

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ им. А. А. Благонравова
Российской академии наук



На правах рукописи

ЖДАНОВ

Александр Степанович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ МНОГООСЕВЫМИ ВИБРОДАТЧИКАМИ**

Специальность: 01.02.06 – Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Явелов Игорь Самуилович

Москва- 2020

Оглавление

	Стр
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА.....	16
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.....	18
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	19
1.1. Обзор современных вибродатчиков, применяющихся в системах измерения вибрации.....	19
1.2. Особенности применения вибродатчиков в виброизмерительных системах.....	40
Выводы по главе 1.	47
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	48
2.1. Влияние поперечных компонентов движения на погрешность измерения вибрации.....	48
2.2. Анализ векторов чувствительности трёхосевых вибродатчиков с квазиортогональным базисом измерительных осей.....	55
2.2.1. Система векторов чувствительности и математические принципы преобразований	55
2.2.2. Анализ реализуемости предложенного метода и сходимость векторов чувствительности.....	59
2.2.3. Структурная схема преобразователя и принципы его работы.....	66
2.3. Трёхосевые вибродатчики с косоугольным базисом измерительных осей.....	68
2.3.1. Конструкция.....	72

2.3.2. Принципы работы преобразователя.....	75
2.3.3. Структурная схема преобразователя	76
2.3.4. Конструкция и технические характеристики преобразователя	77
2.4. Трёхосевой вибродатчик с ортогонально-косоугольной системой измерительных осей на основе монолитного сдвигового пьезоэлемента.....	80
2.4.1. Конструкция и система измерительных осей.....	81
2.4.2. Результаты испытаний.....	83
Выводы по главе 2.....	90
ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....	91
3.1. Электроизмерительный блок для исследования динамических характеристик балансировочных станков.....	92
3.1.1. Общее описание.....	92
3.1.2. Структурная схема и описание работы прибора.....	92
3.1.3. Математические принципы функционирования прибора.....	95
3.1.4. Технические характеристики прибора.....	96
3.1.5. Результаты испытаний.....	100
3.2. Специализированный преобразователь для системы измерения динамических сил в опорах.....	101
3.2.1. Общее описание.....	101
3.2.2. Структурная схема и описание работы.....	102
3.2.3. Технические характеристики.....	107
3.2.4. Результаты испытаний.....	107
3.3. Программно-аппаратный комплекс на основе однокристалльного микропроцессора.....	108
3.3.1. Назначение и основные свойства.....	108
3.3.2. Структурная схема комплекса.....	110

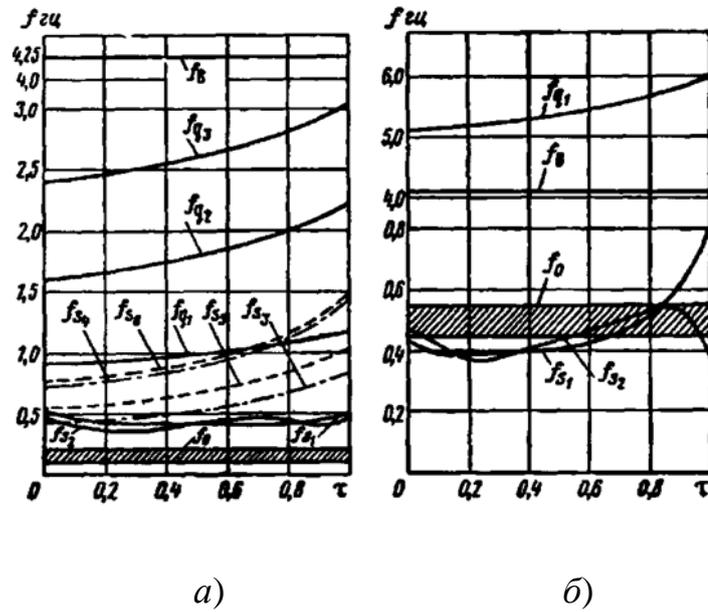
3.3.3. Структурная схема стенда для настройки ортонормализатора.....	112
3.3.4. Алгоритм работы.....	114
3.3.4.1. Алгоритм настройки ортонормализатора.....	114
3.3.4.2. Алгоритм работы модуля ортонормализации.....	122
3.3.4.3. Основные технические характеристики.....	126
3.4. Программа визуализации пространственных форм колебаний механических конструкций.....	127
3.5. Выводы по главе 3.....	132
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	133
5. ЛИТЕРАТУРА	135
6. ПРИЛОЖЕНИЯ.....	142
Приложение 1.....	142
Приложение 2.....	143
Приложение 3.....	144
Приложение 4.....	145
Приложение 5.....	148

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность и эффективность работы энергетических установок в значительной степени зависит от их вибрационного состояния, поэтому в настоящее время особое внимание уделяется обеспечению высокой точности измерения вибрации при исследовании динамики многомерных вибрационных процессов, происходящих в машинах и механизмах с вращающимися и вибрирующими узлами.

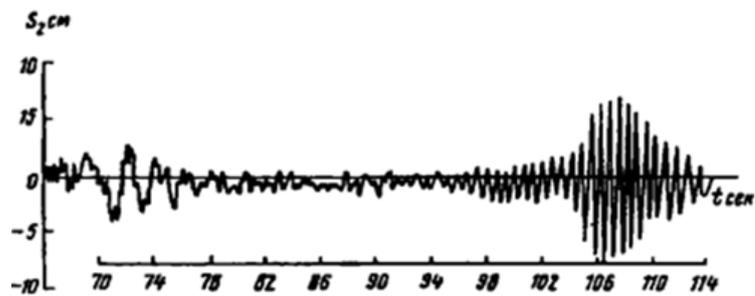
Особенно остро стоит проблема точности измерения вибрации в сложных механических системах, неисправности которых могут приводить не только к сбоям в их работе, но и катастрофам. Это относится к объектам авиационной, ракетной техники, ТЭЦ, ГЭС и т. п. В этих объектах происходят сложные вибрационные процессы, например, нелинейные многочастотные резонансные колебания, приводящие к их разрушению. Актуальность исследования таких процессов поднята в целом ряде исследований отечественных и зарубежных учёных. Особое внимание к этой проблеме отмечено в монографии академика Ганиева [1]. На многочисленных примерах авиационной техники – вертолётах и самолётах, космических ракетах и других объектах в этой работе показано, что для обеспечения их надёжности необходимо проводить исследования с измерением пространственной вибрации многоосевыми вибродатчиками. Подробный анализ динамических вибрационных процессов в космических аппаратах (КА) и ракетоносителях (РН) с ЖРД, представленный в указанной монографии, показал, что колебания в их конструкции происходят как в продольном направлении структуры, так и в поперечном. На рисунках 1 и 2 по данным телеметрии показано изменение парциальных частот поперечных колебаний системы корпус – жидкость – маршевый двигатель – автомат стабилизации, а также временные диаграммы динамической неустойчивости в

канале крена на частотах колебаний в баках окислителя первой ступени РН «Сатурн-5».

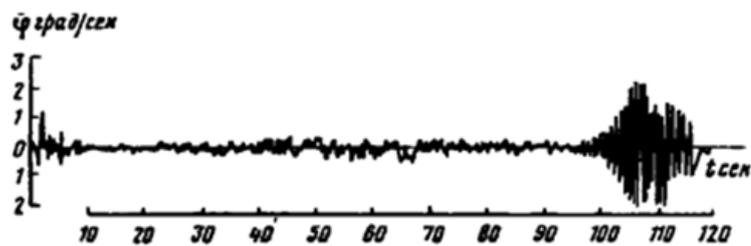


а) – первая ступень; б) – вторая ступень.

Рисунок 1. Парциальные колебания в РН «Сатурн-5»



а)



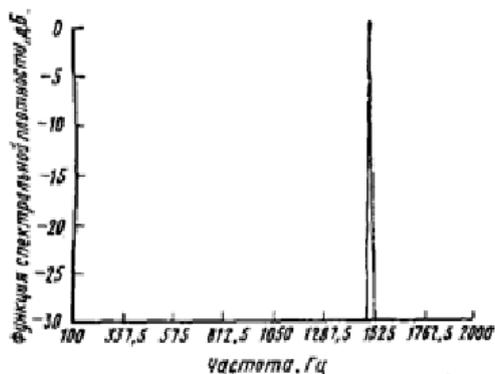
б)

а) уровень окислителя O_2 , б) угловая скорость крена.

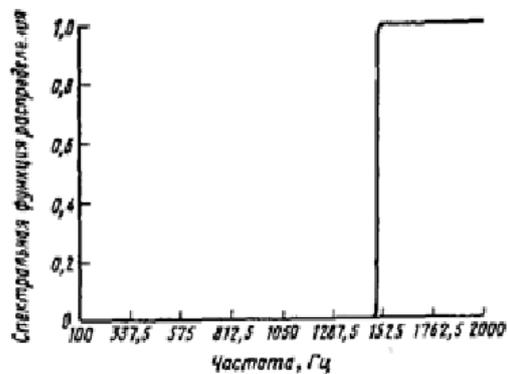
Рисунок 2. Эпюры динамической неустойчивости РН «Сатурн-5»

В самолётах также имеются проблемы динамической неустойчивости. Одной из наиболее острых является широко известная проблема флаттера, приводящего к катастрофам. Анализ автоколебательных процессов и панельного флаттера дан в работах [1, 2].

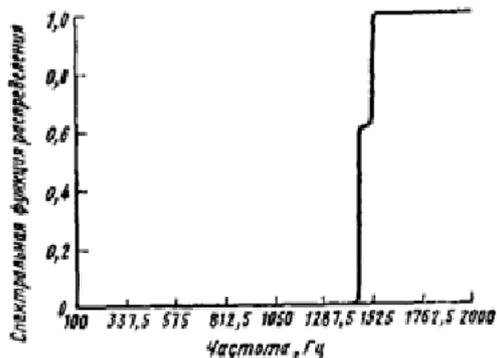
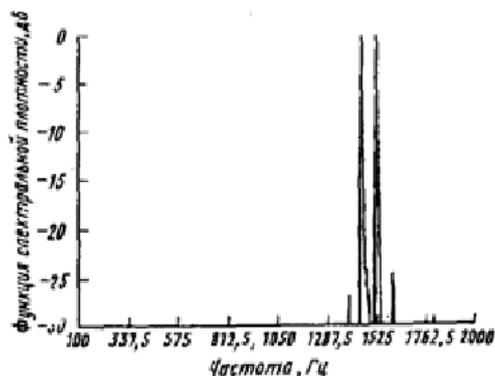
В Лаборатории двигателей Научно-исследовательского центра им. Арнольда (АЕДС) на моделях, представляющих собой пятиметровую сверхзвуковую и трансзвуковую трубы, были проведены исследования в аэродинамической трубе для чисел маха (М) в диапазоне 0,6 – 3,5. На рисунке 3 [1] представлены частотные функции полученных спектров.



а)



б)



исследования свободных и вынужденных колебаний трёхслойных круговых структур, связанных с упругими основаниями, при воздействии поверхностных нагрузок различной формы. В работе [12] приведены результаты исследования нестационарного панельного флаттера пластины из вязкоупругого ортотропного материала. На основании работ [13,14,15] показано, что критическая скорость флаттера определяется комбинацией мгновенных модулей. При этом каждое из ядер релаксации содержит одно экспоненциальное слагаемое. Полученные данные дают основания для дальнейшего развития исследований флаттерных явлений для различных объектов современной техники. Особое внимание при анализе проблем флаттера в настоящее время уделяется нелинейным явлениям, возникающим в энергетических установках с вращающимися и вибрирующими узлами. Учёт этих явлений важен для понимания процессов развития флаттера. Фундаментальный подход к анализу нелинейных эффектов и, в частности, нелинейных резонансов дан в работе [1]. Анализ нелинейных процессов в роторе турбокомпрессора дан в работе [16]. В ней в продолжение работ [17-22] на основе уравнений Навье - Стокса и усреднения Рейнольдса выявлено появление второй гармоники частоты флаттера, которая приводит к колебаниям лопаток и сдвигает положение их равновесия. На рисунке 4 [16] представлена запись формы колебаний ротора турбокомпрессора в неустойчивом режиме.

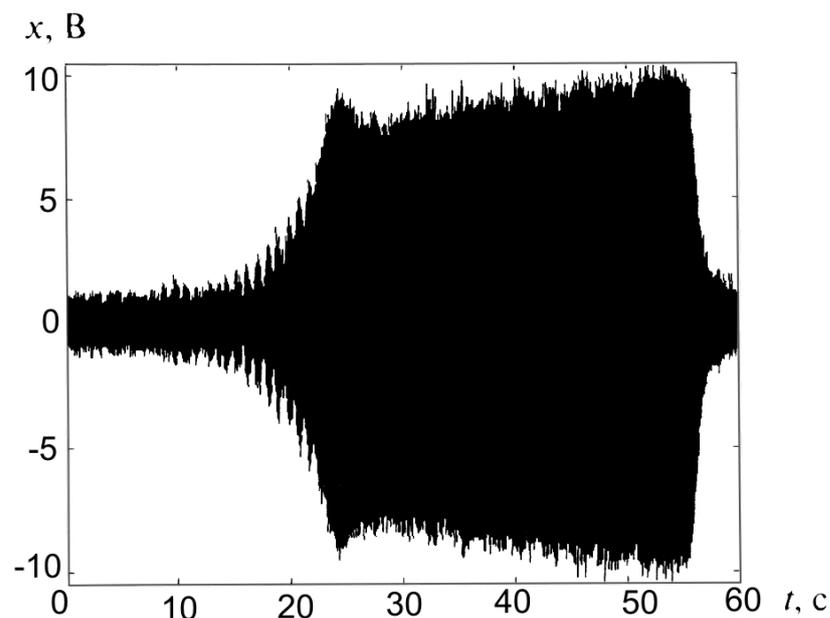


Рисунок 4. Запись неустойчивых колебаний лопатки ротора

В вертолётной технике также существует много проблем надёжности, связанных с возникновением неисправностей, причина которых кроется в неуправляемом росте вибрации. Как известно, динамические процессы в вертолётах значительно сложнее, чем в самолётах. Вертолёт имеет ряд парциальных систем, которых гораздо больше, чем в самолёте, например: корпус вертолёта как управляемое «несущее» твёрдое тело на упругих опорах, вращающиеся роторы, вращающиеся лопасти, крылья вертолёта в потоке газа, упруго подвешенные двигатели и т. д.

Специфические особенности динамики вертолёта отмечены в книге, посвящённой 100-летию юбилею выдающегося генерального конструктора вертолётов Михаила Леонтьевича Миля [23].

В указанной выше работе [1] дан глубокий анализ одного из самых сложных и фатальных разрушительных явлений в вертолётах – так называемого «земного резонанса», приводящего зачастую к катастрофам. На рисунке 5 представлена схема, применявшаяся при исследовании модели вертолёта на земле на упругих опорах:

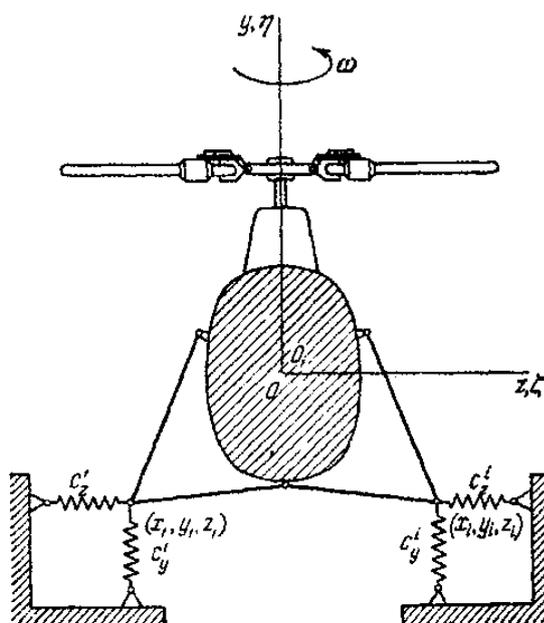


Рисунок 5. Наземная динамическая модель вертолёта

На основании уравнений движения этой модели, составленных с использованием уравнений Лагранжа второго рода, произведён анализ колебательных процессов при «земном резонансе» и получены математические зависимости, позволяющие рассчитать устойчивость системы и исключить возникновение этого и других фатальных явлений. Однако при математической постановке задач обычно принимаются гипотезы, правомерность которых не подтверждена точными эмпирическими данными. Поэтому результаты исследований зачастую не приводят к решению поставленных задач анализа сложных систем, подверженных разрушению спонтанно возникающей вибрацией и борьбы с явлением флаттера. Для реализации подобных математических моделей принципиально важно получить точные эмпирические данные о параметрах многомерной вибрации – величину её вектора и углов его пространственного положения относительно заданной системы координат, что в настоящее время является сложно выполнимой задачей. Решению этой задачи посвящена данная работа.

Кроме указанных выше механических систем, в которых возникают опасные вибрации, существует много других – системы вибрационного контроля энергетических установок и аварийной сигнализации, балансировочные станки и другие подобные системы. В них также весьма актуальна проблема обеспечения точности измерения пространственной вибрации. Одной из сложных с научной и практической точки зрения является задача создания систем активного гашения вибрации. В работе [24], которая является продолжением исследований, представленных в работах [25-27], в свете создания активных виброзащитных систем (АВС) рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования виброизоляции транспортных средств, активного гашения вибрации в жидкостных трактах, а также гашению вибрации стержней и трубных систем.

Во всех приведённых выше исследованиях для корректной математической формализации вибрационных процессов необходимы в качестве первичных параметров точные эмпирические данные, полученные в результате измерения вибрации.

Поскольку большинство физических величин, характеризующих энергетические процессы в механических системах и, в первую очередь вибрация, имеют трёхмерный характер, то наиболее точную и достоверную информацию с точки зрения исследования динамики вибрационных процессов и прогноза технического ресурса энергетических установок даёт мониторинг пространственной (3D) вибрации.

Кроме того, измерительные 3D системы широко используются в промышленных системах мониторинга акустических шумов, а также в научных исследованиях и метрологических установках. Например, такие системы применяются для вычисления акустического давления и скорости частиц в заданной точке, измерения распространения вибрационной и акустической энергии и т. п.

Первоначально для измерения вибрации использовались одноосевые датчики вибрации (ООДВ). Они имеют простую конструкцию и не требуют применения сложных многоканальных устройств согласования и обработки. Однако с их помощью практически невозможно измерить величину и направление вектора вибрации в заданной точке объекта с высокой точностью, поскольку они фактически измеряют лишь проекцию вектора вибрации на измерительную ось датчика. Поэтому, в настоящее время в прецизионных виброизмерительных системах в качестве первичных вибропреобразователей используются хорошо зарекомендовавшие себя трёхосевые датчики вибрации (ТОДВ). Их чувствительным элементом являются пьезокерамические пластины или схемы на основе полупроводниковых преобразователей и интегральных микросхем.

Наибольшее применение в практике виброизмерений нашли пьезоакселерометры, выпускаемых рядом мировых производителей, с чувствительной системой на основе пьезокерамических или кварцевых пластин. Они надёжны, имеют широкий динамический диапазон измерений, обладают высокой стабильностью коэффициента преобразования и хорошо зарекомендовали себя на практике. Однако, этим датчикам присущи системные погрешности, определяемые конструкцией их измерительной системы, которые

значительно снижают точность измерений и эффективность измерительной системы.

Одним из наиболее существенных, по мнению автора, и обычно недооцениваемых источников погрешности измерения вибрации такими датчиками, является их поперечная чувствительность. Она зависит от точности механического изготовления и сборки компонентов измерительной системы датчика. Даже у наиболее совершенных образцов в дорезонансном режиме она достигает величин нескольких процентов относительно осевой чувствительности, а на более высоких частотах она ещё выше.

В практике виброизмерений обычно поперечную чувствительность не принимают во внимания, поскольку её величина составляет лишь несколько процентов и, казалось бы, существенного влияния на общую погрешность вычисления вибрации она не должна оказывать. В данной работе приводятся результаты исследования её влияния на точность виброизмерений и показано, что наличие поперечной чувствительности может значительно снизить точность измерения вибрации вплоть до полной неработоспособности системы. Например, система вибрационного контроля может показывать низкий уровень вибрации контролируемого оборудования, в то время когда реальный уровень вибрации высокий, и наоборот. Это приводит к последующей неправильной интерпретации вибрационного состояния объекта. Фактически в такой системе вибропреобразователь измеряет в косоугольном базисе векторов чувствительности со всеми вытекающими последствиями.

Вопросам повышения надёжности и безопасности сложных механических энергетических систем уделяется много внимания. В указанной выше монографии академика Ганиева [1] приведены результаты теоретических и прикладных исследований нелинейных многократных резонансных процессов в объектах современной техники как типовых механических системах на основе обобщённых динамических моделей ряда машин и аппаратов. Проведены исследования объектов авиации (самолёты и вертолёты), ракетно-космической технике –

ракетоносители, конструкций машин и аппаратов, взаимодействующих или обтекаемых жидкостью и газом. Рассмотрены задачи виброамортизации машин и сооружений, подверженных вибрационным и сейсмическим воздействиям, трубопроводных систем, гидросооружений и др. Показано, что при оценке надёжности и безопасности технических объектов в первую очередь должны быть рассмотрены самые напряжённые, то есть опасные динамические режимы – многомерные волновые и колебательные взаимодействия в конструкциях машин и аппаратов, в сооружениях, в транспортных системах и в других сложных управляемых динамических объектах. Особенно остро проблема обеспечения надёжности таких систем стоит в случаях возбуждения в них многочастотных нелинейных резонансов, приводящих зачастую к разрушению механических объектов и катастрофам.

При исследовании вибрационных характеристик описанных выше механических систем очень важно обеспечить требуемую точность измерения вектора вибрации – его величину и пространственное положение. Поэтому повышение точности измерения многомерной вибрации с помощью многоосевых вибродатчиков весьма актуально. Наличие значительной поперечной чувствительности таких датчиков приводит к существенным погрешностям измерений. Подробно этот вопрос изложен в главе 2.

В настоящее время не существует методов корректировки погрешности измерения вибрации, возникающей вследствие наличия поперечной чувствительности, кроме совершенствования технологии изготовления составных частей его конструкции. Но даже при самой совершенной технологии конструктивными мерами не удаётся довести поперечную чувствительность во всём рабочем диапазоне частот до пренебрежимо малых значений, не влияющих на точность измерения вибрации.

Цели и задачи исследования

Целями работы являются:

1. Разработка методов и средств устранения погрешности измерения вибрации, обусловленной поперечной чувствительностью ТОДВ и асимметрией измерительной системы, а также расширение рабочего диапазона частот;
2. Создание новых ТОДВ с улучшенными метрологическими свойствами и прецизионных виброизмерительных систем на их основе.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Произведён анализ метрологических характеристик выпускаемых промышленных виброизмерительных преобразователей;
2. Разработана математическая модель и технические средства управления векторами чувствительности ТОДВ;
3. Проведены исследования матрицы чувствительности ТОДВ;
4. Разработаны математические принципы реализуемости предложенного метода;
5. Разработаны структурная и принципиальная схемы электронного преобразователя с функцией компенсации поперечных составляющих векторов чувствительности;
6. Разработаны новые ТОДВ с улучшенными метрологическими характеристиками;
7. Разработана методология проведения калибровочных испытаний ТОДВ на специализированном вибростенде;
8. Изготовлен ряд ортонормализующих предусилителей-компенсаторов (ОНПК), успешно проведены их метрологические испытания, анализ результатов и определены направления дальнейших исследований;

В первой главе на основании обзора литературных источников проведён анализ метрологических характеристик стандартных датчиков вибрации, выпускаемых мировыми лидерами. Рассмотрены особенности применения ТОДВ в виброизмерительных системах.

Во второй главе проведены анализ влияния поперечных компонентов движения на погрешность измерений и анализ систем векторов чувствительности ТОДВ с различными базисами измерительных осей. Изложены математические принципы преобразований и проведён анализ реализуемости предложенного метода. Описаны структурные схемы различных вариантов ОНКП, принципы их работы, конструкция и характеристики. Приведены результаты испытаний.

В третьей главе приведены примеры практического применения предложенного метода в виброизмерительных системах. Показано, что на основе представленных в главе 2 математических принципов возможно создание уникальных прецизионных виброизмерительных систем. Представлены также вариант организации компьютеризированного измерительного комплекса, с помощью которого возможно проведение автоматизированной настройки и ортогонализации ТОДВ с паспортизацией полученных характеристик, а также программа визуализации форм пространственных колебаний.

Научная новизна и личный вклад автора

Анализ публикаций в мировой литературе по обсуждаемой теме не выявил информации о проводимых где либо, кроме представленных в данной работе, исследованиях по методам электронного управления эквивалентными векторами чувствительности ТОДВ. Борьба с их поперечной чувствительностью и обеспечение других важнейших с метрологической точки зрения параметров ведётся лишь конструктивными методами в пределах технологических

возможностей производства. В результате поперечная чувствительность и другие параметры погрешности лучших образцов ТОДВ ведущих мировых производителей, имеют значения, достигающие величин, значительно снижающих точность измерений.

Не обнаружена также информация по разработке принципиально более точных с указанной метрологической точки зрения ТОДВ.

Представленный метод разработан в лично автором, а также при его непосредственном участии в качестве ответственного исполнителя.

Научная новизна подтверждается следующими результатами исследований:

1. Проведён анализ влияния поперечной чувствительности ТОДВ на точность измерения вибрации и предложена математическая модель оценки погрешности измерения вибрации, обусловленной наличием поперечной чувствительности ТОДВ, с учётом влияния характеристик вибрационного процесса и поперечных резонансов ТОДВ.

2. Разработаны и научно обоснованы математические принципы снижения погрешности измерений, определяющейся поперечной чувствительностью ТОДВ.

3. Проведены экспериментальные исследования параметров погрешности ТОДВ различной конструкции. Получены новые результаты, позволяющие более точно исследовать пространственное положение векторов чувствительности ТОДВ. В частности, впервые произведены измерения и анализ полной матрицы их чувствительностей.

4. Разработаны новые ТОДВ с улучшенными метрологическими характеристиками.

5. Разработаны математические принципы компенсации помеховых сигналов в каналах, на которых основан метод электронного управления векторами чувствительности ТОДВ. На основе этих принципов создан и испытан ряд ОНПК.

6. Разработана и успешно опробована методика практической ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ на специализированной стендовой аппаратуре.

Практическая ценность

Полученные экспериментальные результаты подтверждают правильность теоретического подхода к управлению векторами чувствительности ТОДВ и позволяют использовать предложенный метод для повышения точности измерения вибрации в различных виброизмерительных системах. Представленный метод даёт возможность значительно улучшить метрологические характеристики промышленных многоосевых вибродатчиков, а также создавать прецизионные многоосевые датчики различных физических величин. Данный метод позволяет проводить регулярную поверку и калибровку многоосевых датчиков в процессе эксплуатации, например, после их повреждения вследствие удара, воздействия высоких температур и т. п. без разбора их механической системы. На основе предложенного принципа компенсации помеховых сигналов в каналах появилась возможность повысить точность и помехозащищённость любой линейной многоканальной измерительной системы, в качестве источников сигналов в которых используются датчики физических величин - давления, перемещения, температуры и т. п.

Исходя из вышеизложенного, становится понятной актуальность проведения исследований по разработке методов и средств снижения погрешности измерений, обусловленной наличием у ТОДВ поперечной чувствительности.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Обзор современных ТОДВ, применяющихся в системах измерения вибрации

Прежде чем приступить к изложению материала, описывающего принципы реализации предложенного метода и общей постановки задачи, необходимо провести анализ существующих средств измерения многомерной вибрации. Рассмотрим технические характеристики ТОДВ и ООДВ, выпускаемые мировыми лидерами в области виброизмерительной аппаратуры.

Фирма ENDEVCO, США, выпускает ряд ТОДВ как на основе пьезокерамических пластин, так и со встроенным электронным преобразователем [28]. На настоящий момент времени она выпускает 150 типов ТОДВ. Все они имеют поперечную чувствительность, доходящую до 5%.

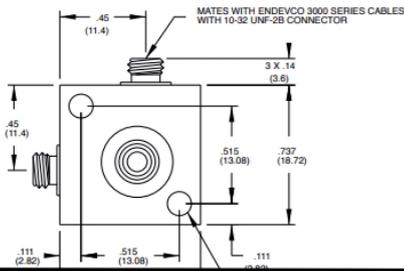
На рисунке 5 приведены технические характеристики ТОДВ типа 2228С на основе пьезопластин, а на рисунке 6 приведены технические характеристики ТОДВ типа 2258 Isotron с внутренней электроникой из текущего каталога фирмы.



Model 2228C Piezoelectric accelerometer

Features

- **NEW!** 2228C-R available as replacement sensor
- Triaxial
- Ground isolated
- Light weight (15 gm)
- Requires no external power
- Vibration measurement in three orthogonal axis

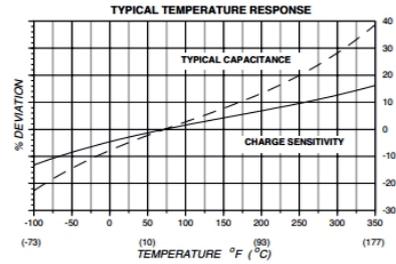


Description

The Endevco® model 2228C is a small triaxial piezoelectric accelerometer designed specifically for vibration measurement in three orthogonal axes on small structures and objects. The transducer features three 10-32 receptacles for output connection and can be screw or adhesively mounted. Its light weight (15 gm) effectively minimizes mass loading. The accelerometer is a self-generating device that requires no external power source for operation.

The model 2228C features Endevco's Piezite® type P-8 crystal elements operating in annular shear mode. This unit exhibits excellent output sensitivity stability over time. Signal ground is isolated from the mounting surface of the unit. Low-noise, flexible coaxial cables are supplied for error-free operation.

Endevco signal conditioner models 133, 2771C, 2775B, 6634C or OASIS 2000 computer-controlled system 4990A-X are recommended for use with this high impedance accelerometer.



TYPICAL AMPLITUDE RESPONSE

a)

Model 2228C Piezoelectric accelerometer		MEGGITT smart engineering for extreme environments
Specifications		
The following performance specifications conform to ISA-RP-37.2 [1964] and are typical values, referenced at +75°F (+24°C), 4 mA and 100 Hz, unless otherwise noted. Calibration data, traceable to National Institute of Standards and Technology (NIST), is supplied		
Dynamic characteristics		
Charge sensitivity	Units	
Typical	pC/g	2.8
Minimum	pC/g	2.2
Frequency response		See typical amplitude response
Resonance frequency	kHz	21
Amplitude response [1]		
±5%	Hz	1 to 4000
±1 dB (ref)	Hz	0.1 to 6000
Temperature response		See typical curve
at -67°F (-55°C) max/min	%	-12 / 0
at +350°F (+177°C) max/min	Hz	20 / 0
Transverse sensitivity	%	≤5
Amplitude linearity	%	1
Per 500g, 0 to 2000 g		
Electrical characteristics		
Output polarity		Acceleration applied in the direction of the axis arrow produces positive output
Resistance	GΩ	≥10
Resistance at +350°F (+177°C)	GΩ	≥5
Isolation	MΩ	≥10
Signal ground to each signal ground and to mounting surface		
Capacitance	pF	400
Grounding		Each sensor is isolated from the anodized aluminum case
Environmental characteristics		
Temperature range		-67°F to +350°F [-55°C to +177°C]
Humidity		Epoxy sealed, non-hermetic
Sinusoidal vibration limit	g pk	1000
Shock limit [2]	g pk	2000
Salt spray		Will meet ML-E-5272C, para 4.6.1 when used with sealed connector
Electromagnetic sensitivity	equiv. g rms/gauss	0.01
Physical characteristics		
Dimensions		See outline drawing
Weight	gm [oz]	15 (0.53)
Case material		Aluminum alloy case, hard anodized, nickel alloy sensors
Connector		Mates with Endevco 3060 series cable
Mounting torque	lbf-in [Nm]	8 [1]
Calibration		
Supplied:		
Charge sensitivity	pC/g	
Capacitance	pF	
Maximum transverse sensitivity	%	
Charge frequency response	%	20 to 4000 Hz
	dB	thru resonance (Z axis only)

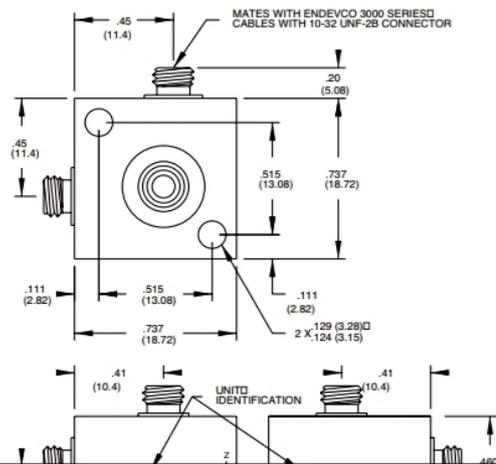
б)

Рисунок 5. Технические характеристики ТОДВ типа 2228С (ENDEVCO, США)
на основе пьезокерамических пластин.

Model 2258A Isotron[®] accelerometer

Features

- **NEW!** 2258A-10-R available as replacement sensor
- Triaxial
- Light weight (15 gm)
- Hermetically sealed
- Milli-g's resolution
- Robotics, machine tools, aerospace structures

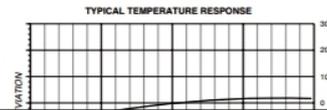
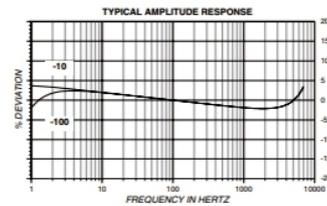


Description

The Endevco[®] model 2258A is a small triaxial piezoelectric accelerometer with integral electronics, designed specifically for measuring vibration in three orthogonal axes on small structures. The transducer features three hermetically sealed 10-32 connectors for output connection, and can be screw or adhesive mounted. Its light weight (15 gm) effectively minimizes mass loading effects.

The model 2258A features Endevco's Piezite[®] type P-8 crystal elements, operating in annular shear mode, which exhibit excellent output sensitivity stability over time. This accelerometer incorporates three stand-alone, low noise internal hybrid signal conditioners, each operating in a two-wire system. Its low impedance voltage outputs are connected to the same cables that supply the required constant current power. Signal grounds are isolated from each other and the mounting surface. A model number suffix indicates acceleration sensitivity in mV/g; i.e., 2258A-10 features output sensitivity of 10 mV/g.

Endevco signal conditioner models 4416B, 133, 2792B, 2793, 2775B, 4999, 6634C or Oasis 2000 (4990-X with cards 428 and/or 433) computer-controlled system are recommended for use with this accelerometer.



a)

Model 2258A Isotron® accelerometer		MEGGITT smart engineering for extreme environments	
Specifications			
The following performance specifications conform to ISA-RP-37.2 (1964) and are typical values, referenced at +75°F (+24°C) and 100 Hz, unless otherwise noted. Calibration data, traceable to National Institute of Standards and Technology (NIST), is supplied.			
Dynamic characteristics	Units	-10	-100
Range	g	±500	±50
Voltage sensitivity ±10%	mV/g	10	100
Frequency response		See typical amplitude response	
Resonance frequency			
typical	kHz	20	20
minimum	kHz	18	18
Amplitude response ±10% ±10%	Hz	1 to 7000	1 to 7000
Temperature response		See typical curve	
-67°F (-55°C) max	%	-15	-15
257°F (125°C) max	%	+5	+5
Transverse sensitivity	%	≤ 5	≤ 5
Amplitude linearity	%	≤ 1 to full scale	≤ 1 to full scale
Output characteristics			
Output polarity		Acceleration applied in the direction of arrow on the unit produces positive output	
DC output bias voltage	Vdc	+12.3 to +13.5	+12.3 to +13.5
-67°F to 257°F (-55°C to 125°C)	Vdc	+7.0 to +16.0	+7.0 to +16.0
Output impedance	Ω	≤ 200	≤ 200
Full scale output voltage	V	±5	±5
Residual noise			
typical	equiv. g rms	0.001	0.0003
maximum	equiv. g rms	≤ 0.002	≤ 0.0005
0.5 Hz to 10 kHz, broadband			
Grounding		Each sensor is isolated from the other signal grounds and the triaxial housing	
Overload recovery	µsec	≤ 45	≤ 45

б)

Рисунок 6. Технические характеристики ТОДВ типа 2258 Isotron (ENDEVCO, США) с внутренней электроникой.

Все остальные ТОДВ этой фирмы имеют такие же значения поперечной чувствительности.

Швейцарская фирма KISTLER также выпускает ряд аналогичных ТОДВ. На рисунке 7 приведены технические характеристики ряда ТОДВ типа 8396А с внутренней электроникой, а на рисунке 8 приведены технические характеристики ТОДВ типа 8290А25М5 на основе пьезопластин из текущего каталога фирмы [29].

Acceleration

KISTLER
measure. analyze. innovate.

K-Beam Accelerometer

Type 8396A...

Capacitive MEMS, Triaxial Accelerometer

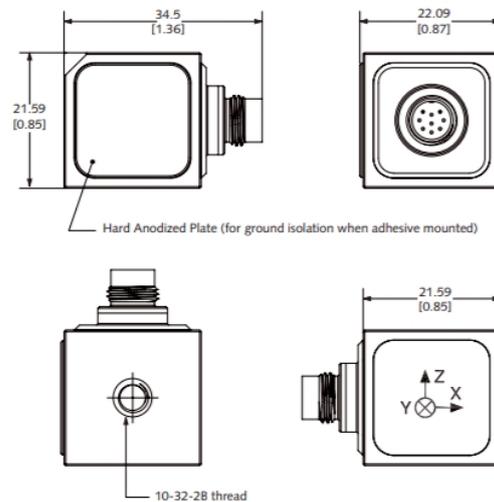
Type 8396A... is a high-sensitivity, low noise triaxial accelerometer which simultaneously measures acceleration and/or low-frequency vibration in three mutually perpendicular axes (x, y, z). The accelerometer features include:

- Measuring ranges: ± 2 g, ± 10 g, ± 30 g, ± 50 g, ± 100 g, ± 200 g
- Frequency response: 0 ... 2,000 Hz (5 %) (except ± 2 g)
- Output Options: 0 ± 4 V or 2.5 ± 2 V single ended, 0 ± 4 V or 0 ± 8 V differential
- Operating temperature: $-55 \dots 125$ °C [$-65 \dots 260$ °F]
- Low noise
- Excellent thermal stability
- Small cube, 30 grams mass
- Wide supply voltage range, 6 ... 50 VDC
- 6,000 g_{pk} shock rated
- Conforming to CE

Description

Type 8396A... triaxial capacitive accelerometer family utilizes a silicon Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) variable capacitance sensing element. The sensing element of each axis consists of a very small inertial mass and a flexure element cantilever positioned between two plates. As the mass deflects under acceleration, the capacitance between these plates changes. AC excitation and synchronous amplitude demodulation circuitry contained in the accelerometer's internal signal conditioner provides an analog output signal proportional to the applied acceleration. This output signal is scaled as a voltage which is proportional to the applied acceleration.

The output signal format is available as bipolar 0 ± 4 V, single-ended 2.5 ± 2 V and 0 ± 4 V or 0 ± 8 V differential. The accelerometer is powered by a single regulated supply between 6 and 50 VDC. Temperature output is provided if external compensation of the output signal is desired. The sensing element and electronics are contained in a lightweight, welded titanium housing with either a



a)

Technical data

Type	Unit	8396A2D0	8396A010	8396A030	8396A050	8396A100	8396A200
Acceleration range	g	±2	±10	±30	±50	±100	±200
Frequency response, ±5 %, min.	Hz	0 ... 250	0... 1,000	0... 1,500	0... 1,500	0... 1,500	0... 1,500
±5 %, typ.	Hz	0 ... 900	0 ... 2 000	0 ... 2 300	0 ... 2 700	0 ... 3 000	0 ... 3 500
±10 %, typ.	Hz	0 ... 1,000	0... 2,400	0... 3,000	0... 3,000	0... 3,500	0... 4,500
±3 dB, typ.	Hz	0 ... 1,150	0... 3,200	0... 4,000	0... 4,500	0... 5,000	0... 7,000
Damping ratio, nom.					0.7		
Sensitivity, ±5 % (ref 100 Hz),							
Output Type A, 0±4 V FSO output	mV/g	2,000	400	133.3	80	40	20
Output Type B, 2.5±2 V FSO output	mV/g	1,000	200	66.6	40	20	10
Output Type C, 0±4 V FSO differential	mV/g	2,000	400	133.3	80	40	20
Output Type D, 0±8 V FSO differential	mV/g	4,000	800	266.6	160	80	40
Resonant frequency, nom.	kHz	1.2	3.2	5.2	6.5	8.5	11
Transverse sensitivity, typ. (max.)	%				1.0 (3.0)		
Sensitive axis misalignment, typ. (max.)	mrad				10 (30)		
Amplitude linearity, max.	% FSO				±0.3		
Amplitude linearity, typ.	% FSO				±0.1		
Phase shift (max.) @ 0 Hz	degrees				0		
@ 10 Hz	degrees				2		
@ 100 Hz	degrees				10		
Noise density, 0 ... 100 Hz, typ. (max)	mg _{rms} /√ Hz	0.007 (0.0085)	0.035 (0.042)	0.105 (0.125)	0.175 (0.210)	0.350 (0.420)	0.700 (0.840)
Noise 0 ... 100 Hz, typ.	mg _{rms}	0.070	0.350	1.050	1.750	3.500	7.000
Resolution (threshold), typ.	mg _{rms}	0.100	0.500	1.470	2.450	4.900	9.800
Electrical							
0 g output, output Type (A; B; C; D)	mV	0 ±60 (A); 2,500±30 (B); 0±60 (C); 0 ±120 (D)					
Capacitive load, max.	µF	0.5					
Load resistance, min.	kΩ	30					
Output impedance, typ.	ohm	300					
Supply current, nom.	mA	12					
Supply voltage, temperature	VDC	6 ... 50 (≤ 100 °C [210 °F]); 6 ... 35 (≤ 110 °C [230 °F]); 6 ... 20 (≤ 120 °C [250 °F]); 6 ... 12.5 (125 °C [260 °F])					
Reverse polarity protection	yes/no	yes					

б)

Рисунок 7. Технические характеристики ряда ТОДВ типа 8396А фирмы KISTLER (Швейцария) с внутренней электроникой

Acceleration

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Ceramic Shear Accelerometer

Type 8290A25M5

High Sensitivity, Charge Mode, Triaxial Accelerometer

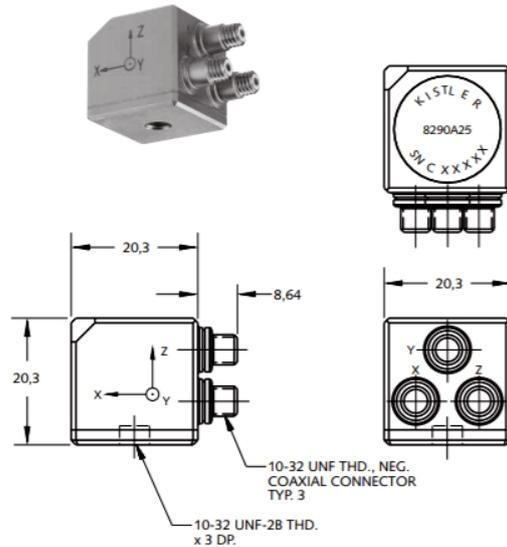
Designed for long-term, high operational temperature stability at 250°C, the 8290A25M5 accelerometer simultaneously measures shock and vibration in three orthogonal axis.

- High impedance, charge mode
- Ceramic Shear sensing element
- High Temperature (250°C)
- Low transverse sensitivity
- Long-term stability at extended temperatures

Description

The 8290A25M5 high temperature, triaxial accelerometer is housed in a cube-shaped package with a notched corner to aid in orientation during installation in blind areas. Laser-etched markings on all sides clearly identify the three axes. A ceramic shear sensing element produces a charge output that can be easily converted into a useable analog voltage signal via a charge amplifier. Kistler's shear technology assures high immunity to base strain, thermal transients and transverse accelerations. Other outstanding features include high frequency response, lightweight and hermetic sealing. It is recommended that low noise transducer cables be used between the sensor and charge amplifier, such as Kistler 1635 series.

Internal of this hermetically sealed accelerometer, is a shear mode, ceramic sensing element, providing a significant charge output. Type 5050B... In-Line Charge Amplifier is recommended for use with the 8290A25M5. The 5050B... is a lower cost alternative to the laboratory amplifier allowing the measurement system to take on the appearance of the traditional voltage mode ac-



Application

The 8290A25M5 is recommended for general vibration measurements in high temperature and in confined areas. Applications for this accelerometer include vehicle vibration and NVH testing, general laboratory, environmental testing where low impedance sensors are limited by temperature range. It can also be used in FSS and modal analysis applications.

a)

High Sensitivity, Charge Mode, Triaxial Accelerometer, Type 8290A25M5

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Technical Data

Type Unit	8290A25M5	
Acceleration Range	g	±1000
Acceleration Limit	gpk	±2000
Threshold nom. (noise 100µVrms)	grms	0.001
Sensitivity	pC/g	-25
Resonant Frequency mounted, nom.	kHz	20
Frequency Response ±10%		
stud mounted	Hz	5 ... 4000
adhesive mounted	Hz	2 ... 2000
Insulation Resistance (75, 485°F)	Ω	≥ 1 x 10 ⁸
Capacitance	pF	1300
Transverse Sensitivity nom., (max.)	%	1,5 (3)
Environmental:		
Base Strain Sensitivity @ 250µε	g/µε	0,01
Shock Limit (1ms pulse)	gpk	5000
Temperature Coeff. of Sensitivity	%/°C	0,127
Temperature Range Operating	°C	-70 ... 246
Temperature Range Storage	°C	-78 ... 257
Construction:		
Sensing Element	type	Ceramic/Shear
Housing/Base	material	St. Stl
Sealing-housing/connector	type	Hermetic/Ceramic
Connector	type	10-32 neg
Weight	grams	53
Mounting (thread)	type	10-32 UNF-2B

1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.113 Nm**Mounting**

Reliable and accurate measurements require that the mounting surface be clean and flat. The accelerometer can be attached to the structure utilizing the supplied 10-32 mounting stud or adhesive. The Operating Instruction Manual for the 8290A25M5 provides detailed information regarding mounting surface preparation.

Accessories Included

- | | Type |
|----------------------------|------|
| • 10-32 thd. mounting stud | 8402 |

Optional Accessories

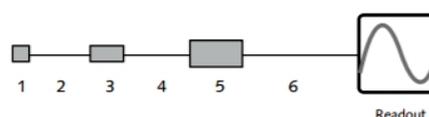
- | | Type |
|---------------------------------|-------|
| • Mounting magnet | 8452A |
| • 10-32 thd to M6 mounting stud | 8411 |

Ordering Key

Measuring Range	8290A
±25 pC/g, High Temperature	25M5

Measuring Chain

- | | Type |
|---------------------------|----------|
| 1 High Impedance Sensor | 8290A... |
| 2 Low noise Cable | 1635C... |
| 3 Series charge converter | 5050B... |
| 4 Outout cable to readout | 1511 |
| 5 Power Supply | 51... |
| 6 Outout cable to readout | 1511 |



b)

Рисунок 8. Технические характеристики ТОДВ типа 8290A25M5 на основе пьезопластин фирмы KISTLER (Швейцария)

Из приведённых характеристик видим, что у ТОДВ фирмы KISTLER поперечная чувствительность достигает значений 3%.

Один из лидеров мирового производства ТОДВ фирма BRUEL & KJEAR (Дания) также выпускает большой ряд прецизионных датчиков для измерения вибрации. Характеристики одного из самых точных и популярных ТОДВ этой фирмы будут рассмотрены ниже. Здесь приведём характеристики широко распространённого ТОДВ типа 4515-B [30].

PRODUCT DATA

CCLD Triaxial Seat Accelerometer Types 4515-B and 4515-B-002

Piezoelectric Accelerometer

Uses

- Field measurement of human whole-body vibration
- Test and measurement of passenger and work vehicles

Features

- Complies with ISO 2631, ISO 7096 and ISO 10326-1
- Removable triaxial accelerometer built into rubber pad
- Low impedance output
- High resolution (100 mV/g) with <0.4 mg residual noise
- Transducer electronic data sheet (TEDS)
- Exceptional lower limiting frequency



060138

Description

Accelerometer Type 4515-B is specially designed for the measurement of whole-body vibration. It consists of a triaxial accelerometer housed in a semi-rigid nitrile rubber disc and complies with ISO 7096, ISO 2631 and ISO 10326-1. It can be placed under a seated person, on a vibrating surface with a suitable weight on top, or strapped onto the body. It detects vibration in directions along the body, back-to-front, and side-to-side.

Type 4515-B includes transducer electronic data sheet (TEDS), which contains sensor- and application-specific information, including frequency response. The built-in accelerometer is mounted inside the rubber pad by means of a clip facilitating easy removal, calibration, and subsequent remounting.

For Type 4515-B, the 3 m integral cable terminates in 3 × 10–32 UNF connectors. Furthermore, 3 × JP- 0145 adapters (10–32 UNF to BNC) are supplied for flexible connectivity.

Type 4515-B-002 terminates in a 4-pin LEMO connector.

Characteristics

Type 4515-B has a CCLD* built-in preamplifier providing a low-impedance output. The sensitivity is expressed in voltage per unit acceleration (mV/ms^{-2}).

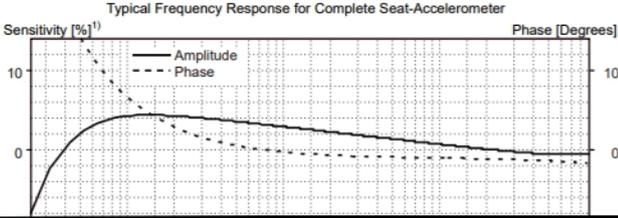
The OrthoShear™ design used in Type 4515-B is built around a common seismic mass. This uni-mass design results in a very compact triaxial accelerometer with excellent low-frequency response. All the axes have the same point of reference and the design also ensures accurate and consistent measurements, even when the accelerometer is exposed to complex vibration patterns.

Calibration

Prior to mounting the accelerometer in the rubber pad it is individually calibrated, providing an 800-point, high-resolution calibration (magnitude and phase) giving a unique characterisation and securing the integrity of the typical frequency response of the seat pad.

* CCLD: Constant Current Line Drive, also known as DeltaTron®. ICP and IEPE compatible

Typical Frequency Response for Complete Seat-Accelerometer



a)

Specifications – Types 4515-B and 4515-B-002

	Unit	4515-B and 4515-B-002*
Dynamic Characteristic		
Voltage Sensitivity (@ 160 Hz)	mV/ms ⁻² (mV/g)	10 ±5% (100 +3/-7%)
Measuring Range	ms ⁻² (g)	±500 (±50)
Frequency Response		See typical amplitude response
Mounted Resonance Frequency	Hz	>2700
Amplitude Response ±10%	Hz	0.25 to 900
Residual Noise	mg	<0.4
Transverse Sensitivity†	%	<5
Electrical Characteristics		
DC Output Bias Voltage	V DC	13 ±1
Output Impedance	Ω	<30
Grounding	V	Case insulated
Power Requirements (All three axes must be powered during operation)		
Constant Current Supply	mA	2 to 10
Supply Voltage (unloaded)	V DC	24 to 30
Warm-up Time (90% of stabilized bias)	s	10
Environmental Characteristics		
Temperature Range	°C (°F)	-10 to +70 (-14 to +158) -60 to +100 for short periods
Humidity		Hermetic
Max. Operational Sinusoidal Vibration (peak)	ms ⁻² (g)	5000 (500)
Max. Operational Shock (peak)	ms ⁻² (g)	50000 (5000)
Thermal Transient Sensitivity	Equiv. ms ⁻² /°C (g/°F)	0.1 (0.005)
Magnetic Sensitivity (50 Hz – 0.03 Tesla)	ms ⁻² T (g/T)	20 (2)
Physical Characteristics		
Dimensions		See outline drawing below
Weight	gram (oz)	345 (14.1)
Base Disc		Nickle-plated Brass
Seat Pad Material		Oil-resistant Nitrile Rubber Hardness: ~80 RHD
Cable		Integral Cable, 3 m
Connector		4515-B: 3 × 10–32 UNF 4515-B-002: 4-pin LEMO
Mounting		Strapped, adhesive or pressed

* All values are typical at 25 °C (77 °F) unless otherwise specified

† Associated with approximately 4% uncertainty from electrical noise of the test equipment



Ordering Information

Type 4515-B CCLD Triaxial Seat Accelerometer, with 3 m integral cable to 3 × 10–32 UNF

Type 4515-B-002 CCLD Triaxial Seat Accelerometer, with 3 m integral cable to 4-pin LEMO

both include the following accessories:

- Carrying box
 - Calibration Chart
 - Straps for body mounting
- Type 4515-B also includes
- 3 × 10–32 UNF adapters

Optional Accessories*	
JJ-0032	Extension Connector 10–32 UNF
AO-0527	Cable with 4-pin to 3 × 10–32 UNF Connectors, 85 °C (185 °F)
UA-2074	Replacement Rubber Pad for Type 4515-B, incl. 5 m cable
JP-0145	BNC to 10–32 UNF Plug Adapter
Calibration Services	
ACC-T-CAF	Accredited Calibration
ACC-T-CAI	Accredited Initial Calibration
ACC-T-CFF	Factory Standard Calibration with calibration chart
ACC-T-CTF	Traceable Calibration

* Additional accessories, cables and services are available (see www.bksv.com)



China RoHS mark indicates compliance with administrative measures on the control of pollution caused by electronic information products according to the Ministry of Information Industries of the People's Republic of China



WEEE mark indicates compliance with the EU WEEE Directive

© Brüel & Kjær. All rights reserved. 2018-05

12-13

б)

Рисунок 9. Технические характеристики ТОДВ типа 4515-B фирмы BRUEL & KJEAR (Дания)

У этого преобразователя поперечная чувствительность достигает значения в 5%.

Известная фирма PCB PIEZOELECTRONICS (США) тоже выпускает ряд вибродатчиков, в том числе ТОДВ.

На рисунке 10 приведены технические характеристики ТОДВ этой фирмы из текущего каталога фирмы [31].

Industrial ICP® Triaxial Accelerometers

Measures vibration in the horizontal, vertical and axial directions simultaneously.

Highlights

- Three concurrent readings reduce labor time and increase measurement consistency
- Through-bolt design ideal for spaces with limited clearance
- Wide variety of options available to accommodate most industrial applications:
 - 10 mV/g and 100 mV/g sensitivities
 - Top and side connector positions
 - Integral polyurethane and armored polyurethane cable options



Typical Applications

- Multi-axis route-based PdM with two or three channel data collector
- Machinery foundation troubleshooting
- Radial vs. axial motor bearing vibration monitoring
- Structural impulse and response studies

Hazardous Area Approvals

CSA (Canada & US unless otherwise noted)

- AEx/Ex ic IIC T4 Gc Class I, Div. 2, Groups A, B, C, D (EX629A11A/)
- AEx/Ex ic IIC T4 Gc Class I, Zone 2 (EX629A11A/)
- AEx/Ex ia IIC T4 Ga Class I, Division 1, Groups A, B, C, D (EX639A91)
- AEx/Ex ia IIC T4 Ga Class I, Division 2, Groups A, B, C, D (EX639A91)
- AEx/Ex ia IIC T4 Ga Class I, Zone 0 (EX639A91)
- Ex ia T4 Class I, Division 1, Groups C, D (Canada only) (CS604B31)

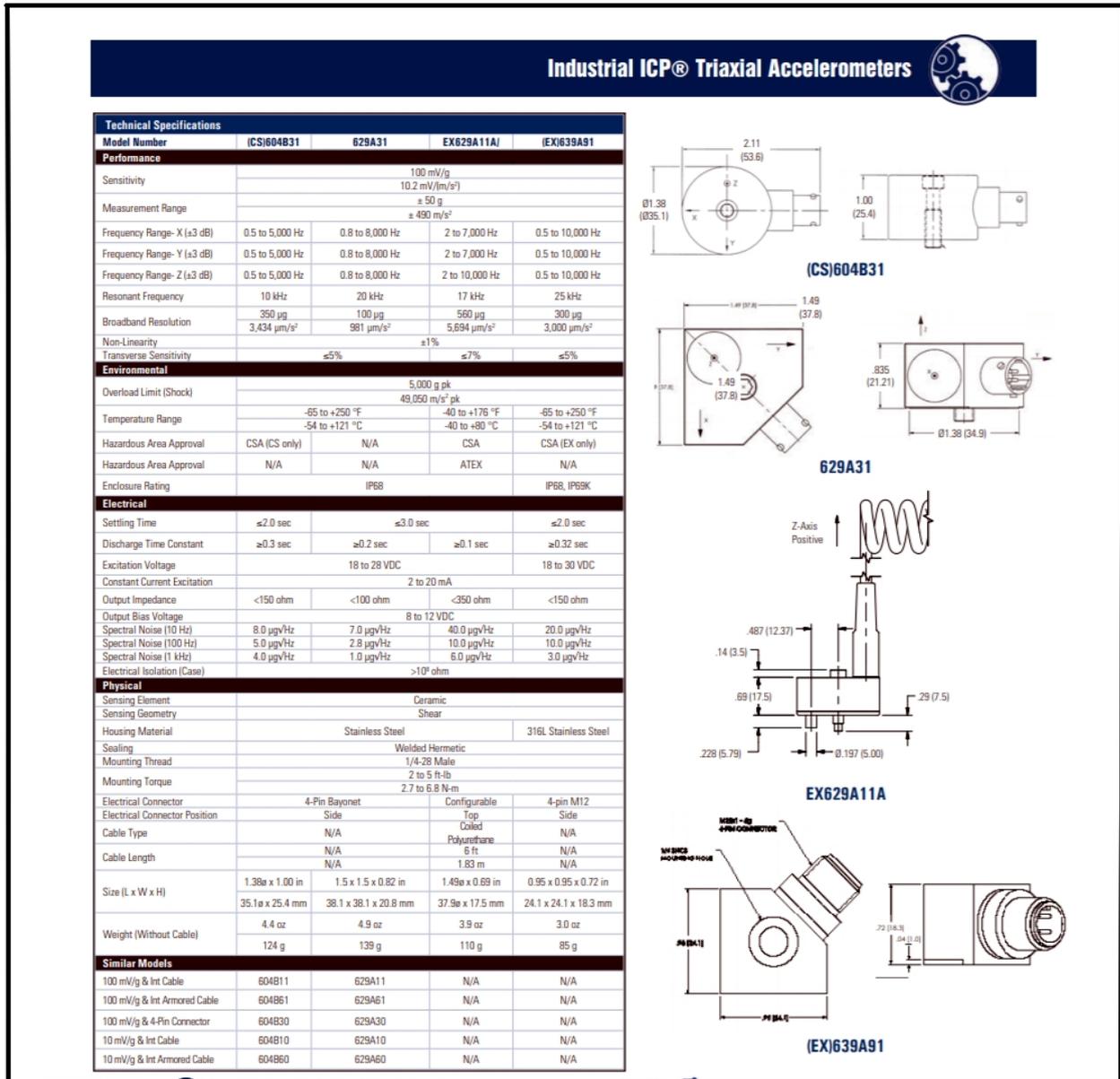
ATEX

- Ex ic IIC T4 Gc (EX629A11A/)
- Ex nA IIC T4 Gc (EX629A11A/)

IMI Sensors has an extensive line of ICP® triaxial accelerometers developed predominantly for route-based industrial vibration monitoring applications. All of the sensors feature three elements in one housing, each with its own dedicated amplifier and dedicated connector pin or cable lead.



a)



б)

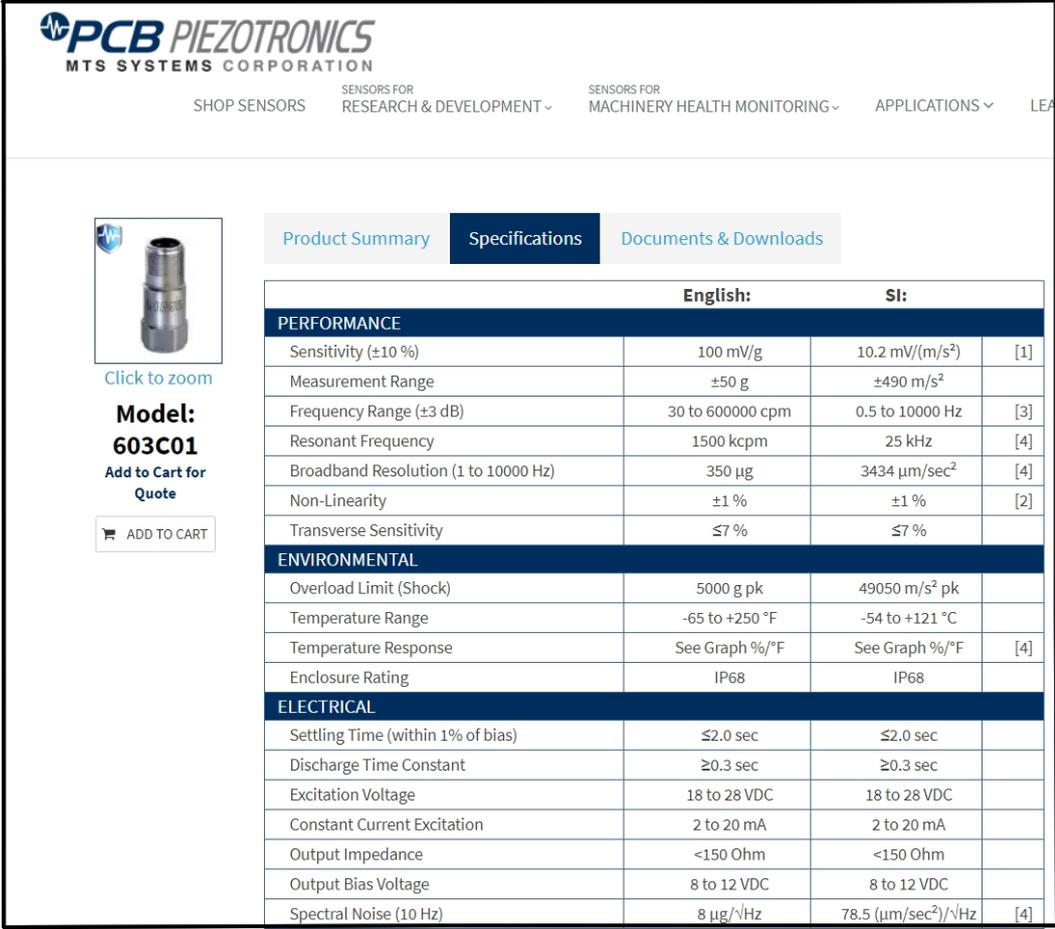
Рисунок 10. Технические характеристики ТОДВ PCB PIEZOELECTRONICS (США)

Из этой таблицы видно, что поперечная чувствительность этих датчиков достигает величины в 7%.

Аналогичными характеристиками по поперечной чувствительности обладают и ТОДВ других фирм, таких как Briel & Kjaer (Дания) и других.

Надо отметить, что поперечной чувствительностью обладают не только многоосевые датчики вибрации, но и одноосевые, с помощью которых в принципе возможно организовать измерение пространственной вибрации, разместив их на кубическом основании во взаимно ортогональных направлениях. Однако такая структура также не может обеспечить высокую точность формирования ортогонального базиса векторов чувствительности вследствие погрешностей установки и наличия существенной поперечной чувствительности входящих в неё датчиков.

На рисунке 11 приведены технические характеристики промышленного ООДВ типа 603C01 фирмы PCB PIEZOELECTRONICS (США).



PCB PIEZOTRONICS
MTS SYSTEMS CORPORATION

SHOP SENSORS SENSORS FOR RESEARCH & DEVELOPMENT SENSORS FOR MACHINERY HEALTH MONITORING APPLICATIONS

Model: 603C01
Add to Cart for Quote
ADD TO CART

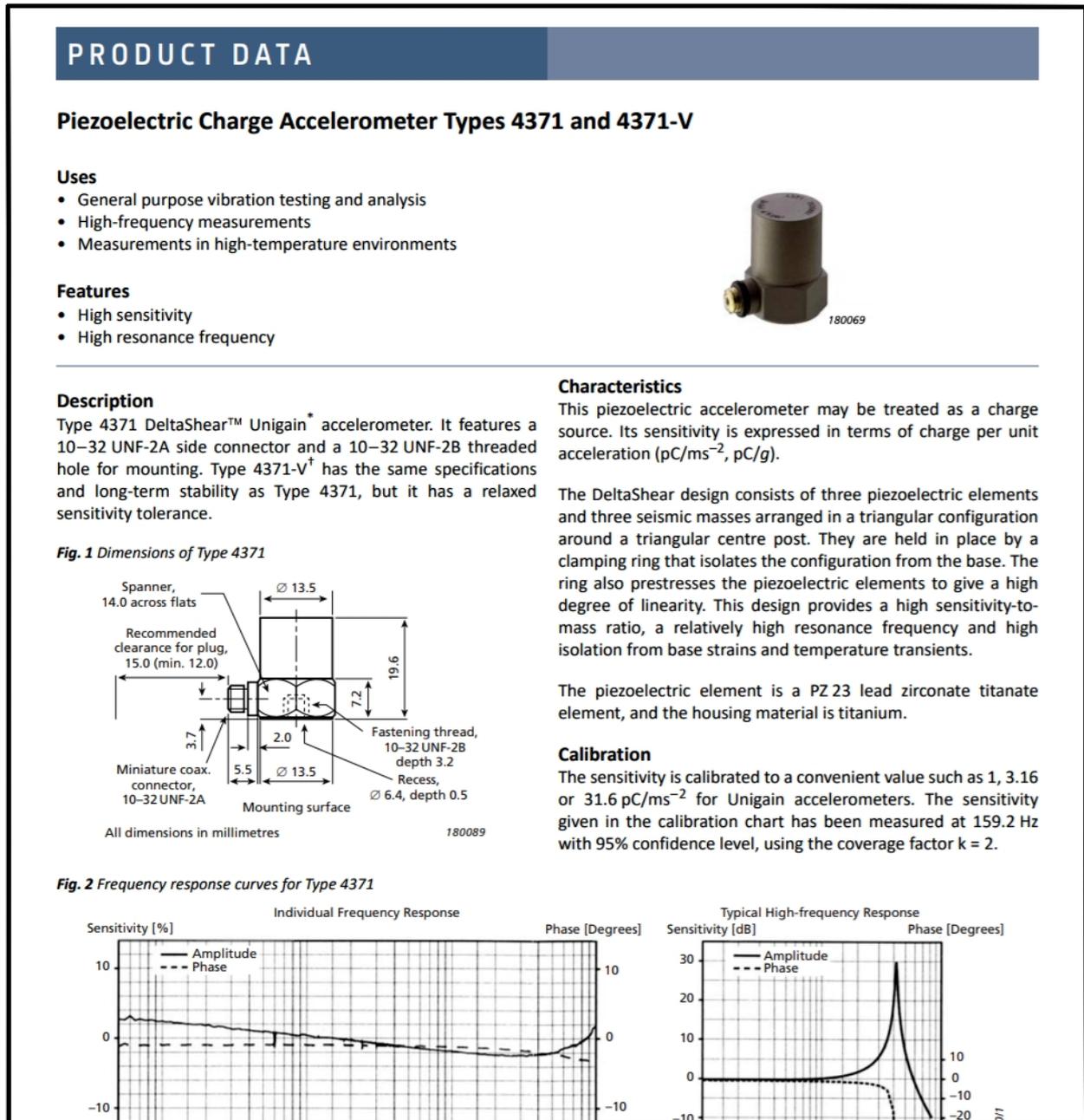
Product Summary **Specifications** Documents & Downloads

	English:	SI:	
PERFORMANCE			
Sensitivity ($\pm 10\%$)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s ²)	[1]
Measurement Range	± 50 g	± 490 m/s ²	
Frequency Range (± 3 dB)	30 to 600000 cpm	0.5 to 10000 Hz	[3]
Resonant Frequency	1500 kcpm	25 kHz	[4]
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	350 μ g	3434 μ m/sec ²	[4]
Non-Linearity	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	[2]
Transverse Sensitivity	$\leq 7\%$	$\leq 7\%$	
ENVIRONMENTAL			
Overload Limit (Shock)	5000 g pk	49050 m/s ² pk	
Temperature Range	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	
Temperature Response	See Graph %/°F	See Graph %/°F	[4]
Enclosure Rating	IP68	IP68	
ELECTRICAL			
Settling Time (within 1% of bias)	≤ 2.0 sec	≤ 2.0 sec	
Discharge Time Constant	≥ 0.3 sec	≥ 0.3 sec	
Excitation Voltage	18 to 28 VDC	18 to 28 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	<150 Ohm	<150 Ohm	
Output Bias Voltage	8 to 12 VDC	8 to 12 VDC	
Spectral Noise (10 Hz)	8 μ g/ \sqrt Hz	78.5 (μ m/sec ²)/ \sqrt Hz	[4]

Рисунок 11. Технические характеристики промышленного ООДВ типа 603C01 фирмы PCB PIEZOELECTRONICS (США)

Из спецификации видим, что у этого ООДВ поперечная чувствительность достигает 7%, как и приведённого выше ТОДВ этой же фирмы.

Поперечная чувствительность ООДВ других мировых производителей также лежит в таких же пределах, как и у ТОДВ. Например, на рисунке 12 приведены технические характеристики ООДВ типа 4371 фирмы BRUEL & KJEAR (Дания).



a)

Specifications – Charge Accelerometer Types 4371 and 4371-V			Ordering Information	
Type No.	4371		4371-V	
General				
Weight	g	11		
	oz	0.39		
Charge Sensitivity (at 159.2 Hz)	pC/ms ⁻²	1 ± 2%	1 ± 15%	
	pC/g	9.8 ± 2%	9.8 ± 15%	
Frequency Range (±10% limit)	Hz	0.1 to 12600		
Mounted Resonance Frequency	kHz	42		
Max. Transverse Sensitivity (at 30 Hz, 100 ms ⁻²)	%	<4		
Transverse Resonance Frequency	kHz	15		
Max. Operational Continuous Sinusoidal Acceleration (peak)	kms ⁻²	60		
	g	6000		
Electrical				
Residual Noise Level (measured with NEXUS Type 2692-001 in the specified frequency range)	mms ⁻²	2.4		
	mg	0.24		
Capacitance (excluding cable)	pF	1100		
Min. Leakage Resistance (at 20 °C)	GΩ	20		
Environmental				
Operating Temperature Range	°C	-74 to +250		
	°F	-101 to +482		
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°C	0.05*		
Temperature Transient Sensitivity (3 Hz Low. Lim. Freq. (-3 dB, 6 dB/octave))	ms ⁻² /°C	0.4		
	g/°F	0.02		
Base Strain Sensitivity (at 250 µε in the base plane)	ms ⁻² /µε	0.02		
	g/µε	0.002		
Magnetic Sensitivity (50 Hz, 0.038 T)	ms ⁻² /T	4		
	g/kG	0.04		
Max. Non-destructive Shock (± peak)	kms ⁻²	200		
	g	20000		
Mechanical				
Housing Material	Titanium ASTM Grade 2			
Piezoelectric Sensing Element	PZ 23			
Construction	DeltaShear			
Sealing	Welded			
Electrical Connector	10–32 UNF-2A			
Mounting	10–32 UNF-2B × 3.2 mm threaded hole			
Mounting Torque	Max.	Nm (lbf-in)	3.5 (31)	
	Min.		0.5 (4.4)	
* In the temperature range -25 to +125 °C (-13 to +257 °F)				
All values are typical at 25 °C (77 °F) unless measurement uncertainty is specified				
COMPLIANCE WITH STANDARDS				
Optional Accessories				
AO-0038-x-yyy*	Low-noise coaxial cable, 10–32 UNF connectors, 250 °C (482 °F)			
AO-0122-x-yyy*	Super low-noise cable, 10–32 UNF connectors, 250 °C (482 °F)			
AO-0231-x-yyy*	Super low-noise cable, 10–32 UNF to TNC, 180 °C (356 °F)			
AO-1382-x-yyy*	Flexible double-screened coaxial cable, 10–32 UNF connectors, 250 °C (482 °F)			
DB-0544	Probe with round tip, 10–32 UNF			
JJ-0207	Plug adaptor, 10–32 UNF to TNC (female)			
JP-0162	Plug adaptor, 10–32 UNF to TNC (male)			
QA-0013	Hexagonal key for 10–32 UNF studs			
QA-0029	Tap for 10–32 UNF thread			
UA-0078	Accelerometer accessory set			
UA-0553	Mechanical filter (set of five)			
UA-0642	Mounting magnet and two insulating discs			
UA-0866	Cementing stud, 10–32 UNF, dia. 14 mm (set of 25)			
YG-0150	Steel stud, double-ended with flange, 10–32 UNF, length 5.3 mm			
YI-0216	Beeswax for mounting			
YP-0080	Probe with sharp tip, 10–32 UNF			
YP-0150	Insulated stud, fully threaded, 10–32 UNF, length 13 mm			
YQ-2960	Set screw, 10–32 UNF × 1/2" (12.8 mm)			
YQ-2962	Set screw, 10–32 UNF × 5/16" (7.7 mm)			
Type 4294	Calibration Exciter			
Calibration Services				
ACC-M-CAI	Accredited initial calibration			
ACC-M-CAF	Accredited calibration			
ACC-M-CFF	Factory standard calibration			
ACC-M-CTF	Traceable calibration			

b)

Рисунок 12. Технические характеристики ООДВ типа 4371 фирмы BRUEL & KJEAR (Дания)

У этого датчика поперечная чувствительность достигает 4%. Причём она приводится только на одной частоте – 30Гц. Поведение поперечной чувствительности во всём рабочем диапазоне частот не приводится. Это кстати,

характерно для всех производителей вибродатчиков. Приводятся значения лишь для наилучшего режима.

Отечественные фирмы тоже выпускают вибродатчики, в том числе и ТОВД. К примеру, фирма МИКРОНИКС (Россия) выпускает ООДВ типа ВД10А [32], внешний вид которого и технические характеристики приведены на рисунке 13.

Датчик вибрации ВД10А

Назначение Технические параметры Скачать



Наименование параметра	Значение
Номинальное значение коэффициента преобразования на базовой частоте (159,159 Гц)	10 мВ*с ² /м
Рабочий диапазон измеряемых виброускорений	0-500 м/с ²
Рабочий диапазон частот	от 1 до 8000 Гц
Неравномерность частотной характеристики, не более	± 10%
Нелинейность амплитудной характеристики, не более	± 4%
Относительный коэффициент поперечного преобразования, не более	± 5%
Тип выхода	ICP
Ток потребления	4...20 мА
Назначенная наработка на отказ вибропреобразователей	15000 ч
Диапазон рабочих температур	от минус 50 до + 70°С
Уровень защиты	IP68
Масса, не более	30 г
Крепление	шпилька М5
Габаритные размеры, мм	19x19x28 (19x19x23 без шпильки)

Рисунок 13. Технические характеристики ООДВ типа ВД10А фирмы МИКРОНИКС (Россия)

Из этой таблицы видим, что поперечная чувствительность у этого датчика доходит до 5%. Её АЧХ также не приводится.

Некоторые известные изготовители вибродатчиков в последнее время перестали приводить в их спецификации значения поперечной чувствительности, что фактически означает признание, во-первых, невозможности обеспечения её низких значений, а, во-вторых, того, что существенное значение поперечной чувствительности значительно снижает общую точность измерения вибрации и качество выпускаемой продукции. Подробный анализ влияния поперечной чувствительности ТОДВ на точность измерения вибрации изложен ниже в главе 2.1.

На рисунках 14а, 14б и 14в приведены технические характеристики трёхосевых вибродатчиков фирмы PCB PIEZOTRONICS (США) из текущего каталога [33], из которых видно, что значения поперечной чувствительности изготовитель не приводит.

General Purpose Triaxial Accelerometers				
Photos Shown Actual Size	  			
Model Number	356A02	356A25	356A26	356A15
Sensitivity	10 mV/g	25 mV/g	50 mV/g	100 mV/g
Measurement Range	± 500 g pk	± 200 g pk	± 100 g pk	± 50 g pk
Broadband Resolution	0.0005 g rms	0.0002 grms	0.0002 grms	0.0002 g rms
Frequency Range (± 5%)	1 to 5k Hz	1 to 5k Hz	1 to 5k Hz	2 to 5k Hz
Resonant Frequency	≥ 25 kHz	≥ 25 kHz	≥ 25 kHz	≥ 25 kHz
Temperature Range	-65 to +250 °F -54 to +121 °C	-65 to +250 °F -54 to +121 °C	-65 to +250 °F -54 to +121 °C	-65 to +250 °F -54 to +121 °C
Sensing Element	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear
Electrical Connector	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack
Electrical Ground Isolation	No	No	No	No
Housing Material	Titanium	Titanium	Titanium	Titanium
Sealing	Hermetic	Hermetic	Hermetic	Hermetic
Weight	10.5 gm	10.5 gm	10.5 gm	10.5 gm
Size	0.55 in Cube 14 mm Cube	0.55 in Cube 14 mm Cube	0.55 in Cube 14 mm Cube	0.55 in Cube 14 mm Cube
Mounting	10-32 Thread	10-32 Thread	10-32 Thread	10-32 Thread
Supplied Accessories				
Cable	—	—	—	—
Wax/Adhesive	080A109/080A90	080A109	080A109/080A90	080A109/080A90
Adhesive Mounting Base	080A12	080A12	080A12	080A12
Mounting Stud/Screw	081B05, M081B05	081B05, M081B05	081B05, M081B05	081B05, M081B05
Additional Versions				
Built-in Low Pass Filter	356A66	—	—	—
Extended Low Frequency	—	—	—	356A14
Additional Accessories				
Magnetic Mounting Base	080A27	080A27	080A27	080A27
Removal Tool	039A10	039A10	039A10	039A10
Mating Cable Connector	AY	AY	AY	AY
Recommended Cable	034	034	034	034
Note				
[1] Frequency range ±1dB				

a)

General Purpose Triaxial Accelerometers

					
Model Number	356A16	356A17	354C02	354C03	356B18
Sensitivity	100 mV/g	500 mV/g	10 mV/g	100 mV/g	1000 mV/g
Measurement Range	± 50 g pk	± 10 g pk	± 500 g pk	± 50 g pk	± 5 g pk
Broadband Resolution	0.0001 g rms	0.00006 g rms	0.0005 g rms	0.0002 g rms	0.00005 g rms
Frequency Range (± 5%)	0.5 to 4.5k Hz	0.5 to 3k Hz	0.5 to 2k Hz	0.5 to 2k Hz	0.5 to 3k Hz
Resonant Frequency	≥ 25 kHz	≥ 14 kHz	≥ 12 kHz	≥ 12 kHz	≥ 20 kHz
Temperature Range	-65 to +176 °F -54 to +80 °C	-65 to +176 °F -54 to +80 °C	-65 to +250 °F -54 to +121 °C	-65 to +250 °F -54 to +121 °C	-20 to +170 °F -29 to +77 °C
Sensing Element	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear
Electrical Connector	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack
Electrical Ground Isolation	No	No	Yes	Yes	No
Housing Material	Anodized Aluminum	Anodized Aluminum	Titanium	Titanium	Anodized Aluminum
Sealing	Epoxy	Epoxy	Hermetic	Hermetic	Epoxy
Weight	7.4 gm	9.3 gm	15.5 gm	15.5 gm	25 gm
Size	0.55 in Cube 14 mm Cube	0.55 in Cube 14 mm Cube	13/16 x 0.45 in 13/16 in x 11.4 mm	13/16 x 0.45 in 13/16 in x 11.4 mm	0.8 in Cube 20.3 mm Cube
Mounting	10-32 Thread	5-40 Thread	Through Hole	Through Hole	10-32 Thread
Supplied Accessories					
Wax	080A109	080A109	080A109	080A109	080A109
Adhesive Mounting Base	080A12	080A145	—	—	080A68
Mounting Stud/Screw	081B05, M081B05	081A27, M081A27	081B60	081B60	081B05, M081B05
Additional Version					
Metric Mounting Thread	—	—	M354C02	M354C03	—
Additional Accessories					
Magnetic Mounting Base	080A27	—	080M162	080M162	080A27
Removal Tool	039A10	039A10	—	—	—
Mating Cable Connector	AY	AY	AY	AY	AY
Recommended Cable	034	034	034	034	034

General Purpose Triaxial Accelerometers			
Photos Shown 3/4 Size			
Model Number	356A70	340A50	356A71
Sensitivity	2.7 pC/g	2.7 pC/g	10 pC/g
Measurement Range	± 500 g pk	± 1000 g pk	± 500 g pk
Broadband Resolution	[1]	[1]	[1]
Frequency Range (± 5%)	5 kHz [2]	8 kHz [2]	5 kHz [2]
Resonant Frequency	≥ 35 kHz	≥ 25 kHz	≥ 25 kHz
Temperature Range	-94 to +490 °F -70 to +254 °C	-94 to +500 °F -70 to +260 °C	-95 to +490 °F -70 to +254 °C
Sensing Element	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear
Electrical Connector	5-44 Coaxial Jack	M3 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack
Electrical Ground Isolation	No	No	No
Housing Material	Titanium	Titanium	Titanium
Sealing	Hermetic	Hermetic	Hermetic
Weight	7.9 gm	11.0 gm	22.7 gm
Size	0.4 x 0.73 x 0.9 in 10.2 x 18.5 x 22.9 mm	0.4 x 0.85 x 0.5 in 10.2 x 21.6 x 12.7 mm	0.5 x 0.96 x 1.0 in 12.7 x 24.4 x 25.4 mm
Mounting	Through Hole	Through Hole	Through Hole
Supplied Accessories			
Wax/Adhesive	080A90	080A109/080A90	080A90
Adhesive Mounting Base	—	080A147	080A170
Mounting Stud/Screw	081A46	081A95	081A94
Additional Version			
Metric Mounting Thread	M356A70	—	M356A71
Additional Accessories			
Mating Cable Connectors	AF, AG	EP	EB
Recommended Cables	003	003	003
Notes			
[1] Resolution is dependent upon cable length and signal conditioner [2] Low frequency response determined by external electronics			

B)

Рисунок 14. Технические характеристики промышленных ТОДВ фирмы PCB PIEZOTRONICS (США) из текущего каталога

1.2. Особенности применения ТОДВ в виброизмерительных системах

Выше отмечено, что все измерительные вибропреобразователи, как ООДВ, так и ТОДВ, обладают существенной паразитной поперечной чувствительностью, то есть, другими словами, значительным относительным коэффициентом поперечного преобразования.

Ниже показано, что при неблагоприятных условиях, когда, например, вибрационные составляющие в поперечных направлениях значительно превышают таковые в направлении измерительных осей датчика, погрешность измерения может достигать недопустимых значений, приводящих к невозможности оценки уровня и направления вектора вибрации с требуемой точностью. Это может нарушить правильность функционирования систем вибрационного контроля, работы автоматических систем балансировки и приводить к другим нежелательным последствиям, в том числе их разрушению и даже катастрофам.

Наличие у вибродатчиков поперечной чувствительности – это не единственная проблема. Ещё один недостаток заключается в том, что у большинства ТОДВ отсутствует единая измерительная точка. Физически они измеряют вибрацию в трёх разнесённых друг относительно друга точках.

В некоторых случаях, когда, например длина волны вибрации сравнима с разносом измерительных точек, точное измерение вектора вибрации в одной точке становится невозможным.

Для устранения этого недостатка необходима конструкция ТОДВ с одним инерционным элементом, одновременно воздействующим на три чувствительные системы. Такая структура чувствительной системы не только обеспечивает измерение вибрации в одной точке, находящейся в центре масс инерционного элемента, но и полностью симметрична во всех измерительных направлениях, то

есть имеет одинаковые параметры по всем измерительным осям. Однако, промышленные ТОДВ, измеряющие в одной точке, вследствие того, что имеют несимметричную конструкцию чувствительной системы, а также вследствие технологических ограничений на точность их сборки и калибровки не могут обеспечить высокой точности измерений.

Метод, представленный в данной работе, позволяет преодолеть этот недостаток и создавать точные ТОДВ с единой измерительной точкой и произвольным исходным базисом векторов чувствительности и при этом ослабленными требованиями к технологической точности сборки их измерительной системы.

В настоящее время ТОДВ нашли применение в широком спектре измерительных систем и приборов. Они применяются в качестве первичных вибропреобразователей в виброметрах, системах вибрационного контроля технического состояния роторных установок, авиадвигателей, балансировочных станках и др. Как указано выше, одной из наиболее сложных задач измерения многомерной вибрации является задача исследования многомерных колебаний в нелинейных системах, в которых возбуждаются опасные резонансы, приводящие не только к нарушению работоспособности этих систем, но и к катастрофам. На рисунке 15 на примере экспериментальной механической модели твёрдого тела в нелинейной резонансной системе показана схема проведения измерений многомерной вибрации в ортогональной системе координат [1].

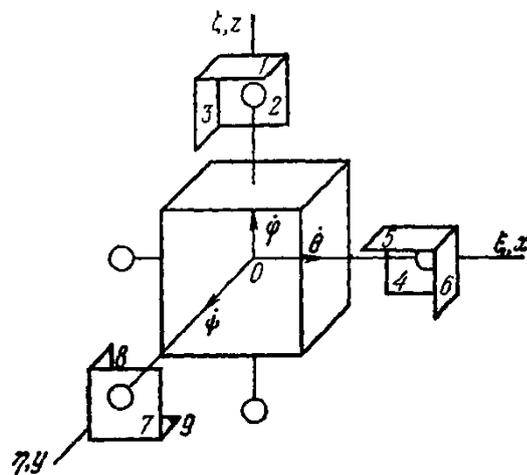


Рисунок 15. Схема измерений вибрации в нелинейной резонансной системе

Твёрдое тело получает возбуждение в направлении вертикальной оси Oz . При этом тело совершает колебания в направлении нескольких координат $\xi, \eta, \zeta, \theta, \psi, \phi$. Измерительные датчики здесь представлены своими плоскостями 1, 2, ..., 9, отображающими ортогональные вектора чувствительности.

В таких системах требования к точности измерения вектора вибрации наиболее высоки, поскольку погрешности измерений на резонансах значительно возрастают по сравнению с линейными безрезонансными системами. Поэтому идеальный датчик вибрации должен обладать измерительным базисом, точно расположенным в ортогональных направлениях, то есть с нулевыми поперечными чувствительностями по измерительным осям.

Ещё одной наглядной иллюстрацией проблем применения ТОДВ, поднятых в данной работе, является их использование в системах балансировки вращающихся узлов машин и механизмов. Рассмотрим это подробнее.

Как известно, одной из основных задач улучшения качества и надёжности изделий машиностроения является борьба с вибрацией. Вибрация является одной из самых важных причин износа машин, шума, снижения производительности и повышения утомляемости обслуживающего персонала. Усталость материалов от статических и, особенно, от динамических нагрузок – основная причина разрушения деталей и отказов машин во многих отраслях машиностроения, например, усталостное выкрашивание, трещины и сколы на зубьях шестерён и подшипников, наклёп на шлицах и посадочных поверхностях, контактные схватывания и др. Всё это подтверждает, что борьбу с вибрацией машин следует начинать с уменьшения дисбалансов изделий.

Рассмотрим применение ТОВД в составе измерительного устройства (ИУ) современных балансировочных станков (БС).

БС состоит из механической системы (МС), содержащей в качестве основных элементов станину станка и опоры для установки ротора и ИУ.

ИУ выполняет следующие основные функции: преобразует колебания МС с ротором или силу давления от дисбаланса на опоры системы в электрические

сигналы с помощью датчиков вибрации; разделяет плоскости коррекции; выделяет сигнал, пропорциональный дисбалансу, и определяет значение, а также угол дисбаланса относительно каких-либо фиксированных отметок на роторе. Несмотря на различия в способах обработки сигналов дисбаланса в качестве первичных преобразователей, вырабатывающих сигналы, пропорциональные величине дисбаланса, используются датчики вибрации, установленные на опорах. В БС первого поколения в качестве датчиков вибрации использовались одноосевые пьезоакселерометры. Однако измерение вибрации в одном направлении не только усложняло процесс балансировки, но и не позволяло получить высокую точность балансировки. Поэтому в современных БС используются многоосевые датчики вибрации, в основном ТОДВ, то есть трёхосевые (трёхкоординатные), измеряющие вектор вибрации в ортогональном измерительном базисе. Например, в приборе для пространственного измерения вибрации балансировки роторов «Балком-3D» используются два трёхкоординатных вибродатчика [34].

Основные характеристики этого БС:

- число плоскостей коррекции при балансировке1,2;
- число каналов измерения вибрации6;
- диапазон измерения среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости, мм/секот 0.2 до 50;
- частотный диапазон измерения СКЗ виброскорости, Гцот 5 до 200;
- пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения СКЗ виброскорости на базовой частоте (80 Гц) в рабочем диапазоне частот, мм/сек $\pm(0.1 + 0.1V_{и})$,
где $V_{и}$ – измеренное значение СКЗ виброскорости.

Из приведённых характеристик следует, что основная относительная погрешность измерения СКЗ в этом приборе лежит в диапазоне от 10,2% до 60%. При такой погрешности измерения невозможно обеспечить высокую точность и высокую скорость балансировки объекта.

Существенный вклад в погрешность измерения вносит поперечная чувствительность первичных преобразователей. Подробный анализ влияния поперечной чувствительности датчиков вибрации на точность виброизмерений автором изложен в работе [35] и далее в разделе 2.

Автором по заданию МСПО им. Октябрьской революции (г. Минск) был разработан и успешно испытан прибор ЭИБ-1, с помощью которого были проведены исследования вибрационных характеристик несущей системы дорезонансных балансировочных станков. В этом приборе был на практике опробован предлагаемый в данной работе метод управления векторами чувствительности датчиков в двух плоскостях. Подробное описание этого прибора приведено в главе 3.

Рассмотрим далее, из чего складывается погрешность метода балансировки, определяющая в конечном счёте остаточный дисбаланс балансируемого объекта и фактически класс точности БС.

Любой метод уравнивания включает в себя определение вибрационных параметров некоторых точек балансировочного устройства технологической системы или самого ротора, расчёт неуравновешенных масс в соответствии с принятой моделью ротора и корректировку масс в заданных плоскостях. На погрешность балансировки, кроме погрешностей, возникающих вследствие неточностей станка, существенное влияние оказывает погрешность определения вибрационных параметров, то есть отклонение результата измерений (значения и угла) от истинного значения. Эта погрешность напрямую связана с метрологическими характеристиками входящих в ИУ первичных вибропреобразователей и может достигать недопустимо больших значений, существенно усложняющих процесс балансировки и снижающих его точность.

При измерении вибрации в опорах БС с помощью одноосевых вибродатчиков ИУ вычисляет лишь уровень вибрации, соответствующий проекции вектора вибрации на измерительную ось датчика, что может привести к недопустимо большой погрешности измерения дисбаланса. Такая структура применяется лишь в БС низкого класса точности. В современных БС высокого класса точности

применяются многоосевые датчики вибрации, позволяющие вычислить пространственный вектор вибрации в нужных точках БС. Наибольшее распространение получили ТОВД с ортогональным измерительным базисом.

Особенно актуальна проблема точности измерения вибрации в автоматических БС высокого класса точности (АБС). Наиболее совершенными АБС в настоящее время являются АБС с применением лазеров. Лазерные методы измерения вибрации и влияние дестабилизирующих факторов на точность описаны в работах [36-41]. Ряд зарубежных фирм выпускают балансировочные установки для уравнивания вращающихся роторов с применением лазеров [42-45].

На рисунке 16 представлена обобщённая структурная схема АБС.

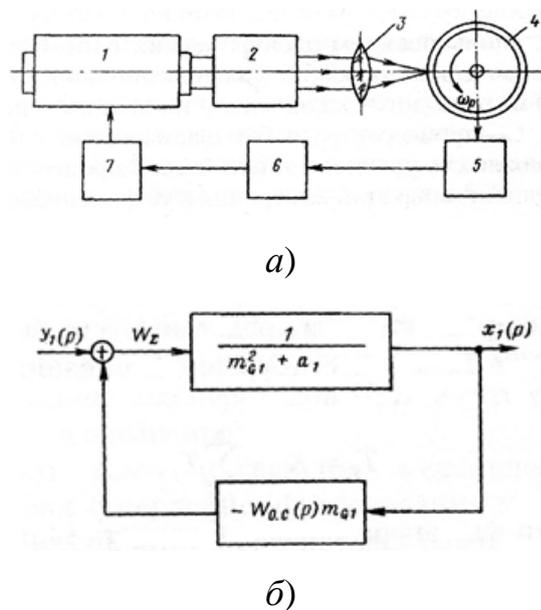


Рисунок 16. Структурная схема АБС:

а - структурная схема; *б* - звено скоростной обратной связи

Рассмотрим в качестве примера структуру и принципы работы АБС с использованием лазеров. Схема автомата включает в себя оптический квантовый генератор 1 на неодимовом стекле или синтетическом рубине, фокусирующую оптику 2 и 3, обеспечивающую концентрацию светового луча на одной из плоскостей исправления балансируемого ротора 4, устанавливаемого в

механических опорах, электрически связанных с датчиками вибрации 5. Блок преобразования сигналов 6 включает в себя согласующие усилители, фильтры и фазовращатели для обеспечения преобразования, усиления и настройки на цикл уравнивания ротора. Блок синхронизации 7 обеспечивает совпадение момента прохождения «тяжёлого места» вращающегося ротора с моментом излучения лазера. Особенностью рассматриваемого АБС является отсутствие обратной связи, управляющей величиной снимаемой неуравновешенной массы балансируемого ротора пропорционально остаточной допустимой неуравновешенности. Эту связь устанавливает оператор-балансировщик, используя для этой цели индикаторы. Угловое положение неуравновешенной массы на поверхности балансируемого тела при его вращении устанавливается автоматически с помощью блока синхронизатора 7, а величина остаточной неуравновешенности после каждого цикла устранения высчитывается оператором в соответствующем масштабе.

В этом АБС оператор оценивает остаточный дисбаланс и число циклов балансировки на основе сигналов текущего дисбаланса, поступающих от датчиков вибрации. Очевидно, что от точности измерения вибрации этими датчиками зависят как остаточный дисбаланс по окончании балансировки, то есть точность, так и её длительность.

Существует много других АБС с применением лазера, таких как АБС на основе лазера, работающего в режиме модулированной добротности, АБС на основе лазера, работающего в режиме плавного изменения внутренних потерь в резонаторе. Все они используют в качестве первичных преобразователей, вырабатывающих сигналы текущего дисбаланса, датчики вибрации, и в основном ТОДВ. Совершенствование их конструкции и улучшение метрологических параметров необходимы для дальнейшего повышения класса точности и ускорения процесса балансировки.

Выводы по главе 1

1. Из представленных выше материалов следует, что промышленные одноосевые и многоосевые датчики вибрации мировых лидеров обладают поперечной чувствительностью, которая составляет весьма значительную величину.

2. На различных примерах механических систем с вибрирующими узлами, показано, что поперечная чувствительность оказывает существенное негативное влияние на точность измерения вибрации, что приводит к снижению эффективности и даже нарушению работоспособности различных виброизмерительных систем.

3. Анализ технических характеристик выпускаемых в настоящее время многоосевых вибродатчиков показал, что в настоящее время весьма актуальными являются поднятые в данной работе задачи исследования влияния поперечной чувствительности ТОДВ на точность измерения вибрации и разработка методов и средств электронной компенсации её влияния на точность измерений.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Влияние поперечных компонентов движения на погрешность измерения вибрации

Наличие у ТОДВ поперечной чувствительности зачастую приводит к значительно бõльшим погрешностям измерений, чем может показаться на первый взгляд. В табл.1 [46] приведены технические характеристики пьезоакселерометров фирмы Bruel&Kjaer, Дания. Из неё видно, что даже у вибродатчиков одного из мировых лидеров поперечная чувствительность достигает значений 4 – 5%.

Обычно влиянием поперечной чувствительности на практике пренебрегают, вычисляя вектор вибрации и его ортогональные составляющие по значениям осевых чувствительностей ТОДВ. Ниже показано, что наличие поперечной чувствительности может значительно снизить точность измерения вектора вибрации. Это объясняется не только наличием указанной в паспорте ТОДВ поперечной чувствительности, что само по себе существенно. Проблема усугубляется ещё и наличием поперечных резонансов, причём вследствие меньшей жёсткости измерительной системы пьезоакселерометров в поперечном направлении их частоты оказываются значительно ниже таковых в направлении измерительных осей, что приводит не только к росту погрешности измерений, но и к существенному сужению рабочего диапазона частот.

Известно, что у пьезоакселерометров частота поперечного резонанса составляет величину порядка $1/3 - 1/5$ от частоты основного механического резонанса, обычно приводимой в паспорте ТОДВ, что хорошо видно из

характеристик различных пьезодатчиков, приведённых, например, в таблице 1. Сравнительные АЧХ одного и того же пьезодатчика в основном и поперечном направлениях показаны в [47]. Наши измерения также подтверждают это. Кроме того, вследствие более низкой добротности, обусловленной значительным снижением жёсткости измерительной системы в поперечных направлениях, деформация АЧХ начинается значительно раньше – с частот порядка $1/5 - 1/8$ от частоты поперечного резонанса. Таким образом, реальный диапазон рабочих частот такого ТОДВ оказывается значительно уже указанного в его паспортных данных. Покажем это на примере промышленного ТОДВ одного из мировых лидеров.

Таблица 1. Технические характеристики пьезоакселерометров фирмы Bruel&Kjaer, Дания

СПЕЦИФИКАЦИЯ ¹							
		4378 4379	8318-C	4374 ¹³	4321 4321V	4326A 4326A-001	8309
Вес	г	175	470	0,65 ¹⁰	55	13/17	3 ¹⁰
Чувствительность по заряду для Uni-Gain-DeltaShear типов ^{2, 5}	пКл/ м*с ⁻²	31,6±2%	-	-	1±2%	-	-
	пКл/г	310±2%	-	-	9,8±2%	-	-
Чувствительность по напряжению для Uni-Gain-DeltaShear типов ⁵	мВ/м*с ⁻²	26	-	-	0,8	-	-
	мВ/г	260	-	-	8	-	-
Чувствительность по заряду для DeltaShear "V" типов	пКл/ м*с ⁻²	-	68±15%	0,11	1±15%	0,3	0,004
	пКл/г	-	666±15%	1,1	9,8±15%	3	0,04
Чувствительность по напряжению DeltaShear "V" типов	мВ/ м*с ⁻²	-	-	0,18	0,8	-	0,04
	мВ/г	-	-	1,8	8	-	0,4
Резонансная частота ^{3, 6}	кГц	13	6,5	85	40	>20	180
Рабочий частотный диапазон ^{5, 6, 9}	5% Гц	0,2-2800	10% 0,1-1000	1-18500	0,2-8700 ¹¹	-	1-39000
	10% Гц	0,1-3900	3 дБ 0,06-1250	1-26000	0,1-12000 ¹¹	От 1 Гц до X: 9, Y: 8 Z: 16 кГц	1-54000
Емкость ^{5, 7}	пФ	1200	-	600	1200	1000	100
Макс чувствительность ^{1, 5, 8} поперечная	%	<4	<5	<5	<4	<5	<5
Резонансная частота поперечных колеб.	кГц	3,8	1,6	21	14	>20	28

Из таблицы 1 видим, что частота основного резонанса ТОДВ типа 4321V равна 40 кГц, его рабочий диапазон частот равен 0,2– 8700 Гц, а частота поперечного резонанса равна 14 кГц. На практике вибрационный процесс обычно имеет сложный пространственный характер, при котором имеются значительные

составляющие вибрации в поперечных направлениях. В этих случаях результирующая АЧХ и погрешность измерений определяются не только характеристиками в направлении осевых чувствительностей, но и таковыми в поперечных направлениях.

Рассмотрим наиболее общий случай, встречающийся на практике, когда вектор вибрации имеет существенную проекцию на измерительные оси в поперечном направлении. При этом к указанной в табл.1 основной погрешности измерений добавится и погрешность, определяемая поперечной чувствительностью. Вследствие этого результирующая погрешность измерений вектора вибрации частот значительно увеличится.

Если составляющие вибрации в основном и поперечном направлениях равны, то результирующая погрешность измерения вектора вибрации на низких частотах будет равна сумме осевой (паспортной) погрешности и поперечной чувствительности, то есть в нашем случае $2\% + 4\% = 6\%$.

Положим, к примеру, что составляющие вибрации в поперечном направлении превышают таковые в основном направлении в 10 раз. Тогда результирующая погрешность измерения вектора вибрации на низких частотах будет равна сумме осевой и умноженной на 10 поперечной чувствительности, то есть

$$2\% + (10 \times 4\%) = 42\%$$

При соотношении в 100 раз общая погрешность будет равна

$$2\% + (100 \times 4\%) = 402\%,$$

и т. д.

Таким образом, в данном случае результирующая погрешность будет определяться не только осевой (паспортной) погрешностью чувствительности, а должна вычисляться по формуле [35]:

$$\xi_{\Sigma_{\text{НЧ}}} = \xi_0 + \frac{a_{\text{п}}}{a_0} S_{\text{п}}, \quad (1)$$

где

$\xi_{\Sigma_{\text{НЧ}}}$ – результирующая погрешность в НЧ (дорезонансной) области;

ξ_0 – паспортная погрешность осевой чувствительности;

$a_{\text{п}}$ – проекция вектора вибрации на поперечное направление;

a_0 – проекция вектора вибрации на ось чувствительности;

$S_{\text{п}}$ – поперечная чувствительность;

$\frac{a_{\text{п}}}{a_0}$ – соотношение составляющих вибрации в поперечном

и основном направлениях;

Необходимо отметить, что приведённая выше формула справедлива лишь для низких частот, то есть на частотах, значительно ниже поперечного резонанса. Необходимо также учитывать то, что поперечные резонансы ТОВД, как известно, лежат внутри рабочего диапазона частот датчика и занимают весьма значительную полосу частот. Для учёта влияния попадающих в область поперечных резонансов ТОВД спектральных составляющих вибрации на погрешность измерений в формуле (1) надо добавить ещё один частотно-зависимый множитель, учитывающий АЧХ поперечного резонанса. Таким образом, предлагается следующая обобщённая формула для оценки результирующей погрешности [35]:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_0 + \frac{a_{\text{п}}}{a_0} S_{\text{п}} [1 + \Psi(f)\gamma], \quad (2)$$

где

ξ_{Σ} – результирующая погрешность измерений в рабочем диапазоне частот с учётом влияния поперечного резонанса;

$\Psi(f)$ – коэффициент, отражающий подъём АЧХ на частотах поперечного резонанса;

γ – коэффициент от 0 до 1, учитывающий спектральный состав
 вибрации, попадающий в полосу резонанса;
 f - частота;

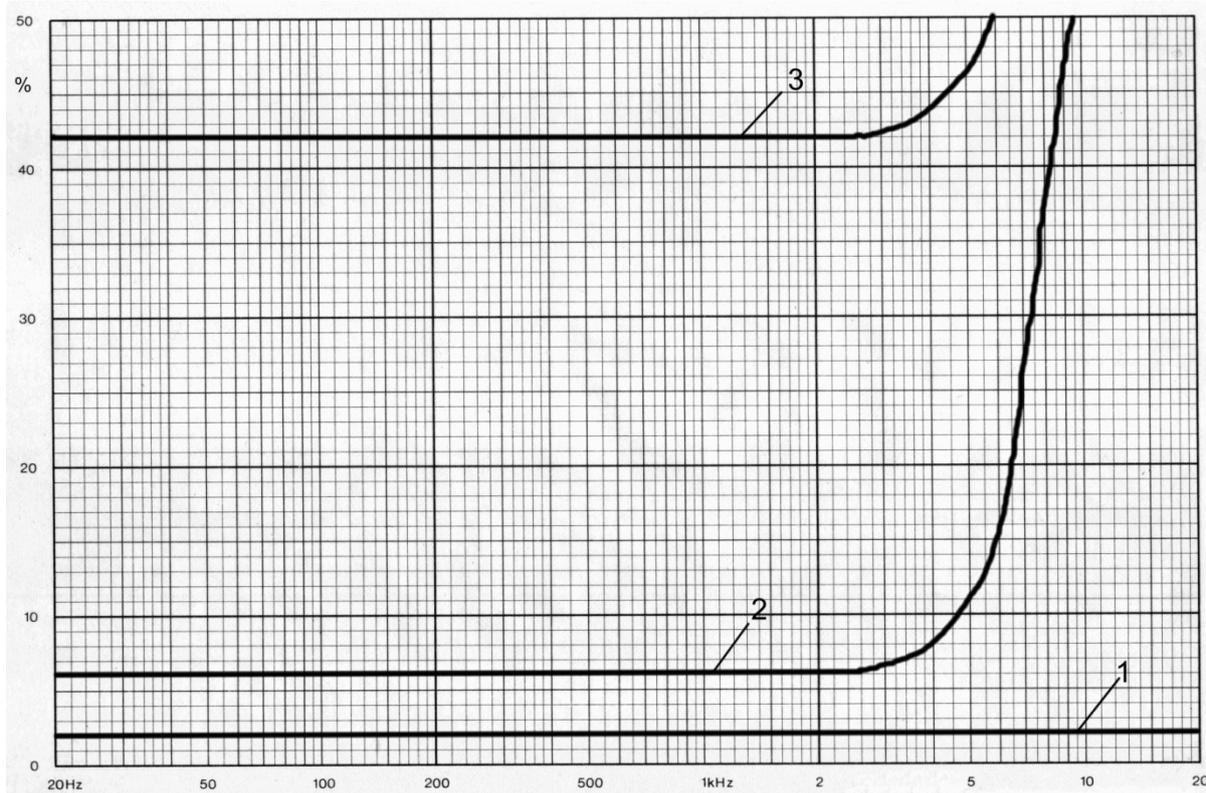
Коэффициент γ равен 1 если спектр вибрации полностью попадает в полосу резонанса, и равен 0 в случае, когда он весь лежит ниже него.

Эта формула справедлива как для одноосевых датчиков вибрации, так и для многоосевых.

Теперь для случая, приведённого выше, оценим влияние поперечного резонанса на результирующую погрешность на примере того же ТОДВ типа 4321 фирмы Bruel & Kjaer (Дания).

Положим, к примеру, что подъём АЧХ на частоте поперечного резонанса этого ТОДВ равен 20 дБ (на практике он может доходить до 30дБ и выше). Тогда из формулы (2) следует, что результирующая погрешность измерений в резонансном диапазоне частот при $\gamma = 1$ для соотношений составляющих вибрации в поперечном и основном направлениях, равных 1:1, 10:1 и 100:1 достигнет соответственно максимальных значений 42%, 402% и 4002%. В дорезонансном диапазоне частот (при $\gamma = 0$) она соответственно равна 6%, 42% и 402%.

Эти результаты для трёх значений $a_{\text{п}}/a_0$ представлены на рисунке 17 [35]:



$$1 - \frac{a_{\text{п}}}{a_0} = 0 \quad 2 - \frac{a_{\text{п}}}{a_0} = 1 \quad 3 - \frac{a_{\text{п}}}{a_0} = 10$$

Рисунок 17. АЧХ погрешности измерения вибрации для различных соотношений составляющих вибрации в основном и поперечном направлениях.

Из формулы (2) и графиков на рисунке 17 следует, что погрешность измерений в реальной ситуации может практически полностью определяться характеристиками ТОДВ в поперечном направлении и значительно превышать такую при отсутствии поперечных составляющих вибрации (прямая 1).

Теперь рассмотрим влияние поперечной чувствительности на реальный рабочий диапазон частот на примере этого же ТОДВ. Поскольку линейность АЧХ в поперечном направлении (вследствие меньшей жёсткости) наблюдается у него лишь до частот примерно $1/6 \times 14000 \approx 2300$ Гц, то реальный диапазон рабочих частот только за счёт этого будет почти в 4 раза уже указанного в заводской спецификации (8700 Гц). Очевидно, что измерение вектора пространственной

вибрации во всём указанном в паспортных данных рабочем диапазоне частот будет производиться с недопустимо большой погрешностью, то есть оно фактически невозможно.

Далее в данной работе рассмотрены математические принципы функционирования и результаты практической реализации электронных ортонормализующих предусилителей-компенсаторов (далее ОНПК), работающих совместно с ТОДВ различной конструкции, измеряющими в квазиортогональном и косоугольном базисах. В наших ранних работах и в некоторых ссылках в данной работе эти устройства называются “ортогонализаторами” или “ортонормализаторами”. Но, поскольку физически они не оказывают влияния на исходные вектора чувствительности самих ТОДВ, а фактически производят компенсацию указанных выше погрешностей, то более правильно называть их ортонормализующими предусилителями-компенсаторами (ОНПК), что мы и будем по возможности в дальнейшем делать.

2.2. Анализ векторов чувствительности ТОДВ с квазиортогональным базисом измерительных осей

2.2.1. Система векторов чувствительности и математические принципы преобразований

Прежде всего, необходимо отметить, что вопросам метрологии вибрационных измерений посвящено большое число публикаций. В работах [46-50] рассмотрены фундаментальные принципы преобразования сигналов датчиками вибрации различных типов, основными из которых в настоящее время являются пьезоакселерометры. Несмотря на различие в физических принципах генерации электрических сигналов, соответствующих уровню вибрации, к ним применимы положения анализа базисов векторов чувствительности, изложенные ниже.

Для облегчения понимания метода управления эквивалентными векторами чувствительности вибродатчиков рассмотрим наиболее общий случай, встречающийся в практике виброизмерений, когда вектор чувствительности S датчика не совпадает с направлением его паспортной измерительной оси. Кроме того, при установке датчика на объект возможно отклонение измерительной оси O_z датчика от заданного измерительного направления O'_z (рисунок 18) [51].

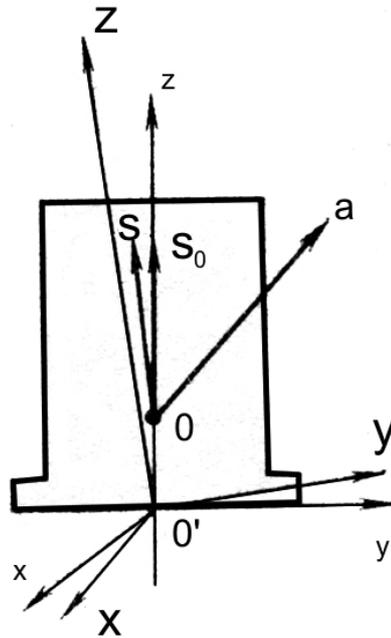


Рисунок 18. Отклонение измерительной оси O_z датчика от заданного измерительного направления.

Здесь:

S_0 - вектор основной чувствительности датчика; O - измеряющая точка датчика, совмещённая с точкой измерения;

$OXYZ$ - система координат, определяемая заданными измерительными направлениями.

Таким образом, вектор чувствительности S имеет результирующие составляющие вдоль осей $O'X$ и $O'Y$:

$$S = S_x X + S_y Y + S_z Z \quad (3)$$

Если, к примеру, измеряется поступательное ускорение a , то, поскольку с достаточной для практики точностью $S_z \approx S_0$, результат измерения будет выглядеть следующим образом [51]:

$$a'_z \approx a_z + \frac{S_x}{S_0} a_x + \frac{S_y}{S_0} a_y = a_z + k_x a_x + k_y a_y, \quad (4)$$

где k_x, k_y – результирующие коэффициенты относительной поперечной чувствительности к ускорению вдоль осей Ox и Oy (результирующие коэффициенты влияния). Последние два члена определяют абсолютную погрешность измерения Δa_z , обусловленную влиянием компонентов виброускорения, перпендикулярных заданному измерительному направлению:

$$\Delta a_z = a'_z - a_z = k_x a_x + k_y a_y \quad (5)$$

Относительную погрешность измерения можно определить по одной из следующих формул [51]:

$$\alpha_z = \max\left(k_x \frac{a_x^*}{a_z^*}, k_y \frac{a_y^*}{a_z^*}\right); \quad (6)$$

$$\alpha_z = \left[\left(k_x \frac{a_x^*}{a_z^*}\right)^2 + \left(k_y \frac{a_y^*}{a_z^*}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где a_x^*, a_y^*, a_z^* – среднеквадратичные, средние по модулю или пиковые значения измеряемых величин (представляющие параметры).

Обусловленная влиянием поперечных компонентов движения погрешность измерения складывается из *инструментальной* (датчика) и *установленной*. Если k_x и k_y – коэффициенты относительной поперечной чувствительности датчика вдоль собственных осей O_x и O_y и известен наклон измерительной оси O_z датчика относительно заданного измерительного направления (φ_x, φ_y) , то результирующие коэффициенты влияния k_x и k_y можно оценить по следующим выражениям:

$$k_x \approx k_x + \varphi_y; \quad (8)$$

$$k_y \approx k_y - \varphi_x, \quad (9)$$

где φ_x и φ_y - углы поворота (в радианах) измерительной оси 0_z датчика относительно осей $0'X$ и $0'Y$, положительные при повороте против часовой стрелки. Для определения погрешности измерений по результатам измерений ускорение точки 0 необходимо измерять с помощью ТОДВ. В этом случае результаты измерения можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} a'_x = a_x + k_{1y} a_y + k_{1z} a_z \\ a'_y = k_{2y} a_x + a_y + k_{2z} a_z \\ a'_z = k_{3y} a_x + k_{3y} a_y + a_z \end{cases} \quad (10)$$

где индексы 1, 2 и 3 при коэффициентах влияния относятся соответственно к датчикам, измеряющим ускорения вдоль осей $0X$, $0Y$ и $0Z$.

Найденные эмпирически относительные погрешности измерения можно оценить по следующим выражениям [51]:

$$\begin{cases} \alpha_X^{\text{э}} = \left[\left(k_{1y} \frac{a'_{y^*}}{a'_{x^*}} \right)^2 + \left(k_{1z} \frac{a'_{z^*}}{a'_{x^*}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_Y^{\text{э}} = \left[\left(k_{2x} \frac{a'_{x^*}}{a'_{y^*}} \right)^2 + \left(k_{2z} \frac{a'_{z^*}}{a'_{y^*}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_Z^{\text{э}} = \left[\left(k_{3x} \frac{a'_{x^*}}{a'_{z^*}} \right)^2 + \left(k_{3y} \frac{a'_{y^*}}{a'_{z^*}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (11)$$

2.2.2. Математические принципы преобразований, анализ реализуемости предложенного метода и сходимость векторов чувствительности

Представленные в данной работе результаты исследований основаны на теории линейных преобразований сигналов в многоканальных измерительных системах, наиболее наглядно представляемых с помощью теории матриц. Вначале рассмотрим эти принципы и их реализацию на примере ТОДВ с квазиортогональным базисом измерительных осей, а затем на обобщённом варианте ТОДВ с косоугольным базисом измерительных осей.

Рассмотрим систему векторов чувствительности промышленного ТОДВ с квазиортогональной системой измерительных осей, подключённого к трёхканальному ОНПК:

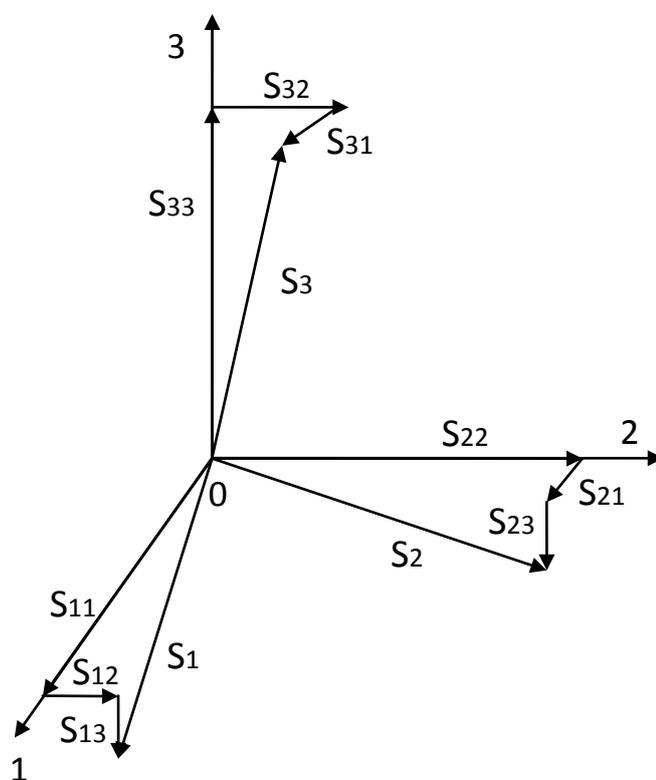


Рисунок 19. Представление векторов чувствительности ТОДВ через составляющие по измерительным осям

Здесь:

S_1, S_2, S_3 - исходные векторы чувствительности ТОДВ,

S_{ij} - составляющие векторов чувствительности S_1, S_2, S_3 ,

где 'i' - номер вектора чувствительности, 'j' - номер измерительной оси, вдоль которой он направлен,

0, 1, 2, 3- ортогональная система координат;

Для простоты и наглядности векторы S_1, S_2, S_3 изображены одинаковой длины.

При измерении виброускорения:

$$\vec{a} = a_1\vec{n}_1 + a_2\vec{n}_2 + a_3\vec{n}_3, \quad (12)$$

каждой измерительной оси ТОДВ соответствует свой выходной сигнал предусилителя U_i , который пропорционален скалярному произведению векторов \vec{S}_i и \vec{a} :

$$\begin{cases} U_1 = \vec{S}_1 \vec{a} = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 \\ U_2 = \vec{S}_2 \vec{a} = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 \\ U_3 = \vec{S}_3 \vec{a} = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3 \end{cases} \quad (13)$$

Это может быть также представлено в матричном виде:

$$U = S a, \quad (14)$$

где

U - вектор-столбец выходных сигналов,

a - вектор-столбец виброускорения,

S - матрица чувствительности;

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Недиагональные элементы S - матрицы представляют собой паразитные чувствительности к поперечным направлениям. Диагональные элементы - это ортогональные составляющие векторов чувствительности, направленные вдоль измерительных осей датчика.

Для точной ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ производится разворот векторов чувствительности S_1 , S_2 , S_3 до ортогонального базиса с нулевыми поперечными чувствительностями на основе принципов линейного матричного преобразования сигналов в каналах [52-54]. Математически задача этого этапа заключается в приведении матрицы чувствительностей ТОДВ к диагональной, в которой недиагональные элементы равны нулю. Физически диагонализация производится методом компенсации помеховых сигналов в каналах, соответствующих главным осям чувствительности ТОДВ, на основе алгоритма пошаговой настройки методом последовательных приближений посредством регулировки коэффициентов перекрёстных связей на соответствующих входах суммирующих усилителей.

Рассмотрим это более подробно.

Выходные сигналы ОНПК могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} U_{\text{вых1}} = \beta_{11}U_1 + \beta_{12}U_2 + \beta_{13}U_3 = S_{01}a_1 \\ U_{\text{вых2}} = \beta_{21}U_1 + \beta_{22}U_2 + \beta_{23}U_3 = S_{02}a_2 \\ U_{\text{вых3}} = \beta_{31}U_1 + \beta_{32}U_2 + \beta_{33}U_3 = S_{03}a_3 \end{cases} \quad (18)$$

где β_{ij} – обобщённые коэффициенты перекрёстных связей;

U_i – входные сигналы.

При уравнивании векторов чувствительности в направлении измерительных осей, то есть

$$S_{01} = S_{02} = S_{03} = S_0, \quad (19)$$

выходные сигналы будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{\beta_{11}} = U_1 + \alpha_{12} U_2 + \alpha_{13} U_3 = \frac{S_0}{\beta_{11}} a_1 \\ \frac{U_{\text{ВЫХ2}}}{\beta_{22}} = \alpha_{21} U_1 + U_2 + \alpha_{23} U_3 = \frac{S_0}{\beta_{22}} a_2 \\ \frac{U_{\text{ВЫХ3}}}{\beta_{33}} = \alpha_{31} U_1 + \alpha_{32} U_2 + U_3 = \frac{S_0}{\beta_{33}} a_3 \end{cases} \quad (20)$$

Из этих уравнений следует шесть уравнений, обеспечивающих ортогонализацию векторов чувствительности:

$$\begin{cases} -S_{12} = \alpha_{12} S_{22} + \alpha_{13} S_{32} \\ -S_{13} = \alpha_{21} S_{11} + \alpha_{23} S_{33} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} -S_{21} = \alpha_{21} S_{11} + \alpha_{23} S_{31} \\ -S_{23} = \alpha_{21} S_{13} + \alpha_{23} S_{33} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} -S_{31} = \alpha_{31} S_{11} + \alpha_{32} S_{21} \\ -S_{32} = \alpha_{31} S_{12} + \alpha_{32} S_{22} \end{cases} \quad (23)$$

Отсюда находим шесть искоемых коэффициентов α_{kl} :

$$\alpha_{12} = \frac{S_{13}S_{32} - S_{12}S_{33}}{S_{22}S_{33} - S_{23}S_{32}} = \frac{\frac{S_{13}S_{32}}{S_{33}} - S_{12}}{S_{22} - \frac{S_{23}S_{32}}{S_{33}}} \quad (24)$$

$$\alpha_{13} = \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S_{22}S_{33} - S_{23}S_{32}} = \frac{\frac{S_{12}S_{23}}{S_{22}} - S_{13}}{S_{33} - \frac{S_{23}S_{32}}{S_{22}}} \quad (25)$$

$$\alpha_{21} = \frac{S_{23}S_{31} - S_{21}S_{33}}{S_{11}S_{33} - S_{13}S_{31}} = \frac{\frac{S_{23}S_{31}}{S_{33}} - S_{21}}{S_{11} - \frac{S_{13}S_{31}}{S_{33}}} \quad (26)$$

$$\alpha_{23} = \frac{S_{21}S_{13} - S_{23}S_{11}}{S_{11}S_{33} - S_{13}S_{31}} = \frac{\frac{S_{21}S_{13}}{S_{33}} - S_{23}}{S_{33} - \frac{S_{13}S_{31}}{S_{11}}} \quad (27)$$

$$\alpha_{31} = \frac{S_{32}S_{21} - S_{31}S_{22}}{S_{22}S_{11} - S_{12}S_{21}} = \frac{\frac{S_{32}S_{21}}{S_{22}} - S_{31}}{S_{11} - \frac{S_{12}S_{21}}{S_{22}}} \quad (28)$$

$$\alpha_{32} = \frac{S_{31}S_{12} - S_{32}S_{11}}{S_{22}S_{11} - S_{12}S_{21}} = \frac{\frac{S_{31}S_{12} - S_{32}}{S_{11}}}{S_{22} - \frac{S_{12}S_{21}}{S_{11}}} \quad (29)$$

Поскольку описанный выше процесс ортогонализации векторов чувствительности происходит методом последовательных приближений, то выясним далее, при каких условиях возможна его сходимость.

Обобщённо коэффициенты α представим в следующем виде:

$$\alpha_{kl} = \frac{\frac{S_{km}S_{ml} - S_{kl}}{S_{mm}}}{S_{ll} - \frac{S_{lm}S_{ml}}{S_{mm}}} \quad (30)$$

при условии, что $k \neq l$; $k, l = 1, 2, 3$

Представим это в другом виде:

$$\alpha_{kl} = \frac{-\frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}}}{1 - \frac{S_{lm}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}}} \quad (31)$$

(при том же условии, что $k \neq l$; $k, l = 1, 2, 3$)

Обозначим теперь: $\gamma = \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}}$

Тогда,

$$\alpha_{kl} = \left(-\frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \right) \frac{1}{1-\gamma} \quad (32)$$

$$\frac{1}{1-\gamma} = 1 + \gamma + \gamma^2 + \gamma^3 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n \quad (33)$$

$$\alpha_{kl} = \left(-\frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \right) \left[1 + \frac{S_{lm}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} + \left(\frac{S_{lm}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \right)^2 + \dots \right] \quad (34)$$

Последовательные приближения к коэффициенту α_{kl} имеют вид:

$$\alpha_{kl}^{(1)} = - \frac{S_{kl}}{S_{ll}} \quad (35)$$

$$\alpha_{kl}^{(2)} = - \frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \quad (36)$$

$$\alpha_{kl}^{(3)} = - \frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} - \frac{S_{kl}S_{lm}S_{ml}}{S_{ll}S_{ll}S_{mm}} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{kl}^{(4)} &= - \frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} - \frac{S_{kl}S_{lm}S_{ml}}{S_{ll}S_{ll}S_{mm}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \frac{S_{lm}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} = \\ &= \left(- \frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \right) \left(1 + \frac{S_{lm}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \right), \dots \end{aligned} \quad (38)$$

Ряд сходится, если $|\gamma| < 1$, и сходится тем быстрее, чем меньше γ по модулю.

Если предложить практический алгоритм ортогонализации, при котором эти коэффициенты последовательно принимают значения

$$\alpha_{kl}^{(1)}, \alpha_{kl}^{(2)}, \alpha_{kl}^{(3)}, \dots, \quad (39)$$

то процесс ортогонализации будет сходиться при выполнении следующего условия:

$$\left| \frac{S_{ij}}{S_{ii}} \right| < 1, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots \quad (40)$$

Это означает, что векторы чувствительности датчика не должны отклоняться от своих номинальных измерительных осей более чем на 45 градусов.

Проиллюстрируем это на конкретном примере, встречающемся на практике. Это очень важный момент, который определяет не только выяснение возможности осуществления ортогонализации предложенным методом, но и выбор структуры ОНПК в каждом конкретном случае.

На рисунке 20 показано положение вектора чувствительности по отношению к измерительным осям, при котором возможна сходимость процесса настройки.

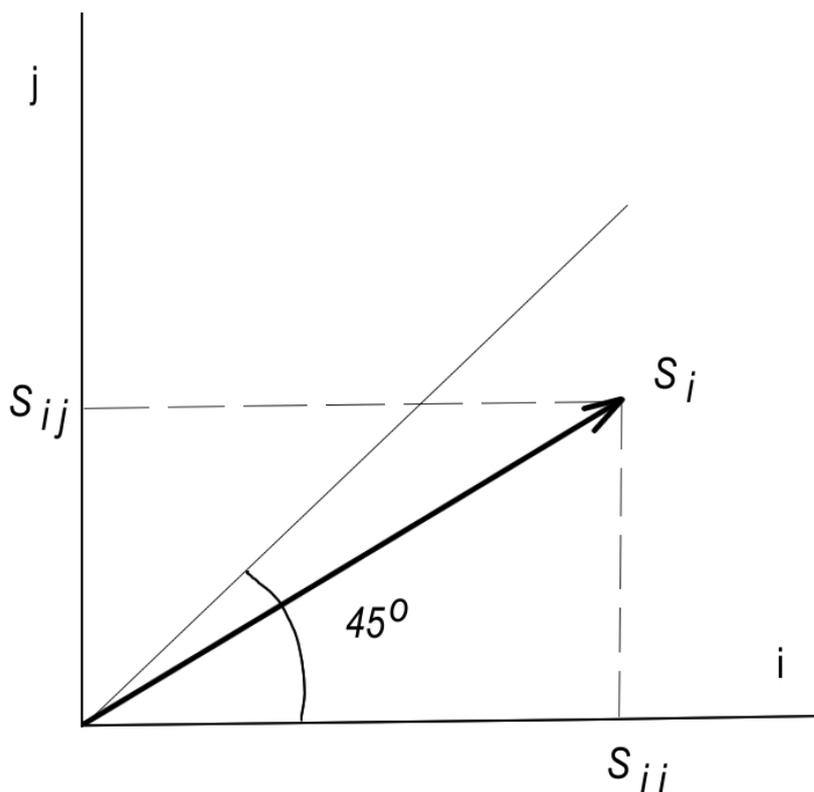


Рисунок 20. Исходное положение вектора чувствительности перед началом процесса ортогонализации

Здесь показано обобщённое положение вектора чувствительности когда он отклонён от измерительных осей на большой угол.

Из вышеизложенного следует, что в этом случае ортогонализация может быть осуществлена только таким образом, чтобы вектор чувствительности S_i был направлен лишь вдоль оси i , поскольку его угол наклона относительно неё меньше 45 градусов. При попытке направить его вдоль оси j процесс ортогонализации будет расходящимся, и в результате мы получим неправильный базис векторов чувствительности, и даже хуже чем исходный. Этот момент необходимо учитывать при ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ с косоугольным базисом векторов или ТОДВ с исходным квазиортогональным базисом, в которых в процессе эксплуатации произошли существенные отклонения векторов чувствительности от своих осей, например, при сильных ударах.

2.2.3. Структурная схема ОНПК и принципы его работы

Как было отмечено выше, для ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ необходимо использовать специализированный ОНПК, представляющий собой так называемый “электронный ортогонализатор” (рисунок 21), который производит компенсацию помеховых сигналов в каналах, возникающих вследствие наличия поперечной чувствительности ТОДВ. Для этого из векторов чувствительности S_1 , S_2 , S_3 формируются линейные комбинации и в соответствии с формулой (13) производится их точная ортогонализация и затем нормализация.

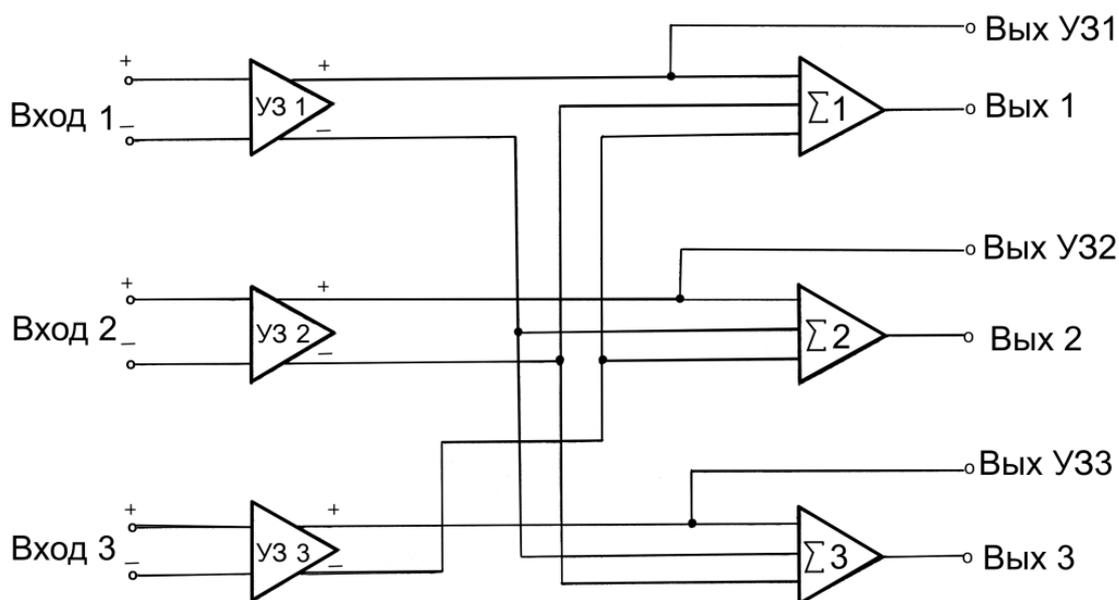


Рисунок 21. Структурная схема ОНПК для ТОДВ с квазиортогональной системой векторов чувствительности

Структурная схема ОНПК включает в себя три усилителя заряда УЗ 1, УЗ 2 и УЗ 3 и три суммирующих усилителя $\Sigma 1$, $\Sigma 2$, $\Sigma 3$. Усилители заряда осуществляют

преобразование зарядов, вырабатываемых ТОВД, в противофазные выходные напряжения и выполнены по схеме усилителя с симметричным входом и выходом, обеспечивая высокую помехоустойчивость измерений в условиях внешних электромагнитных помех. Выходы усилителей заряда подключены к входам линейных сумматоров с перекрёстными связями.

Суммирующие усилители $\Sigma 1, \Sigma 2, \Sigma 3$ из векторов чувствительности

S_1, S_2, S_3 формируют линейные комбинации, осуществляя разворот векторов.

Их выходные сигналы могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \alpha_{11} U_1 + \alpha_{12} U_2 + \alpha_{13} U_3 \\ \tilde{U}_2 = \alpha_{21} U_1 + \alpha_{22} U_2 + \alpha_{23} U_3 \\ \tilde{U}_3 = \alpha_{31} U_1 + \alpha_{32} U_2 + \alpha_{33} U_3 \end{cases} \quad (41)$$

где

U_1, U_2, U_3 - выходные сигналы пьезопреобразователей,

α_{ij} - элементы матрицы чувствительности,

\tilde{U}_i - выходные сигналы ;

ОНПК, работающий в соответствии с описанными принципами, может быть использован в качестве предусилителя совместно с широким спектром промышленных ТОВД. Он был проверен на большом числе отечественных и импортных ТОВД и показал высокую эффективность компенсации поперечных чувствительностей. При исходных значениях поперечных чувствительностей, находящихся у высококачественных датчиков в диапазоне 2 – 5%, остаточная поперечная чувствительность составляла величину менее 0,1% и определялась лишь метрологическими характеристиками вибростенда, используемого при настройке. Ниже приведены результаты испытаний и ортогонализации нескольких ТОВД на специализированном вибростенде.

Поясним, как практически реализуется в ОНПК процесс разворота векторов чувствительности ТОДВ по структурной схеме рисунка 21.

Для разворота векторов по соответствующим входам сумматоров

Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 устанавливаются весовые коэффициенты суммирования, равные коэффициентам при проекциях исходных векторов чувствительности

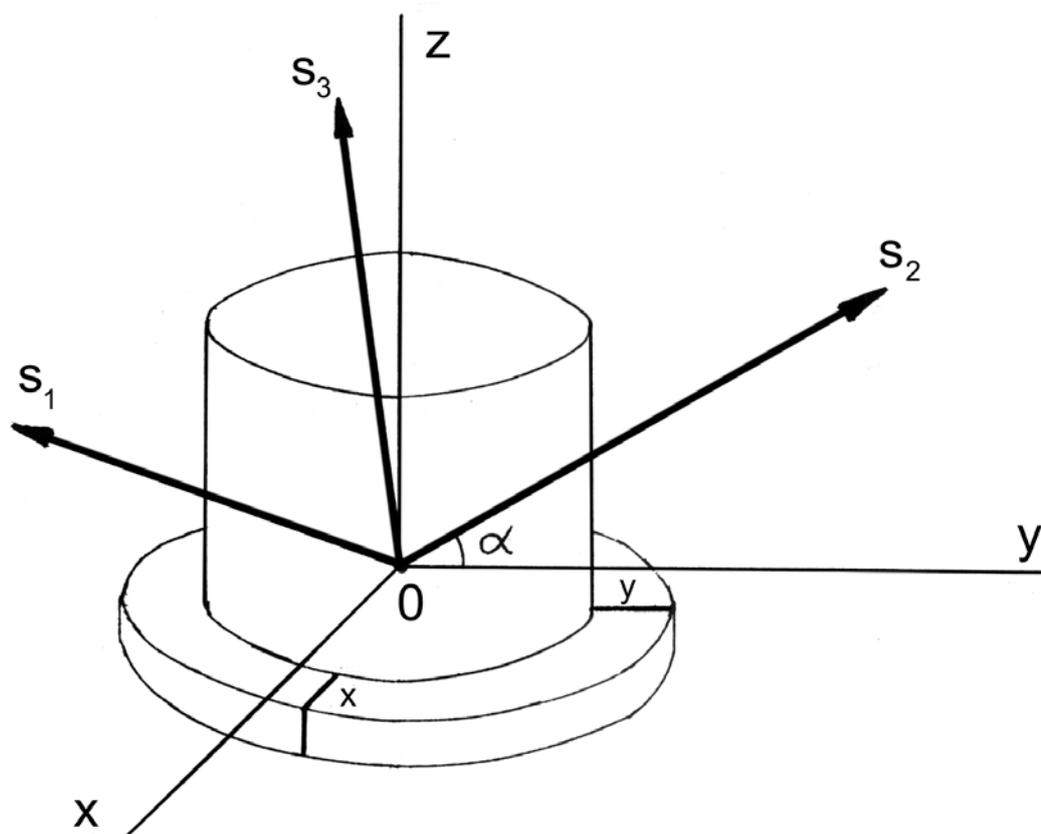
S_1 , S_2 , S_3 в соответствии с формулой (13). Сигналы с выходов усилителей заряда $УЗ\ 1$, $УЗ\ 2$ и $УЗ\ 3$ поступают на соответствующие входы суммирующих усилителей Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 , которые производят точную ортогонализацию и нормализацию векторов чувствительности ТОДВ. С математической точки зрения они выполняют операцию диагонализации матрицы чувствительностей [52]. А физически точная ортогонализация производится регулировкой коэффициентов перекрёстных связей в трёх каналах в пределах $\pm 20 - 30\%$. Этот процесс выполняется на вибростенде (его общий вид представлен на рисунках 25 и 26), на котором задают вибрацию вдоль разных измерительных осей ТОДВ. Например, задаём вибрацию вдоль оси Z и регулировками в сумматорах Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 устанавливаем на выходах X и Y нули. Затем аналогичную процедуру производим, задавая вибрацию вдоль осей X и Y . Это общий принцип. На практике здесь возможны разные по сложности и скорости настройки варианты реализации процедуры ортогонализации и, соответственно, разные схемные варианты реализации сумматоров Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 .

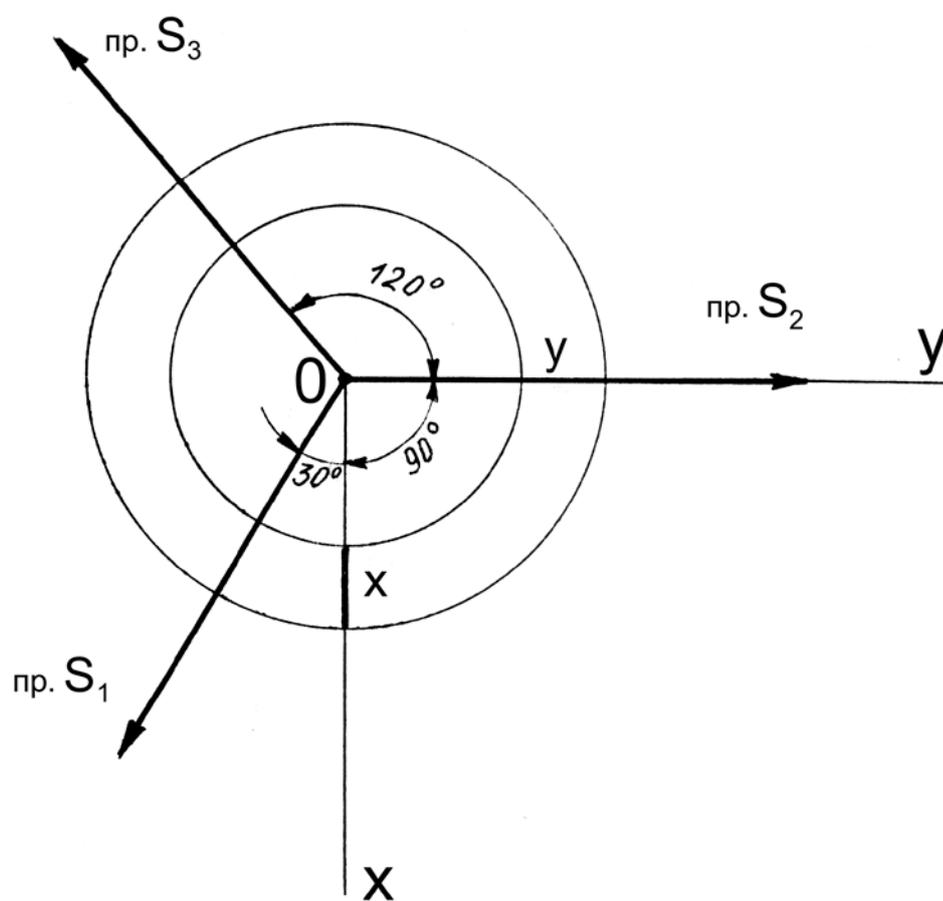
2.3. ТОДВ с косоугольным базисом измерительных осей

Прежде всего, сделаем несколько замечаний по поводу принятой автором терминологии – квазиортогональная система измерительных осей ТОДВ и косоугольная. В принципе, любая система измерительных осей ТОДВ, отличающаяся от строго ортогональной, является косоугольной. Термины “квазиортогональная” и “косоугольная” введены для того, чтобы отличать ТОДВ, у которых векторы чувствительности направлены под большими (более

20°) углами по отношению к ортогональному базису, от ТОДВ, у которых векторы чувствительности отклонены под небольшими (до 20°) углами по отношению к ортогональному базису.

В процессе работы по созданию методов и средств повышения точности измерения трёхмерной вибрации автором были разработаны несколько видов ТОДВ с косоугольной системой измерительных осей. В работе [55] описан помехоустойчивый ТОДВ типа ТСПА-3К с косоугольной системой измерительных осей и измеряющий в одной точке. Он обладает высокими метрологическими характеристиками вследствие того, что, во-первых, вырабатывает дифференциальные сигналы на выходах и тем самым обеспечивает высокую помехоустойчивость измерений, а, во-вторых, благодаря симметричной структуре чувствительной системы электромеханические параметры, в отличие от известных конструкций ТОДВ, по всем выходам очень близки друг к другу. Это свойство особенно важно для точного анализа динамики вибрационного процесса.





б)

а) – Положение векторов чувствительности в пространстве

б) – проекции векторов чувствительности в плоскости X - Y

Рисунок 22. Система измерительных осей ТОДВ типа ТСПА-3К

Конструктивно трёхосевой пьезоакселерометр выполнен с одним инерционным элементом и тремя одноосевыми преобразователями, расположенными в пространстве друг относительно друга под одинаковым углом и образующими с основанием также одинаковые углы. Измерения при этом проводятся в косоугольной системе измерительных осей. Теоретическое положение исходных векторов чувствительности \vec{S}_1 , \vec{S}_2 , \vec{S}_3 показано на рисунке *. Вектор чувствительности \vec{S}_2 лежит в плоскости YZ и образует с осью Y угол α . Проекция

векторов \vec{S}_1 , \vec{S}_2 , \vec{S}_3 на плоскость XU расположены под углом 120° (см. рисунок 22), причём в идеальном случае длины векторов чувствительности равны:

$$|\vec{S}_1| = |\vec{S}_2| = |\vec{S}_3| = S$$

Для перехода к ортогональной системе измерительных осей x , y , z сигналы с выходов 1, 2, 3 пьезоакселерометра необходимо подать на соответствующие входы формирующего ОНПК, в котором из векторов чувствительности \vec{S}_1 , \vec{S}_2 , \vec{S}_3 формируются линейные комбинации. Подробно эти преобразования описаны ниже в разделе 2.3.2.

На рисунке 23 приведены его внешний вид и детализировка конструкции.



Рисунок 23. Внешний вид и детализировка ТОДВ типа ТСПА-3К

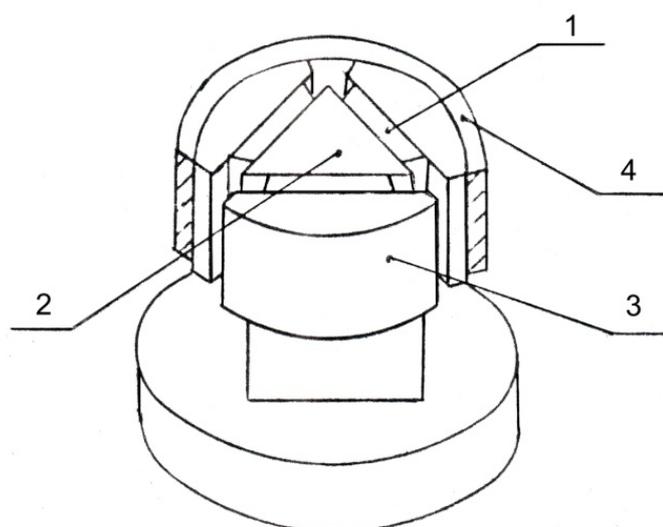
В его конструкции использован один инерционный элемент, одновременно воздействующий на три пьезокерамические измерительные системы. При испытании этого ТОДВ он показал высокие характеристики. Это полностью подтвердило правильность предложенного метрологического подхода к повышению точности измерений. Однако его конструкция оказалась весьма сложной в технологическом плане производства, и впоследствии был разработан более технологичный ТОДВ, описанный ниже.

Представленный в данной работе ОНПК проверялся также в работе с ТОДВ на основе монолитного пьезоэлемента [56] и другими ТОДВ с косоугольной и квазиортогональной системами измерительных осей и также показал высокую эффективность.

2.3.1. Конструкция ТОДВ на сдвиговых пьезоэлементах

Как было отмечено выше, описанный выше ТОДВ типа ТСПА-3К, который имел симметричный исходный косоугольный базис векторов чувствительности, показал хорошие характеристики и при испытаниях подтвердил правильность предложенного метода, но у него была слишком сложная с технологической точки зрения конструкция. Поэтому в дальнейшем был разработан и испытан ТОДВ типа ТСП-1, работающий совместно с соответствующим ОНПК и имеющий чувствительную систему на основе сдвиговых пьезоэлементов [57], которая оказалась более технологичной при сборке.

Эскиз конструкции датчика изображён на рисунке 24.



1- пьезоэлемент; 2- опорная стойка;
3- инерционная масса; 4- стяжное кольцо;

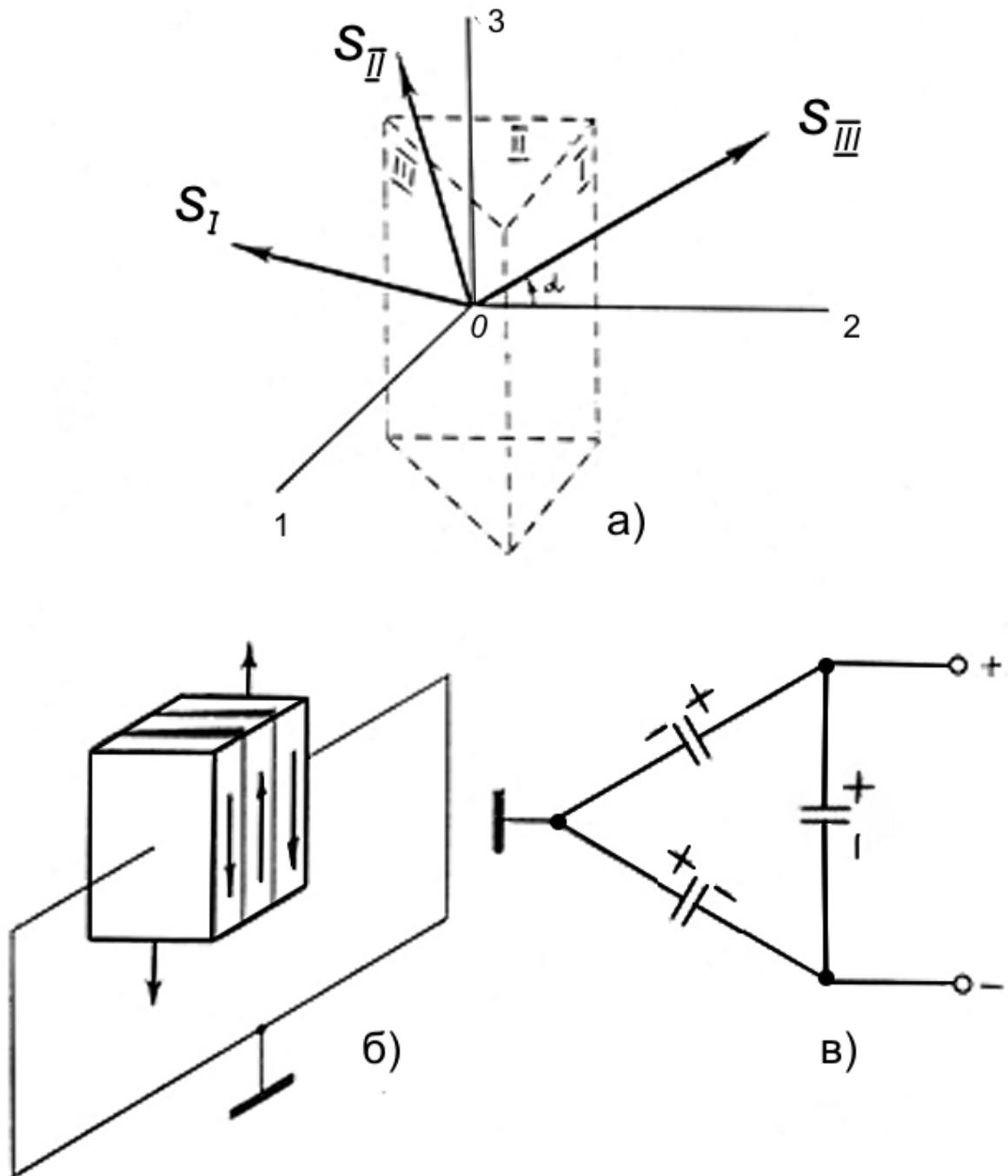
Рисунок 24. Эскиз конструкции ТОДВ типа ТСП-1

Датчик содержит три плоских пьезоэлемента 1, закреплённых между расположенной в центре опорной стойкой треугольного сечения 2 и тремя инерционными элементами 3, прижатыми пружинным стяжным кольцом 4. Векторы поляризации пьезоэлементов направлены одинаково вдоль оси, перпендикулярной к плоскости основания датчика. Пьезопреобразователи имеют симметричный относительно корпуса датчика выход, и каждый из них состоит из трёх сдвиговых пьезопластин, расположенных так, чтобы направления векторов поляризации пьезопластин чередовались.

Аналогичное включение пьезопластин используется в компрессионном симметричном пьезопреобразователе [58]. При таком включении пьезоэлементы одновременно выполняют роль изоляторов.

Инерционный элемент датчика при этом с помощью упругого проводника заземляется с корпусом датчика. Такая конструкция ТОДВ обеспечивает высокую метрологическую точность и помехоустойчивость измерений.

Пьезоакселерометр ТСП-1 имеет конструкцию, в которой три сдвиговых симметричных преобразователя на каждой из трёх плоскостей опорной стойки треугольного сечения располагаются так, что их векторы поляризации P наклонены под некоторым углом к плоскости основания. В результате датчик измеряет три составляющие вектора вибрации, причём его векторы чувствительности \vec{S}_I , \vec{S}_{II} , \vec{S}_{III} образуют косоугольную систему осей (рисунок 25). На рисунке 25а) представлено графическое представление исходного косоугольного базиса векторов чувствительности датчика, на рисунке 25б) - структура его чувствительных систем и полярности потенциалов, вырабатываемых пьезопластинами, а на рисунке 25в) - эквивалентная схема включения пьезопластин.



$\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ - исходные векторы чувствительности датчика
1, 2, 3- ортогональная система координат

Рисунок 25. Векторы чувствительности ТОДВ типа ТСП-1 (а), схема включения пьезопластин (б) и электрическая эквивалентная схема (в)

2.3.2. Принципы работы ОНПК

Проекции векторов $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ ТОДВ с косоугольным измерительным базисом на плоскость 012 расположены под углом 120° . Для перехода к прямоугольной системе измерительных осей 0123 в качестве ОНПК используется двухэтапный так называемый “формирующий” электронный “ортогонализатор”, в котором на первом этапе (этап “ формирования “) из векторов чувствительности $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ формируются линейные комбинации в соответствии с формулами:

$$\begin{cases} \vec{S}_1 = \vec{S}_I + 0 \vec{S}_{II} - \vec{S}_{III} \\ \vec{S}_2 = -0,5 \vec{S}_I + \vec{S}_{II} - 0,5 \vec{S}_{III} \\ \vec{S}_3 = \vec{S}_I + \vec{S}_{II} + \vec{S}_{III} \end{cases} \quad (42)$$

В результате этих преобразований на первом этапе ортогонализации мы получаем квазиортогональную систему векторов чувствительности ТОДВ (рисунок 19), которая отличается от ортогональной наличием векторов поперечной чувствительности, как это имеет место для обычных промышленных ТОДВ.

На втором этапе ортогонализации на основе принципов линейного матричного преобразования сигналов в каналах производится точный разворот векторов чувствительности $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$ до ортогонального базиса с нулевыми поперечными чувствительностями. Математически задача этого этапа заключается в приведении матрицы чувствительностей ТОДВ к диагональной, в которой недиагональные элементы равны нулю. Физически диагонализация производится методом компенсации помеховых сигналов в каналах,

соответствующих главным осям чувствительности ТОДВ, с помощью перекрёстных связей на основе суммирующих усилителей.

2.3.3. Структурная схема ОНПК

Как было отмечено выше, для ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ с косоугольной системой измерительных осей чувствительности необходимо использовать специализированный ОНПК, представляющий собой так называемый “формирующий” электронный ортогонализатор (рисунок 26), который производит компенсацию в два этапа.

На первом этапе из исходных векторов чувствительности $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ формируются линейные комбинации в соответствии с формулой (34), осуществляя первичный “грубый” разворот векторов. Затем на втором этапе он производит их точную ортогонализацию и нормализацию.

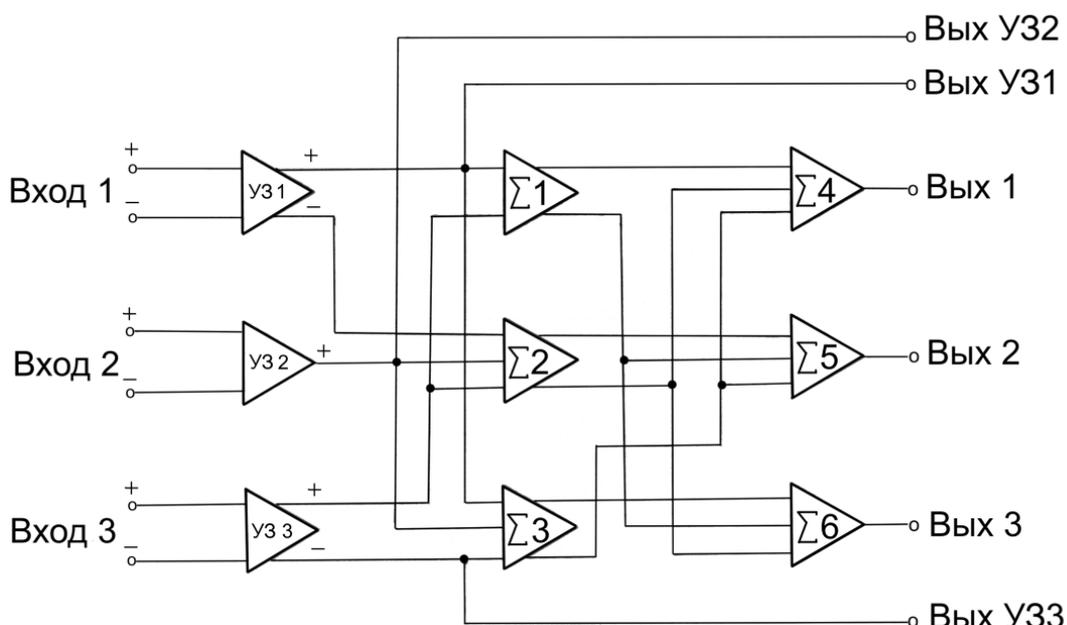


Рисунок 26. Структурная схема ОНПК для ТОДВ с косоугольной системой векторов чувствительности

Структурная схема ОНПК включает в себя три усилителя заряда УЗ 1, УЗ 2 и УЗ 3 и шесть суммирующих усилителей $\Sigma 1 \dots \Sigma 6$. Усилители заряда осуществляют преобразование зарядов, вырабатываемых ТОДВ, в противофазные выходные напряжения и выполнены по схеме усилителя с симметричным входом и выходом, обеспечивая высокую помехоустойчивость измерений в условиях внешних электромагнитных помех. Выходы усилителей заряда подключены к входам линейных сумматоров с перекрёстными связями.

Суммирующие усилители $\Sigma 1, \Sigma 2, \Sigma 3$ из исходных векторов чувствительности $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ формируют линейные комбинации в соответствии с формулой (34), осуществляя грубый разворот векторов. Затем сигналы с выходов суммирующих усилителей $\Sigma 1, \Sigma 2, \Sigma 3$ поступают на соответствующие входы суммирующих усилителей $\Sigma 4, \Sigma 5, \Sigma 6$, которые производят точную ортогонализацию и нормализацию векторов чувствительности ТОДВ аналогично тому, как это было описано выше для ТОДВ с прямоугольной системой векторов чувствительности.

2.3.4. Конструкция и технические характеристики ОНПК

Описанный выше алгоритм ортогонализации реализован в ОНПК типа УЗТ-ОН-2, внешний вид которого представлен на рисунках 27 и 28.



Рисунок 27. Внешний вид ОНПК типа УЗТ-ОН-2



Рисунок 28. ОНПК типа УЗТ-ОН-2. Вид на органы регулировки

ОНПК испытывался в работе совместно с ТОДВ типа ТСП-1, разработанным автором, а также с другими ТОДВ с косоугольным базисом векторов чувствительности, как промышленными, так и экспериментальными.

На передней панели ОНПК расположены три выхода усилителей заряда и три общих выхода прибора. Выходы усилителей заряда можно использовать для определения исходных векторов чувствительности ТОДВ, а также для работы с ТОДВ с ортогональной системой векторов чувствительности без режима ортогонализации. На задней панели расположены вход для ТОДВ и разъём питания.

Основные характеристики ТОДВ типа ТСП-1 совместно с ОНПК типа УЗТ-ОН-2 приведены в таблице 2:

Таблица 2. Основные характеристики ТОДВ типа ТСП-1
совместно с ОНПК типа УЗТ-ОН-2

Параметр	Ед. Измер.	Значение
Рабочий диапазон частот	Hz	0,1- 5000
Коэффициент преобразования	mVS ² /m	10
Поперечная чувствительность	%	< 0,1
Рабочий диапазон температур	°C	- 40- +70
Подавление помех	dB	> 65
Вес датчика	g	58
Размеры: Датчика Предусилителя	mm	35x30 45x55x120

Описанный трёхосевой вибродатчик типа ТСП-1совместно с ОНПК типа УЗТ-ОН-2 прошёл успешные испытания и апробацию в фирме ООО «Оиликвип» в составе телеметрической системы установок погружных электроцентробежных насосов для добычи нефти. В результате проведённых испытаний были измерены матрицы чувствительности датчика и получены следующие результаты:

1. Осевые чувствительности по выходам 1 – 3 равны $10 \text{ mVS}^2/\text{m} \pm 0,15\%$;
2. Поперечные чувствительности лежали в пределах $0,02 - 0,07\%$;

В результате, точность измерения вибрации повысилась на 27%, рабочий диапазон частот расширился на 7 кГц и динамический диапазон расширился на 15 дБ по сравнению с применяющимися штатными средствами измерения вибрации. Датчик рекомендован для применения в составе указанной измерительной системы.

Протокол испытаний приведён в Приложении 3.

2.4. ТОДВ с ортогонально-косоугольной системой измерительных осей на основе монолитного сдвигового пьезоэлемента

ТОДВ на основе монолитного сдвигового пьезоэлемента [59] весьма перспективны и обладают рядом преимуществ перед пьезоакселерометрами стандартной конструкции. Они проще в изготовлении, при прочих равных условиях легче, имеют меньшие габариты. Однако метрологические характеристики у них хуже. В частности, они обладают большой поперечной чувствительностью и значительным разбросом осевой чувствительности по выходам. Поэтому они не нашли широкого применения в современных виброизмерительных системах. В данном разделе на примере экспериментальных образцов ТОВД с монолитным кубическим пьезоэлементом показано, как с помощью предложенного метода можно значительно улучшить их метрологические характеристики и создавать простые в конструктивном отношении ТОВД, обладающие высокими метрологическими характеристиками.

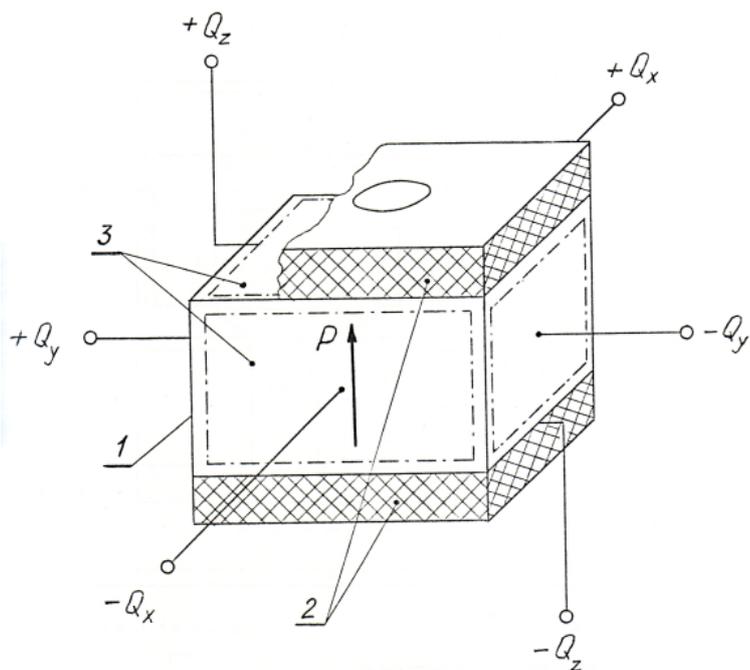
2.4.1. Конструкция и система измерительных осей ТОДВ

Измерительная система рассматриваемого ТОДВ состоит из одного пьезоэлемента, поляризованного в направлении оси Z , в форме куба с металлизированными гранями и использованием двух пьезомодулей пьезокерамики [60,61].

Чувствительная система ТОДВ содержит пьезопреобразователь в виде монолитного клеёного модуля, состоящего из указанного пьезоэлемента и двух изоляторов для получения симметричного относительно корпуса пьезоакселерометра электрического выхода по каждому из трёх взаимно перпендикулярных направлений (рисунок 29).

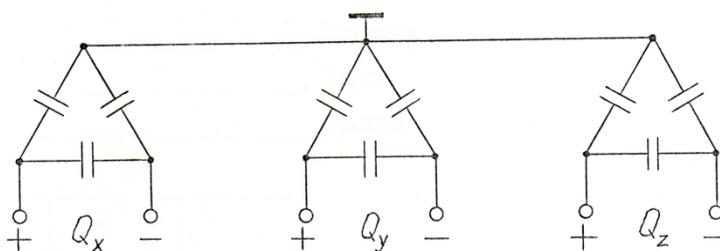
При воздействии вибрации вдоль оси Z в пьезоэлементе возникает деформация растяжения-сжатия в этом же направлении, и заряды, пропорциональные пьезоэлектрической постоянной d_{33} , появляются лишь на гранях Z .

При воздействии вибрации вдоль оси X или Y в пьезоэлементе возникает деформация сдвига, и заряды, пропорциональные пьезоэлектрическим постоянным d_{15} или d_{24} , появляются только на гранях X или Y . Для испытаний была выбрана простейшая клеёная конструкция, на основе которой были разработаны чертежи и изготовлены макетные образцы. Монолитный модуль имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 8 x 8 x 6 мм.



1- пьезоэлемент; 2-изоляторы; 3-электроды

а)



б)

Рисунок 29. Конструкция монолитного модуля (а) и его эквивалентная электрическая схема (б)

Надо отметить, что применение монолитного модуля в качестве пьезопреобразователя весьма перспективно, поскольку это позволяет значительно уменьшить габариты ТОДВ, а, следовательно, и его массу. При этом такой ТОДВ может быть сконструирован как низкочастотным, так и высокочастотным. Кроме того, его конструкция значительно проще и технологичнее ТОДВ, описанных выше.

Система измерительных осей этого ТОДВ практически не отличается от таковой для стандартного промышленного ТОДВ с ортогональной системой измерительных осей. Отличие лишь в том, что его оси чувствительности сильнее

отклонены от ортогонального базиса и имеют существенно больший разброс. Поэтому будем считать, что этот ТОДВ имеет, условно говоря, ортогонально-косоугольный измерительный базис, и для ортогонализации такого ТОВД потребуется либо ОНПК по структуре рисунка 21, либо ОНПК по структуре рисунка 26.

2.4.2. Результаты испытаний

В результате проведённых испытаний определены матрицы чувствительностей и сняты АЧХ пьезоакселерометров. Методика испытаний и аппаратные средства для их осуществления описаны в [61].

Снятие АЧХ ТОВД проводилось по выходам разработанного автором аналого-цифрового формирующего ортонормализатора-усилителя заряда на вибровозбудителе 4290 фирмы Briel & Kjaer (Дания).

На рисунках 30 – 32 представлены фото измерительной установки, на которой проводились испытания как стандартных промышленных, так и разрабатываемых датчиков и согласующих устройств, способ крепления ТОДВ на вибраторе и использованный ОНПК.



Рисунок 30. Измерительный стенд, на котором проводились исследования

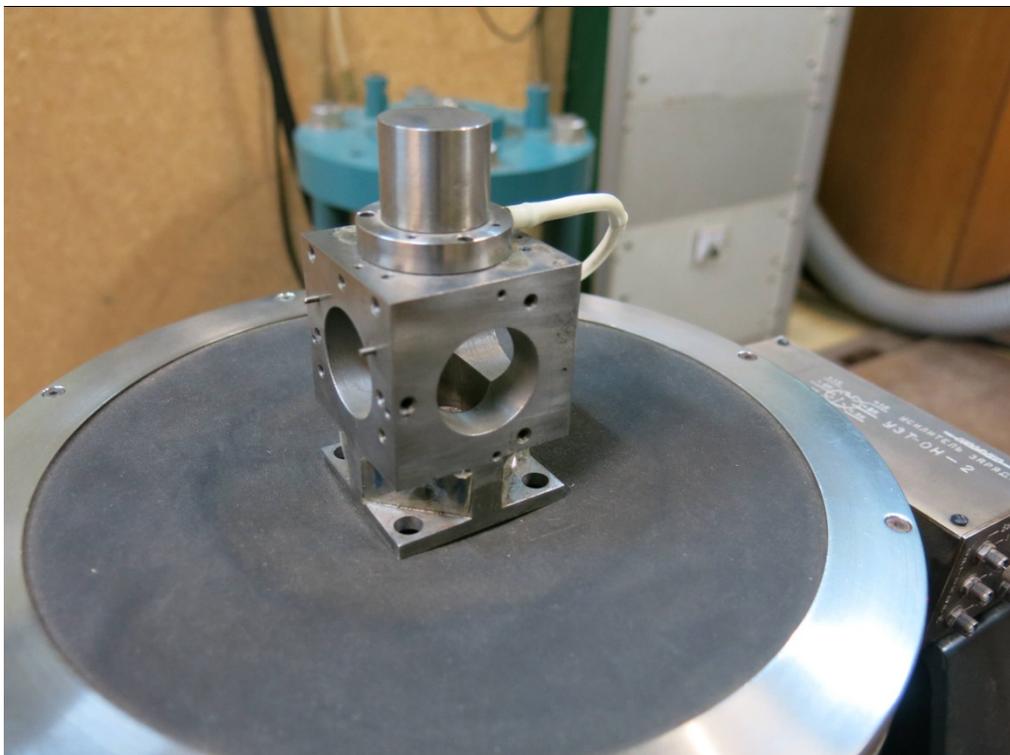


Рисунок 31. Вибратор с установленным датчиком



Рисунок 32. Аналого-цифровой формирующий ортонормализатор-усилитель заряда, с помощью которого проводились исследования коэффициентов матриц чувствительности ТОДВ

Ниже приводятся измеренные матрицы чувствительностей пяти макетных образцов трёхкомпонентного монолитного пьезоакселерометра. Эти же результаты представлены в виде отношения поперечной чувствительности к основной.

Датчик №1:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 2,17 & 0,09 & 0,11 \\ 0,23 & 3,13 & 0,04 \\ 0,54 & 0,53 & 4,90 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 4,2 & 5,1 \\ 7,4 & 100 & 1,3 \\ 11,0 & 10,8 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (43)$$

Датчик №2:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 2,38 & 0,16 & 0,11 \\ 0,12 & 3,32 & 0,12 \\ 0,56 & 0,08 & 5,45 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 6,7 & 4,6 \\ 3,6 & 100 & 3,6 \\ 10,3 & 1,5 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (44)$$

Датчик №3:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 2,35 & 0,15 & 0,08 \\ 0,20 & 2,87 & 0,03 \\ 0,08 & 0,21 & 5,79 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 6,4 & 3,4 \\ 7,0 & 100 & 1,0 \\ 1,4 & 3,6 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (45)$$

Датчик №4:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 2,91 & 0,11 & 0,15 \\ 0,19 & 3,01 & 0,14 \\ 0,44 & 0,07 & 5,21 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 3,8 & 5,2 \\ 6,3 & 100 & 1,0 \\ 1,4 & 3,6 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (46)$$

Датчик №5:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 2,89 & 0,11 & 0,04 \\ 0,03 & 4,05 & 0,19 \\ 0,66 & 0,45 & 4,79 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 3,8 & 1,4 \\ 0,7 & 100 & 4,7 \\ 13,8 & 9,4 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (47)$$

Как видно из результатов испытаний (43) – (47), исходные главные осевые чувствительности ТОДВ имели разброс от $2,17 \frac{nKл}{g}$ до $5,79 \frac{nKл}{g}$, а поперечные – от 0,7% до 13,8%. Фактически, исходно эти ТОДВ представляли собой датчики низкого качества, не пригодные для применения в прецизионных виброизмерительных системах.

На рисунке 33 приведена АЧХ одного из испытанных ТОДВ на основе монолитного пьезоэлемента в направлении измерительных осей.

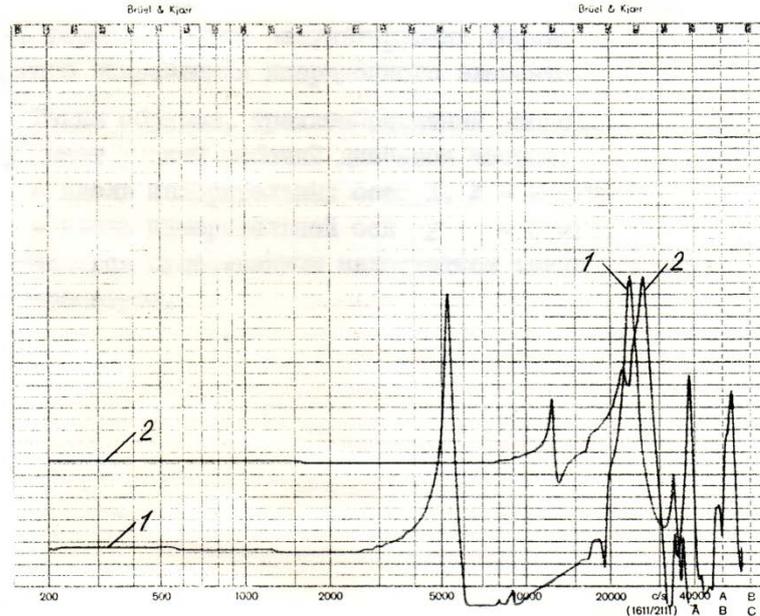


Рисунок 33. АЧХ ТОДВ на основе монолитного пьезоэлемента в направлении измерительных осей X (кривая 1) и Z (кривая 2)

Частотные характеристики в направлении измерительных осей X и Y вследствие одинаковых результирующих жесткостей в горизонтальных направлениях имеют идентичный вид. Поэтому на рисунке 33 показана только АЧХ ТОДВ вдоль измерительной оси X (кривая 1).

После проведения ортогонализации и нормализации получились следующие матрицы чувствительности этих ТОДВ:

Датчик №1:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 10,00 & 0,003 & 0,002 \\ 0,002 & 10,00 & 0,005 \\ 0,006 & 0,001 & 10,00 \end{bmatrix} \frac{nКл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 0,03 & 0,02 \\ 0,02 & 100 & 0,05 \\ 0,06 & 0,01 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (48)$$

Датчик №2:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 10,00 & 0,005 & 0,009 \\ 0,007 & 10,00 & 0,001 \\ 0,002 & 0,004 & 10,00 \end{bmatrix} \frac{nКл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 0,05 & 0,09 \\ 0,07 & 100 & 0,01 \\ 0,02 & 0,04 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (49)$$

Датчик №3:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 10,00 & 0,001 & 0,002 \\ 0,004 & 10,00 & 0,009 \\ 0,005 & 0,007 & 10,00 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 0,01 & 0,02 \\ 0,04 & 100 & 0,09 \\ 0,05 & 0,07 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (50)$$

Датчик №4:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 10,00 & 0,004 & 0,007 \\ 0,001 & 10,00 & 0,005 \\ 0,002 & 0,009 & 10,00 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 0,04 & 0,07 \\ 0,01 & 100 & 0,05 \\ 0,02 & 0,09 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (51)$$

Датчик №5:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 10,00 & 0,004 & 0,001 \\ 0,007 & 10,00 & 0,002 \\ 0,000 & 0,005 & 10,00 \end{bmatrix} \frac{nKл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 0,04 & 0,01 \\ 0,07 & 100 & 0,02 \\ 0,00 & 0,05 & 100 \end{bmatrix} \% ; \quad (52)$$

В результате настройки и регулировки всех указанных экземпляров ТОДВ с помощью ОНПК типа УЗТ-ОН-1 основные чувствительности были нормализованы к значению $10 \frac{nKл}{g}$, а поперечные чувствительности по всем измерительным осям удалось уменьшить до уровней менее 0,1%, практически до нуля, что определяется лишь метрологическими возможностями калибровочного стенда.

Необходимо отметить, что получить строго ортогональные движения на нашем вибростенде с точностью не хуже 0,01% невозможно. Поэтому мы применили способ искусственного создания эталонного базиса, относительно которого определялись отклонения векторов чувствительности ТОДВ. На первом этапе фиксировались реальные направления калибровочных движений в направлениях X, Y и Z и эти направления были приняты за эталонный базис. Затем регулировками коэффициентов в ОНПК вектора чувствительности датчиков были направлены вдоль этого эталонного базиса.

Таким образом, в результате настройки на стенде мы получили поперечные чувствительности (48) – (52) такие, как на представленных выше матрицах, что отражает высокую эффективность метода.

Как видим, с помощью описываемого метода ТОДВ из весьма неточных превратились в прецизионные датчики вибрации.

Выводы по главе 2

1. Проведённый анализ влияния поперечной чувствительности показал, что её влияние на точность измерения вибрации в практике виброизмерений сильно недооценивается, что существенно увеличивает погрешность измерений. Это приводит не только к значительному снижению точности измерений, но в некоторых случаях и к полной неэффективности систем измерения и контроля вибрации.

2. Проведён анализ векторов чувствительности ТОДВ с квазиортогональным и косоугольным базисами измерительных осей.

3. Исследован вопрос о сходимости векторов чувствительности при ортогонализации способом последовательных приближений.

4. Показано, что для ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ требуются специализированные ОНПК, выполненные по разным структурным схемам.

5. Представлены результаты практической ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ различной конструкции с помощью специализированных ОНПК, которые подтвердили правильность предложенного метода.

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Выше показано, что предложенный метод повышения точности измерения многомерной вибрации работоспособен и реализуем на практике. Это было проиллюстрировано на примерах разработки и испытаний специализированных ОНПК для ТОДВ различных конструкции и принципов преобразования вибрации в электрический сигнал.

В главе 2 показано, что принципы ортогонализации векторов чувствительности ТОДВ различной конструкции и чувствительных систем прошли успешную апробацию на различных ТОДВ как промышленного изготовления, так и на нестандартных экспериментальных образцах.

Во всех случаях результат был положительным и подтвердил правильность предложенного подхода.

Ниже на нескольких примерах показано, как этот метод был реализован в многоканальных измерительных системах, нашедших применение в промышленности. Представляет также интерес третий пример по организации автоматизированной системы ортонормализации ТОДВ на основе однокристального микропроцессора, а также программа визуализации форм пространственных колебаний механических конструкций.

3.1. Электроизмерительный блок для исследования динамических характеристик балансировочных станков

3.1.1. Общее описание

Электроизмерительный блок ЭИБ-1 был разработан автором по заданию Минского станкостроительного производственного объединения (МСПО) имени Октябрьской Революции, в соответствие с которым автором был разработан и изготовлен измерительный прибор, в состав которого входят четыре датчика силы с повышенной нагрузочной способностью. Он предназначен для проведения исследований динамических характеристик роторов балансировочных станков, работающих в дорезонансном режиме. Прибор обеспечивает сопряжение с пьезоэлектрическими датчиками динамической силы, имеющих симметричный или несимметричный выход, нормализацию чувствительности датчиков и электронную компенсацию межканальных помех, возбуждаемых основанием станков. В работе прибора реализуется упрощённый вариант описанного выше матричного принципа преобразования в составе двухканальной линейной измерительной системы.

3.1.2. Структурная схема и описание работы прибора.

Структурная схема прибора представлена на рисунке 34.

Она включает в себя следующие узлы:

УЗ – усилитель заряда с симметричным входом и симметричным выходом;

СУ – инвертирующий алгебраический сумматор;

УУ – усилитель с управляемым коэффициентом передачи;

БП – стабилизированный источник питания;

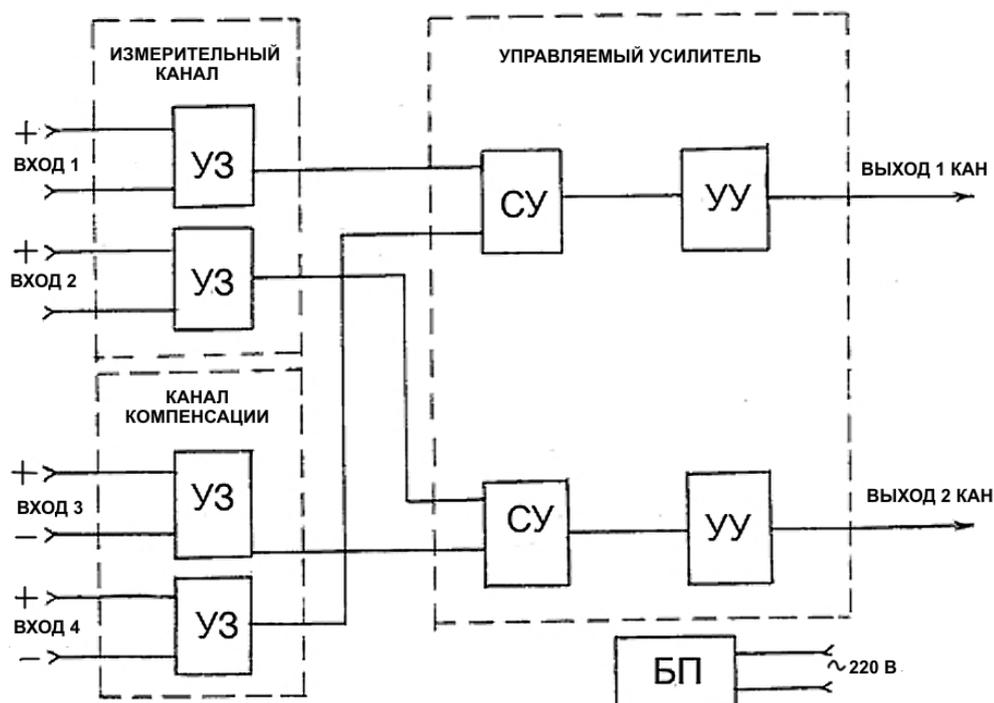


Рисунок 34. Структурная схема электроизмерительного блока ЭИБ-1

Прибор состоит из двух независимых каналов обработки сигналов, имеющих самостоятельные выходы, обозначенные как “ выход 1 кан“ и “ выход 2 кан“. Сигналы с датчиков динамической силы поступают на четыре усилителя заряда, два из которых предназначены для подключения измерительных датчиков, два других датчиков компенсации.

Выходы усилителей заряда подключены к входам сумматоров, причём к каждому сумматору подключается неинвертирующий выход усилителя заряда измерительного канала и инвертирующий выход усилителя заряда канала компенсации. Таким образом, сигналы на выходах сумматоров пропорциональны разности напряжений на выходах соответствующих усилителей заряда. При этом происходит электронная компенсация сигналов механической помехи.

Усилитель с управляемым коэффициентом передачи осуществляет корректировку коэффициента передачи канала при работе с датчиками различной

чувствительности (с помощью переключателя, расположенного на лицевой панели), обеспечивая тем самым поддержание неизменного коэффициента преобразования. Кроме того, он имеет упрочнённый выход, позволяющий работать на длинную соединительную линию.

К выходам каналов подключена схема индикации перегрузки, которая с помощью светодиодов, расположенных на лицевой панели, сигнализирует оператору о достижении выходным сигналом заданного предельного значения.

Для коррекции небольших отклонений чувствительности датчиков от своего номинального значения предназначены потенциометры, выведенные на лицевую панель, которыми можно плавно изменять коэффициент передачи каналов. Включение и отключение этого режима работы осуществляется переключателями.

Режим компенсации механической помехи включается переключателями, а потенциометрами производится точная компенсация.

Усилители заряда могут работать как с датчиками, имеющими симметричный выход, так и с датчиками, имеющими несимметричный выход. В последнем случае усилители заряда переводятся в этот режим с помощью соответствующих переключателей, расположенных на лицевой панели, которые отключают один из входов усилителей заряда от датчиков.

Стабилизированный источник питания обеспечивает внутренние модули прибора стабилизированными напряжениями +15В и -15В при работе от сети переменного тока 220В, 50Гц.

Ниже приведён эскиз внешнего вида лицевой панели и расположение основных органов управления.

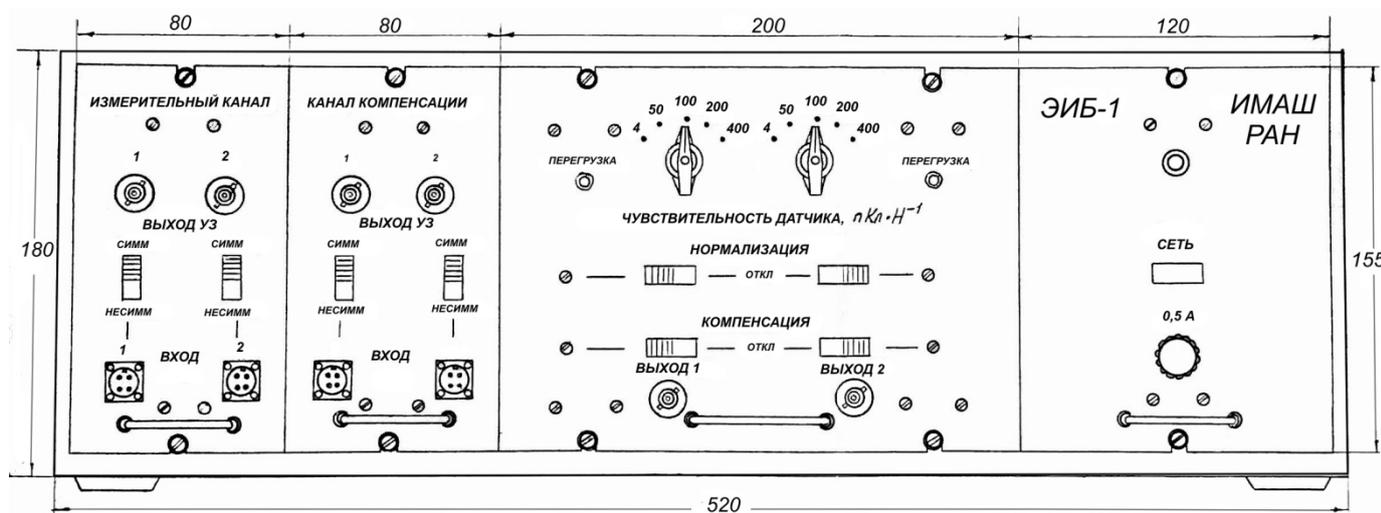


Рисунок 35. ЭИБ-1. Общий вид лицевой панели

3.1.3. Математические принципы функционирования прибора

В основе работы прибора лежат математические принципы, которые описаны выше применительно к управлению векторами чувствительности ТОДВ различных типов.

Для работы прибора используется алгоритм управления межканальными сигналами для двухканальной измерительной системы. В данном случае система описывается следующей матрицей канальных коэффициентов преобразования:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}, \quad (53)$$

где K_{ij} – межканальные коэффициенты передачи,

K_{11} и K_{22} – собственные коэффициенты преобразования 1-го и 2-го каналов,

K_{12} и K_{21} – коэффициенты, отражающие проникание сигналов механической помехи в измерительные каналы.

Таким образом, задача сводится к диагонализации матрицы K :

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix} \quad (54)$$

В результате производится ортогонализация векторов, отображающих чувствительности эквивалентных датчиков динамической силы, то есть коэффициентов преобразования системы. Кроме того, производится нормализация коэффициентов электромеханического преобразования K_{11} и K_{22} , то есть приведение их к удобному для измерений значению относительно входной величины, обычно одному из стандартных значений, в данном случае выбрана величина 10 мВ/Н.

Таким образом, фактически электроизмерительный блок является специализированным двухканальным ортонормализатором, работающим на принципах преобразований векторов чувствительности, описанных в предыдущих главах.

3.1.4. Технические характеристики прибора

1. Рабочий диапазон частот при неравномерности 0,2 дБ3 - 1000Гц;
2. Номинальное значение коэффициента преобразования10 мВ/Н;
3. Номинальные значения нормализуемых чувствительностей датчиков4, 50, 100, 200, 400 пКл/Н;
4. Набег фазы на частотах:

2 Гц	+ 2 ⁰
5 Гц	+1 ⁰
10 Гц	0 ⁰
100 Гц	0 ⁰
500 Гц	- 0,5 ⁰
1000 Гц	-1 ⁰

5. Входной шумовой заряд в рабочем диапазоне частотне более 0,2 пКл;
6. Диапазон измерения0, 005 – 1000 Н;
7. Чувствительность усилителей заряда0. 16 мВ/пКл \pm 1%;
8. Диапазон подстройки нормализации \pm 33%;
9. Ёмкость входного кабеляне более 3000 пФ;
10. Максимальный ток нагрузки50 мА;
11. Коэффициент ослабления синфазной помехине менее 50 дБ;
12. Коэффициент компенсации механической помехи
на частоте 200 Гцне менее 60 дБ;
13. Максимальная ёмкость нагрузки3000 пФ;
14. Мощность, потребляемая от сетине более 10 Вт.

Значения параметров по п. 5 и 6 определены из представленных ниже спектрограмм выходного шумового напряжения, снятых в соответствующих режимах.

Для определения динамического диапазона измерений на входах усилителей заряда имитировался заряд, соответствующий заряду, вырабатываемому датчиком при воздействии на него силы, равной 0,01 Н. Результаты измерений представлены ниже на спектрограммах шумов и выходных сигналов, снятых для различных чувствительностей датчика и частот 3Гц и 500Гц.

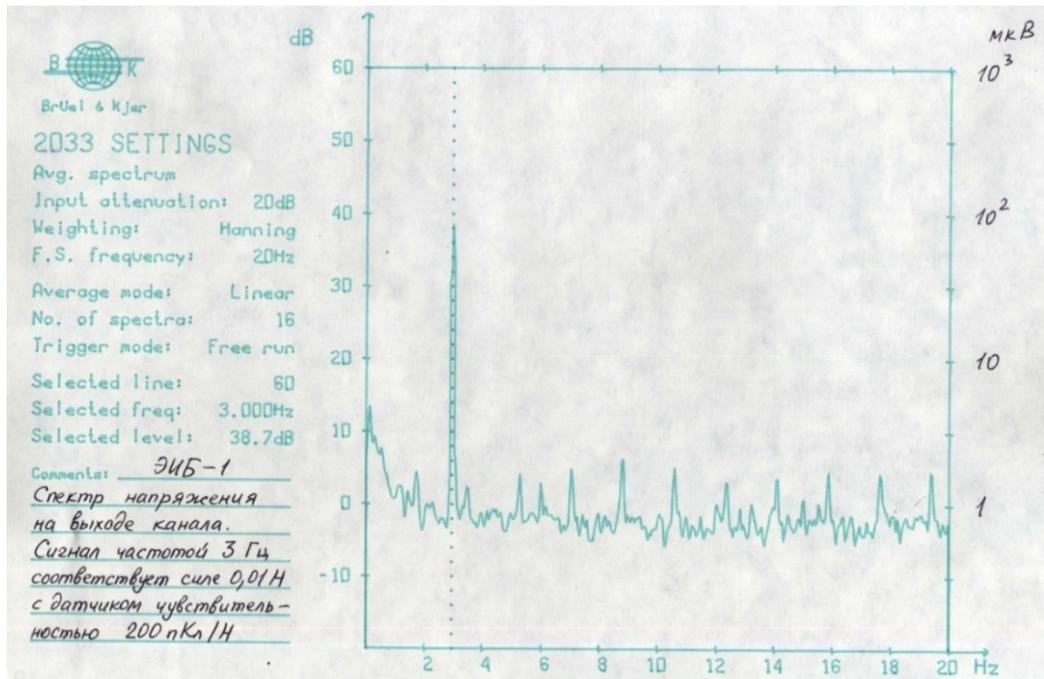


Рисунок 36. ЭИБ-1. Спектр выходного напряжения на частоте 3Гц с датчиком 200пКл/Н:

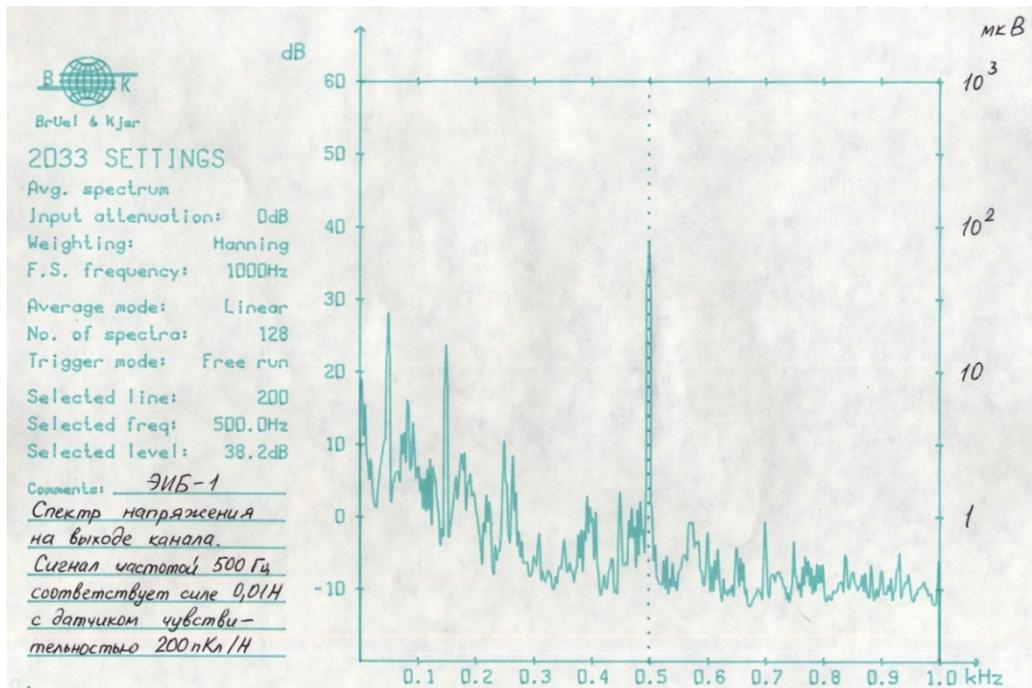


Рисунок 37. ЭИБ-1. Спектр выходного напряжения на частоте 500Гц с датчиком 200пКл/Н.

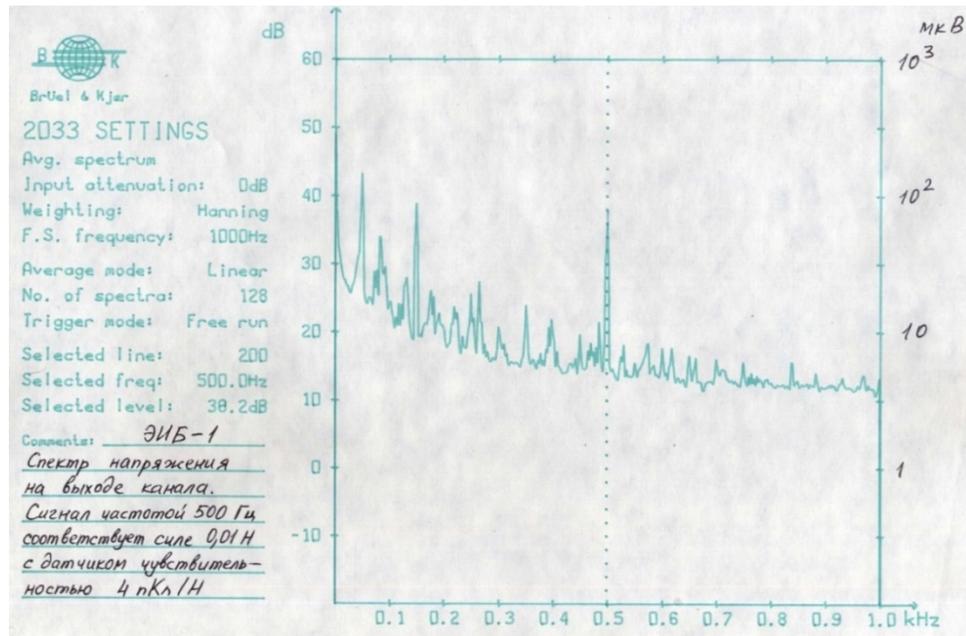


Рисунок 38. ЭИБ-1. Спектр выходного напряжения на частоте 500Гц с датчиком 4пКл/Н;

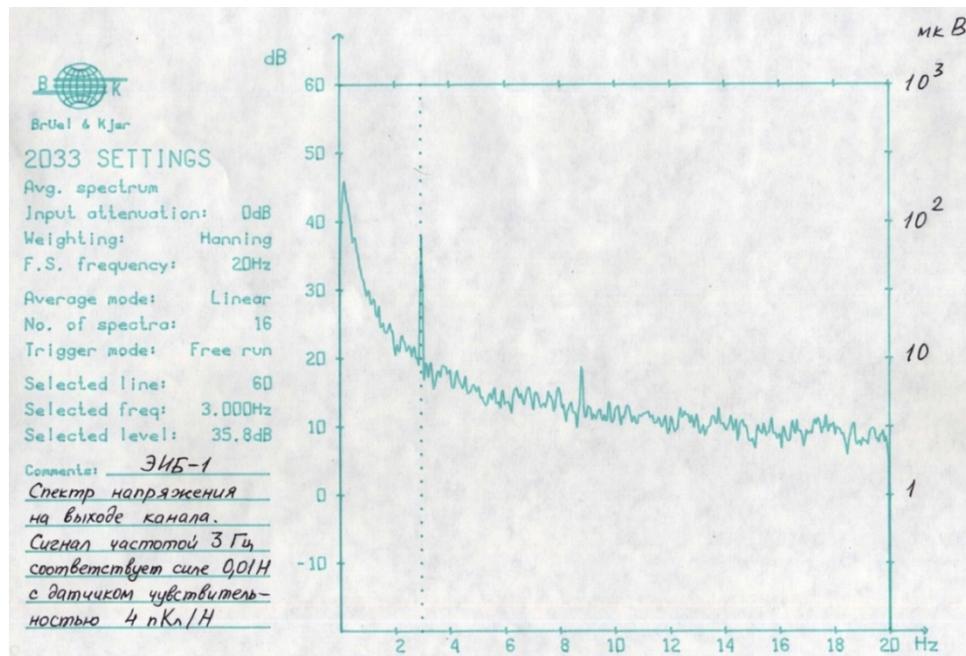


Рисунок 39. ЭИБ-1. Спектр выходного напряжения на частоте 3Гц с датчиком 4пКл/Н;

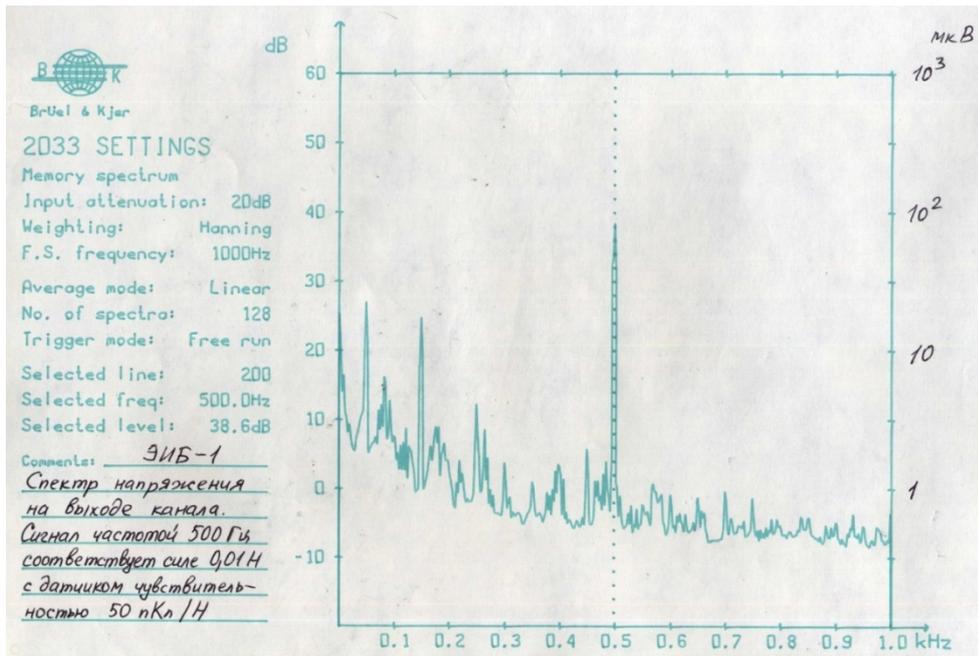


Рисунок 40. ЭИБ-1. Спектр выходного напряжения на частоте 500Гц с датчиком 50пКл/Н;

3.1.5. Результаты испытаний

Описанный выше электроизмерительный блок типа ЭИБ-1 успешно прошёл испытания у заказчика в МСПО им. Октябрьской революции (см. протокол испытаний, Приложение №2) и показал высокие параметры, полностью удовлетворяющие требованиям технического задания. Все характеристики, представленные выше, соответствуют требованиям, указанным в техническом задании, а некоторые превышают. По информации заказчика, с помощью этого прибора удалось провести тщательный анализ факторов, снижающих точность и быстродействие выпускаемых МСПО серийных балансировочных станков.

По результатам исследований были проведены доработки конструкции и алгоритма функционирования станков и разработаны станки нового поколения более высокого класса. В приложении №1 представлен акт сдачи-приёмки работ.

3.2. Специализированный ОНКП для системы измерения динамических сил в опорах

3.2.1. Общее описание

В этой главе приведён пример реализации предложенного метода для создания прецизионных систем измерения динамических сил, возникающих в механических объектах.

Эта измерительная система была разработана и изготовлена по заданию Калужского турбинного завода для измерения динамических сил в опорах при исследовании и приёмных испытаниях продукции и выполнена по договору с заводом. Этот прибор получил название УЗТ-ОН-4, что означает «Усилитель заряда трёхканальный-ортонормализатор, версия №4».

Одной из существенных проблем при измерении динамических сил в опорах многотонных конструкций является сложность организации требуемого базиса измерительных направлений. Кроме того, при эксплуатации таких измерительных систем остро стоит вопрос обеспечения надёжной защиты электронных приборов от перегрузок, возникающих при работе с пьезоэлектрическими силоизмерительными средствами. Так как при эксплуатации таких средств возможно появление квазистатических перегрузок, на выходах пьезоэлектрических датчиков силы создаются опасные напряжения для электронных приборов.

Разработанный прибор УЗТ-ОН-4 входит в состав трёхкоординатного силоизмерительного устройства. Он осуществляет устойчивое к перегрузкам согласование разработанных специально для этой системы датчиков динамической силы с согласующим предусилителем и производит первичное

преобразование сигналов. Его выходные сигналы отображают пространственную картину динамических сил на объекте в ортогональной системе координат.

Для этого прибора был разработан и изготовлен датчик силы – ДСНШ-2 с наружным шунтом (рисунок 45).

3.2.2. Структурная схема и описание работы прибора

Схема расположения датчиков на объекте представлена на рисунке 41.

На рисунке 42 представлена структурная схема прибора.

Измерительные датчики силы расположены на опоре объекта таким образом, что они формируют квазиортогональный базис измерительных осей. При этом они расположены группами таким образом, что образуют симметричную структуру, вырабатывающую сигналы с разными фазами, обеспечивающими точный и помехоустойчивый анализ сигналов, соответствующих динамическим силовым возбуждениям на фоне больших статических нагрузок.

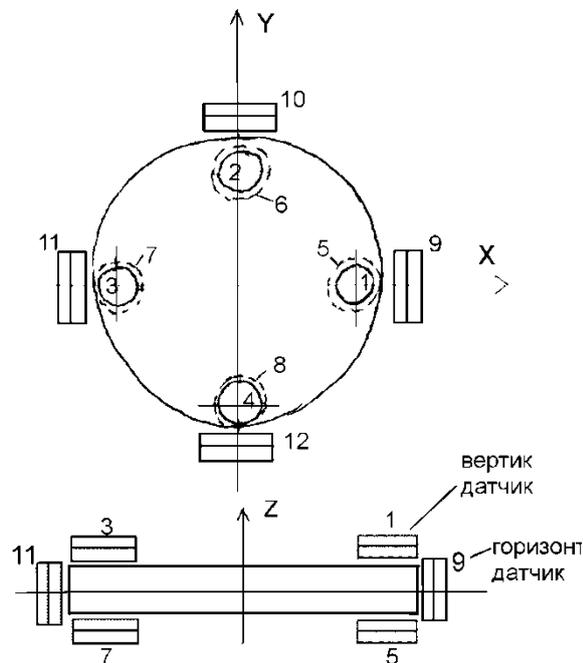


Рисунок 41. УЗТ-ОН-4. Схема расположения датчиков на объекте

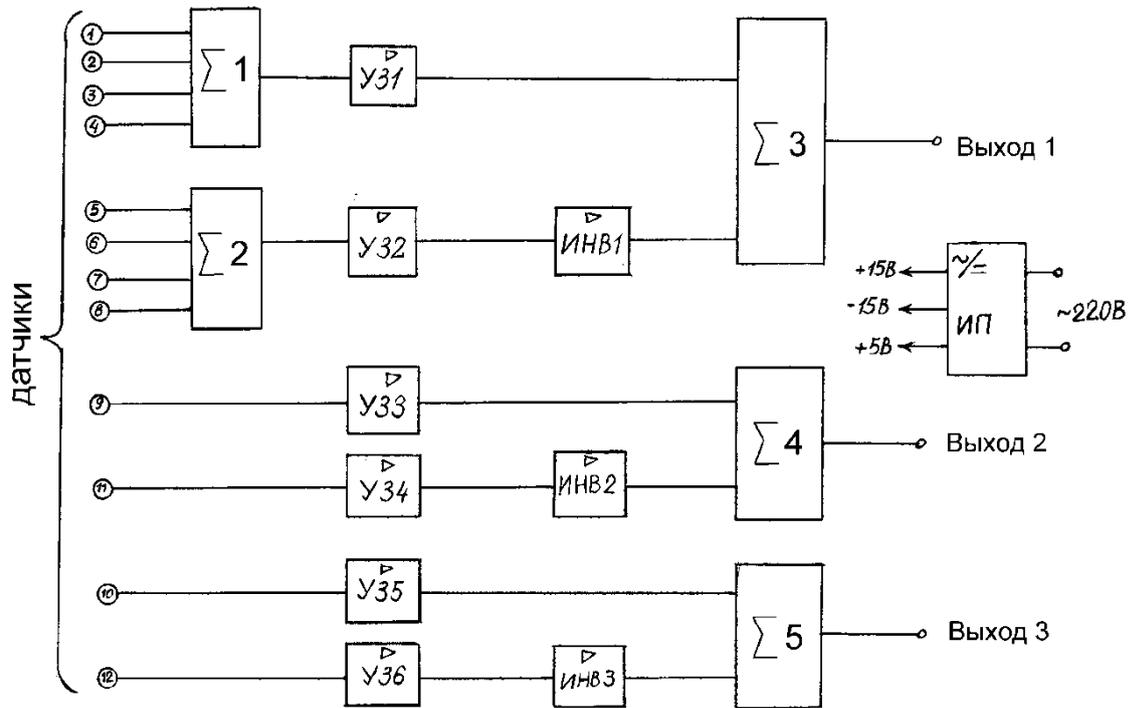


Рисунок 42. УЗТ-ОН-4. Структурная схема прибора

Ортогонализатор имеет три выхода: «Выход 1», «Выход 2» и «Выход 3», соответствующие трём координатам вектора динамической силы. На блок первичной обработки поступают сигналы с 12 пьезодатчиков силы, установленных в силоизмерительном устройстве в 3-х ортогональных направлениях (рисунок 41), в том числе:

- с 4-х датчиков с вертикальной осью чувствительности основного направления (по оси Z);
- с 4-х датчиков с вертикальной осью чувствительности противоположного основному направления;
- с 1 датчика с горизонтальной осью чувствительности (по оси X);
- с 1 датчика с горизонтальной осью чувствительности (по оси Y);
- с 1 датчика с горизонтальной осью чувствительности, направленной в противоположном к оси Y направлении.

На выходах прибора получаются 3 суммарных сигнала для трёх ортогональных направлений устройства. Для этого сигналы с датчиков

суммируются с учётом их фаз. Сигналы каждого направления подаются по длинным кабелям, имеющим стандартные разъёмы, на многоканальный анализатор, производящий их обработку в реальном масштабе времени.

Рассмотрим формирование выходного сигнала первого канала. Заряды, вырабатываемые первой группой датчиков, складываются в сумматоре $\Sigma 1$ и с выхода согласующего усилителя заряда УЗ 1 сигнал поступает на верхний по схеме вход сумматора $\Sigma 3$. На его второй вход поступает аналогичный сигнал от второй группы датчиков. Однако, поскольку датчики второй группы вырабатывают заряды с противоположной фазой по отношению к зарядам датчиков первой группы, сигнал с выхода усилителя заряда УЗ 2 дополнительно сдвигается по фазе на 180 градусов инвертором ИНВ 1 и синфазно с сигналом первой группы поступает на второй вход сумматора $\Sigma 3$. Таким образом, его выходной сигнал пропорционален сумме зарядов двух групп датчиков. Аналогичным образом формируются сигналы на остальных выходах ортогонализатора.

Выходное напряжение 1 канала будет равно:

$$\begin{aligned} U_{вых} &= S_q(\sum_{i=1}^4 Q_{i1} - \sum_{i=1}^4 Q_{i2}) = \\ &= S_q(\sum_{i=1}^4 S_{d_{i1}} F_{i1} - \sum_{i=1}^4 S_{d_{i1}} F_{i2}), \end{aligned} \quad (55)$$

где

S_q – зарядовый коэффициент преобразования ортонормализатора;

Q_{i1}, Q_{i2} – заряды, вырабатываемые i -ми датчиками соответственно 1-й и 2-й группы;

$S_{d_{i1}}, S_{d_{i2}}$ – зарядовая чувствительность i -х датчиков 1-й и 2-й группы;

F_{i1}, F_{i2} – силы, воздействующие на i -е датчики 1-й и 2-й группы.

Для 2-го и 3-го каналов:

$$U_{вых} = S_q(Q_1 - Q_2) = S_q(S_{d_1} F_1 - S_{d_2} F_2) \quad (56)$$

Прибор позволяет контролировать величины сил, воздействующие на датчики. Для этого в каждом канале предусмотрены выходы усилителей заряда, напряжения на которых равны:

$$U_{\text{ВЫХ}_{y3}} = S_{y3} \sum_{i=1}^4 Q_i = S_{y3} \sum_{i=1}^4 S_{d_i} F_i \quad (57)$$

Выше показано как в приборе производятся преобразования сигналов с датчиков разных групп для получения на выходах сигналов, соответствующих квазиортогональному базису измерительных направлений в силоизмерительном устройстве на объекте. Однако, эквивалентные вектора чувствительности измерительной системы, как и для ТОДВ различной конструкции, описанных выше, могут быть неточно направлены вдоль ортогональных измерительных направлений. Фактически это означает, что матрица чувствительностей системы, аналогично описанном выше, содержит отличные от нуля недиагональные элементы, представляющие собой паразитные чувствительности к поперечным направлениям:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (58)$$

Для точной ортогонализации измерительного базиса, в приборе предусмотрены регуляторы плавной подстройки межканальных коэффициентов преобразования. Процесс точной ортогонализации производится аналогично тому, как это описано выше для ТОДВ. Для этого на этапе настройки системы с помощью специализированных вибраторов производится задание калибровочных возбуждений вдоль заданных направлений и точная подстройка коэффициентов преобразования в каналах. При этом производится фактически диагонализация матрицы эквивалентных чувствительностей.

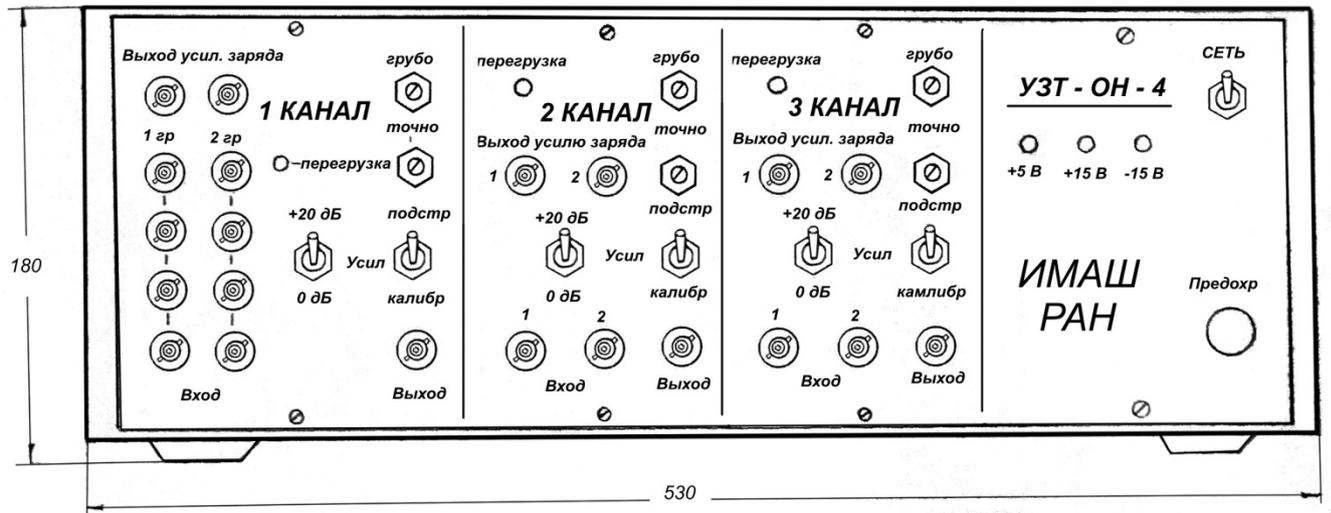


Рисунок 44. УЗТ-ОН-4. Общий вид передней панели



Рисунок 45. УЗТ-ОН-4. Датчик динамической силы ДСНШ-2

3.2.3. Технические характеристики прибора

- 3.2.3.1. Рабочий диапазон частот по уровню -3дБ2 – 200 Гц;
- 3.2.3.2. ДатчикиДСНШ-2 чувствительностью 100 пКл/Н
и внутренней ёмкостью 10000 пФ;
- 3.2.3.3. Рабочий диапазон сил для каждого датчика0,05 – 100Н (СКЗ);
- 3.2.3.6. Предусмотрена защита прибора от перегрузки входными сигналами,
превышающими верхний предел диапазона измерений.
- 3.2.3.7. Максимальная ёмкость входного кабеля3000пФ;
- 3.2.3.8. Минимальное сопротивление нагрузки2кОм;
- 3.2.3.9. Максимальная ёмкость нагрузки3000 пФ;
- 3.2.3.10. Питание от сети переменного тока напряжением 220В частотой 50Гц.
Потребляемая мощность не более 10 Вт.

3.2.4. Результаты испытаний

Разработанный прибор УЗТ-ОН-4 совместно с датчиками ДСНШ-2 был передан на Калужский турбинный завод. Проведённые испытания показали полное соответствие технических характеристик прибора. По информации, полученной от заказчика, в результате применения этой измерительной системы получены уникальные данные о распределения динамических сил в конструкции, с помощью которых производился анализ вибрационных параметров выпускаемой продукции.

Переданный заказчику прибор УЗТ-ОН-4 работал надёжно на протяжении длительного времени и полученные с его помощью данные помогли существенно улучшить технические характеристики и повысить надёжность выпускаемой продукции.

3.3. Программно-аппаратный комплекс для ортонормализации ТОДВ на основе однокристального микропроцессора

3.3.1. Назначение и основные свойства

В развитие работ по практической реализации предложенного метода повышения точности измерения вибрации с помощью ТОДВ был разработан компьютеризированный комплекс аппаратуры для автоматизированной настройки ТОДВ с целью ортогонализации и нормализации их векторов чувствительности на специализированном вибростенде с управлением от микропроцессора и проведены его стендовые испытания [61]. Этот программно-аппаратный комплекс представляет собой управляемый микропроцессором трёхканальный усилитель заряда с симметричными входами, обеспечивающий работу с трёхкомпонентными пьезоэлектрическими датчиками (ТОДВ) с прямоугольной или косоугольной системами измерительных осей, имеющими симметричные или несимметричные выходы.

Он осуществляет следующие функции:

- согласование импеданса ТОДВ с входным сопротивлением аппаратуры обработки сигналов;
- ортогонализацию векторов электромеханического преобразования путём электронной компенсации помеховых сигналов в каналах, появляющихся вследствие наличия у датчика поперечной чувствительности;
- нормализацию коэффициентов электромеханического преобразования каналов, то есть приведение их к одному из стандартных значений, одинаковому для всех

каналов, путём введения в коэффициенты передачи каналов поправок, обратных чувствительностям соответствующих выходов датчика;

– обеспечение высокой помехоустойчивости измерений в условиях повышенного уровня внешних помех, попадающих в цепи датчика;

– измерение и запоминание коэффициентов матрицы чувствительностей датчиков, дающие возможность оперативно перенастраивать ортонормализатор при работе с разными датчиками, а также производить паспортизацию датчиков, позволяющую ортонормализовать их при работе с другими ортонормализаторами. Кроме того, это позволит оперативно производить перекалибровку датчиков при проверке в процессе эксплуатации;

Обработка сигналов при ортонормализации осуществляется в цифровом виде с помощью встроенного в ортонормализатор однокристалльного микропроцессора, производящего вычисление коэффициентов обратной матрицы чувствительности датчика и использующего их при работе с датчиком.

Таким образом, применение такого ортонормализатора или предусилителя-компенсатора (ОНПК), позволяет обеспечить высокую точность измерений при использовании ТОДВ со значительными погрешностями измерительных систем, а также снизить требования к точности изготовления их измерительных систем в серийном производстве, что повышает процент выхода датчиков и снижает их себестоимость.

3.3.2. Структурная схема комплекса

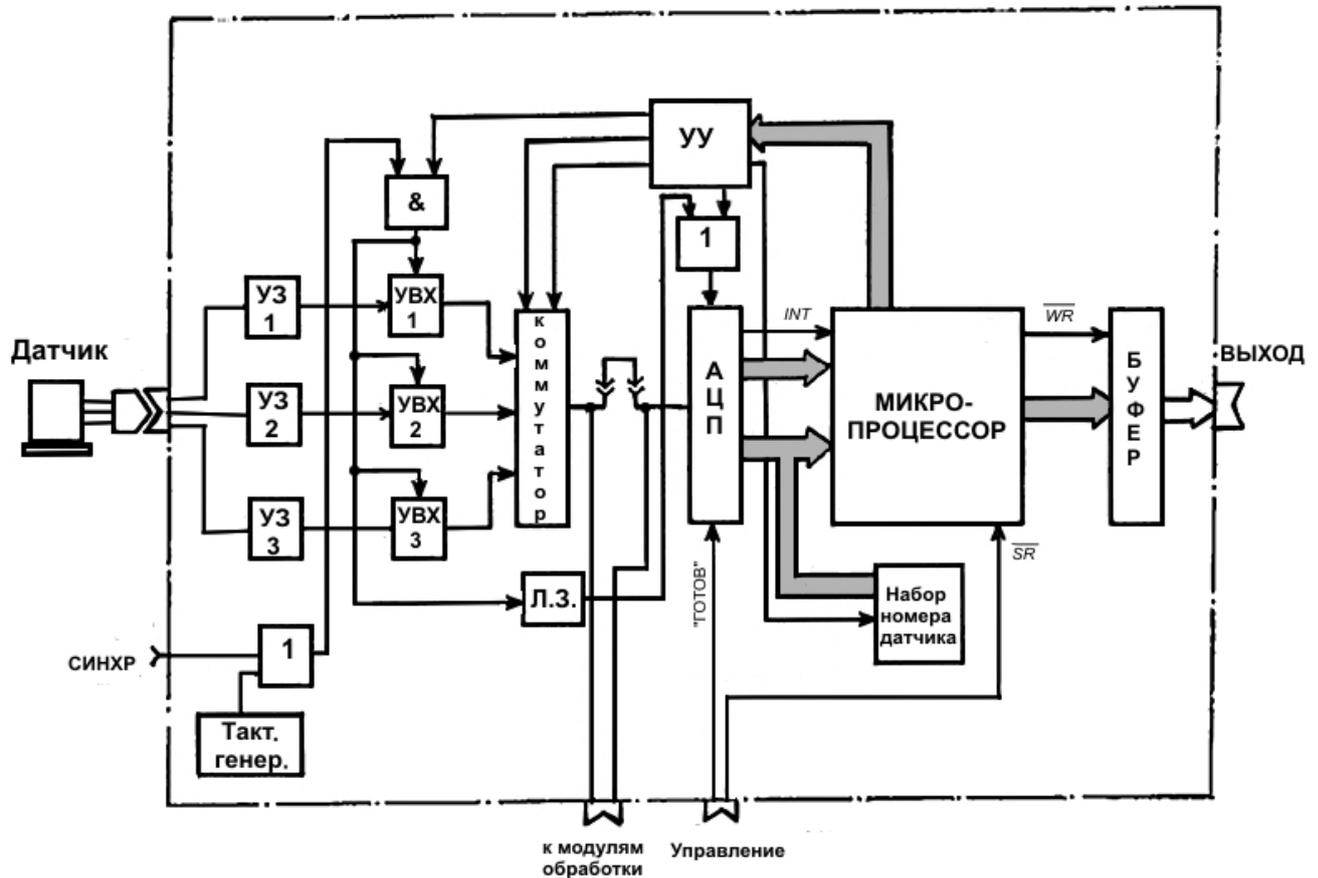


Рисунок 46. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для ортонормализации ТОДВ

Комплекс состоит из следующих модулей:

- три канала обработки аналоговой информации;
- аналого-цифровой преобразователь;
- однокристалльный микропроцессор (МП);
- коммутационные устройства связи с МП в режимах отладки и работы;
- устройства управления;
- устройство набора номера датчика.

Назначение модулей:

Канал аналоговой обработки информации состоит из: усилителя заряда, устройства выборки-хранения, аналогового коммутатора и тактового генератора. Усилитель заряда преобразует и усиливает сигналы ТОДВ. Устройство выборки-хранения запоминает в момент выборки и хранит на время преобразования сигнал с выхода усилителя заряда.

Аналоговый коммутатор подключает один из трёх сигналов ТОДВ к АЦП.

Тактовый генератор вырабатывает тактовые импульсы, по которым осуществляется выборка сигналов. При многоточечных измерениях с использованием большого числа датчиков необходимо тактирование всех ортонормализаторов одним генератором. Для этого в ортонормализаторе предусмотрен вход внешнего тактового генератора.

Однокристальный микропроцессор предназначен для управления каналами аналоговой обработки и АЦП, осуществления цифровой обработки сигналов ТОДВ и выдачи результатов измерений в цифровом параллельном коде на интерфейс.

МП состоит из микроконтроллера, буферных каскадов связи и цепей управления каналами обработки и АЦП.

Коммутационные устройства связи позволяют в режиме отладки подключать в канал модуль аналоговой обработки (масштабный усилитель и полосовой фильтр) и осуществлять связь с отлаживающей ЭВМ; в режиме работы организовывать сеть многоточечного измерения.

Устройство управления дешифрует двоичный код управления от МП в позиционный.

Устройство набора номеров датчиков позволяет набирать номер датчика.

3.3.3. Структурная схема стенда для настройки ортонормализатора

В режиме отладки ортонормализатора организуется специализированный стенд (рисунок 47), в который входят:

- отладочная ЭВМ;
- интерфейс ЭВМ;
- модуль аналоговой обработки;
- микропроцессорный ортонормализатор;
- модуль программирования.

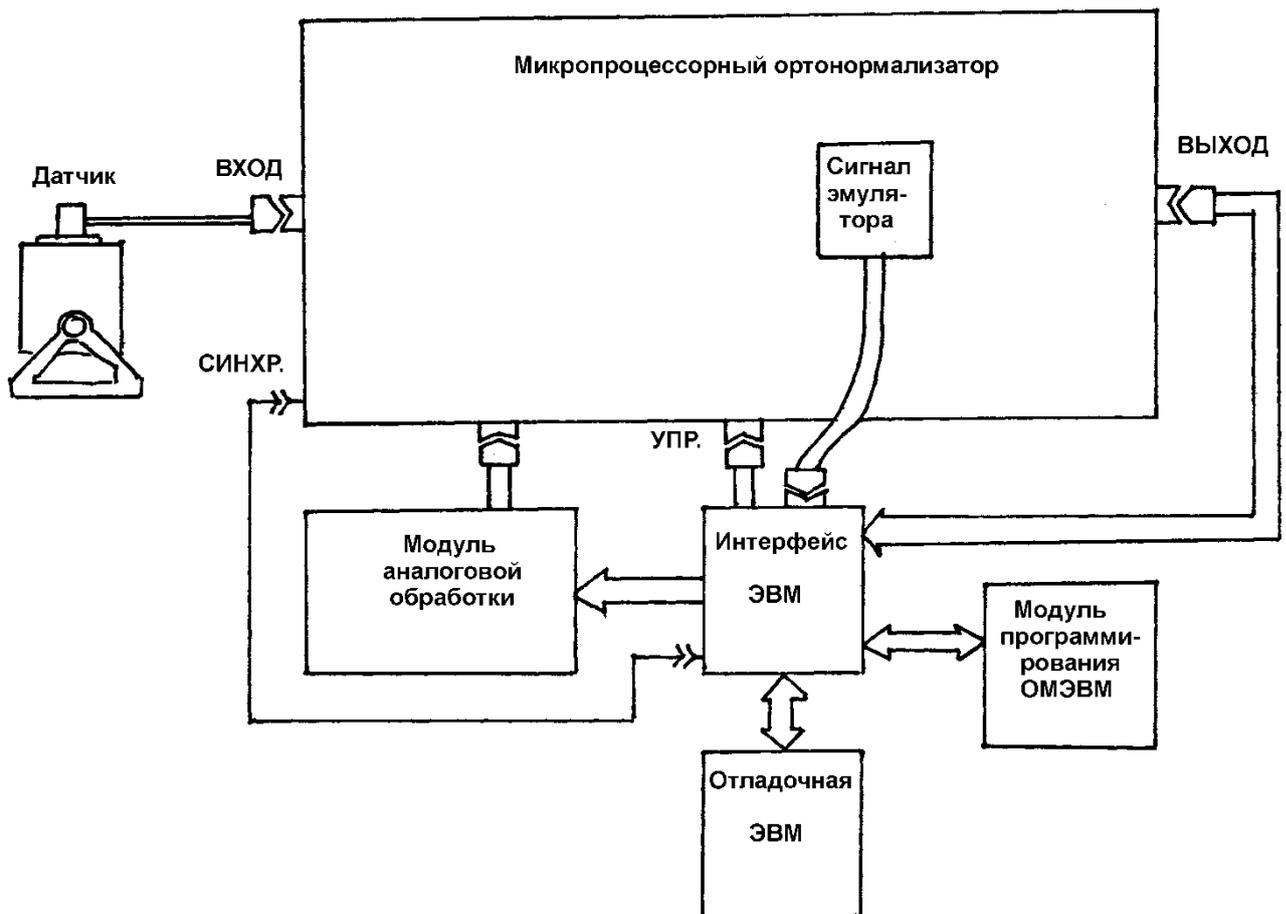


Рисунок 47. Структурная схема стенда для настройки микропроцессорного ортонормализатора

Отладочная ЭВМ предназначена для вычисления коэффициентов ортонормализации конкретного образца датчика, записи этих коэффициентов и программ обработки сигналов в память однокристалльной ЭВМ и проверки правильности работы микропроцессорного ортонормализатора.

Интерфейс ЭВМ предназначен для сопряжения отладочной ЭВМ, модуля ортонормализатора, модуля аналоговой обработки и модуля программирования на этапах отладки и проверки модуля ортонормализатора.

Модуль аналоговой обработки состоит из масштабного усилителя, полосового фильтра и коммутатора аналоговых сигналов и предназначен для обработки сигналов с датчика в режиме вычисления коэффициентов ортогонализации.

Модуль программирования предназначен для записи в микропроцессор программы обработки и коэффициентов ортогонализации датчика.

Микропроцессорный ортонормализатор на этапе отладки работает как адаптер аналоговой обработки. Функции однокристалльного микропроцессора выполняет отладочная ЭВМ, которая подключается к модулю ортонормализатора вместо модуля программирования.

В процессе отладки исследуемый датчик устанавливается на вибростенд и подключается к отладочному стенду. На вибростенд подаётся образцовый сигнал. ЭВМ проводит обмеры выходов датчика для одного измерительного направления. Затем такие же измерения проводятся в двух других направлениях.

По результатам измерений вычисляются коэффициенты ортонормализации. Эти коэффициенты вместе с программой работы ортонормализатора записываются в память микропроцессора.

После этого проводится проверка отлаженного нормализатора: переходник интерфейса отладочной ЭВМ отключается и вместо него подключается запрограммированный экземпляр модуля программирования. Далее на вибростенд подаётся калибровочный сигнал. По выходным цифровым сигналам отладочная ЭВМ проводит заключительную проверку ортонормализатора.

3.3.4. Алгоритм работы

3.3.4.1. Алгоритм настройки ортонормализатора

Алгоритм настройки ортонормализатора представлен на рисунке 48.

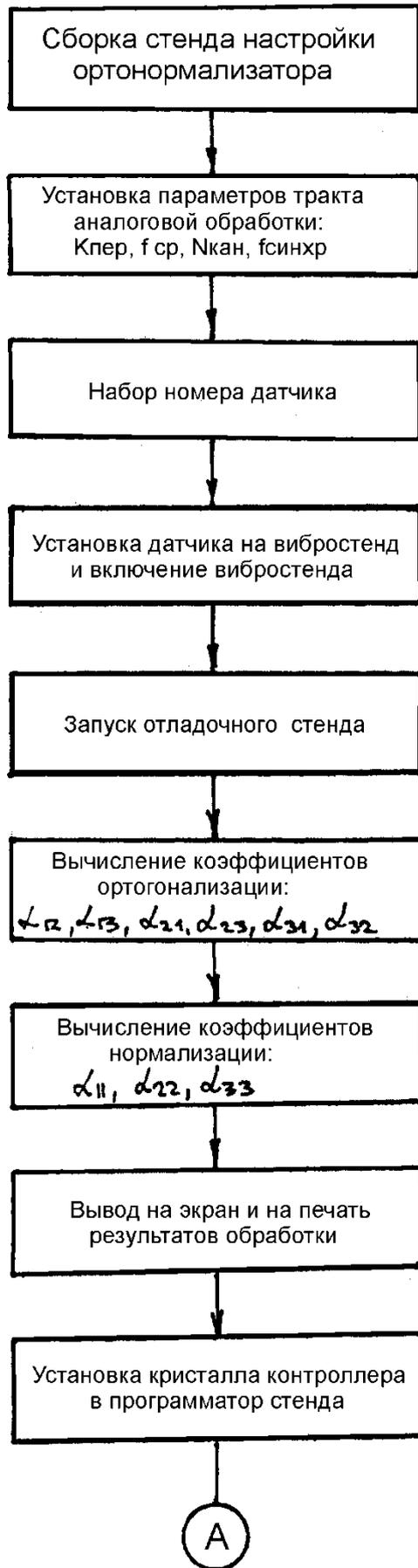




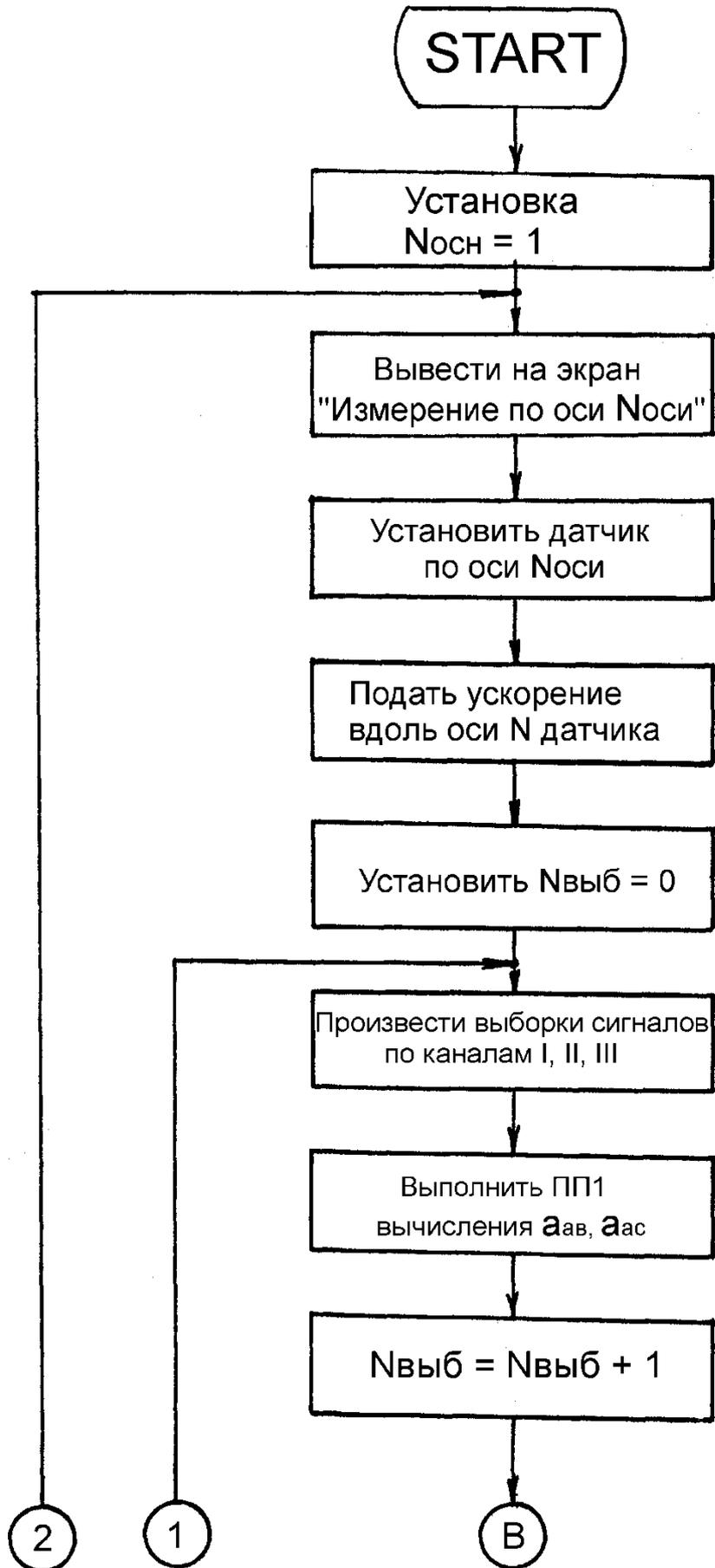
Рисунок 48. Алгоритм настройки ортонормализатора

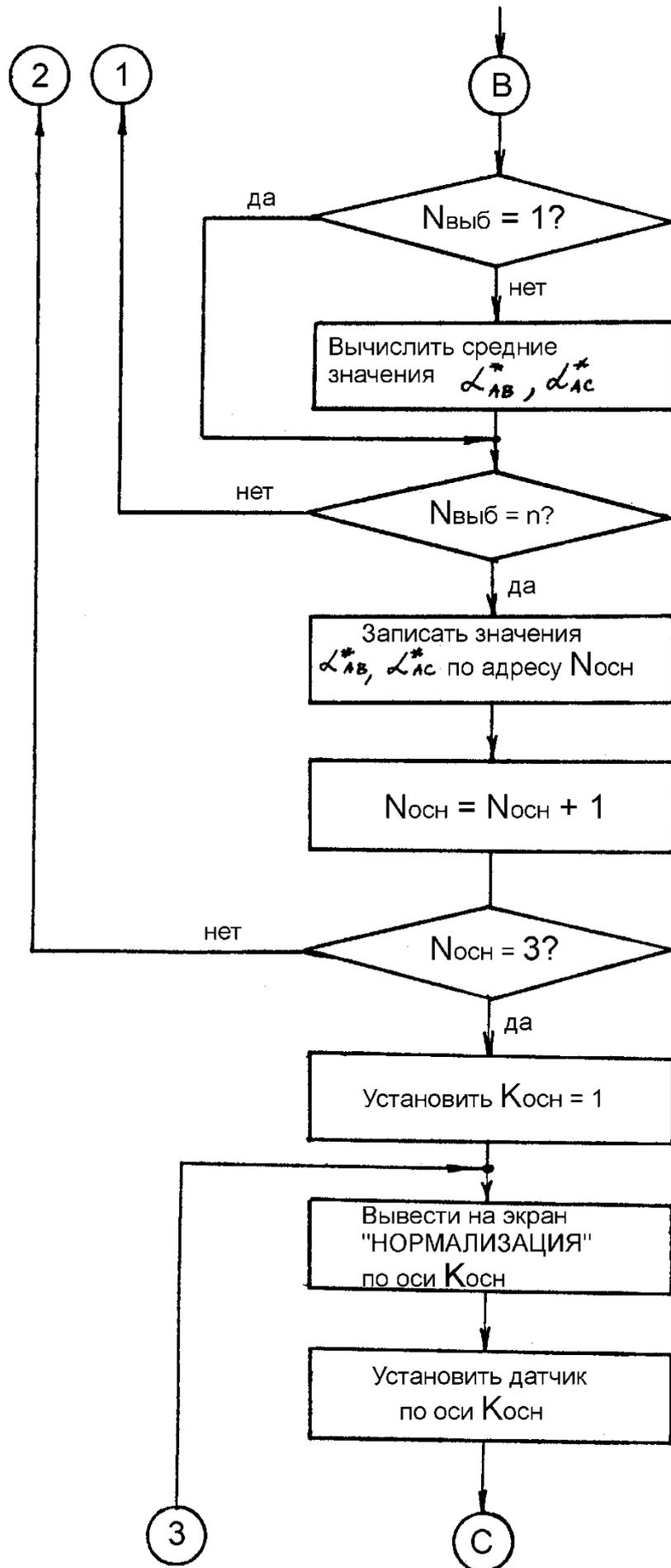
Работа по настройке ортонормализатора начинается со сборки стенда, представленного на рисунке 47. Устанавливаются параметры модуля аналоговой обработки:

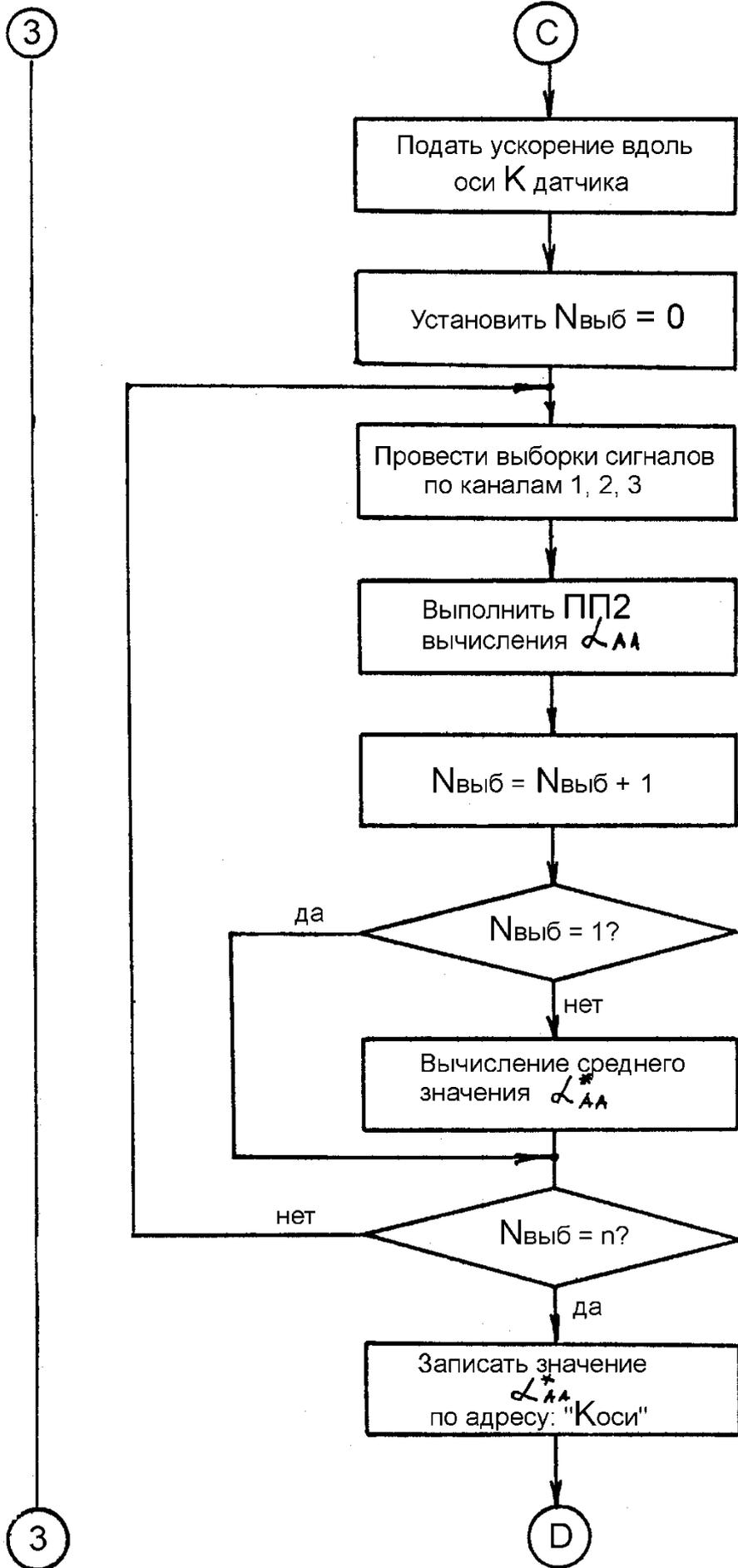
- коэффициент передачи масштабного усилителя;
- частота среза полосового фильтра и переключения коммутатора;

Далее выбирается частота синхронизации, которая определяет максимальную частоту обрабатываемого сигнала. На вибростенд устанавливается датчик по оси 1. Подается калибровочное ускорение. Запускается отладочный стенд, на котором проводятся измерения. По результатам измерений определяются коэффициенты ортогонализации и нормализации по оси 1 для данного датчика. Эти результаты выводятся на экран, на печать и запоминаются в ОЗУ отладочной ЭВМ. Затем такие же операции производятся по осям 2 и 3.

Алгоритм вычисления коэффициентов ортогонализации и нормализации представлен на рисунке 49.







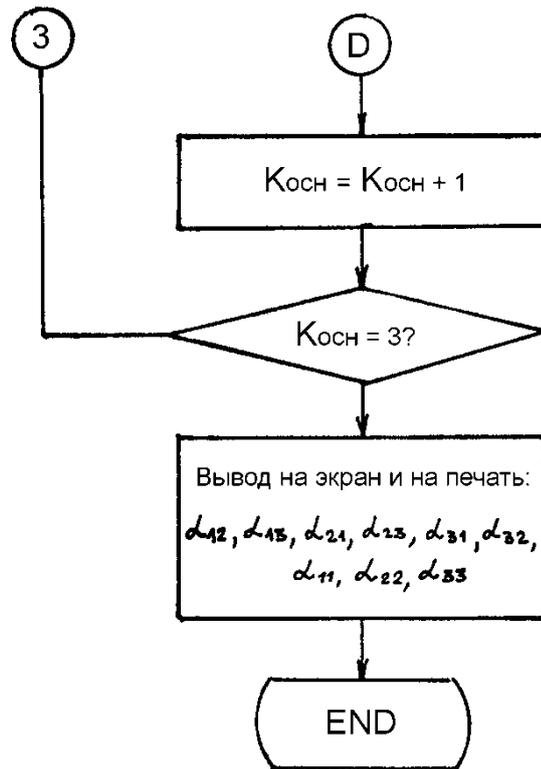


Рисунок 49. Алгоритм вычисления коэффициентов ортонормализации

Если с данным модулем ортонормализатора будут работать несколько датчиков, то вычисление коэффициентов проводится для каждого из них. Эти данные с номерами датчиков записываются в ОЗУ ЭВМ. На следующем этапе производится прошивка полученных данных в память ПЗУ с помощью соответствующего программатора. Структура данных такая: программа обработки (ортонормализация и нормализация), номера датчиков и соответствующие им коэффициенты $\alpha_{12}, \dots, \alpha_{33}$. Затем содержимое ОЗУ программатора записывается в ПЗУ. После цикла программирования производится проверка правильности прошивки. После этого проверяется работоспособность всего модуля ортонормализатора. Запрограммированный чип устанавливается в модуль ортонормализатора. От стенда отключается модуль аналоговой обработки. Проверка производится по всем трём осям датчика. Выходной цифровой код ортонормализатора анализируется отладочной ЭВМ.

Заключительный этап – маркировка датчика и заполнение паспорта ортонормализатора.

3.3.4.2. Алгоритм работы модуля ортонормализации

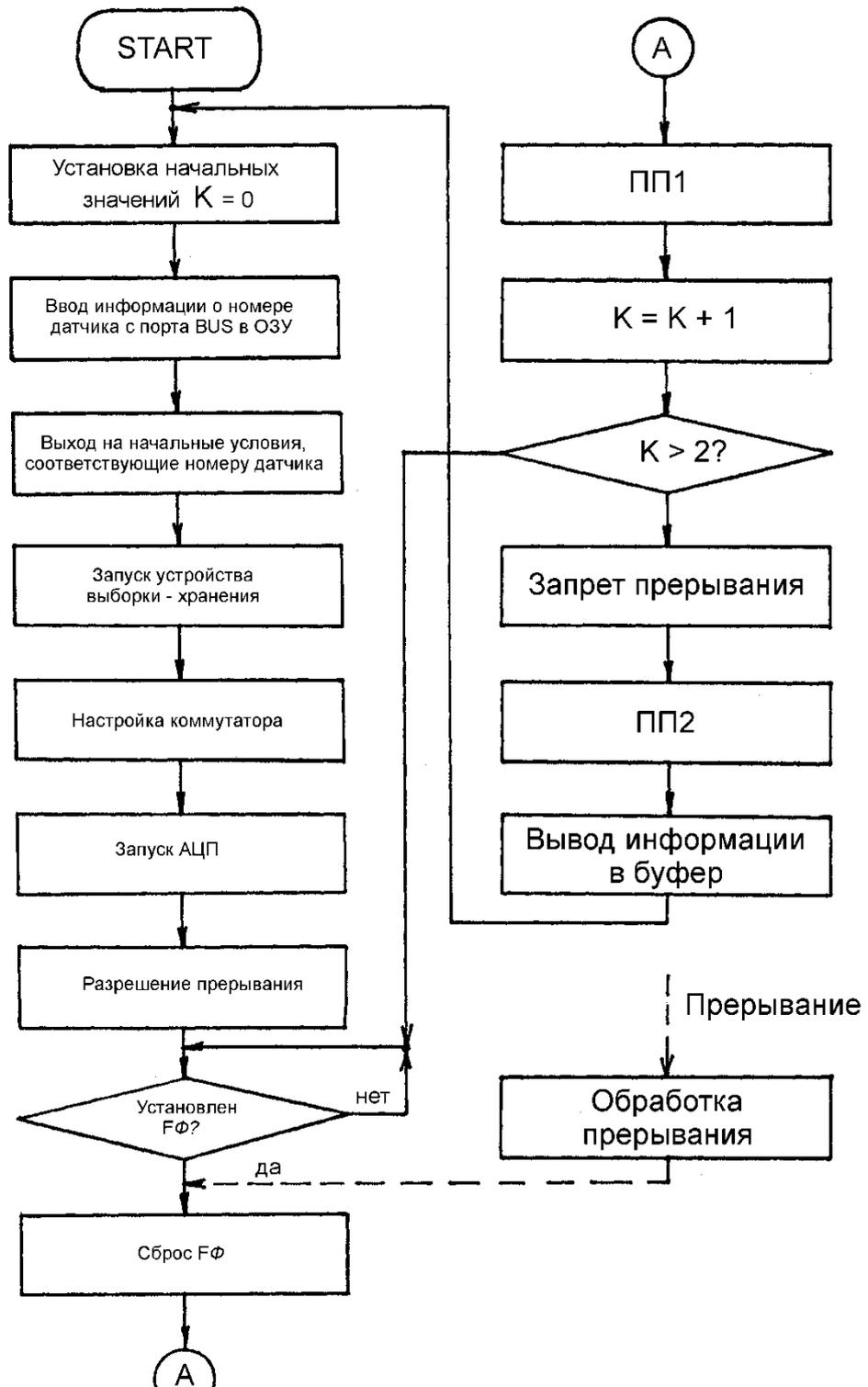


Рисунок 50. Алгоритм работы ортонормализатора на основе однокристального микропроцессора

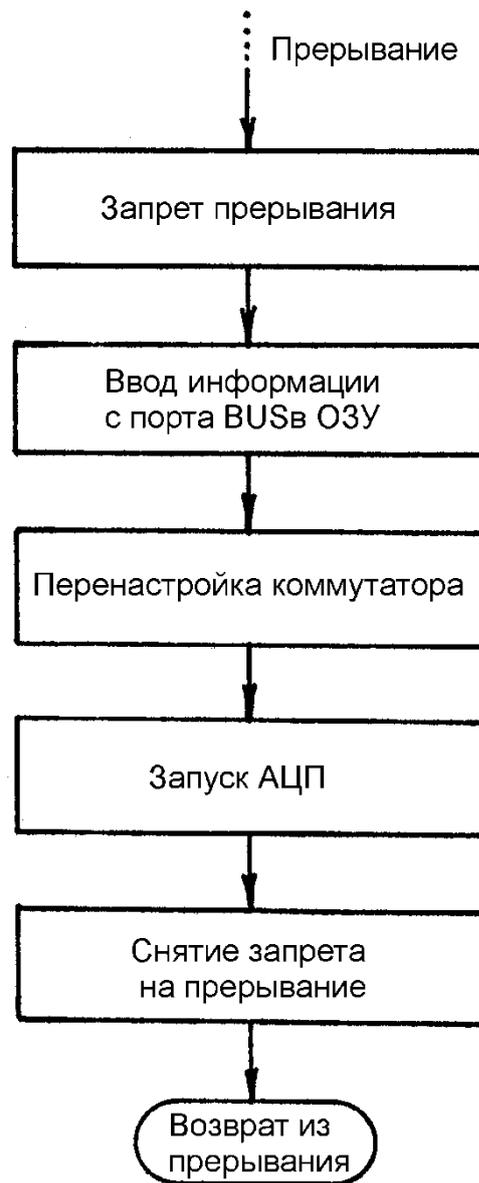


Рисунок 51. Алгоритм подпрограммы обработки прерывания

При включении питания модуля ортонормализатора производится установка начальных значений работы: $K=0$, ввод информации о номере датчика и запись в ОЗУ коэффициентов $\alpha_{12, \dots, \alpha_{33}}$, соответствующих этому датчику.

Затем последовательно производятся следующие операции.

1. Запуск устройств выборки-хранения аналоговой информации (запускаются с устройства управления УУ одновременно все три). Таким образом, осуществляется синхронность выборки значений, составляющих вектора сигнала и хранение их на время обработки.

2. Производится настройка коммутатора подачи соответствующего кода по двухадресной шине через устройство управления.
3. Выбирается составляющая вектора, которая будет обрабатываться в этом цикле.
4. Запускается аналого- цифровой преобразователь подачи сигнала с устройства управления (через порт P2).

После этих операций выполняется команда EN1– разрешение прерываний, и начинается опрос флага F_{INT} (5-й разряд регистра слова состояния процессора) на наличие сигнала прерывания от внешнего устройства (АЦП). По завершении процесса преобразования сигнала АЦП выдаёт сигнал “ГОТОВ” и выставляет данные преобразования на 12-разрядную шину данных. Сигнал “ГОТОВ” поступает на вход “INT” и устанавливает флаг F_{INT} . Начинается обработка подпрограммы прерывания по нижеописанному алгоритму.

Первым этапом выполнения подпрограммы обработки прерывания производится запрет на последующие прерывания. Затем осуществляется ввод информации с 8-разрядного порта BUS и четырёх разрядов с порта P2 ($P2_0 \dots P2_{03}$) в ОЗУ. После этого коммутатор через УУ переключается на следующий канал и запускается АЦП.

Далее снимается запрет на прерывание и осуществляется возврат из подпрограммы обработки прерывания. После возвращения из подпрограммы обработки прерывания производится сброс флага F_{INT} и начинает выполняться подпрограмма ПП 1.

Подпрограмма ПП 1 осуществляет вычисление произведений:

$$P_{ik} = a_k \beta_{ik} \quad \text{для } i= 1- 3 \text{ и } k= 1- 3 \quad (59)$$

где:

a_k – значение составляющей вектора сигнала ускорения, появляющейся на k-м канале,

β_{ik} – значения обобщённых коэффициентов ортонормализации.

Коэффициенты β_{ik} определены заранее и их значения предварительно записаны в ППЗУ.

После выхода из подпрограммы вычисления произведений производится увеличение k на 1 (k – номер канала, или, что тоже самое, номер составляющей вектора сигнала) и осуществляет проверку значения этого коэффициента. В случае $k < 3$ программа производит выборку и обработку следующего канала (следующей составляющей вектора данного сигнала ускорения), то есть возвращается к моменту анализа флага $F\Phi$.

После того как обработаны все три составляющие вектора сигнала на определённый момент выборки, то есть $k > 2$, производится выдача сигнала на запрет прерывания и осуществляется выполнение подпрограммы ПП2. Эта подпрограмма производит вычисление значений составляющих вектора по каждому каналу с учётом влияния составляющих вектора, поступающим по двум другим каналам, то есть производится операция алгебраического суммирования с учётом знака произведений Π_{ik} по следующей формуле:

$$U_i = \sum_{k=1}^3 \Pi_{ik} \quad (60)$$

По выполнении подпрограммы ПП2 осуществляется выдача результатов вычислений в виде двух байтов с порта ввода - вывода P1 через буферное устройство в интерфейс управляющей ЭВМ:

ПЕРВЫЙ БАЙТ – 0...3p – старшие значащие разряды данных;

4p – знаковый разряд;

5, 6p – разряды номера канала;

7p – маркер первого байта (“0”);

ВТОРОЙ БАЙТ – 0...6p – младшие значащие разряды данных;

7p – маркер второго байта;

После этого возобновляется выполнение всего алгоритма сначала.

3.4. Программа визуализации пространственных форм колебаний механических конструкций

В развитие работ по созданию систем измерения и мониторинга вибрации на основе предложенного метода разработана и опробована программа визуализации пространственных форм колебаний поверхности широкого спектра конструкций. Визуализация пространственных форм колебаний позволяет получить на дисплее последовательность изображений колебаний точек конструкции или деформаций конструкции в фиксированные моменты времени. Построение изображения даёт возможность оценивать расположение критических точек конструкции: точек с наибольшими амплитудами колебаний по перемещению, скорости или ускорению, точек повышенной концентрации напряжений и др.

Для визуализации пространственных форм колебаний используются сигналы, снимаемые с датчиков, установленных на конструкции. Координаты (x_i, y_i, z_i) точек, в которых они размещены, вводятся в память ЭВМ. Эти точки выводятся на дисплей, причём с целью изображения трёхмерной структуры на плоскости вводится преобразование координат, соответствующее предварительно выбранному виду аксонометрической проекции, например

$$\begin{aligned} x'_i &= y_i - \frac{\sqrt{2}}{4} x_i \\ y'_i &= z_i - \frac{\sqrt{2}}{4} x_i \end{aligned} \quad (61)$$

для изометрии или

$$\begin{aligned} x'_i &= (y_i - x_i) \frac{\sqrt{3}}{2} \\ y'_i &= z_i - \frac{(y_i + x_i)}{2} \end{aligned} \quad (62)$$

для косоугольной диметрии.

Рассматриваемая система допускает подключение 128 входных сигналов, при этом число N точек, в которых установлены датчики, не превышает 128 при установке одноосевых датчиков или 42 – для трёхосевых датчиков.

Наблюдение за перемещением или деформацией конструкции упрощается, если в множестве изображаемых на дисплее точек выделить одну или несколько групп. При этом точки каждой из групп соединяются отрезками прямых в одну линию или замкнутый контур. Объединение точек в одну группу должно, по возможности, удовлетворять геометрии конструкции и её физической структуре. Процесс визуализации состоит в том, что при получении координат $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$, $i = 1, \dots, N$ – соответствующих очередному моменту времени t , происходит стирание старых контуров и вычерчивание новых, отвечающих новым значениям координат $x'_i(t)$, $y'_i(t)$, $z'_i(t)$, полученных в соответствии с формулами (61) и (62), то есть новый контур проходит через смещённые точки с теми же номерами. При этом, если требуется, может быть сохранено изображение структуры в исходном состоянии. Возможно также изображение векторов смещения точек конструкции.

Вычисление значений координат $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$ для данной формы колебаний производится следующим образом.

1. Выполняется ввод сигналов $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$, $i = 1, \dots, N$; $t = 0, 1, \dots, D - 1$, где $D = 64, 128, 256, \dots$.
2. Для введённых реализаций входных сигналов выполняется вычисление дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Полученные функции в частотной области $A_k(\omega)$, $k = 1, \dots, 3N$:
 $A_{3i-2}(\omega) = X_i(\omega)$, $A_{3i-1}(\omega) = Y_i(\omega)$, $A_{3i}(\omega) = Z_i(\omega)$
представляют собой комплексные величины
 $A_k(\omega) = \text{Re}A_k(\omega) + j\text{Im}A_k(\omega)$
3. для визуализации выбирается составляющая в спектрах, соответствующая частоте, выбираемой заранее либо полученной после просмотра спектров.
4. На выбранной частоте ω строятся гармонические сигналы вида
 $a_k(t) = \text{Re}A_k(\omega)\cos \omega t + \text{Im}A_k(\omega)\sin \omega t$

5. Построенные сигналы используются для визуализации формы пространственных колебаний во времени с учётом выражения (61) или (62) для преобразования координат при переходе к аксонометрической проекции.

Работа программы начинается с ввода значений интервала времени между последовательными изображениями и времени окончания процесса. После этого задаётся вид проекции (изометрия или косоугольная диметрия) и в соответствии с ним происходит изображение недеформированной конструкции на дисплее. После этого происходит ввод модальных параметров интересующей нас моды колебаний. В соответствии с ними вычисляются координаты точек конструкции в момент $t = 0$ и изображение конструкции с учётом вида аксонометрической проекции выводится на дисплей. Происходит переход к следующему моменту времени и цикл визуализации повторяется, пока не будет достигнут момент окончания процесса.

В программе предусмотрена возможность прерывания с клавиатуры, что позволяет вывести интересующее нас изображение деформированной конструкции.

Текст программы приведён в Приложении 4.

Текст программы построения изображений на принтере приведён в Приложении 5.

Подана заявка на государственную регистрацию исходных кодов этих программ.

С помощью описанных программ проведены моделирование и визуализация формы колебаний на прямоугольной раме. Параметры формы приведены в таблице 3.

На рисунке 52 представлено распределение возмущений поверхности рамы в момент времени, соответствующий прерыванию с клавиатуры, полученное с помощью программы визуализации.

Таблица 3. Параметры формы

	Стороны АВ, СД			Стороны ВС, ДА		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Амплитуда	0	0	1	0	0	1
Фаза	0	0	90	0	0	90
Число волн на стороне	1			2		

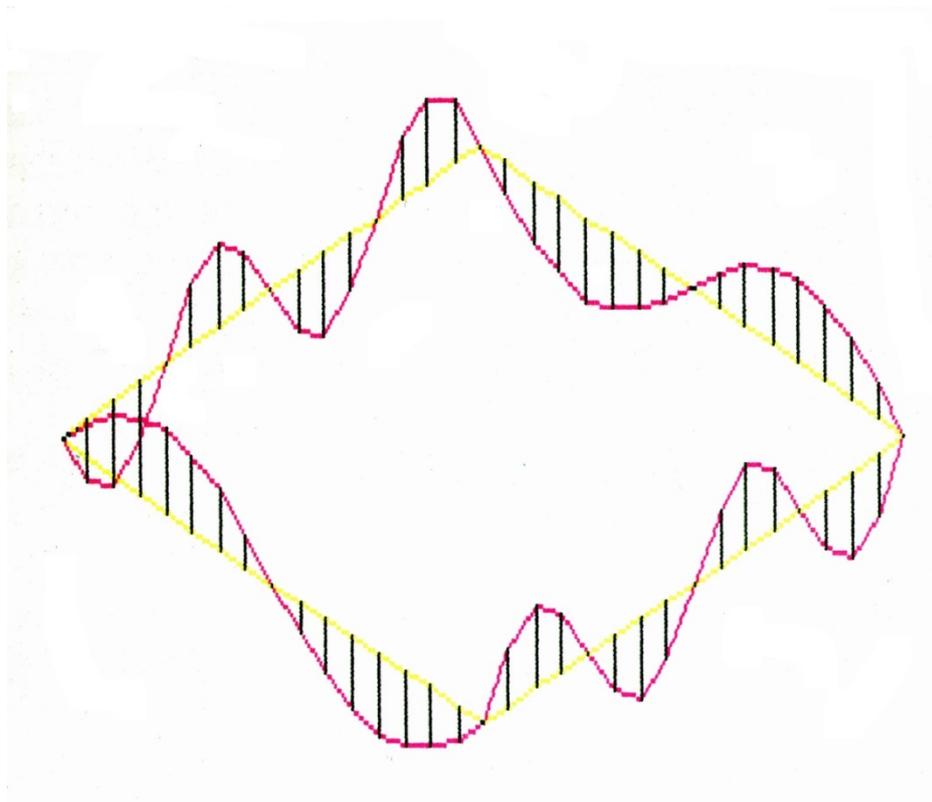


Рисунок 52. Изображение рамы в фиксированный момент времени.

Жёлтым цветом показано исходное положение рамы,
красным – деформированное положение рамы,
чёрным – смещение точки рамы при деформации.



Рисунок 53. Различные виды ОНПК, разработанные автором

3.5 Выводы по главе 3

В этой главе представлены результаты практической реализации предложенного в данной работе метода для создания прецизионных виброизмерительных систем:

1. В ходе исследований автором были разработаны и успешно испытаны как ТОДВ различной конструкции, так и несколько вариантов ОНПК, предназначенных для работы с такими ТОДВ.

2. С помощью формирующего аналого-цифрового ортонормализатора проведены исследования и протоколирование матриц чувствительности ТОДВ с различными измерительными базами.

3. Разработаны и успешно испытаны миниатюрные ОНПК по описанным выше структурным схемам.

4. Измерительные системы, описанные в главах 3.1 и 3.2, созданные на основе предложенного метода, нашли применение в промышленности, что позволило провести уникальные исследования и повысить качество измерительных систем и выпускаемой продукции.

5. Представленный в главе 3.3 программно-аппаратный комплекс для ортонормализации ТОДВ на основе однокристалльного микропроцессора наметил путь для автоматизации процесса настройки вибродатчиков на стенде и их паспортизации в серийном производстве.

6. Описанная в главе 3.4 программа визуализации пространственных форм колебаний различных механических конструкций в составе виброизмерительной системы, созданной на основе предложенного в данной работе метода, позволяет производить наглядное представление и документирование вибрационного состояния объекта.

4. Заключение

1. В представленной работе представлен новый метод повышения точности измерения пространственной вибрации с помощью электронного управления векторами чувствительности многоосевых вибродатчиков на основе математического аппарата линейных преобразований в многоканальных системах.

2. Созданы и испытаны трёхосевые вибродатчики варианты с различными базисами векторов чувствительности и специализированные ортонормализующие предусилители-компенсаторы, устраняющих влияние поперечной чувствительности вибродатчиков на точность измерения вибрации. Приведённые результаты применения этого метода на примере как стандартных промышленных многоосевых вибродатчиков, так и уникальных, созданных в ходе проведения исследований, доказывают его работоспособность и высокую эффективность.

3. Представленный метод даёт возможность не только практически полностью устранить влияние поперечной чувствительности вибродатчиков на погрешность измерений вибрации, но и значительно расширить рабочий диапазон частот, не изменяя их конструкцию.

4. Описанный метод даёт возможность производить поверку и точную калибровку вибродатчиков в процессе эксплуатации, что повышает их ресурс.

5. Намечено направление создания новых высокоточных вибродатчиков с произвольной исходной системой векторов чувствительности, обладающих повышенными метрологическими характеристиками. Разработанный метод позволяет снизить требования к точности сборки измерительной системы вибродатчиков, удешевить их производство и при этом обеспечить высокие метрологические параметры.

6. Показано, что предложенный способ повышения точности измерения вибрации может быть также применён для создания широкого спектра

многоканальных измерительных систем, получающих сигналы с различных промышленных датчиков физических величин - вибрации, силы, давления и прочих. Он позволяет существенно повысить точность измерений, помехоустойчивость и эффективность работы этих систем. Возможность применения описанного в данной работе метода в области измерения акустических полей обсуждена в [62]. Принципы, на которых основан описанный в данной работе метод, нашли также практическое применение в медицине, в частности, при разработке измерительной системы для диагностики состояния сердечно - сосудистой системы [63].

7. Описанная технология представляет собой новое направление в метрологии измерений, позволяющее улучшать существующие и создавать новые многоканальные измерительные системы, имеющие повышенную точность, за счёт устранения погрешности измерений, вызываемой взаимно коррелированными помеховыми сигналами в каналах измерения и обработки сигналов.

В дальнейшем планируется развитие работ в следующих направлениях:

- Разработка и создание ТОДВ новой конструкции с улучшенными метрологическими характеристиками;
- Разработка эффективных способов и алгоритмов калибровки ТОДВ на специализированных вибростендах;
- Микроминиатюризация представленных вариантов ОНКП и разработка встроенного в датчик согласующего предусилителя с цифровым управлением точной ортогонализацией ТОДВ на заводе производителя на основе автоматизированных программно-аппаратных комплексов.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Ганиев Р. Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надёжность, безопасность и бесшумность. - М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика». - 2013. С. 182, 292, 452, 453.
2. Ганиев Р.Ф, Ковальчук П.С. Динамика систем твёрдых и упругих тел: (Резонансные явления при нелинейных колебаниях) - М.: Машиностроение. - 1980. - 208с., ил.
3. Кийко И.А., Наджафов М.А. Флаттер конической оболочки // Проблемы машиностроения и автоматизации // №4. – 2009. – С. 96 – 98.
4. Григолюк Э.И., Михайлов А.И. Флаттер трёхслойной круговой конической оболочки // Докл. АН СССР. – 1965. – т.163, №5. – С. 1100-1103.
5. Диткин В.В., Орлов В.А., Пшеничников Г.И. Численное исследование флаттера конических оболочек // Изв. РАН МТТ, 1993, №1, стр. 185 – 189.
6. Александров В.М., Гришин С.А. Динамика конической оболочки при внутреннем сверхзвуковом потоке газа // Прикл. матем. и мех., 1964, т. 58, Вып. 4, стр. 123 – 132.
7. Леоненко Д.В. Колебания круговых трёхслойных пластин, связанных с упругим основанием, под действием синусоидальных нагрузок // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. - №3. – стр. 89 – 92.
8. Григолюк Э.И., Кассихин В.Н. Малые поперечные колебания слоистых круговых пластин // Пробл. прочности. - 1982. - №10. – стр. 65 – 68.
9. Старовойтов Э.И., Яровая А.В., Леоненко Д.В. Локальные и импульсные нагружения трёхслойных элементов конструкций. - Гомель: БелГУТ, 2003. – 367 с.
10. Старовойтов Э.И., Яровая А.В., Леоненко Д.В. Деформирование трёхслойных элементов конструкций на упругом основании. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 379 с.

11. Леоненко Д.В. Вынужденные колебания трёхслойного стержня на упругом безынерционном основании // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2007. - №3. – С. 70 - 74.
12. Кийко С.И. Флаттер вязкоупругой ортотропной пластины // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. - №1. – С. 81 - 83.
13. Исаев В.П., Кийко С.И. Флаттер ортотропной полосы постоянной толщины // Депонировано ВИНТИ АНРФ 11.04.01, № 957-В2001.
14. Кийко И. А. Флаттер вязкоупругой пластины // Прикл. матем., механика. – 1996. – Т. 60, Вып. 1. – С. 172-175.
15. Кийко И. А., Показеев В.В. Колебания и устойчивость вязкоупругой полосы в потоке газа // ДАН. – 2005. – Т. 401, №3. – С. 342-344.
16. Ганиев Р.Ф., Балакшин О.Б, Кухаренко Б.Г. Нелинейный отклик потока на флаттер лопаток ротора турбокомпрессора // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. - №3. – С. 28 - 32.
17. Ганиев Р.Ф., Балакшин О.Б, Кухаренко Б.Г. Бифуркация резонанса при флаттере лопаток ротора турбокомпрессора // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 444, №1 – С. 35 - 37.
18. Балакшин О.Б, Кухаренко Б.Г. Спектральный анализ флаттера лопаток ротора турбокомпрессора // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 417, №5 – С. 627 - 630.
19. Ганиев Р.Ф., Балакшин О.Б, Кухаренко Б.Г. Моды потока при стабилизации флаттера лопаток ротора турбокомпрессора // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 448, №6 – С. 1 - 3.
20. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011, - 780 с.
21. Mickens R.E. Truly nonlinear oscillations. Harmonic Balance, Parameter Expansions, Iteration and Averaging Methods. - Singapore: World Scientific Publishing Co. - 2010. – 238 p.

22. Simon J.F., Leonard O. Modeling of 3-D losses and deviations in a throughflow analysis tool // Journal of Thermal Science. - 2007. – Vol. 16, №3. - P. 208-214.
23. Миль М.Л. Школа воплощения идей. // Казань: Издательство «Вертолёт». - 2009. 57 с.
24. Кирюхин А.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Яблонский В.В. Активная виброзащита – назначение, принципы, состояние. 4. Активная вибро- и шумоизоляция трубопроводов. Теоретические и экспериментальные исследования пластины // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. - №1. – С. 72 - 80.
25. Кирюхин А.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Яблонский В.В. Активная виброзащита – назначение, принципы, состояние. 1. Назначение и принципы разработки // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. - №2. – С. 108 - 111.
26. Кирюхин А.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Яблонский В.В. Активная виброзащита – назначение, принципы, состояние. 2. История разработок и состояние // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. - №3. – С. 63 - 69.
27. Кирюхин А.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Яблонский В.В. Активная виброзащита – назначение, принципы, состояние. 3. Активная виброизоляция в автомобилях // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. - №1. – С. 56 - 59.
28. MEGGIT Endevco. Accelerometers. - Дата обращения 01.04.2019.
URL:
https://buy.endevco.com/accelerometer.html?applications=NaN&number_of_axis=410
29. Kistler. Product catalogue. - Дата обращения 26.03.2019.
URL:
https://www.kistler.com/ru/search/?no_cache=1&tx_kesearch_pi1%5Bsword%5D=triaxial+accelerometers&tx_kesearch_pi1%5Bpage%5D=1&tx_kesearch_pi1%5BresetFilters%5D=0&tx_kesearch_pi1%5BsortByField%5D=&tx_kesearch_pi1%5BsortByDir%5D

30. Bruel&Kjeaar. Products. Accelerometers. - Дата обращения 27.03.2019.
URL: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4515-B-002>
31. Industrial ICP triaxial accelerometers. - Дата обращения 27.03.2019.
URL: http://www.pcb.com/contentstore/mktgContent/IMI_Downloads/Triaxial-Accelerometer-Data-Sheet.pdf
32. Микроникс. Датчик вибрации ВД10А. - Дата обращения 22.03.2019.
URL: <http://mx-omsk.ru/купить-датчик-вибрации-вд10а>
33. Test and Measurement Sensors and Instrumentation. PCB Piezotronics.
Product Catalogue. URL:
<https://www.pcb.com/contentstore/MktgContent/LinkedDocuments/PCB/TestandMeasurementCatalog.pdf>
- Дата обращения: 06.12.2019
34. Прибор для пространственного измерения вибрации балансировки роторов «Балком-3D».
URL: <http://autex.spb.su/automation/kinematika/balkom3d.php>.
Дата обращения: 12.02.2019.
35. Жданов А.С. Влияние поперечной чувствительности пьезоакселерометров на точность измерения вибрации. // М.: Приборы/ - №4 (202)/ - 2017. С. 1 – 6.
36. Бордиловский А.Ф., Шкаликов В.С. Лазерные методы измерения параметров вибраций. – Л.: ЛДНТП. – 1974. – 30 с.
37. Дунаевский В.П, Субботин М.И., Вуколов А.Н., Козаков Ю.М. Влияние механических, тепловых и электрических воздействий на показания пьезоэлектрических акселерометров. – В кн.: Вибрационная техника. – М.: МДНТП. – 1976. – С. 15-27.
38. Гик Л.Д. Измерение вибраций. – Новосибирск: Наука. – 1972. – 292 с.
39. Голубев В.С. К оценке измерительных свойств акселерометров линейных ускорений. – В кн.: Виброакустические процессы в машинах и присоединённых конструкциях. – М.: Наука. – 1974. – С. 83-98.

40. Электрические измерения неэлектрических величин. – Изд. 5-е / Под ред. П.В.Новицкого. – Л.: Энергия. – 1975. – 576 с.
41. Яроменок А.С. Современные зарубежные линейные акселерометры и виброакселерометры. – Итоги науки и техники. Серия – метрология и измерительная техника. – Т.3. – М.: 1975. – 338 с.
42. Динамические методы испытаний и диагностирование машин-автоматов и автоматических линий. Сб. статей. ИМАШ АН СССР им. А.А.Благонравова. Отв. ред. Е.Г.Нахапетян - М. «Наука», 1981, с. 142.
43. Метрологическое обеспечение метрологических измерений в информационно-измерительных системах. Сб. статей. Научный редактор А.А.Брагин. ВНИИ метрологии измерительных и управляющих систем, Львов, 1981г., с. 104.
44. Экспериментальное исследование и диагностирование роботов. Сб. статей. Отв. редактор Е.Г.Нахапетян. Отделение механики и процессов управления АН СССР ИМАШ., М., «Наука», 1981г., с. 193.
45. Надёжность в технике. Статистическая оценка нагруженности машин и механизмов. В кн. Методы обработки данных о нагруженности. Общие положения. Стандарт СССР, ГОСТ 23604-79, Механика, 1980г., №5.
46. Белицкий Г.М. Конструкции пьезооптических акселерометров. – В кн.: Вибрационная техника. М., МДНТП, 1977г., с. 25-30.
47. Гик Л.Д. Измерение вибраций. Новосибирск, «Наука», 1972г., 292 с.
48. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М., «Энергия», 1978г., 248 с.
49. Генкин М.Д., Голубев В.С. О направленных свойствах акселерометров. – Машиноведение, 1968г., №5, с. 9-16.
50. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2-х кн. Под ред. В.В.Клюева. М., Машиностроение, 1978г., кн. 1-я – 447с., кн. 2-я – 439 с.
51. Вибрации в технике. Том 5. Под ред. М. Д. Генкина. - М.: Машиностроение. - 1981. С. 165, 166, 167.

52. Alexander Zhdanov, Konstantin Morozov. A new technology for Improving vibration measurement accuracy with 3D piezoelectric Transducers / Proceedings of the 10th International Congress on sound and vibration. 7- 10 July, 2003. - Stockholm, Sweeden. P. 943 - 950.
53. Жданов А.С., Голубев В.С., Скворцов О.Б. Ортонормализатор для трехкомпонентных вибродатчиков. Виброметрия. Материалы конференции. // М.: Издание Московского дома научно-технической пропаганды (МДНТП). - 1986. - С. 37 – 42.
54. Жданов А.С. Повышение точности измерения пространственной вибрации трёхкомпонентными пьезодатчиками на основе электронной ортогонализации векторов чувствительности. / М.: Вестник научно-технического развития, №5. - 2011. - С. 13 – 19.
URL: <http://vntr.ru/ftpgetfile.php?id=518>
55. Жданов А.С., Голубев В.С. и др. Создание трёхкомпонентных прямолинейных пьезоэлектрических измерительных преобразователей ускорения с единым инерционным элементом. Отчёт о НИР. - Инв. № АЛ- 1224. / М.: ИМАШ АН СССР. - 1989. - 12 с.
56. Жданов А.С. Помехоустойчивый трёхкомпонентный пьезоакселерометр на основе монолитного пьезоэлемента. // М.: Приборы, №7 (169). - 2014. С. 1 – 5.
57. Жданов А.С. Предусилитель-компенсатор для трёхкомпонентных вибродатчиков. // М.: Приборы, №4 (178). - 2015. - С. 19 – 24.
58. Голубев В.С. и др. Дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь. - Патент СССР № 591725/ - БИ - 1978, №5.
59. Донсков В.И., Янчич В.В., Козлов В.В., Лимарев А.М. Конструкции пьезоакселерометров с монолитными модулями. – В кн.: Вибрационная техника. – М.: МДНТП. – 1976. – С. 3-7.
60. Лукашин Ю.В., Кобяков И.Б. Пьезоэлектрический виброакселерометр. - Авторское свидетельство СССР № 504940/ - БИ, №8. - 1976.

61. Жданов А.С., и др. Разработка датчиков и аппаратуры для измерения трёхмерной вибрации. Отчёт о НИР. / М.: Инв. № АЛ- 1227. М.: ИМАШ АН СССР. - 1989. - 51с.
62. Жданов А.С. Электронное управление характеристиками направленности микрофонов в системах измерения акустических полей. - Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященная 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 21-22 ноября 2018, С.222
[http://imash.ru/netcat_files/file/80/Сборник%20тезисов%20конференции%20Машины,%20технологии%20и%20материалы%20для%20современного%20машиностроения\(2\).pdf](http://imash.ru/netcat_files/file/80/Сборник%20тезисов%20конференции%20Машины,%20технологии%20и%20материалы%20для%20современного%20машиностроения(2).pdf)
63. Явелов И.С., Жданов А.С. и др. Устройство для контроля параметров сердечно-сосудистой системы. Патент РФ на полезную модель №37454 от 19.12.2001г.

6. ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Акт приёмки-сдачи работ по прибору ЭИБ-1

<p>Наименование исполнителя Предприятие п/я Ю-9827 Адрес: Г27486 г.Москва, И-486 абонементный ящик 964 Расчетный счет: № 608035 Сперу при Правлении Жилсоц- банка в г.Москве <i>ИПВ № 299093</i></p>	<p>Наименование заказчика МСПО им.Октябрьской революции Адрес: 220801, г.Минск <i>ул.Октябрьская, 16</i> Расчетный счет: 262508 в Октябрьском отд. ЦСБ г. Минск, МФО 400279</p>	2.
<p>А К Т сдачи-приемки научно-технической продукции по договору №1/01, составлен "29" июня 1989 г.</p> <p><u>Разработка и изготовления электронизированного блока</u> (наименование научно-технической продукции и этапа работ)</p> <p>Мы, нижеподписавшиеся, представитель исполнителя <u>заместитель</u> <u>руководителя Постнев В.А.</u> (должность, фамилия и инициалы) представитель заказчика <u>главный инженер Кривомаз Н.М.</u> (должность, фамилия и инициалы) с другой стороны, составил настоящий акт в том, что научно-тех- ническая продукция <u>удовлетворяет условиям "Технического задания</u> (удовлетворяет, не удовлетворяет условиям <u>на разработку и изготовления электронизированного блока"</u> договора и технического задания или иного документа, предъ- являет требования технического или иного документа)</p> <p>ТЗ от 03.03.1989 г. (наименование, дата утверждения)</p> <p>и в надлежащем порядке оформлена.</p> <p>Краткое описание научно-технической продукции <u>электронмери-</u> <u>тельная аппаратура для проведения исследований вибрационных ха-</u> <u>рактеристик несущей системы дорезонансных баланспровочных стоек</u> <u>с устройством компенсации (подавления) помех</u></p>		
<p>Эффективность научно-технической продукции и ссылка на документ ее обосновывающий <u>создание баланспровочных стоек</u> <u>класса точности "П"</u></p> <p>Договорная цена составляет по договору <u>25,0 тыс.</u> руб. <u>двадцать пять тыс. руб.</u> (сумма прописью)</p> <p>При сдаче работы с учетом выполнения условий договора устанавлена надбавка (скидка) к договорной цене в размере _____ %.</p> <p>Общая сумма аванса, перечисленная за выполненные этапы, составила _____ руб. (прописью)</p> <p>Следует к перечислению <u>25,0 тыс.</u> руб. <u>двадцать пять тыс. руб.</u> (сумма прописью) с учетом надбавки (скидки) к договорной цене в сумме <u>25 тыс.</u> руб. <u>двадцать пять тыс. руб.</u> (прописью)</p>		
<p>Работу сдал: от исполнителя  И.П.</p> <p>Работу принял: от заказчика  И.П.</p> <p>В.А.Постнев Н.М.Кривомаз</p>		

Приложение 2. Протокол испытаний прибора ЭИБ-1

ПРОТОКОЛ
испытаний электроизмерительного блока ЭИБ-1

Испытания проводились в Институте машиноведения им. А. А. Благонравова АН СССР в лаборатории экспериментального исследования виброакустических процессов в машинах в присутствии представителя заказчика. Целью испытаний явилось установление соответствия параметров блока величинам, указанным в техническом задании.

Во время испытаний использовалась аппаратура спектрального анализа, а также стандартный комплект измерительной аппаратуры.

Результаты испытаний представлены в табл. I.

Установлено, что все параметры блока удовлетворяют требованиям технического задания, причем многие из них превышают эти требования. Кроме того, отмечается, что в прибор введены дополнительные сервисные возможности, не предусмотренные техническим заданием, такие как возможность использования прибора в качестве четырехканального усилителя заряда, а также возможность отключения режимов нормализации и компенсации.

Прибор изготовлен в соответствии с техническим заданием. Считать работы полностью выполненными.

От заказчика:

Ведущий конструктор *Манаши* Манаши Г. Г.

От исполнителя:

Тимофеев Тимофеев С. А.

От ИМАШ:

Председатель ВК *Голубев* Голубев В. С.

Таблица I

П а р а м е т р	Единица измер.	Значение параметра		
		по ТЗ	фактически	Лучше (хуже) чем в ТЗ
1. Рабочий диапазон частот при неравномерности $\pm 2\%$	Гц	3 + 500	3 + 1000 Гц	лучше
2. Диапазон измерения	Н	0,01 + 1000	0,005 + 1000	лучше
3. Набег фазы на частотах:	град			
3 Гц		2,5	1,5	лучше
5 Гц		1,5	1,0	лучше
10 Гц		0,5	0	лучше
100 Гц		0,5	0	лучше
500 Гц		0,5	0,5	соответствует
4. Входной шумовой заряд в рабочем диапазоне частот	мКи	1	0,15	лучше
5. Коэффициент преобразования	мВ/Н	10	10	соответствует
6. Диапазон подстройки нормализации	%	± 20	± 33	лучше
7. Диапазон подстройки степени компенсации	%	± 30	± 35	лучше
8. Емкость входного кабеля	пФ	до 1000	до 3000	лучше
9. Максимальный ток нагрузки	мА	10	50	лучше

Примечание: значения параметров по пп. 2. и 4. определены из спектрограмм выходного шумового напряжения, снятых в соответствующем режиме.

Манаши

Приложение 3. Акт испытаний вибродатчика ТСП-1 совместно с ортонормализатором УЗТ-ОН-2

OILEQUIP
Oil Industry Equipment

ООО «Оиликвип»

115093, г. Москва, ул. Щипок, дом 18, этаж 6, комната 30 (615), тел. +7 (495) 958-59-23;
ИНН 9705116709, КПП 770501001, Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО), БИК 044525411,
р/с 40702810800320003569, к/с 30101810145250000411

АКТ

испытаний и промышленной апробации
научно-исследовательской работы

Настоящий акт составлен о том, что в период от 9 ноября 2017 года по 7 февраля 2018 года в ООО «Оиликвип» проведены испытания предоставленного ИМАШ РАН трёхосевого вибродатчика типа ТСП-1 совместно с согласующим предусилителем УЗТ-ОН-2 в части определения их параметров точности и возможности применения в термометрических системах (ТМС) установок погружных электроцентробежных насосов для добычи нефти (УЭЦН). В результате проведённых испытаний были измерены параметры матрицы чувствительности указанного датчика и получены следующие результаты:

1. Осевые чувствительности по выходам 1 – 3 равны $10 \text{ mVS}^2/\text{m} \pm 0,15\%$
2. Поперечные чувствительности лежали в пределах $0,02 - 0,07\%$.

Датчик испытывался в работе с ТМС. Испытания показали, что представленные датчики удовлетворяют по точности требованиям к ТМС. В результате, точность измерения вибрации повысилась на 27%, рабочий диапазон частот расширился на 7 кГц, динамический диапазон измерений расширился на 15 дБ

На основании полученных результатов указанный датчик совместно с предусилителем УЗТ-ОН-2 рекомендован для применения в составе ТМС УЭЦН, работающие в пластовой жидкости при температуре до 80°C .

От ООО «Оиликвип»:
Генеральный директор

Старцев И.И.

05.03.2018г.



От ИМАШ РАН:

В.н.с., д.т.н. Явелов И.С.

С.н.с. Жданов А.С.

Приложение 4. Исходный код программы визуализации
пространственных колебаний

```

50 DIM CC (4)
60 TM=0
70 PRINT "INPUT DELTA & NUMBER"
80 W=200
90 INPUT DELTA, NUMBER
100 GOSUB 1000
110 PRINT " ( Amplitudes ) ( Phases ) ( Scale ) ( Wave- )"
120 PRINT " ( AB,CD ) ( BC,AD ) ( AB,CD ) ( BC,AD ) ( length )"
130 PRINT " ( X Y Z ) ( X Y Z ) ( X Y Z ) ( X Y Z ) ( length )"
140 INPUT X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2, XF1, YF1, ZF1, XF2, YF2, ZF2, S, NW1, NW2
150 FOR I=0 TO N/4-1
160 X(I)=X1*S*COS(I*NW1/N*25.12+XF1*3.14159/180)*COS (TM)
170 X(I+N/2)=X(I)
180 X(I+N/4)=X2*S*COS(I*NW2/N*25.12+XF2*3.14159/180)*COS (TM)
190 X(I+3*N/4)=X(I+N/4)
200 Y(I)=Y1*S*COS(I*NW1/N*25.12+YF1*3.14159/180)*COS (TM)
210 Y(I+N/2)=Y(I)
220 Y(I+N/4)=Y2*S*COS(I*NW2/N*25.12+YF2*3.14159/180)*COS (TM)
230 Y(I+3*N/4)=Y(I+N/4)
240 Z(I)=Z1*S*COS (I*NW1/N*25.12+ZF1*3.14159/180)*COS (TM)
250 Z(I+N/2)=Z(I)
260 Z(I+N/4)=Z2*S* COS (I*NW2/N*25.12+ZF2*3.14159/180)*COS (TM)
270 Z(I+3*N/4)=Z(I+N/4)
280 NEXT I
290 GOSUB 1520
303 TM=TM+DELTA303 A$=INKEY$
305 IF A$ = " " THEN 340
310 IF TM (NUMBER) THEN 150
320 STOP
340 INPUT "Scale (s) and lower left corner coordinates (x1, y1)", s, x1, y1
350 for I=0 to 3*J-1
360 W(I) = Q(I)
370 IF I>2*J-1 THEN W(i)=R(I-2* J)
380 NEXT I
385 FOR I=0 to 3*J/2-1
390 W(2*i)=W(2*i) *s+x1
395 W(2*i+1)=W(2*i+1) *s+y1
400 NEXT i
405 CC(0)=1
410 CC(1)=0
415 CC(2)=J
420 hvct W(*) , CC(*)
425 CC(0)=2
430 CC(1)=J
435 CC(2)=2*J

```

```
440 hvct W(*) , CC(*)
445 CC(0)=3
450 CC(1)=2*J
455 CC(2)=3*J
460 hvct W(*) , CC(*)
480 GOTO 310
1000 DIM A(127), B(127), Q(1023), R(1023):ACQUIS
1010 DIM X(127), Y(127), Z(1023), W(1023):ACQUIS
1020 PRINT "INPUT MODE OF COORDINATES` SYSTEM"
1030 INPUT MODE
1040 BASIC 1
1050 BASIC 0
1060 X1=256
1070 Y1=128
1080 A11=-.3535
1090 A21=1
1100 A31=0
1110 A12=A11
1120 A22=0
1130 A32=1
1140 IF MODE=1 THEN 1190
1150 A11=-.866
1160 A21=-A11
1170 A22=-.5
1180 A12=-.5
1190 PRINT "NUMBER OF POINTS"
1200 INPUT N
1210 REM DRAWING OF 4-SIDE SHAPE
1220 FOR I=0 TO N
1230 IF I >=N/4 THEN 1270
1240 A(I)=100
1250 B(I)=800/N*I-100
1260 GOTO 1370
1270 IF I >=N/2 THEN 1310
1280 A(I)=100-800/N*(I-N/4)
1290 B(I)=100
1300 GOTO 1370
1310 IF I >= 3*N/4 THEN 1350
1320 A(i)=-100
1330 B(i)=100-800/N*(I-N/2)
1340 GOTO 1370
1350 A(I)=800/N*(I-3*N/4)-100
1360 B(I)=-100
1370 CX=A11*A(I)+A21*B(I)
1380 CY=A12*A(I)+A22*B(I)
1390 CX=CX+X1
1400 CY=19./30*CY+Y1
1410 J=4*1
1420 Q(J)=CX
1430 Q(J+1)=CY
1440 IF I=0 THEN 1470
1450 Q(J-2)=CX
```

```
1460 Q(J-1)=CY
1470 NEXT I
1480 CL=6
1490 REM 190-450:IT IS AN EXAMPLE:SQWARE SHAPE (SIDE=200)
1500 VECT #3,0(*),,CL,,J+1,1
1510 RETURN
1520 REM 630-SHAPE DEFORMATION
1530 FOR I=0 TO N
1540 J=4*1
1550 K=4*N+J+2
1560 Q(K)=Q(J)
1570 Q(K+1)=Q(J+1)
1580 CX=A1*X(I)+A21*Y(I)+A31*Z(I)
1590 CY=A12*X(I)+A22*Y(I)+A32*Z(I)
1600 Q(K+2)=Q(J)+CX
1610 Q(K+3)=Q(J+1)+CY*19./30
1620 R(J)=Q(K+2)
1630 R(J+1)=Q(K+3)
1640 IF I=0 THEN 1670
1650 R(J-2)=R(J)
1660 R(J-1)=R(J+1)
1670 NEXT I
1680 J=4*N+2
1690 REM ERASING
1700 CL1=7
1710 CL2=5
1720 VECT #3,Q(*),1,CL1,2*J,3*J-1,1
1730 VECT #3,R(*),1,CL2,J*J,2*J-1,1
1740 FOR I=J TO 2*J
1750 Q(I+J)=Q(I)
1760 R(I)=R(I-J)
1770 NEXT I
1780 REM DRAWING
1790 VECT #3,Q(*),,CL,,J-1,1
1800 VECT #3,Q(*),,CL1,J, 2*J-1,1
1810 VECT #3,R(*),,CL2,,J-1,1
1820 RETURN
```

Приложение 5. Исходный код программы
построения изображений на принтере

```
1 PARAM AA(*), PP(*)
10 REM PLOTTING OF SCREEN COPY
300 on error 1115 GOTO 375
310 OPEN #30, : ieee
320 PRINT #30, "IN"
321 TT=PP(1)
326 PRINT #30, "SP", PP(0)
330 PRINT #30, "PA", AA(TT), AA(TT+1)
340 PRINT #30, "PD"
350 FOR i=TT+2 TO PP(2)-2 STEP 4
352 PRINT #30, "PA", AA(i), AA(i+1)
353 F=0
354 IF AA(i)=AA(i+2) THEN F=F+1
355 IF AA(i+1)=AA(i+3) THEN F=F+1
356 IF F<2 THEN PRINT #30, "PU"
360 PRINT #30, "PA", AA(i+2), AA(i+3)
365 IF F<2 THEN PRINT #30, "PD"
370 NEXT i
375 PRINT #30, "PU"
377 off error 1115
378 PRINT #30, "SP"
380 CLOSE #30
```