

УДК: 681.3(075.8)

Расчет в среде SolidWorks механических воздействий на датчик давления для испытательного оборудования авиационной техники

Никонов К.П.

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

Россия

e-mail: kpnikonov_88@inbox.ru

Аннотация

Представлена методика проектирования датчика давления для испытательного оборудования авиационной техники с помощью интеграции ECAD и MCAD систем. Технология проектирования датчиков давления включает в себя моделирование в среде MATLAB и проведение поверочных расчетов в среде SolidWorks. В результате моделирования получены резонансные частоты f_{0i} и формы колебаний датчика давления, определено максимальное относительное перемещение элементов Z_{\max} , ударное ускорение a_y . Испытания макета датчика давления позволяют утверждать, что выбранная конструкция обеспечивает прочность к воздействию механических ударов и вибраций. Погрешность моделирования не превышает 5 %. Временные затраты на разработку датчика давления сокращаются на 20%.

Ключевые слова: испытания изделий авиационной техники, маршрут проектирования датчика давления; интеграция ECAD и MCAD систем; 3D-моделирование, поверочно-конструкторские расчеты в САПР SolidWorks

Введение

Испытания изделий авиационной, ракетной и космической техники являются одним из ключевых этапов при их проектировании и изготовлении. Для испытательного оборудования необходимы различные датчики, обеспечивающие высокую точность измерений. В ряду измерительных приборов доля датчиков давления занимает 2/3 от общего числа. Внешние воздействующие факторы оказывают ощутимое влияние на точность измерения. Поэтому к модернизируемым или разрабатываемым вновь датчикам давления предъявляются жесткие требования на стойкость к механическим воздействиям.

При проектировании необходимо получить требуемые метрологические характеристики датчика давления, обеспечить его работоспособность в заданных условиях эксплуатации при заданной стоимости. С целью определения способности датчиков давления выполнять свои функции, сохраняя параметры в пределах норм, проводят механические испытания. Наибольшее влияние на приборы оказывают вибрационные нагрузки, одиночные и многократные удары [1]. Поэтому испытания на указанные воздействия проводят в первую очередь. В связи с расширением функционала датчиков давления, усложнением их конструкции и

увеличением плотности монтажа электрорадиоизделий на печатной плате возрастает объем и сложность поверочно-конструкторских расчетов. Вычислить резонансные частоты датчика давления и его элементов становится практически невозможным. Для достижения точных результатов в заданные сроки проектирования предлагается использовать средства компьютерного моделирования. С помощью интеграции ECAD и MCAD систем, используя грубые макромодели электрорадиоизделий и упрощенную модель печатной платы без проводников, монтажных и переходных отверстий необходимо получить 3D-модели печатных плат и датчика давления. Применяя 3D-модель в MCAD системе можно провести частотный анализ и анализ на действие удара. В силу того, что модели упрощенные, результаты анализов требуют проверки; но даже предварительный результат позволяет сравнить полученные параметры с параметрами указанными в техническом задании, при необходимости внести изменения в конструкцию проектируемого датчика давления.

Маршрут проектирования датчика давления включает следующие этапы: разработку математической модели и имитационное моделирование в среде MATLAB; разработку принципиальной электрической схемы и сквозное проектирование печатной платы в ECAD системе; разработку конструкции и проведение поверочных расчетов в MCAD системе.

Проектирование 3D-модели датчика давления

В качестве ECAD системы используется САПР Mentor Graphics, MCAD система – SolidWorks. Процедура проектирования 3D-модели печатной платы начинается с обмена данными между системами. Для этого используются файлы формата IDF и модуль CircuitWorks, входящий в состав SolidWorks. На рисунке 1 иллюстрируется обработка IDF файла одной из печатных плат проектируемого датчика давления. В разработанную 3D-модель печатной платы (на рис. 1 справа) можно внести изменения, например, переместить какой-либо из элементов. Это изменение с помощью обратной связи (back annotation) будет передано из SolidWorks в Mentor Graphics для модификации трассировки печатной платы [2].

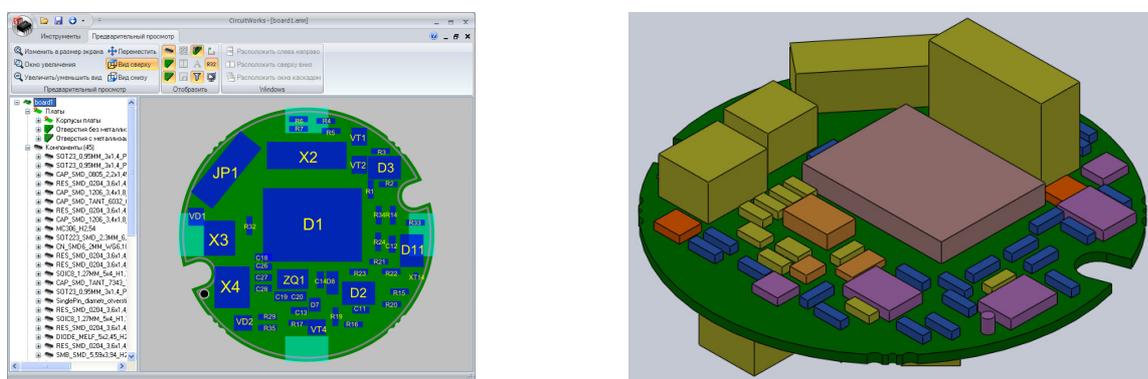


Рисунок 1. Обработка IDF файла печатной платы в CircuitWorks и её 3D-модель

Аналогично разрабатываются 3D-модели остальных печатных плат датчика давления. Затем осуществляется сборка 3D-моделей корпуса датчика давления, модуля первичного преобразователя давления и всех печатных плат. На рисунке 2 представлена 3D-модель собранного датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем.

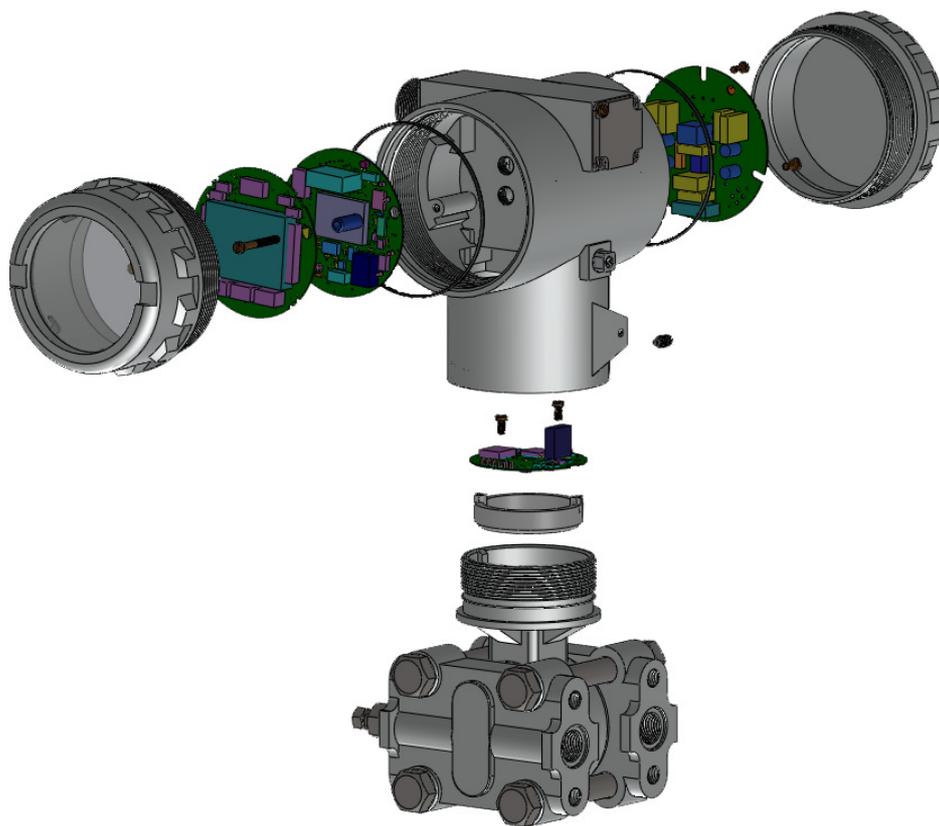


Рисунок 2. 3D-модель датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем

Расчет механических воздействий на датчик давления

Следующим шагом при проектировании является расчет механических воздействий на датчик давления.

Рассмотрим анализ действия вибраций на конструкцию проектируемого датчика. В результате необходимо получить резонансные частоты датчика давления и его элементов.

Частота собственных колебаний печатной платы рассчитывается по формуле [3,4]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{K\alpha}{a^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{M}\right) \cdot a \cdot b},$$

где a и b длина и ширина пластины; D – цилиндрическая жесткость; M – масса пластины с элементами; K_α – коэффициент, зависящий от способа закрепления сторон пластины.

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \nu^2)},$$

где E – модуль упругости; h – толщина пластины; ν – коэффициент Пуассона.

$$K_\alpha = k \sqrt{\left(\alpha + \beta \cdot \frac{a^2}{b^2} + \gamma \cdot \frac{a^4}{b^4} \right)},$$

Здесь k , α , β , γ – коэффициенты, соответствующие способу закрепления сторон печатной платы [3].

Далее проведем частотный анализ и анализ на действие удара в MCAD системе SolidWorks. Он осуществляется с помощью модуля CosmosWorks.

При проведении частотного анализа в SolidWorks использована приведенная далее методика. Рассмотрим её применение на примере датчика давления с дифференциально - емкостным первичным преобразователем. Сначала указывается материал элементов, входящих в 3D-модель [3]. В качестве материала печатной платы рекомендуется стеклотекстолит фольгированный FR4, материала электрорадиоизделий - керамику фарфор, материала втулок, которыми крепится печатная плата – прессматериал АГ-4В, материала винтов сталь Ст 3 ГОСТ 380-88, корпуса - сплав алюминия АЛ2 ГОСТ 1583-93 и материала модуля первичного преобразователя – легированную сталь 08Х17Т ГОСТ 4543-71. Далее указывается способ

закрепления конструкции и внешние воздействующие нагрузки на датчик давления (рисунок 3). Датчик давления закрепляется к несущим конструкциям с помощью четырёх винтов, вкручивающихся в модуль первичного преобразователя. Втулка приклеивается к гидроблоку клеем ВК-9 (считаем, что она зафиксирована), внешняя нагрузка – сила тяжести. После определения всех ограничений создаётся сетка конечных элементов. Варьируя параметры сетки (размер элемента, число элементов в окружности, коэффициент увеличения элемента и количество точек Якобиана), можно существенно уменьшить длительность вычислений. Однако, следует учитывать, что точность результатов моделирования при этом будет снижена. При проектировании следует выбирать компромиссное решение. На рисунке 3 представлены результаты построения такой расчетной сетки. Красной стрелкой обозначена внешняя нагрузка, зеленым цветом выделен способ закрепления.

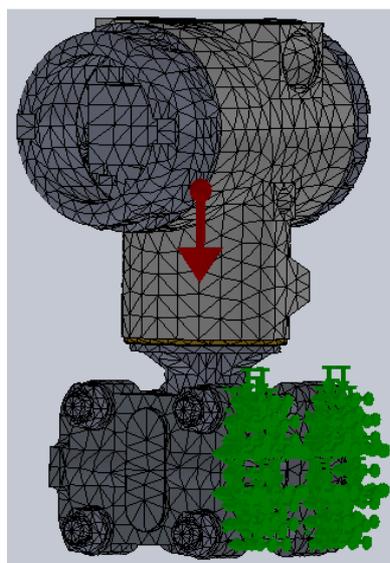


Рисунок 3. Расчетная сетка для и ограничения для датчика давления

В результате проведенных расчетов получены формы колебаний конструкции и её резонансные частоты. На рис. 4 представлены деформации конструкции датчика давления, полученные им в результате моделирования.

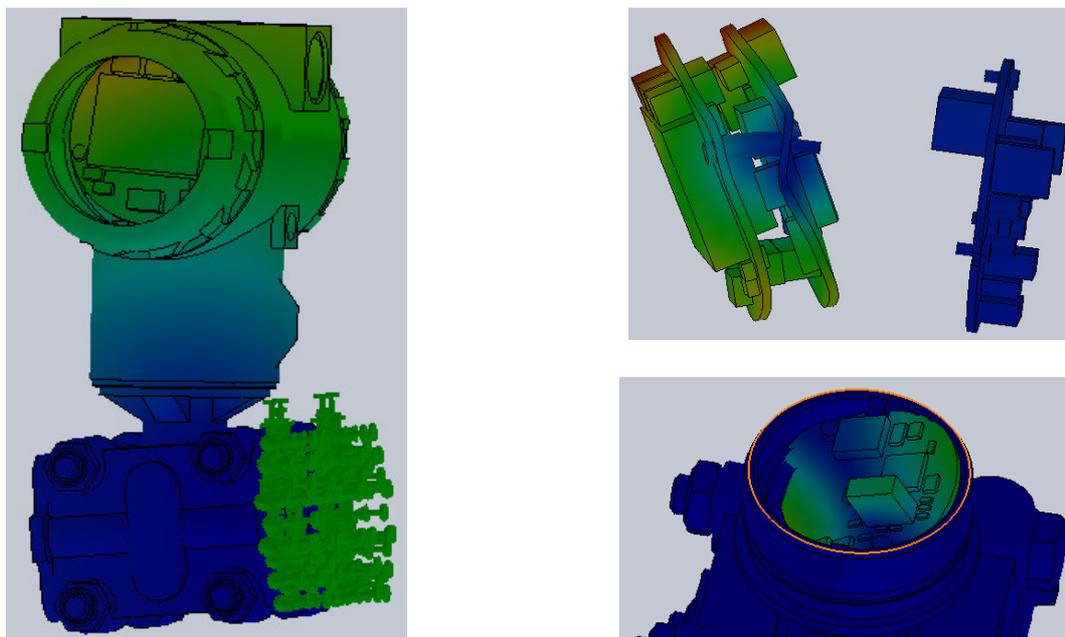


Рисунок 4. Результаты моделирования

Резонансные частоты датчика давления, соответствующие пяти режимам работы датчика давления представлен в таблице 1.

Таблица 1. Список резонансный частот датчика давления.

Режим No.	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)
1	17085,47	2719,21	0,0003677
2	17591,96	2799,82	0.0003571
3	18856,97	3001,15	0.0003332
4	22069,53	3512,44	0.0002847
5	26850,70	4273,38	0.0002340

Эти резонансные частоты лежат за пределами диапазона частот воздействующего на датчик давления при его эксплуатации и транспортировании.

Теперь рассмотрим расчет на действие удара. Первоначально определяется условная частота ударного импульса $\omega = \pi/\tau$, где τ - длительность ударного импульса. Затем рассчитывается коэффициент передачи при ударе для полусинусоидального импульса

$$K_y = \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \cos\left(\frac{\pi}{2\nu}\right),$$

где ν - коэффициент расстройки, $\nu = \frac{\omega}{2\pi f_0}$; f_0 — частота собственных колебаний (берется из расчета на вибрационные воздействия).

Далее вычисляется ударное ускорение $a_y = H_y \cdot K_y$, где H_y – амплитуда ускорения ударного импульса. На заключительном этапе определяется максимальное относительное перемещение

$$Z_{\max} = \frac{a_y}{2\pi f_0}.$$

Теперь проверим выполнение условий ударопрочности. Для этого используем следующие критерии:

- для элементов ударное ускорение должно быть меньше

допустимого: $a_y < a_{y,\text{доп.}}$;

- для печатной платы максимальное относительное перемещение должно быть не более 0,0003 размера стороны печатной платы b , параллельно которой установлены электрорадиоизделия:

$$Z_{max} < 0.0003 \cdot b.$$

Частным случаем ударного воздействия является удар при падении датчика давления. Действующая при этом перегрузка находится следующим образом:

$$V_0 = V_y + V_{om},$$

где V_0 — относительная скорость соударения; $V_y = \sqrt{2gH}$ — скорость датчика давления в момент соударения; H — высота падения датчика давления; $V_{om} = V_y \cdot K_g$ — скорость отскока; K_g — коэффициент восстановления скорости, зависящий от материала соударяющихся тел.

Вычислим действующее на датчик давления ускорение по формуле:

$$a_y = V_0 \cdot 2\pi f_0$$

и проверим выполнение сформулированного условия ударопрочности.

При анализе ударной нагрузки в SolidWorks задаётся высота падения или скорость при ударе. В результате моделирования для проектируемого датчика давления определено максимальное относительное перемещение его элементов $Z_{max} = 5,95 \cdot 10^{-4}$ м и ударное ускорение $a_y = 14,6$ g. Результаты анализа показали, что дополнительных конструкционных мер защиты от ударных воздействий в этом случае не требуется.

Испытания макета датчика давления

С целью подтверждения правильности выбора варианта схемного и конструктивного решения датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, были проведены предварительные испытания макета на механические воздействия. В таблице 2 представлены характеристика испытываемого макета датчика давления до проведения испытаний.

Таблица 2. Приведенная погрешность макета датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем в нормальных климатических условиях до проведения испытаний.

Ризм (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-1,5	400,1	400,4	+0,006	+0,025
-0,75	800,2	800,2	+0,013	+0,013
0	1200,3	1200,3	+0,019	+0,019
+0,75	1600,1	1600,2	+0,006	+0,013
1,5	2000	2000,2	0,000	+0,013

Испытания на вибропрочность и виброустойчивость проведены на испытательной вибрационной электродинамической установке типа 875Т №SP6549, изготовленной фирмой «Ling Dynamic Systems». На рисунке 5 показан датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, закрепленный на указанной выше установке.

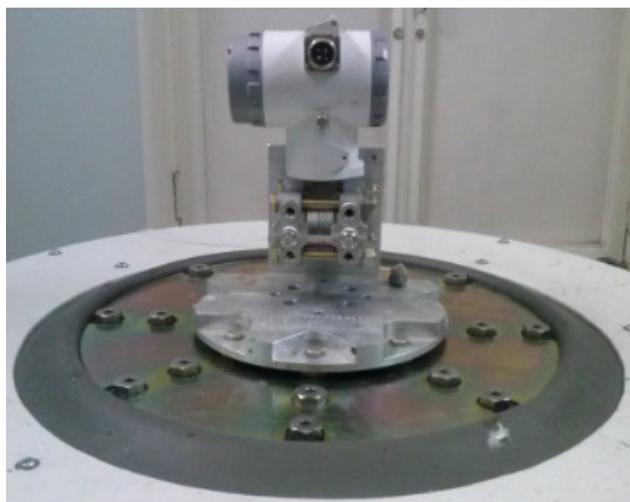


Рисунок 5. Датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, закрепленный на вибрационной установке

Датчик давления подвергся испытаниям на прочность к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,75 мм и в диапазоне частот от 62 Гц до 2000 Гц с амплитудой ускорения 16g. На рисунке 6 представлены воздействовавшие на датчик вибрации.

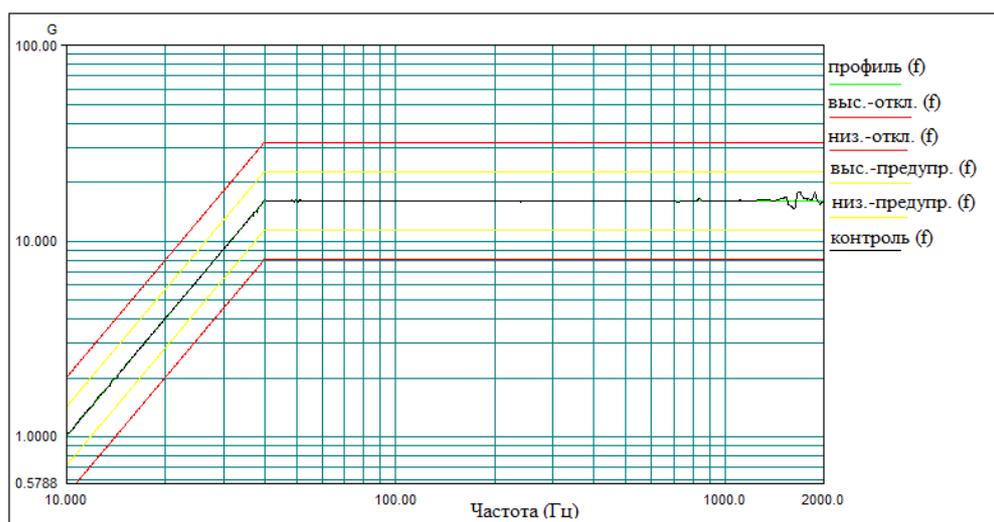


Рисунок 6. График изменения синусоидальной вибрации при испытаниях на вибропрочность

Здесь представлено шесть графиков амплитуд G этих вибраций. Графики (1-5 (снизу вверх) показывают ограничения на допустимые вибрации), график «профиль» - реально действующую нагрузку.

В таблице 3 приведены полученные в результате испытаний значения погрешностей макета датчика давления.

Максимальное значение основной приведенной погрешности датчика после воздействия синусоидальной вибрации составило $\gamma_{\text{макс}} (\%) = - 0,044$.

Таблица 3. Приведенная погрешность макета датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем в нормальных климатических условиях после испытаний на вибропрочность.

$P_{\text{изм}}$ (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-1,5	399,3	399,5	-0,044	-0,031
-0,75	800,4	799,6	+0,025	-0,025
0	1199,6	1199,8	-0,025	-0,013
+0,75	1600,2	1600,3	+0,013	+0,019
1,5	1999,6	1999,7	-0,025	-0,019

Далее макет датчика давления подвергся испытаниям на устойчивость к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,35 мм и в диапазоне частот от 62 до 500 Гц с амплитудой ускорения 8g.

На рисунке 7 представлен график изменения выходного сигнала датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем.

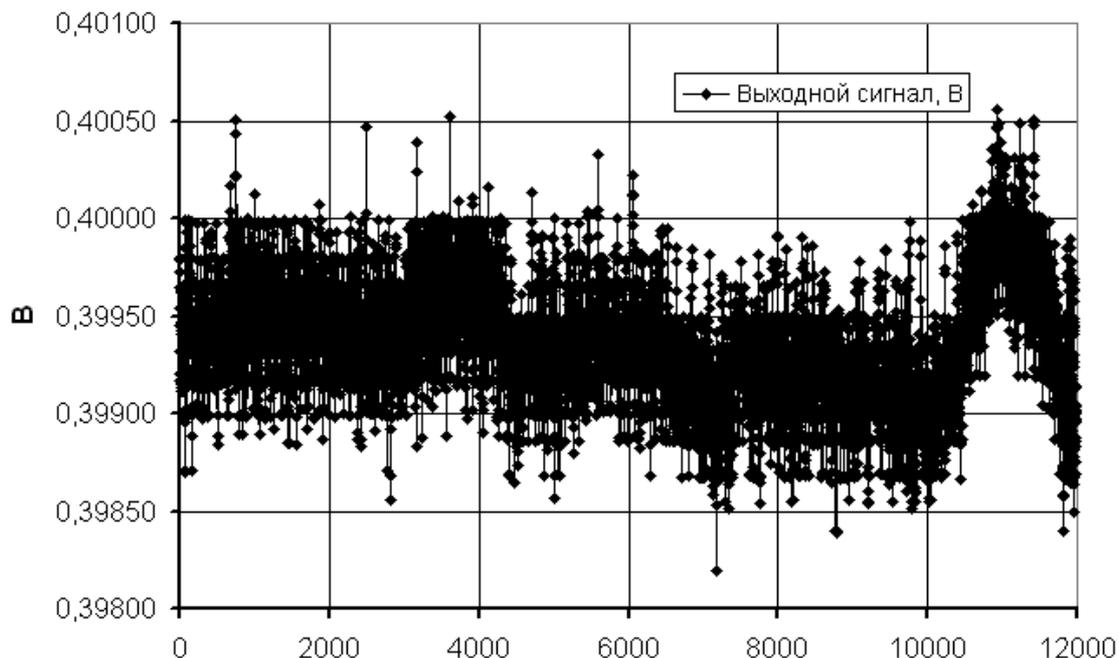


Рисунок 7. График изменения выходного сигнала датчика давления при испытаниях на виброустойчивость для 12000 измерений

Выходной сигнал измерялся на прецизионной катушке P331, номинал сопротивления 100 Ом. Показания с частотой 10 Гц фиксировались на вольтметр универсальный В7-78/1 (производитель АК ИП).

В таблице 4 даны погрешности макета датчика давления после испытаний на вибропрочность.

Таблица 4. Приведенная погрешность макета датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем в нормальных климатических условиях после испытаний на виброустойчивость.

Р _{изм} (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-1,5	399,7	400,7	-0,019	+0,044
-0,75	799,4	799,5	-0,038	-0,031
Р _{изм} (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
0	1200,1	1200,3	+0,006	+0,019
+0,75	1600,0	1601,1	0,000	+0,069
1,5	2000,9	2000,7	+0,056	+0,044

Максимальное значение дополнительной приведенной погрешности датчика при воздействии синусоидальной вибрации $\gamma_{в.макс}(\%) = 0,093\%$ и максимальные значения основной приведенной погрешности преобразования после воздействия синусоидальной вибрации $\gamma_{макс}(\%) = 0,069$.

Испытания на прочность к воздействию механического удара проводились на электромеханическом испытательном ударном стенде ST800 (страна изготовитель ГДР). На рисунке 8 представлен датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, закрепленный на указанном выше стенде.



Рисунок 8. Датчик давления с дифференциально-емкостным
первичным преобразователем, закрепленный на ударном стенде

Датчик давления подвергся испытаниям на прочность к воздействию механического удара многократного действия с пиковым ускорением 60g и длительностью ударного импульса от 2 до 5 мс в двух направлениях. Общее число ударов составило 150. На рисунке 9 представлена форма ударного импульса.

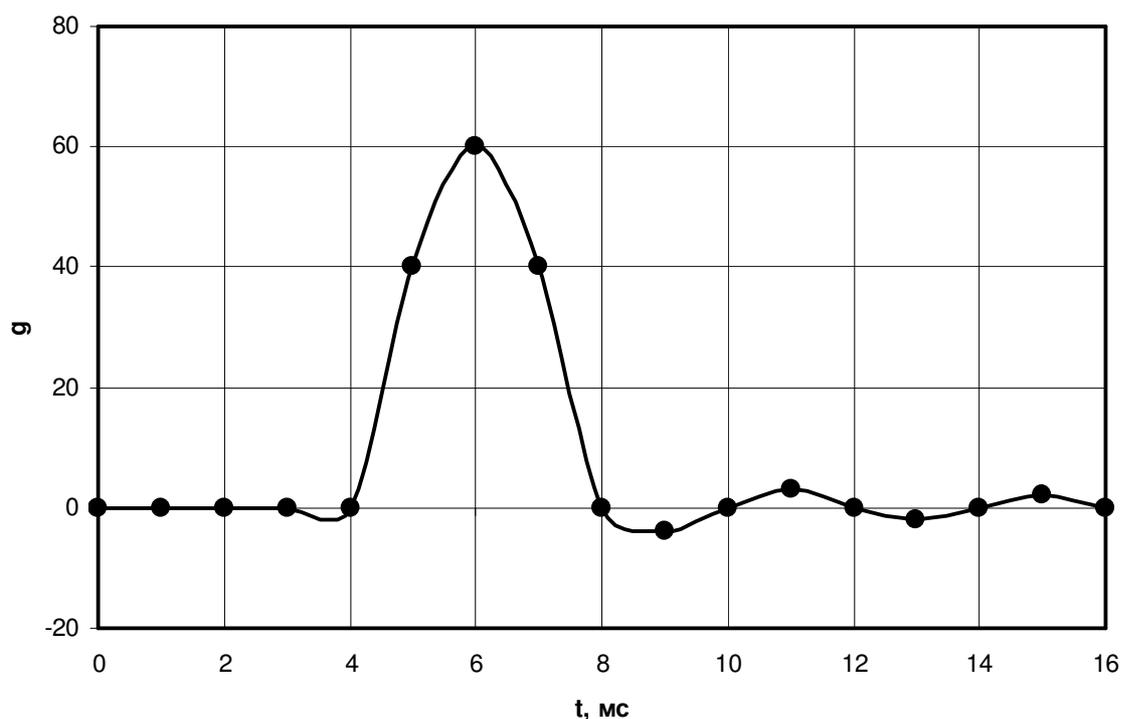


Рисунок 9. Форма ударного импульса многократного действия

Погрешности макета датчика давления после этого воздействия представлены в таблице 5. Максимальное значение основной приведенной погрешности макета датчика давления после воздействия механического удара многократного действия $\gamma_{\text{макс}} (\%) = 0,085$.

Таблица 5. Приведенная погрешность макета датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем в нормальных климатических условиях после испытаний на воздействия механического удара многократного действия.

Ризм (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-1,5	401,2	398,5	0,077	-0,092
-0,75	801,4	800,7	0,085	0,046
0	1198,8	1200,6	-0,077	0,036

+0,75	1600,0	1601,3	0,000	0,081
1,5	2000,7	2001,0	0,044	0,063

Далее датчик давления подвергся испытаниям на прочность к воздействию механического удара однократного действия с пиковым ускорением 160g и длительностью ударного импульса от 0,5 до 30 мс в двух направлениях. Общее число ударов 10. Погрешности макета датчика давления после этого воздействия представлены в таблице 6. Максимальное значение основной приведенной погрешности макета датчика давления после воздействия механического удара однократного действия $\gamma_{\text{макс}} (\%) = 0,092$.

Таблица 6. Приведенная погрешность макета датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем в нормальных климатических условиях после испытаний на воздействия механического удара однократного действия.

Ризм (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-1,5	400,1	400,9	0,004	0,059
-0,75	801,3	801,5	0,082	0,092
0	1199,3	1200,2	-0,042	0,014
+0,75	1598,9	1600,3	-0,066	0,021
1,5	2000,3	2001,1	0,021	0,069

Таким образом, проведенные испытания макета датчика давления в различных условиях позволяют сделать вывод о точности его работы в различных условиях и проанализировать наиболее сложные режимы его работы.

Выводы

Проведенные предварительные испытания макета датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем на механические воздействия позволяют сделать следующие выводы:

- датчик давления является стойким к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,35 мм и в диапазоне частот от 62 до 500 Гц с амплитудой ускорения 8g;

- датчик давления является прочным к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,75 мм и в диапазоне частот от 62 Гц до 2000 Гц с амплитудой ускорения 16g;

- датчик давления является прочным к воздействию механического удара многократного действия с пиковым ускорением 60g и длительность ударного импульса от 2 до 5 мс в двух направлениях;

- датчик давления является прочным к воздействию механического удара однократного действия с пиковым ускорением 160g и длительность ударного импульса от 0,5 до 30 мс в двух направлениях.

Проведенные предварительные испытания подтверждают применимость поверочно-конструкторских расчетов, выполненных в MCAD системе SolidWorks для анализа влияний механических воздействий на датчики давления, в частности, датчики с дифференциально-емкостными первичными преобразователями. Результаты моделирования показали, что упрощенные 3D-модели элементов датчика давления, позволяют получить результат с высокой степенью соответствия теоретического и реального

поведения конструкции. Проанализированный вариант схемного и конструктивного решения датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем для исследованных условий был выбран правильно. Предварительный анализ предложенного маршрута проектирования позволяет утверждать, что временные затраты на разработку электронных схем сокращаются на 20%, а типовых элементов замены в виде печатных плат - на 25%, и конструкции датчика давления - на 20%.

Библиографический список

1. К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др.; Под общ. ред. В.А. Шахнова. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.: ил. – (Информатика в техническом университете).
2. Mentor Graphic. Expedition™ PCB User's Guide, 2005. 480с.
3. Парфенов Е.М. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ Е.М. Парфенов, Э.Н.Камышная, В.П. Усачев. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.: ил.
4. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005.- 560с.
5. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.:ДМК Пресс, 2010. 464с., ил. (Серия «Проектирование»).
6. SIPMOS® Small-Signal-Transistor BSP129. Infineon technologies, 2005. 9с.