

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

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва- 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Научный руководитель:

Явелов Игорь Самуилович,
доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории исследования биомеханических систем, ИМАШ РАН

Официальные оппоненты:

Гудков Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии приборостроения», Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

Даниелян Георгий Львович,
кандидат технических наук, заведующий лабораторией ФГБУН «Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится 19 января 2021 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д002.059.06 при ИМАШ РАН по адресу: Россия, 119334, Москва, ул. Бардина, д.4

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИМАШ РАН

Автореферат разослан « 28 » октября 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д002.059.06,
кандидат технических наук

Гранова Г. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

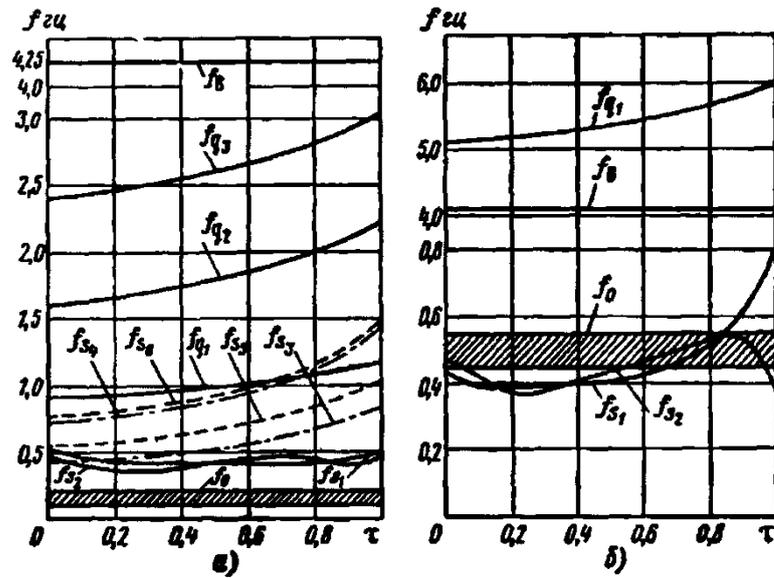
Актуальность темы

Актуальность темы обуславливается тем, что надёжность и эффективность работы энергетических установок в значительной степени зависит от их вибрационного состояния и 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 измерений при анализе многомерной 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 могут происходить сложные нелинейные многочастотные резонансные колебания, приводящие к их разрушению. Наиболее полно анализ этих процессов изложен в монографии академика Ганиева Р. Ф. (Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надёжность, безопасность и бесшумность. М.: Научно-исследовательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2013г.).

На многочисленных примерах авиационной техники – вертолётках и самолётках, космических ракетах и других объектах в этой работе показано, что для обеспечения их надёжной работы необходимо измерение пространственной вибрации. Подробный анализ динамических вибрационных процессов в космических аппаратах (КА) и ракетносителях (РН) с жидкостным реактивным двигателем (ЖРД), представленный в указанной монографии, показал, что колебания происходят как в продольном направлении структуры, так и в поперечном.

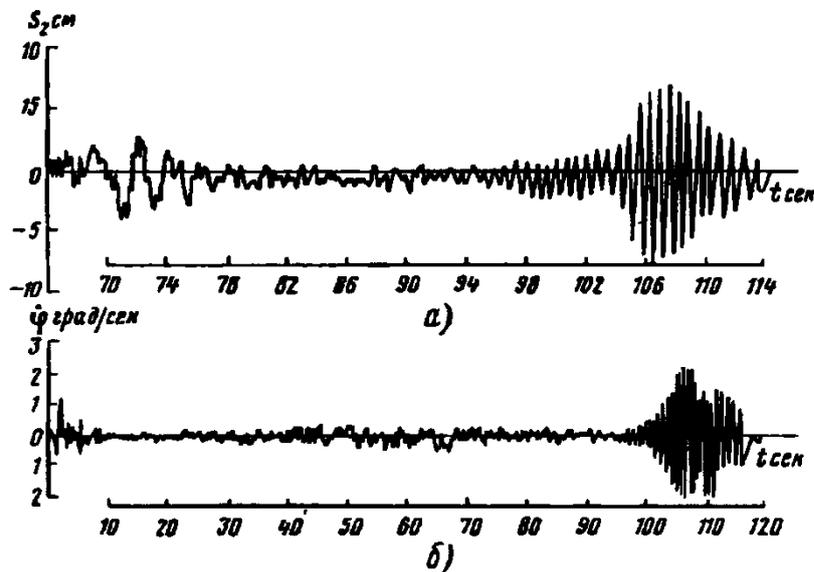
В указанной выше монографии на рисунке 1 показано изменение парциальных частот поперечных колебаний системы корпус – жидкость – маршевый двигатель – автомат стабилизации РН «Сатурн-5».



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

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

На рисунке 2 показаны временные диаграммы динамической неустойчивости РН «Сатурн-5» в канале крена на частотах колебаний в баках окислителя первой ступени (по данным телеметрии):



а) – уровень окислителя O_2 ; б) – угловая скорость крена.

Рисунок 2. Динамическая неустойчивость РН «Сатурн-5»

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.

В указанной выше монографии академика Р. Ф. Ганиева дан глубокий анализ одного из самых сложных и фатальных разрушительных явлений в вертолётах – так называемого «земного резонанса», приводящего зачастую к катастрофам с людскими жертвами. На рисунке 3 показана схема применявшейся при исследовании модели вертолёта на земле на упругих опорах.

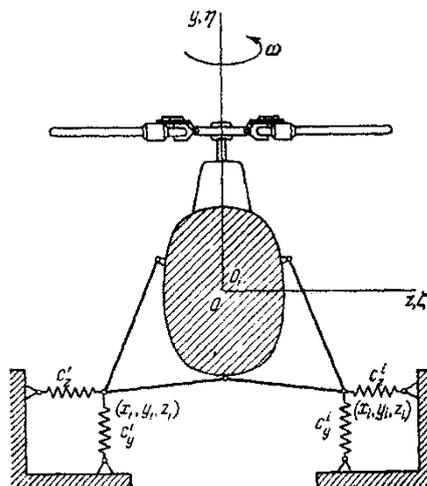


Рисунок 3. Динамическая модель вертолёта

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.

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 сложной 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.

Первичным звеном виброизмерительной системы является вибродатчик. От его метрологических характеристик, в конечном счёте, зависит результирующая эффективность всей системы. В настоящее время именно погрешности вибродатчиков определяют в основном общую точность измерения вибрации и анализа вибрационного состояния контролируемых

объектов. В данной работе представлен новый метод повышения точности измерения вибрации в современных виброизмерительных системах.

Наибольшее применение в практике виброизмерений нашли трёхосевые датчики вибрации, позволяющие измерять вектор вибрации в заданной точке объекта. Одним из существенных и неустранимых в настоящее время источников погрешности измерения вибрации такими датчиками, является их поперечная чувствительность, наличие которой может значительно снизить точность измерений вплоть до полной неработоспособности системы.

Разработка методов и средств снижения влияния поперечной чувствительности на точность измерения вектора вибрации является важнейшей задачей повышения точности измерения вибрации и обеспечения эффективности виброизмерительных систем и надёжности контролируемых объектов.

Цель диссертационного исследования

Целью работы является разработка методов и средств устранения погрешности измерения вибрации, обусловленной поперечной чувствительностью многоосевых вибродатчиков, асимметрией их измерительной системы, расширение рабочего диапазона частот, а также создание на их основе методологии повышения точности и помехозащищённости измерения сигналов в многоканальных измерительных системах широкого спектра физических величин.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Проведён анализ метрологических характеристик выпускаемых в настоящее время отечественных и зарубежных промышленных виброизмерительных преобразователей;
2. Разработана математическая модель и технические средства управления векторами чувствительности многоосевых вибродатчиков;
3. Проведены исследования их матрицы чувствительности;
4. Разработаны математические принципы реализации предложенного метода и методика экспериментальных исследований для его подтверждения;
5. Разработаны структурная и принципиальная схемы электронного преобразователя с функцией компенсации погрешности, вызываемой поперечной чувствительностью;

6. Разработаны и испытаны новые многоосевые вибродатчики с улучшенными метрологическими характеристиками;
7. Разработана методика проведения калибровочных испытаний многоосевых вибродатчиков на специализированном вибростенде;
8. Изготовлен ряд ортонормализующих предусилителей-компенсаторов, успешно проведены их испытания и определены направления дальнейших исследований;

Объект исследования. Многоосевые вибродатчики для измерения вибрационного состояния механических систем, а также методы и средства оценки погрешностей измерения вибрации вибродатчиками.

Методы исследования. Теоретическая часть диссертационной работы построена на базе математического аппарата матричного анализа составляющих погрешности в многоканальных измерительных системах. Экспериментальные исследования проведены с использованием методики и оборудования, разработанных автором.

Научная новизна исследования. Анализ публикаций в мировой литературе по обсуждаемой теме выявил, что борьба с поперечной чувствительностью и обеспечение других важнейших метрологических параметров многоосевых вибродатчиков ведётся лишь конструктивными методами в пределах технологических возможностей производства. В результате поперечная чувствительность и некоторые другие параметры погрешности лучших образцов одно- и многоосевых вибродатчиков ведущих мировых производителей имеют неприемлемо высокие значения, снижающие точность измерения вибрации.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработаны новый метод и средства повышения точности измерения вибрации посредством управления пространственным положением векторов чувствительности многоосевых вибродатчиков. С помощью разработанной автором аппаратуры проведены исследования матриц чувствительности многоосевых вибродатчиков различной конструкции и получены новые результаты, позволяющие значительно повысить точность измерения вибрации.

Научные результаты, полученные впервые:

1. Предложена математическая модель оценки погрешности измерения вибрации, обусловленной наличием поперечной чувствительности многоосевых вибродатчиков, с учётом влияния характеристик вибрационного процесса и поперечных резонансов многоосевых вибродатчиков.

2. С помощью разработанных измерительных приборов проведены экспериментальные исследования параметров погрешности многоосевых вибродатчиков различной конструкции. Получены новые результаты, позволяющие более точно исследовать пространственное положение векторов чувствительности многоосевых вибродатчиков. В частности, впервые произведены измерения и анализ полной матрицы их чувствительностей.

3. Созданы новые помехоустойчивые многоосевые вибродатчики с улучшенными метрологическими характеристиками.

4. Разработаны математические принципы компенсации помеховых сигналов в каналах, на которых основан метод электронного управления векторами чувствительности многоосевых вибродатчиков. На их основе создан и испытан ряд электронных преобразователей.

5. Разработана и успешно опробована методика практической коррекции векторов чувствительности многоосевых вибродатчиков на специализированной стендовой аппаратуре.

Научная новизна подтверждается совокупностью публикаций в рецензируемых изданиях и авторскими свидетельствами по теме диссертации.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, обеспечиваются хорошей сходимостью теоретической модели, лежащей в основе предложенного метода, и практических результатов её реализации в ходе экспериментальных исследований. Проведённые исследования на различных многоосевых вибродатчиках как промышленного производства, так и экспериментальных образцах, разработанных в ходе исследований, подтвердили полное схождение результатов и правильность предложенной теоретической модели.

Практическая значимость работы

1. Представленные в диссертации метод и средства электронного управления векторами чувствительности многоосевых вибродатчиков имеют высокую значимость с точки зрения перспектив их применения для повышения эффективности существующих и создания новых виброизмерительных систем для многочисленных областей промышленности – авиации, ракетостроения, балансировочной технике, мощных энергетических установках и др.

2. Данный метод даёт возможность значительно улучшить метрологические параметры не только промышленных многоосевых вибродатчиков, но и создавать новые высокоточные датчики различных физических величин – давления, перемещения, температуры и т. п., для широкого спектра измерительных систем. При этом ослабляются требования

к точности сборки измерительной системы датчиков, что снижает себестоимость их производства.

3. Этот метод позволяет повысить точность и помехоустойчивость любой линейной многоканальной измерительной системы.

4. Уникальным преимуществом данного метода является то, что он позволяет проводить поверку и калибровку датчиков в процессе эксплуатации без вмешательства в их конструкцию, что позволяет существенно увеличить их ресурс.

5. Описанный способ представляет собой новую перспективную методологию, дающую возможность создавать прецизионные измерительные системы на основе первичных преобразователей механических величин с произвольным исходным базисом векторов чувствительности и низкими параметрами точности, определяемыми технологическими погрешностями их конструкции.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод матричного представления и векторного преобразования составляющих чувствительности многоосевых вибродатчиков.
2. Влияние характера вибрационного процесса на погрешность измерения вибрации.
3. Математическая модель оценки погрешности измерения вибрации с учётом поперечной чувствительности многоосевых вибродатчиков, влияния характеристик вибрационного процесса и поперечных резонансов.
4. Структура электронных преобразователей для многоосевых вибродатчиков с квазиортогональным и косоугольным базисами векторов чувствительности.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

1. Всесоюзная конференция по научно-техническому развитию. Московский дом научно-технической пропаганды, 4-7 мая 1986г., Москва.
2. X международный конгресс по акустике и вибрации, 7- 10 июля 2003 г., Стокгольм, Швеция.
3. Всероссийская конференция по судовой акустике. 7- 9апреля 2009г., С - Пб.
4. Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященная 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 21-22 ноября 2018г.

5. Доклад на научно-техническом семинаре лаборатории исследований биомеханических систем отдела вибрационной биомеханики в ИМАШ РАН, 26 ноября 2019г., Москва.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 3 статьи в научных журналах из перечня ВАК РФ для представления основных научных результатов диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук, 1 патент, 1 авторское свидетельство и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. В работе содержатся 3 таблицы, 53 рисунка и 63 библиографические ссылки. Общий объём работы составляет 148 страниц.

Личный вклад автора включает постановку задачи, исследование матриц чувствительности многоосевых вибродатчиков, разработку основных методов и средств исследований, проведение испытаний, анализ и обработку результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертационной работы приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований. Обоснована актуальность работы. Представлены её научная новизна, практическая ценность и личный вклад автора.

Дан обзор современных виброизмерительных систем и входящих в их состав датчиков вибрации. Рассмотрены характеристики промышленных одно- и многоосевых вибродатчиков с измерительной системой на основе пьезокерамики. Отмечены их недостатки, снижающие точность измерения вибрации.

Показано, что одним из существенных параметров вибродатчиков, существенно снижающих точность измерений является их поперечная чувствительность. Дано обоснование необходимости исследований и разработки методов по снижению её влияния на точность виброизмерений.

Первая глава работы посвящена описанию общих принципов, лежащих в основе представленного метода. Представлен литературный обзор современных одно- и многоосевых вибродатчиков, применяющихся в системах измерения вибрации.

Проведён обзор многоосевых вибродатчиков, выпускаемых мировыми лидерами в области виброизмерительной аппаратуры. Отмечено, что все они

обладают существенной поперечной чувствительностью. Например, фирма ENDEVCO (США), выпускает ряд трёхосевых вибродатчиков как на основе пьезокерамических пластин, так и со встроенным электронным преобразователем. На настоящий момент времени она выпускает около 150 типов таких вибродатчиков. Приведены технические характеристики трёхосевого вибродатчика типа 2228С на основе пьезопластин и типа 2258 Isotron с внутренней электроникой из текущего каталога фирмы. Поперечная чувствительность этих датчиков достигает 5%. Все остальные трёхосевые вибродатчики этой фирмы имеют такие же значения поперечной чувствительности.

Один из лидеров мирового производства многоосевых вибродатчиков фирма BRUEL & KJAR (Дания) также выпускает большой ряд датчиков для измерения вибрации. К примеру, у трёхосевого вибродатчика типа 4515-В поперечная чувствительность также достигает значения в 5%. У других многоосевых вибродатчиков этой фирмы поперечная чувствительность лежит в таких же пределах.

Известная фирма PCB PIEZOTRONICS (США) тоже выпускает ряд вибродатчиков, в том числе многоосевые. Поперечная чувствительность этих датчиков достигает величины в 7%. Многоосевые вибродатчики других изготовителей как зарубежных, так и российских имеют аналогичные значения поперечной чувствительности.

Некоторые известные изготовители вибродатчиков, в том числе фирма PCB PIEZOTRONICS (США), в последнее время перестали приводить в их спецификации значение поперечной чувствительности. Это фактически означает признание, во-первых, невозможности обеспечения её низких значений, а, во-вторых, того, что существенное значение поперечной чувствительности может значительно снизить точность измерения вибрации и является существенным параметром погрешности выпускаемой продукции этих фирм. Вибродатчики других изготовителей как зарубежных, так и российских имеют аналогичные значения поперечной чувствительности.

В таблице 1 приведены сравнительные значения поперечной чувствительности для нескольких зарубежных многоосевых вибродатчиков ведущих мировых производителей и отечественного, изготовленного в ИМАШ РАН в рамках проведения представленной работы.

Таблица 1

Тип ТОДВ	Производитель	Поперечная чувствительность, %
2228С	ENDEVCO (США)	5
2258 Isotron	ENDEVCO (США)	5

4515-B	BRUEL & KJAR (Дания)	5
8396A	KISTLER (Швейцария)	3
EX629A11A	PCB PIEZOTRONICS (США)	7
4371	BRUEL & KJAR (Дания)	4
356A02, 356A15, 356A25, 356A26	PCB PIEZOTRONICS (США)	Не указано
ТСП-1 + УЗТ-ОН-2	ИМАШ РАН (Россия)	Менее 0,1

Наличие у вибродатчиков поперечной чувствительности – это не единственная проблема. Ещё один существенный недостаток заключается в том, что у большинства многоосевых вибродатчиков 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 разном измерительных точек, точное измерение вектора вибрации таким датчиками в заданной точке становится невозможным. Те же многоосевые вибродатчики, в которых используется один инерционный элемент, обладают невысокими метрологическими характеристиками, поскольку обладают существенной неоднородностью структуры, приводящей к значительному разбросу свойств в измерительных направлениях, и повышенными значениями поперечной чувствительности. Кроме того, промышленные вибродатчики не обеспечивают помехозащищённости измерений, поскольку их измерительная система вырабатывает несимметричный сигнал относительно общей точки, являющейся как правило точкой заземления корпуса.

Метод, представленный в данной работе, позволяет преодолеть этот недостаток и создавать более точные помехоустойчивые многоосевые вибродатчики с единой измерительной точкой, однородной структурой и, соответственно, одинаковыми характеристиками в измерительных направлениях, произвольным базисом векторов чувствительности и при этом ослабленными технологическими требованиями к точности сборки их измерительной системы.

Весьма наглядной иллюстрацией проблем применения многоосевых вибродатчиков, поднятых в данной работе, является их использование в системах балансировки вращающихся узлов машин и механизмов. В современных БС используются многоосевые датчики вибрации, в основном трёхосевые (трёхкоординатные), измеряющие вектор вибрации в ортогональном измерительном базисе. Например, в приборе для измерения

пространственной вибрации и балансировки роторов «Балком-3D» используются два трёхосевых вибродатчика. Основная относительная погрешность измерения СКЗ в этом приборе лежит в диапазоне от 10,2% до 60%. При такой погрешности измерения невозможно обеспечить высокие точность и скорость балансировки объекта.

Особенно актуальна проблема точности измерения вибрации в автоматических БС (АБС) высокого класса точности. Все современные АБС используют в качестве первичных преобразователей, вырабатывающих сигналы текущего дисбаланса, датчики вибрации, и в основном многоосевые. Их погрешности снижают эффективность работы АБС. Совершенствование конструкции многоосевых вибродатчиков и улучшение их метрологических параметров необходимы для дальнейшего повышения класса точности БС и ускорения процесса балансировки. Отечественная компания ДИАМЕХ-2000, например, выпускает многочисленные виброизмерительные системы, в том числе ряд балансировочных станков, как дорезонансных, так и зарезонансных. В них используется широкий спектр вибродатчиков с параллельным выводом сигналов в формате 0-5 (4-20) мА, 0-20 В, IЕРЕ (ICP), как одноосевые, так и трёхосевые.

Как было отмечено выше, одной из наиболее сложных задач измерения многомерной вибрации является задача исследования многомерных колебаний в нелинейных системах. В них возбуждаются опасные резонансы, приводящие не только к нарушению работоспособности этих систем, но и к катастрофам.

На рисунке 4 показана предложенная академиком Р. Ф. Ганиевым схема проведения измерений многомерной вибрации твёрдого тела в нелинейной резонансной системе.

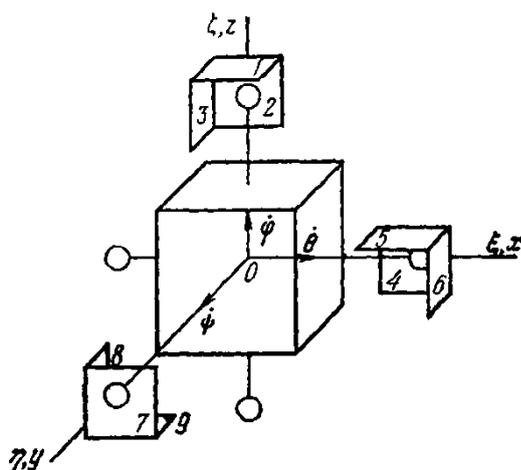


Рисунок 4. Схема измерений вибрации в нелинейной резонансной системе

1,2,...,9 – измерительные грани.

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 датчик вибрации должен обладать измерительным базисом, наиболее точно расположенным в ортогональных направлениях, то есть с нулевыми поперечными чувствительностями по измерительным осям.

Во второй главе описываются методологическая и теоретическая основы исследования. Приводится анализ влияния поперечных компонентов движения на погрешность измерений.

На примере одного из известных трёхосевых вибродатчиков фирмы Bruel&Kjaer (Дания) типа 4321V показано, что наличие у многоосевых вибродатчиков поперечной чувствительности зачастую приводит к значительно бóльшим погрешностям измерений, чем может показаться на первый взгляд, а также к значительному ограничению рабочего диапазона частот.

Рассмотрен наиболее общий случай, встречающийся на практике, когда вектор вибрации имеет существенную проекцию на измерительные оси в поперечном направлении, создавая сигнал ошибки. При этом к основной погрешности измерений добавляется и погрешность, определяемая поперечной чувствительностью. Вследствие этого результирующая погрешность измерений вектора вибрации значительно возрастает. Например, 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 $2\% + 4\% = 6\%$.

Когда составляющие вибрации в поперечном направлении превышают таковые в основном направлении в 10 раз, то 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

$$2\% + (100 \times 4\%) = 402\%, \text{ и т. д.}$$

Для учёта влияния попадающих в область поперечных резонансов вибродатчиков спектральных составляющих вибрации на погрешность измерений в формуле надо добавить ещё один частотно-зависимый множитель, учитывающий АЧХ поперечного резонанса. Таким образом, предлагается следующая обобщённая формула для результирующей погрешности:

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

где

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

ξ_0 – паспортная погрешность осевой чувствительности;

a_{Π} – проекция вектора вибрации на поперечное направление;

a_0 – проекция вектора вибрации на ось чувствительности;

S_{Π} – поперечная чувствительность;

$\frac{a_{\Pi}}{a_0}$ – соотношение составляющих вибрации;

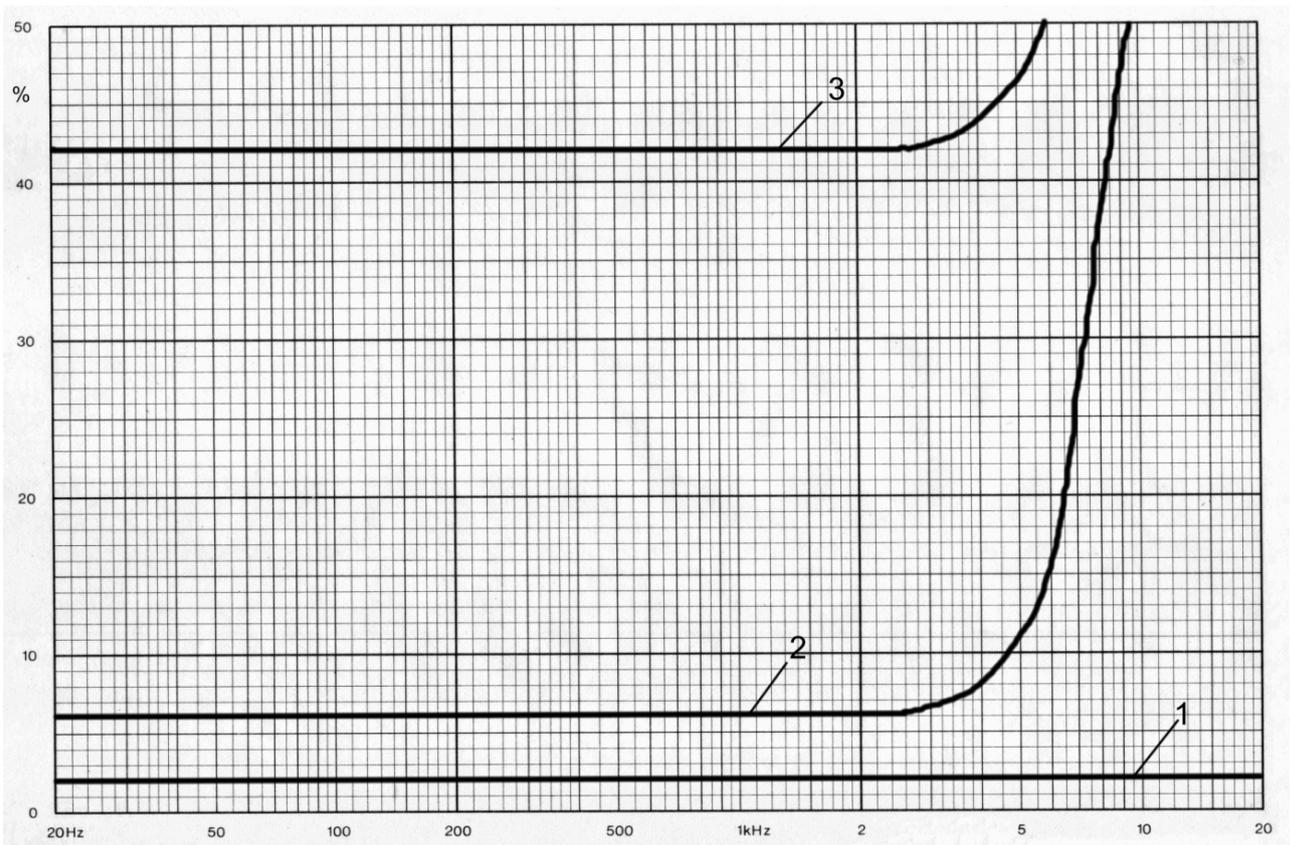
$\Psi(f)$ - коэффициент, отражающий подъём АЧХ на частотах поперечного резонанса;

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.

Эти результаты для трёх значений a_{Π}/a_0 представлены на рисунке 5:



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

Рисунок 5. АЧХ погрешности измерения вибрации для различных соотношений составляющих вибрации в основном и поперечном направлениях с учётом резонанса

На этом графике видно, что особенно резко погрешность измерений возрастает с ростом частоты вследствие влияния поперечного резонанса, занимающего широкую область рабочего диапазона частот.

На рисунке 6 показано разложение векторов чувствительности трёхосевого вибродатчика по составляющим вдоль измерительных направлений и представлены поперечные чувствительности через их составляющие по направлениям измерительного базиса.

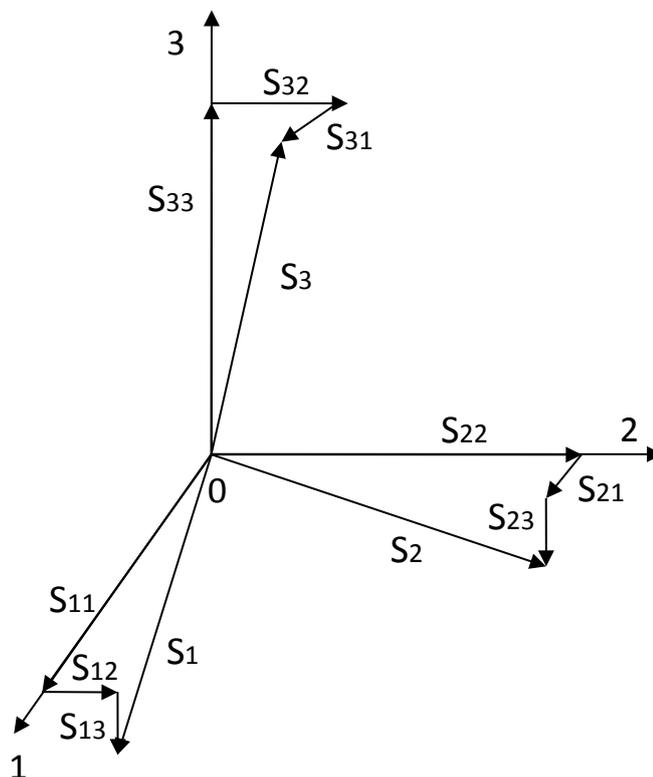


Рисунок 6. Представление векторов чувствительности трёхосевого вибродатчика через составляющие

1, 2, 3 – ортогональный базис

S_1, S_2, S_3 - исходные векторы чувствительности ТОДВ;

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

При измерении виброускорения:

$$\vec{a} = a_1 \vec{n}_1 + a_2 \vec{n}_2 + a_3 \vec{n}_3 \quad (2)$$

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

$$\begin{cases} U_1 = \vec{S}_1 \vec{a} = S_{11} a_1 + S_{12} a_2 + S_{13} a_3 \\ U_2 = \vec{S}_2 \vec{a} = S_{21} a_1 + S_{22} a_2 + S_{23} a_3 \\ U_3 = \vec{S}_3 \vec{a} = S_{31} a_1 + S_{32} a_2 + S_{33} a_3 \end{cases} \quad (3)$$

Это может быть также представлено в матричном виде:

$$U = S a, \quad \text{где} \quad (4)$$

U – вектор-столбец выходных сигналов,

a – вектор-столбец виброускорения,

S – матрица чувствительностей:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Недиагональные элементы 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 трёхосевого вибродатчика 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. Математически задача этого этапа заключается в приведении матрицы чувствительностей трёхосевого вибродатчика к диагональной, в которой недиагональные элементы равны нулю. Физически диагонализация производится специализированным электронным преобразователем методом компенсации помеховых сигналов в каналах, соответствующих главным осям чувствительности трёхосевого вибродатчика, на основе алгоритма пошаговой настройки методом последовательных приближений посредством регулировки коэффициентов перекрёстных связей на соответствующих входах канальных сумматоров.

Выходные сигналы электронного преобразователя могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} U_{\text{вых}1} = \beta_{11}U_1 + \beta_{12}U_2 + \beta_{13}U_3 = S_{01}a_1 \\ U_{\text{вых}2} = \beta_{21}U_1 + \beta_{22}U_2 + \beta_{23}U_3 = S_{02}a_2 \\ U_{\text{вых}3} = \beta_{31}U_1 + \beta_{32}U_2 + \beta_{33}U_3 = S_{03}a_3 \end{cases} \quad (6)$$

где β_{ij} - обобщённые коэффициенты перекрёстных связей;

U_{i1} - входные сигналы;

Выходные сигналы будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{\beta_{11}} = U_1 + \alpha_{12} U_2 + \alpha_{13} U_3 = \frac{S_0}{\beta_{11}} a_1 \\ \frac{U_{\text{ВЫХ2}}}{\beta_{22}} = \alpha_{21} U_1 + U_2 + \alpha_{23} U_3 = \frac{S_0}{\beta_{22}} a_2 \\ \frac{U_{\text{ВЫХ3}}}{\beta_{33}} = \alpha_{31} U_1 + \alpha_{32} U_2 + U_3 = \frac{S_0}{\beta_{33}} a_3 \end{cases} \quad (7)$$

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

$$\begin{cases} -S_{12} = \alpha_{12} S_{22} + \alpha_{13} S_{32} \\ -S_{13} = \alpha_{21} S_{11} + \alpha_{23} S_{33} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} -S_{21} = \alpha_{21} S_{11} + \alpha_{23} S_{31} \\ -S_{23} = \alpha_{21} S_{13} + \alpha_{23} S_{33} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} -S_{31} = \alpha_{31} S_{11} + \alpha_{32} S_{21} \\ -S_{32} = \alpha_{31} S_{12} + \alpha_{32} S_{22} \end{cases} \quad (10)$$

Отсюда можно найти шесть искоемых коэффициентов α_{kl} , например:

$$\alpha_{12} = \frac{S_{13}S_{32} - S_{12}S_{33}}{S_{22}S_{33} - S_{23}S_{32}} = \frac{\frac{S_{13}S_{32}}{S_{33}} - S_{12}}{S_{22} - \frac{S_{23}S_{32}}{S_{33}}}, \text{ и т. д.} \quad (11)$$

Далее выясним, при каких условиях возможна сходимость процесса ортогонализации векторов чувствительности предложенным методом.

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

Тогда
$$\alpha_{kl} = \left(-\frac{S_{kl}}{S_{ll}} + \frac{S_{km}S_{ml}}{S_{ll}S_{mm}} \right) \quad (12)$$

$$\frac{1}{1-\gamma} = 1 + \gamma + \gamma^2 + \gamma^3 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n \quad (13)$$

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

Графическая иллюстрация этого условия приведена на рисунке 7, где показано исходное положение вектора чувствительности перед началом процесса ортогонализации.

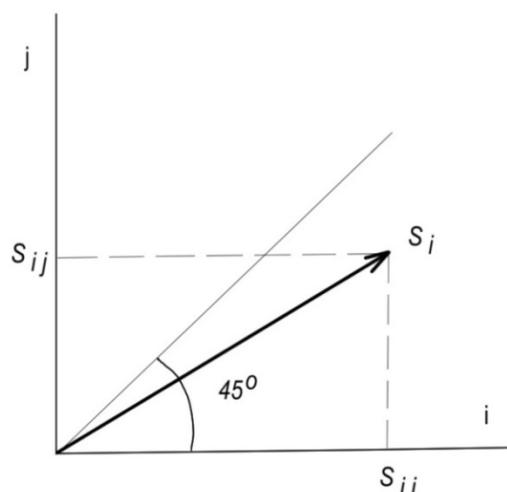


Рисунок 7. Исходное положение вектора чувствительности

Из вышеизложенного следует, что в этом случае ортогонализация данным методом 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. Для ортогонализации векторов чувствительности с такой косоугольной системой измерительных осей необходимо использовать электронный преобразователь, представляющий собой так называемый “формирующий” ортонормализатор (рисунки 8 и 9), который производит преобразования в два этапа.

На первом этапе из векторов чувствительности $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ формируются линейные комбинации, осуществляя первичный “грубый” разворот векторов. Затем на втором этапе производится их точная ортогонализация и нормализация.



Рисунок 8. “Формирующий” электронный преобразователь и трёхосевой вибродатчик с косоугольным базисом.

Внешний вид

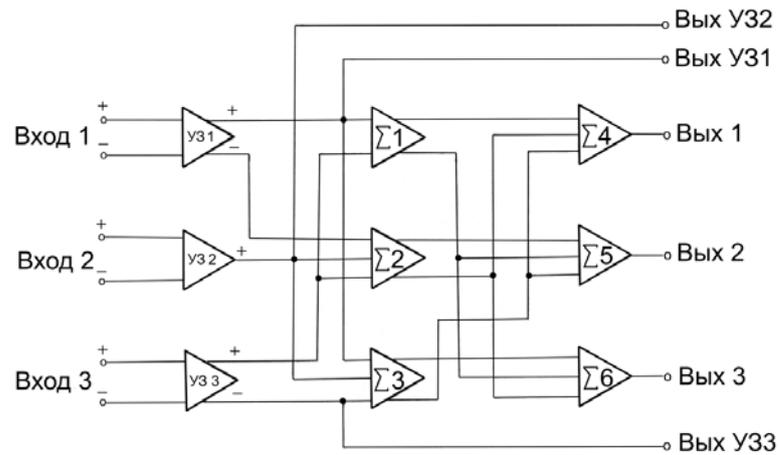


Рисунок 9. Структурная схема “формирующего” электронного преобразователя.

Выходы усилителей заряда УЗ1, УЗ2 и УЗ3 – вспомогательные. Они используются в процессе настройки для оценки первичных характеристик векторов чувствительности трёхосевого вибродатчика.

Ниже приведены измеренные матрицы чувствительностей одного из пяти макетных образцов трёхосевого монолитного пьезоакселерометра до и после ортонормализации. Эти же результаты представлены в виде отношения поперечной чувствительности и основной. У этого образца исходные значения поперечной чувствительности до ортогонализации лежали в диапазоне от 1,3% до 11,0%.

До:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 2,17 & 0,09 & 0,11 \\ 0,23 & 3,13 & 0,04 \\ 0,54 & 0,53 & 4,90 \end{bmatrix} \frac{нКл}{g}; \quad \frac{S_{ij}}{S_{ii}} = \begin{bmatrix} 100 & 4,2 & 5,1 \\ 7,4 & 100 & 1,3 \\ 11,0 & 10,8 & 100 \end{bmatrix} \% \quad (12)$$

После:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 10,00 & 0,003 & 0,002 \\ 0,002 & 10,00 & 0,005 \\ 0,006 & 0,001 & 10,00 \end{bmatrix} \frac{n\text{Кл}}{g} ; \quad \overline{S_{ij}} = \begin{bmatrix} 100 & 0,03 & 0,02 \\ 0,02 & 100 & 0,05 \\ \mathbf{0,06} & \mathbf{0,01} & 100 \end{bmatrix} \% \quad (13)$$

В результате ортонормализации осевые чувствительности были нормализованы к значениям 10 пКл/г, а поперечные чувствительности по всем измерительным осям снижены до уровней менее 0,1%, теоретически до нуля, что ограничивается лишь метрологическими характеристиками калибровочного стенда.

В третьей главе представлены примеры практического применения предложенного метода в измерительных системах. Ниже на двух 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 трёхосевого вибродатчика на основе однокристалльного микропроцессора.

1. Электроизмерительный блок ЭИБ-1 был разработан автором по заданию Минского станкостроительного производственного объединения (МСПО) имени Октябрьской Революции. В состав прибора входят разработанные специально для этого проекта 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, имеющими симметричный или несимметричный выход, нормализацию чувствительности датчиков и электронную компенсацию межканальных помех, возбуждаемых основанием станков.

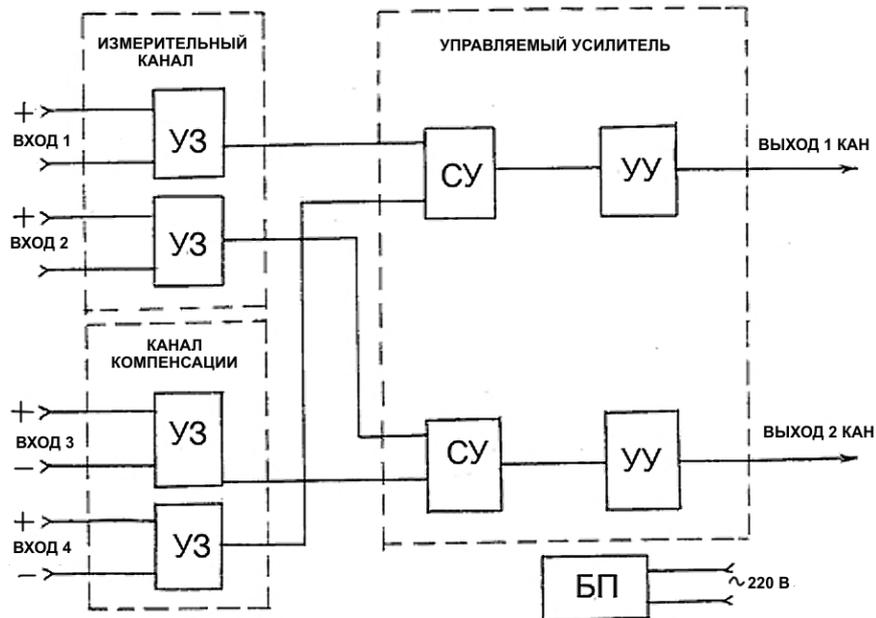


Рисунок 10. Структурная схема электроизмерительного блока ЭИБ-1

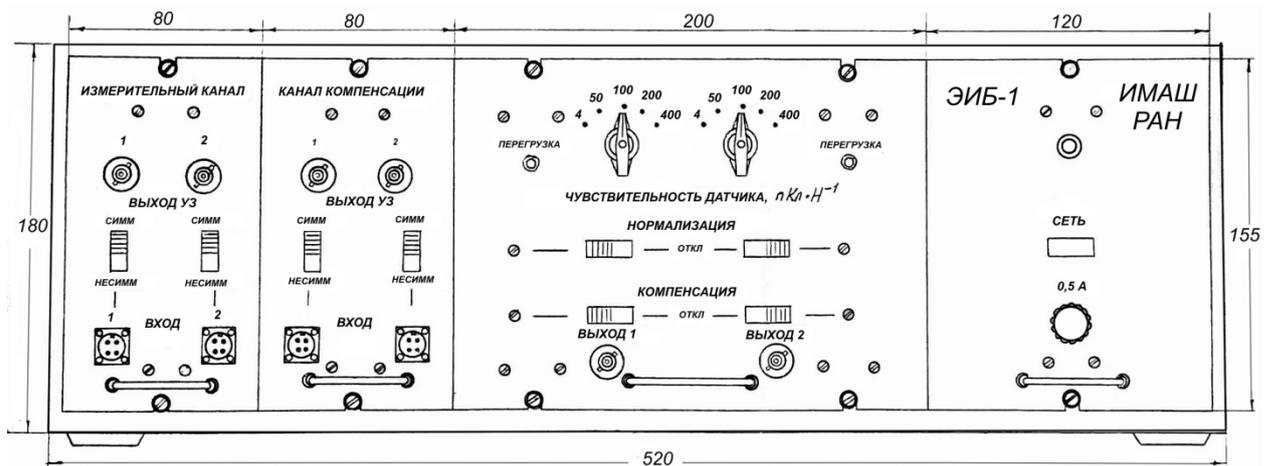


Рисунок 11. Электроизмерительный блок ЭИБ-1. Общий вид

Для работы прибора используется алгоритм управления межканальными сигналами для двухканальной измерительной системы.

В данном случае система описывается следующей матрицей канальных коэффициентов преобразования:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где K_{ij} - межканальные коэффициенты передачи

Прибор производит диагонализацию матрицы:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

В результате произведена ортогонализация векторов, отображающих чувствительности эквивалентных датчиков динамической силы, то есть коэффициентов преобразования двухканальной системы.

Прибор успешно прошёл испытания у заказчика и показал высокие параметры, полностью удовлетворяющие требованиям технического задания. По информации представителей 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.

2. По договору с Калужским турбинным заводом был разработан и изготовлен прибор типа УЗТ-ОН-4, предназначенный для измерения динамических сил в опорах для проведения исследований и приёмных испытаниях продукции (рисунок 12). Разработанный прибор УЗТ-ОН-4 входит в состав трёхкоординатного силоизмерительного устройства. Для этого прибора был разработан и изготовлен датчик силы - ДСНШ-2 с наружным шунтом (рисунок 13), позволяющий измерять динамические силы на фоне больших статических нагрузок. На выходах прибора получаются 3 суммарных сигнала для трёх ортогональных направлений устройства. Для этого сигналы с датчиков суммируются с учётом их фаз. Для точной ортогонализации измерительного базиса, в приборе предусмотрены регуляторы плавной подстройки межканальных коэффициентов преобразования.

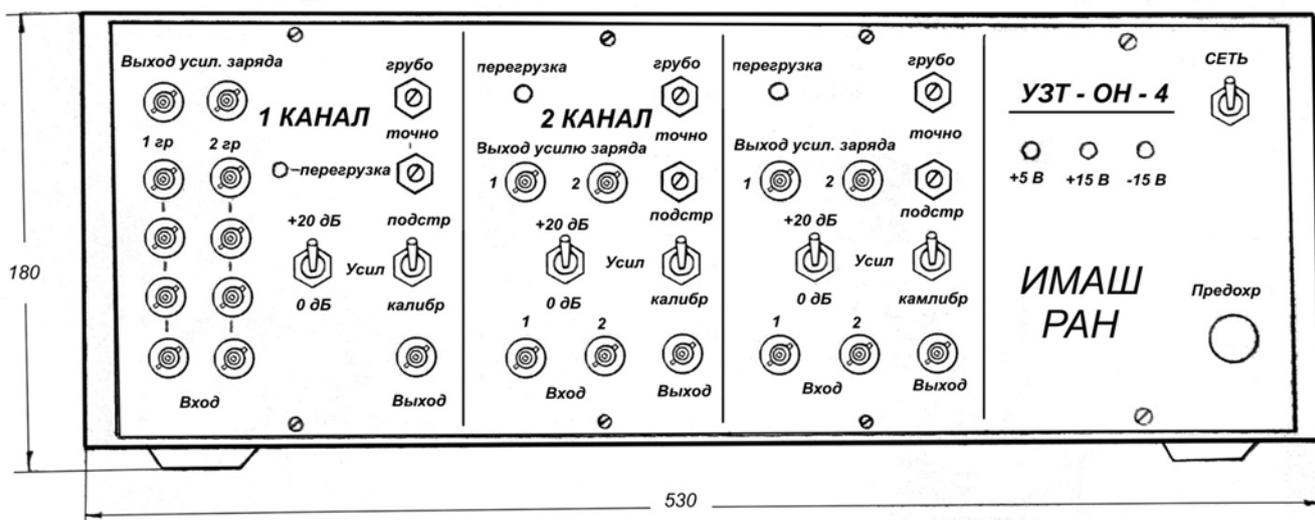


Рисунок 12. Общий вид передней панели прибора УЗТ-ОН-4



Рисунок 13. Датчик динамической силы ДСНШ-2

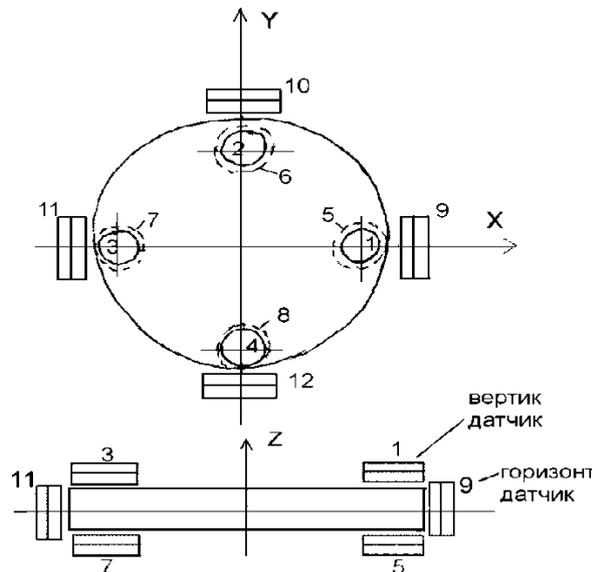


Рисунок 14. Схема расположения датчиков на объекте.

Разработанный прибор УЗТ-ОН-4 совместно с датчиками ДСНШ-2 был передан на Калужский турбинный завод. В результате применения этой измерительной системы получены уникальные данные о распределении динамических сил в конструкции, с помощью которых произведён более точный анализ вибрационных параметров выпускаемой продукции, что позволило разработать более эффективные системы её доводки и приёмки.

3. В развитие работ по практической реализации предложенного метода повышения точности измерения вибрации с помощью трёхосевых вибродатчиков был разработан компьютеризированный комплекс для автоматизированной ортогонализации и нормализации векторов

чувствительности датчиков на специализированном вибростенде с управлением от микропроцессора и проведены его стендовые испытания. На рисунке 15 представлена структурная схема программно-аппаратного комплекса. Он представляет собой управляемый микропроцессором трёхканальный усилитель заряда с симметричными входами, обеспечивающий работу с трёхосевыми вибродатчиками с прямоугольной или косоугольной системами измерительных осей.

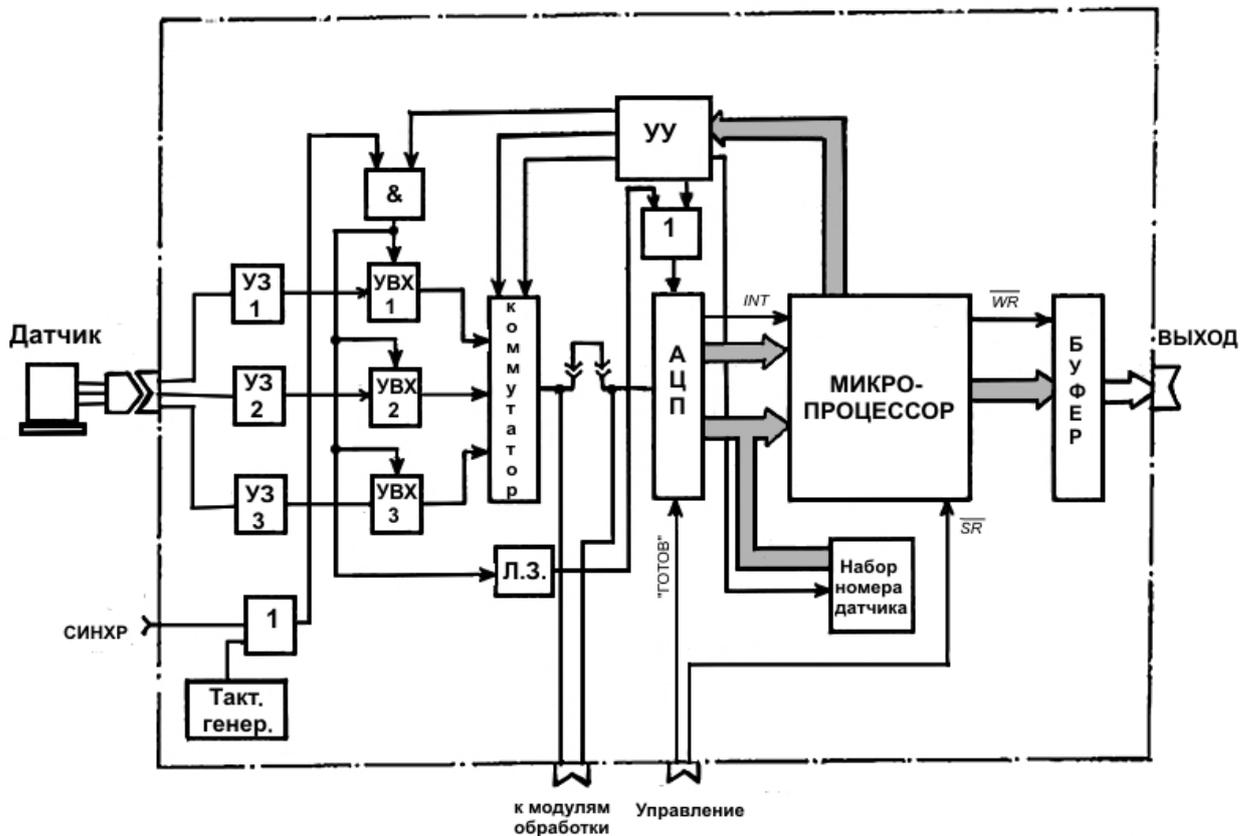


Рисунок 15. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

На разработанные для этого комплекса компьютерные программы получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Проведён анализ влияния поперечной чувствительности одно- и многоосевых датчиков вибрации и других механических величин на точность измерений, который показал, что она обычно недооценивается. Это приводит к тому, что реальная погрешность измерений может оказаться существенно большей, чем следует из значения поперечной чувствительности, приводимой в спецификации вибродатчика.

2. Предложена математическая модель оценки погрешности измерения вибрации с учётом поперечной чувствительности вибродатчиков, влияния характеристик вибрационного процесса и поперечных резонансов. Она позволяет оценить погрешность измерений в реальных условиях.

3. Разработан математический аппарат управления векторами чувствительности многоосевых датчиков на основе матричного представления межканальных коэффициентов влияния.

4. На основе указанного математического аппарата предложен метод управления векторами чувствительности многоосевых вибродатчиков различной конструкции посредством электронной компенсации помеховых сигналов в каналах обработки сигналов, позволяющий практически полностью устранить погрешность измерения вибрации вследствие наличия поперечной чувствительности.

5. Разработана структура специализированных ортонормализующих предусилителей-компенсаторов, позволяющих производить ортонормализацию векторов чувствительности многоосевых вибродатчиков любой конструкции с произвольным исходным базисом векторов чувствительности.

6. Проведён анализ условий реализуемости предложенного метода. Выявлены условия, позволяющие производить ортогонализацию векторов чувствительности многоосевых вибродатчиков, и предложен практический способ.

7. Созданы и успешно испытаны различные предусилители-компенсаторы, работающие как со стандартными промышленными трёхосевыми вибродатчиками, так и с вибродатчиками новой конструкции с улучшенными метрологическими параметрами. Испытания показали правильность теоретической модели, её практической реализации и высокую эффективность.

8. Проведена успешная апробация предложенного метода на реальных измерительных системах и намечены пути его дальнейшего развития в части совершенствования алгоритма проведения ортогонализации на калибровочных стендах, а также её автоматизации и микроминиатюризации электронных преобразователей.

9. В данной работе представлена новая методология повышения точности измерений, дающая возможность создавать прецизионные измерительные системы на основе стандартных первичных преобразователей механических величин с произвольным исходным базисом векторов чувствительности и низкими значениями параметров точности, определяемыми технологическими погрешностями их конструкции.

10. Эта методология позволяет создавать новые первичные преобразователи с более высокими метрологическими параметрами, высокоточные измерительные системы на их основе и проводить поверку и перекалибровку датчиков во время эксплуатации без их разборки.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах из перечня ВАК РФ:

1. Жданов А.С. Помехоустойчивый трёхкомпонентный пьезоакселерометр на основе монолитного пьезоэлемента. // Приборы, №7 (169), 2014г., стр. 1 – 5.

2. Жданов А.С. Предусилитель-компенсатор для трёхкомпонентных вибродатчиков. // Приборы, №4 (178), 2015г., стр. 19 – 24.

3. Жданов А.С. Влияние поперечной чувствительности пьезоакселерометров на точность измерения вибрации. // Приборы, №4 (202), 2017г., стр. 1 – 6.

Материалы статей и научных конференций:

4. 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.

5. Жданов А.С., Голубев В.С. и др. Ортонормализатор для трехкомпонентных вибродатчиков. Материалы конференции «Развитие

технических наук и проблемы машиностроения». // М., Издание Московского дома научно- технической пропаганды (МДНТП), 1986 г., стр. 37 – 42.

6. Жданов А.С. Повышение точности измерения пространственной вибрации трёхкомпонентными пьезодатчиками на основе электронной ортогонализации векторов чувствительности. // Вестник научно-технического развития, №5, 2011г., стр. 13 – 19.

7. 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 2018г, С.222

8. Доклад на научно-техническом семинаре лаборатории исследований биомеханических систем отдела вибрационной биомеханики в ИМАШ РАН, 26 ноября 2019г., Москва.

Патенты и авторские свидетельства:

9. 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.

10. Жданов А.С., Голубев В.С., и др. Устройство для измерения пространственной вибрации. Авторское свидетельство СССР № 1341499 G01H11/06. БИ № 36. 1987г.

11. Жданов А.С., Явелов И.С. Визуализатор пространственных форм колебаний. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617652. Дата регистрации - 10.07.2020 г.

12. Жданов А.С. Построение изображений на принтере. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617653. Дата регистрации - 10.07.2020 г.