

Методика и аппаратура электрических испытаний акселерометров типа Q-Flex

Дмитрий МАЛЫХИН,
info@labdin.ru
Денис МАЙОРОВ, к.т.н.,
Юрий ПОНОМАРЕВ, к.т.н.,
info@pavantech.ru
Александр МАЛЫХИН,
Сергей КОНОВАЛОВ, д.т.н.

В статье рассматриваются конструктивные особенности акселерометра навигационного класса точности типа Q-Flex, а также методика ускоренных испытаний для оценки параметров и работоспособности приборов.

Введение

В настоящее время значительно повысился спрос на высокоточные автономные навигационные системы, в составе которых в качестве инерциальных датчиков для определения линейных ускорений используются акселерометры навигационного класса точности. Наиболее распространенными датчиками такого класса являются акселерометры типа Q-Flex [1–2]. Их разработка началась достаточно давно, и в настоящее время существует большое количество приборов, выполненных по этим конструктивным схемам. Особенностью такого акселерометра является чувствительный элемент, представляющий собой выполненный из кварцевого стекла маятник с упругими балками и подвижной лопастью с установленными на ней катушками, а также магнитную систему из двух магнитопроводов с постоянными магнитами. Процесс производства и проведения приемосдаточных испытаний, а также входного контроля таких датчиков сопровождается рядом трудностей:

- процесс определения параметров и контроль качества акселерометров занимает достаточно много времени;
- требуется наличие дорогостоящих прецизионных установок (6–8 разрядные вольтметры, наклонно-поворотные стенды, центрифуги, вибростенды);
- поскольку проводятся испытания полностью собранных приборов, при несоответствии фактических характеристик заявленным или при наличии дефектов конструкции акселерометр отправляется на переборку, что является длительным процессом.

Таким образом, актуальной задачей на сегодняшний день является разработка, модернизация и реализация методов оперативного контроля параметров акселерометров; методов, необходимых для оценки качества собираемых приборов и проведения входного контроля без использования дорогостоящих механических стендов.

Конструкция акселерометра

Типичная конструкция чувствительного элемента с магнитной системой кварцевого маятникового компенсационного акселерометра показана на рис. 1. Маятниковый узел состоит из рамки 1 с установочными платиками 5, расположенными симметрично снизу и сверху, и подвижной лопасти 2 с закрепленными на ней по обе стороны катушками 4 плунжерного датчика силы (датчика момента).

Подвижная лопасть 2 крепится к рамке 1 с помощью упругих перемычек 3. Рамка 1 зажимается между двумя магнитопроводами 6–7 таким образом, что платики 5 формируют зазоры емкостного датчика угла (неподвижными электродами которого являются плоскости магнитопроводов 6–7, обращенные к маятнику, а подвижными – напыленные с двух сторон на лопасть 2 золотые электроды). Соединение подвижных электродов емкостного датчика угла и последовательно соединенных катушек 4 плунжерного датчика силы с электрическими цепями усилителя происходит через токоподводы, напыленные симметрично с двух сторон на упругие перемычки 3 и контактные площадки 10, напыленные на рамке 1. Магнитная система плунжерного датчика силы состоит из нижнего и верхнего магнитопроводов 6–7 и постоянных магнитов 8 с полюсными наконечниками 9.

Принцип работы

Принцип работы кварцевого маятникового акселерометра компенсационного типа заключается в уравнивании суммы инерционной силы и силы тяжести, действующих вдоль измерительной оси, компенсационной силой плунжерного датчика силы. При этом си-

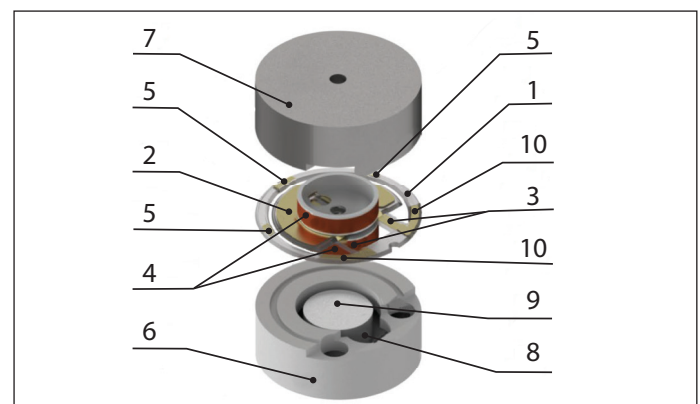


Рис. 1. Чувствительный элемент акселерометра с магнитной системой: 1 – рамка; 2 – подвижная лопасть с напыленными электродами; 3 – упругие перемычки с напыленными на них токоподводами; 4 – катушки плунжерного датчика силы; 5 – установочные платики; 6, 7 – нижний и верхний магнитопроводы; 8 – постоянный магнит; 9 – полюсный наконечник; 10 – контактные площадки

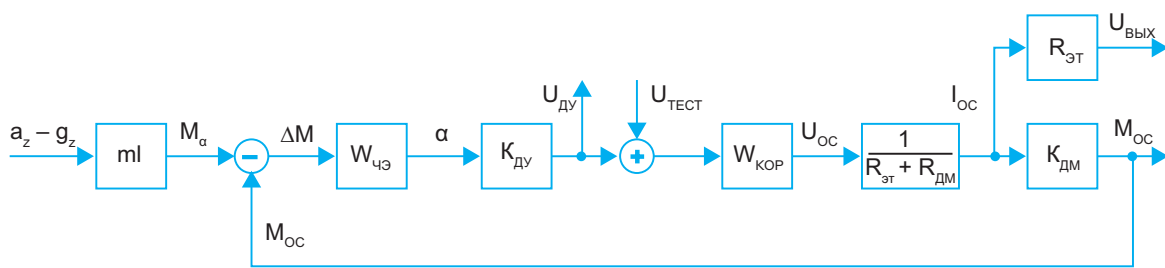


Рис. 2. Структурная схема акселерометра

стема регулирования при внешних воздействиях удерживает маятник в нулевом положении относительно обкладок емкостного датчика угла, а ток в катушках плунжерного датчика силы пропорционален измеряемому ускорению.

Основные параметры акселерометра

К основным параметрам акселерометра, которые определяются с помощью механических стендов, относятся:

- масштабный коэффициент акселерометра;
- нулевой сигнал;
- отклонение оси чувствительности от базовой плоскости крепления акселерометра.

Для определения масштабного коэффициента и нулевого сигнала акселерометр разворачивают относительно вектора ускорения свободного падения с помощью наклонно-поворотного стенда. Кроме того, для определения диапазона измерения и нелинейности масштабного коэффициента проводят натурные испытания на центрифуге. С помощью вибростенда также определяют виброошибки и амплитудно-частотные характеристики прибора.

Метод электроиспытаний характеристик акселерометра

Суть этого метода состоит в подаче тестовых сигналов внутрь контура обратной связи (ОС) и снятия ответных сигналов из других точек контура ОС. Данный метод натурных испытаний был разработан и апробирован в 1980–90-х гг. специалистами кафедры ИУ-2 («Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации») МГТУ им. Н.Э. Баумана, в том числе при совместных работах с НПЦ АП имени академика Н.А. Пилюгина [3–4]. На рис. 2–3 представлены структурная и функциональная схемы акселерометра со-

ответственно, на которых показаны точки подачи тестового сигнала и точки съема ответных сигналов. В акселерометрах, имеющих компенсационный контур, для определения и контроля параметров с помощью данного метода должны быть предусмотрены выходы для подачи тестового сигнала и выход демодулятора. Основные методы определения параметров, к которым относятся «кривые остаточного тока», косвенный метод определения амплитудно-частотной характеристики, определение газодинамических параметров акселерометров, отличаются видом тестового сигнала и точкой снятия выходного сигнала.

На представленной структурной схеме (рис. 2) показаны следующие элементы: $(a_z - g_z)$ – измеряемое ускорение; m – масса подвижной лопасти; l – длина от центра перемычек до центра масс подвижной лопасти; W_{α} – передаточная функция чувствительного элемента акселерометра; $K_{ДУ}$ – коэффициент передачи датчика угла; $W_{КОР}$ – передаточная функция корректирующего звена; $R_{ЭТ}$ – эталонное сопротивление; $R_{ДМ}$ – сопротивление катушки датчика момента; $K_{ДМ}$ – коэффициент передачи датчика момента; M_{α} – момент инерции; M_{OC} – момент обратной связи; ΔM – разность моментов M_{α} и M_{OC} ; α – угол отклонения подвижной лопасти; $U_{ДУ}$ – напряжение выходного сигнала демодулятора; $U_{ТЕСТ}$ – напряжение тестового сигнала; U_{OC} – напряжение обратной связи; I_{OC} – ток обратной связи; $U_{ВЫХ}$ – напряжение на эталонном сопротивлении.

Ниже представлена функциональная схема компенсационного маятникового акселерометра (рис. 3), на которой показаны следующие элементы: DA1 – дифференциальный усилитель; DA2 – операционный усилитель; ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель; ФНЧ – фильтр низких частот; Z_1, Z_2 – комплексные электрические сопротивления; C_1 – конденсатор; C_0 – емкость, образованная обкладками датчика угла акселерометра в нулевом положении; ΔC – изменение емкости датчика угла при отклонении лопасти при внешнем воздействии.

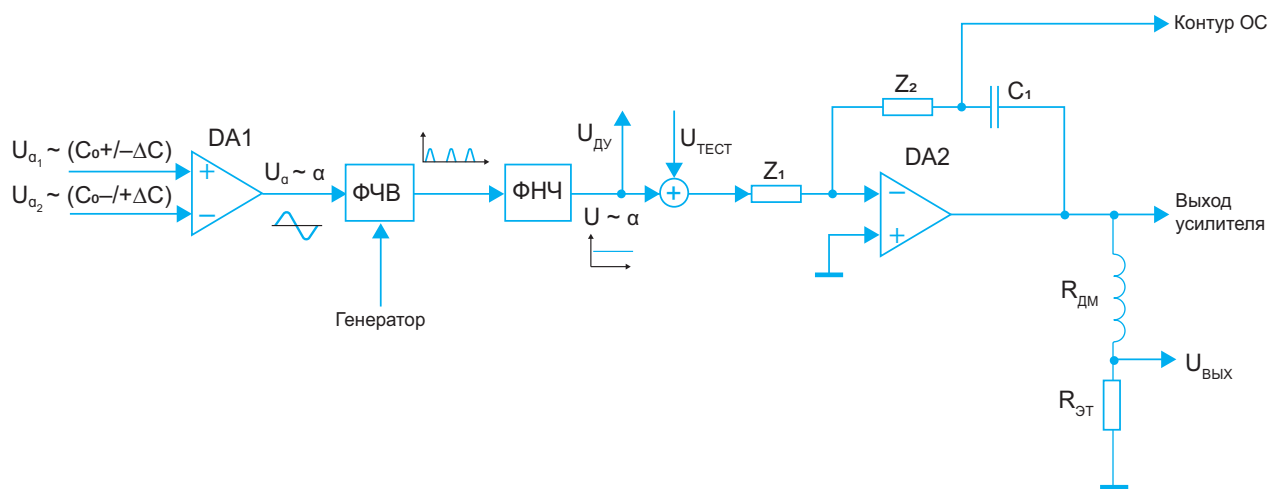


Рис. 3. Функциональная схема акселерометра

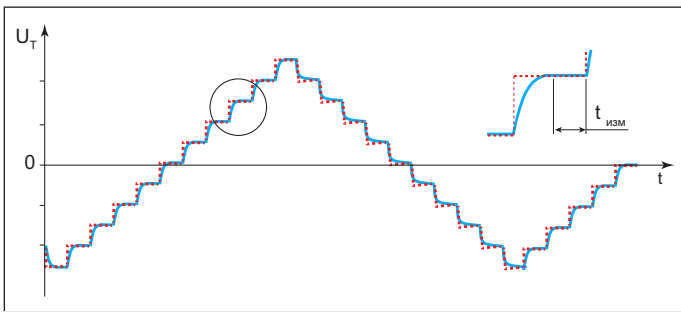


Рис. 4. Тестовый сигнал при снятии кривых остаточного тока: синяя линия — реальный сигнал, подаваемый на тестовый вход; красная линия — импульсный тестовый сигнал без переходного процесса; $t_{изм}$ — время измерения выходного сигнала (в это время лопасть маятника неподвижна)

Метод кривых остаточного тока

Данный метод заключается в прокачке подвижной лопасти маятникового узла во всем диапазоне движения, то есть в зазоре, образованном обкладками емкостного датчика угла. При измерении кривых остаточного тока фиксируется ток датчика момента (съем сигнала происходит на эталонном резисторе) при подаче на тестовый вход акселерометра медленно изменяющегося сигнала, вид которого показан на рис. 4, в результате чего маятник совершает движение в рабочем зазоре с остановками для измерений. Характеристику снимают, прокачивая подвижную лопасть в одну и другую стороны.

Результирующий график при этом определяется следующими факторами:

- зависимостью момента датчика момента от угла отклонения маятника;
- линейностью датчика угла;
- линейностью усилителей цепи измерения напряжения;
- разрядностью цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователей;
- температурным дрейфом акселерометра и измерительной электроники.

На рис. 5 показаны примеры результирующих графиков, снятых методом кривых остаточного тока. По графикам можно определить качество сборки и наличие некоторых дефектов конструкции чувствительного элемента акселерометра.

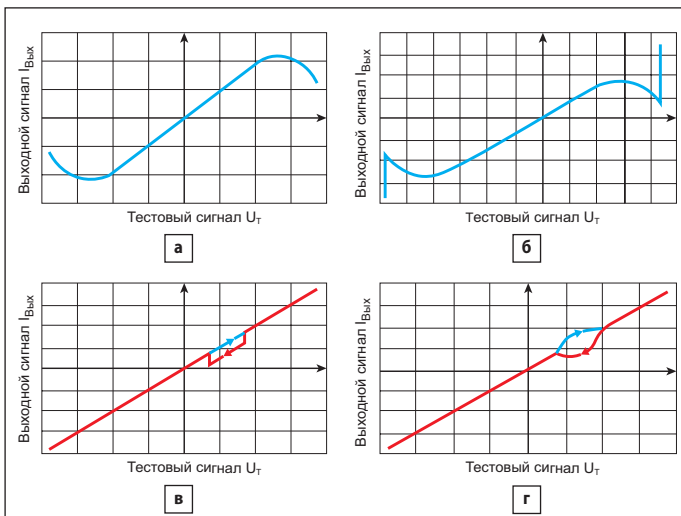


Рис. 5. Кривые остаточного тока с различными дефектами конструкции: а) влияние электростатических сил емкостного датчика угла; б) несимметричное положение маятника в зазоре; в) трещина в упругом подвесе; г) диссипативное рассеивание энергии при движении маятника вследствие трения в воздушном зазоре емкостного датчика угла

На рис. 5а представлена кривая остаточного тока качественного прибора с симметрично расположенным маятником и отсутствием серьезных дефектов конструкции (загибы слева и справа показывают влияние электростатических сил при приближении подвижной лопасти к неподвижному электроду).

На рис. 5б показана характеристика, полученная в результате подачи тестового сигнала, заданного таким образом, чтобы подвижная лопасть маятника коснулась неподвижных электродов емкостного датчика угла. При этом в момент касания магнитопровода усилитель акселерометра насыщается и выдает большое выходное напряжение. В данном случае проверяется положение маятника относительно неподвижных электродов датчика угла, а также фиксируется нецентрально положение лопасти. Это может привести к погрешностям акселерометра, в том числе виброошибкам, но при этом прибор является полностью работоспособным.

На рис. 5в показана характеристика прибора, в упругом подвесе которого имеется трещина. Такой прибор является непригодным для эксплуатации.

На рис. 5г представлена характеристика акселерометра, в воздушном зазоре которого может присутствовать пыль или грязь, вызывающая диссипативное рассеивание энергии при движении маятника вследствие трения в воздушном зазоре емкостного датчика угла. Такой прибор также непригоден для эксплуатации.

Метод определения амплитудно-частотной характеристики

На тестовый вход компенсационного контура акселерометра подается гармонический сигнал с постоянной амплитудой и плавно изменяющейся частотой (рис. 6), при этом измеряется амплитуда колебаний в выходном сигнале, снимаемом с демодулятора (естественно, при этом переменная составляющая сигнала, связанная с выпрямлением высокочастотного сигнала датчика угла, должна быть отфильтрована). По изменению амплитуды выходного сигнала можно построить АЧХ прибора (рис. 7).

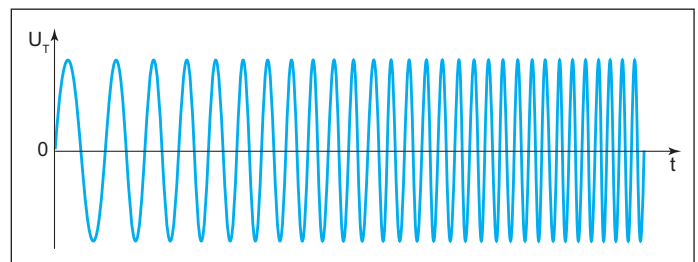


Рис. 6. Тестовый сигнал при снятии АЧХ акселерометра

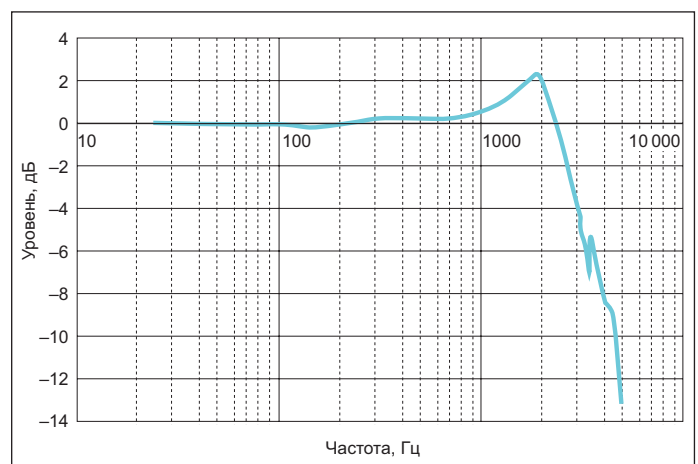


Рис. 7. АЧХ акселерометра

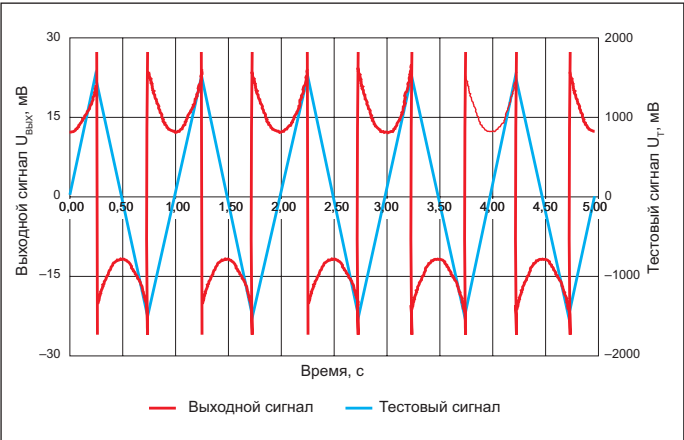


Рис. 8. Определение демпфирования акселерометра: красная линия – выходной сигнал, снимаемый с эталонного резистора; синяя линия – тестовый сигнал

Метод определения газодинамических параметров

Для определения коэффициента демпфирования прибора на тестовый вход акселерометра подается сигнал, изменяющийся с постоянной скоростью, а съём сигнала происходит с эталонного резистора; при этом цепь обратной связи замкнута. Суть метода заключается в том, что если маятник движется с постоянной угловой скоростью, то со стороны газовой среды на маятник действует момент, который при замкнутой обратной связи компенсируется моментом датчика момента. Соответственно, измеряя этот момент, можно определить момент демпфирования. Для расчета необходимо знать скорость движения маятника в зазоре, а также масштабный коэффициент датчика момента. Скорость можно оценить, исходя из определения максимальной амплитуды тестового сигнала, при котором происходит касание подвижной лопастью неподвижного электрода, ранее описанным методом кривых остаточного тока. Тестовый и выходной сигналы показаны на рис. 8. Значение коэффициента демпфирования определяется в точке прохождения лопастью маятника центральной позиции, когда упругие перемычки не деформированы; соответственно, на лопасть не действуют упругие моменты.

Таблица. Характеристики измерительного блока	
Основные характеристики	
Количество измерительных каналов	3 канала: датчик момента, демодулятор, термодатчик
Разрядность АЦП	16 бит
Поддиапазоны измерения входного сигнала	±10 В, ±5 В, ±2 В, ±1 В, ±0,5 В, ±0,2 В
Частота преобразования АЦП (макс.)	2 МГц
Разрядность ЦАП	16 бит
Частота вывода в синхронном режиме (макс.)	1 МГц
Выходной диапазон ЦАП	±5 В
Рабочий выходной ток	не более 10 мА
Интерфейс для подключения к ПК	USB 2.0
Габариты измерительного блока	245×212×57 мм
Требования к питанию	
Рекомендуемое напряжение питания	12 В
Допустимый диапазон	9–28 В
Параметры окружающей среды	
Температура	15–25°C
Влажность	не более 80%

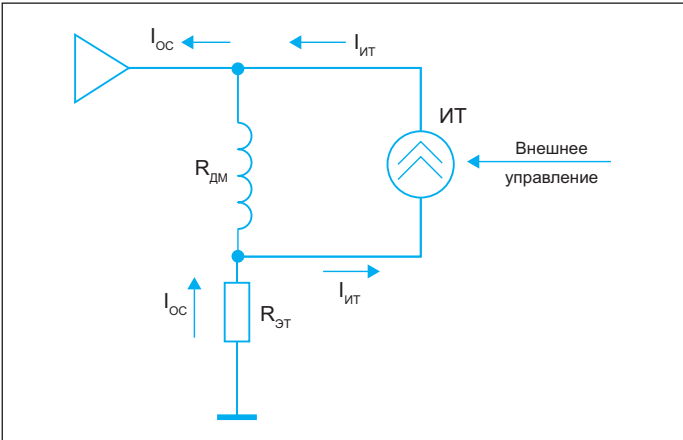


Рис. 9. Схема подключения внешнего гальваноизолированного источника тока к катушкам датчика момента

Пропускание через катушки датчика момента тока от внешнего гальваноизолированного источника тока

Данный метод позволяет проверить диапазон измеряемого ускорения, а также симитировать действие внешнего ускорения при проверке акселерометра в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы. На рис. 9 показана схема подключения источника тока к катушкам датчика момента. При этом система обратной связи акселерометра пропускает через катушки датчика момента ток, равный току источника тока, в противоположном направлении:

$$I_{ДМ} = I_{ИТ} - I_{ОС} = 0,$$

а через R_{ЭТ} течет ток I_{ОС} = -I_{ИТ}.

Аппаратно-программный комплекс оперативного контроля параметров акселерометров

Представленные выше методы были реализованы с помощью аппаратно-программного комплекса, показанного на рис. 10.

В состав этого комплекса входит:

- электронный измерительный блок;
- ПК с ОС Linux с установленной управляющей программой;
- набор соединительных кабелей;
- приспособление для базирования прибора.

Технические характеристики измерительного блока представлены в таблице.

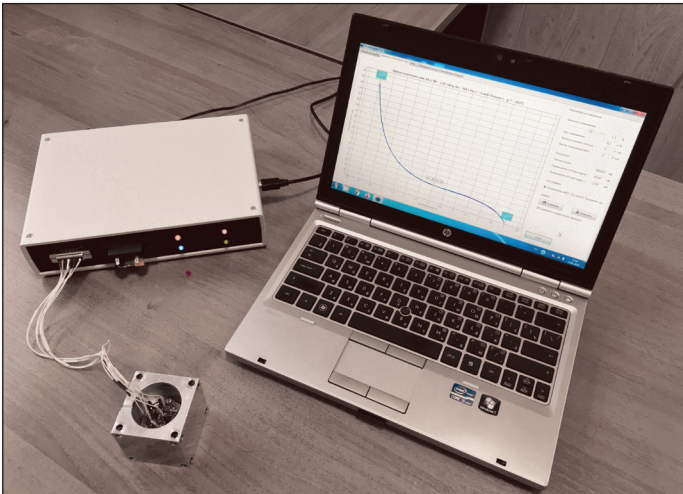


Рис. 10. Аппаратно-программный комплекс для оперативного контроля параметров акселерометров

С помощью этого аппаратно-программного комплекса можно проводить испытания акселерометров в следующих режимах:

- снятие выходного сигнала акселерометра;
- снятие кривых остаточного тока;
- снятие АЧХ акселерометра;
- определение газодинамических параметров;
- цикл включений–выключений акселерометра.

Эти режимы позволяют контролировать параметры и оценивать качество компенсационных маятниковых акселерометров. При этом полный цикл испытаний акселерометра занимает не более 15 минут.

Выводы

Описанные методы электрических испытаний компенсационных маятниковых акселерометров позволяют оперативно оценить работоспособность и некоторые параметры прибора без использования дополнительного дорогостоящего оборудования на этапах сборки чувствительного элемента при производстве, на приемо-сдаточ-

ных испытаниях готового акселерометра или входном контроле. Представленный аппаратно-программный комплекс реализует необходимые методы и выдает результаты в текстовом и графическом виде, что упрощает постобработку полученных результатов.

Литература

1. Pat. 3702073 (USA). Int. Cl. G 01 P 15/08. Accelerometer / E.D. Jacobs. Sundstrand Data Control Inc. № 803208. 1969.
2. Cardy W. Q-Flex Accelerometer, Construction and Principle of Operation. Technical Note TN-103. Sundstrand Data Control Inc. 1984.
3. Коновалов С. Ф., Коновалов Б. С., Майоров Д. В. и др. Автоматическое оборудование для испытаний акселерометров // Тез. докл. IV Международной конф. по интегрированным навигационным системам. СПб. 1997.
4. А. с. 1839835 (СССР). Способ измерения динамических характеристик компенсационного акселерометра // Глазов А. В., Смирнов Е. С. Оpubл. в Б. И. № 22. 10.08.05.

НОВОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ

В НИУ ВШЭ впервые в России испытали работу связи 6G на скорости 12 Гбит/с

Эксперимент подтвердил, что система может работать в лабораторных условиях, сохраняя высокую скорость передачи данных и устойчивость связи. В демонстраторе использовались частоты 141–148,5 и 151,5–164 ГГц, а скорость передачи данных достигла 12 Гбит/с. Эти показатели соответствуют международным стандартам, предъяв-

ляемым к каналам связи сетей шестого поколения (6G) и IMT-2030, в частности ETSI GR THz 002 V1.1.1 (март 2024 г.) и Международного союза электросвязи (МСЭ) ITU-R M.2160, сообщили представители ВШЭ.

Главной особенностью системы стало управление распределением сигнала в реальном времени.

Если сигнал блокируется, система автоматически переключается на другую антенну. Это делает связь устойчивой даже в сложных условиях. Часть компонентов системы разработана в МИЭМ НИУ ВШЭ и МПГУ. Это, например, панель RIS (соответствующая ITU-R M.2541-0, май 2024 г.), или частотно-селективная поверхность, которая управляет направлением передачи сигнала, а также диодные детекторы, позволяющие системе работать на суб-терагерцовых частотах.

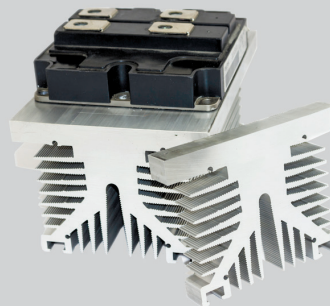
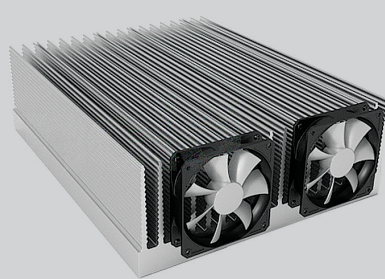
<https://russianelectronics.ru/>

ЛИГРА ольчатые диаторы

Производство



198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Швецова, д.23,
Тел./Факс: (812) 600-18-55
www.ligra.ru E-mail: ligra-spb@mail.ru



Охлаждения силовых модулей, ключей, реле
и других электронных компонентов

Оказываем услуги по фрезерованию, нарезке резьбы,
сверловке радиаторных профилей по чертежам заказчика.

Все операции выполняются на станках ЧПУ
с максимальной точностью и в сжатые сроки.

