

Разработка модификации вибропреобразователя AP1022-01 для измерения виброускорений на двигателях РД191 производства АО «НПО «Энергомаш»



В статье представлена работа инженеров ООО «ГлобалТест» над вибропреобразователями AP1022-01, предназначенными для ракетных двигателей. В основу настоящей разработки положены результаты исследований по созданию пьезоакселерометров типа AP.

ООО «ГлобалТест», г. Саров

В этой статье будет описано выполнение ОКР для разработки вибропреобразователей AP1022-01 с температурным режимом работы от -184 до $+150$ °С.

В соответствии с требованиями, датчик должен обеспечивать генераторный режим работы с использованием пьезоэлектрического чувствительного элемента. В настоящее время пьезоэлектрические акселерометры являются оптимальными датчиками для измерений механических ударов и колебаний. Это обусловлено их свойствами, такими как:

- ▶ широкий рабочий частотный диапазон;
- ▶ линейная характеристика в широком динамическом диапазоне;
- ▶ выходной электрический сигнал, пропорциональный ускорению механических колебаний, можно преобразовать электронным путем в сигнал, пропорциональный виброскорости или виброперемещению;
- ▶ высокая стойкость в отношении воздействия окружающей среды и сохранения высокой точности в неблагоприятных эксплуатационных условиях;
- ▶ активный преобразователь, не нуждающийся в применении источника питания;
- ▶ конструкция без движущихся деталей, гарантирующая исключительную долговечность;
- ▶ малогабаритная, компактная конструкция, обладающая большим значением отношения чувствительности к собственной массе.

В основу настоящей разработки положены результаты исследований по созданию пьезоакселерометров типа AP, широко применяемых при динамических испытаниях изделий [1].

Одним из основных требований является значительное снижение чувствительности датчика к воздействию предельных пониженных температур и, как следствие, паразитных скачков на диаграмме измерений (рис. 1). Однозначного объяснения природы возникновения этого процесса на данный момент не найдено. Предполагается, что этот эффект возникает в результате действия целого комплекса причин. Одной из них являются фазовые искажения, вносимые акселерометром, в случае когда время задержки

между воздействующим на него механическим колебанием и снимаемым с его выхода электрическим сигналом не имеет фиксированного значения на всех частотах, а произвольно изменяется с изменением частоты [2]. Вследствие нелинейности характеристики предусилителя низкочастотные составляющие исследуемого процесса претерпевают опережение фазы относительно его основной составляющей, в результате чего электрический сигнал искажается и дает ошибочное представление о форме импульса.

Как показывает практика проведения испытаний, при высокоинтенсивных вибрационных и ударных нагрузках происходит практически мгновенное достижение максимального

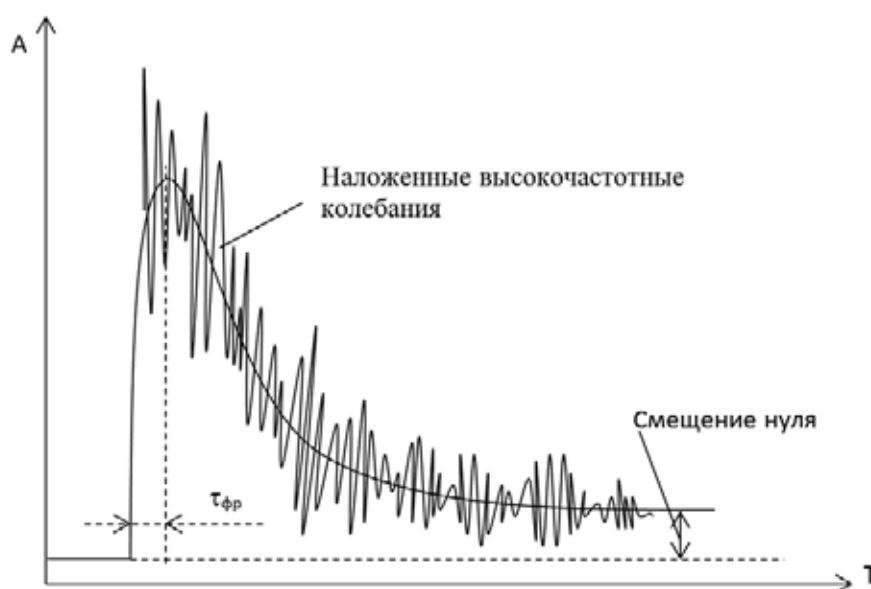


Рис. 1. Форма сигнала высокоинтенсивного ударного импульса

значения амплитуды ударного ускорения с практически вертикальным нарастанием переднего фронта $\tau_{фр}$ порядка десятка микросекунд, с наличием интенсивных высокочастотных наложенных колебаний на основную форму импульса (рис. 1). Основываясь на анализе многочисленных исследований и экспериментальных данных [1], можно сделать вывод, что еще одной, наиболее значимой причиной возникновения эффекта смещения нуля является перенапряжение пьезоматериала чувствительного элемента в результате воздействия суперпозиции возмущающих факторов в виде измеряемого импульсного ускорения высокого уровня и наложенных на него затухающих высокочастотных колебаний. Отметим, что пиковое значение ускорения таких импульсов с наложенными колебаниями может достигать десятков тысяч г с длительностью порядка десятков микросекунд и превышать верхний предел рабочего динамического диапазона акселерометра, что, как правило, не обнаруживается при использовании фильтров в усилительном тракте. Предположив, что пьезоэлементы акселерометра имеют несовершенную упругость, делаем вывод, что при быстром уменьшении действующей на них силы не все молекулярные домены материала вернуться в исходное состояние, в котором они находились до приложения упомянутой силы. Следовательно, даже после уменьшения силы до нуля пьезоэлементы акселерометра отдают электрический заряд, умень-

шающийся медленно с постоянной времени, соответствующей нижнему пределу частоты используемого вместе с акселерометром преусилителя. Соответствующее явление является случайным процессом и может иметь положительный или отрицательный знак. Время, на протяжении которого происходит установление начального уровня, может более чем в 1000 раз превышать длительность исследуемого импульса [3].

С учетом сказанного в целях защиты чувствительного элемента от высокочастотной составляющей ударного импульса большой амплитуды, в разрабатываемом датчике введено механическое демпфирование чувствительного элемента. Использование демпфера между чувствительным элементом и корпусом акселерометра способствует:

- ▶ фильтрации наложенных высокочастотных колебаний;
- ▶ снижению деформационной чувствительности;
- ▶ повышению рабочего диапазона частот.

Выбор варианта закрепления и материала пьезоэлемента

Значительно меньше подвержены явлению смещения нуля акселерометры с кристаллическими пьезоэлементами, а также акселерометры, выполненные по сдвиговой конструктивной схеме [4]. Это объясняется повышенной стабильностью пьезосвойств природных кристаллических структур, таких как кварц, ниобат лития и другие,

по отношению к пьезокерамическим материалам из сегнетокерамических порошков. Однако пьезоэлементы из кристаллических пьезоматериалов значительно уступают синтезированным материалам по такому параметру, как энергетический КПД ($\eta_э$). Для сравнения вычислим $\eta_э$ для кварца и пьезокерамики ЦТС-19:

$$\eta_э = \frac{d^2 \cdot E_1}{\epsilon_{дн}} \cdot 100,$$

где $\eta_э$ – энергетический КПД, %;

d – пьезомодуль;

E_1 – модуль продольной упругости материала пьезоэлемента;

$\epsilon_{дн}$ – диэлектрическая проницаемость материала пьезоэлемента.

Для кварца:

$$d_{11} = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н};$$

$$E_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ Н/м};$$

$$\epsilon_{дн} = 4,05 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м};$$

Для ЦТС-19:

$$d_{33} = 360 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н};$$

$$E_1 = 57 \cdot 10^9 \text{ Н/м};$$

$$\epsilon_{дн} = 1580 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м}.$$

$\eta_э = 1\%$ – для кварца;

$\eta_э = 46\%$ – для пьезокерамики ЦТС-19.

Видно, что пьезокерамика превращает в электрическую почти 50% подводимой к ней механической энергии, в то время как кварц – 1%. На основании вышеизложенного в качестве материала чувствительного элемента выбрана пьезокерамика ЦТС-19 и сдвиговая схема работы.

Согласно требованиям, разрабатываемый датчик должен состоять из трех независимых измерительных каналов, каждый из которых содержит пьезокерамический чувствительный элемент сдвигового типа. Конструкция датчика представлена на рис. 2.

Чувствительный элемент, состоящий из пьезоэлемента и инерционного элемента, закреплен в корпусе датчика. Необходимое усилие поджатия обеспечивается технологически при запрес-

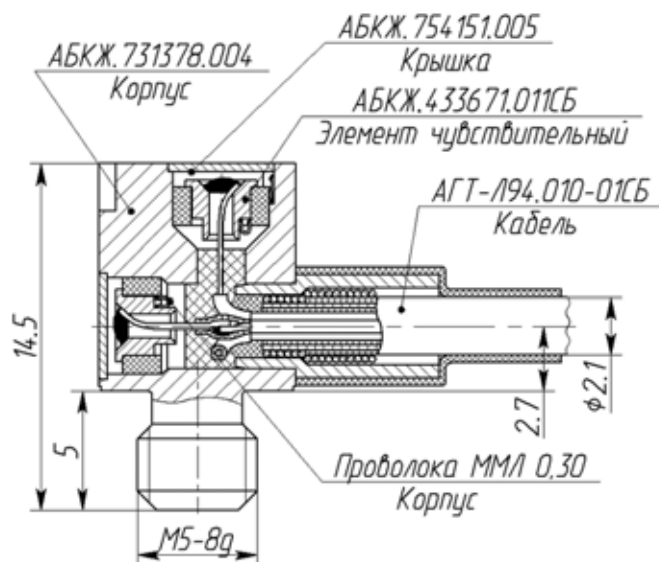


Рис. 2. Конструкция датчика

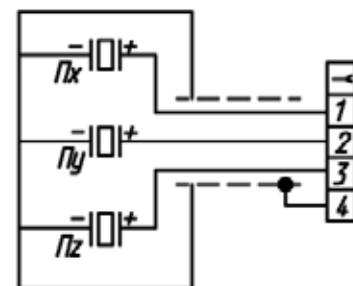


Рис. 3. Схема электрическая соединений датчика

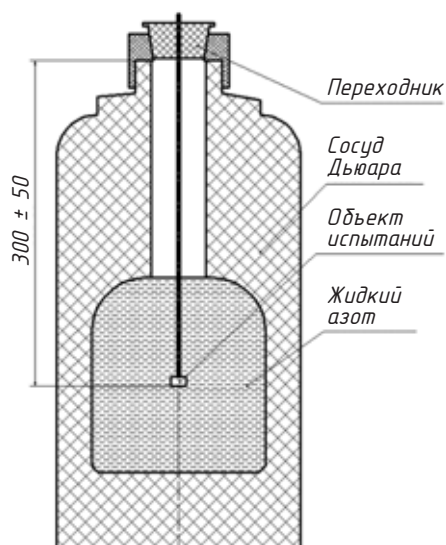


Рис. 4. Схема установки объектов испытаний в сосуд Дьюара

совке пьезокерамики в корпус датчика и путем подбора упругих свойств эластичного клеевого шва. Снятие сигнала происходит с помощью трехжильного antivибрационного кабеля марки АВКТМ-3 длиной, согласно спецификации, из ряда 0,15/0,25/0,3 м, который заканчивается стандартным соединителем РС4 ТВ. Корпус имеет кубическую форму с резьбовым хвостовиком М5-8г и длиной 5 мм в основании. Для установки датчика на объекте испытаний на корпусе предусмотрена проточка с размером под ключ 7 мм. Объем датчика составляет 0,8 см³, масса без учета кабеля и соединителя – 5 г.

Схема электрическая соединений датчика представлена на рис. 3.

По итогам расчетов, приведенных выше, были изготовлены опытные образцы вибропреобразователей АР1022-01. На них проводились предварительные испытания на базе предприятия ООО «ГлобалТест» и межведомственные испытания на базе АО «НПО «Энергомаш».

Проведение предварительных испытаний на пониженную температуру

Установить датчики в сосуд Дьюара согласно рис. 4. Проводить измерения электрического сопротивления изоляции и электрической емкости каждый час в течение 4 часов.

Внешний вид установки (сосуд Дьюара) и оборудования для испыта-

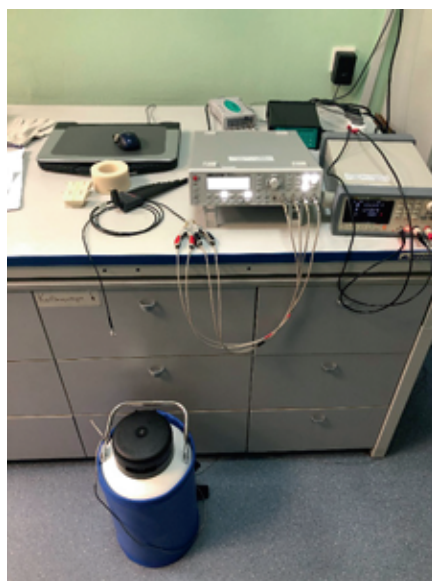


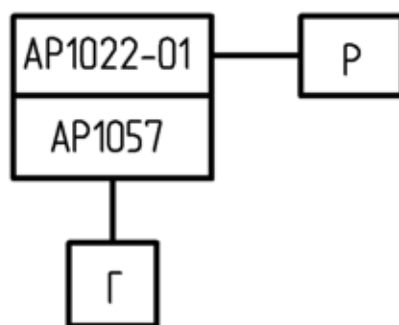
Рис. 5. Внешний вид установки для испытания датчика на предельную пониженную температуру

ния на предельную пониженную температуру представлены на рис. 5. Проверку коэффициента преобразования в сосуде Дьюара проводят по схеме, представленной на рис. 6.

Подключаем вибропреобразователь АР1057 к генератору, а вибропреобразователь АР1022-01 – к регистратору. Подаем ускорение 5 г на АР1057 на частоте 150 Гц. Проверяем коэффициент преобразования оси Z вибропреобразователя АР1022-01.

Установить вибропреобразователи в сосуд Дьюара. Проводить измерения коэффициента преобразования каждый час в течение 4 часов.

По результатам предварительных и межведомственных испытаний опытные образцы вибропреобразователей АР1022-01 подтвердили соответ-



Р – регистратор
Г – генератор

Рис. 6. Блок-схема проверки датчика АР1022-01



ствие характеристик вибропреобразователя требованиям заказчика.

Заключение

► Вибропреобразователь внесен в Государственный реестр СИ, регистрационный номер 88635-23.

► Проведены работы по каталогизации и внесению в каталог ПС военного назначения.

► По результатам выполнения ОКР РКД датчика присвоена литера «О1».

► Вибропреобразователь АР1022-01 готов к поставке на двигатель РД 191.

Литература

1. Малинский В.Д., Бегларян В.Х., Дубицкий Л.Г. Испытания аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов: Справочник. М., 1993.
2. Пьезоэлектрические акселерометры и преусилители. Справочник по теории и эксплуатации. Дания, 1987.
3. Пьезоакселерометры АП. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. АОТ07. ВНИИЭФ, 1988.
4. Новицкий П.В., Шмаков Э.М. Критерий оценки качества пьезоэлектрических датчиков акселерометров // Труды ЛПИ. Л., 1972.

А.А. Редюшев, директор,
Р.Р. Кутуев, главный конструктор,
ООО «ГлобалТест», г. Саров,
Нижегородская обл.,
тел.: +7 (831-30) 6-7777,
e-mail: mail@globaltest.ru,
сайт: www.globaltest.ru