


УТВЕРЖДАЮ
Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
член-корр. РАН Никитов С.А.
«20» 11 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе
Жданова Александра Степановича
«РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ МНОГООСЕВЫМИ ВИБРОДАТЧИКАМИ»
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

Актуальность темы определяется недостаточной теоретической и практической разработкой вопросов влияния параметров погрешности первичных вибропреобразователей на точность измерения вибрации. Как известно, надёжность и эффективность работы энергетических установок в значительной степени зависит от их вибрационного состояния, поэтому в настоящее время большое внимание уделяется исследованию динамики вибрационных процессов, происходящих в машинах и механизмах с вращающимися и вибрирующими узлами, например, в системах вибрационного контроля, системах автоматической балансировки, и других.

Особенно остро стоит проблема измерения и анализа 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 и ракетной техники, ТЭЦ, ГЭС. В этих объектах могут происходить сложные нелинейные многочастотные резонансные колебания, приводящие к их разрушению.

Теория и практика разработки и эксплуатации авиационной техники – вертолётов и самолётов, космических ракет и других объектов показывают, что для обеспечения их надёжности необходимо проводить исследования вибрационных характеристик элементов и узлов их конструкции с помощью систем измерения пространственной (3D) вибрации. Анализ динамических вибрационных процессов в космических аппаратах (КА) и ракетноносителях (РН) с ЖРД показал, что колебания в их конструкции происходят как в продольном направлении структуры, так и в поперечном. Так, в литературе приведены данные телеметрии 3D вибрации РН «Сатурн-5» и выявлены изменения парциальных частот поперечных колебаний системы корпус – жидкость – маршевый двигатель – автомат стабилизации и получены временные диаграммы динамической неустойчивости в канале крена на частотах колебаний в баках окислителя первой ступени. Эпюры динамической неустойчивости на уровне окислителя O_2 и на угловой скорости крена

наглядно показывают развитие динамического процесса потери устойчивости, который может привести к катастрофе.

В самолётах также имеются проблемы динамической неустойчивости. Одной из наиболее сложных для анализа является широко известная проблема флаттера, приводящего к катастрофам. В ряде публикаций дан математический анализ автоколебательных процессов и панельного флаттера на основе эмпирических данных динамики вибрационных процессов. В Лаборатории двигателей Научно-исследовательского центра им. Арнольда (АЕДС) на моделях, представляющих собой пятиметровую сверхзвуковую и трансзвуковую трубы были проведены исследования флаттера в аэродинамической трубе для чисел Маха (M) в диапазоне 0,6 – 3,5. На основании анализа 3D вибрации получены функция спектральной плотности и спектральная функция распределения при первичной и повторной потере устойчивости, а также при стабилизирующем внутреннем давлении. Полученные данные дают основания для дальнейшего развития исследований флаттерных явлений.

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. Это тоже также повышает актуальность исследований, изложенных в представленной диссертации.

Одно из самых сложных и фатальных разрушительных явлений в вертолётах – так называемый «земной резонанс», приводящий зачастую к катастрофам. В работах академика Р.Ф. Ганиева представлен математический анализ нелинейных явлений при «земном резонансе» и предложена схема и методология исследования модели вертолёта на земле на упругих опорах. 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 нерешённой задачей. Исследования, проведённые в представленной диссертации, позволяют решить эту задачу и значительно повысить эффективность реализации указанных математических моделей на практике.

В настоящее время мониторинг пространственной вибрации производится с помощью трёхосевых датчиков вибрации (ТОДВ). Наибольшее применение в практике виброизмерений нашли пьезоакселерометры с чувствительной системой на основе пьезокерамических или кварцевых пластин, выпускаемые рядом мировых производителей. Они надёжны, имеют широкий динамический диапазон измерений, обладают высокой стабильностью коэффициента преобразования и хорошо зарекомендовали себя на практике. Однако, этим датчикам присущи существенные

системные погрешности, определяемые конструкцией их измерительной системы, которые могут значительно снизить точность измерений и эффективность всей измерительной системы. Одним из наиболее существенных, и обычно недооцениваемых источников погрешности измерения, 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 данной работе показано, что её наличие может значительно снизить точность измерений вплоть до полной неработоспособности системы.

В представленной диссертационной работе приведены теоретические и практические результаты разработки нового метода устранения влияния поперечной чувствительности на точность измерения вектора вибрации, что является одной из важнейших задач повышения точности измерения 3D вибрации и обеспечения эффективности виброизмерительных систем.

Конкретное личное участие автора в получении результатов диссертации. Автором были проведены следующие работы:

1. Проведён анализ влияния поперечной чувствительности ТОДВ на точность измерения вибрации.
2. Проведены исследования влияния параметров вибрационного процесса на эквивалентные коэффициенты поперечного преобразования в измерительных каналах.
3. Предложена математическая модель оценки погрешности измерения вибрации, обусловленной наличием поперечной чувствительности ТОДВ, с учётом влияния характеристик вибрационного процесса и поперечных резонансов ТОДВ.
4. Созданы измерительные приборы для изучения пространственного положения векторов чувствительности отечественных ТОДВ и измерения матрицы их чувствительностей.
5. Разработаны новые ТОДВ с улучшенными метрологическими характеристиками и проведены их испытания.
6. Разработаны математические принципы компенсации помеховых сигналов в каналах, на которых основан метод электронной коррекции векторов чувствительности ТОДВ.
7. Разработан, изготовлен и испытан ряд ортонормализующих предусилителей-компенсаторов (ОНПК).
8. Проведены испытания разработанных ТОДВ и ОНПК в составе виброизмерительных систем.

Представленные в теоретической и практической части положения диссертации отражают **степень достоверности результатов проведённых исследований.**

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, обеспечиваются соответствием теоретической модели, лежащей в основе предложенного метода, и практических результатов её реализации на многочисленных примерах, которые приведены в данной работе.

Проведённые исследования на различных ТОДВ как промышленного производства, так и экспериментальных образцах, разработанных в ходе исследований,

продемонстрировали хорошее схождение результатов и правильность предложенной теоретической модели.

Новизна полученных результатов исследований заключается в том, что в результате исследований разработан и прошёл успешные испытания новый метод повышения точности измерения вибрации, открывающий перспективное направление в области создания прецизионных виброизмерительных систем. Анализ публикаций в мировой литературе по обсуждаемой теме, а также представленной ведущими фирмами информации о современных виброизмерительных средствах, не выявил информации о проводимых где либо кроме представленных в данной работе исследованиях по методам и средствам управления векторами чувствительности ТОДВ. Борьба с их поперечной чувствительностью и обеспечение других важнейших метрологических параметров ведётся лишь конструктивными методами в пределах технологических возможностей производства. В результате поперечная чувствительность и некоторые другие параметры погрешности лучших образцов ТОДВ ведущих мировых производителей имеют недопустимо высокие значения, значительно снижающие точность измерений.

Научная значимость результатов исследований заключается в том, что теоретические выводы позволяют проводить исследования с использованием новой математической модели, более точно оценивать погрешности измерений и разрабатывать новые технологии в области создания виброизмерительных систем с высокими метрологическими характеристиками.

Практическая значимость работы

1. Представленные в диссертации метод и средства электронного управления векторами чувствительности ТОДВ 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 ТОДВ, 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 вибродатчиков в процессе эксплуатации без вмешательства в их конструкцию, что позволяет существенно увеличить их ресурс.

5. Предложенный метод 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 исходными параметрами точности, определяемыми технологическими погрешностями их конструкции.

Считаем целесообразным продолжить работу в области совершенствования предложенной технологии в части разработки первичных вибропреобразователей новой

конструкции, в том числе в части создания встроенных в ТОДВ ОНKP и автоматизации процесса их настройки.

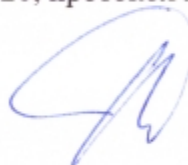
Замечания по диссертационной работе. Как недостаток отмечаем, что в работе не нашли отражение проблемы влияния ФЧХ коэффициентов передачи ТОДВ в измерительных направлениях и влияние резонансов на фазовые соотношения в измерительных каналах и на межканальные коэффициенты преобразования ОНПК. Замечания носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором в дальнейших публикациях по теме исследования.

Заключение

Работа является законченной и выполнена автором на высоком научном уровне. Работа написана литературным языком, грамотно, стиль изложения доказательный. Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет положения, рисунки, графики, примеры, подробные расчёты. По каждой главе и работе в целом имеются выводы. Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, и соответствует, на наш взгляд, пункту 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». В работе задачи, решённые диссертантом, имеют существенное значения для создания высокоэффективных измерительных систем, применяющихся в промышленности для обеспечения надёжности функционирования различных энергетических объектов в таких областях, как авиация, ракетостроение, ГЭС и т. п. Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждён и одобрен на заседании НТС отдела 34 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 12 ноября 2020, протокол № 4.

Председатель семинара,
д.ф.м.н. профессор



А.С. Дмитриев

Секретарь семинара,
д.ф.м.н.



Л.В. Кузьмин

Подписи Дмитриева А.С. и Кузьмина Л.В. заверяю



ЗАВЕДУЮЩИЙ
ОТДЕЛОМ КАДРОВ
Е. В. ЧИЖОВА

