Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ»

На правах рукописи

МИРСАИТОВ ФАНИС НАИЛЕВИЧ

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ РОТОРА ГАЗОТУРБИННОГО АВИАДВИГАТЕЛЯ

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор
Болознев Виктор Васильевич

Казань – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА 1 Функциональная вибродиагностика авиационных двигателей 13

1.1 Надёжность и техническая диагностика ГТД 13

1.2 Виброакустические методы диагностики ГТД 15

1.3 Радиоволновые и оптические виброметры 22

1.4 Предварительные замечания к выбору метода и средств вибродиагностики 27

Вывод по Главе 1 30

ГЛАВА 2 Динамика диагностических операций в ГТД 32

2.1 Ротор ГТД, как объект радиолокационной диагностики. Структура диагностического пространства и способ диагностики 32

2.2 Схема и принцип работы вибродатчика 35

2.3 Кольцевая-щелевая антенна – первичный преобразователь вибродатчика 41

2.4 Содержание диагностической операции 44

2.4.1 FEKO как средство численного моделирования. Описание и применяемые методы 45

2.4.2 Моделирование, расчёт и анализ электромагнитного отклика вибродатчика в проточной части ГТД 51

2.4.3 Элементарный диагностический отклик 56

2.4.4 Групповой диагностический отклик 58

2.4.5 Аномальные диагностические отклики 64

2.5 Датчик с цилиндрическим резонатором 75

2.6 Динамический режим вибродатчика лопаток рабочего колеса компрессора 76

2.7 Динамический режим датчика вибраций лопаток турбины 82

2.7.1 Диагностические особенности газовой турбины 82

2.7.2 Выбор типа и структуры датчика. Детализация стоящей задачи .. 84

ГЛАВА 3 Спектр и информационное содержание диагностического отклика 92

3.1 Термины и определения 92

3.2 Виброспектр как диагностический параметр 92

3.3 Три формы диагностического отклика и их спектры 100

3.3.1 Общая структура и компоненты спектров 101

3.3.2 Гармонический анализ радиочастотного диагностического отклика 105

3.3.3 Детальная структура диагностического спектра 112

3.4 Спектр автодинного отклика 114

3.5 Корреляционные компоненты спектра 118

ГЛАВА 4 Вибродиагностическая радиолокационная система 122

4.1 Вибродатчик в составе многоканальной радиолокационной диагностической системы 122

4.2 Информационная производительность как мера контролеспособности диагностической системы 127

4.3 Конструкции вибродатчиков, имитационный и лабораторный эксперименты 131

4.3.1 Особенности конструкций вибродатчиков, их установка на ГТД131

4.3.2 Имитационный эксперимент. Моделирование в радиодиапазоне138

4.3.3 Лабораторный эксперимент 145

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 149

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 152

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты FEKO-моделирования 163

ВВЕДЕНИЕ

Функциональное диагностирование тепловых энергетических установок (ТЭУ) (называемое также эксплуатационным, а в авиации – полётным или бортовым) решает задачи выявления неисправностей в процессе применения ТЭУ по основному назначению. В отличие от тестового диагностирования (осуществляемого на стенде), здесь используют только те операции и воздействия на узлы ТЭУ, которые предусмотрены рабочим циклом эксплуатации, и только штатными измерительными приборами (средствами диагностирования).

Совокупность газотурбинного двигателя (ГТД), как объекта диагностирования, средств диагностирования и исполнителей (экипажа) образуют систему диагностирования. Принятая последовательность диагностических операций и их анализ называют *алгоритмом диагностирования* [1].

Разработка оптимальных алгоритмов с применением новых технических средств диктуется необходимостью сокращения времени обнаружения неисправностей и, в конечном итоге – повышения безопасности полёта. Эффективность алгоритма авиаспециалисты оценивают *контролепригодностью* двигателя и *контролеспособностью* диагностических средств [5].

Системы функционального диагностирования должны немедленно реагировать на нарушение правильности режима ГТД, переходя на другой режим путём включения дополнительных средств управления, или выключением ГТД.

Актуальность темы исследования

Специалисты отмечают, что существующие типы отечественных ГТД во многих моделях проектировались без учёта поиска неисправностей в условиях их эксплуатации, что приводит к неоправданным материальным затратам [5]. Действительно, если в процессе конструктивной доработки ГТД подвергается проверке по 200-1000 параметрам, в серийном производстве по 60-200, то в по-

лёте контролируемых параметров немногим более десятка (что соответствует психологическим возможностям экипажа без бортового компьютера).

Процесс совершенствования методов и средств функционального диагностирования серийных ГТД затрудняется вследствие:

– невысокой контролепригодности, включая полную невозможность контроля некоторых параметров и поиска неисправностей;
– высокой стоимости средств диагностирования;
– низкой организации обработки извлечённой диагностической информации, включая её доставку в пункт диагностирования;
– отсутствия (или запаздывания) обратной связи.

Поэтому специалисты по эксплуатации авиационной техники крайне заинтересованы в разработке средств, позволяющих преодолеть названные трудности.

К сожалению, все технические решения, предложенные до настоящего времени и зачастую вполне эффективные на стендах, пока не позволяют в своей совокупности решить ряд актуальных задач, возникающих в полёте. Иными словами: средства функциональной диагностики, которые копируют стендовое оборудование (но только в уменьшенных габаритах), своей задачи не выполняют. Необходимы специально разработанные технические решения, зачастую построенные на иных физических принципах [12, 13].

Хотя доля общего числа авиапроисшествий из-за отказов ГТД невелика (примерно 20%), их последствия – наиболее тяжёлые. Основная часть этих отказов приходится на проточный тракт ГТД – компрессор и турбину, причём перечень возникающих здесь неисправностей включает 35 позиций.

Трудами отечественных и зарубежных учёных: Баркова А.В., Заблоцкого И.Е., Кебы И.В., Коростелёва Ю.А., Степаненко В.П., Шипова Р.А., Якобсона П.П., Carrington I.B., Cooper J.E., Dimitriadis G., Ewins D.J., Heath S., Hohenberg R., Holz R.G., Robinson R.A., Slater T., Stivenson R.E., Wright J.R., Zielinski M. выявлены причины и формы колебаний лопаток турбины и компрессора. В частности показано, что по спектру этих колебаний можно судить не только о

состоянии рабочих колёс, но и о значительной части неисправностей других узлов проточного тракта.

В настоящее время предложены и разработаны методы бесконтактного измерения регулярных и вибрационных перемещений лопаток – тензометрические, магнитные, ёмкостные, индуктивные, оптические и радиолокационные. Это работы Боришанского К.Н., Данилина А.И., Заблоцкого И.Е., Коростелёва Ю.А., Усанова Д.А., Шипова Р.А., Carrington I.B., Cooper J.E., Dimitriadis G., Ewins D.J., Heath S., Hohenberg R., Holz R.G., Robinson R.A., Slater T., Stivenson R.E., Wright J.R., Zielinski M. и др.

Но реализация этих предложений требует препарирования ГТД и, уже поэтому, непригодна в функциональной диагностике. Более того, авторы почти всех работ уделяют мало внимания воздействию помеховых факторов, в том числе весьма специфичных. Это, прежде всего, теснота проточного тракта, нагрев и термоэрозия датчиков. Поэтому, несмотря на усилия названных специалистов, вполне эффективные на измерительных стендах предложения не позволяют решить многих диагностических задач, возникающих в полёте.

Наиболее точно стоящую задачу формулирует Данилин А.И. [105]. По его мнению, задача состоит в создании «одно или двухканального первичного преобразователя, в котором функционально и конструктивно интегрированы: объект контроля, источник и приёмник оптического, или радиоволнового диапазона, а также электронные узлы первичной обработки». Реализация этой идеи возможна разными путями, в том числе с использованием успешно развивающихся и применяемых методов сверхближней, ближнепольной, сверхширокополосной, и подповерностной радиолокации [86-94]. Следует выбрать и иной, более информативный диагностический параметр, и учитывать опыт функциональной диагностики в авиации [1]. А этот опыт состоит в том, что неисправность конкретного узла может быть надёжно определена по сопоставлению показаний нескольких приборов, в том числе установленных на других узлах ГТД.

Представляется, что поставленная проблема может быть решена средствами ближней (БРЛ), или ближнепольной (БПРЛ) радиолокации с применением малоразмерных (т.е. ненаправленных) антенн, с модуляцией излучения, и с автодинным преобразованием радиолокационного отклика [75]. В качестве диагностического параметра следует выбрать более информативный параметр – виброспектр и полосу контроля, соответствующую его ширине.

В связи с этим, дальнейшее развитие исследований в области функциональной радиолокационной вибродиагностики ротора ГТД в данной диссертационной работе является актуальным.

Предмет исследования

Структура и динамические характеристики вибродиагностической системы ближней радиолокации, включая автодинный приёмопередатчик.

Цель работы

Исследование, разработка научно-обоснованного метода и реализующего этот метод локатора БРЛ для функциональной диагностики роторов, и других узлов современных ГТД по вибрациям лопаток турбины, и компрессора в процессе полёта.

Задачи работы

1. Разработка новых и доработка известных физических принципов радиолокационного способа функциональной диагностики, диагностического алгоритма и структуры диагностической системы. Выбор наиболее пригодного в условиях полёта диагностического параметра, и уточнение перечня диагностических признаков.
2. Исследование структуры электромагнитного поля, возбуждаемого в объёме проточного тракта, и её зависимости от типа антенны, а также от регулярных и аномальных параметров рабочего процесса.

3. Построение физической модели вибродатчика автодинного типа, анализ динамических процессов. Спектральный анализ диагностического отклика и выявление в нём диагностических признаков.
4. Выработка информационного критерия контролеспособности диагностических средств, его количественная оценка. Выявление и минимизация помеховых откликов, порождённых специфическими факторами в проточном тракте.
5. Модернизация, в применении к виброконтролю, ранее запатентованной диагностической системы, схемы и конструкции датчика.

Научная новизна работы

1. Разработан и научно обоснован метод ближней радиолокации проточного тракта ГТД с модуляцией отражённого сигнала с частотой, кратной числу оборотов ротора, предназначенный для вибродиагностики его состояния, и обеспечивающей в своей аппаратурной реализации невозмущающий характер контроля, включая невмешательство в конструкцию двигателя.
2. Установлена количественная взаимосвязь возбуждаемого в секции проточного тракта электромагнитного поля с конфигурацией, а также с регулярными и вибрационными перемещениями лопаток турбины и компрессора. Показано, что отмеченные явления, включая поломку одной лопатки, могут быть уверенно зарегистрированы по изменению коэффициента отражения.
3. Предложен новый диагностический параметр – огибающая виброспектра лопаток. Применительно к автодинному преобразованию радиолокационного отклика установлена количественная зависимость амплитуд и расстановки дискретных компонентов спектра от частоты вращения ротора, величины и характера виброперемещения. Обнаружено появление дискретного компонента, свидетельствующего о поломке одной лопатки и/или биений вала.

4. Выявлены специфичные помеховые факторы: флуктуационный и статический нагрев датчика, собственное радиоизлучение плазмы пламени, и отражение сигнала от следующего потоку рабочего колеса. Уточнена форма спектра и предложены меры снижения помеховых откликов, путём повышения зондирующей частоты до 28-37,5 ГГц, и модификации конструкции датчика, а также детекторного блока.
5. В качестве критерия эффективности (контролеспособности) автодинной диагностической радиосистемы предложена и вычислена её информационная производительность (по Шеннону).

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы состоит в оперативном выявлении в условиях полёта и на предаварийной стадии приблизительно половины из известных неисправностей ГТД, что способствует повышению безопасности полётов и продлению ресурса узлов ГТД. Опыт разработки и испытаний, подобных по конструкции датчиков параметров пламён в камерах сгорания ЖРД показал их достаточную устойчивость к агрессивным воздействиям.

Теоретическая значимость работы состоит в распространении численного метода моделирования в электродинамике в среде FEKO, предназначенного для проектирования сложных антенн на выявление отклика в системе ближней (ближнепольной) радиолокации.

Методы исследования

Методы функциональной диагностики авиадвигателей; численные методы моделирования в электродинамике: метод моментов, многоуровневый быстрый метод многополюсников, метод тензорных функций Грина, решение системы линейных алгебраических уравнений методом исключения Гаусса, разложение электромагнитных полей по поперечным волновым числам, теория возмущений, методы численного интегрирования; теория нелинейных колеба-

ний, включая спектрально-корреляционный анализ колебательных процессов; теория и методы проектирования РЛС с частотной модуляцией; теория извлечения и передачи информации; среда объектного программирования LabView для моделирования динамики процессов.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ радиолокационной функциональной (полётной) диагностики ротора ГТД, включающий возбуждение в секции проточного тракта (турбины высокого давления) электромагнитного поля, преобразование изменений его структуры в изменение коэффициента обратного рассеяния, и далее, в автодинный радиолокационный отклик.
2. Установление численным методом моделирования в электродинамике трёхмерной структуры поля, как функции конфигурации элементов конструкции, в частности, регулярного и вибрационного перемещения лопаток турбины при различных зондирующих частотах гигагерцового диапазана.
3. Физическая и математическая модели автодинного локатора. Результаты анализа динамического режима, включающего определение формы огибающей спектра частотного автодинного отклика.
4. Результаты сопоставления величины и спектров откликов по пункту 3 для известных и предложенных автором схем, и конструкций автодинных локаторов.
5. Принцип оценки эффективности названных локаторов по информационной производительности по Шеннону, т.е. с учётом помеховых воздействий со стороны рабочего процесса ГТД.

Публикации и апробация работы

Основные результаты диссертации изложены в 16 печатных работах, в том числе в 2 статьях (в ведущем рецензируемом журнале), в 5 трудах и мате-

риалах конференций, в 7 тезисах докладов, в 1 патенте России на полезную модель, в 1 патенте России на изобретние, и обсуждались на:

- Международная молодёжная конференция «Туполевские чтения», г. Казань (2005, 2006, 2007 г.).
- 20th European Frequency and Time Forum, Braunschweig, Germany (2006).
- 13-я международная молодёжная научная конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж (2007 г.).
- 13-я международная молодёжная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», г. Москва (2007 г.).
- VI Международная научно-техническая конференция «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», г. Казань (2007 г.).
- Международная научно-техническая конференция «Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы», г. Курск (2009, 2011 г.).
- Международный симпозиум «Надёжность и Качество», г. Пенза (2014 г.).
- 24'th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014), Sevastopol, Crimea, Russia.

ГЛАВА 1 Функциональная вибродиагностика авиационных двигателей

1.1 Надёжность и техническая диагностика ГТД

Работа ГТД характеризуется сложным взаимодействием его систем: топливорегулирующей, отбора воздуха, управления поворотом лопаток спрямляющего (направляющего) аппарата, ограничения предельных параметров, смазки, запуска и других. Оценка технического состояния ГТД возможна лишь путём измерения параметров, число и точность этих измерений должно отображать взаимосвязь этих систем [1].

Из всей этой совокупности нас будет интересовать состояние проточного тракта.

Опыт эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) убеждает, что среди общего числа неполадок, аварий и катастроф, доля отказов ГТД не так уж велика. Однако в большинстве случаев, последствия этих отказов приводят к более тяжёлым лётным происшествиям [1]. Основная доля отказов ГТД в полёте, приходится на проточную часть (проточный тракт).

Среди причин отказов, прежде всего, называют:

- механические повреждения при попадании посторонних предметов: птиц, гальки, а также оставленных при ремонте внутри проточного тракта и на взлетно-посадочной полосе инструментов, и деталей оборудования мусороуборочных машин;
- абразивный и эрозийный износ, особенно характерный для ГТД вертолетов (при взлете последних в двигатель попадает до 3 кг пыли в минуту), а также загрязнение стенок отвердевшей смесью масел, топлива и пыли;
- обледенение лопаток компрессора;
- деформации и разрушения по конструктивным, производственным и эксплуатационным причинам;
- прогары камер сгорания (жаровых труб) и сопловых аппаратов;

- разбандажирование (увеличение зазоров между антивибрационными полками лопаток компрессора);
- закоксованность форсунок;
- самопроизвольное выключение реверсного устройства при посадке.

Всего общий перечень включает 35 видов неисправностей [5] и их последствий.

Ухудшения характеристик проточной части, вызванное перечисленными причинами, приводит, прежде всего, к снижению эффективного КПД двигателя и, как следствие, к повышению расхода топлива, а также снижению газодинамической устойчивости компрессора. Более существенными последствиями являются постепенные и внезапные отказы ГТД, причем по статистике [5] на долю последних приходится до 30%. Следует отметить, что эти проценты относятся ко всей авиации планеты, и составляет несколько десятков единиц техники и сотни человеческих жизней ежегодно.

Все перечисленные причины отказов, за исключением обледенения и закоксованности, имеют общие диагностические признаки в виде скольжения роторов, расхода топлива и температуры газов за турбиной. Эти признаки отнюдь не указывают место дефекта, а лишь позволяют поставить диагноз: «исправен/неисправен» ГТД в целом. Более точный диагноз обеспечивается осмотром (поиском) с выявлением трещин, забоин, коррозии, коробления, разрушения, прогара и т.д., и возможен только на стенде. Вместе с тем, наличие датчиков давления на входах и выходах компрессора и турбины, частоты и неравномерности вращения рабочего колеса турбины (РКТ) и так называемого выбега увеличивает глубину поиска. Существенным подспорьем здесь является наличие банка данных, отражающих статистическую зависимость полетных и иных показателей от того и иного дефекта [5]. Тем не менее, осмотр всегда остается необходимым.

С точки зрения общего подхода к диагностике ГТД вышеописанная концепция совпадает с концепцией автора диссертационной работы: *при диагностике ГТД и других ТЭУ измерение одного физического параметра узла одним*

датчиком не дает достаточной информации ни о состоянии узла, ни даже о желаемом параметре. Диагностирование должно быть многоканальным, а последующая обработка извлеченной информации – и только она – может дать искомый результат: величину диагностического параметра. Работы [1-6, 9] убеждают, что авиаторы пришли к этому выводу десятки лет назад.

Большое значение при функциональной диагностике приобретает алгоритм диагностирования, позволяющий выявить ряд неисправностей с использованием только штатных приборов (предназначенных, вообще говоря, для других целей). Пример: определение соответствия скоростей вращения вала РКТ, несущего винта вертолетного и развиваемой мощности ГТД предусматривает учёт скорости горизонтального полёта, высоты (то есть плотности воздуха и забортовой температуры). Итак, вывод о соответствии или несоответствии делают на основе сопоставления показаний нескольких штатных приборов. Причиной несоответствия могут быть дефекты в проточной части ГТД.

1.2 Виброакустические методы диагностики ГТД

Виброакустическая диагностика ТЭУ ведет свое начало с 20-х годов 20-го века, что в применении к ДВС нашло отражение даже в художественной литературе [7]. Индикатором служили органы слуха водителя и автомеханика.

В практике эксплуатации авиационных ГТД ряд неисправностей можно обнаружить в простейшем варианте – по уровню, но гораздо более точно – по изменению виброспектра в различных частотных диапазонах. Иначе говоря, вибрация, будучи в принципе явлением вредным, в то же время может служить источником информации о грозящей аварии. Этим объясняется пристальный интерес к данному явлению [8-18].

Наиболее распространенными причинами возникновения вибрации РКТ считается:

– помпаж в компрессоре;

– неравномерность газовоздушного потока по скорости, давлению, и температуре;
– износ деталей проточного тракта и, как следствие, сближение критических (резонансных) частот с рабочими;
– разрушение компрессорных и турбинных лопаток;
– разрушение подшипников опор роторов;
– нарушение работы системы автоматического управления поворотом спрямляющих аппаратов;
– нарушение соосности валов (в двухконтурных ГТД).

Традиционно в авиации вибросостояние ГТД характеризуется двумя группами частот: круговыми Ω, если колебание совершается в плоскости вращения роторов, и «линейными частотами» *F*, если колебание совершается в плоскости, ортогональной (т.е. параллельной оси ГТД). Здесь используют соответственно две единицы измерения – об/мин и Гц. Две другие характеристики: амплитуда виброперемещения *y* (мм) и размах *A=2y* (мм).

Опыт эксплуатации авиационных ГТД показал, что отказы возможны при *F=(12…1800)* Гц и амплитудах *(0,007…1,0)* мм [1]; автор процитированной работы считает, что в применении к обеим величинам измерение одним прибором (датчиком) затруднительно, так как динамический диапазон для обоих диагностических параметров больше ста. В приложении к частотам *F* этот вывод в наши дни несостоятелен вследствие использования и развития электронных средств спектрального анализа. Тем не менее, в авиации в качестве динамических признаков вибраций используют другие величины: *виброскорость*,

$$\mathcal{V} = \frac{dy}{dt} \in (30 \ldots 90)\ \text{мм/с} \tag{1.1}$$

и *коэффициент виброперегрузок*,

$$K_g = \frac{a}{g} \in (0{,}32 \ldots 15) \tag{1.2}$$

где $a = dV/dt = d^2y/dt^2$ – виброускорение, g – ускорение свободного падения.

Выбор виброскорости, как диагностического признака, обусловлен тем, что независимо от частот и форм колебаний она пропорциональна действующим в деталях ГТД механическим напряжениям. Диагностирование по виброскорости позволяет определить (а возможно и предотвратить) такие дефекты и отказы, как обрыв лопаток РКТ, трещины дисков, деформации лопаток компрессора.

Коэффициент виброперегрузок, как диагностический признак, используется в основном для турбовинтовых двигателей и вертолетов, и лежит вне наших интересов.

Для изучения проблем возникновения и развития неисправностей в ГТД методом вибродиагностики в рассмотрение вводится спектр виброскоростей. Типичный спектр показан на рис. [1, стр. 132], он зарегистрирован датчиками на корпусе ГТД. Хорошо видны непрерывные и дискретные компоненты, которые формируются тремя группами причин: внешним аэродинамическим потоком, газовым потоком в проточном тракте ГТД и конструктивными элементами. Все три компонента порождают еще и акустический шум, слышимый экипажем, что дополняет инструментальную информацию и важно в психологическом плане.

В отличие от стендовой диагностики (а в этой области опубликованы более сотни статей и патентов) функциональная вибродиагностика в авиации, тем не менее, развита слабо и это мягко сказано. Главной причиной является ограниченность аппаратурной базы, которая, в свою очередь, опирается на ограниченный набор методов: индуктивные, ёмкостные, тензометрические, электромагнитные, а в последнее время – радиоволновые и оптические, с использованием лазерных средств (п. 1.4). Существующие реализации этих методов характерны значительными габаритами и почти всегда конструктивно несовместимы с проточным трактом, тем более – с ротором.

По названной причине достоинства вибродиагностики удается усмотреть в применении к стационарным ГТД. В частности, средства диагностики получили значительное распространение в электроэнергетике и доминируют на газоперекачивающих станциях. Исключение составляют два известных примера [18]: судовой конвертированный двигатель ДР59Л, мощностью около 10 МВт (массой 14 тонн, ресурсом 82000 часов) и авиационный ГТД НК-12СТ, мощностью 6 МВт (массой 3,5 тонн, ресурсом 33000 часов). Этот перечень явно не полон, так как ГТД широко используется в ВМФ, в частности, на всех без исключения авианосцах.

В ходе проведённого исследования [18] названных ГТД удалось зарегистрировать и оценить изменение виброспектра 8 узлов и по этим изменениям выявить в них 17 дефектов. Исследование проводилось в трёх частотных диапазонах: низкочастотном (до 1 КГц), среднечастотном (в окрестности 5 КГц) и высокочастотном (25 КГц). Результаты выявления дефектов сведены в таблицу 1.1, из которой также очевидны места крепления лишь некоторых датчиков. Но типы и конструкции датчиков в статье не раскрываются, кроме факта, что аппаратура переносная.

Таблица 1.1 – Обнаруженные виды дефектов и их причины в 8 узлах ГТД по спектрам вибрации

№	Вид дефекта	Причины
1	Неуравновешенность ротора	– механический дисбаланс (износ отдельной лопасти, налипание продуктов сгорания и т.п.); – аэродинамический дисбаланс (плохое обтекание отдельных лопаток потоком).
2	Бой вала	– дефекты соединительных муфт, при их наличии; – несоосность валов из-за нарушения соосности опор вращения (подшипников); – перегрузка межвального подшипника из-за искривления одного из валов; – сильный износ подшипника или ослабление его крепления.
3	Дефект опор вращения	– перекос одного из колец подшипника; – ослабление креплений опор, подшипниковых узлов.
4	Износ рабочего колеса (износ лопаток)	– износ торцевых поверхностей лопаток рабочего колеса; – смещение (радиальное или осевое) рабочего колеса (или направляющего аппарата) – вплоть до задевания; – ухудшение обтекания потоком направляющего аппарата, в том числе из-за износа лопаток последнего.
5	Дефекты рабочего колеса	– бой вала с рабочим колесом; – перекос рабочего колеса; – преимущественный износ (дефект) отдельной лопатки рабочего колеса.
6	Повышенная турбулентность потока	– плохая работа направляющего аппарата или дефекты в камере сгорания, при которых появляются отдельные локальные зоны повышенной турбулентности.
7	Износ подшипника	– появление повышенного зазора в подшипнике, при котором возникает нелинейное взаимодействие вала и подшипника или двух валов.
8	Дефекты подшипника	– ударное взаимодействие тел качения с дефектом на поверхности наружного (внутреннего) кольца подшипника или дефектного тела качения с поверхностью качения на наружном кольце.

На основе этой работы, а также [4, 19-20] можно сделать вывод, что вибродиагностика ГТД в условиях полета позволила бы обнаружить многие дефекты в докритической (употребляется также термин – доаварийной) фазе при наличии аппаратуры, удовлетворяющей трем условиям:

– невозмущающий контроль, включая отсутствие серьезных конструктивных изменений в проточном тракте ГТД;
– устойчивость датчиков к присущим проточному тракту агрессивным условиям;
– помехоустойчивость в экстремальных для любого измерительного прибора условиях.

Есть и чисто метрологическая трудность: большой динамический диапазон виброчастот. Действительно, суммируя сведения из [1, 4], убеждаемся, что спектр виброчастот простирается от десятка f_{min} до десятков тысяч f_{max} (и даже сотен тысяч) Герц, то есть охватывает 7…8 октав, коэффициент диапазона

$$K_f = \frac{f_{max}}{f_{min}} \sim 10^4 \sim 2^{7...8} \tag{1.3}$$

При этом наиболее информативные участки этого спектра, по-видимому, различны у разных типов ГТД, а автор [18] выбирает упомянутые три поддиапазона произвольно (точнее, исходя из имеющегося набора резонансных датчиков).

По совокупности перечисленных фактов можно сделать вывод, что аппаратура для регистрации и анализа формы огибающей спектра виброскоростей в штатном и аномальном режимах, даже в применении к упомянутым ГТД в производственных условиях в настоящее время отсутствует, точнее не эксплуатируется.

Исследователи практически единогласно отмечают, а таблица 1.1 наглядно подтверждает, объективно существующее свойство ГТД: в каком бы узле ни зарождались вибрации, они в той или иной мере вызывают виброотклики лопаток компрессора и турбины. Но именно лопатки являются едва ли не самыми

недоступными узлами ГТД, особенно в условиях полёта. В качестве перспективного по части внедрения в функциональную диагностику надо отметить работу [10], а также близкие по принципу действия технические решения [11-17], включающие ёмкостные (и, следовательно, бесконтактные) датчики, измеряющие зазор (клиренс) между краем (торцом) лопатки и корпусом, в месте размещения чувствительного элемнта датчика, и в пределах угла поворота ротора порядка единиц градусов. Отсюда принятое название группы методов [10-15, 76, 105] – *дискретно-фазовые*. Здесь регулярное и вибрационное перемещение лопатки преобразуют в измерительный отклик акустическими, электрическими, магнитными, радиоволновыми или оптическими методами. Особенность в том, что авторы подвергают статистической обработке совокупность многократных прохождений «подозрительной» лопатки. Это позволяет построить путём Фурье-анализа спектр аномального процесса и сравнить его с эталонным. Но авторы сосредотачивают внимание на выявлении спектра одиночной лопатки и установлении характера дефекта. Это важно при производстве. На стенде аппаратура показала обнадёживающие результаты.

В качестве основного недостатка своих методов авторы [76, 105] справедливо отмечают необходимосить препарирования ГТД, а именно создания отверстия в статоре в плоскости рабочего колеса. О другом недостатке умалчивают.

Самым вибронагруженным в роторе, а также подверженным наибольшей температурной и механической эрозии являются рабочие колёса турбины, особенно её первой ступени. Для противодействия вибрациям торцы лопаток здесь охвачены бандажными кольцами, препятствующие осуществлению любого из упомянутых методов. Никакое препарирование ГТД здесь не поможет.

Таким образом, названные методы даже при некотором вмешательстве в конструкцию двигателя допускают диагностику только рабочих колёс компрессора (что конечно, немаловажно). Другое применение – паровые турбины.

Но и это не всё. Для многих авторов выявление характера и величины вибродеформация лопатки – самоцель. Тогда как для авиаторов [1, 5, 18] это

ещё и средство отыскания неисправного узла, например, опорного подшипника. А о ней свидетествует один из участков виброспектра многих лопаток.

Возвратимся к началу данного раздела. Акустические шумы в настоящее время продолжают оставаться в числе диагностических параметров ГТД, но их восприятие и оценка пока осуществляется исключительно органолептическим путем (экипажем). Основной источник шума – компрессор, а в вертолетах, сверх того, несущий винт.

Преимущество данного диагностического параметра – широкая полоса (по мнению разных исследователей от 10 до 13 КГц [1], и даже до сотен КГц [18-20]). Без сомнения акустический шум коррелирован с вибрационным. Поэтому введение акустического канала в состав многоканальной диагностической системы с совместной обработкой вибро и акусто-информации могло бы расширить контролеспособность этой системы.

1.3 Радиоволновые и оптические виброметры

Радиоволновые (РВ), в частности, радиолокационные (РЛ) виброметры по принципу работы практически совпадают с радиодальномерами, а в структурном и схемном отношении они даже проще. Упрощение обусловлено тем, что амплитуды контролируемых вибропроцессов часто обуславливают выбор длины волны зондирующего радиосигнала, так что несущую частоту можно использовать и как дальномерную. Значительное распространение получили РЛ-системы с модулированным радиоизлучением, что обусловлено их лучшими функциональными возможностями [75]

Главные достоинства РВ-виброметров: бесконтактность при слабой зависимости (в частных случаях – и полной независимости) точности от дистанции до объекта и широкая полоса контролируемых виброчастот [36-40]. Главный недостаток: направленность излучения и, как следствие, значительные габариты антенн, затрудняющие и даже, для нашей задачи, исключающие не только конструктивное сопряжение с контролируемым объектом, но и должное формирование структуры зондирующего электромагнитного поля (ЭМП). Теснота

проточного тракта ГТД и отражение волн от стенок не позволяет сформировать зондирующий луч в дальней зоне антенны.

Названные обстоятельства в нашей более узкой задаче не столь существенны, поскольку изменение спектра РЛ-отклика может быть зафиксировано и для ненаправленного излучения, в том числе – в ближней зоне антенны. Этот эффект отмечен несколькими экспериментаторами [32, 33, 69, 70] как помеховый и поэтому серьезно не изучен (точнее, рассмотрен лишь в приложении к узкополосной случайной вибрации [70]). Вместе с тем эффект качественно наблюдался в созданной на кафедре РЭКУ КАИ в 80-е годы лабораторной работе № 315 «Исследование автодинного приемопередатчика».

Более серьезные результаты здесь были получены А. Острейковским [33], основное содержание работ, которого в те годы открытой публикации не подлежало. Исследователь создал и запатентовал в качестве охранного устройства автодинный локатор, способный «узнавать» человека по индивидуальным особенностям спектра колебаний грудной клетки при дыхании. При этом известно (по расстоянию до объекта и длине волны), что излучение было ненаправленным.

Но наиболее серьёзной по теоретическому уровню, объёму аналитических исследований, выдвинутым и реализованным техническим предложениям, и проведённым экспериментам является работа Данилина А.И. [105]. Здесь автор видит свою задачу в установлении зависимости формы радиолокационного, в том числе автодинного отклика от формы, перемещения (регулярного и вибрационного), а также дефектов лопатки. Более того, он озабочен поиском наиболее информативных зон проточного тракта, в которых возбуждено электромагнитное поле, и сопоставлением режима турбины (паровой) с требованиями теоремы Котельникова.

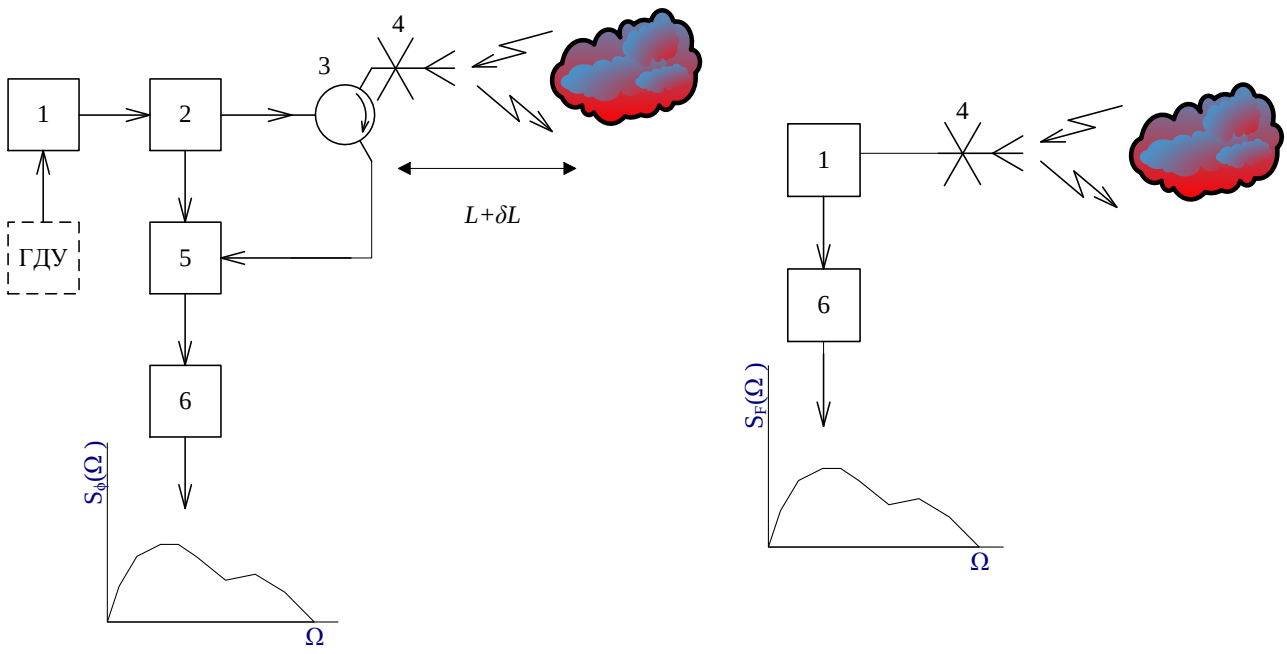
Применённый автором СВЧ датчик с антенной в виде открытого конца круглого волновода, работающий в автодинном режиме, установлен, как и в описанных выше устройствах (п. 1.2) в дополнительном (специально проделанном) отверстии напротив торцов движущихся лопаток. Автодинный отклик

пропорционален амплитуде отражённого сигнала. С помощью построенной математической модели детально изучена форма импульсного отклика при пересечении лопаткой контролируемой зоны. Автор считает одним из информационных параметров временной интервал между соседними импульсами колоколообразной формы. Большое значение придаётся выбору зондирующей частоты, отличающемуся от известного в РЛС с непрерывным и направленным излучением. В целом, разработанное устройство могло бы служить основой для диагностической системы со спектральным анализом совокупности откликов в реальном времени. Таким образом, есть серьезные основания предполагать, что и другие устройства ближней радиолокации могут быть применены для функционального диагностирования РКТ с использованием в качестве диагностического параметра формы огибающей виброспектра, и с ограниченной целью: различать аномалии в спектре в сопоставлении с его эталоном.

Есть однако существенное препятствие. Самым вибронагруженным и подверженным температурной и механической эрозии узлом ГТД является турбина и её рабочие колёса, особенно, первой ступени. А во всех существующих ГТД торцы лопаток этих колёс охвачены бандажными кольцами, препятствующими изгибным вибрациям, но одновременно исключающими диагностирование любым из описанных выше способов, включая радиолокационный [105].

Указанное обстоятельство однако не порочит иные, в том числе гипотетические, способы радиолокационной вибродиагностики. Тем более, что дополнительным (предполагаемым на момент начала нашего исследования) достоинством локаторов ближней радиолокации (БРЛ) с ненаправленным излучением является некритичность к выбору несущей частоты, т.е. длины волны. Последняя, при направленном и немодулированном излучении, должна быть больше максимальной амплитуды виброперемещения, иначе возникает неоднозначность в оценке виброперемещений, виброскоростей и виброускорений на различных виброчастотах.

Обратимся теперь к аппаратурной реализации.



а) б)

Рисунок 1.1 – Радиодальномеры непрерывного излучения

а) гомодинный дальномер; б) автодинный дальномер

1 – генератор; 2 – делитель; 3 – циркулятор; 4 – антенна; 5 – фазовый детектор; 6 – фильтр нижних частот

Наиболее распространенными архитектурами радиодальномеров непрерывного излучения (а в БРЛ импульсные локаторы неприменимы) являются гомодинная и автодинная (рис. 1.1 а, б).

Здесь мы ограничимся дальномерами, в которых дальномерная частота совпадает с зондирующей. Гомодинная схема приемопередатчика РЛС включает генератор (рис. 1.1 а) зондирующей частоты *1*, делитель мощности *2*, циркулятор *3*, антенну *4*, фазовый (синхронный) детектор *5*, фильтр нижних частот *6*.

Отражённый от объекта сигнал задержан по фазе на [64]:

$$\varphi + \delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (L + \delta L) = \frac{4\pi \cdot f}{C} \cdot (L + \delta L) \qquad (1.4)$$

где f, λ – частота и длина волны зондирующего сигнала, δL – вариация дальности (т.е., виброперемещение). Напряжение на выходе фазового детектора (с коэффициентом детектирования $K_Д$):

$$U(\Omega) = K_Д \cdot \delta\varphi(\Omega) \tag{1.5}$$

совпадает по форме спектра с вибропроцессом:

$$S_U(\Omega) = K_Д^2 \cdot S_\varphi(\Omega) \tag{1.6}$$

Для получения виброспектра скоростей сигнал $U(\Omega)$ подлежит дифференцированию.

При $L>\lambda$ или $L>>\lambda$ зондирующее колебание во избежание неоднозначности измерения модулируют дальномерной частотой (ГДУ), а фазовое детектирование производят на этой частоте.

Нетрудно видеть, что приёмный тракт сходен с супергетеродинным приёмником с «нулевой» промежуточной частотой (отсюда и название, как схемы в целом, так и детектора).

В автодинной схеме (рис. 1.1 б, где функции узлов отмечены номером, точнее, совпадением номеров с рис. 1.1 а) операция фазового детектирования (перемножения сигналов) заменена автодинным эффектом с преобразованием виброперемещения в зондирующую частоту [54, 64]:

$$\delta f = K_f \cdot \delta f = \frac{4\pi \cdot f}{c} \cdot K_A \cdot \delta L \tag{1.7}$$

где $K_A = K_{отр} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L\right)$, $К_{отр}$ – коэффициент отражения от объекта. Из сопоставления соотношений (1.4) и (1.7) видно, что автодинная схема требует аккуратного выбора рабочей точки в случае произвольного расстояния L до объекта. Для этого используют [64] дополнительную задержку отклика с помощью отрезка линии между антенной и генератором $l_А$ с тем, чтобы приблизить выра-

жение $\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}\cdot(L+l_{\text{А}})\right]$ к единице, одновременно обеспечивая линейность измерительного преобразования.

Применение радиоволновых методов для контроля многих технологических процессов и накопленный опыт, тем не менее, не пересилили их недостатков в приложении к виброметрии ГТД.

То же можно сказать и об оптических методах, где последняя оригинальная работа [9] датируется 1980 годом.

Вместе с тем в стендовой диагностике применение оптических методов, в частности, оптоволоконной техники, носит едва ли не повсеместный характер. Так, в отечественных и зарубежных двигателях предусмотрено от 7 до 23 смотровых окон, в которые вставлены «оптические трубки» [5]. Однако они используются для визуального осмотра на стенде, причём время полного осмотра достигает 6-8 часов. По-видимому, ГТД и в этом отношении обладает низкой контролепригодностью, оптические методы и средства – низкой контролепригодностью, а в функциональной диагностике – и вовсе нулевой.

1.4 Предварительные замечания к выбору метода и средств вибродиагностики

Из вышеизложенного следует, что попытки создать достаточно надежную систему функциональной диагностики РКТ ГТД предпринимаются в течение полувека. Около сорока лет назад был получен весьма успешный результат при стендовой вибродиагностике лопаток [10], но попытки создания бесконтактного (и поэтому пригодного в полёте) метода, если и делались, то к созданию серийной диагностической аппаратуры они не привели. Но, что весьма важно, принципиальная возможность вибродиагностики узлов РКТ вновь подтверждена [18].

Сейчас специалисты склоняются к компромиссной концепции и исходят из того здравого взгляда, что функциональное диагностирование, формируя своего рода сигнал тревоги, хотя и не заменяет стендового, но побуждает к та-

ковому. Тем более что для устранения дефекта (если он заподозрен) двигатель всё равно приходится ставить на стенд.

Действительно, возможно три диагностических ситуации, возникающих по результатам функциональной диагностики:

1) На стенде диагноз подтвержден: узел и дефект названы верно;
2) Дефект есть, но в другом узле;
3) Дефекта нет, т.е. он, может быть, и есть, но остался не выявленным.

Достоверность первого варианта автор [5] оценивает в 25%, но в сопоставлении с диагнозом других подсистем (а он почти всегда есть [1, 5]) достоверность повышается. Второй вариант тоже небесполезен, но конечно, усложняет стендовый диагноз. Опасен только третий вариант.

Представляется, что неудачи в попытках создания РЛ средств функциональной диагностики, конструктивно совместимых с ГТД, происходят от стремления копировать задачи, и средства их решения из классической радиолокационной виброметрии. А именно: стремиться определить количественные показатели вибропроцесса (а также размеры поломки) с принятой в РЛ (и даже при стендовой диагностике поломок) точностью.

Между тем, авиаспециалисты придерживаются иного подхода и нацелены на получение ответа: можно ли продолжать полёт и какова вероятность благоприятного исхода? Поэтому количество диагностируемых параметров и их значений дискретизируют, причём степень дискретизации для каждого из узлов ГТД, и их состояний ставят в зависимость от требуемой глубины диагностирования [1, 5]. В большинстве случаев оставляют наиболее информативные признаки, придавая им двухразрядные значения 0 и 1. Так, для вертолётного ГТД диагностике подлежит 74 состояния (из них 16 влияют на вибрации лопаток турбины и компрессора и могут быть использованы для выявления путём виброконтроля). При этом окончательный диагноз для каждого из состояний устанавливается при сопоставлении 20 параметров (признаков) и носит вероятностный характер [1, 5].

Несмотря на то, что отказы двигателей не так уж часты (в сравнении с другими причинами аварий), но последствия таких редких отказов ужасны и поэтому дополнительные диагностические возможности представляют серьёзный интерес для безопасности полёта.

С другой стороны, на первом этапе решением задачи можно считать факт обнаружения дефекта, т.е. установление заметного различия реального и номинального виброспектров, как это сделано в [1], тем более что характер и детали такого различия рекомендуется предварительно установить в стендовых экспериментах.

Третьим обстоятельством служит наличие схемно-конструктивных прототипов [31, 32]. Важно, что эти датчики изначально были созданы для камер сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), т.е., во-первых, для диагностики объекта в тесном пространстве, размеры которого сопоставимы с длиной зондирующей волны (что отличает их от общеизвестных локаторов, но сближает с появившимися в последние годы средствами *ближнепольной* (near-field) и *подповерностной* радиолокации [86-94]) и, во-вторых, для условий, гораздо более жестких (особенно по температуре), чем в проточном тракте ГТД (включая турбину и сопловой аппарат).

Четвёртое обстоятельство ещё более усиливает предыдущее: наличие смотровых окон со штуцерами в проточном тракте ГТД, с которыми известные датчики допускают конструктивное сопряжение, и их чувствительные элементы – антенны, в рабочем положении не выступают в газовод.

Наконец, пятое: возможность постоянного контакта в коллективе с создателями прототипов.

Для исследования и разработки предполагаются способ радиоволновой диагностики и датчик в виде СВЧ автогенератора, схемно и конструктивно сопряженного с невыступающей в проточный тракт антенной. Конструктивными прототипами служат датчики электронной концентрации и теплового потока в камерах сгорания ЖРД [31, 32, 68, 69, 70].

Особенность данного исследования в том, что параллельно ему и на разных стадиях завершения разрабатываются средства радиоволнового контроля других узлов авиационных и космических двигателей, в частности, камер сгорания. Физическими характеристиками здесь выступают электронная концентрация и температура пламени, а диагностическими параметрами – спектральные плотности этих процессов. В приложении к ГТД эти параметры находятся в некоторой, пока малоисследованной, взаимосвязи с виброспектром ротора. Но это – предмет интереса теплофизиков.

Нас же привлекает близкое сходство с методами радиоволновой диагностики и приборными средствами. Но не только. Наша задача сближается с достижениями БРЛ, в том числе – в виброметрии, что способствует проверке с подтверждением (или неподтверждением) наших результатов. И, если идти дальше, то отсюда следует необходимость учёта свойств разрабатываемого виброканала, как узла (а датчика – как элемента) многоканальной системы диагностирования проточного тракта, а не только ротора и, тем более, не только состояния лопаток.

Наиболее трудными разделами предстоящего исследования предполагаются анализ свойств и отклика антенны, ввиду расположения диагностируемого объекта в ближней зоне, а далее, выбор зондирующей частоты и конструктивных размеров щели, отыскание формы огибающей спектра диагностического отклика, оценка воздействия совокупности помех и оптимизация информационной производительности вибро-диагностической подсистемы.

Вывод по Главе 1

Возможность построения автодинной системы БРЛ для вибродиагностики в специфичных условиях проточного тракта ГТД и в условиях полёта, как минимум, физически осуществима. В техническом плане имеются многочисленные аналоги. Однако было бы преждевременным ставить задачу определения величины и частоты вибрации (или поломки) произвольно выбранной лопатки, как это успешно делают на стендах упомянутые авторы.

Пилотов интересует не амплитуда вибрации и не конфигурация излома, а степень опасности. То есть ответ «да» или «нет» – в смысле продолжения полёта. Как показано ещё в [10], это можно сделать на доаварийной стадии, сравнивая наблюдаемый спектр со статистически выверенным допустимым.

Работа в этом плане перспективна.

ГЛАВА 2 Динамика диагностических операций в ГТД

2.1 Ротор ГТД, как объект радиолокационной диагностики. Структура диагностического пространства и способ диагностики

Создание радиолокационного диагностического отклика (в рамках стоящей задачи) на первом этапе измерительного преобразования связано с формированием электромагнитного поля (ЭМП) в своеобразных полузамкнутых «диагностических камерах», образованных элементами турбины или компрессора. На рис. 2.1 представлен вид газовоздушного тракта в разрезе конструкции отечественного ГТД Д-36.

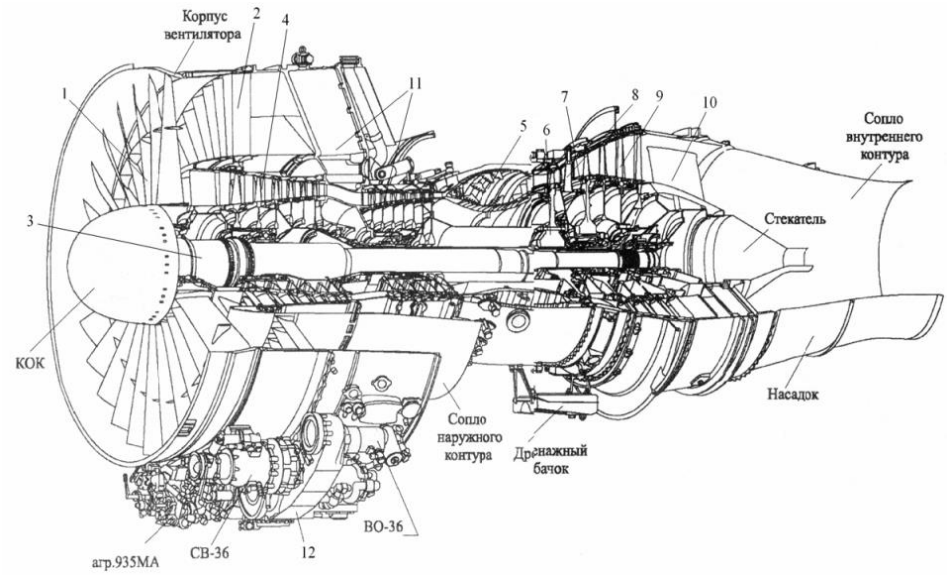


Рисунок 2.1 – Вид газовоздушного тракта в разрезе двигателя Д-36

1. Рабочее колесо вентилятора; 2. Спрямляющий аппарат вентилятора; 3. Вал вентилятора; 4. Компрессор низкого давления; 5. Камера сгорания; 6. Ротор турбины высокого давления; 7. Ротор турбины низкого давления; 8. Корпус опор турбин; 9. Турбина вентилятора; 10. Задняя опора двигателя; 11. Промежуточный корпус и компрессор высокого давления; 12. Коробка приводов.

Рассмотрим как частный случай турбину. Турбина служит для преобразования кинетической энергии газового потока, энергии теплосодержания в механическую энергию на валу. Турбина является важнейшим узлом двигателя, во многом определяющим ресурс и надёжность всего двигателя.

Основными элементами турбины являются: сопловой аппарат (СА) и рабочее колесо (РК). Совокупность неподвижного СА и следующего за ним РК называется ступенью турбины. Профилированные лопатки СА образуют суживающиеся криволинейные каналы, в которых происходит разгон потока. Кроме того, газовый поток закручивается в направлении вращения РК.

В РК происходит преобразование части кинетической энергии в механическую работу на валу турбины, поэтому абсолютная скорость потока, его полная температура и давление газа также уменьшаются.

В продольном по потоку сечении (рис. 2.2 Вид А) показано, что «диагностическая камера» ограничена внутренним корпусом статора ТНД *1*, корпусом вала *7*, лопатками соплового аппарата ТНД *6*, движущимися, и вибрирующими лопатками РКТ первой *5*, и второй *8* ступеней, образующими полупрозрачные для радиоизлучения стенки, далее называемые «диагностическими окнами». Размеры «диагностической камеры» исключают применение для диагностики традиционных радиолокационных виброметров [35-40] с направленным радиоизлучением.

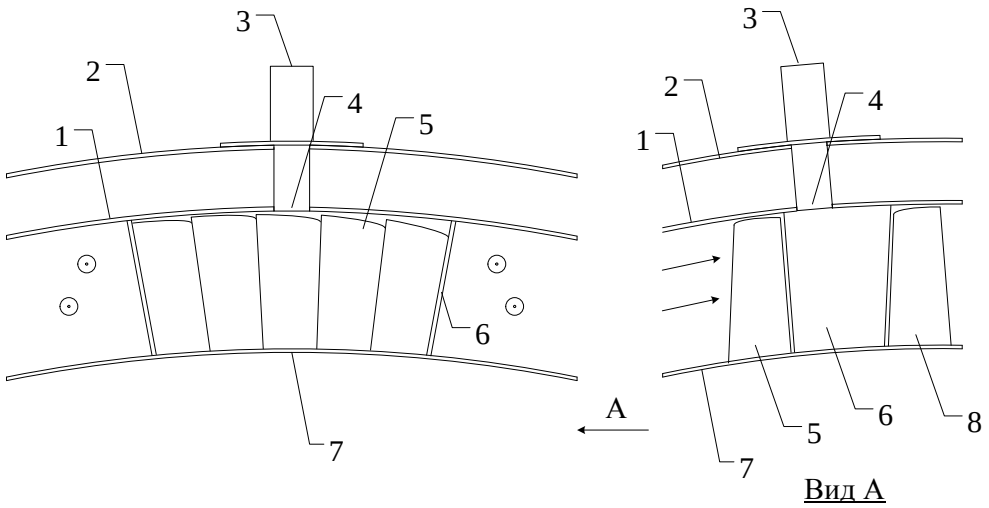


Рисунок 2.2 – Поперечное (слева) и продольное (справа, вид А) сечения «диагностической камеры»

1. Внутренний корпус; 2. Наружный корпус; 3. Вибродатчик; 4. Смотровое окно; 5. Лопатка ротора ТВД; 6. Лопатка соплового аппарата; 7. Корпус вала; 8. Лопатка ротора ТНД.

Для реализации предложенного в данной работе способа вибродатчик *3* (рис. 2.2) предполагается разместить в штатное смотровое окно (для бороскопического осмотра лопаток) *4* так, чтобы чувствительный элемент – антенна располагался впереди, или сзади (по потоку) от РК. По регламенту смотровые окна закрыты заглушками. При установке вибродатчика раскрыв невыступающей антенны обращён во внутрь «диагностической камеры» и обеспечивает возбуждение ЭМП. Остальные элементы вибродатчика, как и в прототипах [31, 32], расположены снаружи наружного корпуса *2*.

Таким образом, антенна, являющаяся одновременно и возбудителем ЭМП, и чувствительным элементом вибродатчика (как в обоих прототипах), образует совместно со стенками «диагностической камеры» единую электродинамическую конструкцию. Структура возбуждённого ЭМП зависит от конфигурации стенок «диагностической камеры» и, следовательно, изменяется как при регулярном (рабочем), так и при случайном (вибрационном) перемещении лопаток, не говоря уже о поломках лопаток.

Эти явления могут быть преобразованы в диагностический радиосигнал одним из известных в радиотехнике способов. Два из них применены в данной диссертационной работе. Никаких конструктивных изменений в ГТД оба варианта способа не требуют.

Уже на предварительном этапе, очевидно, что предлагаемый способ не позволяет выявить вид и размеры дефектов, а также место (то есть, конкретную лопатку), вид и амплитуды вибраций, на что нацелены и претендуют известные методы [27, 36, 37].

Однако общий подход к функциональной диагностике [1, 5] этого и не требует. Здесь важнее обнаружение факта неисправности или аномалии рабочего процесса, и степени их опасности. В большинстве случаев они влияют на спектр рабочего процесса (о чём уже говорилось в гл.1) и, в частности, приводят к появлению дополнительных, и изменению соотношения амплитуд регулярных (дискретных) спектральных компонентов, а также к искажению огибающей сплошного спектра [1, 19, 20]. Поэтому эффективность предложенного

способа зависит от достоверности выявления указанных диагностических признаков.

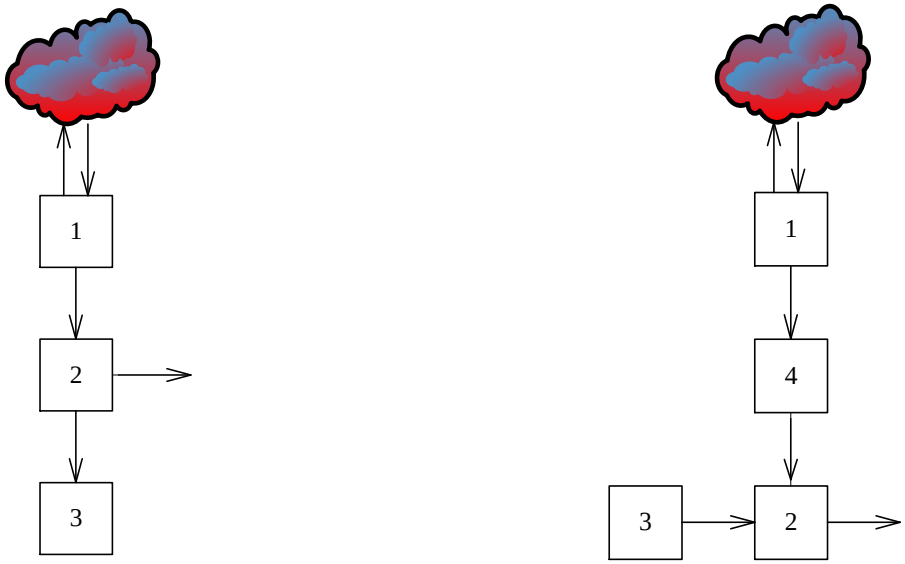
По аналогии с системами ближней радиолокации и, особенно, с работами [54, 57, 64, 67, 68] надо полагать, что соответствие спектров диагностического отклика и рабочего процесса зависит от четырёх факторов: линейности всех промежуточных операций, полосы отклика (т.е. от инерционности датчика), собственных шумов диагностической системы, и степени подавления откликов на помехи. Эти показатели предстоит установить и оптимизировать. В более широком плане существенно знание структуры эталонных спектров и допустимых отклонений, а также быстродействия вычислительных средств, сопоставляющих в реальном времени эти спектры с диагностическими. Но эти две последние задачи не входят в содержание диссертационной работы и рассмотрены в главе 4 очень кратко как перспективные.

2.2 Схема и принцип работы вибродатчика

Схемными и конструктивными прототипами обоих вибродатчиков являются, как это уже отмечено в Главе 1, датчики электронной концентрации [31, 32, 69], и плотности теплового потока [70], сходные по принципу работы и почти идентичные по конструкции, особенно, внешне. В обобщении датчик этого типа представляет собой СВЧ антенно-генераторный модуль, предназначенный для установки в стандартный штуцер от М8 и более так, что рабочая поверхность чувствительного элемента – антенны, располагается заподлицо с внутренней поверхностью стенки газовода (проточного тракта). Различия датчиков по прототипам между собой обусловлены стремлением уменьшить (практически – устранить) помеховые отклики: для первого – на статический и флуктуационный нагрев, для второго – на изменение концентрации электронов.

В приложении к вибродатчикам (ВД) влияние температуры на диагностический отклик несколько иное, чем в прототипе, хотя тоже помеховое. Для вибродатчика компрессора (ВДК) существенно изменение температуры по мере набора высоты полета или снижения с перепадом порядка $\Delta T=80$ К (как и в

прототипах). Это обстоятельство приводит к количественному изменению амплитуды автоколебаний вследствие смещения рабочей точки, а искажение спектра отклика здесь незначительно, потому что диагностический отклик – частотный. И поскольку схема со встроенной антенной [31] обладает более высокой чувствительностью (крутизной передаточной характеристики), то она более эффективна для диагностики компрессора.



а) б)

Рисунок 2.3 – Структуры вибродатчиков

а) структура ВДК; б) структура ВДТ

1. Щелевая антенна; 2. Резонатор; 3. Генераторный диод; 4. Фидер

Структура ВДК показана на рис. 2.3 а. Здесь щелевая антенна *1*, выполняющая роль чувствительного элемента, непосредственно «врезана» в резонатор *2*, в котором также размещён генераторный диод *3*. Питание диода и выход сигнала осуществлены через один разъём, аналогично [31].

Частота генерации, и соответственно, изменение спектра отклика, обусловлены влиянием комплексного сопротивления антенны при внесении и виброперемещении лопатки в её ближней зоне (или, точнее, в окрестности этой зоны).

Понижение внешней температуры по мере набора высоты приводит, конечно, к некоторому изменению размеров антенны и (в меньшей мере) резона-

тора. Об этом уже сказано выше. Но на работоспособность генераторного диода (диода Ганна) практически не влияет. Иначе говоря, условия для ВДК более комфортны.

Измерительное преобразование происходит в последовательности:

$$[l+\delta l](x,y,z) \longrightarrow \delta\vec{E}(x,y,z) \longrightarrow \delta i_A \longrightarrow \delta\dot{Z}_A \longrightarrow \delta\omega \qquad (2.1)$$

Здесь первый этап условно отображает совокупность номинального l и вибрационного δl движения лопатки в пространстве координат (x,y,z) электромагнитного поля (ЭМП) антенны; $\delta\vec{E}(x,y,z)$ опять-таки, условно отображает вызванное вторжением лопатки возмущение структуры ЭМП и, следовательно, распределения токов i_A по поверхности антенны; $\dot{Z} = |Z| \cdot \exp(-j\varphi)$ – комплексное сопротивление антенны, ω – зондирующая частота.

Выбор номинального значения частоты ω и, как следствие, размера резонатора, а также диаметра, ширины щели и расположения ВДК относительно плоскости диска ротора затруднён, поскольку авторов наиболее серьёзных работ [64] интересовала дальняя зона. Лишь в последние годы разработаны вычислительные методы, позволяющие решать подобные задачи для ближней зоны. Но ни для кольцевых-щелевых, ни для других слабонаправленных антенн (тем более с расчётом структуры ЭМП в ближней зоне) исследований с помощью этих методов, по-видимому, не производилось. И в этом – предмет и серьёзная трудность настоящего исследования.

У данного (ВДК) варианта вибродатчика есть ещё одно преимущество – более широкая полоса контрольного сигнала. Но, в применении к виброконтролю, оно излишне – здесь полоса составляет ~10^{-6} от несущей зондирующей частоты.

Особенности структуры ВДТ обусловлены, как и в работах [69, 71], защитой диода от перегрева (его рабочая температура менее 70-80 ^{0}С), для чего

между резонатором и антенной установлен отрезок линии передачи *4* (рис. 2.3 б). Остальные позиции совпадают с рис. 2.3 а. Отрезок, как и резонатор, коаксиальный. Подобная структура в радиотехнике и, в частности, в ближней радиолокации широко известна [54, 55]. В данном случае (то есть в прототипах и, на первом этапе исследования – у нас) имеется существенная особенность: антенна рассогласована с отрезком, что обуславливает отражение падающей волны и возникающий в автогенераторе автодинный эффект в виде некоторого изменения амплитуды и частоты генерации, а дополнительный отрезок секционирован на полуволновые участки с разным волновым сопротивлением [71]. Количественные значения этих параметров обусловлены регулярными и вибрационными перемещениями лопаток.

Здесь (т.е. в ВДТ), измерительное преобразование включает дополнительную операцию – отражение сигнала от рассогласованной (в номинальном режиме) антенны:

$$[l+\delta l](x,y,z) \longrightarrow \delta\vec{E}(x,y,z) \longrightarrow \delta i_A \longrightarrow \delta\dot{Z}_A \longrightarrow \delta\dot{\Gamma}_{\text{отр}} \longrightarrow \delta\omega \qquad (2.2)$$

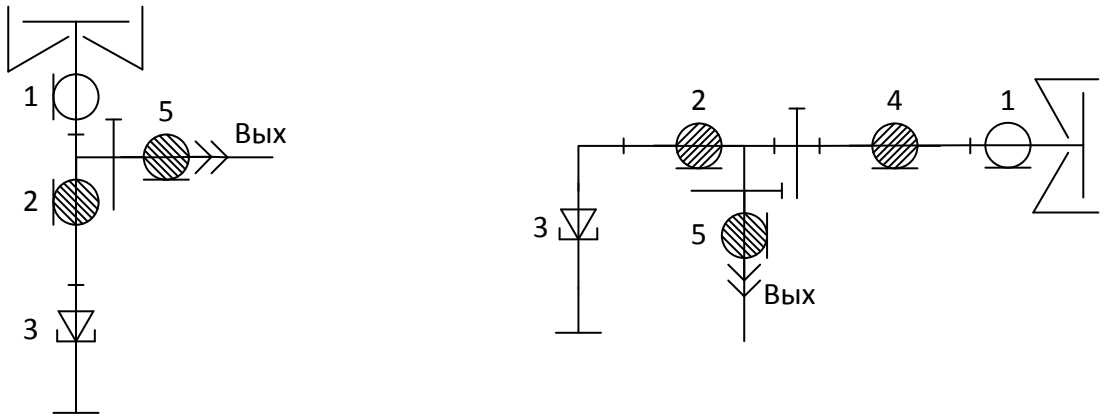
где $\dot{\Gamma}_{\text{отр}} = |\Gamma| \cdot \exp(-j\varphi_{\text{отр}})$ – комплексный коэффициент отражения от рассогласованной (в номинальном режиме) антенны.

Физическое удлинение конструкции ВДТ за счёт дополнительного отрезка обеспечивает тепловую защиту диода; соответствующие технические предложения и количественные рекомендации выработаны в [69]: это многозвенный резонатор, обеспечивающий устойчивость рабочего режима с номинальной частотой.

ВДТ с данной структурой обладает меньшей чувствительностью $\delta\omega/\delta l$, что достаточно подробно изучено в [69, 70]. Этого же эффекта следует ожидать и в нашем случае. Кроме того ВДТ и, в особенности, его чувствительный элемент – антенна, ввиду непосредственной близости к камере сгорания, подвержены флуктуационному нагреву, который предположительно коррелирован с вибрациями. Очень серьёзным обстоятельством является эрозия антенны, что

присуще всем датчикам, работающим в пламёнах [70, 74]. Рекомендация: детали огневой поверхности (т.е. антенны) должны быть из того же металла, что стенка камеры сгорания [68]. О других мерах защиты от эрозии сказано ниже в разделе 2.7.

Обобщённые принципиальные схемы ВДК и ВДТ показаны на рис. 2.4 (а, б).



а) б)

Рисунок 2.4 – Обобщённые принципиальные схемы:
а) ВДК, б) ВДТ

Два варианта структуры ВД включают невыступающую (в «камеру») антенну *1*, автогенератор, состоящий из резонатора *2* и генераторного диода *3*. Питание диода и выход сигнала осуществлены через один разъём *5*.

В первом варианте резонатор коаксиальный и четвертьволновый, т.е. встроенная антенна выполнена (точнее, прорезана) в короткозамкнутом конце. Такое техническое решение копирует общеизвестные [41-44] и обеспечивает равноамплитудное возбуждение щели.

Во втором варианте антенна – выносная, и подключена к резонатору с помощью отрезка *4*, который в ряде случаев секционирован, и образует вместе с отрезком *1* уже упомянутый многозвенный резонатор [69]. Питание генераторного диода и выход измерительного сигнала осуществлены (как и в прототипах) через один разъём *5*.

Схема ВДТ, подверженного воздействию высокой температуры отличается введением дополнительного отрезка коаксиала. Его длина, с одной стороны, обеспечивает комфортную температуру диода и, с другой стороны (т.е. в электрическом плане, другими словами, в функциональном отношении) – фазу отраженной волны, соответствующую линейному участку фазочастотной характеристики автодинного отклика. Другой особенностью, отличающей ВДТ от классического автодинного приёмо-передатчика, является высокочастотный выход. Это сделано из соображений обеспечения помехозащищённости (и соответствующего свойства высокочастотного ЧМ сигнала) при весьма удалённом расположении ГТД от приборного отсека.

Общий недостаток обоих схемных и конструктивного решений – при попадании на поверхность антенны ВДК электропроводной пыли или металлических крошек (при повреждении лопаток), а для ВДТ – частиц сажи, возникает угроза короткого замыкания источника питания. Выход из положения – диэлектрическое покрытие в виде тонкой плёнки. Материалы и опыт известны в технике ЖРД [67, 68].

В рамках данного параграфа целесообразно рассмотреть еще один вариант схемы и конструкции датчика, необходимость и особенности которого подробно обоснованы ниже (гл. 3). Сейчас это обоснование сделано очень кратко.

В диагностике ТЭУ, особенно, в функциональной, многие датчики и подсистемы испытывают комплекс помеховых воздействий. Для вибродатчиков – это прежде всего нагрев, статический и флуктуационный, а также эрозия. А для радиоволновых средств это ещё и электродинамические факторы: изменение диэлектрической проницаемости пламён, как следствие ионизации, и их собственное радиоизлучение. Как средство ослабления побочных эффектов, но уже на системном уровне, и увеличения таким путём контролеспособности, применяют межканальную обработку совокупности диагностических сигналов, например, предложенную в ходе настоящего исследования [72]. Датчики в подобных диагностических подсистемах имеют свои особенности в части выбора зондирующих частот.

Принцип построения, схема и конструкция одного из таких датчиков описаны ниже.

При создании ВД использован накопленный опыт исследования датчиков электронной концентрации и температуры пламени, а также радиоволновых вибродатчиков [21, 37, 39]. Установлено, что каждый из этих датчиков в той или иной мере откликается на все три фактора (а также на собственное радиоизлучение), но по-разному. Важным обстоятельством, вносящим это различие, является рабочая (зондирующая) частота. Отсюда идея построения датчика с переменной рабочей частотой, позволяющего получить преимущественный диагностический отклик на один из названных факторов [72, 104].

Эквивалентная схема такого вибродатчика в двухчастотном варианте представлена на рис. 2.5. Здесь резонатор секционирован, а совокупность pin-диодов позволяет дискретно изменять его длину и, соответственно, зондирующую частоту.

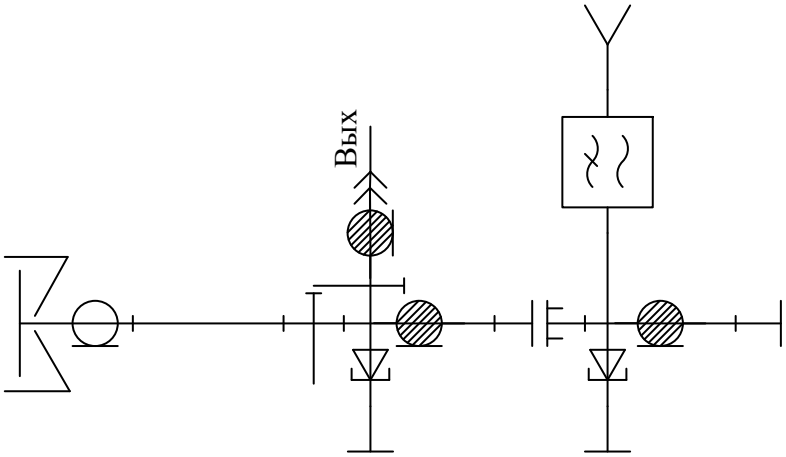


Рисунок 2.5 – Обобщённая принципиальная схема вибродатчика

2.3 Кольцевая-щелевая антенна – первичный преобразователь вибродатчика

Щелевые антенны (ЩА) применяются в летательных аппаратах, в частности космических, около полувека, и с момента их появления предназначались для тяжёлых условий эксплуатации, при соблюдении целого ряда конструктив-

ных ограничений: перепады температуры, и давления, другие климатические явления, вибрации, скоростной напор, ограничения по габаритам, и др. Впоследствии, наличие удачных технических решений и накопленный коллективами опыт [44] стимулировал интерес к ЩА со стороны исследователей, и разработчиков систем функциональной диагностики процессов, сначала в камере сгорания ЖРД [32], а затем и в проточных трактах ГТД летательных аппаратов [69, 70].

Разработчики антенн (не только щелевых) разделяют их технические характеристики на две группы. Первая характеризует структуру электромагнитного поля (ЭМП), вторая – свойства антенны, как нагрузки для источника возбуждения. Соответственно, главное внимание и главные достижения относятся:

– в первой группе – к направленности излучения, т.е. в пространственном отношении – к дальней зоне;
– во второй – к согласованию в заданной полосе рабочих частот (обычно в широкой, так как в узкой это сделать нетрудно).

Для разработчиков датчиков теплоэнергетических параметров при пристальном интересе к конструкциям ЩА оба названных свойства второстепенны. Здесь существенна электрофизическая ситуация в пристенной области, т.е., вблизи антенны (точнее в ближней зоне и её окрестности, хотя подлежащий регистрации тепловой поток исходит из дальней зоны). Но для радиолокации и связи эта зона всегда была малоинтересной. По этой причине приемлемые для практики аналитические исследования её свойств развития не получили.

Но именно в этой зоне у нас и наших предшественников [32, 69, 70] осуществляется интенсивное взаимодействие ЭМП с диагностируемым объектом, и, соответственно, извлечение диагностической информации, точнее – его первый этап.

Прежде чем перейти к анализу процессов на первом этапе измерительного преобразования уточним предмет исследования и терминологию.

В литературе [42, 43], причём, иногда в одном и том же источнике, термину «кольцевая (дуговая) щелевая антенна» («КЩА» и «КДА») придаётся различный смысл.

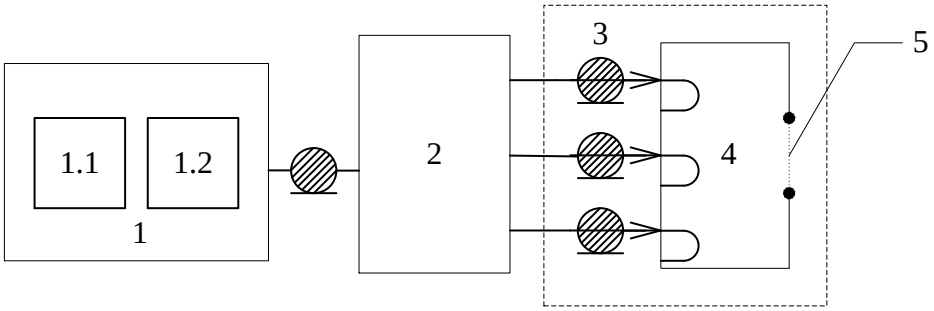


Рисунок 2.6 – Радиопередатчик БРЛ с КЩА (КДА)

1. Генератор; 2. Формирователи возбуждающих напряжений; 3. Фидеры; 4. Согласующий резонатор; 5. Кольцевая (дуговая) щель

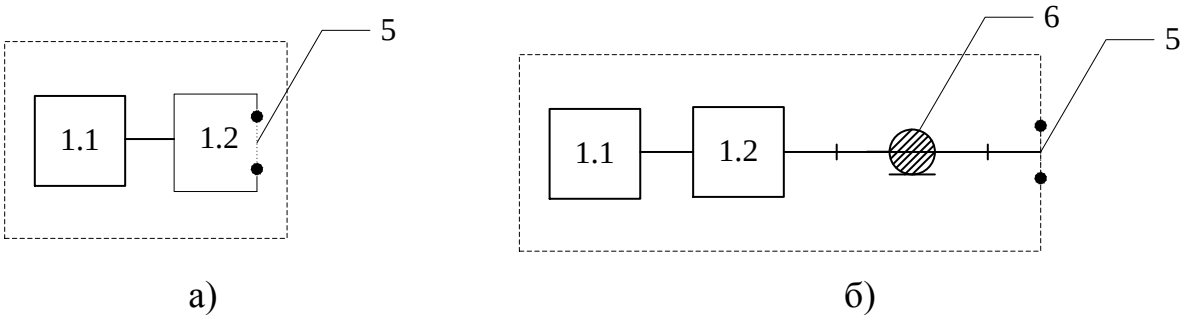


Рисунок 2.7 – Приёмо-передатчики: а) ВДК, б) ВДТ

5. Кольцевая (дуговая) щель; 6. Линия передачи (фидер)

Для уточнения понятий обратимся сначала к известной (и обобщённой) схеме радиопередатчика БРЛ (гл. 1), использующего КЩА (КДА) (рис. 2.6). Здесь выделен генератор *1*, состоящий из активного элемента (вакуумного или полупроводникового) *1.1* и резонатора *1.2*, формирователи возбуждающих напряжений *2* (этих напряжений при многоточечном возбуждении резонатора может быть несколько [43]), линии передачи (фидеры) *3*, обеспечивающие подачу возбуждающих напряжений в определенные точки согласующего резонатора *4*. В одной из торцевых стенок резонатора, называемой также мембраной, прорезана кольцевая (дуговая) щель *5*. Исходя из принципов электродинамики,

оба торца, по отношению к напряжениям, короткозамкнуты, а сам резонатор – полуволновой. Узлы *3, 4, 5* конструктивно объединены, а термин «КЩА» («КДА») применяется либо к этому объединению, либо только к мембране, либо только к щели. Возникает путаница.

Описанный радиопередатчик может быть использован только в РЛС с гомодинной структурой (гл.1 рис.1.3).

В рассматриваемых нами датчиках – ВДК и ВДТ (как и в прототипах), а с точки зрения радиотехники они – есть передатчики (и даже – приёмопередатчики), все перечисленные выше узлы объединены как в схемном, так и в конструктивном отношениях, а функции двух резонаторов совмещены в одном (рис. 2.7 (а, б)). Такое совмещение обусловлено близостью объекта и его непосредственным влиянием на электродинамические (структура ЭМП), и электрические (токи, проводимости) характеристики антенны. Добавочный отрезок обеспечивает не только теплозащиту диода, как в [71], но и должную фазу автодинного отклика.

В последующем тексте термин «антенна» приложим только к мембране со щелью.

С точки зрения энергетики, схемы радиопередатчиков (рис. 2.6 и 2.7) различаются существенно. В первом случае генерируемая мощность, как и во всех РЛС, определяется дальностью до цели, коэффициентом обратного рассеяния, и другими известными факторами. Она должна полностью излучаться антенной.

Во втором и третьем случаях мощность передатчика должна обеспечить только работу детектора, т.е. может быть на несколько порядков меньше, чем в первом. Причина: качество измерительного преобразования – автогенераторного и автодинного – от мощности не зависит.

2.4 Содержание диагностической операции

Идея диагностической операции базируется на деформации возбуждаемого в «диагностической камере» ЭМП под влиянием дефектов и/или вибродеформаций лопаток. Обе группы аномалий неизбежно сказываются на свойствах

антенны, что может быть выявлено, например, по коэффициенту отражения от неё или – для встроенной антенны – по изменению комплексной проводимости. Дальнейшие этапы измерительного преобразования (формулы 2.1, 2.2) успешно осуществлены предшественниками [69, 70]. Впрочем, ими же, но только качественно, зафиксирован и отклик на внесение в ЭМП твёрдых тел.

Таким образом, задача данного раздела сводится к установлению аналитическим путём факта, формы и грубых численных оценок электродинамического отклика, позволяющих судить о пороговой чувствительности диагностического способа. Здесь различия с наблюдениями предшественников обусловлено электродинамическими свойствами «диагностической камеры». Предсказать их даже качественно трудно, хотя технические аналоги есть и тут: промышленные и бытовые СВЧ нагреватели.

В рамках данного параграфа 2.4 рассмотрение происходит в *квазистатическом приближении*, что вполне оправдано безинерционностью антенны и «диагностической камеры». Вместе с тем, реальная диагностическая операция принципиально осуществима благодаря динамике рабочего процесса, а именно, многократному (с частотой $F_{\text{В}}$, т.е. сотни раз в секунду) прохождению дефектной (или вибрирующей) лопатки через ЭМП вибродатчика. Соответствующее этой многократности накопление диагностической информации способствует выявлению дефекта даже на фоне многочисленных и мощных помех, создаваемых рабочим процессом.

Наиболее полным отображением диагностической информации является огибающая спектральной плотности отклика (см. гл. 3) описанного процесса.

2.4.1 FEKO как средство численного моделирования. Описание и применяемые методы

В настоящее время многие разработчики антенн используют специализированные, так называемые, EDA-программы для, так называемых, EM-расчётов. В основе работы подобных программных продуктов лежит численное решение уравнений Максвелла в интегральной или дифференциальной форме.

Основополагающий метод решения, несомненно, влияет на эффективность и точность, с которыми могут быть смоделированы те или иные высокочастотные компоненты.

FEKO («FEldberechnung bei Körpern mit beliebiger Oberfläche», с немецкого: «расчет поля в телах произвольной поверхности») – это широкофункциональная программная среда для численного электромагнитного моделирования, основанная на современных вычислительных технологиях (CEM) и позволяющая решать широкий круг задач [45-47].

Возможность использования нескольких технологий электромагнитного моделирования, реализованных в FEKO, делает этот программный продукт применимым для решения разнообразных задач во многих отраслях промышленности.

В плане решения задачи № 2 настоящей диссертационной работы нас привлекают такие возможности FEKO, как:

- размещение антенн: расчет диаграмм направленности, опасных зон и др. параметров и характеристик для антенн, расположенных на объектах сложной формы, например, на кораблях, самолётах, бронемашинах;
- задачи рассеяния излучения большими и малыми структурами;
- возможность задания различной плотности сетки для точного и эффективного численного моделирования при наличии малых деталей;
- задание плотности сеток на поверхности и гранях;
- средства привязки сеток;
- создание двухмерных и трёхмерных проекций;
- несколько опций визуализации для поверхностей, включая изоповерхности и двумерные фрагменты картины полей;

Ядром программы является алгоритм решения трёхмерных задач электродинамики в частотной области. Применение преобразования Фурье позволяет перейти от частотной области к временной, т.е. решить задачу анализа переходных процессов.

Программный продукт FEKO позволяет использовать широкий спектр численных методов и вариантов их комбинации (гибридизации), каждый из которых предназначен для своей области применения.

Известным недостатком FEKO, как и других численных методов, является жёсткая привязка к конкретному (или к их ограниченному) техническому решению. В данном случае – это двигатель Д-36 и автогенераторный датчик, испытанный в ограниченном числе вариантов. В обоих случаях, критерием выбора служила доступность для исследователя обоих объектов.

2.4.1.1 Метод моментов

До появления высокоскоростных ЭВМ, необходимо было предпринимать значительное усилие, чтобы перевести аналитические решения в форму, которая выполнила бы последовательное вычисление. Теперь часто более удобно использовать методы, которые являются аналитически простыми, но требуют больших объёмов численных вычислений. Кроме того, много практических задач могут быть решены только при помощи таких методов. Из-за фантастической скорости и возможностей памяти современных ЭВМ, почти любая задача линейного анализа может быть решена до требуемой степени точности.

Метод моментов (Method of Moments, или MoM) применяется при решении задач, в которых присутствуют токи в металлических или диэлектрических структурах, и излучение в свободное пространство. Эти структуры должны быть электрически малыми, и обычно являются металлическими, однако специальные расширения метода допускают наличие диэлектриков, в виде покрытий или объёмных элементов конечных размеров.

Метод моментов выполняет решение уравнений Максвелла в интегральной форме в частотной области. Достоинство метода моментов заключается в том, что он является «методом источника», т.е. дискретизируется только интересующая структура, а не свободное пространство, как при решении уравнений для нахождения поля в объёме. При этом граничные условия не требуются, а используемая память пропорциональна геометрии задачи и частоте.

Метод моментов (MoM) предусматривает следующие этапы решения электродинамической задачи. Металлические элементы анализируемой структуры заменяются эквивалентными электрическими поверхностными токами. Затем решается задача возбуждения окружающей среды данными токами. При этом, среда может быть сложной, т.е. может содержать магнито-диэлектрические слои.

Решение задачи возбуждения среды осуществляется с помощью аппарата тензорных функций Грина. После того, как задача возбуждения решена, и электрическое поле найдено, на него накладываются граничные условия на металлических элементах. Последнее условие используется для определения эквивалентных токов. Важным моментом решения является разбиение поверхности металла на элементарные площадки и аппроксимация электрического тока в пределах площадки. Пример разбиения показан на рис. 2.8.

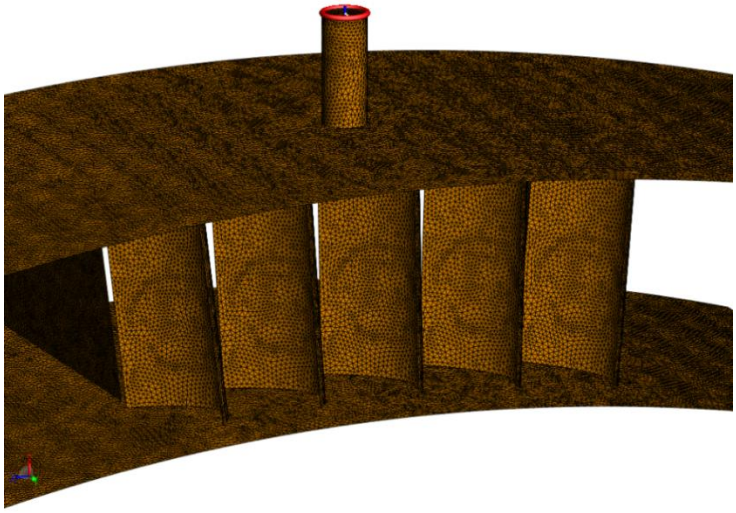


Рисунок 2.8 – Разбиение поверхности металла на элементарные площадки и аппроксимация электрического тока в пределах площадки

В программе FEKO для аппроксимации тока используются постоянные, линейные и треугольные функции, которые принято называть базисными функциями. Граничные условия на поверхности металла в MOM выполняются приближенно, а именно, в нескольких точках в пределах каждой элементарной площадки (строго эти условия должны выполняться во всех точках). В резуль-

тате выполнения граничных условий в дискретных точках получается система *линейных*[1] алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно коэффициентов при базисных функциях, которые имеют смысл амплитуд токов, текущих в пределах элементарной площадки. Данная СЛАУ решается на ЭВМ с помощью известного метода исключения Гаусса.

В программе FEKO элементарная площадка имеет треугольную форму, что позволяет хорошо описывать, в том числе, и искривленные поверхности.

Точность MoM тем выше, чем меньше размер элементарной площадки. Считается, что для получения приемлемой точности, размер площадки не должен превышать $\lambda/10$, где λ – длина волны в свободном пространстве. Количество уравнений в СЛАУ равно числу элементарных площадок N, которое неизбежно увеличивается, при увеличении размеров анализируемого объекта, или при увеличении частоты. Поэтому легко увидеть, что непосредственное решение задачи типа рассеяния радиоволн на фрагменте самолёта с помощью MoM, потребует решения СЛАУ огромной размерности. На практике, оно просто невозможно, из-за ограниченной оперативной памяти ЭВМ.

2.4.1.2 Многоуровневый быстрый метод многополюсников

Многоуровневый быстрый метод многополюсников (Multi-level Fast Multipole Method, или MLFMM) является альтернативной реализацией метода моментов, и применяется для значительно более больших структур, чем те, для которых возможно применение метода моментов. Метод MLFMM позволяет проводить полный электромагнитный анализ электрически больших объектов на основе моделирования токов. Данный метод можно применять для большинства объектов, для которых раньше использовался метод моментов, без изменения шага сетки.

---

[1] Слово «линейных» выделено курсивом, поскольку в нём содержится подтверждение высказанного в гл. 3 предположения об идентичности огибающих рабочего и диагностического спектров.

Метод моментов и метод MLFMM сходны тем, что базисные функции описывают взаимодействие между треугольными ячейками сетки. Отличие между ними заключается в том, что MLFMM группирует базисные функции и рассчитывает взаимодействие между группами базисных функций, а не между отдельными функциями. Программа FEKO применяет иерархический алгоритм, в котором на верхнем уровне все моделируемое пространство помещается в «короб», который при делении по трем осям представляется не более чем восемью дочерними «коробами». Этот процесс итеративно продолжается до нижнего уровня, когда сторона каждого из «коробов» не станет примерно равна четверти длины волны. На каждом уровне сохраняются только заполненные «короба», в результате чего формируется эффективная древообразная структура. Таким образом, используя аппарат метода моментов, метод MLFMM дополнительно выполняет операции объединения, трансляции и разделения на различных уровнях.

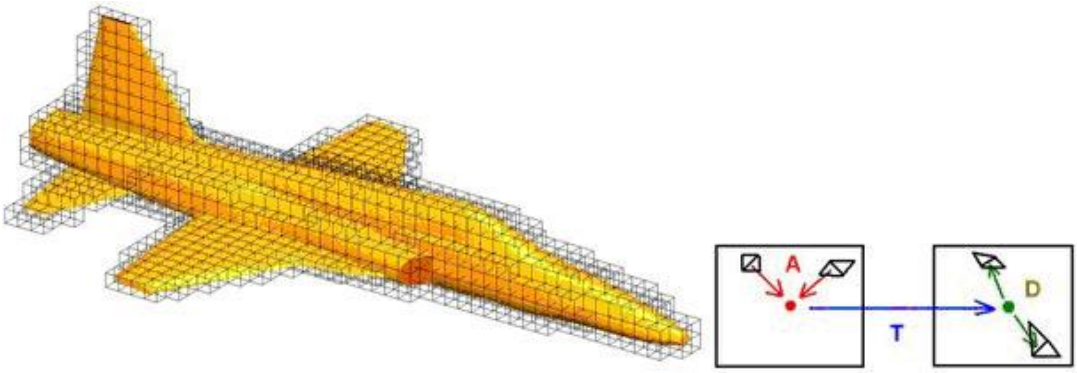


Рисунок 2.9 – Декомпозиция на 3 уровне методом MLFMM. Операции объединения, трансляции и разделения

Метод моментов рассматривает каждую базисную функцию изолированно, что приводит к необходимости иметь память размером *N2* для хранения импедансной матрицы. Затраты процессорного времени для решения системы линейных уравнений пропорциональны *N3*. Следовательно, увеличение размера моделируемой области вызывает быстрый рост затрат памяти и процессорного времени. Алгоритмы, используемые в методе MLFMM, позволяют снизить тре-

бования к памяти до $N \cdot log(N)$, и к процессорному времени до $N \cdot log(N) \cdot log(N)$. В реальных задачах это означает повышение эффективности в десятки раз.

Недостатком стандартного алгоритма MLFMM является то, что он не очень подходит для моделирования структур, содержащих сложные диэлектрические элементы. Программа FEKO преодолевает это ограничение путём объединения метода MLFMM и метода конечных элементов (FEM), который хорошо моделирует сложные диэлектрические объекты. Также, он может быть использован для моделирования сложных диэлектрических объектов вблизи толстых слоёв, в то время как метод MLFMM применяется для моделирования самих толстых слоёв. Однако, данный недостаток не столь существенен при решении наших задач.

2.4.2 Моделирование, расчёт и анализ электромагнитного отклика вибродатчика в проточной части ГТД

Особенность стоящей задачи обусловлена конфигурацией конструкции, формирующей модель. Она включает детали, форма и размеры которых нетрадиционны для техники СВЧ, и не предназначены для формирования какого бы то ни было электромагнитного поля (ЭМП). Вместе с тем, экспериментально установлено, что указанные детали существенно влияют на электрические параметры антенны по отношению к источнику возбуждения, что логично объяснить деформацией возбуждаемого ею ЭМП.

Сама кольцевая-щелевая антенна, как возбудитель, её размеры, место установки, а также зондирующая частота предназначались для других задач. Поэтому их нельзя считать оптимальными. В данном случае их следует считать нулевым вариантом, позволяющим отрабатывать методику и сопоставлять результаты с натурным экспериментом.

Первым этапом электродинамического моделирования являлось создание геометрической модели турбины отечественного авиационного двигателя Д-36,

установленного на таких пассажирских воздушных судах как Як-42, Ту-334, Ан-148 (последние два оборудованы модифицированным вариантом Д-436), а также самого датчика вибраций. Мы выбрали именно турбину высокого давления, хотя вибрационная картина в компрессоре высокого давления была бы схожей, за одним существенным исключением – турбина сама по себе является источником зарождения вибраций, так как в ней происходит процесс интенсивного разгона неламинарных потоков высокотемпературных ионизированных газов. Иными словами – это самый теплонапряжённый и вибронагруженный узел в ГТД.

Ниже приведена упрощённая модель турбины и встроенный в смотровое (бороскопическое) окно (диаметр отверстия 10 мм, внутренний диаметр волновода 8 мм) датчик вибраций (рис. 2.10), излучающий в проточный тракт ротора ТВД, а именно между лопатками соплового аппарата статора ТНД. Стоит заметить, что в нашей модели под термином «датчик» подразумевается волноводная структура с излучающим концом – с одной стороны, и с концом в которую поступает энергия в систему – с другой стороны. Поступление энергии в систему осуществляется через волноводный порт. Здесь не рассматривается конкретная колебательная система, такая как, например, резонатор с автогенератором. Они условно заменены понятием – порт. Порт условно представлен в форме обода в закороченном торце волновода с указателем направления распространения волны в пространстве (reference direction). В плоскости обода, внутри проводящей конструкции, начинает распространяться электромагнитная волна, структура которой зависит от типа волновода. Мощность возбуждения подбирается автоматически программой FEKO, исходя из предполагаемой пороговой чувствительности штатных измерительных приборов (в нашем случае, для коаксиального волновода с кольцевой-щелевой антенной мощность составляет порядка 6,95 мВт при амплитуде волны 1 В/м; для круглого волновода с открытым концом в качестве антенны – 2,67 мВт при амплитуде волны 1 В/м).

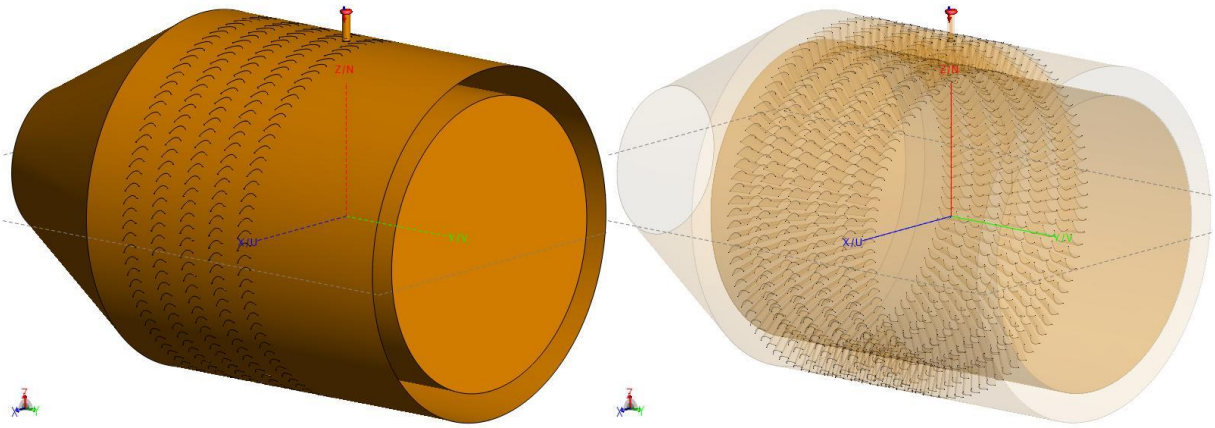


Рисунок 2.10 – Упрощённая модель турбины и встроенный в смотровое окно (в зоне статора ступени ТНД) датчик вибраций

Для оптимизации ресурсов времени, затрачиваемого ЭВМ на расчёт ЭМП от всех проводящих поверхностей, рассмотрим геометрию только рабочего колеса ротора ТВД и статора ТНД в разрезе видимой бороскопом области проточного тракта (рис. 2.11). Так как мы рассматриваем случай применения вибродатчика на вышеупомянутом двигателе Д-36, то датчик будет расположен между двумя сопловыми аппаратами второй ступени турбины, то есть в зоне ТНД. В поле зрения бороскопа попадает 5 рабочих лопаток (рис. 2.12). «Диагностическое окно» составляет порядка 15 градусов по азимуту.

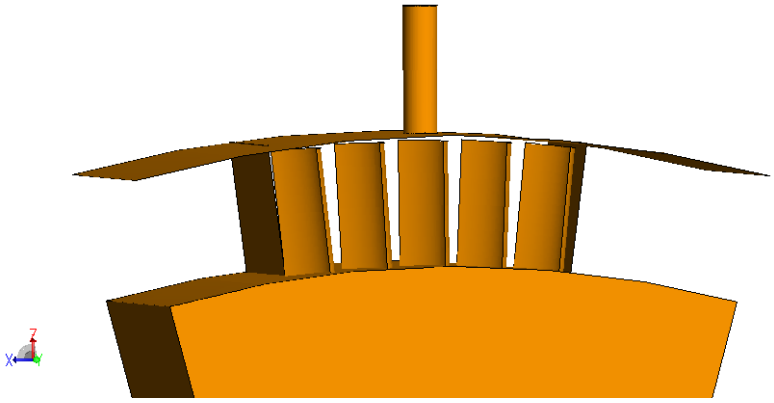


Рисунок 2.11 – Геометрия ротора ТВД и статора ТНД в зоне контроля ВД

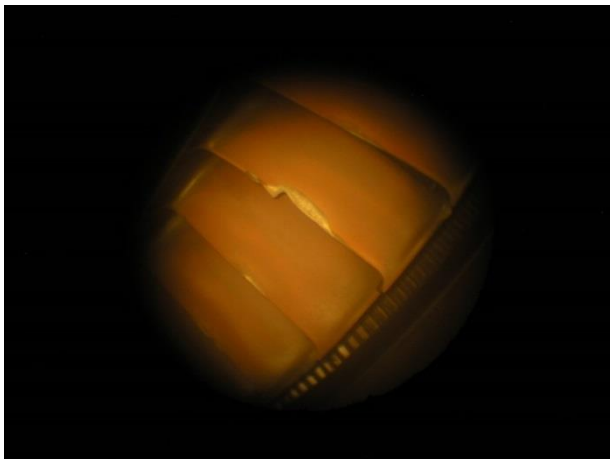


Рисунок 2.12 – «Диагностическое окно» в выходной части ТВД. Двигатель Д-36

В кругу наших исследований рассматриваются две конструкции вибродатчика:

1. Коаксиально-волноводная с кольцевой-щелевой антенной (рис. 2.13). Возбуждение осуществлено через коаксиальный порт. Здесь начинает распространяться падающая, в данном случае, ТЕМ-волна (мы не рассматриваем волны, такие как ТЕ11 и ТЕ21, хотя они тоже могут существовать в данном волноводе, причём на частотах ниже 28 ГГц волна типа ТЕМ перестаёт распространяться при размере внутреннего диаметра наружного коаксиала волновода равном 8 мм). Здесь обеспечивается равноамплитудное (по окружности) возбуждение антенны [44].

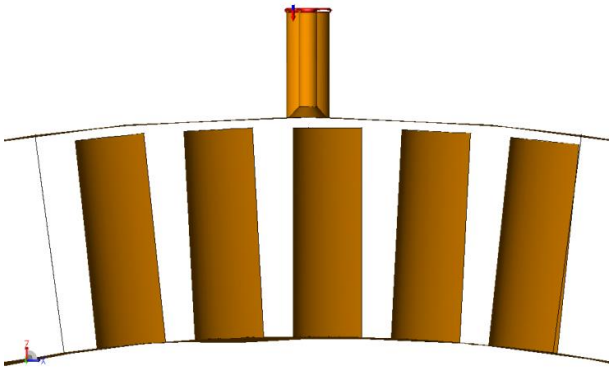


Рисунок 2.13 – Расположение коаксиально-волноводного вибродатчика с кольцевой-щелевой антенной и контролируемых лопаток в диагностическом окне

2. Кругло-волноводная с открытым концом (рис. 2.14). Возбуждение – через круглый порт. В данном случае распространяется TE11-волна (мы не рассматриваем высшие моды волны, такие как TE21 и волны типа TM01, хотя они также могут существовать в данном волноводе).

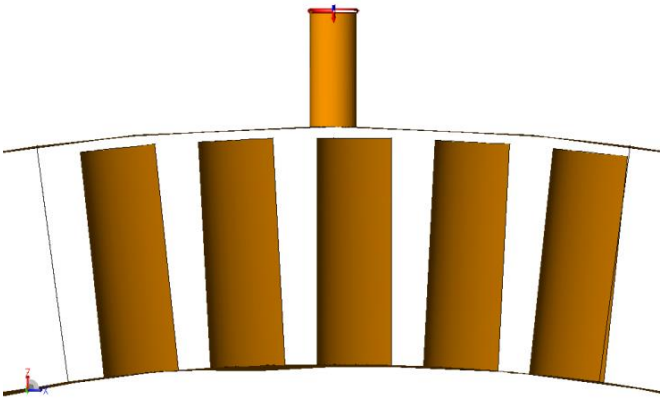


Рисунок 2.14 – Расположение кругло-волноводного вибродатчика с открытым концом и контролируемых лопаток в диагностическом окне

Вторым этапом электродинамического моделирования являлся подбор оптимальной зондирующей частоты, ширины щели и соотношения проводников – для коаксиального варианта, длины волновода – для коаксиального и круглого варианта вибродатчика. Анализу подлежал электромагнитный отклик. При моделировании, первоначально предполагалось варьировать зондирующие частоты в пределах от единиц до нескольких десятков гигагерц (4...40 ГГц). Однако наиболее эффективные результаты были получены на частотах 30…37,5 ГГц (Приложение А, таблица А1, рис. А1). Варьировалась также рабочая точка – за счет длины волновода L*в*. Здесь критерием оптимизации был выбран комплексный параметр S11 (в принятых в FEKO обозначениях) и его зависимость от состояния лопаток. Он представляет собой комплексный коэффициент отражения, и далее обозначен как $\dot{\Gamma} = |\Gamma| \cdot \cos\eta$.

Дальнейшее содержание раздела 2.4 составляют исследования и сопоставительная оценка откликов чувствительных элементов двух датчиков: кольце-

вой-щелевой антенны и открытого конца круглого волновода (в качестве антенны).

2.4.3 Элементарный диагностический отклик

Формирование диагностического отклика включает элементарную операцию – движение одной лопатки по дуге радиусом *R* (рис. 2.15) с пересечением ЭМП антенны в пределах угла β. В рабочем процессе ему соответствует фазовый угол $\beta_ф = 2\pi \cdot F_в \cdot T_ф$, где $T_ф$ – длительность элементарного импульсного отклика, гипотетическая форма которого (Приложение А, рис. 3А) однозначно определяются формой лопатки и тем как лопатка (то есть эта её форма) влияет на трехмерную структуру ЭМП, ранее обозначенную функционалом *l(x,y,z,t)* (формулы 2.1, 2.2). Из чисто геометрических соображений, которые проиллюстрированы на рис. 2.15, можно заключить, что одиночная лопатка находится в зоне радиовидимости в пределах угла $2\beta > 100°$. В действительности в большей части этого угла она экранирована соседними лопатками и лопатками соплового аппарата статора.

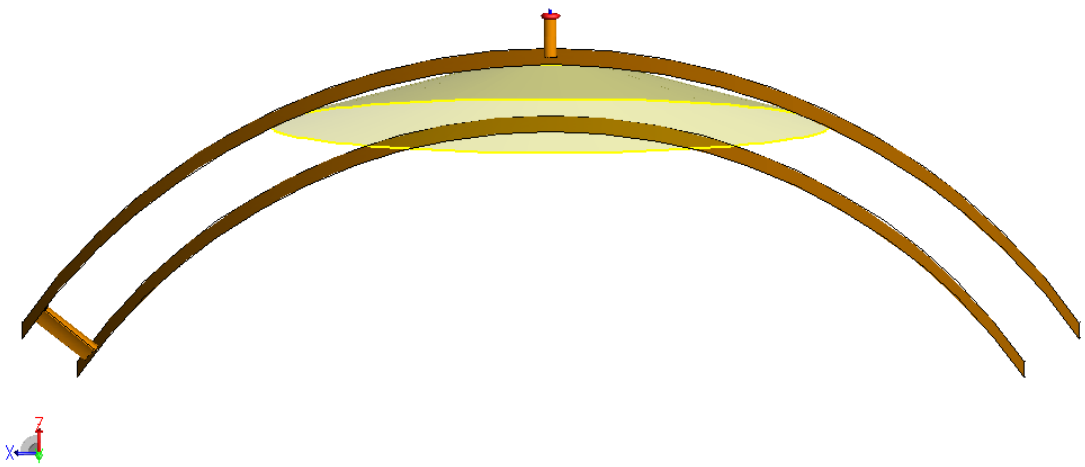


Рисунок 2.15 – Движение лопатки по дуге радиусом *R*

При применении вычислительных методов, исследование и обеспечение уже на начальном этапе заметного диагностического отклика, необходимо удачное (хотя это ненаучный термин) сочетание рабочих – механических и

термодинамических – параметров турбины с электродинамическими (радиоволновыми) параметрами зондирующего сигнала. Сделать это надо при вполне понятных конструктивных ограничениях на размеры датчика.

Поэтому проводимые ниже результаты получились не сразу. Одним из препятствий оказался неудачный выбор диапазона зондирующих частот. Он формально соответствовал экспериментальным результатам [69] и заявочным материалам (одному из существенных отличительных признаков) патента.

В ходе данной работы более удачным оказалось значительное повышение зондирующей частоты до 30…37,5 ГГц.

Сложность и разнообразие форм откликов объясняется типами датчиков, зондирующей частотой и различием в размерах и форме лопаток.

Величина амплитудного (рис 2.17 (а), 2.18 (а)) и, что гораздо более интересно, фазового (рис. 2.17 (б), 2.18 (б)) отклика (для автодинной схемы ВД, рис. 2.3 (а)) хотя и невелики, но в сопоставлении с аналогами [32, 69] дают достаточно обнадеживающий результат. Относительное изменение комплексной проводимости схемы со встроенной антенной (рис. 2.4 (а)) тем более подтверждает принципиальную возможность регистрации самого факта влияния лопатки.

Однако реальная диагностическая ценность отклика может быть выявлена только в сопоставлении с помеховыми факторами.

В следующем этапе смоделировано перемещение одиночной лопатки при вращении турбины с углом поворота сначала в пределах диагностического окна (± 6°), далее вблизи диагностического окна (± 16°), а затем и в пределах радиовидимости (± 52°). В качестве аргумента принят угол поворота ротора, поскольку этот параметр в равной степени удобен для преобразования и в пространственную, и во временную координату. Последняя далее использована при отыскании спектра динамического отклика. Здесь диагностическое окно представлено условно, лишь для удобства сопоставления. На самом деле лопатки соплового аппарата здесь отсутствуют. Это сделано намеренно, в целях изучения предельной чувствительности, чтобы не возникало дополнительного «за-

тенения» лопатки. Таким путём установлены формы парциальных откликов по амплитуде и фазе коэффициента отражения. Результаты представлены в Приложении А в таблицах: 1А, 2А, 3А, в рисунках: 1А, 2А, 3А.

Формы импульсных откликов для исправной лопатки (синяя трасса) и для аномальной ситуации – виброскручивания (светло-коричневая трасса) – достаточно показательны (Приложение А, рис. 1А). Асимметрия импульсов относительно середины диагностического окна отображает номинальную угловую ориентацию лопатки.

На предварительном этапе также установлено влияние зондирующей частоты, рабочей точки по фазе, ширины щели, длины и диаметра волновода на величину и форму откликов. Всё – для коаксиальной конструкции.

Зондирующая частота первоначально варьировалась в пределах от единиц до полусотни ГГц. Был установлен рост чувствительностей $d\Gamma/dl$ и $d\eta/dl$ с частотой с оптимумом близким к весьма распространённому номиналу 37,5 ГГц (λ=8 мм). Большинство результатов получено в диапазоне 28…48 ГГц.

2.4.4 Групповой диагностический отклик

В реальном рабочем режиме ГТД диагностический отклик формируется непрерывной последовательностью амплитудных и фазовых импульсов, форма каждого из которых отнюдь не идентична элементарному. В данном подразделе речь идет о ситуации, в которой диагностическое окно (формируемое лопатками соплового аппарата) «затенено» группой лопаток. В рассматриваемом нами случае с двигателем Д-36 количество таких лопаток 5 (рис. 2.11).

Рассмотрению подлежит эталонный отклик. Поэтому все лопатки идентичны по форме, не имеют поломок, и не деформированы вибрацией. Общее число лопаток в данном примере 118, следовательно, угловой размер диагностического окна составляет $5 \times \frac{2\pi}{118} \approx 0{,}266\ \text{рад} \approx 15^\circ$, а на долю одной лопатки приходится около 3°. Эта величина определяет эффективные значения угловой и временной длительности импульсного отклика. Под эффективностью в

данном случае понимается возможность визуальной оценки самого факта отклика.

Поскольку данная ситуация отображает диагностический процесс в квазистатическом приближении, то ниже наряду с формой отклика представлены структура ЭМП и распределение поверхностных токов (рис. 2.19, 2.20).

Авторы прототипов [32, 69] уделили значительное внимание зависимости величины отклика антенны от диаметра и ширины кольцевой щели, а также среднему значению коэффициента отражения (в зависимости от первых двух величин). Для нас также представляют интерес еще влияние зондирующей частоты и выбор (для автодинной схемы) рабочей точки по фазе.

Сопоставление результатов, отображённых на приведенных здесь, а также на вынесенных в приложение А рисунках, позволило выявить следующие тенденции:

– рост амплитудного и фазового отклика, то есть и чувствительности датчика, но не пороговой, а df/dl, с ростом ширины щели;
– то же (в меньшей степени) с ростом диаметра щели, но здесь он ограничен существующими стандартами (табл. № 4.1);
– рост по мере уменьшения коэффициента отражения от собственно антенны (в отсутствие лопаток в диагностическом окне);
– рост с ростом зондирующей частоты;
– неоднозначная зависимость от среднего значения (рабочей точки) фазы отражения.

Первая тенденция замечена и получила объяснение в [70]: уменьшение ёмкости щели ведёт к росту характеристического сопротивления резонатора и его зависимости от этой ёмкости.

Третья тенденция особенно интересна в том смысле, что все предшественники [32, 69, 70] работали с рассогласованной антенной, т.е. с обязательным наличием отражения от антенны, поскольку ни радиопрозрачная плазма,

ни тепловой поток радиоволн не отражают. Но на комплексное её сопротивление, при соблюдении ряда условий, влияют.

В нашем случае диагностируемый объект явно способен к отражению, притом распределённому. Свой вклад в него вносят и антенна, и стенки «диагностической камеры», и «диагностическое окно». Ясно, что антенна должна быть согласованной (как в радиолокации). Это важное обстоятельство было выявлено не сразу.

Возможно, влияет и тип антенны и структура поля в ближней зоне, например, осе-асимметричная. Нахождение оптимума могло бы стать предметом отдельного исследования.

Поэтому в результате обсуждений и консультаций предложено новое техническое решение: антенна в виде открытого конца круглого волновода, возбуждаемая через фидер автогенератором с цилиндрическим резонатором [105]. Полное схемное и конструктивное решение такого датчика описано в конце Главы 4 (§ 4.3).

Одновременно принято решение об увеличении зондирующей частоты, создающего два эффекта: упомянутый рост чувствительности и возможность докритического режима круглого волновода при заданных диаметрах бороскопических отверстий.

Названные обстоятельства, как мы уже упомянули выше, побудили к поиску лучшего типа антенны (табл. 2.1), и структуры элементов конструкции датчика на основе отрезков круглых волноводов (см. п. 2.5). Сравнение табличных данных (приложение А, табл. 5А и 6А) и рисунков (приложение А, рис. 4А, 5А) явно демонстрирует преимущества круглой конструкции. Здесь виден выигрыш в величине отклика, а, следовательно, и в чувствительности датчика более чем на порядок. Хотя в коаксиальном варианте, номинальный коэффициент отражения в 5 раз больше, но его реакция на поломку лопатки в относительных единицах $\Delta Г/Г$ почти в 10 раз меньше (а по фазе – в десятки раз).

Другим важным эксплуатационным достоинством такой антенны является отсутствие металлических деталей (одна керамика) на её огневой поверхности.

Повторим, что на обсуждаемых рисунках обращает внимание асимметрия импульсов относительно середины диагностического окна, отражающая конструктивную угловую ориентацию лопатки.

В ходе основного этапа исследования установлены отклики на перемещение в диагностическом окне непрерывного ряда лопаток, что в квазистатическом приближении обеспечивает моделирование рабочего процесса – вращение турбины. Здесь, сопловой аппарат присутствует, появляется дополнительная помеха точнее, дополнительные отражающие поверхности, снижающие относительный вклад лопаток в диагностический отклик. Рабочая точка по фазе (то есть длина волновода) выбрана по результатам предварительного этапа и остается постоянной ($L_в = 2{,}5 \cdot \lambda_в$). Изменён шаг отчетов угла поворота ротора ТВД, он составляет четверть градуса (для варианта с круглым волноводом и открытым концом в качестве антенны).

Таблица 2.1 – Анализ отклика кольцевой щелевой антенны и открытого конца круглого волновода в качестве антенны на перемещение группы лопаток при изменении частоты и длины волновода

Частота (Гц) *f*	Волновое сопр. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Ширина щели (м) s	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Коэффициент отражения (S11)		
					L*в* (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vо*	Амплитуда |Г|	Фаза η	
3E+10	50	2,3	0,001	0,01	3	0,03	0	-	-	0,817	-82,3	Кольцевая-щелевая антенна
3E+10	50	2,3	0,001	0,01	3	0,03	-1,5	-	-	0,826	-82,3	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	3	0,024	0	-	-	0,807	-67,9	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	3	0,024	0	1	-	0,807	-67,8	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2	0,016	0	-	-	0,807	-67,8	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2	0,016	0	1	-	0,808	-67,6	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2	0,016	-1	-	-	0,791	-67,5	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,75	0,022	0	-	-	0,808	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,75	0,022	0	1	-	0,809	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,25	0,018	0	-	-	0,807	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,25	0,018	0	1	-	0,807	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,5	0,02	0	-	-	0,806	-68,9	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,5	0,02	0	1	-	0,808	-68,6	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,5	0,02	-1	-	-	0,79	-68,5	
3E+10	-	-	-	0,01	3	0,03	0	-	-	0,277	127	Открытый конец круглого волновода
3E+10	-	-	-	0,01	3	0,03	0	1	-	0,28	127	
3E+10	-	-	-	0,01	3	0,03	-1,5	-	-	0,272	128	
3E+10	-	-	-	0,01	2	0,02	0	-	-	0,278	-103	
3E+10	-	-	-	0,01	2	0,02	0	1	-	0,281	-103	
3E+10	-	-	-	0,01	2,75	0,027	0	-	-	0,277	-107	
3E+10	-	-	-	0,01	2,75	0,027	0	1	-	0,28	-108	
3E+10	-	-	-	0,01	2,25	0,022	0	-	-	0,277	135	
3E+10	-	-	-	0,01	2,25	0,022	0	1	-	0,279	135	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопр. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Ширина щели (м) s	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Коэффициент отражения (S11)		
					L*в* (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vo*	Амплитуда |Г|	Фаза η	
3E+10	-	-	-	0,01	2,5	0,025	0	-	-	0,276	11,3	
3E+10	-	-	-	0,01	2,5	0,025	0	1	-	0,279	10,9	
3E+10	-	-	-	0,01	2,5	0,025	-1,5	-	-	0,27	12,9	
3,75E+10	-	-	-	0,008	3	0,024	0	-	-	0,18	82	
3,75E+10	-	-	-	0,008	3	0,024	0	1	-	0,176	80,4	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2	0,016	0	-	-	0,179	-55,7	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2	0,016	0	1	-	0,175	-57,4	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,75	0,022	0	-	-	0,179	-132	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,75	0,022	0	1	-	0,175	-134	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,75	0,022	-1	-	-	0,17	-127	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,25	0,018	0	-	-	0,182	159	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,25	0,018	0	1	-	0,177	157	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,5	0,02	0	-	-	0,181	13,2	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,5	0,02	0	1	-	0,176	11,5	
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,5	0,02	-1	-	-	0,172	18,4	

2.4.5 Аномальные диагностические отклики

Газовая турбина и прежде всего первая ступень турбины высокого давления относится к самым нагруженным узлам ГТД. Условия рабочего процесса соплового аппарата и корпуса турбины определяются высокотемпературным нагревом, давлением газового потока и общей вибрацией конструкции ГТД.

На корпус турбины действуют моменты сил, передаваемых от сопловых аппаратов (см. рис. 2.2) и внутреннее давление газов. В наиболее тяжелых условиях находятся рабочие лопатки. Эти условия порождены неравномерностью – статической и динамической – полей температур и давлений. Основными причинами таковых являются неравномерность работы топливных форсунок, отбора воздуха, помпаж ГТД, а также «затенение» газового потока сопловыми лопатками. Вибровоздействия, с частотами от десятков до десятков тысяч герц, совмещены с существенно неравномерным в пространственном и временном отношениях нагревом тела лопатки. Откликами на эти воздействия являются изгибные и крутильные вибрации лопаток [1].

Автор [1] также отмечает, что наиболее характерными являются три типа неисправностей: вытяжка лопаток (кроме бандажных лопаток РКТ), как следствие – уменьшение зазора между кромкой лопатки и стенкой, даже до отрицательных значений; со своей стороны отметим, что штатный зазор после приработки составляет порядка 0,2 мм, эрозия (обгорание) и обрыв (разрушение). Последнее явление характерно внезапностью и пагубными последствиями. Бороскопическая фотография на рис. 2.16 иллюстрирует сказанное.

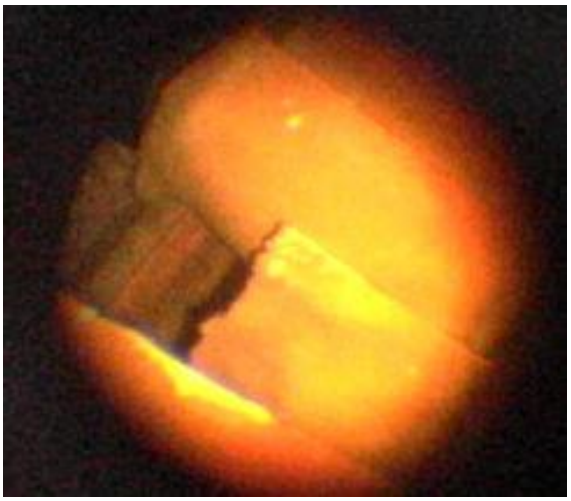
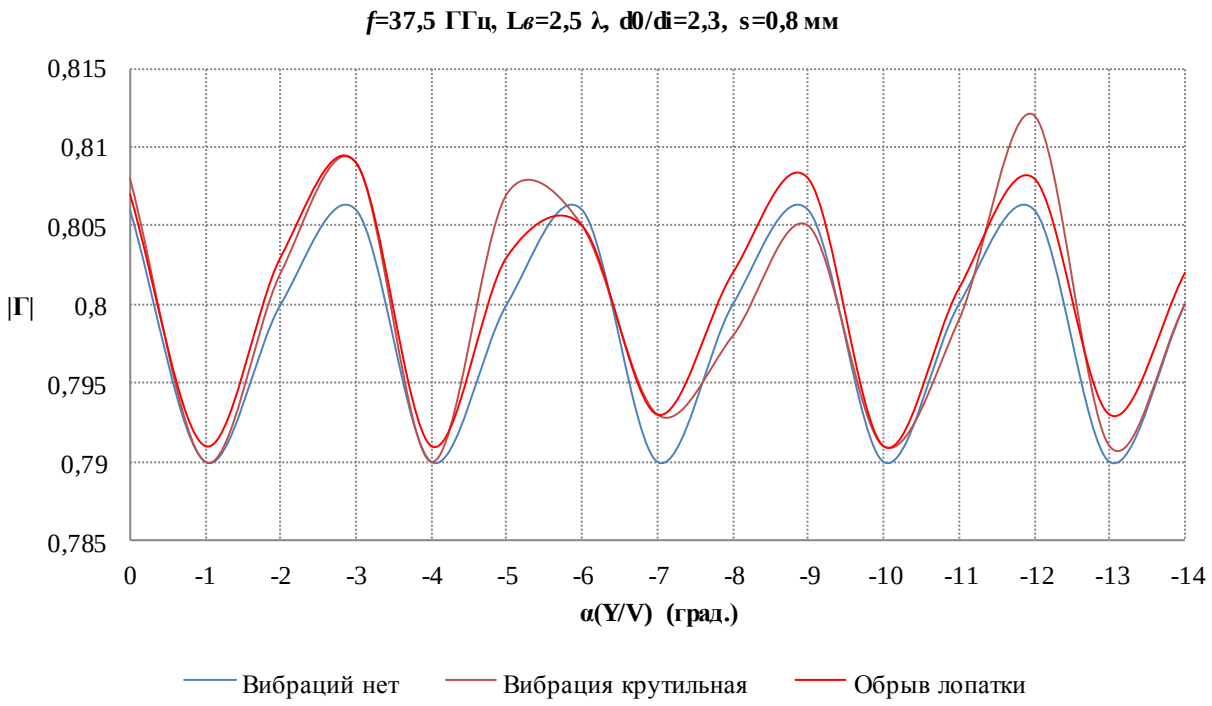


Рисунок 2.16 – Обрыв лопатки ТВД Д-36. Вид в бороскоп

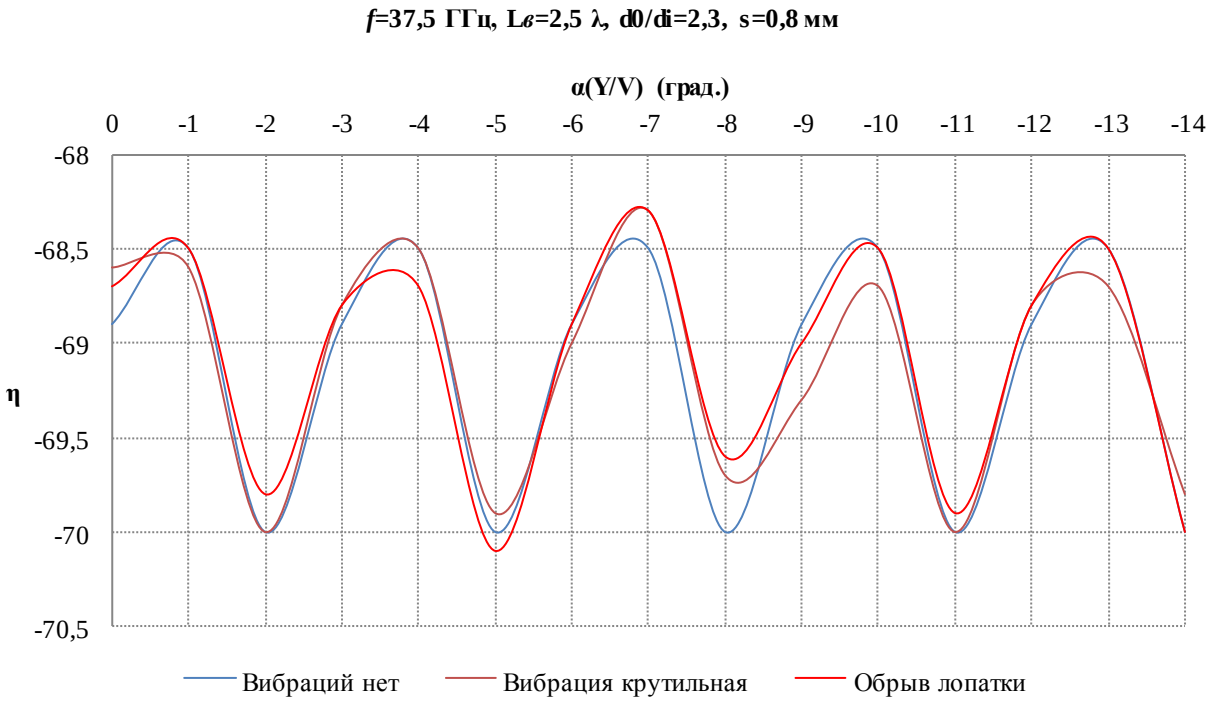
Результаты расчётов, относящиеся к обрыву и вибродеформации лопатки, сведены в таблицы 7А, 8А, и также вынесены в приложение А. Графическое представление результатов данных таблиц отображают три варианта совокупности откликов, и приведены на рис. 2.17 и 2.18. Рисунки обеспечивают наглядное сопоставление двух аномальных режимов – вибрацию или обрыв лопатки с номинальным. Диагностический эффект здесь отображён различием трасс в графиках.

В динамическом режиме каждая из 118 лопаток ТВД двигателя Д-36 при прохождении в пределах диагностического окна шириной 15° вызывает отклики амплитуды и фазы коэффициента отражения вида (рис. 2.17 (а, б) и 2.18 (а, б)). За один оборот ротора, длящийся около $T_{об}$=5 мс каждый из 118 откликов происходит через интервал около 3°, или по времени через $T_{и}$=8 мкс. Поскольку длительность импульса отклика превышает период следования, то импульсы налагаются друг на друга, формируя в итоге сглаженный модулированный радиосигнал. Для удобства сопоставления регулярного и аномальных откликов их сглаженные варианты представлены на общих осях координат.

При исправном двигателе диагностируемому процессу соответствует регулярная импульсная последовательность. При поломке лопатки один из 118 импульсов отличается по форме и это отличие, как показано ниже, доступно для выявления радиотехническими методами.

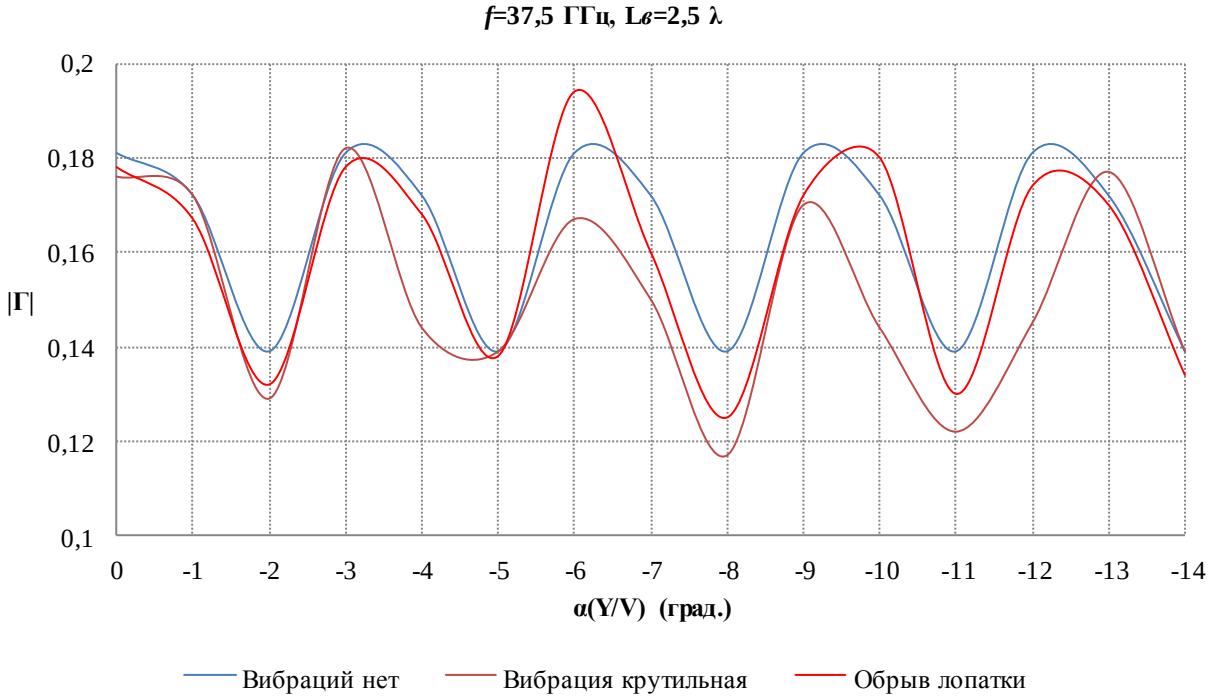


а)

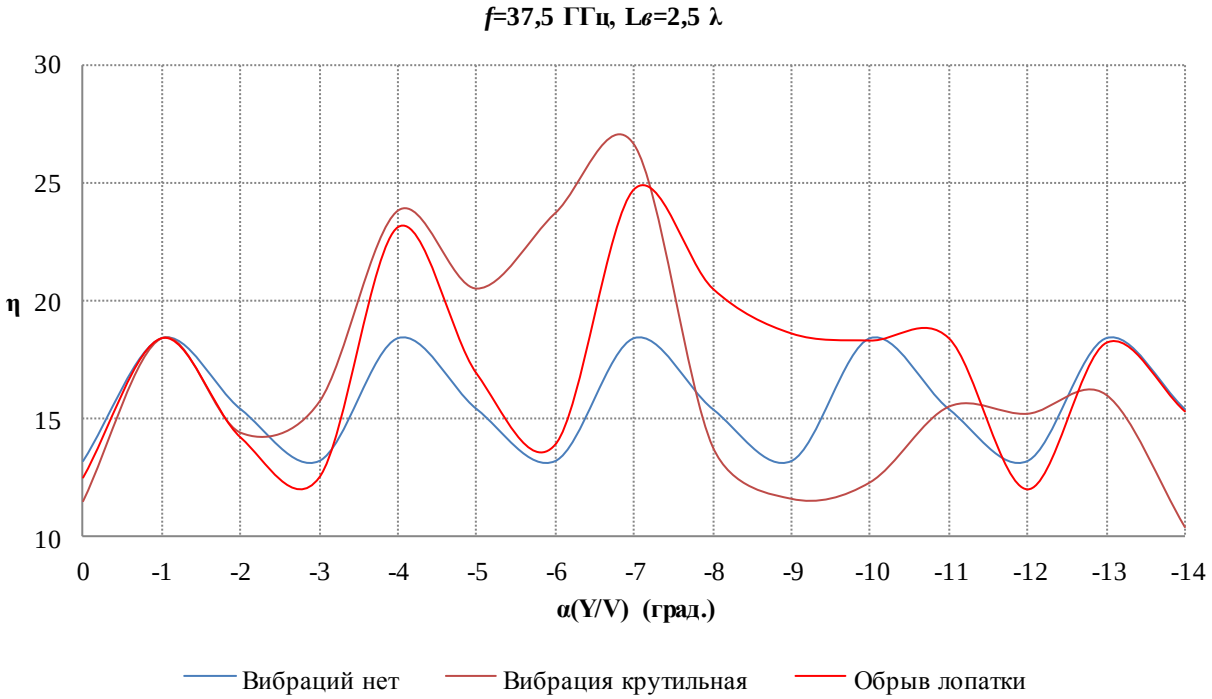


б)

Рисунок 2.17 – Амплитуда (а) и фаза (б) коэффициента отражения кольцевой-щелевой антенны на перемещение группы лопаток при различных состояниях лопатки



а)



б)

Рисунок 2.18 – Амплитуда (а) и фаза (б) коэффициента отражения открытого конца круглого волновода в качестве антенны на перемещение группы лопаток при различных состояниях лопатки

Возможности FEKO-метода позволили выявить структуру электромагнитного поля в объёме диагностической камеры, в том числе, в анимационном режиме при движении лопаток. Статическая картина поля, как пример, представлена на рис. 2.19-2.24. Она во многом объясняет сложную форму откликов и говорит об их высокой информативности (которая пока остается потенциальной).

На данном этапе исследования можно сделать лишь предварительные заключения, поскольку форма амплитудного и фазового квазистатического отклика неудобна для оценки, вернее, здесь возможна лишь визуальная оценка. Да, эффект есть. Но будет ли он заметен на фоне многочисленных помеховых откликов – сказать трудно. Ответ на эти вопросы может дать спектральный анализ (см. гл. 3).

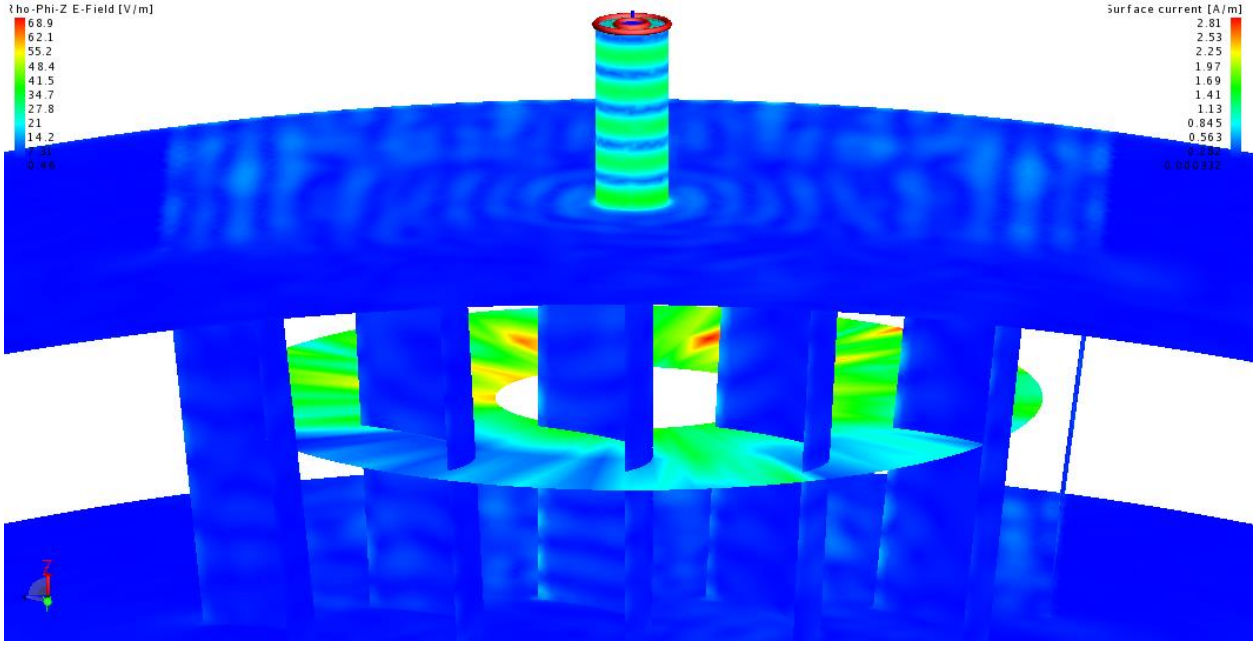


Рисунок 2.19 – 3-х мерное изображение распределения напряженности ЭМП (В/м) в районе лопаток и плотности токов (мА/м) по проводящим поверхностям при излучении кольцевой-щелевой антенны

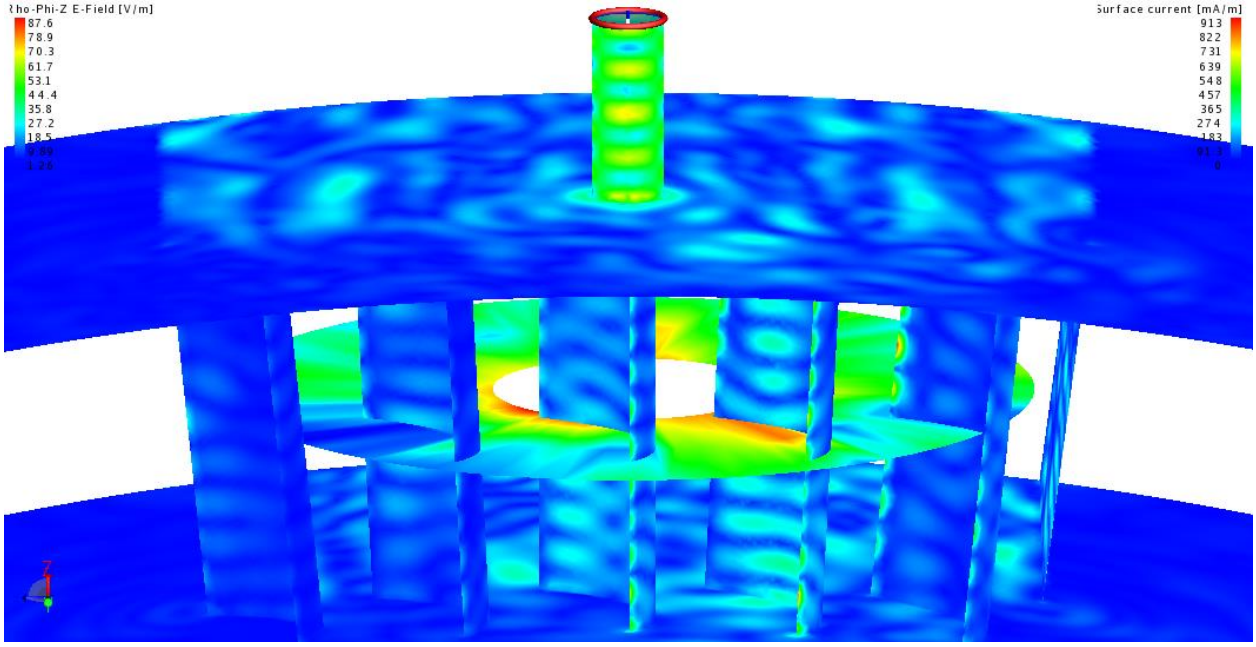
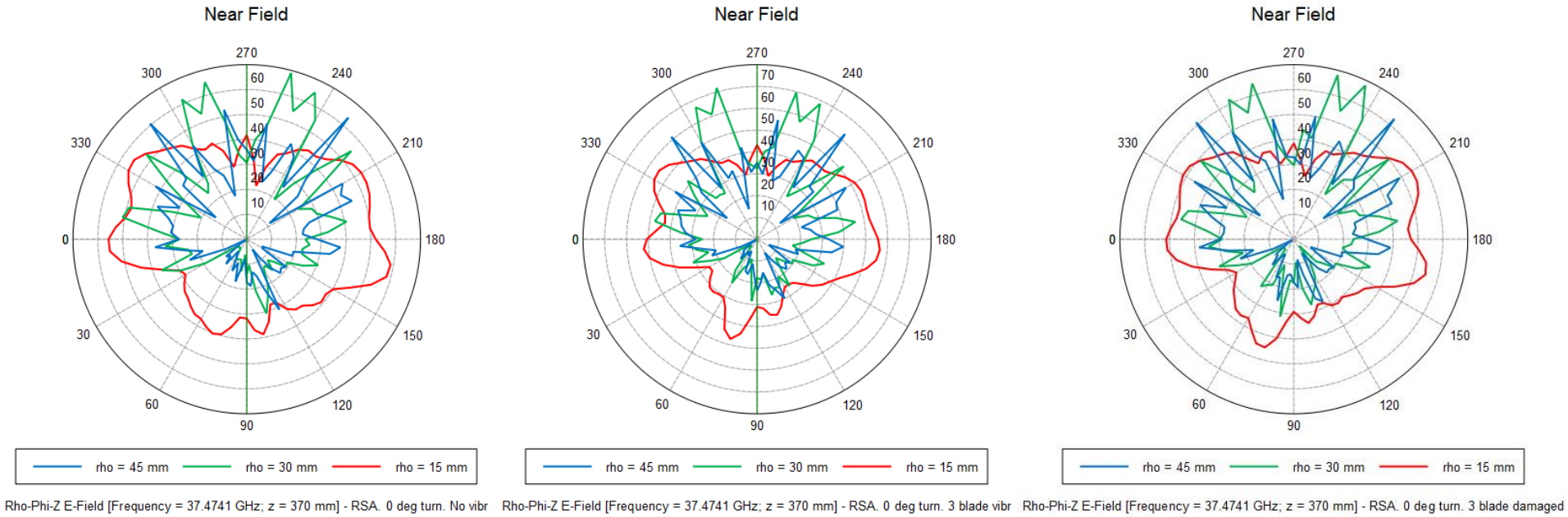
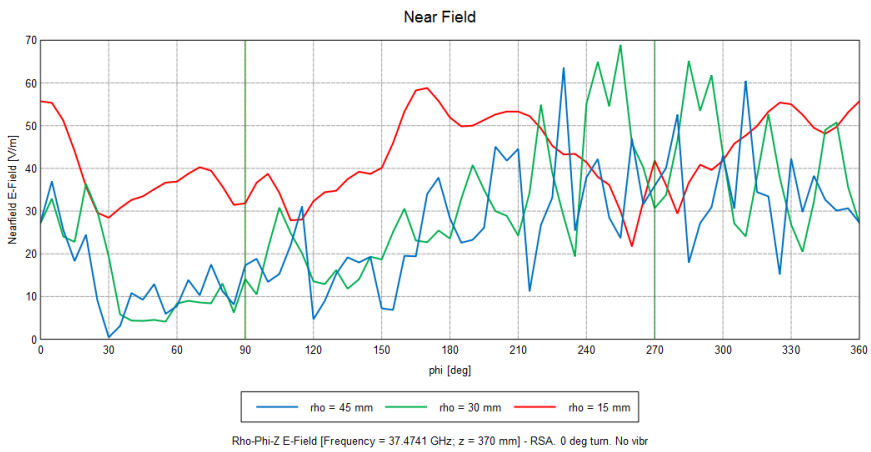


Рисунок 2.20 – 3-х мерное изображение распределения напряженности ЭМП (В/м) в районе лопаток и плотности токов (мА/м) по проводящим поверхностям при излучении открытого конца круглого волновода в качестве антенны

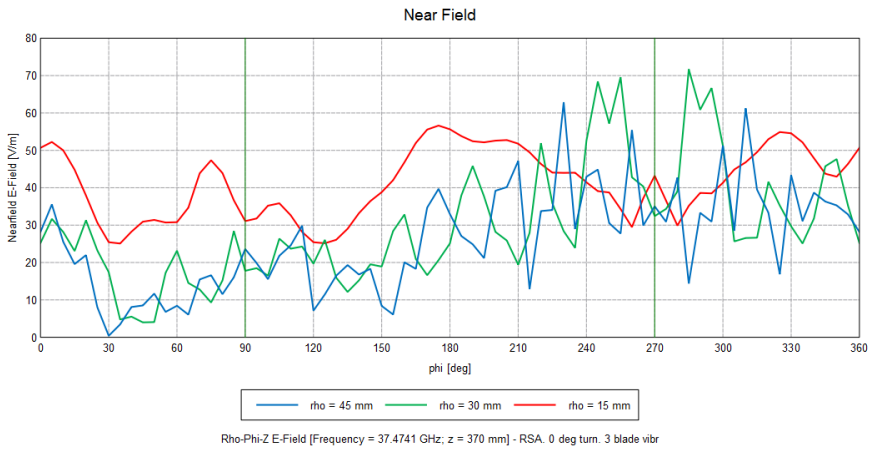


а) б) в)

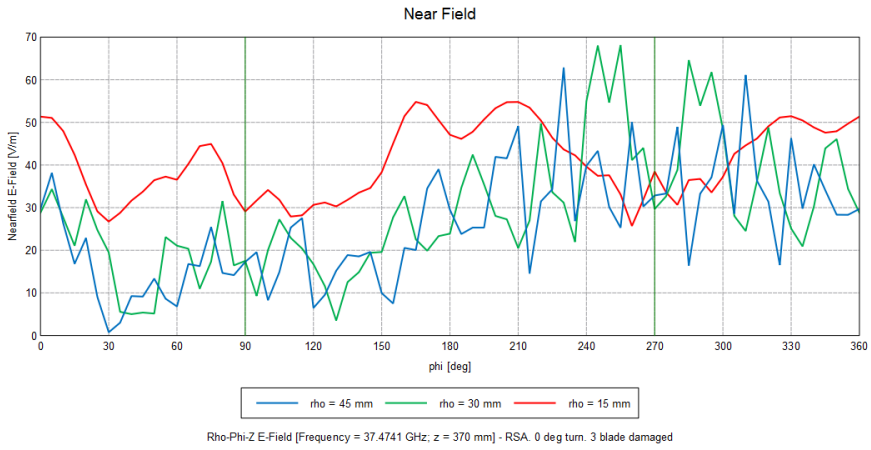
Рисунок 2.21 – Напряженности ЭМП (В/м) вблизи (в продольном сечении, на разных радиусах от центра антенны) кольцевой-щелевой антенны при: а) вблизи лопатка не вибрирует; б) вблизи вибрирует лопатка (самая ближняя); в) обрыв лопатки (самой ближней)



а)

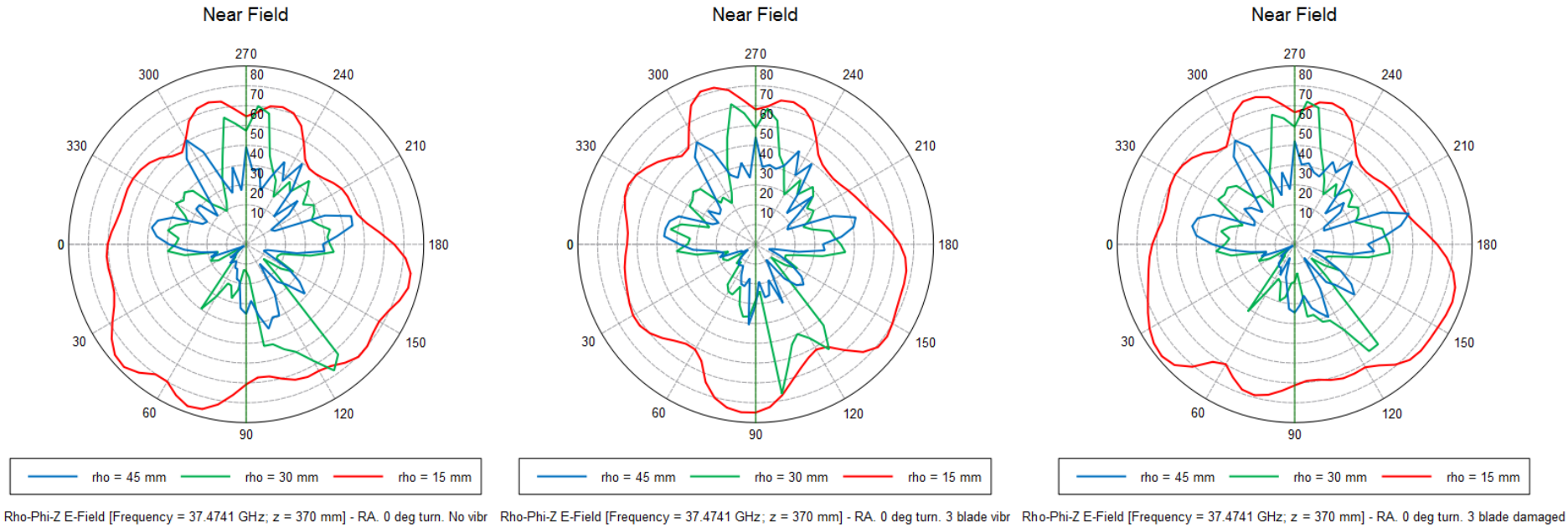


б)



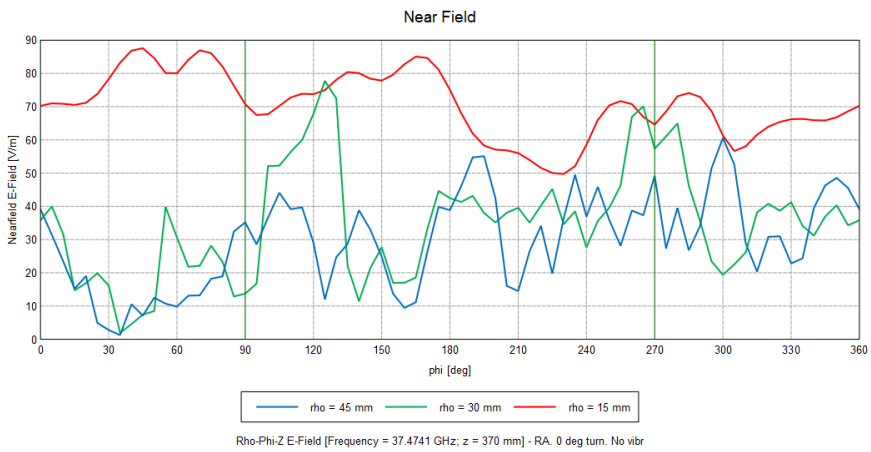
в)

Рисунок 2.22 – Напряженности ЭМП (В/м) вблизи кольцевой-щелевой антенны при: а) вблизи лопатка не вибрирует; б) вблизи вибрирует лопатка (самая ближняя); в) обрыв лопатки (самой ближней)

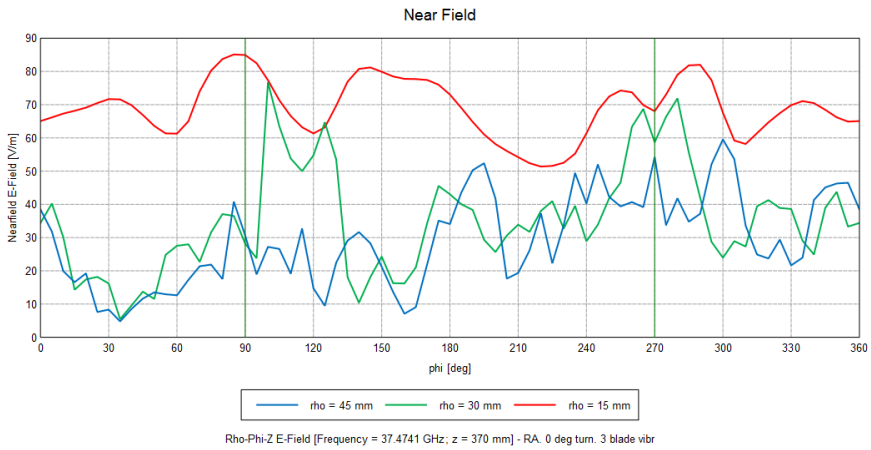


а) б) в)

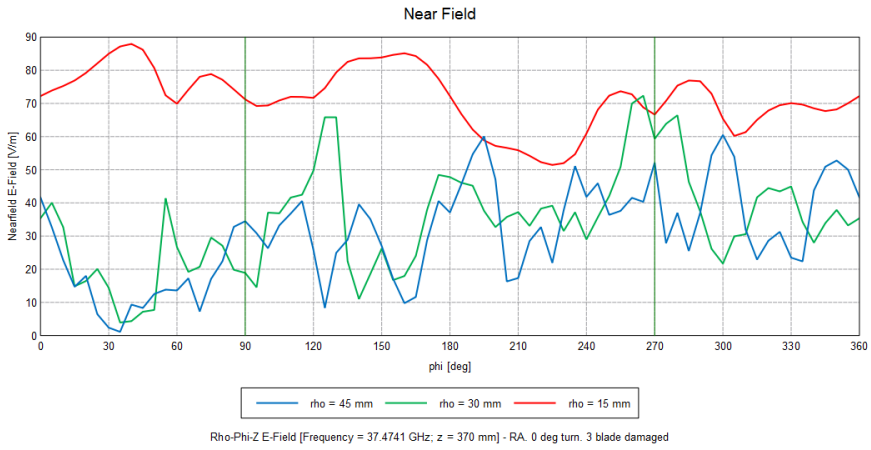
Рисунок 2.23 – Напряженности ЭМП (В/м) вблизи (в продольном сечении, на разных радиусах от центра антенны) открытого конца круглого волновода в качестве антенны при: а) вблизи лопатка не вибрирует; б) вблизи вибрирует лопатка (самая ближняя); в) обрыв лопатки (самой ближней)



а)



б)



в)

Рисунок 2.24 – Напряженности ЭМП (В/м) вблизи открытого конца круглого волновода в качестве антенны при: а) вблизи лопатка не вибрирует; б) вблизи вибрирует лопатка (самая ближняя); в) обрыв лопатки (самой ближней)

Сходную задачу решают авторы [12, 13, 105]. Они делают это с использованием временной селекции, называя этот метод дискретно-фазовым. В настоящей диссертационной работе это сделано с помощью спектрального анализа (Глава 3).

Таким образом, исследование с применением FEKO-методики подтвердило начальное предположение, что радиоволновое СВЧ зондирование ротора позволяет выявить в условиях полёта наиболее опасные неисправности в проточном тракте ГТД. Ставить задачу точной количественной оценки при функциональной диагностике необязательно [5], тем более что FEKO-методика всегда привязана к конкретному объекту. Поэтому для серьёзных выводов нужна оценка огромного массива статистических данных.

В ходе исследования выявлены следующие свойства датчиков:

1. Предельная пространственная чувствительность датчиков.
2. Форма отклика – в виде изменения амплитуды и фазы коэффициента отражения от антенны – на движение единичной лопатки (парциальный отклик) в пределах диагностического окна.
3. То же – на движение последовательности исправных лопаток.
4. То же, но при наличии одной сломанной лопатки.
5. То же, но при наличии одной вибрирующей лопатки.

Предварительное сопоставление полученных результатов позволяют заключить, что диагностические свойства исследуемых ВД могут изменяться в достаточно широких пределах. Однако рассмотренный коэффициент отражения является промежуточным параметром. Поэтому заключение о контролеспособности ВД может быть сделано на основе анализа спектра радиоволнового отклика с частотным выходом и с учётом всех показателей диагностической системы, в частности, её помехозащищённости.

2.5 Датчик с цилиндрическим резонатором

Результаты раздела 2.4 убеждают, что датчики электронной концентрации и температуры пламён с чувствительным элементом в виде кольцевой-щелевой антенны в применении к вибродиагностике обеспечивают низкую чувствительность, которая, однако, существенно увеличивается по мере расширения щели. В известных [31, 67, 68, 69, 70] и в рассматриваемом применениях антенна остается несогласованной и, как следствие, слабоизлучающей. Подобная ситуация нехарактерна ни для ближней радиолокации (хотя исключения есть), ни для радиотехники вообще.

Но в обоих названных конкретных технических решениях [69, 70] несогласованный режим подтверждает два важных эффекта:

– работоспособность при отсутствии отражения зондирующего излучения от объекта (в силу электрофизических свойств последнего),
– комфортный температурный режим маломощного генераторного диода, что в сочетании с мерами теплозащиты от пламени [69] повышает надёжность датчиков.

В применении к вибродиагностике ГТД ситуация иная: объект способен эффективно отражать и рассеивать радиоволны (то есть, эффективно формировать отклик), а температура газа в турбине на много сотен градусов ниже, чем в камерах сгорания ЖРД.

Поэтому целесообразен поиск технических решений, позволяющих если не устранить, то хотя бы ослабить названные недостатки. В полном объёме такая задача представляется слишком громоздкой, и по силам лишь коллективу исследователей.

Обратимся к оценке одного из предложений, близкого к рассмотренному по технической сущности, и одновременно позволяющему использовать накопленный опыт в применении программного продукта FEKO. Таковым предложением является замена коаксиальной конструкции цилиндрической, в примене-

нии как к резонатору, так и к волноводу, а щелевой антенны – открытым концом волновода.

Цилиндрические резонаторы хотя и в достаточной степени изучены [109], но не получили широкого практического применения в радиоэлектронике вообще, а в радиолокации – в особенности. Исключение составляют водородный мазер, входящий в состав атомного стандарта частоты [78, 80, 99-101] и два измерителя параметров влияющих на диэлектрическую проницаемость потока вспененной жидкости [21]. Не лучше обстоит дело и с круглой антенной, точнее – в виде открытого конца круглого волновода.

В этих условиях даже начальный этап работы – создание схемы и компактной конструкции датчика, аналогичной по решаемым задачам, рассмотренным выше – представляет достаточно сложную техническую задачу. Если же говорить о подробном изучении и сравнении (теоретическом и экспериментальном) с КЩА и коаксиальным генератором, то подобное исследование сопоставимо по объёму с [69] или с [70].

Поэтому в нижеследующем разделе работы стоит задача получения лишь первых пробных результатов.

2.6 Динамический режим вибродатчика лопаток рабочего колеса компрессора

Конструктивно первый из датчиков этого типа [31] по существу повторял по форме и размерам давно известную конструкцию согласующего устройства между кабелем (фидером) и кольцевой щелью. При этом в антенне обеспечивалось равноамплитудное по окружности возбуждение при равенстве её полного (в сочетании с резонатором) сопротивления стандартному, т.е. чисто активному сопротивлению кабеля, при том, что собственно сопротивление щели – комплексное. Таким устройством стал коаксиальный резонатор. Создатели датчика электронной концентрации [31, 32] вставили в резонатор диод Ганна, обеспечив таким путём возбуждение колебаний в самом резонаторе, а кабель использовали для вывода сформированного измерительного сигнала. В довольно много-

численных литературных источниках [42, 44] термин «антенна» применяется как к собственно щели, так и ко всей конструкции: резонатор со щелью.

Длина резонатора в данном случае – около четверти длины волны, тогда как с обычной КЩА сопряжение осуществляет полуволновой резонатор. Поэтому максимум напряжения в разомкнутом конце (где стоит диод), а максимум тока – в торце со щелью. Радиальный размер резонатора и щели в электродинамическом отношении (как и любой коаксиал) некритичен, и поэтому всеми [31, 69, 70] выбран с учётом установки датчика в стандартный штуцер М18 или М12.

С позиции теории цепей и теории колебаний такой датчик (далее вернёмся к аббревиатуре ВДК) – суть частотно-модулированный автогенератор СВЧ, в котором щель – есть модулятор. В изохронном приближении такой автогенератор безинерционен по отношению к модулирующему сигналу, т.е. способен к формированию весьма широкополосного ЧМ-радиосигнала, и в нашем случае, адекватно отображать практически любой широкополосный вибропроцесс.

Это же обстоятельство позволяет при анализе структуры, а также динамики и количественных показателей измерительного отклика обойтись без дифференциального уравнения, и математического аппарата электродинамики. То есть можно представлять схему ВДК, как колебательный контур (рис. 2.4 (а)).

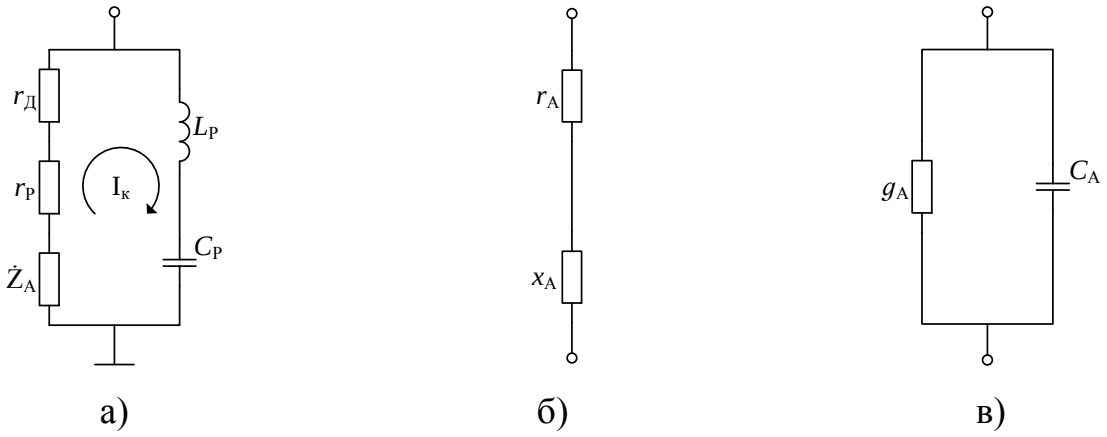


Рисунок 2.25 – Эквивалентная схема ВДК

Здесь $\dot{Z}_{\text{А}} = \frac{1}{\dot{y}_{\text{А}}}$ – комплексные сопротивление и проводимость антенны с внесенной в созданное ею электромагнитное поле лопаткой, при этом на рис. 2.4 (б, в) показаны:

$$\dot{Z}_{\text{А}} = \frac{1}{g_{\text{А}} + j \cdot b_{\text{А}}} = r_{\text{А}} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{\text{А}}} \tag{2.3}$$

т.е. реактивному сопротивлению антенны придан (как это бывает чаще, и как показано в [44]) ёмкостный характер, $g_{\text{А}}$ – проводимость излучения.

Резонатор представлен элементами $L_{\text{Р}}$, $C_{\text{Р}}$, $r_{\text{Р}}$, соотношения между ними известны [49, 54, 55]:

$$\omega_{\text{Р}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{Р}} \cdot C_{\text{Р}}}} \tag{2.4}$$

где $\omega_{\text{Р}}$ – резонансная частота,

$$x_{\text{Р}} = \omega_{\text{Р}} \cdot L_{\text{Р}} = \frac{1}{\omega_{\text{Р}} \cdot L_{\text{Р}}} = \frac{1}{b_{\text{Р}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{Р}}}{C_{\text{Р}}}} \tag{2.5}$$

где $x_{\text{Р}}$ – характеристическое сопротивление,

$$Q_{\text{Р}} = \frac{x_{\text{Р}}}{r_{\text{Р}}} \tag{2.6}$$

где $Q_{\text{Р}}$ – добротность ненагруженного резонатора (без потерь на излучение антенной),

$$R_{\text{Р}} = x_{\text{Р}} \cdot Q_{\text{Р}} = \frac{x_{\text{Р}}^2}{r_{\text{Р}}} \tag{2.7}$$

$r_{\text{Д}}$ – среднее за период отрицательное сопротивление диода.

В общем случае, а на частотах более 1-2 ГГц обязательно, должно быть учтено реактивное (ёмкостное) сопротивление диода $x_Д = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_Д}$, хотя принципиальных изменений это не вносит.

Стационарный режим ВДК определяется двумя условиями Курокавы [58]:

1. Условие баланса амплитуд:

$$r_Д + r_П + r_А = 0 \tag{2.8}$$

2. Условие баланса фаз:

$$x_Д + x_C + x_L = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_Д} + \frac{C_А + C_Р}{j \cdot \omega \cdot (C_А \cdot C_Р)} + j \cdot \omega \cdot L_Р = 0 \tag{2.9}$$

<u>Примечание</u>: строго говоря, у Курокавы три уравнения. Третье отображает условие устойчивости стационарного автоколебательного режима. Оно изучено многими авторами в применении к различным схемам и ситуациям, как для свободного автогенератора, так и для автодинного режима. В частности, в применении к датчикам пламён это сделано у Е.В. Сафоновой [69]. Выявленные ею условия для ВДК выполняются автоматически.

Здесь, во втором уравнении, ёмкость $C_А = \frac{b_А}{\omega}$ – функция размеров и положения лопатки. Таким образом, уравнение 2.9 определяет искомое в нашем исследовании измерительное преобразование. Ему соответствует рис. 2.4 (б), где:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_Р} + \frac{1}{C_А} \tag{2.10}$$

$$b = \omega \cdot C = \omega \cdot \frac{C_Р \cdot C_А}{C_Р + C_А} \tag{2.11}$$

а) б)

Рисунок 2.26 – Эквивалентная схема ВДК

а) полная схема; б) обобщённая схема

Полученные выражения используем далее для вычисления чувствительности ВДК, точнее:

$$K_Д = \frac{d\omega}{db_А} \cdot \frac{db_А}{dl} = \frac{d\omega}{dC_А} \cdot \frac{dC_А}{dl} \tag{2.12}$$

Поскольку схема на рис. 2.4 (б), как уже сказано совпадает со схемой ЧМ автогенератора, воспользуемся известным приближенным соотношением [79]:

$$\Delta_\omega = \frac{d\omega}{\omega} = -\frac{m_C}{2} \cdot \frac{db_А}{b_А} = -\frac{m_C}{2} \cdot \Delta_b \tag{2.13}$$

где m_C – коэффициент включения модулятора (в [79] это варикап) в контур. Применительно к схеме (рис. 2.4 (а, б)) он определяется отношением напряжений, развиваемых контурным током на реактивностях и при условии слабоизлучающей антенны ($g_А$<<$b_А$).

$$m_C \approx \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_А}}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_А} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_Р}} = \frac{C_Р}{C_Р + C_А} \tag{2.14}$$

Знак «минус» в выражении (2.13) указывает, что росту ёмкости соответствует уменьшение частоты (что имеет место в классических радиосистемах с частотной модуляцией).

Надо иметь ввиду, что ёмкостной характер антенна имеет согласно [44] в дециметровом диапазоне, и отсутствии ограничений на радиус щели. В произвольном случае проводимость b_A может носить индуктивный характер, однако принципиальных изменений этот факт не вносит.

Заключаем, что чувствительность (по абсолютной величине) растёт по мере уменьшения ёмкости C_A, то есть при расширении щели. Этот вывод согласуется с результатами расчётов в программе FEKO.

С другой стороны, с ростом ширины щели растёт мощность излучения антенны (и проводимости b_A), которой в выражении (2.14) мы пренебрегли. Более того, рост потерь на излучение требует применения более мощного диода со всеми вытекающими последствиями, к которым нам придётся вернуться при анализе динамики ВДТ (мощный диод при обычном КПД<10% излучает тепло, которого в турбине итак хватает).

Теперь несколько детализируем полученный результат. В реальности изменение частоты, отличной от резонансной ω_P, складывается из трёх величин: первая вызвана самим фактом включения антенны, а вторая – внесением в ЭМП лопатки и, наконец, третья – виброперемещением лопатки. Соответственно,

$$\Delta C_A = \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 \tag{2.15}$$

Нетрудно заключить на основании выражения (2.14), что преобразование $\Delta C \rightarrow \Delta\omega$ линейно, пока $C_P >> C_A$, что опять таки требует расширения щели, либо уменьшения характеристического сопротивления x_P. Конструктивно последняя мера может быть реализована утолщением внутреннего проводника коаксиала, что противоречит многим вполне оправданным требованиям электродинамики СВЧ. Действительно, при x_P = 50 Ом и зондирующих частотах 3…18 ГГц, (в области этих частот работали авторы [69, 70]) величина эквивалентной ёмкости $C_P \in$ (0,5…0,08) пФ.

В свою очередь C_A образуется краевой ёмкостью (имеются ввиду края мембраны, в которой прорезана щель) и лежит в пределах ~ (1…0,3) пФ. По-

этому $m_C \leq 0{,}5$, а чувствительность в относительных единицах $K_Д = \frac{l}{f} \cdot \frac{df}{dl}$, где l – есть вибросмещение (крутильное; изгибное), с учётом результатов п. 2.4 по порядку величины достижима в пределах менее (0,1…0,01), т.е. относительное приращение диагностируемого параметра на десять процентов откликается изменением частоты от одного до одной десятой процента. Читателю, не сталкивавшемуся с таким подходом к оценке надо пояснить (или напомнить), что в ЧМ-автогенераторе с варикапом при полном его включении в контур, десятипроцентное приращение напряжения приводит к изменению ёмкости и частоты на 5 и 2,5 процента соответственно.

2.7 Динамический режим датчика вибраций лопаток турбины

2.7.1 Диагностические особенности газовой турбины

Газовая турбина считается самым нагруженным в тепловом и механическом отношении узлом ГТД. Условие работы предшествующего (по газовому потоку) турбине соплового аппарата и корпуса турбины определяются высоким, и весьма неравномерным нагревом, давлением газов, и общей вибрацией конструкции ГТД (т.е. стенок и арматуры крепления узлов).

В наиболее тяжёлых условиях (в сравнении с названными узлами) работают диски турбин и лопатки (т.е. рабочее колесо). Это определяется неравномерностью полей температур и полей давлений перед турбиной по окружности проточного тракта, порождённых флуктуациями процесса горения в топливных форсунках камеры сгорания, неравномерностью отбора воздуха и помпажом ГТД.

Непосредственной причиной возникновения вибраций лопаток турбины считают [1] «затенение» газового потока сопловыми лопатками. При этом частоты вынужденных колебаний определяются соотношением:

$$F_{лт} = \frac{F_{об} \cdot N}{60} = F \cdot N \qquad (2.16)$$

где $F_{об}, F$ – число оборотов (об/мин) и частота вращения (Гц) ротора, N – число лопаток ротора турбины. Данная частота для серийных ГТД составляет десятки килогерц. Пример для ТВД Д-36:

$$F_{лт} = \frac{8300 \cdot 118}{60} = 138{,}3 \cdot 118 = 16{,}3 \text{ КГц} \tag{2.17}$$

Виброзащита лопаток в форме бандажирования препятствует главным образом возникновению резонансов; но обеспечить эффект при значительных изменениях числа оборотов не всегда удаётся.

Одновременно с флуктуациями давления, лопатки подвергаются статическому и флуктуационному нагреву, с неравномерностью нагрева по профилю. Последняя достигает 300…450 К, что приводит к значительным термическим напряжениям растяжения и сжатия.

Наконец, лопатки подвергаются растяжению, скручиванию и изгибу под действием центробежных сил.

Совместное и долговременное влияние указанных воздействий вызывают вытяжку, обгорание алитированного слоя, растрескивание и, в итоге, обрыв, и разрушение лопаток.

Здесь трудно удержаться от прямого цитирования: «обрыв рабочей лопатки турбины в полёте сопровождается резким хлопком в двигателе и появлением шлейфа сизого дыма. Обычно оборвавшаяся часть разрушенной лопатки, попадая в зазор между корпусом турбины и торцами следующих по потоку лопаток, вызывает изгиб этих лопаток, и выпучивание корпуса, или разрушение керамических вставок. В дальнейшем кусок лопатки, имея осевую составляющую скорости, движется в направлении выходного устройства и производит аналогичные деформации…» [1].

Именно такую картину наблюдали авторы [10] на стенде, где часть лопаток была снабжена тензодатчиками. Выше уже сказано, что по наблюдению виброспектров катастрофа была предсказана за 100 минут.

При использовании ранее предложенных способов диагностики (см. п.п. 1.1, 1.3) ВДТ устанавливается на корпусе турбины в плоскости диска ротора (требуется препарация корпуса турбины) [105], а в рамках исследуемого способа с некоторым смещением (в стандартное и имеющееся смотровое окно). Следовательно, он подвержен только что описанным воздействиям, дополненным вибрациями корпуса (а в данном случае – это помеха).

2.7.2 Выбор типа и структуры датчика. Детализация стоящей задачи

Совокупность описанных условий и стоящей задачи побуждает отказаться от датчика с конструктивно совмещенной антенной [31], а использовать схему, конструкцию с выносной антенной, и накопленный опыт авторов [69, 70].

Прямое заимствование здесь не даст эффекта, так как прототипы предназначены и хороши для ЖРД с коротким рабочим циклом. Но более существенен тот факт, что требования к контролируемой полосе флуктуаций концентрации и температуры, авторы ориентировали на низкое быстродействие средств управления режимом горения ЖРД, т.е. на десятки герц, и десятки миллисекунд. В экспериментах эрозионная стойкость ограничивалась получасом [69, 70].

Вместе с тем, их результаты и опыт ценны, прежде всего, детальным изучением помеховой ситуации и выработанными мерами защиты от помех. Последние, по своим свойствам и механизму влияния на спектр измерительного сигнала, существенно отличны от известных помех в радиолокации.

Другой компонент опыта относится к анализу динамики измерительных преобразований (2.2). Если программные методы, использованные выше, потребовали длительной работы, то отыскание коэффициента отражения и автодинного отклика, ввиду наличия аналогий, больших трудностей не вызвало, ввиду наличия упомянутых аналогов.

Математической моделью ВДТ выбрано нелинейное дифференциальное уравнение неавтономного автогенератора – автодина [49-52, 54, 56]. Как инструмент ближней радиолокации автодин изучен во всех подробностях, в том числе – для различных задач и условий применения [54, 55]. В частности, в

наиболее основательном и обобщающем исследовании дан глубокий анализ свойств СВЧ автодинов на основе полупроводниковых диодов – междолинных (Ганна), и лавинно-пролётных [54].

В работе [56] режимы автодинов ставятся в один ряд с синхронизированными автогенераторами. В фундаментальном труде [59] изучены флуктуации в синхронизированном генераторе. В учебнике [52] подробно описано влияние рассогласованной антенны на режим однокаскадного радиопередатчика. Наконец, в [55] рассмотрен отклик автодина на внешнюю радиопомеху. Т.е., материал для сопоставления и оценки достоверности полученных результатов как будто бы есть. Однако стыковка упомянутых результатов между собой оказывается затруднительной.

Ставшая классической и одинаково пригодная для триодных и диодных автогенераторов математическая модель есть уравнение Ван-дер-Поля:

$$\ddot{U}(t) + \omega_p^2 \cdot U(t) = \varepsilon\{\Phi_1(U, \dot{U}) + \Phi_2(\dot{\Gamma}_A, W_i) + \Phi_3(t)\} \tag{2.18}$$

где $U(t)$ – переменное напряжение; точки над символом означают степень дифференцирования, ω_p – частота генерации в нулевом приближении, ε – малый параметр, в данном случае это не сомножитель, и не коэффициент, а оператор, указывающий на то, что члены правой части уравнения в своей совокупности существенно меньше каждого из двух членов в левой части.

Функции $\Phi_{1,2,3}$ – отображают три группы физических процессов, влияющих на режим автодина, т.е. на амплитуду и частоту генерации.

Здесь $\Phi_1(U, \dot{U})$ – нелинейный член (по Ван-дер-Полю). Он зависит от энергетических параметров активного элемента, а в математическом плане – от аппроксимации его вольт-амперной характеристики. Этот член используют для вычисления амплитуды автоколебаний, а соответствующие выкладки можно найти в учебниках [49]. Поэтому научного интереса эта функция для нас не представляет.

Функция $\Phi_2(\dot{\Gamma}_A, W_i) = \Phi_2[\dot{\Gamma}_A(W_i), W_i]$ – отображает две формы воздействия физических процессов (рабочих в ГТД и побочных) на режим автодина, причем $W_i = \mathcal{V}, N, T$ ... Первая из двух групп влияет через изменение коэффициента отражения от антенны, а вторая через непосредственный контакт корпуса датчика со стенкой проточного тракта.

В линейном приближении коэффициент отражения:

$$\dot{\Gamma}_A(W) \approx \delta\dot{\Gamma}_A(W) = \dot{\Gamma}_{A0} + \delta\Gamma_A(\mathcal{V}) + \delta\Gamma_A(N) + \delta\Gamma_A(T) + \cdots \tag{2.19}$$

где $\dot{\Gamma}_{A0}$ – коэффициент отражения при отсутствии воздействий, т.е. $\dot{\Gamma}_{A0} = |\Gamma_{A0}| \cdot exp(-j\varphi_0)$, остальные слагаемые – суть отклики, подлежащие отысканию. Главный из них – измерительный отклик $\delta\Gamma_A(\mathcal{V})$, остальные – помеховые, перечень которых можно продолжить.

Наконец $\Phi_3(t)$ – собственное радиоизлучение пламени (СРП), точнее ещё неостывшего в сопловом аппарате газа.

Для того, чтобы далее сосредоточить внимание на неисследованных эффектах автодинного режима датчика, учтём, что зависимости коэффициента отражения, точнее, его амплитуды и фазы от концентрации N и температуры T подробно изучены в работах [69, 70], а нам достаточно лишь скорректировать численные оценки. Воздействию СРП на автодин уделили внимание авторы [54, 55]. Поэтому научную новизну составляет изучение отклика сначала коэффициента отражения, а затем и частоты генерации на регулярное, и вибрационное перемещение лопатки.

Поскольку диагностическая информация содержится в частоте генерации ω, то следует уточнить её отличие от частоты резонатора (которая введена в п. 2.6).

$$\omega_{\text{Г}} = \omega_{\text{Р}} + \Delta\omega_{\text{Д}} + \Delta\omega_{\text{Н}} + \Delta\omega_{\text{А}} = \omega_{\text{Р}} \cdot \left(1 + \Delta_{\text{Д}} + \Delta_{\text{Н}} + \Delta_{\text{А}}\right) \tag{2.20}$$

Выражение (2.20) включает поправку $\Delta_{\text{Д}}$, обусловленную влиянием реактивности диода по второму уравнению Курокавы (см. п. 2.6, формула (2.9)), $\Delta_{\text{Н}}$ – поправка на неизохронность автогенератора, $\Delta_{\text{А}}$ – следствие автодинного эффекта в рабочей точке, обусловленного отражением от конструктивных элементов исправной диагностической камеры. Все компоненты в выражении (2.19) – суть детерминированные значения. В действительности все они флуктуируют, как под влиянием контролируемых вибраций лопаток, так и помеховых факторов.

В идеальном рабочем режиме, который в общепринятой в авиации методике диагностики считается эталонным [1, 5], частота генерации:

$$\omega_{\text{эт}} = \omega_{\text{Г}} + \Delta\omega_{\text{Л}}(t) \tag{2.21}$$

Здесь $\Delta\omega_{\text{Л}}(t)$ отображает закон изменения частоты во времени под влиянием перемещения лопатки, принятой в свою очередь за эталон.

Весь последующий материал данного параграфа посвящён отысканию $\Delta\omega_{\text{Л}}(t)$, как функции коэффициента отражения, более точно – от его фазы, с тем чтобы в конечном итоге представить в явном виде всю цепочку измерительных преобразований (2.2), связав частотный отклик с движением и формой лопатки.

Приступим к решению дифференциального уравнения методом медленно меняющихся амплитуд, ориентируясь на то обстоятельство, что аналогичные математические преобразования на первых этапах этого решения хорошо известны и содержатся во многих работах. Ищем решение в виде:

$$U(t) = U(t) \cdot \cos[\omega_{\text{Г}} \cdot t + \theta(t)] \tag{2.22}$$

имея ввиду, что амплитуда $U(t)$ и фаза $\theta(t)$, через коэффициент отражения, находятся в зависимости от воздействий $\mathcal{V}, N, T$.

Отражённое напряжение:

$$U_{\text{отр}}(t) = U(t) \cdot |\Gamma_{\text{A}}| \cdot exp(-j\varphi_{\text{A}}) \tag{2.23}$$

причём $U(t) = (U_0 + \delta U) = U_0 \cdot (1 + \delta_U)$, $\Gamma_{\text{A}} = \Gamma + \delta\Gamma$.

Не приводя здесь, в силу упомянутых обстоятельств, промежуточные выкладки, получим так называемые укороченные уравнения:

$$\frac{1}{U} \cdot \frac{dU}{dt} = \Pi_{\text{з}} \cdot (-\delta_U + \Gamma \cdot \cos\theta + \delta\Gamma \cdot \cos\theta + \delta\theta \cdot \Gamma \cdot \sin\theta) \tag{2.24}$$

$$\delta\omega = \frac{d\theta}{dt} = \Pi_{\text{з}} \cdot (\Gamma \cdot \sin\theta + \delta\Gamma \cdot \sin\theta + \delta\theta \cdot \Gamma \cdot \cos\theta) \tag{2.25}$$

где $\Pi_{\text{з}}$ – полоса возбуждённого резонатора с учётом компенсации затухания активным элементом (диодом), называемая в теории колебаний прочностью предельного цикла, $\delta_U = \frac{\delta U}{U}$ – относительное приращение амплитуды автоколебаний за счёт автодинного эффекта, при отсутствии виброперемещений лопатки вблизи антенны, $\delta\Gamma$, $\delta\theta$ – возмущения амплитуды и фазы автодина виброперемещением. По сути, это отклик на искомое воздействие на предпоследнем этапе измерительного преобразования. Фаза θ соответствует рабочей точке ВДТ. Таким образом, значения Γ и θ – суть параметры эталонного диагностического режима, при котором рабочий процесс в проточном тракте ГТД соответствует штатному полётному режиму.

Строго говоря, таких режимов может быть два, и автор [70] называет их «холодным» и «горячим», имея ввиду смещение рабочей точки за счёт квази-

статического, например, предстартового нагрева. Однако он же признает, что влияние этого смещения на спектр незначительно.

Уравнение (2.25) – математическое описание последнего этапа измерительного преобразования, т.е. искомый измерительный отклик, позволяющий отыскать только что упомянутый спектр – принятый диагностический параметр. Однако оно же (2.25) позволяет видеть серьёзную погрешность, обусловленную свойством автодина – неизохронностью. Она может быть существенно уменьшена путём рационального выбора рабочей точки по фазе $\theta = 0$. Действительно, при такой начальной фазе уравнения (2.24) и (2.25) упрощаются:

$$\frac{1}{U} \cdot \frac{dU}{dt} = \Pi_4 \cdot (-\delta_{\text{Х}} + \delta_{\text{Г}}) \tag{2.26}$$

$$\delta\omega = \frac{d\theta}{dt} = \Pi_4 \cdot \delta\theta \tag{2.27}$$

и преобразование фазы автодинного отклика, в принятом приближении, становится линейным, а режим преобразования изохронным. Здесь $\Pi_4 = \Gamma \cdot \Pi_3$ – полоса автодинного отклика, введённая в теорию колебаний и известная в БРЛ около полувека [64].

Свойства антенны, т.е. реальное соотношение проводимостей $g_{\text{А}}$, $b_{\text{А}}$ с проводимостью фидера не позволяют реализовать нулевую фазу отражения. Но это можно сделать, регулируя длину фидера $l_{\text{ф}}$. С учётом материалов п. 2.3 условие линейности и изохронности:

$$\theta + \theta_{\text{ф}} = -\operatorname{arctg}\frac{2 \cdot \alpha_1}{1 - (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)} + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot l_{\text{ф}} = 0 \tag{2.28}$$

где $\alpha_1 = \frac{b_{\text{А}}}{g}$, $\alpha_2 = \frac{g_{\text{А}}}{g}$.

Таким образом, искомый частотный диагностический отклик при удачном выборе рабочей точки находится в линейной зависимости от фазы коэффициента отражения, и пропорционален его модулю. Это известный в БРЛ результат. Обычно в автогенераторах со значительным отбором генерируемой мощности прочность предельного цикла имеет порядок одной сотой от частоты генерации. Поэтому при найденных в параграфе 2.4 коэффициентах отражения диагностический отклик ВДТ может достигать единиц МГц – при коаксиальной конструкции, и до десятка МГц – при цилиндрической. В обычных для БРЛ условиях, это сильный сигнал. Насколько он эффективен в данных условиях, покажет анализ помеховой ситуации (гл.3).

В заключение данного раздела, следует провести дополнительное сопоставление ВДК и ВДТ, имея ввиду возможность и целесообразность их применения для диагностики рабочих колёс, следующих за ТВД, где имеют место более благоприятные условия. Требуется ли там столь внимательная диагностика – решать специалистам. Наша задача – обратить внимание на основные различия в уже выявленных рабочих характеристиках и недостатках датчиков. В последнем случае речь пойдёт, главным образом, о помеховых откликах, серьёзно изученных в [70], но в приложении только к датчикам коаксиальных конструкций.

Итак, оба датчика при автогенераторной и автодинной схемах, и при обоих вариантах конструкций – коаксиальной и цилиндрической – обеспечивают достаточный для регистрации диагностический отклик (что подтверждено в Главе 3 численными расчётами). Его величина, пропорциональная чувствительности датчика, растёт с ростом зондирующей частоты и проводимости излучения антенны. Более того, контролируемая полоса виброотклико в также достаточна, хотя в более термостойком автодином варианте она значительно меньше. Наконец, конструктивное сопряжение с ГТД (без каких либо его переделок) обеспечивают как обе схемы, так и обе конструкции.

Сравнительно меньшая чувствительность автодинного варианта ВДТ окупается его термостойкостью [69], но более обоснованное заключение можно

дать только с учётом его реакции на помехи. Пока же какого-либо отличия в этом плане работы [69, 70] не подтверждают. Цилиндрическая конструкция при обоих вариантах схем обеспечивает лучшую, а возможно и полную защиту от эрозии.

Окончательный вывод могут сделать специалисты лишь после натурных испытаний.

ГЛАВА 3 Спектр и информационное содержание диагностического отклика

3.1 Термины и определения

Диагностированию подлежит периодический *рабочий процесс*, характеризуемый двумя кратными частотами: *вращения вала* $F_{\text{В}}$ и *парциальных импульсных откликов* на каждую из N лопаток $F_{\text{И}} = N \cdot F_{\text{В}}$. Далее, её называем *рабочей частотой*. Соответствующие негармонические колебания модулированы искомым *вибропроцессом* и *помехами*, где *частота модуляции* формируется специальным низкочастотным генератором, и не зависит от поведения объекта локации, т.е. является только носителем, но не источником диагностической информации.

В ходе формирования *диагностического* отклика *радиочастотное* зондирующее колебание претерпевает частотную модуляцию, после отражения от стенок диагностической камеры, включая движущиеся лопатки и преобразования их перемещения в частотную модуляцию (*автодинным* или прямым путём). В этом состоит отличие подлежащего изучению РЛ-метода от классического [64]. Вследствие характерной для ТЭУ (включая ГТД) взаимосвязи факторов рабочего процесса: вибрации и помехи – *коррелированы*, причём по мере многоэтапного формирования диагностического отклика степень корреляции откликов на эти воздействия возрастает.

Выделенные курсивом слова далее использованы для наименования сигналов и их спектров.

3.2 Виброспектр как диагностический параметр

Предложенный диагностический алгоритм основан на сопоставлении спектров реального и эталонного откликов датчика на перемещение лопаток РКТ в зондирующем электромагнитном поле вблизи антенны.

Вследствие автодинного детектирования, в спектре сигнала на выходе датчика присутствуют (наряду с побочными продуктами нелинейного процесса) два диагностических компонента с зондирующей и с рабочей частотами. Традиционно [64] внимание привлекает последний.

Фактически в системном плане алгоритм дальнейших диагностических операций является четырёх этапным. Поэтому контролеспособность данной подсистемы (или системы вибродиагностики), зависящая «a priori» от количества извлечённой диагностической информации, определяется свойствами (качеством функционирования) четырёх узлов подсистемы:

– собственно вибродатчика, адекватности основного отклика и невосприимчивостью (противостоянию) к помехам;
– эталона, т.е. знанию, каким должен быть идеальный спектр, и в каких пределах допустимо его изменение;
– анализатора спектра на основе быстрого преобразования Фурье;
– блока, реализующего процедуру сравнения, которая в свою очередь предусматривает учёт влияния помех, «встроенных» в измерительный диагностический сигнал на двух предыдущих этапах (операции две, но в одном узле компьютера, а он в составе многоканальной диагностической системы (далее, МКДС)).

Первому из этапов посвящена Глава 2. По реализации второго этапа авиаспециалисты накопили значительный (если не сказать – огромный опыт) [1, 18, 20]. Тем не менее, у каждого типа (даже конкретного экземпляра) ГТД «свой» спектр, и его надо выявлять на стенде. Третий этап представляет собой давно решённую в радиотехнике задачу. Наконец, задачу четвертого этапа призвана осуществить многоканальная система [72]. Точнее, этой системе в рамках данного этапа принадлежит важная роль, но окончательное решение в распознавании ситуации «годен/негоден» (или «допустимо/недопустимо») осуществляется по результатам обработки на ЭВМ с использованием информации других диагностических каналов. И здесь у авиаторов изрядный опыт [5, 73].

Обратимся теперь ко второму этапу. Для изучения возникновения и развития неисправностей ГТД средствами виброметрии сложный спектр вибраций принято рассматривать, как сочетание простых (идеализированных) форм: гармоническая, квазигармоническая, детерминированная и квазидетерминированная, а также случайная – узкополосная и широкополосная [8]. Использование в качестве диагностического признака среднего уровня *виброскоростей* не обеспечивает выявления неисправностей. Поэтому авиаспециалисты уже более 30 лет обращают основное внимание не на дисперсию вибропроцесса, а на структуру спектра виброскоростей с использованием перестраиваемых узкополосных фильтров [1], причём радиопромышленность предоставляет широкий набор аппаратуры, поскольку в радиотехнике аналогичные операции освоены гораздо раньше. Особенно здесь развиты методы и приборное оснащение в приложении к анализу откликов в радиолокации, и флуктуаций в первичных возбудителях колебаний радиопередатчиков.

Критичным в данном случае является длительность операции по оценке спектра в сравнении с предполагаемым временем развития дефекта. Чем быстрее мы хотим выявить неисправность, тем больше внимания должны уделить:

– при формировании виброотклика – расширению полосы,
– при обработке диагностического сигнала – высокочастотной части отклика (жертвуя при этом низкочастотной частью спектра, требующей более длительной обработки).

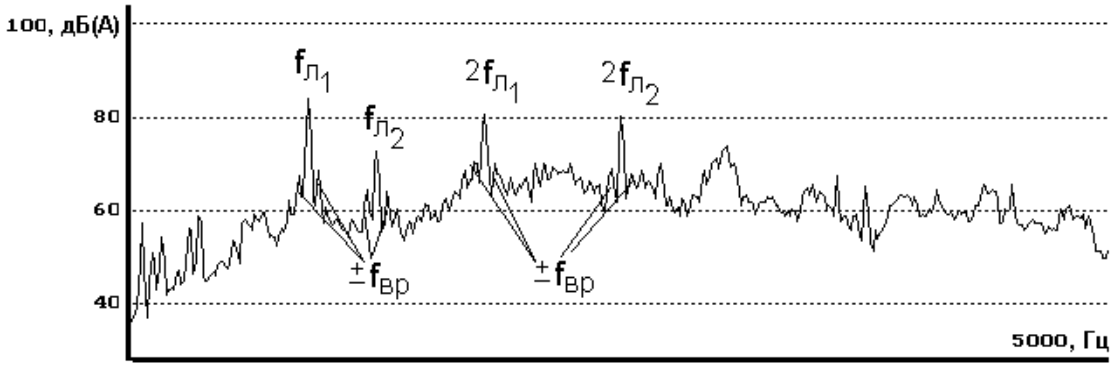
К сожалению, многочисленные исследования вибропроцессов в ГТД [8, 12, 13, 20] проводились только на стендах, причём экспериментаторов больше беспокоила форма огибающей, но не время, затраченное на выявление этой формы. Здесь показательны выдержки из статьи [4], процитированной с сохранением терминологии и символов автора (нумерация рисунков – наша): «Поскольку основным методом анализа высокочастотных случайных составляющих шума и вибрации является анализ спектра огибающей, то на него делается и ставка при диагностике рабочих колёс. В результате такого анализа обнаруживаются: биение рабочего колеса, дефекты отдельных лопастей (лопаток), по-

вышенная турбулентность потока и кавитация в жидкости. Но для этого необходимо измерять спектр огибающей вибрации корпуса в непосредственной близости от лопастей (лопаток) диагностируемого рабочего колеса. Эти задачи просто решаются в насосах и компрессорах, но в турбинах их решать гораздо сложнее, так как корпус турбины обычно имеет теплоизоляционный кожух, который крайне сложно снимать. Поэтому места для установки датчика следует готовить во время крупного ремонта со снятием кожуха.

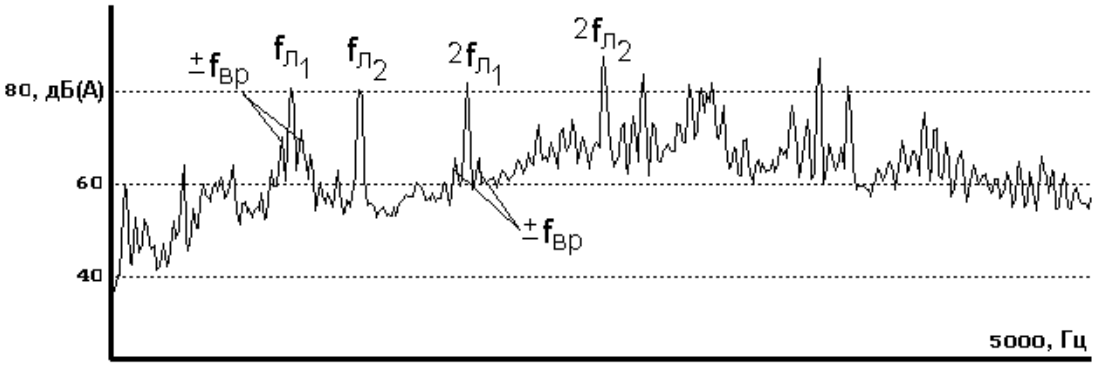
Достоверность диагноза рабочего колеса резко увеличивается, если кроме спектра огибающей рабочего колеса измерять и спектр низкочастотной вибрации корпуса машины или подшипникового узла. В этом случае по данным анализа лопастных (лопаточных) составляющих вибрации и вибрации на частотах, кратных частоте вращения, можно значительно точнее определять величину дефекта.

Диагностическим признаком дефектов лопастей являются рост НЧ вибрации на гармониках $k \cdot f_{\text{вр}}$ (т.е. один из признаков биений рабочего колеса), дополненный ростом гармоник с теми же частотами в спектре огибающей, причём уровни этих гармоник могут превышать уровни лопастных гармоник. Возможно появление и боковых составляющих у лопастных гармоник в спектрах вибрации, и её огибающей. Основным отличием признаков дефектов лопастей от биения рабочего колеса считается преимущественный рост гармоник $k \cdot f_{\text{вр}}$ в спектре огибающей вибрации корпуса, а если машина имеет несколько рабочих колёс, преимущественный рост гармоник $k \cdot f_{\text{вр}}$ в спектре огибающей вибрации корпуса возле дефектного колеса, а не всех колёс, насаженных на один вал. В качестве иллюстрации возможностей обнаружения и разделения биения рабочего колеса и дефекта лопастей, на рис. 3.1 приведены спектры вибрации корпуса двух многоступенчатых компрессоров, в одном из которых имеет место биение рабочего колеса, а во втором – дефекты лопастей одного из рабочих колёс. В обоих спектрах обнаруживаются признаки биений и дефектов лопастей, а

именно, появление боковых составляющих вибрации у лопастных гармоник (составляющие с частотами $k \cdot f_л \pm k_1 \cdot f_{вр}$). Но при биении вала с рабочими колёсами боковые составляющие обнаруживаются сразу у двух лопастных составляющих, а при дефектах лопастей – только у одной.



а)

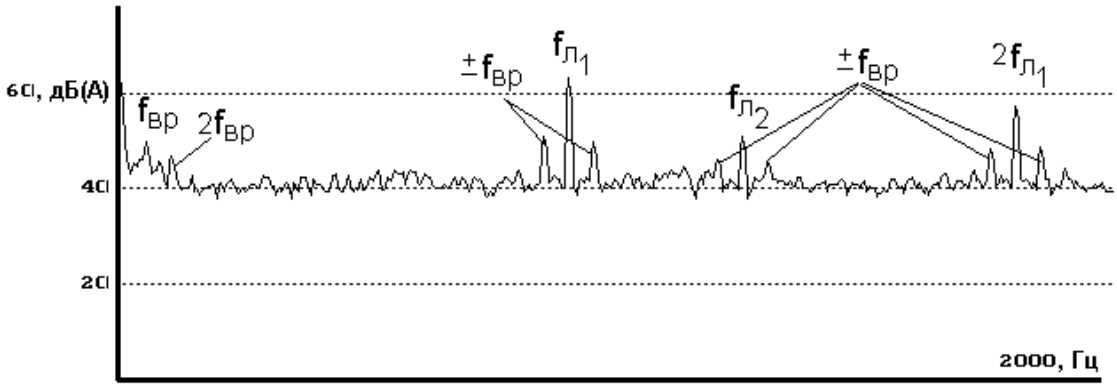


б)

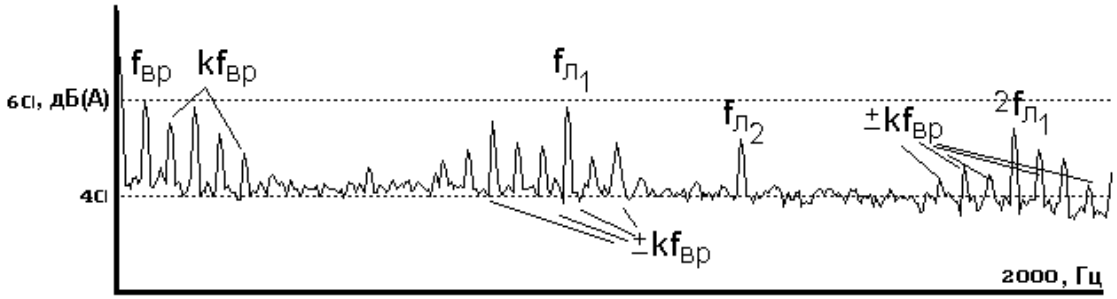
Рисунок 3.1 – Спектры вибрации многоступенчатого компрессора с биением рабочего колеса (а) и дефектом лопасти (б)

Если же биение имеет только одно из рабочих колёс, задача идентификации вида дефекта усложняется. В этом случае необходимо принимать решение по данным измерения спектра огибающей ВЧ вибрации. На рис. 3.2 приведены спектры огибающей вибрации тех же ступеней двух компрессоров, спектры вибрации которых приведены на рис. 3.1. В спектрах огибающей вибрации при

дефектах лопастей число составляющих с частотами $k \cdot f_{вр}$ и их уровень значительно выше, чем при биении рабочего колеса».



а)



б)

Рисунок 3.2 – Спектры огибающей вибрации многоступенчатого компрессора с биением рабочего колеса (а) и дефектом лопасти (б)

Ряд весьма выразительных всплесков в спектре рис. 3.2 (б) даже не нуждаются в комментариях относительно их высокой диагностической ценности. Считая, что для быстрого преобразования Фурье необходимо время:

$$\tau_{ф} \ggg \frac{1}{F_{В}} \tag{3.1}$$

заключаем, что неисправность доступна для обнаружения за несколько секунд (была бы аппаратура).

Убедившись, что существующие радиоэлектронные технические средства удовлетворяют требованиям к вибродиагностической аппаратуре, в том числе в

её полётном варианте, обратимся к свойствам вибродатчика. Здесь, как и для любого радиолокационного контроля пространственных перемещений, существенен динамический диапазон по входу и выходу, а также подлежащая контролю полоса виброчастот. В связи с тем, что в рабочем режиме регулярные перемещения лопаток совмещены со случайными (вибрационными), при сложной форме траектории, традиционное представление динамического диапазона:

$$D_l = \frac{\delta l_{\text{макс}}}{\delta l_{\text{мин}}} \tag{3.2}$$

напрямую применить трудно.

В данном выражении δl – есть некоторое обобщение изменённого положения лопатки относительно датчика, включающее регулярное двумерное (по плоскости диска) перемещение, все виды вибраций (изгибные, крутильные колебания), а также растяжение из-за центробежной силы [1]. В совокупности они создают отклик в виде изменения частоты генерации и поэтому датчик фактически фиксирует некоторую аномалию. Часть этих аномалий, а возможно большинство, или даже все, могут быть идентифицированы по изменению спектра. Но такая идентификация возможна и правомерна для конкретного ГТД и для конкретного рабочего колеса компрессора или турбины. Понятно, что подобная задача не входит в число поставленных задач в данной диссертационной работе. Следует особенно подчеркнуть, что в диагностический отклик δl, не входит смещение зондирующей частоты, обусловленное внесением лопаток в поле антенны, и имеющее место в неработающем двигателе. Это смещение суть изменение рабочей точки и должно быть учтено при конструировании датчика. По нашим экспериментальным данным это смещение имеет порядок долей или единиц процентов.

В радиолокационных виброметрах с направленным и немодулированным излучением [37] обязательно условие:

$$\lambda = \frac{c}{f} > \delta l_{\text{макс}} \tag{3.3}$$

где $\delta l_{\text{макс}}$ – максимальная амплитуда виброперемещения. Иначе возникает неоднозначность (см. ниже) в оценке амплитуды, виброскоростей и виброускорений. При модулированном излучении [75] эта неоднозначность устранима.

С учётом сказанного ограничимся некоторыми грубыми оценками. Из общих представлений об измерительном приборе $\delta l_{\text{мин}}$ определяется собственными шумами, пересчитанными к входу, а $\delta l_{\text{макс}}$ – раствором квазилинейного участка передаточной характеристики. Обе величины различны по спектру. Второй из этих критериев в нашем случае неприемлем, ибо нелинейный эффект возникает при положении лопатки, невозможном в реальной конструкции (лопатка не может быть поставлена в 10 мм и параллельно плоскости антенны).

У нас максимальный отклик на изменение реактивной проводимости антенны и/или фазы коэффициента отражения обусловлен её регулярным перемещением и составляет (по данным гл. 2) около 1° ≈ 0,015 рад. для коаксиального датчика и гораздо больше для цилиндрического. Попутно заметим, что в радиотехнике глубина фазовой модуляции ~ 10^{-4}…10^{-5} рад. обеспечивает формирование высококачественного радиосигнала, а прецизионные приборы, применяемые в контроле стабильности частоты и фазы, обладают фазовыми шумами менее 10^{-9} (по среднему квадрату). Если обратиться к выходному сигналу датчика (п. 2.5, 2.6), то там относительная девиация частоты ~ 10^{-3} и ~ 10^{-5} соответственно (в УКВ-ЧМ вещании ~ 10^{-3}…10^{-5}, соответственно *forte* и *piano*), что вполне нормально для бытовых радиоприёмников. Надо полагать, что в авиационной аппаратуре этот показатель лучше (т.е. меньше) и, следовательно, выявление аномалий в отклике не слишком трудная задача.

Величину $\delta l_{\text{мин}}$ определим в п. 3.3.

Дальнейшее изложение результатов данной главы имеет особенность, обусловленную объективными свойствами вибродатчиков, и состоит в не-

сколько нетрадиционном для диссертационных работ разбиении её на разделы. Дело в том, что совокупность диагностического и помеховых воздействий в ходе формирования откликов преобразуется путём различных физических процессов в вибродатчике, главным из которых является автодинное преобразование в частоту радиодиапазона. Его претерпевают три фактора:

– вибрационное и другие перемещения деталей;
– флуктуационный нагрев антенны;
– концентрация заряженных частиц (электронов) в продуктах сгорания.

Остальные помехи внедряются в структуру сигнала «в обход» автодинного принципа.

Поэтому сначала изучен и структурирован первый (неавтодинный) этап формирования сигнала (п. 3.2). Затем рассмотрено автодинное преобразование диагностического сигнала и двух, вышеназванных, помеховых факторов (п. 3.3). Наконец, в п. 3.4 описаны отклики на остальные помехи и найдены их спектры.

Интегральная оценка диагностической эффективности (контролеспособности) датчика сделана на основе информационного критерия, в котором сопоставлены спектры всех откликов. Этот раздел вынесен в четвёртую главу данной диссертации.

3.3 Три формы диагностического отклика и их спектры

В данном разделе речь идет о трёх формах отклика, имеющих место на разных этапах измерительного преобразования. Все эти формы имеют аналоги в радиолокации, но ближе всего к нашей задаче относятся радиолокационные системы с непрерывным излучением ЧМ колебаний [75] и фиксированной частотой модуляции. У нас эта частота – частота следования лопаток, или рабочая частота. Таким образом, диагностический процесс включает операции с тремя формами спектра: радиочастотным (диапазон гигагерцовый), рабочим (диапазон десятков килогерц) и, собственно, диагностическим – *информационным*

(десятки герц – единицы килогерц). Но уже это разделение не совсем строгое, поскольку некоторая диагностическая информация содержится (и может быть извлечена, или не извлечена) непосредственно и в радиочастотном, и в рабочем спектрах.

3.3.1 Общая структура и компоненты спектров

Радиочастотный спектр формируется автодинным приёмопередатчиком (вибродатчиком), и является продуктом взаимодействия зондирующего сигнала с тремя видами процессов в турбине (компрессоре): квазирегулярным рабочим, вибрационным и помехами.

Регулярный процесс формирует идеальный эталонный спектр. При низком (или допустимом) уровне вибраций спектральные линии остаются достаточно узкими, и тогда можно говорить о реальном эталонном, а также и о допустимом спектре рабочего процесса (т.е. о допустимом уширении спектральных линий). Этот спектр расположен в радиочастотном диапазоне (точнее, в его сверхвысокочастотной области), он представлен на рис.3.3 (а), и, как всякий радиочастотный сигнал, для непосредственного функционального диагностирования неудобен, хотя как необходимый промежуточный результат он подлежит исследованию.

В ходе спектрального анализа с применением известных в радиотехнике методик, радиочастотный измерительный сигнал подвергается двухэтапному детектированию, осуществляемому во вторичном блоке.

На первом этапе детектирование частотное (вариант – фазовое). Путём детектирования выявляется спектр рабочего процесса, как отклик на совокупность регулярного и вибрационного (т.е. случайного) перемещений. Его основой является колебание с частотой $F_{И}$ (рис. 3.3 (б)).

По структуре этот спектр подобен спектру тока в резонансном усилителе мощности радиопередатчика, где соотношения амплитуд компонентов выражены через знаменитые коэффициенты Берга [49]. В нашем случае форма импульсного отклика на движение сильно отличается от косинусоидального (как у

Берга), что подтверждает, например, рис. 2.18. Отсюда следует, что эти соотношения подлежат анализу. Диагностическими признаками здесь являются частота и ширина спектральных линий, частотный интервал (шаг спектральной сетки), а также соотношение амплитуд дискретных компонентов. Некоторое сходство, как может показаться, есть с общеизвестным спектром доплеровского автодинного локатора. Но такое сопоставление неправомерно, поскольку здесь компоненты, распределены не по Бергу, а по Бесселю.

На втором этапе детектирование амплитудное (как вариант – синхронное), совмещённое со спектральным анализом с использованием перестраиваемого узкополосного фильтра. На рис. 3.3 (в) показаны спектры, собственно, вибропроцессов. При этом намеренно представлена неблагоприятная – предаварийная ситуация: нижняя кривая соответствует допустимому уровню вибраций, а верхняя – реальному.

Обратимся к другим неисправностям ротора, отмеченных в [1], и их отображению в спектрах (рис. 3.3): неравномерность вращения вала, биение вала, поломка и обледенение лопаток (первых ступеней компрессора низкого давления) [1], помпаж.

Неравномерность или проскальзывание – процесс достаточно низкочастотный и нерегулярный [1]. Его сплошной спектр предположительно расположен ниже (по частоте) вибрационного и на рис. 3.3 (в) не показан, ввиду его близости к началу координат.

Регулярное перемещение лопаток по принципу работы вибродатчика вызывает частотную модуляцию радиосигнала. Спектр включает несущее колебание с частотой f_0 и боковые составляющие с частотами $f_m = f_0 \pm n \cdot F_И$, $F_И$ является (как уже сказано) своего рода (по аналогии с рядом радиосистем) поднесущей, число и амплитуда последних определяется формой лопаток, отображённой формой импульса отклика, но не свойствами широкополосной частотной модуляции; здесь ЧМ узкополосна (рис. 3.3 (в)). Сам спектр дискретный и при полной идентичности лопаток (включая угловое расстояние между сосед-

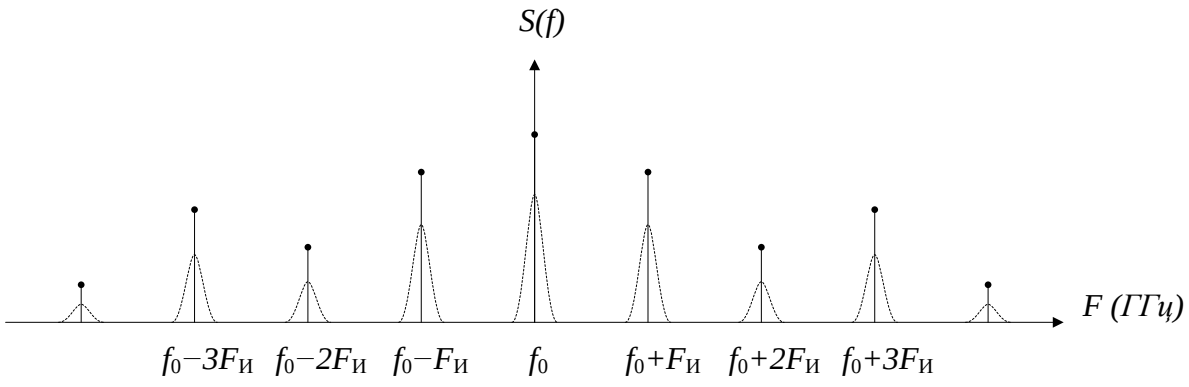
ними) каждая боковая составляющая представлена одной линией. В действительности разброс по размерам довольно значителен (о чём косвенно свидетельствует приведённый ниже факт). Поэтому каждая из боковых составляющих состоит из множества близких друг к другу спектральных линий – носителей основной диагностической информации.

Вибрационное перемещение лопаток преобразуется в амплитуды только что названных спектральных составляющих. При этом сплошной спектр вибропроцесса обуславливает размывание спектральных линий, которое усугубляется значительным разбросом (до – пятнадцати процентов [1]) индивидуальных виброчастот лопаток. Последнее обстоятельство, по-видимому, связано с упомянутым в предыдущем абзаце разбросом по размерам. С некоторой условностью, виброспектр представлен на рис. 3.3 (а) штриховой линией.

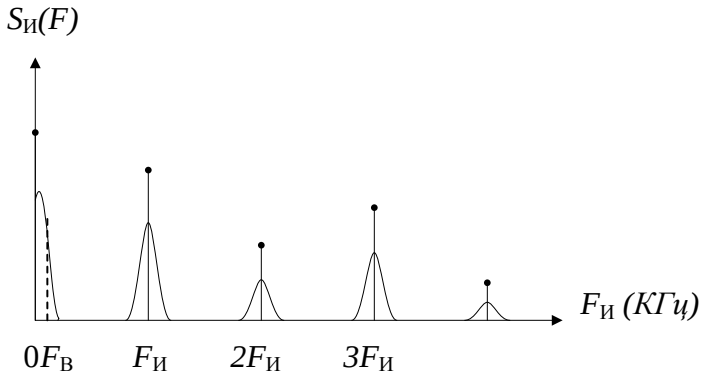
Биение вала, вызванные изношенностью его опор, скорее всего совпадают по частоте с вращением вала, т.е. $F_Б = N$ (рис. 3.3 (в), обозначено пунктирной линией).

Поломка одной лопатки приводит к нерегулярности импульсной последовательности, присущей отклику. При наличии на контролируемом рабочем колесе ротора большого числа (обычно порядка сотни) лопаток, общая картина спектров (рис. 3.3 (а, б)) не очень изменится. Но появится другой регулярный процесс, обусловленный прохождением этой лопатки (её остатка) мимо вибродатчика. Частота этого процесса $F_А = N = F_Б$. Т.е. в спектре отклика появится дополнительный компонент, по частоте неотличимый от биения вала, но сильно уступающий по амплитуде. Поэтому установление различия по какому-то другому признаку должно стать предметом исследования. Однако уже сейчас можно сказать, что вибродиагностика конкретного ГТД, когда она будет осуществлена, охватит все диски. Следовательно, вибрации вала будут отмечены всеми вибродатчиками, а поломки лопатки – только одним.

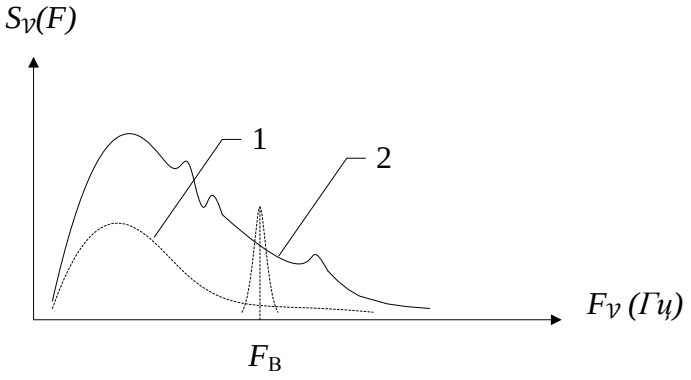
Довольно сложно пока предсказать по характеру и в количественном отношении спектральный отклик на обледенение лопаток компрессора.



а)



б)



в)

Рисунок 3.3 – Радиочастотный (а), рабочий (б), вибрационный (в) спектры.
1 – допустимая форма огибающей, *2* – огибающая при аномальной ситуации

Среди целого ряда последствий, вызванных неправильным использованием системы обогрева входной части компрессора автор [1] называет: «увеличение уровня вибраций и тряски на рабочих лопатках первой ступени компрессо-

ра, что вызывает неуравновешенность ротора, и изменяет характер обтекания лопаток потоком воздуха». Поставить изменение виброспектра в соответствии с названными процессами затруднительно, здесь необходимы исследования совместно с авиаспециалистами (натурный эксперимент).

Эти две задачи оставим на следующие разделы диссертационной работы.

В заключение данного раздела следует отметить (но не более) ещё один эффект, вызванный влиянием на структуру электромагнитного поля, а следовательно, и на спектр, наличия и перемещения рабочего колеса следующей ступени турбины, образующего в диагностической камере второе «диагностическое окно». Соответствующий компонент отклика можно расценивать, как помеху, но и как источник информации о состоянии следующей ступени. Если говорить о помехе, то структура её спектров аналогична представленным на рис. 3.3. Но вследствие различия числа лопаток на соседних колёсах (а это различие составляет несколько процентов) частоты модуляции различны, и такая помеха устранима в рамках простых инженерных решений.

3.3.2 Гармонический анализ радиочастотного диагностического отклика

Парциальный (элементарный) отклик датчика формируется однократным прохождением лопатки через ЭМП датчика. Отклик представляет собой радиоимпульс в виде скачка частоты δf довольно сложной формы. Последовательность этих импульсов с частотой следования $F_{\text{И}}$ (формула (2.16)) формирует радиочастотный диагностический сигнал, модулированный последовательностью импульсов примерного вида рис. 3.4, спектр последовательности которых подлежит изучению в данном разделе.

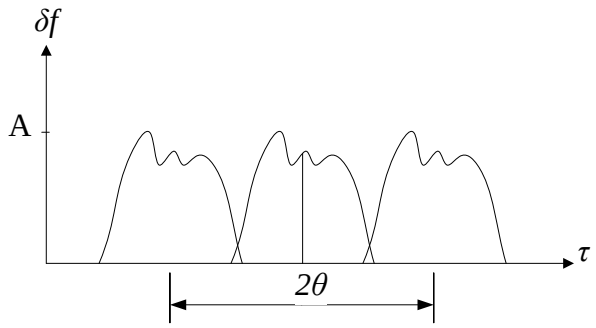


Рисунок 3.4 – Примерный вид последовательности импульсов радиочастотного диагностического сигнала

Упомянутая выше и хорошо известная в радиотехнике аналогия со спектрами процессов в резонансных усилителях мощности [49] побуждает провести анализ виброспектров подобным образом. Предварительная грубая оценка спектрального состава отклика может быть основана на прямом заимствовании. При этом форма парциального отклика описывается косинусом текущей фазы $\tau = 2\pi \cdot F_{И} \cdot t$ в пределах угла отсечки 2θ, который вместе с амплитудой отклика однозначно определяет спектральный состав последовательности. Количественной мерой служат коэффициенты разложения Фурье $\gamma_k(\theta) = \frac{a_k}{A}$, где A – амплитуда импульса, a_k – амплитуда k-той спектральной составляющей с частотой $f_k = k \cdot F_{И}$ $(k = 1, 2, 3 \ldots)$. Другая мера – коэффициенты формы $g_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}$ эта мера удобнее (особенно для нас), так как в ходе спектрального анализа избавляет от необходимости определения амплитуды импульса.

Описанный традиционный подход оправдывает себя в приложении к оценке и оптимизации КПД и мощности усилителя. В этом приложении наиболее удачные решения основаны на выборе угла отсечки (обычно $\theta \leq \pi/2$) и симметрии импульса. При этом коэффициенты второй и третьей гармоник $\gamma_{2,3}$ имеют значимые величины, но практической роли не играют.

Наша задача иная. Достоверная оценка формы импульса, свидетельствующей о состоянии лопатки (лопаток) и других узлов проточного тракта как раз требует наилучшего знания спектра, включая не только коэффициенты γ_k, но и их производные по интересующим параметрам. К сожалению, при угле $2\theta = 2\pi$ коэффициенты $\gamma_{2,3}$ и $g_{2,3}$ в усилителе равны нулю.

Таким образом, в сопоставлении с аналогом видны следующие трудности:

– сложная (несимметричная и негладкая) форма импульса отклика;
– близость угла отсечки к π и даже «нахлест» соседних импульсов, отчего коэффициент $g_1 \approx 1$, и почти не зависит от угла отсечки, а коэффициенты $g_{2,3} \to 0$;
– неповторяемость формы импульсов (особенно вершины) из-за неидентичности лопаток как по форме, так и по резонансным виброчастотам.

Поэтому известный метод анализа спектра [49] требует модификации, и в качестве первого шага – уточнения формы импульса парциального отклика.

Представим единичный (парциальный) импульсный отклик двумя отрезками (рис. 3.5)

– восходящим в пределах фазового угла $\theta_1 = \Omega_И \cdot t_1 = 2\pi \cdot F_И \cdot t_1$ с общеизвестной косинусоидальной аппроксимацией в текущей фазе $\tau = \Omega_И \cdot t$;
– суммой двух процессов: нисходящей ветвью косинуса с медленной фазой $p \cdot \tau, (p < 1)$ и колебанием с быстрой фазой $q \cdot \tau = q \cdot \Omega_И \cdot t, (q > 1)$, и амплитудой $\mu \lll 1$ – оба процесса действуют в пределах фазового угла θ_2.

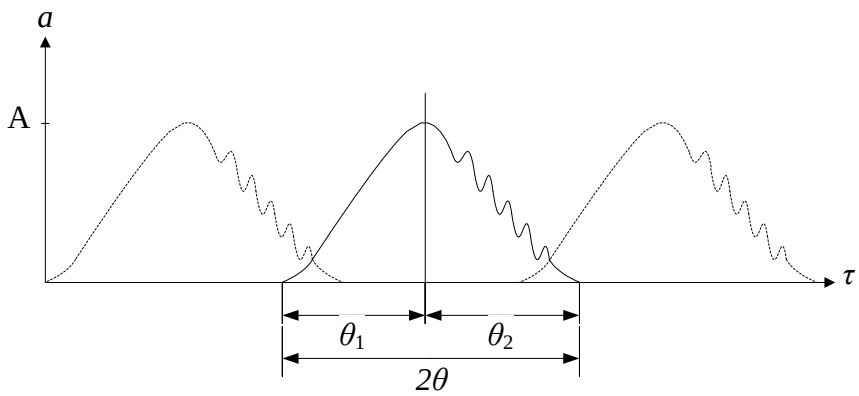


Рисунок 3.5 – Уточнённый вид последовательности импульсов радиочастотного диагностического сигнала

Такой полукачественный подход оправдан особенностями функциональной диагностики, в частности, стремлением хотя бы обнаружить аномалию в спектре по изменению формы отклика. Надёжность этого обнаружения возрастает при сопоставлении нескольких спектральных компонентов, представленных коэффициентами a_i.

Теперь временная диаграмма (рис. 3.5) $a(\tau)$ аппроксимирована совокупностью выражений:

$$a(\tau) = \begin{cases} 0{,}5 \cdot A \cdot (\cos\tau - \cos\theta_1), & \tau \in (-\theta_1, 0) \\ 0{,}5 \cdot A \cdot (\cos\theta_1 - \cos(p \cdot \tau) + \mu \cdot \cos(q \cdot \tau)), & \tau \in (0, \theta_2) \end{cases} \quad (3.4)$$

при этом судя по результатам п. 2.4 число периодов осцилляции вершины импульса составляет несколько единиц и следовательно $q \in (3 \ldots 6)$, а $\mu \in (0{,}1 \ldots 0{,}4)$. Конкретные значения q и μ связаны как с формой собственно лопатки, так и подвержены влиянию «соседей», искажающих в какой-то мере структуру ЭМП.

Коэффициенты разложения определяются по Фурье:

$$\gamma_0(\theta_{1,2},p,q,\mu) = \\ = \frac{1}{\pi}\cdot\int_{-\theta_1}^{0}(\cos\tau-\cos\theta_1)\,d\tau+\frac{1}{\pi}\cdot \\ \cdot\int_{0}^{\theta_2}(\cos\theta_2-\cos(p\cdot\tau)+\mu\cdot\cos(q\cdot\tau))\,d\tau \tag{3.5}$$

$$\gamma_n(\theta_{1,2},p,q,\mu) = \\ = \frac{2}{\pi}\cdot\int_{-\theta_1}^{0}(\cos\tau-\cos\theta_1)\cdot\cos(n\cdot\tau)\,d\tau+\frac{2}{\pi}\cdot \\ \cdot\int_{0}^{\theta_2}(\cos\theta_2-\cos(p\cdot\tau)+\mu\cdot\cos(q\cdot\tau))\cdot\cos(n\cdot\tau)\,d\tau \tag{3.6}$$

Интегрируя, получим:

$$\gamma_1(\theta_{1,2},p,q,\mu) = \\ = \frac{1}{\pi}\cdot\sin(2\cdot\theta_1)+\frac{1}{\pi\cdot p}\cdot\sin(2\cdot\theta_2)+\frac{\mu}{2\pi\cdot q}\cdot \\ \cdot\left[\frac{\sin((q+1)\cdot\theta_2)}{q+1}-\frac{\sin((q-1)\cdot\theta_2)}{q-1}\right] \tag{3.7}$$

$$\gamma_n(\theta_{1,2},p,q,\mu) = \\ = \frac{1}{2\cdot n\cdot\pi}\cdot\left\{\frac{\sin[(n+1)\cdot\theta_1]}{n+1}-\frac{\sin[(n-1)\cdot\theta_1]}{n-1}\right\}+\frac{1}{2\cdot n\cdot p\cdot\pi}\cdot \\ \cdot\left\{\frac{\sin[(n+1)\cdot\theta_2]}{n+1}-\frac{\sin[(n-1)\cdot\theta_2]}{n-1}\right\}+\frac{\mu}{2\cdot n\cdot p\cdot\pi}\cdot \\ \cdot\left\{\frac{\sin[(q+n)\cdot\theta_2]}{q+n}-\frac{\sin[(q-n)\cdot\theta_2]}{q-n}\right\} \tag{3.8}$$

Подчеркнём, что полученные соотношения описывают радиочастотный спектр и спектр диагностического сигнала на частоте модуляции $F_И$ (рис. 3.3 (а, б) соответственно).

В таблице 3.1 даны примеры спектрального состава диагностического сигнала для восьми вариантов формы импульса, отличающихся крутизной переднего фронта и изрезанностью вершины. Как и ожидалось, асимметрия гладких компонентов ($\theta_1 \neq \theta_2$) лишь несущественно сказывается на амплитуде первой гармоники. Следует помнить, что для идеального косинусоидального импульса при $2\theta = 2\pi$, $\gamma_2 = \gamma_3 = g_2 = g_3 = 0$. В нашем случае неравенство этих коэффициентов нулю обусловлено осцилляциями вершины импульса, но в некоторой степени – и асимметрией.

Таблица 3.1 – Спектральный состав диагностического сигнала для восьми вариантов формы импульса

$\theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = \frac{3}{2} \cdot \pi, p = 0{,}25$					$\theta_1 = \frac{\pi}{4}, \theta_2 = \frac{3}{4} \cdot \pi, p = 0{,}125$			
μ	0,25		0,5		0,25		0,5	
q	3	5	3	5	3	5	3	5
γ_1	1	0,97	0,94	0,91	1	0,96	0,95	0,92
γ_2	0,08	0,13	0,11	0,15	0,14	0,19	0,18	0,21
γ_3	-0,03	-0,05	-0,044	-0,062	0,04	0,053	0,07	0,074
g_1	1	0,95	0,96	0,92	-	-	-	-
g_2	0,08	0,084	0,1	0,11	-	-	-	-
g_3	-0,2	-0,35	0,04	0,06	-	-	-	-

Хотя амплитуды второй и третьей гармоник невелики, но обогащая рабочий спектр (рис. 3.3 (б)), дают известную диагностическую информацию. Здесь

надо учитывать, что в спектре собственно диагностического отклика (рис. 3.3 (в)) этот компонент отсутствует вследствие известных эффектов при детерминированном подходе.

Спектральное распределение, отображённое коэффициентами $\gamma_n(\theta_{1,2}, p, q, \mu)$ и $g_n(\theta_{1,2}, p, q, \mu)$ не противоречит ни аналогу [49], ни рис. 3.3; но являет собой частный случай: «угол отсечки» $\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2$ близок к π. В радиотехнике это имеет место в линейном режиме усиления, причём $\gamma_0 = \gamma_1 = 0{,}5$, $g_1 = 1$, а $\gamma_{2,3}$ и $g_{2,3}$ близки к нулю. Физический процесс, обуславливающий импульсную частотную модуляцию, у нас другой. Для него характерна пространственная близость соседних лопаток друг к другу, при достаточно большом поперечнике ЭМП антенны (его эффективной в смысле формирования отклика части). Лишь некоторая асимметрия двух первых аппроксимирующих функций обуславливает хотя и малые, но ненулевые значения важных для быстрой диагностики гармоник $n = 2, 3, \ldots$

В этом плане пугающая своей «негладкостью» (и существенно усложнившая аппроксимацию) вершина импульса в немалой степени улучшила контролепригодность метода, поскольку увеличила вклад именно этих гармоник. По формуле (3.8) видно, что с ростом «негладкости», т.е. порождающей её неравномерности структуры ЭМП диагностические возможности возрастают.

Приведённые рассуждения относятся к математическим ожиданиям коэффициентов g_n и γ_n, т.е. к идеальному спектру. Фактически, в силу упомянутых уже причин, спектральные линии размыты даже при невибрирующих лопатках, точнее представляют собой множество чрезвычайно близких друг к другу (и недоступных для разрешения) спектральных линий.

Вместе с тем, задача здесь сходна с оценкой «чистоты» спектра высокостабильных возбудителей колебаний – автогенераторов и синтезаторов частот [83]. Там при использовании обычной аппаратуры обеспечивается разрешение на уровне $10^{-5}\ldots10^{-6}$, и даже 10^{-11} при прецизионной аппаратуре. Поэтому прин-

ципиальной трудности в выявлении огибающей виброспектра при функциональной диагностике не существует.

Двумя определяющими показателями радиолокационных измерительных систем являются чувствительность и полоса частот.

Чувствительность $K_Д(F)$, как производная от отклика по воздействию $d\gamma_0/dl$, $d\gamma_1/dl$ или dg_1/dl, в данном случае, трудно представима в явном виде, из-за разнообразия воздействий. В обобщенном смысле и в приложении к спектрам можно записать:

$$S_F(F) = K^2(F) \cdot S_l(F) \tag{3.9}$$

далее представив $K^2(F)$ в виде произведения коэффициентов передачи узлов датчика (гл. 2). В диагностируемой полосе частот, как это следует из той же Главы 2, $K^2(F) = const$, даже если включить в эту полосу вторую и третью гармоники.

Конкретные значения чувствительности в частных случаях могут быть определены по результатам FEKO-анализа. Так, по данным табл. 1А (см. приложение А) для крутильной вибрации $K(F) = df/d\varphi$, где φ – угол закручивания, на частоте 28 ГГц составляет приблизительно (150-200) Гц/град. В относительных единицах это меньше одной миллионной доли среднего значения, и поэтому требования к вторичным приборам достаточно высокие. Однако все «простые» измерения в авиации уже сделаны.

3.3.3 Детальная структура диагностического спектра

Ввиду воздействия на чувствительный элемент датчика целого ряда факторов, повсеместно присущего тепловым энергетическим установкам, спектр диагностического сигнала содержит отклики на эти факторы, далее называемые помеховыми. Перечень таковых, в применении к радиоволновым датчикам в

ЖРД, составлен в [69] и, позднее, дополнен в [70], в части структуры спектров помех.

Особенности ГТД и стоящей задачи требуют некоторых дополнений и перестановок в этом перечне.

Наряду с откликом на основной диагностический параметр выявлению и оценке формы огибающей спектра подлежат следующие помеховые воздействия:

– электронная концентрация пламени и температура газового потока;
– собственное радиоизлучение пламени (СРП);
– вибрации корпуса, осаждение сажи на антенне, эрозия антенны;
– продукты корреляционных взаимосвязей перечисленных факторов между собой и с основным диагностируемым параметром.

Как видно, отклики разбиты на четыре группы. Эти группы различаются по физическому принципу формирования откликов, по степени их изученности, и по успехам предшественников [69, 70], в компенсации (ослабления) помеховых откликов. В части последнего обстоятельства существенно, что исследователей интересовал спектр в узкой полосе ~ (5…50) Гц, нас же интересует не только полоса виброотклика (рис. 3.3 (в)), но и рабочий спектр (рис. 3.3 (б)). Поэтому требуемая ширина спектра возрастает на два порядка, и это обстоятельство требует существенного увеличения коэффициента отражения, и амплитуды автодинного отклика для поддержания приемлемого соотношения сигнал/помеха и, как следствие, улучшения контролеспособности.

Здесь требуется аналитическая оценка и в необходимом случае – выработка мер улучшения информативности диагностических операций.

Влияние факторов второй и третьей групп требует меньшего внимания, поскольку в отношении СРП основные оценки сделаны в ряде работ: в [55, 56] для автодина БРЛ общего назначения и в [70] для коаксиального датчика.

В отношении факторов третьей группы в [70] показано, что вибрации корпуса существенны лишь при резонансах, которых у нас не ожидается, и что имеющийся экспериментальный материал пока не позволяет оценить постоян-

ные времени процессов эрозии и осаждения, но ясно, что их спектры лежат в полосе менее сотых, или даже тысячных долей герца. Эта область в применении к автогенераторам пока недоступна даже для прецизионных методов. Пока авторы ограничиваются бороскопическим и чисто органолептическим осмотром.

Исходя из сказанного, далее сосредоточим внимание на спектрах откликов автодинного и корреляционного происхождения.

3.4 Спектр автодинного отклика

Автодинный отклик формируется совокупностью основного – вибрационного ($\mathcal{V}$) и двух помеховых – концентрационного (N), и температурного (T) факторов. Их объединяет влияние на структуру ЭМП и/или непосредственно на комплексное сопротивление антенны, хотя физические механизмы влияния каждого из факторов различны.

Помеховые факторы в ЖРД и отклики на них коаксиальных датчиков подробно изучены [67-70]. Здесь повторим, что в работе [69] диагностическим параметром была спектральная плотность (СП) концентрации электронов $S_N(\Omega)$, а температура (и её СП $S_T(\Omega)$) помехой, а в работе [70] наоборот. Оба автора нашли системные, схемные и конструктивные решения, обеспечившие существенное улучшение отношения сигнал/помеха, применительно к их конкретным задачам. Более того, в [70] уделено внимание ещё одной помехе – узкополосной вибрации, деформирующий корпус датчика. Поскольку оба автора занимались диагностикой ЖРД, то виброотклик антенны и коэффициента отражения их не интересовал. Зато в [70] много внимания уделено взаимной корреляции откликов.

Опираясь на эти результаты, представим СП автодинного отклика в виде:

$$S_{\mathrm{A}}(\Omega) = \sum_r K_r^2(\Omega) \cdot S_r(\Omega) + S_k(\Omega) \tag{3.10}$$

где $K_r(\Omega), (r = \mathcal{V}, N, T)$ – комплексные (частотнозависимые) чувствительности датчика по отношению к трём воздействующим факторам, $S_k(\Omega)$ – условная запись совместных СП трёх откликов (к ним мы обратимся ниже в § 3.4).

Учитывая, что $K_{N,T}(\Omega)$ известны [70], обратимся к отысканию $S_{\text{А}}(\Omega)$, т.е. главным образом к $K_{\mathcal{V}}(\Omega)$, иначе говоря, к нахождению амплитудно-частотной характеристики вибродатчика и результирующей СП отклика.

Метод анализа заимствован из множества работ, посвящённых флуктуациям в автоколебательных системах, главная из которых – монография А.Н. Малахова [59]. Разработаный названным автором метод включает отыскание алгоритмов преобразования амплитудно-частотных флуктуаций элементов схемы автогенератора в параметры квазигармонического автоколебания, и отыскание спектрально-корреляционных характеристик последнего. В том числе, при внешней синхронизации автогенератора гармоническим (т.е., идеальным) сигналом.

В нашем случае ситуация несколько сложнее: синхронизирующий сигнал заменён квазигармоническим сигналом автодинного отклика, модулированному процессами флуктуационного характера. Ситуация осложнена воздействием аддитивного шума СРП.

Найдём нормированный частотный отклик, вызванный автодинным эффектом, вновь обратившись к укороченному уравнению (2.25), которое представим в двух видах с различной нормировкой:

$$\frac{\delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{d\eta}{dt} = -\frac{\Gamma}{2 \cdot Q_3} \cdot \left(\sin\eta \cdot \delta_\Gamma - \cos\eta \cdot \delta_\eta\right) \tag{3.11}$$

$$\frac{\delta\omega}{\Pi_4} = -\frac{1}{2} \cdot \left(\sin\eta \cdot \delta_\Gamma - \cos\eta \cdot \delta_\eta\right) \tag{3.12}$$

где $\Pi_4 = |\Gamma| \cdot \Pi_3$, $\Pi_{3,4}$ – соответственно, прочность предельного цикла и полоса автодинного отклика, η – фаза коэффициента отражения в рабочей точке, δ_Γ и δ_η – флуктуации амплитуды и фазы отражения, в форме которых участвуют все три воздействия.

Здесь, в отличие от [70] трудно достичь идеальной точки $\eta = 0$, при которой режим автогенератора изохронен и $\frac{\delta\omega}{\omega_0} \approx -\Pi_4 \cdot \delta_\eta$, а $\frac{\delta\omega}{\Pi_4} = -\delta_\eta$, что значительно упрощает понимание ситуации, и количественную оценку. Причина этой трудности в том, что в формировании отражённого сигнала и в коаксиальном, и тем более в цилиндрическом вибродатчике превалирует не антенна, а диагностическая камера: отражение ЭМП от её неподвижных деталей, т.е. от статора, приводит к смещению рабочей точки. Спектральная плотность радиочастотного отклика:

$$S_\omega(\Omega) = \frac{1}{4} \cdot \left\{ K_c^2(\Omega) \cdot S_\eta(\Omega) + \frac{K_s^2(\Omega)}{1 + \Omega^2/\Pi_3} \cdot S_\Gamma(\Omega) \right\} \tag{3.13}$$

где $K_c^2(\Omega) = \frac{1}{1+\Omega^2/\Pi_4^2 \cdot \cos^2\eta}$, $K_s^2(\Omega) = \frac{1}{1+\Omega^2/\Pi_4^2 \cdot \sin^2\eta}$; $S_\eta(\Omega)$, $S_\Gamma(\Omega)$ – спектральные плотности амплитуды и фазы коэффициента отражения.

Ввиду сходства зависимостей $K_c(\Omega)$ и $K_s(\Omega)$ с АЧХ общеизвестных фильтров нижних частот, нетрудно заключить, что полоса неискаженного автодинного отклика близка к $\Pi_4 = |\Gamma| \cdot \Pi_3$, особенно при удачном выборе рабочей точки ($\eta = 0$), где к тому же влияние неизохронности (второй член в (3.12)) минимально.

Если прочность предельного цикла $\Pi_3 \sim 10^{-3} \cdot \omega_0$, то при гигагерцовых зондирующих частотах для коаксиального датчика диагностическая полоса составит десятки килогерц, а для цилиндрического, вследствие меньшей эквива-

лентной добротности – сотни, и даже больше килогерц. Первый результат может оказаться недостаточным для получения неискаженного спектра радиосигнала (т.е. $П_4 \lesseqgtr m \cdot F_И$). Цилиндрический датчик подобного беспокойства не вызывает. По отношению же к «чистому» виброотклику оба типа датчиков работоспособны, т.е. адекватно отображают виброспектр.

Согласно данным работы [69] отклики на флуктуации концентрации N_e и температуры $T_А$ здесь совершенно незначительны. Это обусловлено низкой в ГТД ленгмюровской частотой $f_Л = \sqrt{b \cdot N_e}$, где $b \approx 80\,Гц^2 \cdot м^3$, $N_e \sim (10^{10} \ldots 10^{12})\ м^{-3}$ (это для первой ступени турбины ВД, дальше – меньше), т.е. $f_Л \ll f_0$. В отношении ослабления температурной помехи, вопрос решается выбором толщины мембраны в коаксиальном датчике [69, 70], а в цилиндрическом она просто не возникает.

Большой интерес представляют работы В.Я. Носкова и его коллег [111], развивающий подход [59] к анализу флуктуаций в неавтономных генераторах.

В нашей ситуации всей совокупности помеховых воздействий могут быть поставлены в соответствие флуктуации в автогенераторе. Укороченные уравнения (3.11) принимают вид:

$$\frac{\delta\omega}{\omega_0} = -\frac{Г}{2 \cdot Q_З} \cdot \left(\sin\eta \cdot \delta_Г - \cos\eta \cdot \delta_\eta\right) - \sum_{ш} K_ш \cdot e_ш(t) \qquad (3.14)$$

где $e_ш(t)$, $K_ш$ – помеховый компонент и коэффициент его отклика (в [111] это α_{11}). Среди них только часть имеют отношение собственно к автодину, как в [59]. Другие – плазма пламени, её температура и собственное радиоизлучение изучены в [57], а температура и плазма весьма подробно в [69, 70], но в очень узкой полосе.

Для широкополосной вибрации и рабочего спектра граничная частота автодинного оклика:

$$\Omega_{\text{гр}} = \frac{\Gamma \cdot \omega_0}{2 \cdot Q_3} \tag{3.15}$$

Здесь наш результат точно совпадает с [111]: $\tau_a = Q_{\text{н}}/\alpha_{11} \cdot \omega_0$

Реально для гигагерцового диапазона – это единицы мегагерц, что безусловно охватывает не только виброспектр, что важно для авторов [111], но и весь рабочий спектр (рис. 3.3 (б)), что важно для нашего способа.

3.5 Корреляционные компоненты спектра

Корреляция откликов обусловлена рядом причин, среди которых автор [70] выделяет применительно к ЖРД естественные, методические, системные, аппаратурные и технологические.

В ГТД всё это есть, но содержание требует уточнений.

Естественные причины в ГТД, как и в любой ТЭУ, порождены физическими процессами в проточном тракте, определяются режимом полёта и, что главное – никак не зависят от метода диагностики. Одну из главных ролей здесь играет турбулентность газового потока [1].

К методическим причинам автор [70] относит причины, порождённые особенностями методов диагностики (в нашем случае – радиолокации) и, в частности, электродинамической зависимостью параметров антенны от концентрации электронов, а также от температуры.

Системные причины обусловлены нелинейными процессами в конкретной радиосистеме. Автодинная структура системы и системный диагностический алгоритм, т.е. цепочка преобразований $\delta l \longrightarrow \delta\dot{y} \longrightarrow \delta\dot{\Gamma} \longrightarrow \delta\omega$, порождает на всех этапах $\delta\dot{y}_{\text{A}} \longrightarrow \delta\dot{\Gamma}$ нелинейные операции, и неизбежную корреляцию, например, амплитуды и фазы отражённого сигнала. Здесь имеет место наиболее существенное отличие от прототипов, поскольку, как это выявлено в Главе 2, в нашем случае отражение в цилиндрическом датчике происходит не от антенны, а от очень сложной электродинамической структуры. Степень нелинейности (а

сам факт её легко усмотреть на рисунках в п. 2.4) ни аналитически, ни численно с помощью FEKO-методики автор найти не берётся. Но ясно, что степень корреляционных связей полезного отклика с помеховыми возрастает.

Аппаратурная корреляция идентична той, что присуща автогенератору [70]; непосредственная причина – неизохронность. Порождённая ею асимметричность радиочастотного спектра обнаружена достаточно давно [59].

Примеры технологической корреляции в ГТД пока не выявлены, это задача авиаспециалистов.

Изучение естественной корреляции по силам специалистам по теплоэнергетике. Методическая корреляция (и это достаточно очевидно) учтена математическим аппаратом моделирования в FEKO. Поэтому обратимся к двум чисто радиотехническим причинам.

В самом общем виде, спектр совместного отклика на два коррелированных фактора может быть представлен в виде, аналогичном (3.13), но дополненном корреляционным членом:

$$S(\Omega) = K_1^2 \cdot S_1(\Omega) + K_2^2 \cdot S_2(\Omega) + S_{12}(\Omega) \tag{3.16}$$

где $S_{12}(\Omega)$ – обобщённое представление продуктов взаимного влияния двух процессов и часто называемой взаимной (или совместной) спектральной плотностью.

Реально нас интересует один диагностируемый параметр, точнее, его отклик, спектр которого «загрязнён» несколькими факторами. Тогда:

$$S_\omega(\Omega) = K_\omega^2(\Omega) \cdot S_V(\Omega) + \sum_m K_{\omega m}^2(\Omega) \cdot S_m(\Omega) + \sum_m K_{mm}^2(\Omega) \cdot S_{mm}(\Omega) \tag{3.17}$$

где первое слагаемое – есть собственно диагностический отклик – виброотклик; второе слагаемое выражает корреляционный вклад от взаимодействия основного процесса с побочными; а третье – побочных между собой.

Обозримый результат может быть получен, если учтён только один из побочных факторов. Применительно к уравнению (3.10) – это, в частности, влияние амплитуды на частоту.

Рассмотрим это влияние на конкретном примере, приведённом в [1]: прогар жаровой трубы и рост температуры на первой ступени турбины высокого давления приводит к появлению пика в виброспектре. На рис. 3.6 исходная и описанная ситуация (т.е. эталонный и аномальный спектры) показаны соответственно пунктирными, и сплошными линиями.

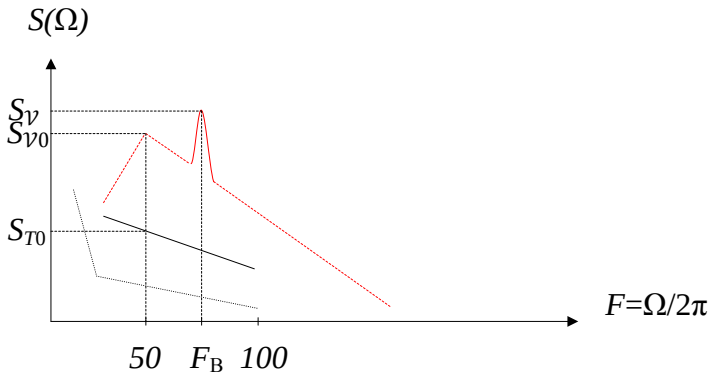


Рис. 3.6: Отклик виброспектра на прогар жаровой трубы и рост температуры в ТВД

Аппроксимируем соответствующие участки спектральной плотности:

$$S_v(\Omega) = (S_{v0} - p_v \cdot \Omega) + \frac{S_v}{1 + \left[2 \cdot Q_v \cdot \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_v}\right)\right]^2} \tag{3.18}$$

$$S_T(\Omega) = S_{T0} - p_T \cdot \Omega \tag{3.19}$$

$$S_{\omega A}(\Omega) = \frac{\omega^2}{4} \cdot \left\{ \frac{\Pi_4^2}{\Pi_4^2 + \Omega^2} \cdot \frac{m_{vT} \cdot \Pi_3^2}{\Pi_3^2 + \Omega^2} \cdot \frac{1}{1 + \left[2 \cdot Q_v \cdot \frac{\Omega_v^2 - \Omega}{\Omega_v}\right]^2} \right\} \cdot S_v(\Omega) \tag{3.20}$$

где m_{vT} – коэффициент корреляции, остальные обозначения ясны из рис. 3.6.

В сопоставлении с [59] заключаем, что полученный спектральный компонент эквивалентен сужению полосы виброотклика, т.е. замедлению формирования спектрального пика. Это своеобразное проявление неизохронности автодина.

Реально имеет место еще один фактор (не включенный в рассмотрение в данном частном примере): квазистатический нагрев антенны и резонатора смещает рабочую точку автодина. Это отмечают авторы [69, 70]. Первая причина, применительно к коаксиальному датчику, частично компенсируется утолщением внутренней части мембраны [69].

В применении к вибродатчикам всех трёх вариантов [31, 69, 70], данный процесс неопасен, так как это процесс медленный, и его спектр (шириной в доли единицы герца) лежит вне полосы виброконтроля.

Таким образом, по выявленным объективным причинам, корреляция виброотклика с помехами не оказывает существенного влияния на контролеспособность автодинного принципа радиолокационной вибродиагностики. Вместе с тем, выявление и снижение уровня корреляционных откликов способно повысить информативность контроля, что достигнуто в диагностической системе по патенту [72].

ГЛАВА 4 Вибродиагностическая радиолокационная система

4.1 Вибродатчик в составе многоканальной радиолокационной диагностической системы

Определение технического состояния ГТД в условиях полёта осуществляется методами функционального диагностирования, включающих измерения параметров штатными приборами с последующим сопоставлением показаний с допустимыми значениями и между собой. Такое диагностирование называют параметрическим [5].

Сложность параметрического диагностирования процитированный автор связывает с тремя обстоятельствами:

– созданием математических моделей многопараметрических процессов в ГТД;
– набором статистических данных, которые нужны уже на этапе проектирования;
– точной оценке результатов сопоставления за короткий интервал времени.

Первое обстоятельство убедительно соответствует материалам второй главы. В части третьего обстоятельства сейчас очевидно, что автор опирался на возможности вычислительных средств в отечественной авиации своего времени (1980-е).

С более современной точки зрения, существенными обстоятельствами представляются помеховые воздействия (о чём авторы подавляющего большинства работ [2, 3, 4, 8-15] даже не упоминают), и малоисследованная, хотя и признаваемая, и подтвержденная экспериментами, корреляция между параметрами (и тем более, между откликами).

При построении многоканальных функциональных диагностических систем, где число каналов определяется набором главных параметров, существенен выбор этих параметров, как обладающих наибольшей диагностической

ценностью. В авиации такой выбор основан на обобщении огромного опыта, что выгодно отличает её от более молодой космической отрасли.

Так, в ГТД такими параметрами считают частоту вращения турбокомпрессора, температуру газа перед турбиной, уровень вибраций, давление топлива перед форсунками, и параметры маслосистемы [1]. В соответствии с техническими возможностями, как на указанную выше дату (80-е), так и сейчас, два первых параметра оцениваются средними (за период порядка >1 сек.) значениями, а третий только по акустическому шуму.

В ходе развития авиационной диагностики изменяется сама стратегия борьбы за безопасность полётов. «Самолёты сейчас просто утыканы различными датчиками, фиксирующими состояние воздушной среды и следящими за функционированием всех систем» [Bulletin of FAA. US, 2005]. Экипаж не справляется с такой массой данных. Поэтому совокупность данных подвергается двухэтапной обработке на ЭВМ: сначала в бортовых диагностических подсистемах (в число которых входит исследуемая нами), а затем во всей совокупности этих подсистем – сначала на борту, в полёте, а потом (при необходимости) на земле.

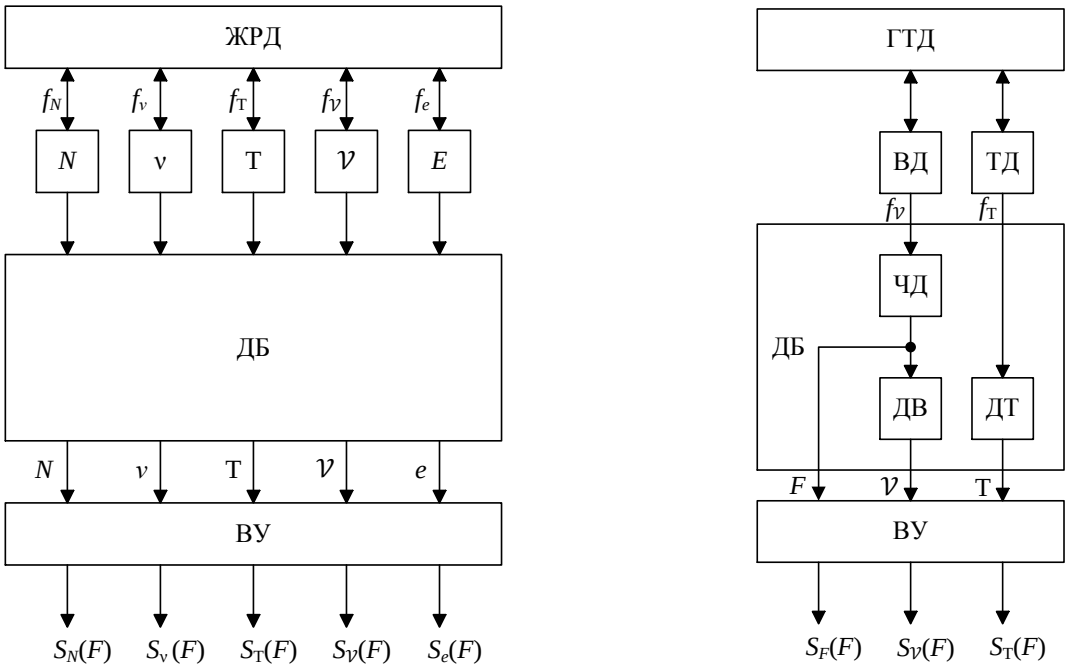
В многоканальной диагностической подсистеме, реализующий способ [72], и выбранной нами в качестве прототипа (а первоначально предназначенной для ЖРД, где ротор отсутствует), ставилась сходная с нашей задача: контроль параметров в спектральном приближении. При этом учитывалось, что отклики датчиков в каналах содержат три рода помех, обусловленных воздействиями:

– «соседнего» параметра;
– неконтролируемых параметров (например, эрозии);
– продуктами корреляции контролируемого параметра со всеми вышеназванными.

С учётом различий диагностируемых объектов (ЖРД и ГТД) по принципу работы, по конструкции, по абсолютным величинам диагностируемых и поме-

ховых параметров, структура подсистемы [72] может быть упрощена, а условия выбора зондирующих частот изменены.

Пример структуры многоканальной диагностической системы (МКДС) по запатентованному способу [72] показан на рис. 4.1 (а). Здесь 5 каналов и 5 датчиков: электронной концентрации – N, частоты соударений частиц – ν, температуры пламени – T, вибраций корпуса – $\mathcal{V}$, и собственного радиоизлучения плазмы пламени – E. Датчики однотипны (но неидентичны) по схеме и конструкции, а также работают в разнесённых по частоте диапазонах. Это обеспечивает существенное различие по чувствительности к «своему» и к «соседним» параметрам, и, как следствие, успешное выделение искомого параметра, включающее подавление помеховых откликов. В число последних, в данном случае входит и неконтролируемое (не представляющее интереса, как диагностический параметр) собственное радиоизлучение – E.



а) б)

Рисунок 4.1 – Многоканальные радиолокационные диагностические системы а) прототип по патенту [72]; б) исследуемая

ДБ – детекторный блок; ВУ – вычислительное устройство; ВД – вибродатчик; ТД – температурный датчик; ЧД – частотный детектор; ДВ – детектор вибрационного канала; ДТ – детектор температурного канала

При диагностировании ГТД электрофизические параметры пламени значительного влияния на вибродатчик не оказывают, вследствие, во-первых, более низкой температуры пламени (а, следовательно, и концентрации N) и, во-вторых, более высокой зондирующей частоты. Исключение может составить первая ступень турбины высокого давления. Собственное радиоизлучение пламени E экранируется сопловыми аппаратами. Поэтому вывод соответствующих откликов на индикацию и на средства автоматического управления ГТД не нужен, хотя в вычислительных операциях они используются.

С другой стороны, структура основного (вибрационного) канала должна обеспечить разделение спектров $S_{\text{В}}(F)$ – вращения вала и $S_{\nu}(F)$ – вибраций лопаток (рис. 3.3(в)). Наконец, необходимо преобразование спектра виброперемещений в спектр виброскоростей, путём дифференцирования первого.

Модифицированная структура многоканальной радиолокационной диагностической системы показана на рис. 4.1 (б); вычислительный алгоритм (двухэтапное решение системы линейных уравнений по Крамеру) [62] сохраняется. Возможность, или даже необходимость введения в эту систему уравнение спектра $S_{\text{В}}(F)$ требует отдельного обсуждения.

Выборы системных параметров – зондирующих частот и контролируемой полосы спектров также претерпевают изменения. Необходимо подчеркнуть, что в системе по прототипу (рис. 4.1 (а)) радиолокационных каналов нет (поскольку в ЖРД нет РЛ объекта), а виброканал реагирует на вибрации корпуса. Тем не менее, зондирующая частота вибрационного канала была выбрана по принципу БРЛ, путём сопоставления амплитуды виброперемещения с длиной зондирующей волны. Здесь, как это показано в п. 2.4, главенствующую роль играет чувствительность коаксиального датчика, и конструктивная сопрягаемость цилиндрического. Поэтому один из существенных отличительных признаков патента [72] в нашем случае неприменим.

Динамика двухканальной диагностической системы (рис 4.1 (б)) описывается совокупностью функционалов:

$$P_i(t) = P_i[\mathcal{V}(t), T(t), f_i(t)] = 0 \tag{4.1}$$

причём $P_i(t)$ – нелинейное дифференциальное уравнение автодина (на базе известного уравнения диодного автогенератора [58]), где $i = \mathcal{V}, T$, а f_i – зондирующие частоты.

В линейном (по Тейлору) приближении приращения диагностических откликов:

$$\Delta f_i(t) = \sum_r K_r \cdot \Delta r \tag{4.2}$$

где, $K_r(F) = df_i/dr$ – чувствительность датчиков, $r = T, \mathcal{V}$, а F – текущая частота диагностируемого спектра. Отмеченная зависимость чувствительности от частоты особенно существенна в температурном канале [70].

После частотного детектирования на выходах блока ДБ (рис. 4.1 (б)) имеем сигналы со спектрами:

$$\begin{cases} S_1(F) = D_{\mathcal{V}}^2 \cdot [K_{\mathcal{V}1}^2 \cdot S_{\mathcal{V}} + K_{T1}^2 \cdot S_T] \\ S_2(F) = D_T^2 \cdot [K_{\mathcal{V}2}^2 \cdot S_{\mathcal{V}} + K_{T2}^2 \cdot S_T] \end{cases} \tag{4.3}$$

причём в идеале $D_{\mathcal{V}}^2 \cdot K_{\mathcal{V}1}^2 = D_T^2 \cdot K_{T2}^2 = 1$, где $D_{\mathcal{V},T}$ – коэффициенты детектирования. Решением системы (4.3) являются исходные спектры в линейном приближении.

$$S_{1,2}(F) = G_{1,2}/G \tag{4.4}$$

где G – главный детерминант (базисный определитель) системы (4.3), $G_{1,2}$ – дополнительные определители, полученные заменой одного из столбцов G свободными членами $S_{1,2}(F)$, представляющими собой диагностические отклики.

Точное решение требует точного знания коэффициентов $D_{V,T}$, K_V, K_T, безошибочной оценки отклика и отсутствия корреляции между вибрациями, и температурой газа. Эксперимент [69] опровергает последнее предположение, а погрешности в оценке остальных неизбежны. Тем не менее, подбор коэффициентов G и K влияет на точность результата. В частности, погрешность уменьшается с ростом базисного определителя $G = K_{V1} \cdot K_{T2} - K_{V2} \cdot K_{T1}$. Поэтому в описании патента условие максимизации базисного определителя положено в основу выбора зондирующих частот.

В данном случае к достижению этой же цели можно приблизиться конструктивными приёмами. Согласно [70] высокая чувствительность термодатчика K_{T2} в заданной полосе частот достигается уменьшением толщины мембраны, в которой прорезана антенна. Справедливо и обратное утверждение. Более того, вибро и термоотклики по-разному зависят от ширины щели. Вывод: если оба датчика коаксиальные, то у вибродатчика мембрана должна быть толстая, а щель широкая; у термодатчика наоборот.

Таким образом, двухканальная вибродиагностика существенно улучшает контролеспособность даже при линейной обработке канальных откликов. Дополнительный эффект здесь даёт сходный отклик обоих датчиков на неконтролируемые помехи (в процедуре Крамера они вычитаются).

Количественные оценки сделаны в следующем п. 4.2.

Нелинейная обработка даёт ещё больший эффект, но она не входит в число задач данной диссертационной работы.

4.2 Информационная производительность как мера контролеспособности диагностической системы

Полноту, оперативность и качество диагностирования в авиации принято оценивать для ГТД – контролепригодностью, а для диагностической системы – контролеспособностью [5].

Количественными мерами являются критерии эффективности, контролепригодности, и комплексный критерий эффективности:

$$K_Э = \prod_i P_i \tag{4.5}$$

где P_i – вероятности отсутствия неисправностей, правильности оценки, достоверности алгоритма и метода, а также безотказности и исправности аппаратуры (средств). Вероятности определяются по статистическим данным [73].

Критерий контролепригодности $K_К$ включает отношение числа контролируемых параметров n к их общему числу N, $K_П = n/N$, а также учитывает их информативность [5]:

$$K_К = K_П \cdot K_И \cdot K_Н \cdot K_Э \tag{4.6}$$

где $K_П$ – критерий полноты, $K_И$, $K_Н$ – коэффициенты приспособленности и исправности диагностических средств, и $K_Э$ – критерий эффективности.

Комплексный критерий оценивает глубину поиска дефектов, целесообразность применения, полноту диагностирования, а также стоимостные показатели.

Критерий полноты определяется количеством информации извлекаемой датчиком, или (в применении к диагностической подсистеме) их совокупностью. Здесь существенное значение приобретает информационная производительность (пропускная способность) датчиков, что цитируемым автором не учтено, поскольку используемые им механические датчики весьма узкополосны.

При оценке информационной производительности следует иметь ввиду, что полоса частот виброотклика радиоволнового датчика существенно шире, чем у механического датчика [5].

При оценке информационной производительности нужно иметь ввиду, что полоса вибраций: 12…1800 Гц [5]. Там же [5] контроль невозможен, поскольку механических вибродатчиков с такой полосой нет. У нас в этом отношении ситуация преимущественная.

Далее в этом разделе речь идет о критерии полноты, так как остальные члены в формуле (4.6) могут быть определены авиаспециалистами на основе массивов статистических данных.

Автор [5] оперирует с набором дискретных параметров. Для потоковых (т.е. непрерывных) процессов авторы – коллеги [69, 70] объединили вышеописанный подход с теорией извлечения и передачи информации [63] в радиотехнике. Наиболее полно этот подход изложен и использован в [84].

Количество извлечённой информации в единичной полосе частот диагностируемого процесса (авторы [66] называют её информационной плотностью) определяется как разность энтропий – полной и условной:

$$H_{\text{СУ}} = H_{\text{С}} - H_{\text{У}} \tag{4.7}$$

причём в качестве условной энтропии фигурирует либо дисперсия, либо спектральная плотность шума (помех). Разумеется, должно быть учтено, что обе энтропии – есть продукты измерительного преобразования диагностической системой (или датчиком) с неравномерной (в общем случае) частотной характеристикой. Не повторяя промежуточных операций в [63] запишем окончательное соотношение, как интеграл от информационной плотности в полосе контролируемых виброчастот:

$$W = \frac{1}{2 \cdot \ln 2} \cdot \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \log_2 \frac{S_{\text{С}}(\Omega)}{S_{\text{У}}(\Omega)} d\Omega = \frac{1}{2 \cdot \ln 2} \cdot \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \log_2 \left[1 + \frac{S_{\text{В}}(\Omega)}{S_{\text{У}}(\Omega)}\right] d\Omega \tag{4.8}$$

где $S_{\text{В}}(\Omega)$ – спектральная плотность (СП) виброотклика, Ω_1, Ω_2 – границы подлежащего диагностического спектра (или его части).

В качестве условной энтропии и, соответственно, спектральной плотности $S_{\text{у}}(\Omega)$ авторы [84], следуя Шеннону [63], ставят СП совокупности помеховых откликов, и искажений в процедуре формирования отклика. В качестве разности $\Omega_2 - \Omega_1 = \Pi$, т.е. полосу диагностического отклика.

Наша задача несколько иная. Диагностический алгоритм должен обеспечить полноту диагностирования в двух режимах – номинальном и аварийном. При этом датчик и система диагностирования должны обеспечить разрешение, как по амплитуде (девиации) отклика, так и по только что упомянутой полосе.

Первое достигается повышением чувствительности датчика и снижением чувствительности к помехам (то и другое хорошо известно в радиотехнике); второе – разбиением контролируемой полосы виброспектра на несколько участков. После реализации второго условия информационная производительность может быть представлена как:

$$W_{i1} = \sum_i W_i = \frac{1}{2 \cdot \ln 2} \cdot \sum_i \int_{\Omega_i}^{\Omega_{i+1}} \log_2 \left[1 + \frac{S_{\text{В}}(\Omega)}{S_{\text{у}}(\Omega)}\right] d\Omega \tag{4.9}$$

т.е. как сумма информационных массивов на отдельных *i*-тых участках спектра, общим числом *N*.

Но это выражение справедливо только в номинальном режиме. Аварийным считается режим, при котором на любом из участках спектра $S_{\text{В}}(\Omega) > S_{\text{Э}}(\Omega)$ – эталона, причём весьма существенна степень этого превышения, позволяющая уверенно распознать аварийную ситуацию.

Отсюда следует, что полнота диагностирования в этой ситуации, и на этом *i*-том участке оценивается информационной производительностью:

$$W_{i2} = \frac{1}{2 \cdot \ln 2} \cdot \int_i^{i+1} \log_2 \left[1 + \frac{S_{\text{В}}(\Omega) - S_{\text{Э}}(\Omega)}{S_{\text{у}}(\Omega)}\right] d\Omega \tag{4.10}$$

Нетрудно заключить, что $W_{i2} < W_{i1}$, и что предаварийная ситуация ($S_{\text{В}}(\Omega) \approx S_{\text{Э}}(\Omega)$) предъявляет гораздо более строгие требования к помехозащищённости датчика.

Остаётся добавить, что установление формы и дисперсии эталонного спектра требует значительного объёма экспериментов, которые могут осуществиться только в коллаборации с авиаспециалистами. В рамках данной диссертационной работы эта задача неразрешима.

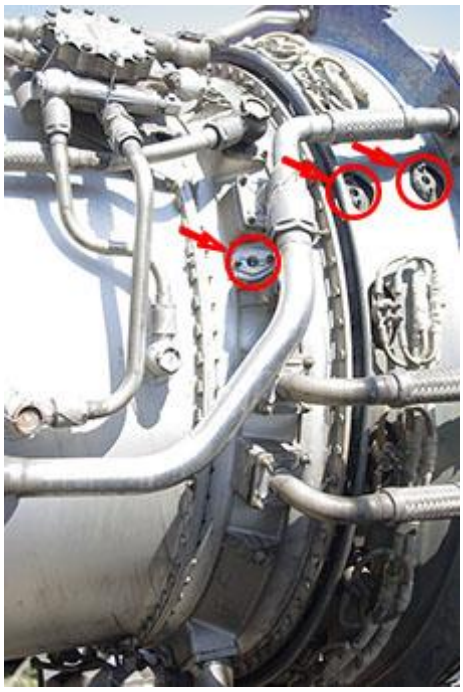
4.3 Конструкции вибродатчиков, имитационный и лабораторный эксперименты

4.3.1 Особенности конструкций вибродатчиков, их установка на ГТД

Названные особенности обусловлены следующими факторами:

– использованием для установки вибродатчиков отверстий, предназначенных для стендового контроля состояния ротора и компрессора турбины (РКТ);
– поперечными размерами этих отверстий;
– предполагаемым температурным режимом компрессора и турбины;
– защитой от эрозии и осаждения продуктов сгорания на поверхности антенны.

Как и прототипы [31, 69, 70], вибродатчики РКТ конструктивно ориентированы на установку в стандартные отверстия в стенках проточного тракта, оформленные в виде, например, как это уже сделано в прототипах, штуцеров с резьбой. В нашем случае с двигателем Д-36 наиболее удобны смотровые окна для стендового бороскопического визуального осмотра состояния деталей ротора с использованием оптоволоконной техники (рис. 4.2 (а)), но там конструкция установочного элемента иная.



а) б)

Рисунок 4.2 – Смотровые окна турбины Д-36 (а) с заглушкой (б)

В штатном режиме работы двигателя эти окна, как уже отмечено выше, не используются и закрыты заглушками (рис. 4.2 (б)). Общее число этих окон, расположенных на стенке статора за каждой ступенью РКТ, достигает порядка десяти (на первой ступени турбины Д-36 их два). Это количество, а также места расположения могут обеспечивать диагностирование всех ступеней РКТ. Однако, необходима схемотехническая и конструктивная доработка, поскольку ротор имеет сложный продольный профиль – это влияет и на конструктивную, и на электрическую длину волновода каждого датчика; и, как следствие, влияет на его рабочую точку по фазе отражённого сигнала, обуславливающего автодинный отклик.

Рабочие диаметры диагностических средств, использующих эти отверстия и определяющих размеры раскрыва антенны и сечения волновода, приведены в верхней строке таблицы 4.1.

С учётом сказанного, общая конструктивная компоновка датчиков базируется на телах вращения, а в электрическом отношении – на отрезках коаксиальных, или цилиндрических волноводов. Первые, в поперечном сечении, не-

критичны к длине волны и частоте, т.е. могут быть применены при любом диаметре отверстия. Для вторых характерны критические значения, ограничивающие возбуждение колебаний по длине волны сверху и, как следствие, по частоте – снизу. Приведённые в таблице 4.1 примеры критических значений $\lambda_{кр}$ и $f_{кр}$ при различных диэлектриках, наполняющих резонатор и волновод, дают представление о возможностях датчиков, выбора рабочих частот, и конструктивных мерах.

Наличие и размеры отечественных и большинства зарубежных бороскопических отверстий, позволяют осуществить радиолокационную диагностику в привлекательном, как по чувствительности, так и по освоённости, частотном диапазоне. Исключение составляет только немецкое изделие диаметром 4 мм, требующее достаточно дефицитного (или, как альтернатива, маломощного) диода, ввиду чрезвычайно высокой зондирующей частоты.

Применение диэлектриков-наполнителей с большой диэлектрической проницаемостью ε для малых отверстий может потребовать дополнительных исследований свойств антенны. Более того, диэлектрик вызывает необходимость укорочения резонатора и, следовательно, ухудшение теплового режима диода, хотя методы компенсации этого явления [69] делают данный недостаток принципиального устранимым.

Таблица 4.1 – Рабочие диаметры диагностических средств, использующих смотровые окна и определяющих размеры раскрыва антенны, и сечения волновода

Конструкции		Жесткие бороскопы										Гибкие бороскопы		
Страна, фирма		Россия, «ЦИАМ»				Франция, «Fort»			Германия, «Karlheintz»			Япония, «Olympus»		
Диаметр рабочей части (мм)		16	8	6	8,5	11	8	5,5	10	8	4	13	11	6
$\lambda_{кр}$ (мм)	ε=1	29	14,6	10	-	20	-	-	-	-	8,3	-	-	-
	ε=1,2	32	16	11	-	22	-	-	-	-	9	-	-	-
	ε=4	58	29	20	-	40	-	-	-	-	16,6	-	-	-
$f_{кр}$ (ГГц)	ε=1	10	20	27	-	15	-	-	-	-	36	-	-	-
	ε=1,2	9	18	24	-	13,5	-	-	-	-	32	-	-	-
	ε=4	5	10	13,5	-	7,5	-	-	-	-	18	-	-	-

На рисунках 4.3 и 4.4 показаны принципы конструктивной компоновки датчиков и более детальный эскиз конструкции цилиндрического. Учтено, что конструкции коаксиального типа описаны в [32, 69].

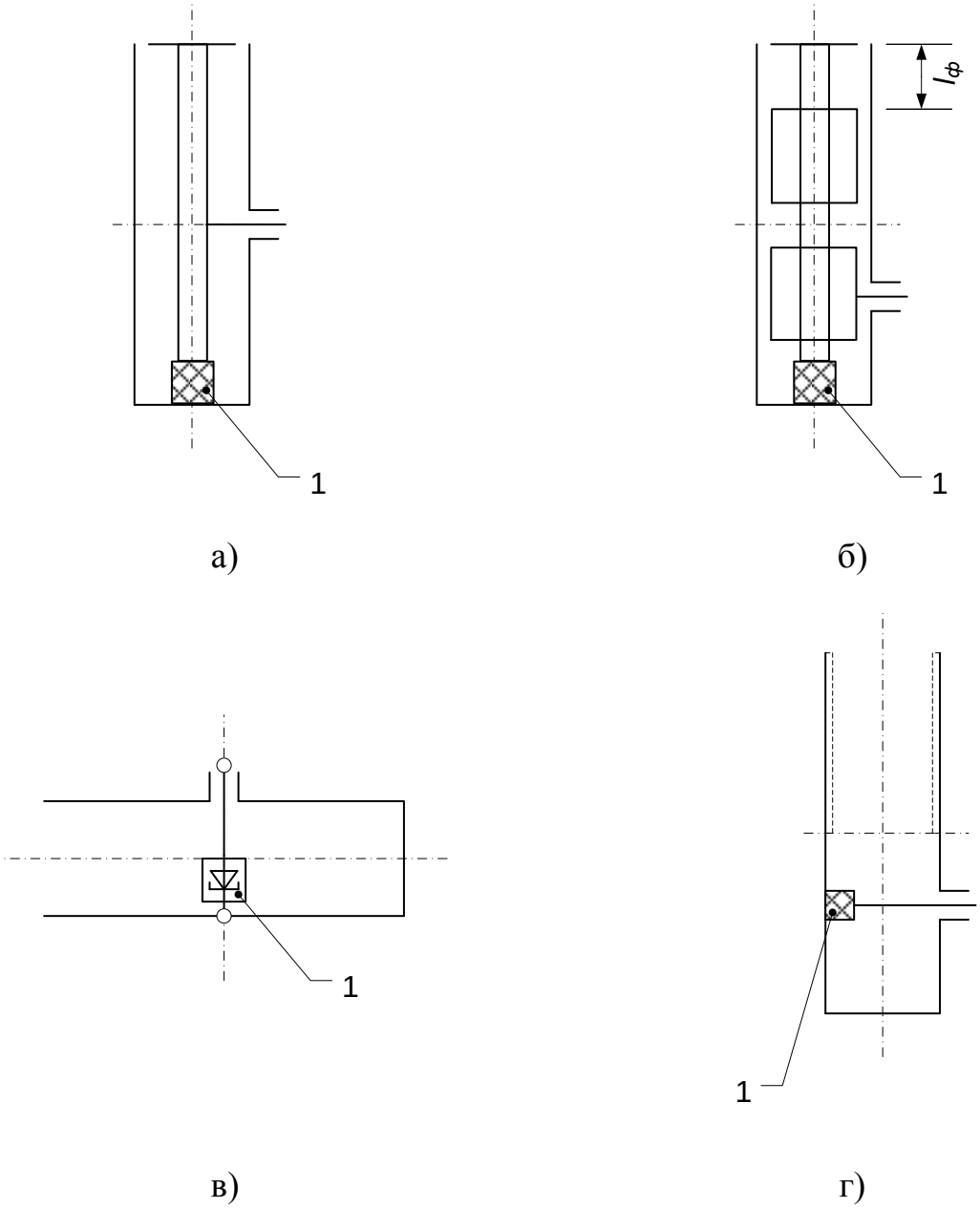


Рисунок 4.3 – Варианты общей компоновки датчиков

а) ДРК коаксиальный; б) ДРТ коаксиальный, многозвенный; в) ДРТ цилиндрический; г) ДРТ цилиндрический с разными диэлектриками.

1 – генераторный диод.

Диэлектрическое заполнение резонатора условно не показано.

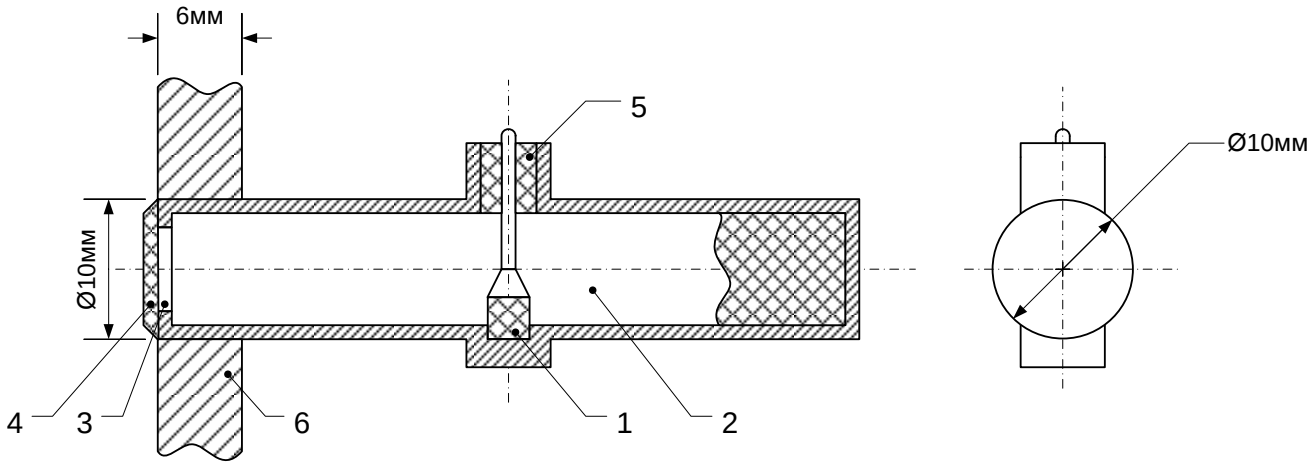


Рисунок 4.4 – Эскиз конструкции цилиндрического вибродатчика

1 – генераторный диод; *2* – цилиндрический резонатор; *3* – окно антенны; *4* – диэлектрический обтекатель; *5* – разъём питания и выхода; *6* – стенка наружного корпуса турбины.

Диэлектрическое заполнение резонатора показано условно только около правого торца.

В части температурного режима воспользуемся результатами [70], но с учётом особенностей ГТД. Здесь предполагаются две группы опасностей.

Статический нагрев корпуса ДРТ приводит к некоторому смещению (уменьшению) рабочей частоты, но гораздо более опасен перегрев диода (так как рабочая температура диода ниже 70 °С). Опасность полностью устраняется применением генератора с многозвенным резонатором [71], конструкция которого по замыслу аналогична (рис. 4.3 (б)), но может быть реализована, например, чередованием разных диэлектриков, что уже учтено в п. 2.5. Вибродатчик с круглым волноводом (в котором центральный тепловод диэлектрический) еще более устойчив к перегреву (но подлежит дополнительному изучению).

Динамический нагрев, особенно при возникновении помпажа ГТД с присущими ему быстрыми скачками температуры, способен вызвать в вибродатчиках эффект, сходный по спектру с виброотклик. Меры предотвращения опять-таки разработаны: достаточно толстая мембрана щелевой антенны; а для круглой антенны роль демпфера играет штуцер и стенка проточного тракта.

Обтекатель (рис. 4.4, позиция *4*), как защитный элемент конструкции известен в применении к КЩА систем ближней радиолокации (БРЛ) [42], и как средство защиты от эрозии, с одновременным улучшением аэродинамических характеристик КЩА. В [67] он применён не столько по своему назначению, отражённому в названии, сколько для защиты от осаждения сажи. Его электродинамические эффекты исследованы в [44]. В данном случае, важнее его антиадгезионные свойства и термостойкость исходных материалов. Подобные материалы на основе огнестойких керамик существуют, применяются в ЖРД, но кроме [67] других открытых публикаций найти не удалось.

На рис. 4.5 показан прототип изготовленного нами образца вибродатчика. Для наглядности, рядом расположена стационарная заглушка смотрового окна.

Рисунок 4.5 – Прототип вибродатчика (слева) и заглушка смотрового окна (справа)

На рис. 4.6 показан прототип вибродатчика в сравнении с датчиками температуры работ предшественников [32].

Рисунок 4.6 – Прототип вибродатчика (слева) и датчики температуры (в середине и справа)

4.3.2 Имитационный эксперимент. Моделирование в радиодиапазоне

Экспериментальное исследование спектра диагностического отклика возможно только на реальном двигателе. Причина: в данной специфичной структуре диагностической системы объект диагностики – двигатель, формирует важнейший параметр диагностического радиосигнала – частоту модуляции (в радиолокаторах для этого служит специальный генератор). Т.е. двигатель становится составной частью диагностической системы, что вполне соответствует взглядам авиаспециалистов [1, 5, 73, 82].

В несколько упрощённом виде формирование рабочего диагностического спектра удалось качественно промоделировать в радиодиапазоне. При этом исследованию подлежала зависимость амплитуд дискретных компонентов от формы импульсов отклика. Результаты представлены на осциллограммах (рис. 4.7).

К сожалению, технические возможности доступной аппаратуры не позволили сформировать импульсы, идентичные по форме импульсам, полученным в Главе 2, хотя основные элементы формы, влияющие на спектр, присутствуют. Кроме того, разрешение по спектру явно недостаточное. Тем не менее, при плавном изменении формы импульсов, хотя и качественно, но очень наглядно

наблюдается изменение огибающей спектра на нижних частотах. На представленных статичных осциллограммах это увидеть трудно. Амплитудная зависимость отсутствует.

Таким образом, работоспособность метода подтверждена.

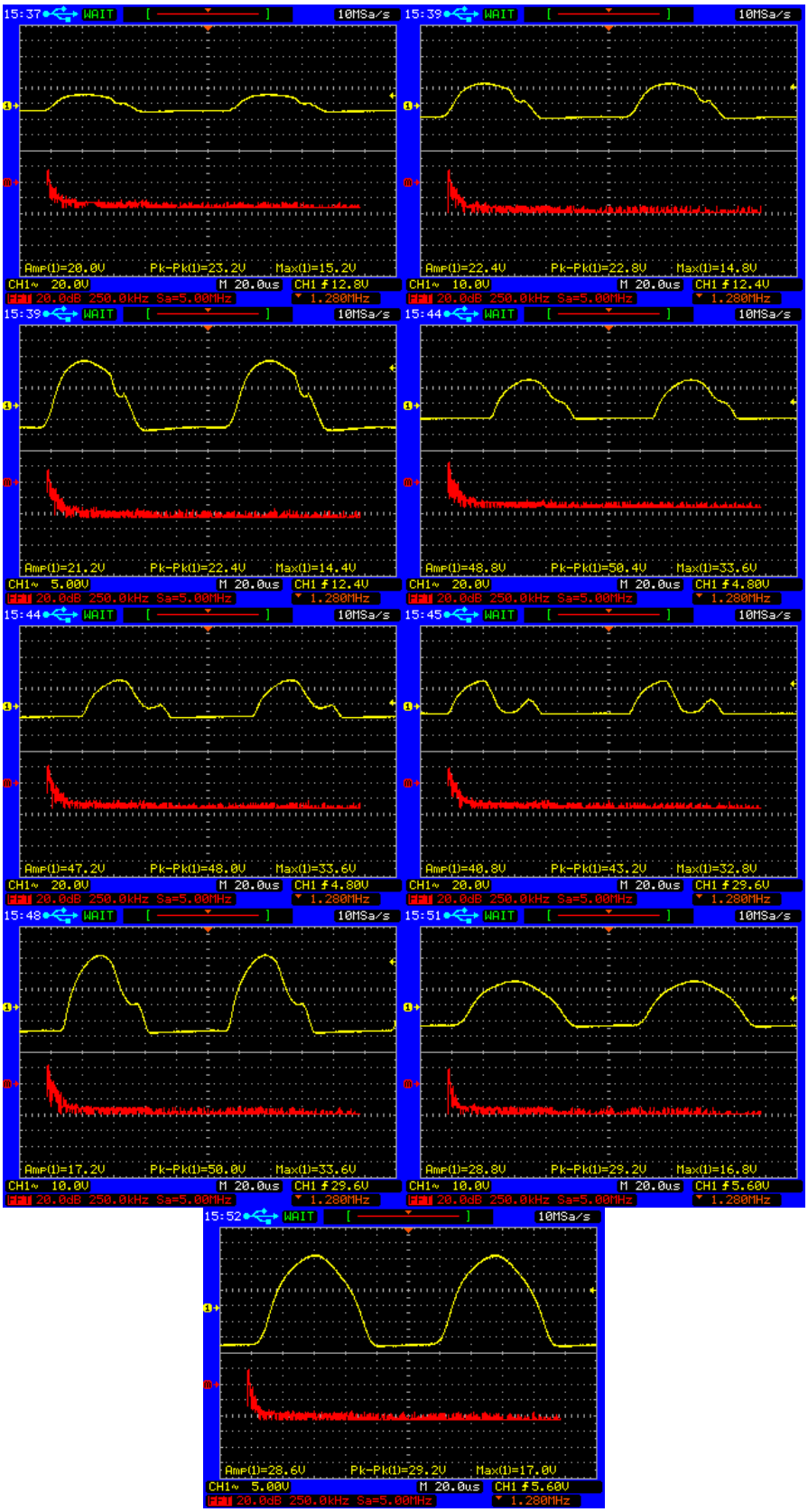


Рисунок 4.7 – Формы импульсов и их амплитудные спектры

Автором, в том числе проведён имитационный эксперимент в среде объектного программирования LabVIEW, широко известной среди радистов. Исследовалась динамика диагностируемого процесса. Построены временные диаграммы, амплитудные и фазовые спектры отклика датчика, когда рабочее колесо ТВД вращается с определённой частотой, определённое число раз, и одна из лопаток рабочего колеса проходящая через «диагностическое окно» разрушена, или вибрирует. При этом формы фазовых откликов антенны датчика заимствованы из результатов моделирования в FEKO (приложение А, табл. 8А).

Для удобства, и ограниченности вычислительных ресурсов ЭВМ, при моделировании геометрии в FEKO сделано ряд допущений. Количество лопаток на рабочем колесе принято равным 120, вместо 118; это связано с кратностью угла окружности $360°/120 = 3°$, что примерно равно реальному расстоянию между лопатками. Геометрия лопатки существенно упрощена – не учтены: толщина, сложная форма закрутки и точная пространственная ориентация лопатки. Для оценки основных изменений в спектре отклика такие допущения существенной роли не играют.

Для накопления статистики по процессу вращения введён параметр рабочего цикла, которое определяет число полных оборотов ротора. Для получения спектра процесса введена частота вращения ротора.

Виртуальный стенд (рис. 4.8) выполняет быстрое преобразование Фурье модулированных сигналов процесса вращения. На рис. 4.9 приведены временные диаграммы откликов антенны датчика для полного оборота рабочего колеса, когда: а) одна из 120 лопаток разрушена, б) одна из 120 лопаток вибрирует.

На рис. 4.10, 4.11 приведены амплитудные и фазовые спектры откликов антенны датчика, соответствующие временным диаграммам рис. 4.9. В данном примере рабочий цикл составляет 50000 оборотов, а частота вращения ротора 10000 об/мин

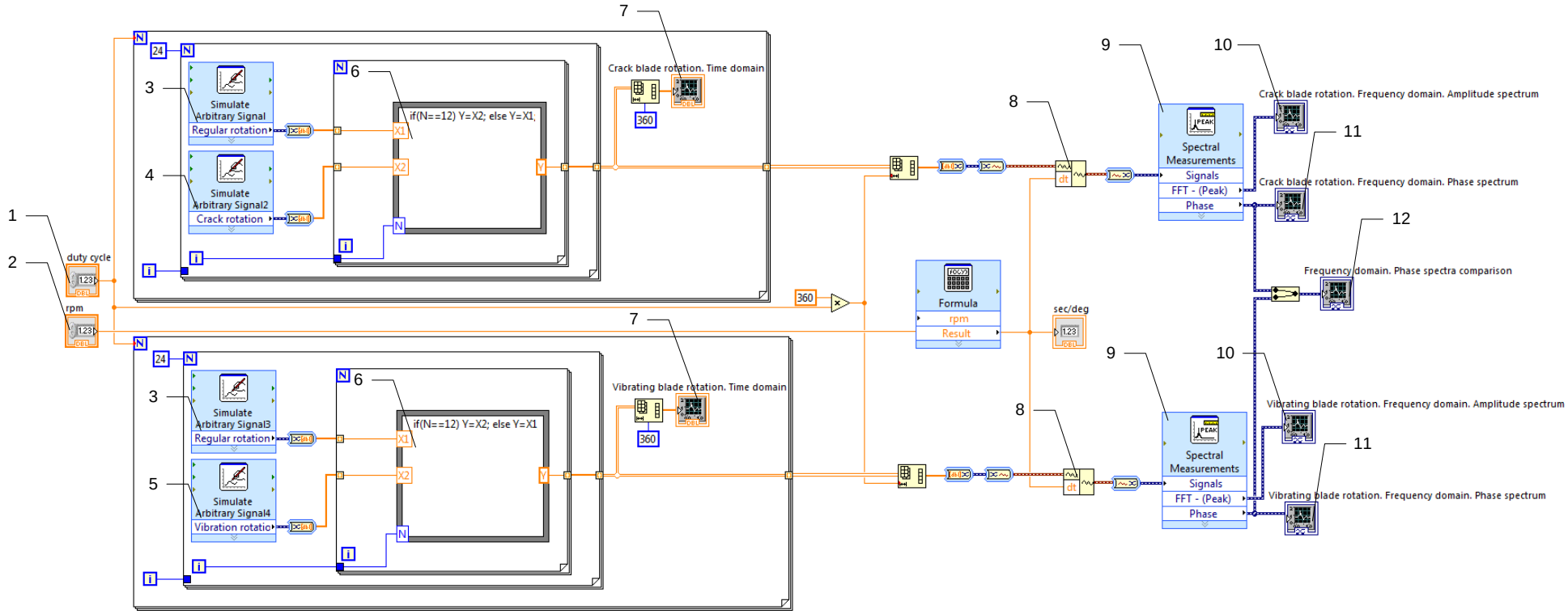
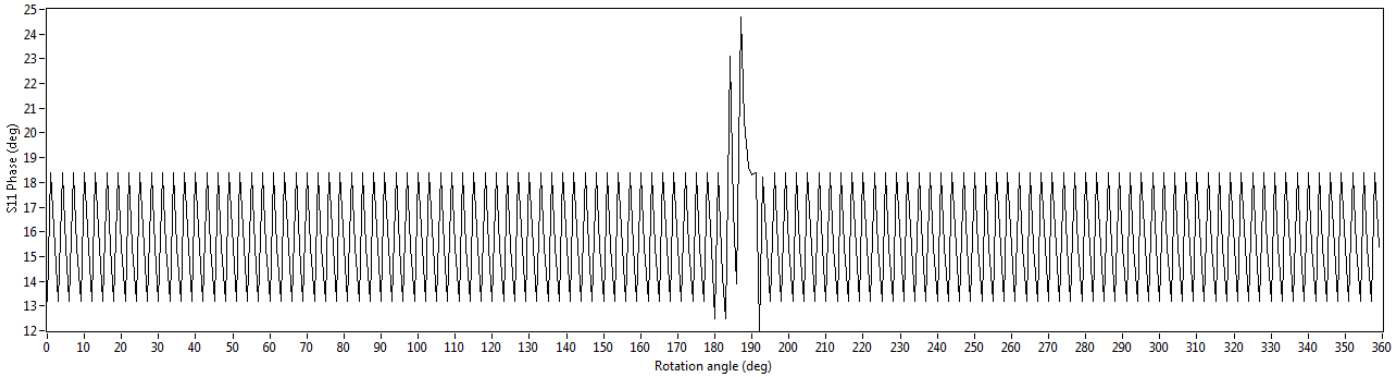
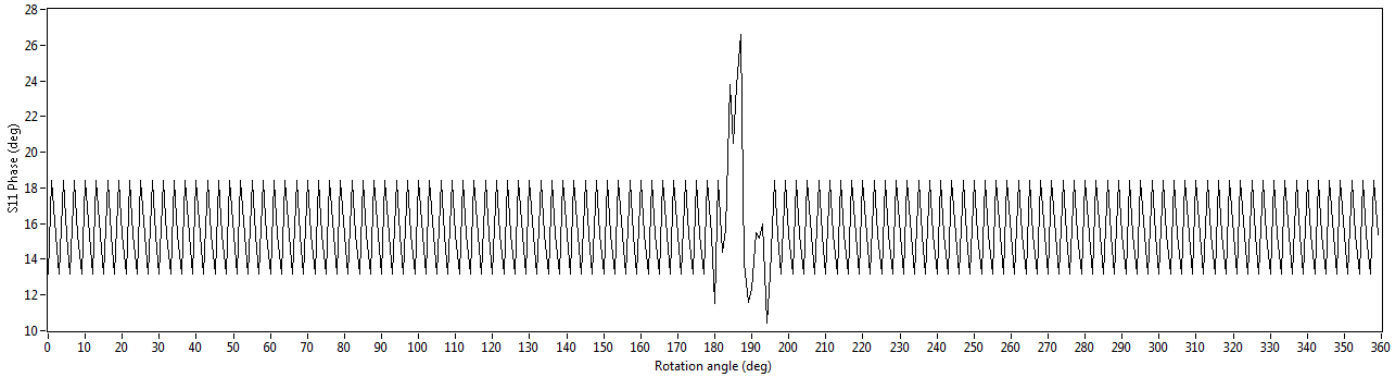


Рисунок 4.8 – Виртуальный стенд измерения вибраций

1 – счётчик рабочих циклов, *2* – счётчик скорости вращения, *3* – генератор сигнала нормальной лопатки, *4* – генератор сигнала разрушенной лопатки, *5* – генератор сигнала вибрирующей лопатки, *6* – блок условий последовательности временных реализаций генерируемых сигналов, *7* – осциллограф временной развёртки, *8* – преобразователь угла вращения в время вращения, *9* – анализатор спектра, *10* – осциллограф амплитудного спектра, *11* – осциллограф фазового спектра, *12* – осциллограф совместных фазовых спектров

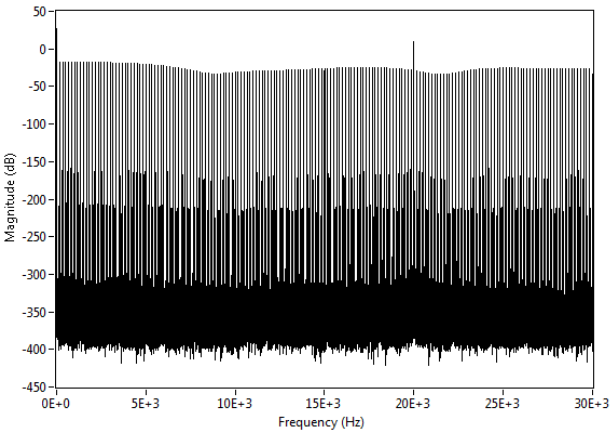


а)

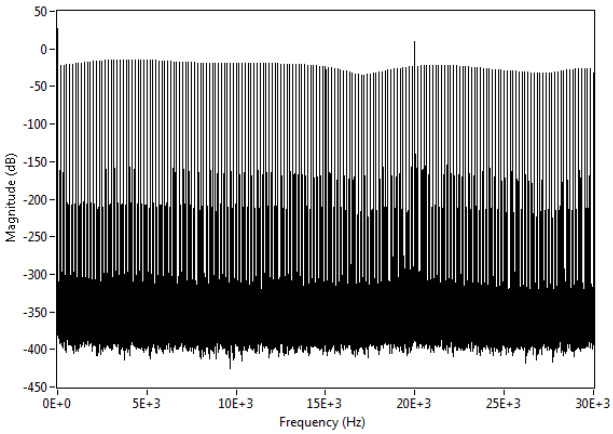


б)

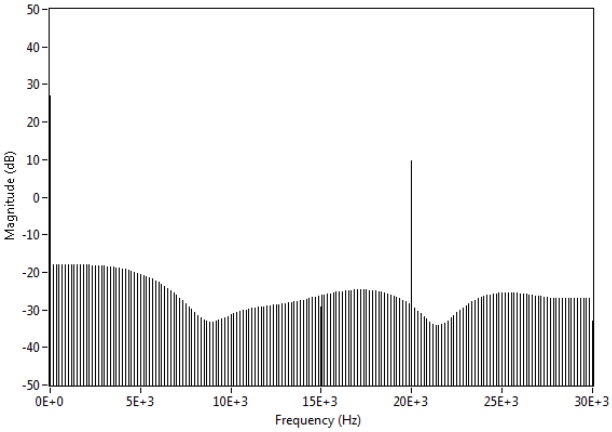
Рисунок 4.9 – Временная диаграмма одного оборота ротора при наличии:
а) разрушенной лопатки, б) вибрирующей лопатки



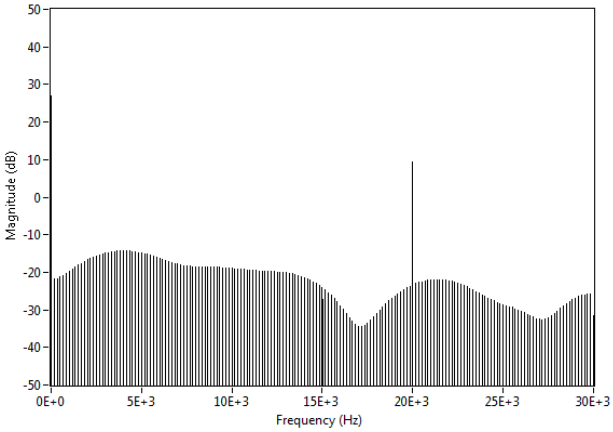
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.10 – Амплитудные спектры (а, б) и огибающие спектров (в, г); наличие в РКТ:

а), в) – разрушенной лопатки; б) вибрирующей лопатки

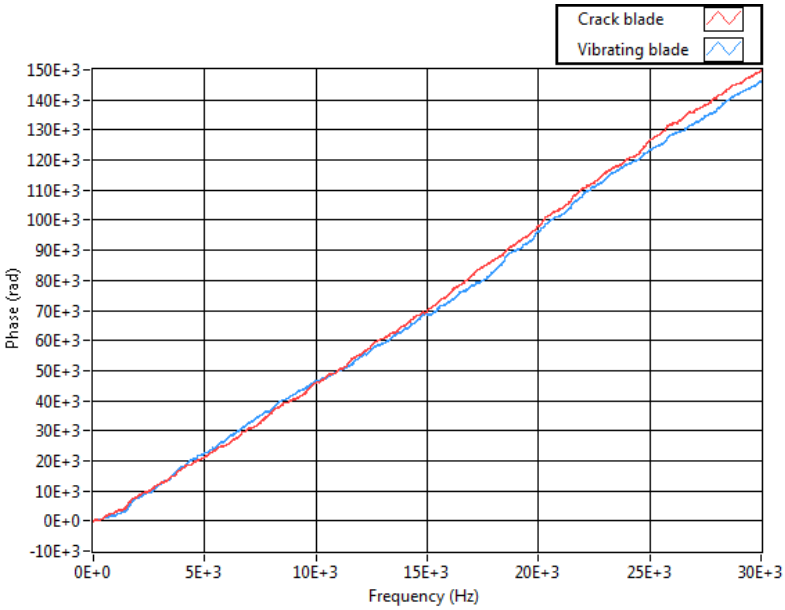


Рисунок 4.11 – Сравнение фазовых спектров при наличии в РКТ: разрушенной лопатки (красная линия); вибрирующей лопатки (синяя линия)

4.3.3 Лабораторный эксперимент

Лабораторные эксперименты с СВЧ датчиками, сходными по принципу работы и конструкции, обладающими КЩА, а также полосковыми антеннами проводились в рамках единой научной группы, авторами работ [32, 69, 70] как до, так и в ходе настоящего исследования.

Впервые влияние внесения и перемещения твёрдых тел, как предполагаемую помеху диагностическому отклику, отметил автор [32] на этапе наладки одного из первых образцов датчика. Поскольку в этот период датчики предназначались для диагностики пламён по электронной концентрации (точнее, по спектру концентрации заряженных частиц – электронов) в камерах сгорания ЖРД, то развития эти эксперименты не получили. Тем не менее, было отмечено различие физического механизма и откликов на внесение образцов из диэлектриков (пенопласта, а делалось это для калибровки датчика), и металлических предметов.

В ходе работ исследователи [32] получили доступ к малогабаритным камерам сгорания маневровых (на орбите) ЖРД. Здесь размеры камер сгорания оказались соизмеримыми с длиной волны и эффект приобрёл практический смысл, как помеховый. Все оценки этого влияния носили качественный характер.

Позже, по результатам экспериментов и в связи с введением в учебный план кафедры РЭКУ КАИ им. А.Н. Туполева дисциплины «Полупроводниковые генераторы СВЧ» названным выше коллективом (группой), была создана и внедрена в учебный процесс лабораторная работа «Автодинный приёмопередатчик СВЧ». Здесь изучался динамический режим вибраций, имитатором служил комнатный вентилятор.

Автор [69] и её коллеги провели ряд экспериментов на имитаторах камер сгорания (жаровых труб) авиационных двигателей – газовых горелках, построенных и использующихся на кафедре авиадвигателей КАИ им. А.Н. Туполева. Здесь помеховые виброотклики оказались значительнее по величине, а спектр их богаче. Эксперименты проведены на частоте около 2,7 ГГц, причём антенна была кольцевой-щелевой и слабоизлучающей.

Наконец, в связи с исследованием и разработкой датчика плотности теплового потока автор [70] получил теоретическую оценку и сымитировал отклик на сосредоточенную по спектру вибропомеху.

В этих же экспериментах, на их начальном этапе (т.е. до установки датчика на двигатель) производилась качественная оценка структуры ЭМП путём перемещения в предполагаемом объёме этого поля щупа в виде петли на открытом конце коаксиального кабеля. Отклик контролировался анализатором спектра. Перемещение (в свободном пространстве) осуществлялось в трёх плоскостях с поворотом петли, и на расстояниях порядка от 0,1 до 1 метра от антенны. При упомянутых зондирующих частотах отклик составлял от десятков килогерц до единиц мегагерц. Была качественно выявлена неравномерность структуры ЭМП и её зависимость от внесения в ЭМП (кроме щупа и одновременно с ним) твёрдых тел.

Таким образом, работоспособность изученного в данной работе способа подтверждена прямыми и косвенными экспериментальными данными. Получению более точных количественных результатов препятствуют финансовые трудности.

Вторая серия экспериментов проведена на стенде в Институте радиоэлектроники и информационных технологий ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», совместно с научным руководителем направления проф. В.Я. Носковым.

Стенд подробно описан в [110]. В качестве автодинного СВЧ генератора использовался гибридно-интегрированный модуль «Тигель-08М» на основе планарного двухмезового диода Ганна с рабочей частотой 37,5 ГГц, к генератору подключен чип детекторного диода с барьером Шоттки, контролировавший амплитудную модуляцию.

Имитатором лопатки служила басовая динамическая головка, с наклеенной на диффузор металлической фольгой, закреплённая на оптической скамье, что обеспечивало изменение расстояния между антенной и «лопаткой».

На рис. 4.12 представлены скриншоты с монитора ПК осциллограмм, на которых верхний след показывает форму частотного (рис. 4.12 (а)) и амплитудного (рис. 4.12 (б)) откликов, а также результат автодетектирования чипом (рис. 4.12 (в)). Нижний след везде – есть шумовой отклик, причём полоса шумов по уровню -3 дБ составляла от 10 до 100 кГц.

Полученные здесь результаты качественно подтвердили, как результаты группы проф. В.Я. Носкова, так и наши в части отношения сигнал/шум. В применении к нашим задачам это очень существенно, так как наши предшественники [69, 70] регистрировали лишь температурный шум в полосе до 50 Гц, т.е. не учитывали собственного радиоизлучения пламени.

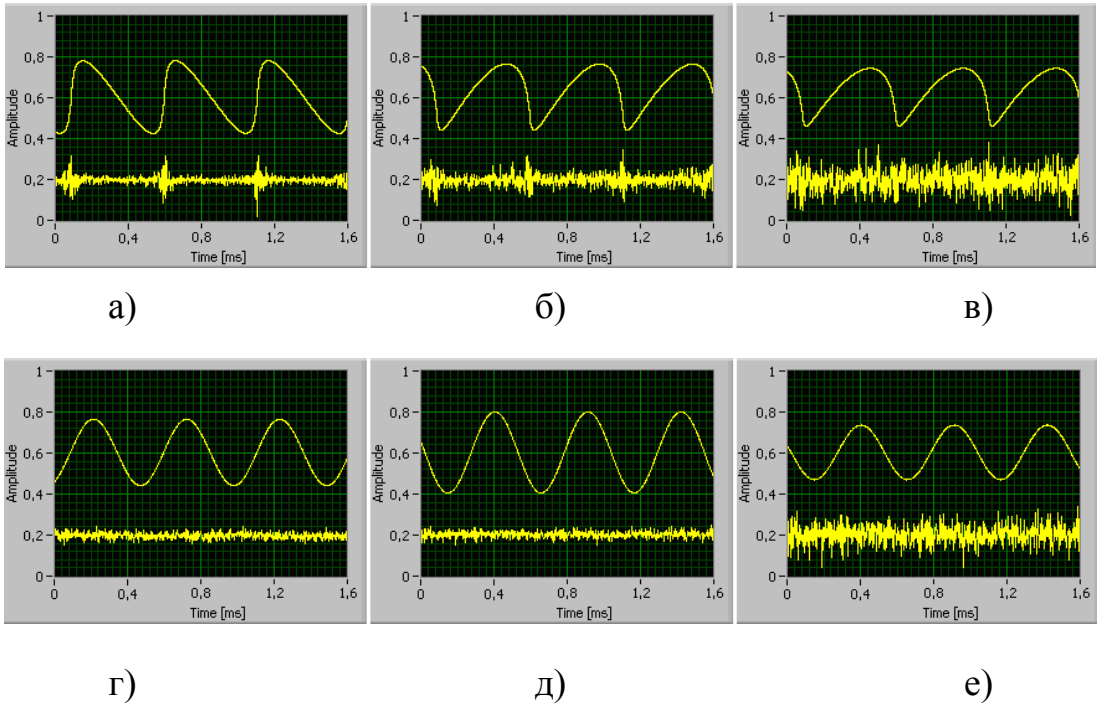


Рисунок 4.12 – Осциллограммы автодинных сигналов (верхний след) по изменению частоты – (а) и (г), амплитуды – (б) и (д), автодетектирования – (в) и (е), а также соответствующие им дорожки высокочастотного шума (нижний след)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность результатов выполненной работы можно квалифицировать как решение актуальной задачи по исследованию и созданию научно-обоснованных средств функциональной диагностики роторов компрессора и турбины современного авиационного двигателя на основе радиолокационного контроля реальных вибраций лопаток в процессе полёта. Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Предложен и разработан способ функциональной диагностики лопаток рабочих колёс ГТД, основанный на непрерывном зондировании ротора СВЧ радиоизлучением, с преобразованием состояния и перемещения лопаток в комплексный коэффициент отражения. Диагностический алгоритм включает автодинное, или автогенераторное преобразование сопротивления в частоту излучения. Диагностическим параметром выбрана форма огибающей спектра радиолокационного отклика, а диагностическими признаками – спектральные плотности на известных участках. При этом использована дискретность спектров, обусловленная отражённого сигнала циклическими процессами в ГТД (с частотой в несколько кГц).
2. В применении к двум типам антенн: кольцевой-щелевой и открытому концу круглого волновода, исследован процесс формирования диагностического отклика при квазистатическом вращении ротора. Количественно оценена амплитуда и фаза коэффициента отражения при регулярном, и вибрационном перемещении лопаток, а также при поломке лопатки. Расчёты произведены с использованием программного продукта численного электромагнитного моделирования FEKO.
3. Выбраны схемы и конструкции автодинных вибродатчиков (три варианта), преобразующих регулярные и вибрационные перемещения лопаток (а также их деформации и поломки) в частоту автодина. Проведён анализ динамики вибродатчиков в рабочем режиме ГТД, частотный отклик со-

ставляет десятки – сотни кГц, что обеспечивает надёжное обнаружение аномалий. Найдены спектральные характеристики диагностического отклика, установлены диагностические признаки вибраций, деформаций и поломок лопаток, а также проскальзывания, и биения вала. Оценено влияние размеров антенны (радиуса и ширины щели) и зондирующей частоты на величину отклика. Признано, что автодинный датчик с цилиндрическим резонатором и с открытым концом волновода в качестве антенны даёт наилучшие показатели. Изучены спектры помеховых откликов и опробованы предложенные, в более ранних исследованиях, способы их минимизации.

4. Предложен двухканальный вариант запатентованной многоканальной радиолокационной диагностической системы, и исследована её контролеспособность. При этом критериями оценки приняты информационная производительность на особо значимых участках спектра. Установлено, что контролеспособность (по мнению авиаспециалистов) пропорциональна информационной производительности на особо значимых участках виброспектра. Также установлено, что наиболее существенный рост информационной производительности обеспечивается повышением зондирующей частоты до 28-37,5 ГГц.

5. Разработаны схема и конструкция; изготовлен и испытан образец датчика с цилиндрическим волноводом, конструктивно сопрягаемый с реальными ГТД.

Конструкции и степень контролепригодности современных газотурбинных авиадвигателей, например семейств: Д-436 (Ту-334, Ан-148, Бе-200), ПС-90А (Ил-96, Ту-214, Ил-76), CFM-56 (Boeing 737 Classic, Boeing 737 NG, Airbus A320), CF-34 (Bombardier CL-605, Bombardier CRJ1000 NextGen, Embraer E-195) уже сейчас позволяют без конструктивных изменений ГТД оснастить радиолокационными диагностическими системами.

Функциональные возможности таких систем в принципе, а после доработки диагностических (компьютерных) алгоритмов, и практически, позволят

выявить в условиях полёта, и в доаварийном состоянии до половины неисправностей проточного тракта ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кеба И.В.* Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 247 с.
2. *Ахмедзянов А.М., Юлдыбаев Л.Х.* Вопросы технической диагностики состояния авиационных двигателей // Испытание авиационных двигателей. – Уфа: УАИ., 1987. – № 5.
3. *Мальцев В.М.* Фундаментальные основы диагностики быстропротекающих процессов. // ПСУКД, 2001. – №8. – С. 67-72.
4. *Барков А.В., Баркова Н.А.* Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Труды Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США. – СПб., 1999. – Вып. 9.
5. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / *Л. П. Лозицкий, В. П. Степаненко, В. А. Студеникин* и др. / Под ред. *В. П. Степаненко.* – М.: Транспорт, 1985. – 102 с.
6. *Сиротин Н.Н., Коровкин Ю.М.* Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
7. *Ремарк Э.* Три товарища. / Пер. с нем. *И. Шрайбера* и *Л. Яковленко* под редакцией *Л. Плотникова*. – Л.: Лениздат, 1959.
8. *Окороков В.С., Воробьёв В.А.* К вопросу виброакустической диагностики авиационных газотурбинных двигателей // Труды ГосНИИГА. – М., 1976. – 131 с.
9. *Roth H.* Vibration measurement on turbomachine rotor blade with optical probes // Measurement Methods in Rotating Components of Turbomachinery. New Orlean, Louisiana, 1980, p 215-224.
10. *Harling K., Shurger K.* Optimierung der Instandhaltung von Fluggerat. “Flug Revue”, 1974, p. 18.

11. *Hegner Henry R., Bridges Jack E.* In-flight and flight-line monitor system to detect foreign object damage in jet engines. “Instrum. Aerospace Ind.” Pittsburgh, 1972, vol. 18, p. 238.

12. *Zielinski M., Ziller G.* Noncontact Blade Vibration Mesurement System for Aero Engine Application // 17th International Symposium on Airbreathing Engines. Munich, Germany, 2005, paper No. ISABE-2005-1220.

13. *Zielinski M., Ziller G.* Noncontact Vibration Measurements on Compressor Rotor Blades // Measurement Science Technology, 2000, vol. 11, No. 7, pp. 847-856.

14. *Von Flotow A., Mercadal M.* Turbine Rotor Health Management with Blade Tip Sensors: From Laboratory Tool to Fielded System // Proceedings of the International Instrumentation Symposium, 2002, vol. 48, pp. 277-286.

15. *Цилински М., Циллер Г.* Устройство и способ бесконтактного измерения вибраций лопаток турбин и компрессора // Патент России № 2465562. 2007.

16. *Кузьменко В.А., Кузьменко А.В.* Способ и устройство для определения амплитуды колебаний лопаток турбин и компрессоров // Патент России №2112934. 1998.

17. *Щеголев В.В.* Способ определения амплитуд колебаний лопаток турбомашин // Патент России № 2244272. 2003.

18. *Якобсон П.П.* Особенности вибрационной диагностики газотурбинных установок [Электронный ресурс] // Литература: доклады, 2003. – URL: http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/21 (дата обращения 01.06.2013).

19. *Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К.* Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1978.

20. *Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю.* Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. – СПб.: СПбГМТУ, 2000.

21. *Викторов В.А., Лункин Б.В., Савлуков А.С.* Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 915 с.

22. *Фрайден Дж.* Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 587 с.

23. *Nyfors E., Vainikainen P.* Industrial Microwave Sensors // Norwood. Artech House, 1989.

24. *Zoughi R.* Microwave non-destructive testing and evaluation // Kluver Academic Publ., 2000.

25. *Heath S., Imregun M.* A survey of blade tip-timing measurement techniques for turbomachinery vibration // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, vol. 120, pp. 784 – 791.

26. *Holmquist E.B., Jalbert, P.L.* Turbine blade tip clearance measurement instrumentation // Proceedings of GT2007 ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, 2007.

27. *Zimmer A.K.* Investigation of the Impact of Turbine Blade Geometry on Near-Field Microwave Blade Tip Time of Arrival Measurements // A Thesis Presented to The Academic Faculty, Daniel Guggenheim School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology, 2008.

28. *Cotgrove R. M., Wood, M. I.* Opportunities for advanced sensors for condition monitoring of gas turbines // Opportunities and Advances in International Power Generation, 1996.

29. *Giubbolini L.* A multistatic microwave radar sensor for short range anticollision warning // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000.

30. *Mazzucato E.* Microwave imaging reflectometry for the visualization of turbulences in tokamaks // Nuclear Fusion, 2001.

31. *Болознев В.В., Законов М.А., Чабдаров А.Ш.* Датчик параметров пламени в камере энергетической установки // Авт. св. № 1829006 А1. 1993.

32. *Болознев В.В., Чабдаров А.Ш.* Датчик диэлектрической проницаемости потока ионизированного газа // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 5. – С. 149-152.

33. *Острейковский Д.В.* Автогенераторный метод измерения комплексных сопротивлений // VI Всесоюзный научно-технический семинар «Автоколебательные системы и усилители». – Рязань, 1987.

34. *Носков В.Я.* Анализ проблем использования автодинов в радиоволновых датчиках технологических процессов // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. научн. трудов. – Харьков: ИРЭ АН Украины, 1981. С. 48-56.

35. *Strand L.D., McNamara R.P.* A variable-frequency driver-microwave transient regression rate measurement system // Experimental Diagnostics in Combustion of Solids / *T.L. Boggs* and *B.T. Zinn*. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1978. Vol. 63. P. 155-172.

36. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Вагарин В.А.* // ПТЭ. 1994. №6. С. 162-165.

37. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э.* СВЧ-автодиный измеритель параметров вибраций // Приборы и техника эксперимента. 2004. №5. С. 130–134.

38. *D.A. Usanov, A.V. Skripal*. Near-Field Microwave Microscopy. Capabilities. Application areas // Proc. of 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON – 2012. Warsaw, Poland, May 21-23, 2012. – V.1. P. 163–168.

39. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2003. – 312 с.

40. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В.* // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С. 51.

41. *Кинг Р., Смит Г.* Антенны в материальных средах / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.

42. *Резников Г.В.* Самолётные антенны. – М.: Сов. Радио, 1962.

43. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988.

44. *Воробьёв Н.Г., Авксентьев А.А., Стахова Н.Е.* Проектирование слабонаправленных невыступающих антенн. – Казань: КАИ, 1984.

45. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. – М., ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 248 стр.

46. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Система 3D электромагнитного моделирования FEKO [Электронный ресурс]. – URL: http://ipso.ioso.ru/distance/Feko.htm (дата обращения 01.06.2013).

47. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO. – М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009, 200 стр.

48. *Harrington R.G.* Field Computation by Moment Methods. – N.-Y., 1968, pp. 230.

49. Генерирование колебаний и формирование радиосигналов: Г 34 учеб. пособие / *В.Н. Кулешов, Н.Н. Удалов, В.М. Богачев* и др.; под ред. *В.Н. Кулешова и Н.Н. Удалова.* – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с: ил.

50. *Дворников А.А., Уткин Г.М.* Автогенераторы в радиотехнике. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

51. *Дворников А.А., Уткин Г.М.* Фазированные автогенераторы радиопередающих устройств. – М.: Энергия, 1980. – 176с.

52. *Минаев М.И.* Генераторы СВЧ с внешней дополнительной обратной связью / *М.И. Минаев.* – Минск.: Вышэйшая школа, 1984 . – 166 с.

53. *Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.* Материаловедение: Учебник для машиностроительных вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с., ил.

54. *Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М.* Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 7. – С. 3-33.

55. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчёт / Под ред. *И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого.* М.: Сов. Радио, 1969. – 580 с.

56. *Хотунцев Ю. Л., Тамарчак Д. Я.* Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах / *Хотунцев Ю. Л., Тамарчак Д. Я.* – М: Радио и связь, 1982. – 239 с.

57. *Болознев В.В., Пикулев А.Н., Романычев А.Д.* Автогенераторные преобразователи в исследованиях пламён. Автоколебательные системы и усилители в РПДУ. // Сб. научн. трудов № 180. – М.: МЭИ, 1988. – С. 28.

58. *Курокава Т.* Принудительная синхронизация твердотельных СВЧ – генераторов. // ТИИЭР, 1973. – Т. 61, – № 10, – С. 12-40.

59. *Малахов А.Н.* Флуктуации в автоколебательных системах. – М.: Наука, 1967. – 660 с.

60. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – 5-е изд., стереотип. – М.: Наука, 1971.

61. *Двайт Г.Б.* Таблицы интегралов и другие математические формулы / Пер. с англ. / Под ред. Семендяева. – 5-е изд. – М.: Наука, 1978.

62. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 576 с.

63. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Изд. иностр. лит., 1963. – 830 с.

64. *Коган И.М.* Теория информации и проблемы ближней радиолокации. – М.: Сов. радио, 1968. – 144 с.

65. *Кармалита В.А.* Цифровая обработка случайных колебаний. – М.: Машиностроение, 1986.

66. *Михеев А.А.* Согласование производительности датчиков с пропускной способностью группового тракта // Датчики и системы, 2008. – Т. 6, №4. – С. 75-79.

67. Диагностика внутрикамерных процессов в энергетических установках: монография / *Р.А. Гафуров, В.В. Соловьев.* – М.: Машиностроение, 1991. – 271 с.

68. *Гафуров Р.А.* Неразрушающие методы контроля двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие / Под ред. *И. Х. Фахрутдинова*. – Казань: КАИ, 1981.

69. *Сафонова Е.В.* Теплостойкие СВЧ датчики систем контроля режимов горения: Дис. канд. техн. наук.: 05.11.13. – Казань, 2003. – 183 с.

70. *Станченков М.А.* СВЧ датчик плотности теплового потока: Дис. канд. техн. наук.: 05.11.13. – Казань, 2012. – 175 с.

71. *Boloznev V.V., Safonova E.V.* Diode SHF-active oscillator with multilink resonator in autodine mode // Proc. of Int. Symp. AFC and SG., St-Peterburg, Russia, 1998.

72. *Болознев В.В., Сафонова Е.В., Султанов Ф.И., Станченков М.А., Мирсаитов Ф.Н., Сулейманов С.С.* Способ контроля режима ТЭУ и датчик для его осуществления // Патент России № 2374559. 2009. БИ №33.

73. *Мирзоев А.Д.* Комплексная система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей // АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ / Двигатели и энергоустановки, 2007. – № 6 (42). – С. 47-58.

74. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трёх томах. Т.1(кн. 1) / Под общ. ред. *Ю.Н. Коптева*; [под ред. *Е.Е. Багдатьева, А.В. Гориша, Я.В. Малкова*]. – М.: ИПРЖР, 1998. – 458 с.

75. *Комаров И.В., Смольский С.М.* Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. – М: Горячая Линия – Телеком, 2010. – 366 с.

76. *Заблоцкий И.Е.* Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин / *Заблоцкий И.Е, Коростелёв Ю.А., Шипов Р.А.* – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.

77. *Болознев В.В., Сафонова Е.В.* Выбор электротехнических материалов для СВЧ датчиков высокотемпературных технологических потоковых процессов // Межвузовский сборник научных трудов, посвященный 110-летию В.К. Зворыкина. – Муром, 1999. – С. 84-90.

78. Signal processing principal in a microwave autodyne sensor / *Boloznev V.V., Safonova E.V.* [and others] // Abstracts and proceedings of the 19th European frequency and time forum, Besancon, France. – 2005.

79. *Дворяшин Б.В.* Метрология и радиоизмерения: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / *Дворяшин Б.В.* – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.

80. *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. – М.: Техносфера, 2002. – 401 с.

81. *Шахмаев М. М.* ЧМ автогенератор с варикапом: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – Казань: КАИ, 1978. – 65 с.

82. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов. / *Васильев В.И., Гусев Ю.М.,. Иванов А.И.* [и др.] – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

83. Формирование прецизионных частот и сигналов: Учеб. пособие / *Ямпурин Н.П., В.В. Болознев, Е.Ф. Сафонова* [и др.]. – Нижний Новгород: Нижегородский. гос. техн. ун-т., 2003. – 187 с.

84. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования: Учеб. пособие для вузов гражд. авиации / *Воробьёв В.Г., Глухов В.В., Козлов Ю.В.* [и др.] / Под ред. *Синдеева И.М.* – М.: Транспорт, 1984. – 191 с.

85. Диагностика авиационных ГТД / *Пашаев А.М., Садыков Р.А, Макаров Н.В.* [и др.]. – Баку: Sigma, 2004. – 188 с.

86. *Шмалешок А.С.* О возможности диагностики параметров неоднородных сред по модовым характеристикам их тепловых шумов. – М.: Препринт № 2 (357) ИРЭ АН СССР, 1983.

87. *Резник А.Н.* Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34, № 5. С. 512-518.

88. А. с. 1396730 СССР, МКИ 4 G 01 J 5/50. Способ определения глубинных температур объектов / С.В. Маречек, Ю.Н. Муськин, В.М. Поляков, А.С. Шмалешок.

89. *Вакс В. Л.* Ближнее тепловое поле и возможности его использования для глубинной температурной диагностики сред / В.Л. Вакс, К.П. Гайкович, А.Н. Резник // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 1. С. 8-25.

90. *Rosner B.T.* High-frequency near-field microscopy / *B.T. Rosner and D.W. van der Weide*// Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73, N. 7. P. 2505-2525.

91. *Steinhauer D. E.* Imaging of microwave permittivity, tunability, and damage recovery in (Ba, Sr)TiC>3 thin films / *D. E. Steinhauer, C. P. Vlahacos, F. C. Wellstood* et al.// Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 75. P. 3180-3182.

92. *Golosovsky M.* High-spatial resolution resistivity mapping of large-area YBCO films by a near-field millimeter-wave microscope / *M. Golosovsky, A. Galkin, and D. Davidov* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1996. Vol. 44. P. 1390-1392.

93. *Юрасова Н.В.* Ближнепольное СВЧ зондирование плоскослоистых сред: Дис. канд. физ.-мат. наук.: 01.04.03. – Нижний Новгород, 2006. – 122 с.

94. *Евтухов С.Н.* Томография термоакустических свойств среды и акустического нелинейного параметра: Дис. канд. физ.-мат. наук.: 01.04.06. – М: МГУ, 2007. – 200 с.

95. *Sheinshleiger V.B.* Study of the Effect of Nonlinear Scattering of Radio Waves by Real Metallic Objects // Proc. on IEEE Int. Radar Conf. On Ra-dar-95, Arlingtone, 1995.

96. *Бугаев А. С.* Диагностика функционального состояния человека с помощью РЛС / *А.С. Бугаев, И.А. Васильев* [и др.] // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: 2 всерос. науч. конф.-семинар. [Муром, 4-7 июля 2006 г]. –Муром: МИ ВлГУ, 2006. – С. 466-470.

97. *Chen Kum-Mu, Nyquist D.P.* Transient radar for target identificatioonand detection // Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. – Chicago (USA). –1992. – Vol. 3. – P. 1245.

98. *Amnoiy R.* Design of UWB Radar Sensor / Kassel Unisersity, 2007.

99. *Ramsey N.F.* Experiments with separated oscillatory fields and hydrogen masers // Rev. Mod. Phys. – 1990. Vol 62, № 3. – P. 541-553.

100. *Kleppner D., Goldenberg H.M., Ramsey N.F.* Theory of the hydrogen maser // Phys. Rev. – 1962. Vol 126, № 2. – P. 603-615.

101. *Koshelyaevsky N.* H-masers in USSR //Proc. of 13-th EFTF Symp., France, Besancon, 1999.

102. *Мирсаитов Ф.Н., Гимадеева Л.А., Болознев В.В.* Спектр при радиоволновой вибродиагностике ротора газотурбинного авиадвигателя // Научно-

технический вестник Поволжья. № 3, 2013 г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – С. 198-201.

103. *Мирсаитов Ф.Н., Сулейманов С.С., Болознев В.В.* Способ вибродиагностики ротора газотурбинного авиадвигателя // Научно-технический вестник Поволжья. № 3, 2013 г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – С. 202-205.

104. *Болознев В.В., Мирсаитов Ф.Н., Сафонова Е.В., Станченков М.А., Сулейманов С.С., Султанов Ф.И.* Датчик контроля режима тепловой энергетической установки // Патент России на полезную модель № 77419. 2008.

105. *Данилин А.*И. Дискретно-фазовые преобразователи перемещений элементов вращающихся узлов изделий машиностроения: Дис. докт. техн. наук.: 05.13.05. – Самара, 2011. – 280 с.

106. *Астанин Л.Ю.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л.Ю. Астанин, А.А. Костылёв. – М.: Радио и связь, 1989. – 192 с.

107. *Осипов, М.Л.* Сверхширокополосная радиолокация / М.Л. Осипов // Радиотехника. – 1995. – №3. – С. 36.

108. *Агапова Е.В., Овчаров А.П., Седельников Ю.Е.* Оптимизация требований к частотному диапазону средств БРЛ малоразмерных объектов. // Труды VI международной научно-технической конференции «Физика и технологии волновых процессов». – Казань, 2007.

109. *Баскаков С.И.* Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов по спец. «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1992. – 416 с.

110. *Носков В.Я., Игнатков К.А.* Экспериментальные исследования сигналов автодинных СВЧ-датчиков вибраций // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2013): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 8–13 сент. 2013 г.) Севастополь: Вебер, 2013. Т. 2. С. 1049–1050.

111. *Носков В.Я., Игнатков К.А.* Анализ шумовых характеристик автодинных СВЧ-датчиков малых перемещений // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМи-

Ко’2013): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 8–13 сент. 2013 г.) Севастополь: Вебер, 2013. Т. 2. С. 1046–1048.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты FEKO-моделирования

Таблица 1А – Анализ размеров конструкции коаксиального волновода с кольцевой-щелевой антенной

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)		
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η	
					Ось Y	Ось X	Ось Z					
2,8E+10	32	1,7	0,04	0	0,022	0	0,002	0	0	0,545	125	Выбор длины волновода и частоты зондирования. Лопатка в свободном пространстве.
2,8E+10	32	1,7	0,04	0	0,022	0	0,002	15	0	0,548	125	
2,8E+10	66	3	0,04	0	0,022	0	0,002	0	0	0,598	109	
2,8E+10	66	3	0,04	0	0,022	0	0,002	15	0	0,597	109	
2,8E+10	42	2	0,04	0	0,022	0	0,002	0	0	0,528	112	
2,8E+10	42	2	0,04	0	0,022	0	0,002	15	0	0,53	112	
2,8E+10	24	1,5	0,04	0	0,022	0	0,002	0	0	0,503	130	
2,8E+10	24	1,5	0,04	0	0,022	0	0,002	15	0	0,505	130	
2,8E+10	42	2	0,03	0	0,022	0	0,002	0	0	0,524	62,9	
2,8E+10	42	2	0,03	0	0,022	0	0,002	15	0	0,524	62,7	
2,8E+10	42	2	0,0275	0	0,022	0	0,002	0	0	0,538	-129	
2,8E+10	42	2	0,0275	0	0,022	0	0,002	15	0	0,539	-129	
2,8E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,532	39,4	
2,8E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	15	0	0,531	39,1	
2,8E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,001	0	0,001	0,531	39,4	
2,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	0	0	0,527	-152	
2,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	15	0	0,526	-153	
2,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,001	0	0,001	0,524	-153	
2,8E+10	42	2	0,035	0	0,022	0	0,002	0	0	0,53	82,5	
2,8E+10	42	2	0,035	0	0,022	0	0,002	15	0	0,529	82,4	
2,8E+10	42	2	0,02	0	0,022	0	0,002	0	0	0,514	13,7	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)		
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η	
					Ось Y	Ось X	Ось Z					
2,8E+10	42	2	0,02	0	0,022	0	0,002	15	0	0,515	13,7	
3E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,467	-82,6	
3E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	15	0	0,464	-82,5	
4,8E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,775	-25,6	
4,8E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	15	0	0,775	-25,5	
4,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	0	0	0,768	-96,8	
4,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	15	0	0,768	-96,7	
4,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,001	0	0,001	0,768	-96,8	
4,8E+10	42	2	0,022	0	0,022	0	0,002	0	0	0,768	-37,8	
4,8E+10	42	2	0,022	0	0,022	0	0,002	15	0	0,768	-38,7	
4,8E+10	42	2	0,02	0	0,022	0	0,002	0	0	0,77	-169,0	
4,8E+10	42	2	0,02	0	0,022	0	0,002	15	0	0,769	-169,0	
2,8E+10	66	3	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,689	-153	Присутствие первой ступени. Анализ лопатки второй ступени
2,8E+10	66	3	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,691	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,688	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,691	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	0	0,022	0	0,002	0	0	0,689	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	0	0,022	0	0,002	10	0	0,689	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,697	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,686	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,703	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,679	-155	
2,8E+10	66	3	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,678	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,677	-154	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)		
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η	
					Ось Y	Ось X	Ось Z					
2,8E+10	42	2	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,63	-151	ОТСУТСВИЕ ПОМЕХ ГРАФИКИ
2,8E+10	42	2	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,62	-150	
3E+10	66	3	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,637	93,1	
3E+10	66	3	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,634	92,3	
3E+10	42	2	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,581	97,2	
3E+10	42	2	0,0225	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,576	96,4	
2,8E+10	66	3	0,025	12	0,022	0,08	0,01	0	0	0,684	36,6	
2,8E+10	66	3	0,025	12	0,022	0,08	0,01	10	0	0,684	36,8	
2,8E+10	66	3	0,025	9	0,022	0,06	0,0066	0	0	0,679	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	9	0,022	0,06	0,0066	10	0	0,685	36,5	
2,8E+10	66	3	0,025	8	0,022	0,054	0,0056	0	0	0,68	36,8	
2,8E+10	66	3	0,025	8	0,022	0,054	0,0056	10	0	0,683	36,6	
2,8E+10	66	3	0,025	7	0,022	0,048	0,0048	0	0	0,682	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	7	0,022	0,048	0,0048	10	0	0,678	36,8	
2,8E+10	66	3	0,025	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,69	36,6	
2,8E+10	66	3	0,025	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,681	37,2	
2,8E+10	42	2	0,025	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,635	40,9	
2,8E+10	42	2	0,025	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,625	41,8	
3E+10	66	3	0,025	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,645	-86,6	
3E+10	66	3	0,025	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,642	-87,3	
3E+10	42	2	0,025	6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,582	-82,1	
3E+10	42	2	0,025	6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,578	-82,9	
2,8E+10	66	3	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,688	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,681	-154	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)		
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η	
					Ось Y	Ось X	Ось Z					
2,8E+10	42	2	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,632	-151	
2,8E+10	42	2	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,625	-150	
3E+10	66	3	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,632	93,1	
3E+10	66	3	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,631	92,6	
3E+10	42	2	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,575	97,2	
3E+10	42	2	0,0225	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,573	96,7	
2,8E+10	66	3	0,025	5	0,022	0,034	0,0034	0	0	0,684	36,3	
2,8E+10	66	3	0,025	5	0,022	0,034	0,0034	10	0	0,684	36,5	
2,8E+10	66	3	0,025	4	0,022	0,028	0,003	0	0	0,682	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	4	0,022	0,028	0,003	10	0	0,679	36,4	
2,8E+10	66	3	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,692	36,6	
2,8E+10	66	3	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,685	36,9	
2,8E+10	42	2	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,636	40,9	
2,8E+10	42	2	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,629	41,4	
3E+10	66	3	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,64	-86,6	
3E+10	66	3	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,639	-87	
3E+10	42	2	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,577	-82	
3E+10	42	2	0,025	3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,575	-82,5	
2,8E+10	66	3	0,0225	0	0,022	0	0,002	0	0	0,682	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	0	0,022	0	0,002	10	0	0,684	-154	
2,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	0	0	0,626	-150	
2,8E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	10	0	0,629	-150	
3E+10	66	3	0,0225	0	0,022	0	0,002	0	0	0,639	92,5	
3E+10	66	3	0,0225	0	0,022	0	0,002	10	0	0,641	92,8	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)		
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η	
					Ось Y	Ось X	Ось Z					
3E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	0	0	0,582	96,5	
3E+10	42	2	0,0225	0	0,022	0	0,002	10	0	0,583	96,8	
2,8E+10	66	3	0,025	2	0,022	0,014	0,0022	0	0	0,679	36,5	
2,8E+10	66	3	0,025	2	0,022	0,014	0,0022	10	0	0,674	36,4	
2,8E+10	66	3	0,025	1	0,022	0,007	0,002	0	0	0,681	36,4	
2,8E+10	66	3	0,025	1	0,022	0,007	0,002	10	0	0,682	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,686	37,1	
2,8E+10	66	3	0,025	0	0,022	0	0,002	10	0	0,689	37,1	
2,8E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,63	41,7	
2,8E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	10	0	0,633	41,7	
3E+10	66	3	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,647	-87,1	
3E+10	66	3	0,025	0	0,022	0	0,002	10	0	0,648	-86,8	
3E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,548	-82,7	
3E+10	42	2	0,025	0	0,022	0	0,002	10	0	0,586	-82,4	
2,8E+10	66	3	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,682	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,682	-154	
2,8E+10	42	2	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,626	-150	
2,8E+10	42	2	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,626	-150	
3E+10	66	3	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,637	92,4	
3E+10	66	3	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,637	92,7	
3E+10	42	2	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,579	96,3	
3E+10	42	2	0,0225	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,579	96,7	
2,8E+10	66	3	0,025	-1	0,022	0,007	0,002	0	0	0,685	36,5	
2,8E+10	66	3	0,025	-1	0,022	0,007	0,002	10	0	0,682	37,2	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)		
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η	
					Ось Y	Ось X	Ось Z					
2,8E+10	66	3	0,025	-2	0,022	0,014	0,002	0	0	0,683	36,7	
2,8E+10	66	3	0,025	-2	0,022	0,014	0,002	10	0	0,683	37,1	
2,8E+10	66	3	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,686	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,687	36,9	
2,8E+10	42	2	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,63	41,4	
2,8E+10	42	2	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,63	41,3	
3E+10	66	3	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,644	-87,3	
3E+10	66	3	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,644	-87	
3E+10	42	2	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	0	0	0,581	-82,9	
3E+10	42	2	0,025	-3	0,022	0,02	0,0025	10	0	0,581	-82,5	
2,8E+10	66	3	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,681	-154	
2,8E+10	66	3	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,683	-154	
2,8E+10	42	2	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,624	-150	
2,8E+10	42	2	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,626	-150	
3E+10	66	3	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,637	92,5	
3E+10	66	3	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,635	92,7	
3E+10	42	2	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,58	96,4	
3E+10	42	2	0,0225	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,578	96,7	
2,8E+10	66	3	0,025	-4	0,022	0,028	0,003	0	0	0,683	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	-4	0,022	0,028	0,003	10	0	0,685	37,2	
2,8E+10	66	3	0,025	-5	0,022	0,034	0,0034	0	0	0,684	36,7	
2,8E+10	66	3	0,025	-5	0,022	0,034	0,0034	10	0	0,684	37	
2,8E+10	66	3	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,685	36,8	
2,8E+10	66	3	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,685	36,9	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)		
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η	
					Ось Y	Ось X	Ось Z					
2,8E+10	66	3	0,025	-7	0,022	0,048	0,0048	0	0	0,681	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	-7	0,022	0,048	0,0048	10	0	0,688	37,2	
2,8E+10	66	3	0,025	-8	0,022	0,054	0,0056	0	0	0,679	36,8	
2,8E+10	66	3	0,025	-8	0,022	0,054	0,0056	10	0	0,684	37,2	
2,8E+10	42	2	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,629	41,4	
2,8E+10	42	2	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,63	41,4	
2,8E+10	66	3	0,025	-9	0,022	0,06	0,0066	0	0	0,68	36,9	
2,8E+10	66	3	0,025	-9	0,022	0,06	0,0066	10	0	0,684	37	
2,8E+10	66	3	0,025	-12	0,022	0,08	0,01	0	0	0,683	36,4	
2,8E+10	66	3	0,025	-12	0,022	0,08	0,01	10	0	0,679	36,9	
3E+10	66	3	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,644	-87,2	
3E+10	66	3	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,643	-87	
3E+10	42	2	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	0	0	0,581	-82,8	
3E+10	42	2	0,025	-6	0,022	0,04	0,004	10	0	0,58	-82,5	

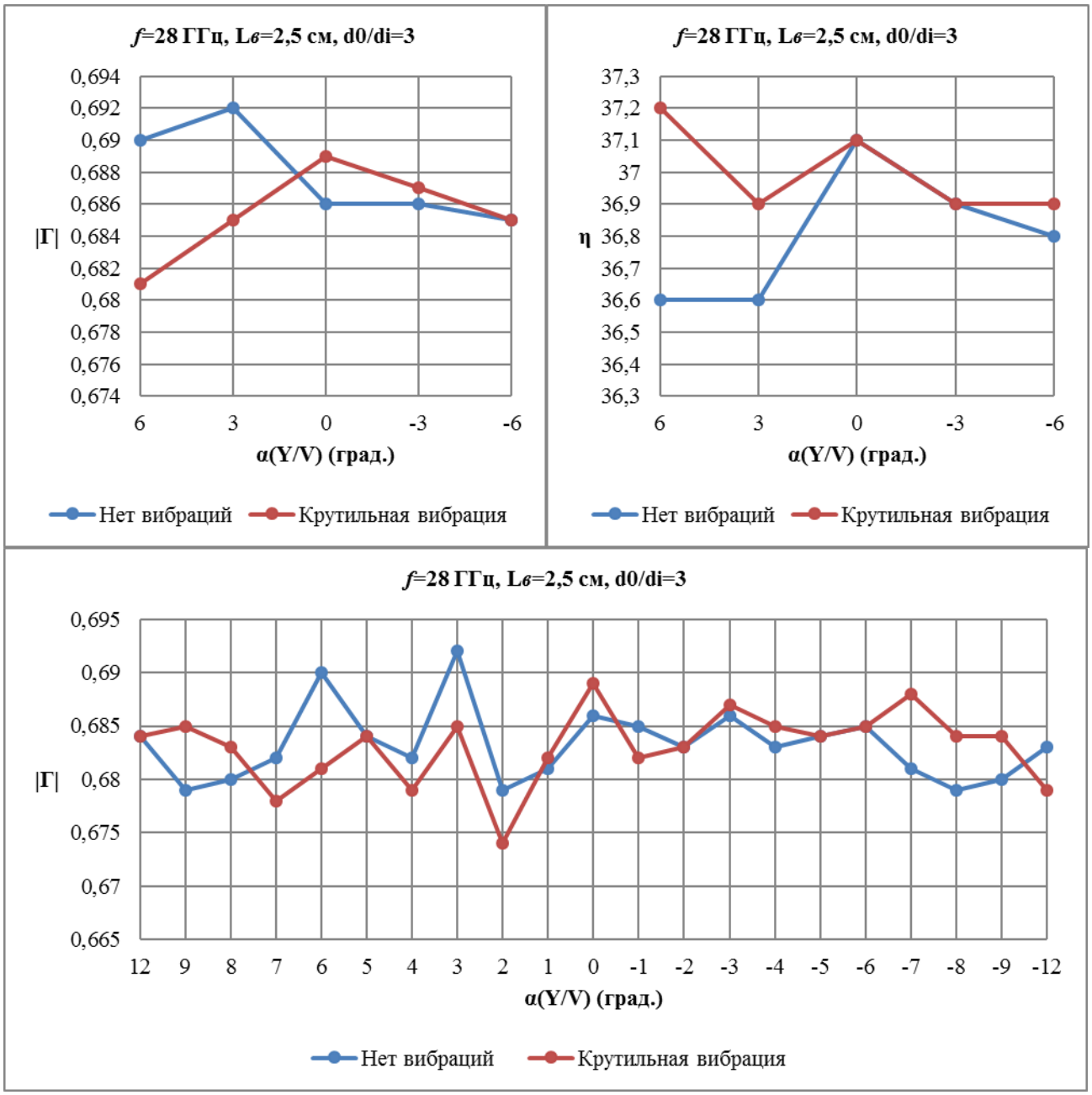


Рисунок 1А – Графики по таблице 1А

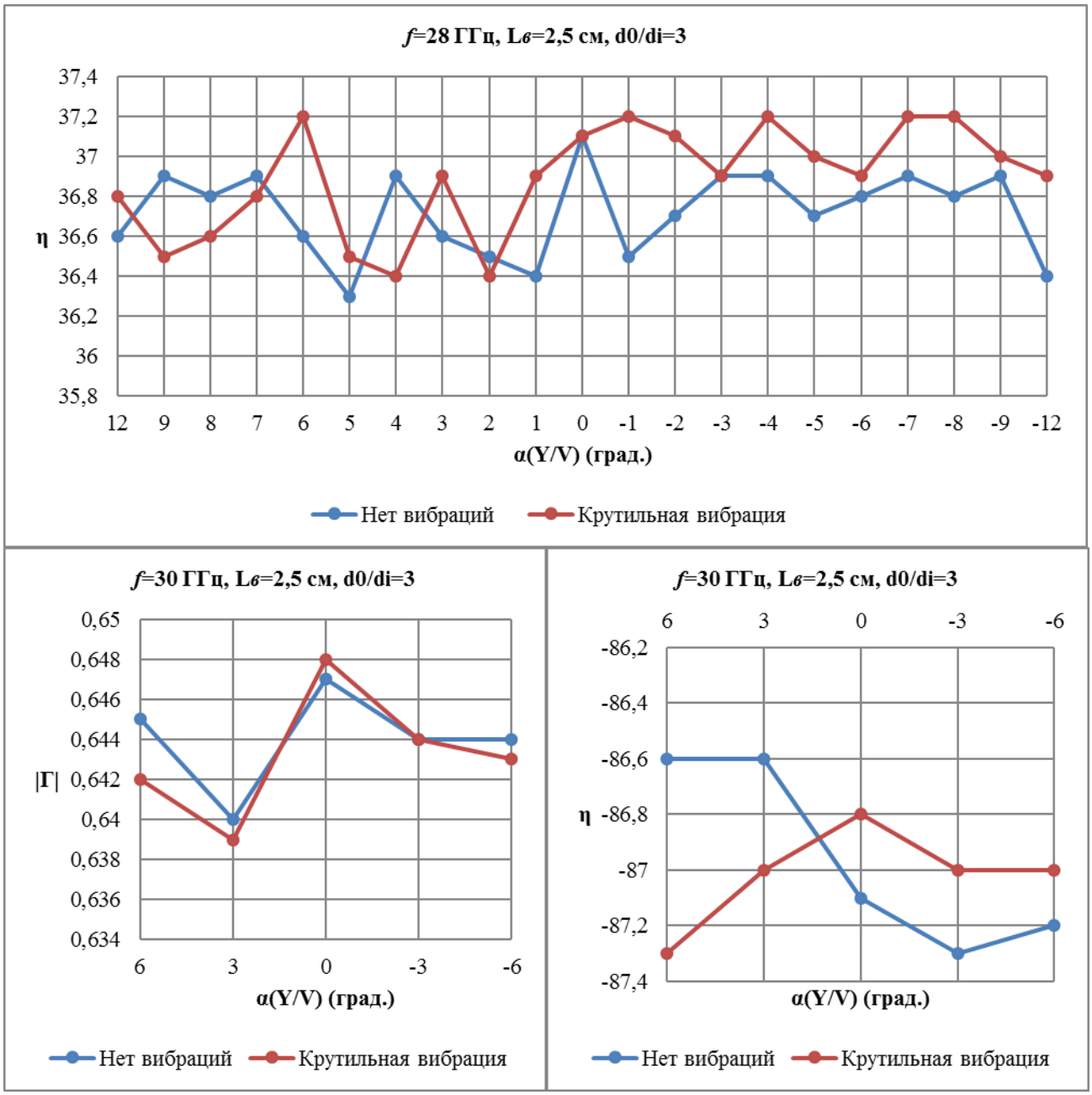


Рисунок 1А – Графики по таблице 1А (продолжение)

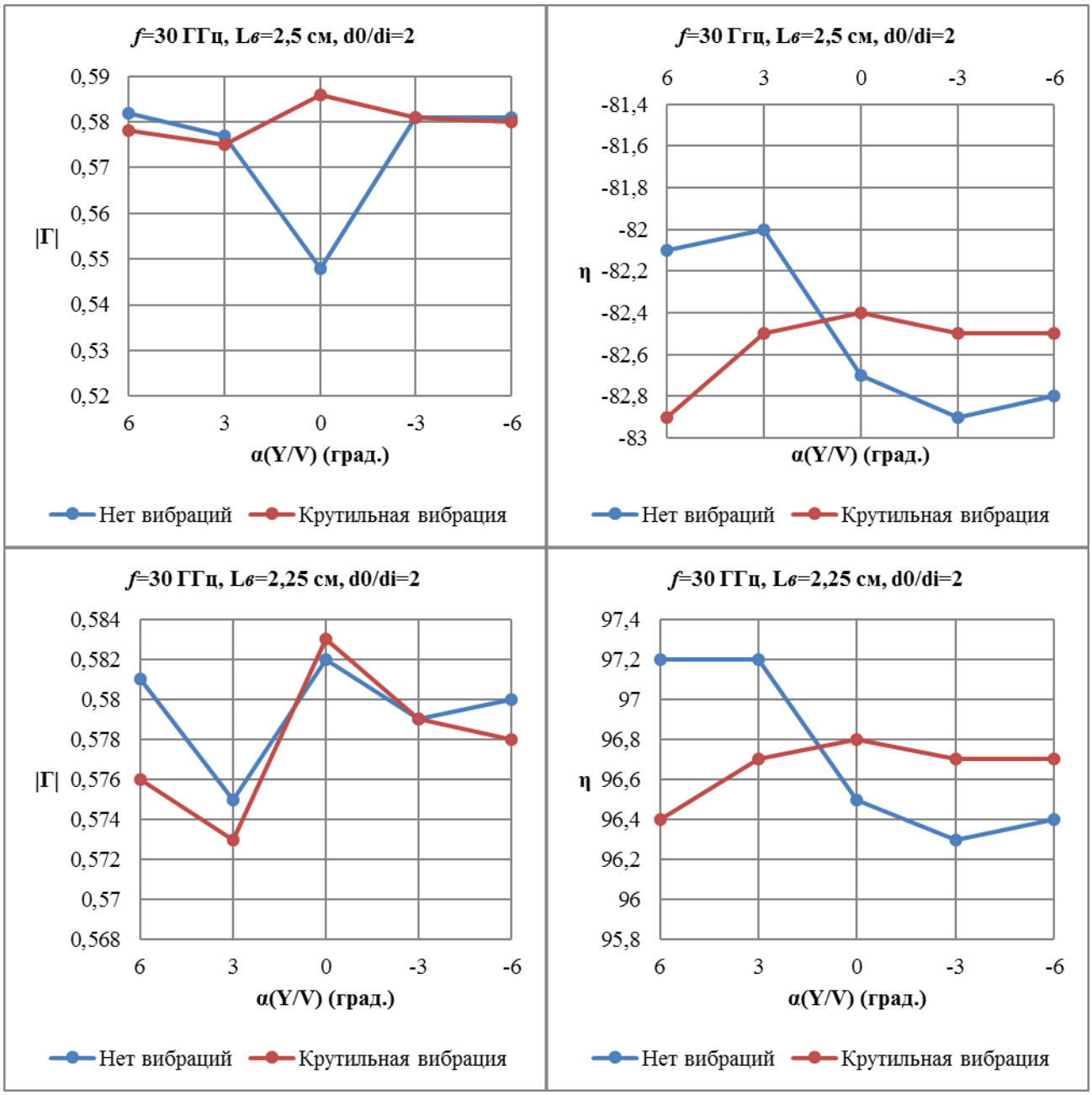


Рисунок 1А – Графики по таблице 1А (продолжение)

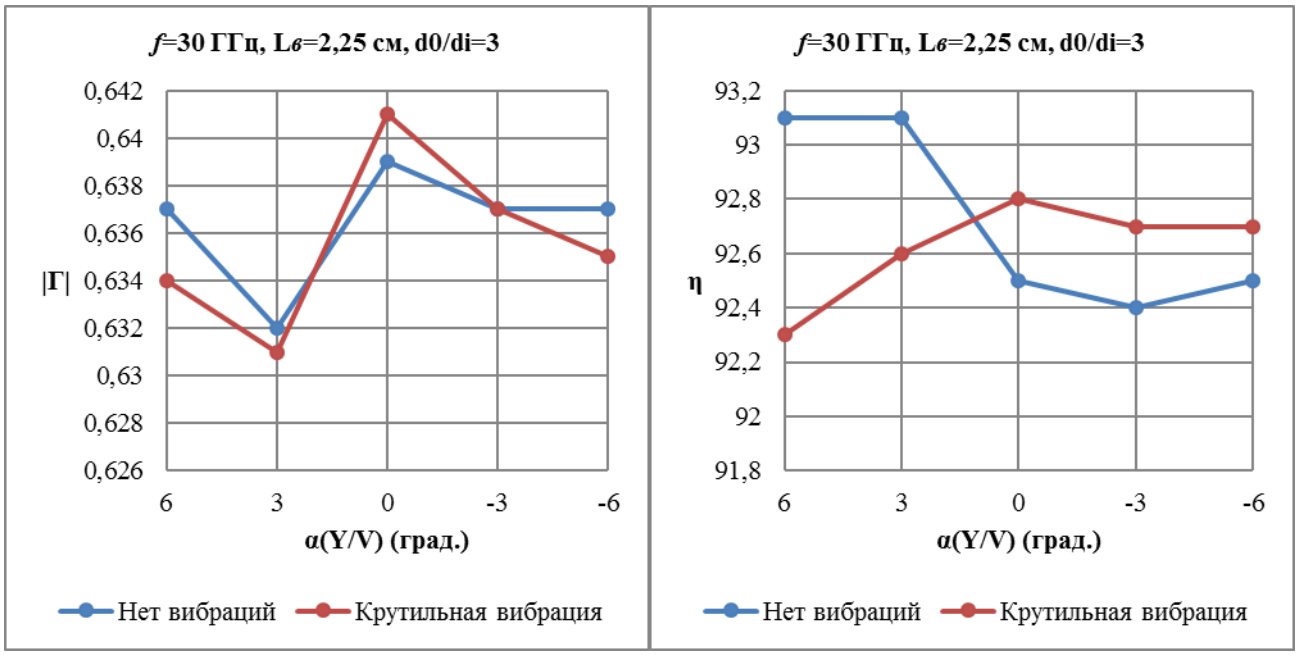


Рисунок 1А – Графики по таблице 1А (продолжение)

Таблица 2А – Анализ откликов антенн с коаксиальным и круглым волноводами с открытыми концами на перемещение одиночной лопатки

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)	
				α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	Г	η
					Ось Y	Ось X	Ось Z				
3E+10	66	3	0,025	-16	0,022	0,08	0,016	0	0	0,645	-87,4
3E+10	66	3	0,025	-12	0,022	0,08	0,01	0	0	0,641	-87,5
3E+10	66	3	0,025	-8	0,022	0,054	0,0056	0	0	0,642	-87,2
3E+10	66	3	0,025	-4	0,022	0,028	0,003	0	0	0,647	-87,4
3E+10	66	3	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,648	-87,2
3E+10	66	3	0,025	4	0,022	0,028	0,003	0	0	0,639	-87,8
3E+10	66	3	0,025	8	0,022	0,054	0,0056	0	0	0,642	-87,4
3E+10	66	3	0,025	12	0,022	0,08	0,01	0	0	0,644	-87,3
3E+10	66	3	0,025	16	0,022	0,08	0,016	0	0	0,645	-87,5
3E+10	-	-	0,025	-16	0,022	0,08	0,016	0	0	0,126	32,3
3E+10	-	-	0,025	-12	0,022	0,08	0,01	0	0	0,127	29,9
3E+10	-	-	0,025	-8	0,022	0,054	0,0056	0	0	0,116	36
3E+10	-	-	0,025	-4	0,022	0,028	0,003	0	0	0,118	32,4
3E+10	-	-	0,025	0	0,022	0	0,002	0	0	0,131	45,3
3E+10	-	-	0,025	4	0,022	0,028	0,003	0	0	0,124	37,9
3E+10	-	-	0,025	8	0,022	0,054	0,0056	0	0	0,128	37
3E+10	-	-	0,025	12	0,022	0,08	0,01	0	0	0,129	38,9
3E+10	-	-	0,025	16	0,022	0,08	0,016	0	0	0,128	39,6

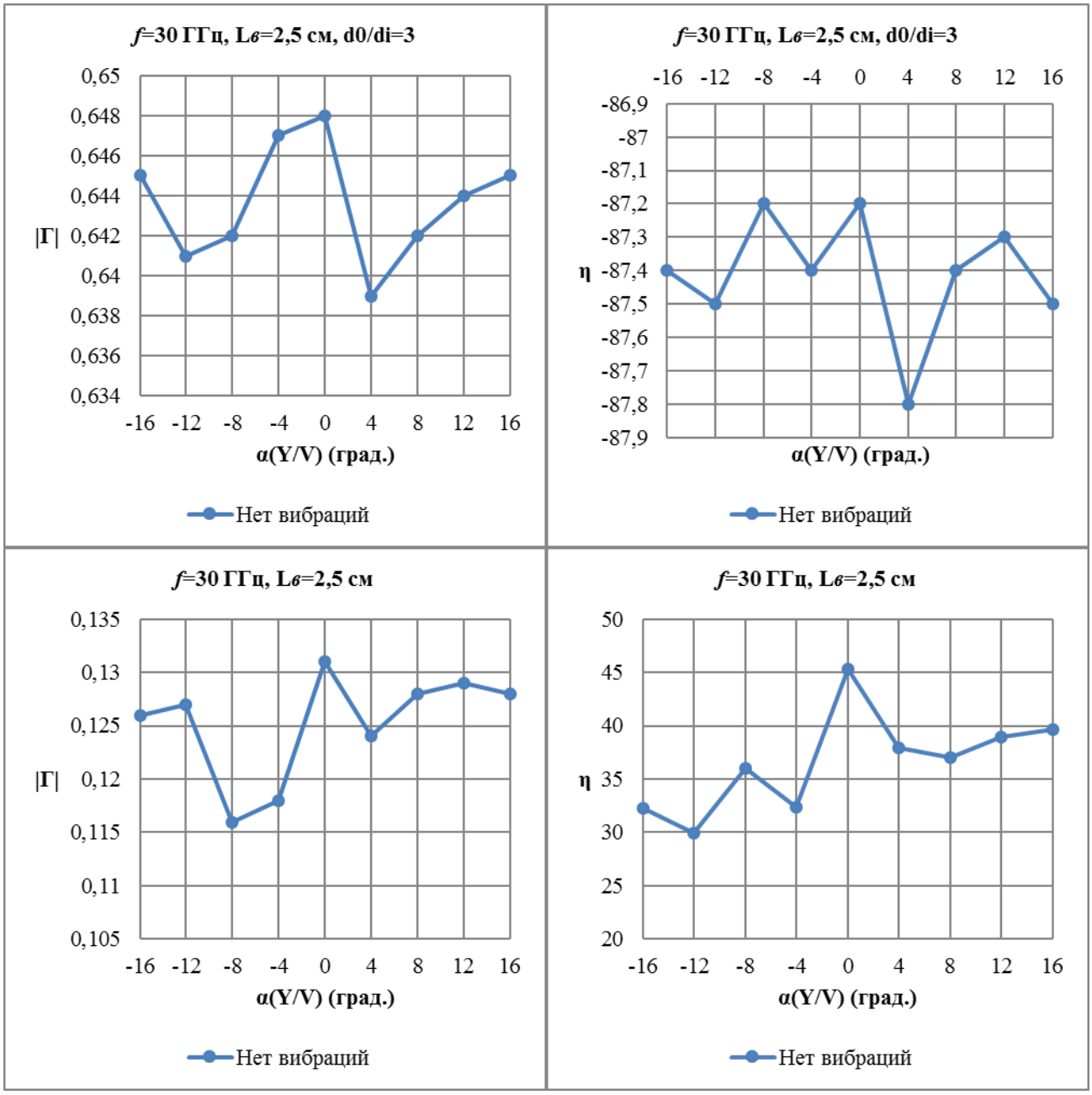


Рисунок 2А – Графики по таблице 2А

Таблица 3А – Анализ отклика антенны с круглым волноводом с открытым концом на перемещение одиночной лопатки в зоне предельной чувствительности антенны

Частота (Гц) *f*	Длина волновода (м) L*в*	Положение лопатки				Виброперемещение		Отклик антенны (S11)	
		α(Y/V) (град.)	Расстояние до датчика (м)			Крутильная (град.) *Vк*	Поперечная (м) *Vп*	|Г|	η
			Ось Y	Ось X	Ось Z				
3E+10	0,025	+∞	-	-	-	-	-	0,143	53,5
3E+10	0,025	52	0,02	0,3	0,15	-	-	0,144	48,3
3E+10	0,025	44	0,02	0,266	0,11	-	-	0,156	53
3E+10	0,025	36	0,02	0,224	0,07	-	-	0,146	57,4
3E+10	0,025	28	0,02	0,18	0,05	-	-	0,143	55,3
3E+10	0,025	20	0,02	0,13	0,03	-	-	0,15	52,5
3E+10	0,025	12	0,02	0,08	0,01	-	-	0,159	53,8
3E+10	0,025	4	0,02	0,02	0,003	-	-	0,152	57,7
3E+10	0,025	0	0,02	0	0,002	-	-	0,166	61,2
3E+10	0,025	-4	0,02	0,02	0,003	-	-	0,146	51,8
3E+10	0,025	-12	0,02	0,08	0,01	-	-	0,155	47,1
3E+10	0,025	-20	0,02	0,13	0,03	-	-	0,148	48
3E+10	0,025	-28	0,02	0,18	0,05	-	-	0,131	52,9
3E+10	0,025	-36	0,02	0,224	0,07	-	-	0,141	54,5
3E+10	0,025	-44	0,02	0,266	0,11	-	-	0,149	50,5
3E+10	0,025	-52	0,02	0,3	0,15	-	-	0,142	48,5
3E+10	0,025	-∞	-	-	-	-	-	0,143	53,5

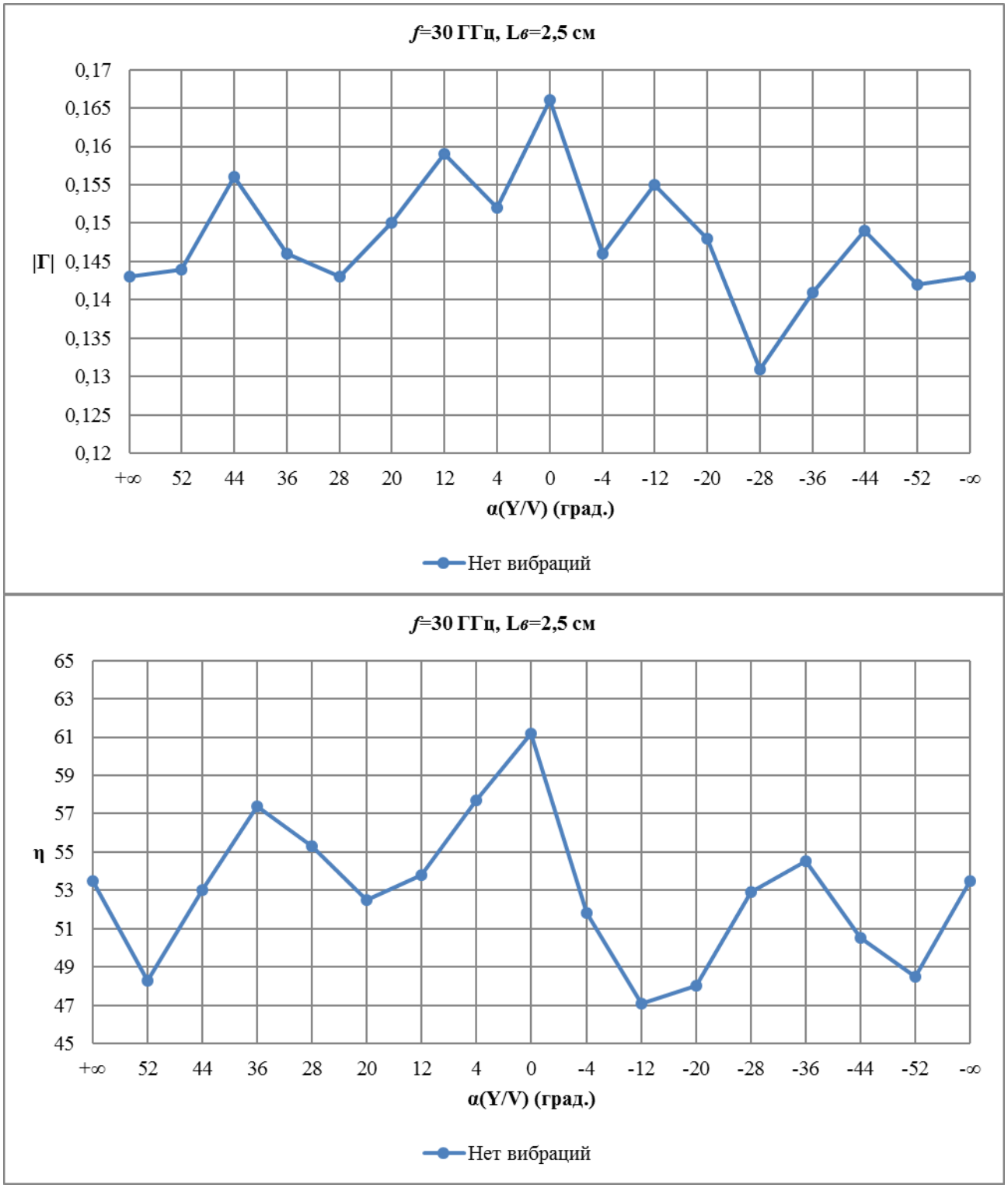


Рисунок 3А – Графики по таблице 3А

Таблица 4А – Анализ отклика кольцевой щелевой антенны и открытого конца круглого волновода в качестве антенны на перемещение группы лопаток при изменении частоты и длины волновода

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Ширина щели (м) s	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик (S11)		
					Lв (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vo*	Амплитуда |Г|	Фаза η	
3E+10	50	2,3	0,001	0,01	3	0,03	0	-	-	0,817	-82,3	Кольцевая-щелевая антенна
3E+10	50	2,3	0,001	0,01	3	0,03	-1,5	-	-	0,826	-82,3	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	3	0,024	0	-	-	0,807	-67,9	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	3	0,024	0	1	-	0,807	-67,8	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2	0,016	0	-	-	0,807	-67,8	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2	0,016	0	1	-	0,808	-67,6	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2	0,016	-1	-	-	0,791	-67,5	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,75	0,022	0	-	-	0,808	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,75	0,022	0	1	-	0,809	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,25	0,018	0	-	-	0,807	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,25	0,018	0	1	-	0,807	111	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,5	0,02	0	-	-	0,806	-68,9	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,5	0,02	0	1	-	0,808	-68,6	
3,75E+10	50	2,3	0,0008	0,008	2,5	0,02	-1	-	-	0,79	-68,5	
3E+10	-	-	-	0,01	3	0,03	0	-	-	0,277	127	Кругл. волн-д
3E+10	-	-	-	0,01	3	0,03	0	1	-	0,28	127	
3E+10	-	-	-	0,01	3	0,03	-1,5	-	-	0,272	128	

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Ширина щели (м) s	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик (S11)	
					Lв (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vo*	Амплитуда |Г|	Фаза η
3E+10	-	-	-	0,01	2	0,02	0	-	-	0,278	-103
3E+10	-	-	-	0,01	2	0,02	0	1	-	0,281	-103
3E+10	-	-	-	0,01	2,75	0,027	0	-	-	0,277	-107
3E+10	-	-	-	0,01	2,75	0,027	0	1	-	0,28	-108
3E+10	-	-	-	0,01	2,25	0,022	0	-	-	0,277	135
3E+10	-	-	-	0,01	2,25	0,022	0	1	-	0,279	135
3E+10	-	-	-	0,01	2,5	0,025	0	-	-	0,276	11,3
3E+10	-	-	-	0,01	2,5	0,025	0	1	-	0,279	10,9
3E+10	-	-	-	0,01	2,5	0,025	-1,5	-	-	0,27	12,9
3,75E+10	-	-	-	0,008	3	0,024	0	-	-	0,18	82
3,75E+10	-	-	-	0,008	3	0,024	0	1	-	0,176	80,4
3,75E+10	-	-	-	0,008	2	0,016	0	-	-	0,179	-55,7
3,75E+10	-	-	-	0,008	2	0,016	0	1	-	0,175	-57,4
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,75	0,022	0	-	-	0,179	-132
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,75	0,022	0	1	-	0,175	-134
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,75	0,022	-1	-	-	0,17	-127
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,25	0,018	0	-	-	0,182	159
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,25	0,018	0	1	-	0,177	157
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,5	0,02	0	-	-	0,181	13,2
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,5	0,02	0	1	-	0,176	11,5
3,75E+10	-	-	-	0,008	2,5	0,02	-1	-	-	0,172	18,4

Таблица 5А – Анализ отклика кольцевой-щелевой антенны с коаксиальным волноводом на перемещение группы лопаток

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Отношение радиусов проводников d0/di	Ширина щели (м) s	Длина волновода (м) L*в*	Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик антенны (S11)	
					α(Y/V) (град.)	Крутильная (град.) *Vк*	Обрыв лопатки (%) *Vo*	|Г|	η
3E+10	66	3	0,001	0,025	0	0	0	0,933	-82,9
3E+10	66	3	0,001	0,025	0	5	0	0,931	-83
3E+10	66	3	0,001	0,025	0	0	25	0,932	-82,9
3E+10	66	3	0,001	0,025	-1	0	0	0,928	-83,2
3E+10	66	3	0,001	0,025	-1	5	0	0,933	-83
3E+10	66	3	0,001	0,025	-1	0	25	0,935	-83,3
3E+10	66	3	0,001	0,025	-2	0	0	0,93	-82,9
3E+10	66	3	0,001	0,025	-2	5	0	0,935	-83,1
3E+10	66	3	0,001	0,025	-2	0	25	0,933	-82,9
3E+10	66	3	0,001	0,025	-3	0	0	0,934	-83,2
3E+10	66	3	0,001	0,025	-3	5	0	0,933	-83,1
3E+10	66	3	0,001	0,025	-3	0	25	0,932	-82,8
3E+10	66	3	0,001	0,025	-4	0	0	0,936	-83,3
3E+10	66	3	0,001	0,025	-4	5	0	0,934	-83,3
3E+10	66	3	0,001	0,025	-4	0	25	0,931	-83,3

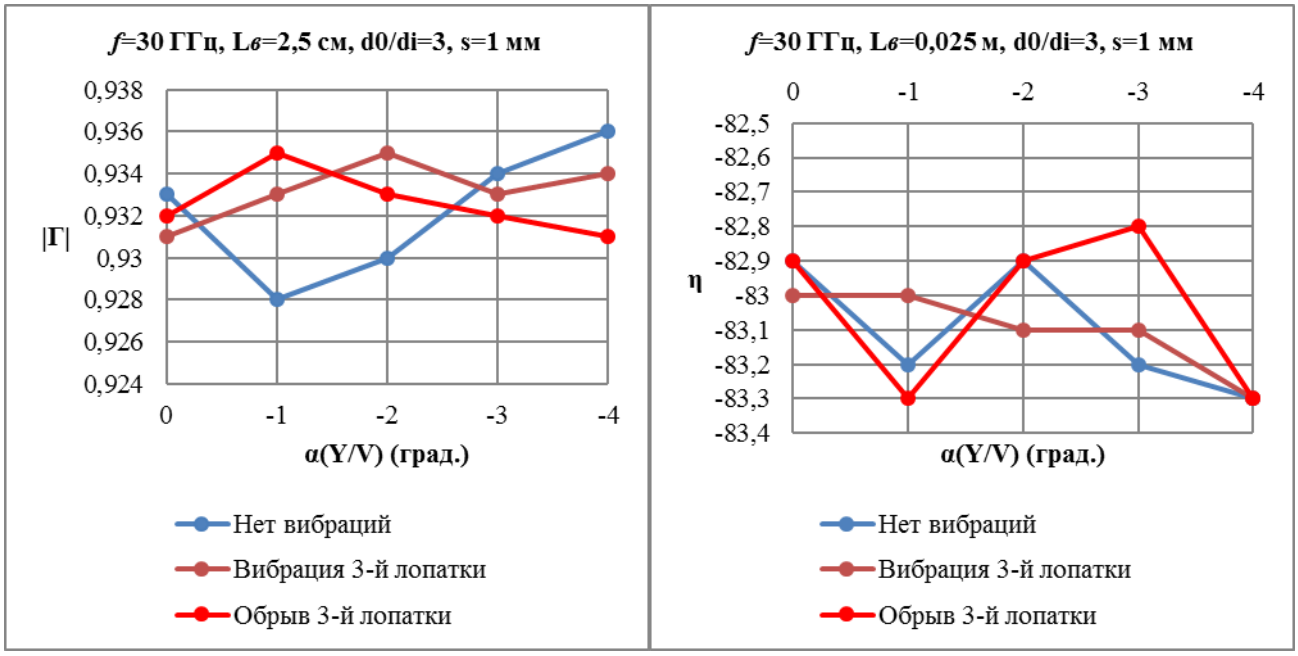


Рисунок 4А – Графики по таблице 5А

Таблица 6А – Анализ отклика антенны с круглым волноводом при открытом конце на перемещение группы лопаток

Частота (Гц) *f*	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик антенны (S11)	
	L*в* (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (град.) *Vк*	Обрыв лопатки (%) *Vo*	|Г|	η
3E+10	2,5	0,025	0	0	0	0,143	84,4
3E+10	2,5	0,025	0	5	0	0,134	88,8
3E+10	2,5	0,025	0	0	25	0,159	88,8
3E+10	2,5	0,025	-0,25	0	0	0,135	80,5
3E+10	2,5	0,025	-0,25	5	0	0,122	82
3E+10	2,5	0,025	-0,25	0	25	0,13	88,2
3E+10	2,5	0,025	-0,5	0	0	0,136	76,6
3E+10	2,5	0,025	-0,5	5	0	0,123	74,5
3E+10	2,5	0,025	-0,5	0	25	0,112	80,4
3E+10	2,5	0,025	-0,75	0	0	0,138	74,1
3E+10	2,5	0,025	-0,75	5	0	0,127	69,9
3E+10	2,5	0,025	-0,75	0	25	0,108	71,6
3E+10	2,5	0,025	-1	0	0	0,136	72,9
3E+10	2,5	0,025	-1	5	0	0,126	67,1
3E+10	2,5	0,025	-1	0	25	0,107	66,4
3E+10	2,5	0,025	-1,25	0	0	0,135	72
3E+10	2,5	0,025	-1,25	5	0	0,127	65,6
3E+10	2,5	0,025	-1,25	0	25	0,109	64,6
3E+10	2,5	0,025	-1,5	0	0	0,147	71
3E+10	2,5	0,025	-1,5	5	0	0,14	65,3
3E+10	2,5	0,025	-1,5	0	25	0,12	64,5
3E+10	2,5	0,025	-1,75	0	0	0,172	71
3E+10	2,5	0,025	-1,75	5	0	0,164	67,6
3E+10	2,5	0,025	-1,75	0	25	0,145	68,9
3E+10	2,5	0,025	-2	0	0	0,195	72,3
3E+10	2,5	0,025	-2	5	0	0,189	71,3
3E+10	2,5	0,025	-2	0	25	0,169	74
3E+10	2,5	0,025	-2,25	0	0	0,2	74,1
3E+10	2,5	0,025	-2,25	5	0	0,196	75,1
3E+10	2,5	0,025	-2,25	0	25	0,181	79,6
3E+10	2,5	0,025	-2,5	0	0	0,183	76,7
3E+10	2,5	0,025	-2,5	5	0	0,187	79,2

Частота (Гц) *f*	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик антенны (S11)	
	L*в* (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (град.) *Vк*	Обрыв лопатки (%) *Vo*	|Г|	η
3E+10	2,5	0,025	-2,5	0	25	0,178	85,3
3E+10	2,5	0,025	-2,75	0	0	0,16	81,6
3E+10	2,5	0,025	-2,75	5	0	0,171	85,1
3E+10	2,5	0,025	-2,75	0	25	0,17	90,4
3E+10	2,5	0,025	-3	0	0	0,146	86
3E+10	2,5	0,025	-3	5	0	0,161	88
3E+10	2,5	0,025	-3	0	25	0,168	90,8
3E+10	2,5	0,025	-3,25	0	0	0,145	84,7
3E+10	2,5	0,025	-3,25	5	0	0,159	85,8
3E+10	2,5	0,025	-3,25	0	25	0,167	84,7
3E+10	2,5	0,025	-3,5	0	0	0,148	80,2
3E+10	2,5	0,025	-3,5	5	0	0,158	80,9
3E+10	2,5	0,025	-3,5	0	25	0,164	76,3
3E+10	2,5	0,025	-3,75	0	0	0,146	76
3E+10	2,5	0,025	-3,75	5	0	0,153	76,9
3E+10	2,5	0,025	-3,75	0	25	0,152	69,3
3E+10	2,5	0,025	-4	0	0	0,139	73,5
3E+10	2,5	0,025	-4	5	0	0,144	74,5
3E+10	2,5	0,025	-4	0	25	0,134	66

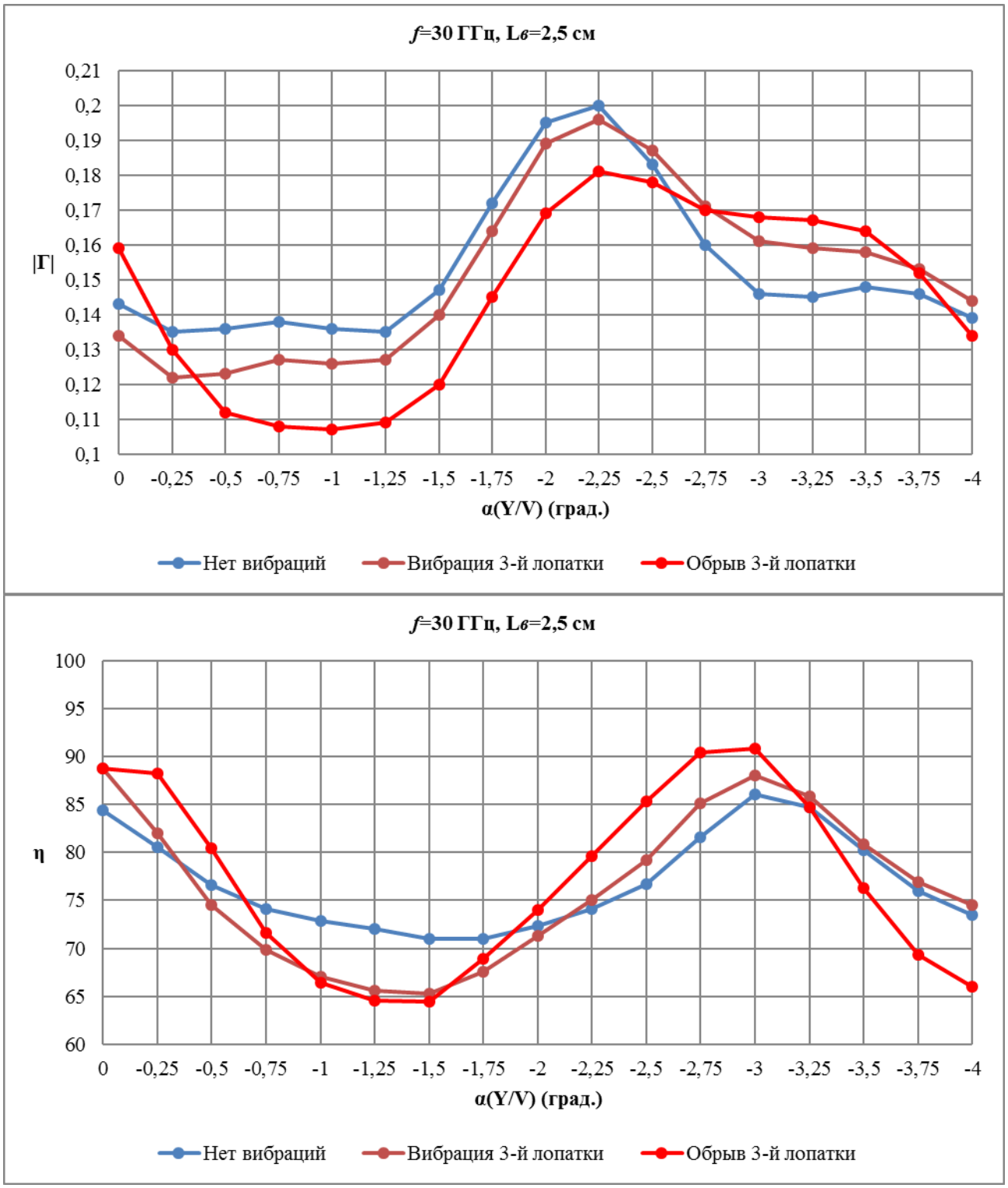


Рисунок 5А – Графики по таблице 6А

Таблица 7А – Анализ отклика кольцевой-щелевой антенны с коаксиальным волноводом на перемещение группы лопаток

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Ширина щели (м) s	Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик антенны (S11)	
			L*в* (λ)	L*в* (м)		α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vо*	Амплитуда |Г|	Фаза η
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	-	-	0,806	-68,9
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	-	-	0,79	-68,5
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	-	-	0,8	-70
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	1	-	0,808	-68,6
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	1	-	0,79	-68,6
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	1	-	0,802	-70
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	2	-	0,809	-68,8
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	2	-	0,79	-68,5
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	2	-	0,807	-69,9
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	3	-	0,805	-69
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	3	-	0,793	-68,3
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	3	-	0,798	-69,7
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	4	-	0,805	-69,3
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	4	-	0,791	-68,7
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	4	-	0,799	-70
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	5	-	0,812	-68,8
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	5	-	0,791	-68,7
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	5	-	0,8	-69,8
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	-	1	0,807	-68,7
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	-	1	0,791	-68,5

Частота (Гц) *f*	Волновое сопротив. (Ом) *ρ*	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Ширина щели (м) s	Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик антенны (S11)	
			L*в* (λ)	L*в* (м)		α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vo*	Амплитуда |Г|	Фаза η
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	-	1	0,803	-69,8
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	-	2	0,809	-68,8
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	-	2	0,791	-68,7
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	-	2	0,803	-70,1
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	-	3	0,805	-68,9
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	-	3	0,793	-68,3
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	-	3	0,802	-69,6
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	-	4	0,808	-69
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	-	4	0,791	-68,5
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	-	4	0,801	-69,9
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	0	-	5	0,808	-68,8
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-1	-	5	0,793	-68,5
3,75E+10	50	0,008	2,5	0,02	0,0008	-2	-	5	0,802	-70

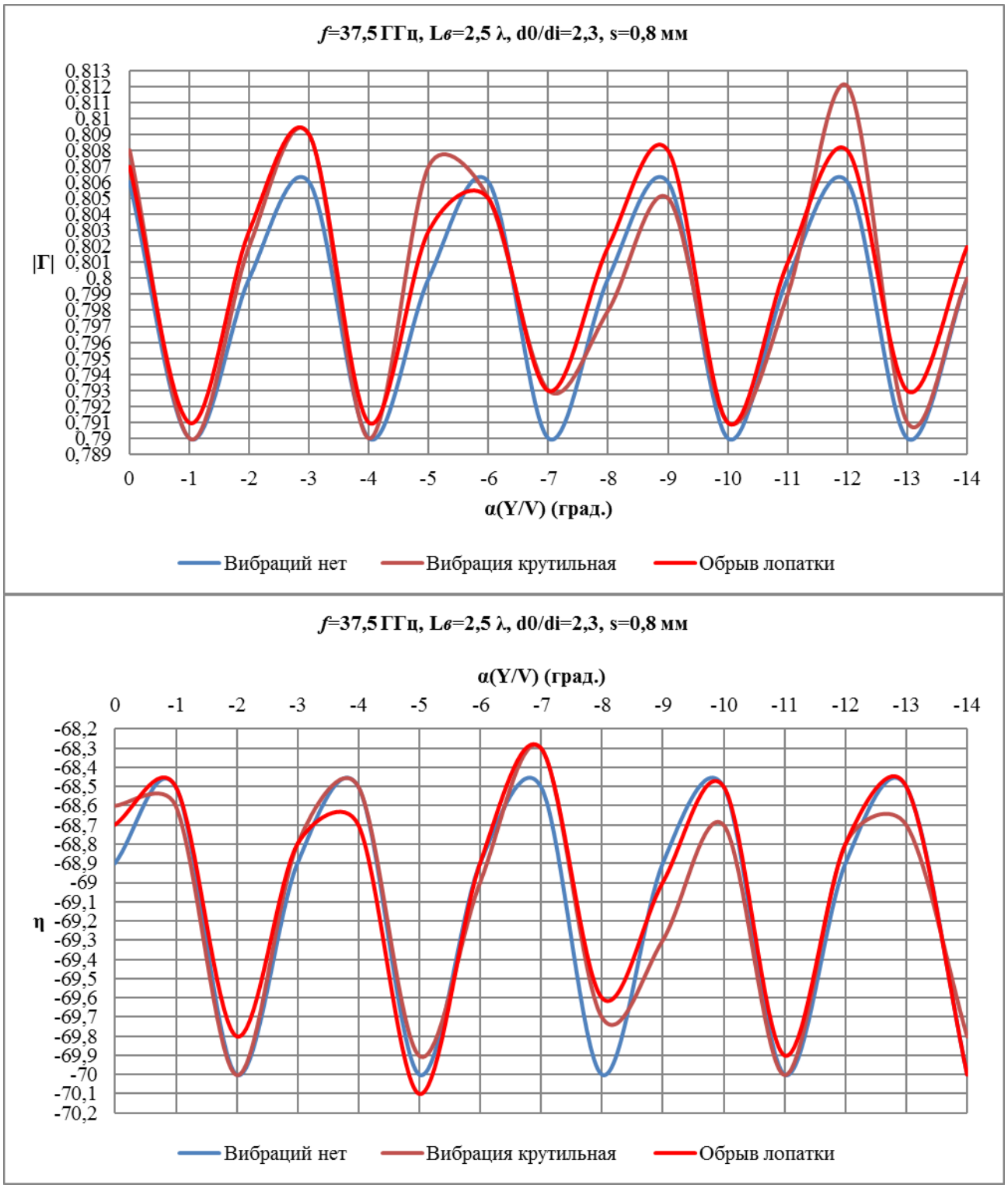


Рисунок 6А – Графики по таблице 7А

Таблица 8А – Анализ отклика антенны с круглым волноводом при открытом конце на перемещение группы лопаток

Частота (Гц) *f*	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик (S11)	
		L*в* (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vо*	Амплитуда |Г|	Фаза η
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	-	-	0,181	13,2
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	-	-	0,172	18,4
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	-	-	0,139	15,4
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	1	-	0,176	11,5
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	1	-	0,172	18,4
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	1	-	0,129	14,4
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	2	-	0,182	15,7
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	2	-	0,144	23,8
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	2	-	0,139	20,5
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	3	-	0,167	23,7
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	3	-	0,15	26,6
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	3	-	0,117	13,8
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	4	-	0,17	11,6
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	4	-	0,144	12,3
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	4	-	0,122	15,5
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	5	-	0,145	15,2
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	5	-	0,177	16
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	5	-	0,139	10,4
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	-	1	0,178	12,5
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	-	1	0,167	18,4
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	-	1	0,132	14,2

Частота (Гц) *f*	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик (S11)	
		L*в* (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vо*	Амплитуда |Г|	Фаза η
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	-	2	0,178	12,5
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	-	2	0,168	23,1
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	-	2	0,138	16,9
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	-	3	0,194	13,9
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	-	3	0,16	24,7
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	-	3	0,125	20,5
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	-	4	0,172	18,6
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	-	4	0,18	18,3
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	-	4	0,13	18,4
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	0	-	5	0,174	12
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-1	-	5	0,17	18,2
3,75E+10	0,008	2,5	0,02	-2	-	5	0,134	15,3
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	-	-	0,179	-132
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	-	-	0,17	-127
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	-	-	0,137	-130
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	1	-	0,175	-134
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	1	-	0,17	-127
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	1	-	0,128	-131
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	2	-	0,18	-130
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	2	-	0,142	-122
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	2	-	0,137	-125
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	3	-	0,165	-122
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	3	-	0,15	-119

Частота (Гц) *f*	Длина волны (м) λ	Длина волновода		Вращение группы лопаток	Виброперемещение		Отклик (S11)	
		L*в* (λ)	L*в* (м)	α(Y/V) (град.)	Крутильная (№ лопатки) *Vк*	Обрыв лопатки (№) *Vо*	Амплитуда |Г|	Фаза η
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	3	-	0,116	-132
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	4	-	0,168	-134
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	4	-	0,143	-133
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	4	-	0,12	-130
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	5	-	0,143	-130
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	5	-	0,175	-129
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	5	-	0,137	-135
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	-	1	0,176	-133
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	-	1	0,166	-127
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	-	1	0,131	-132
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	-	2	0,177	-133
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	-	2	0,167	-122
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	-	2	0,137	-129
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	-	3	0,192	-132
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	-	3	0,158	-121
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	-	3	0,124	-125
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	-	4	0,171	-127
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	-	4	0,179	-127
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	-	4	0,128	-127
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	0	-	5	0,172	-134
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-1	-	5	0,168	-127
3,75E+10	0,008	2,75	0,022	-2	-	5	0,132	-130

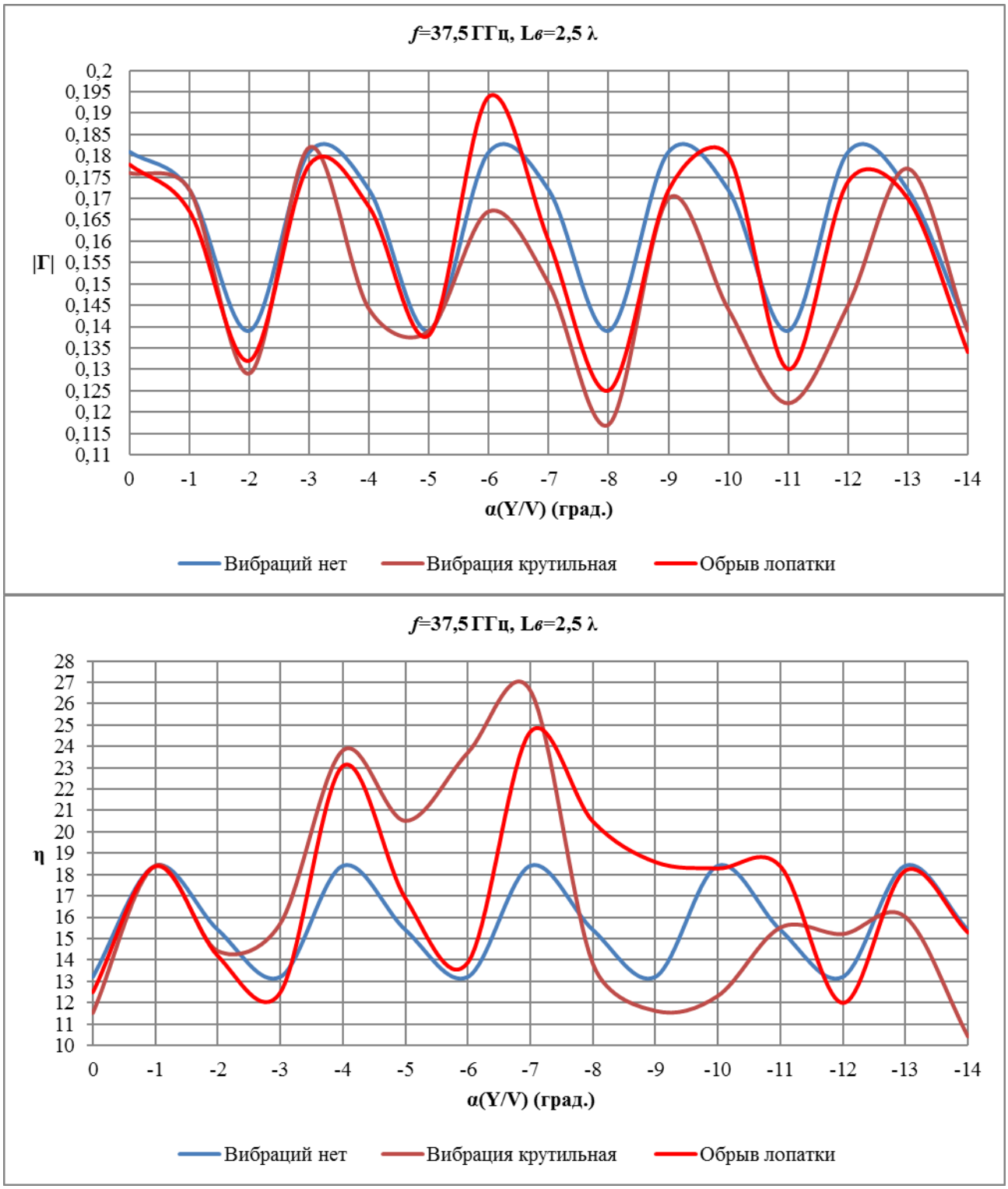


Рисунок 7А – Графики по таблице 8А

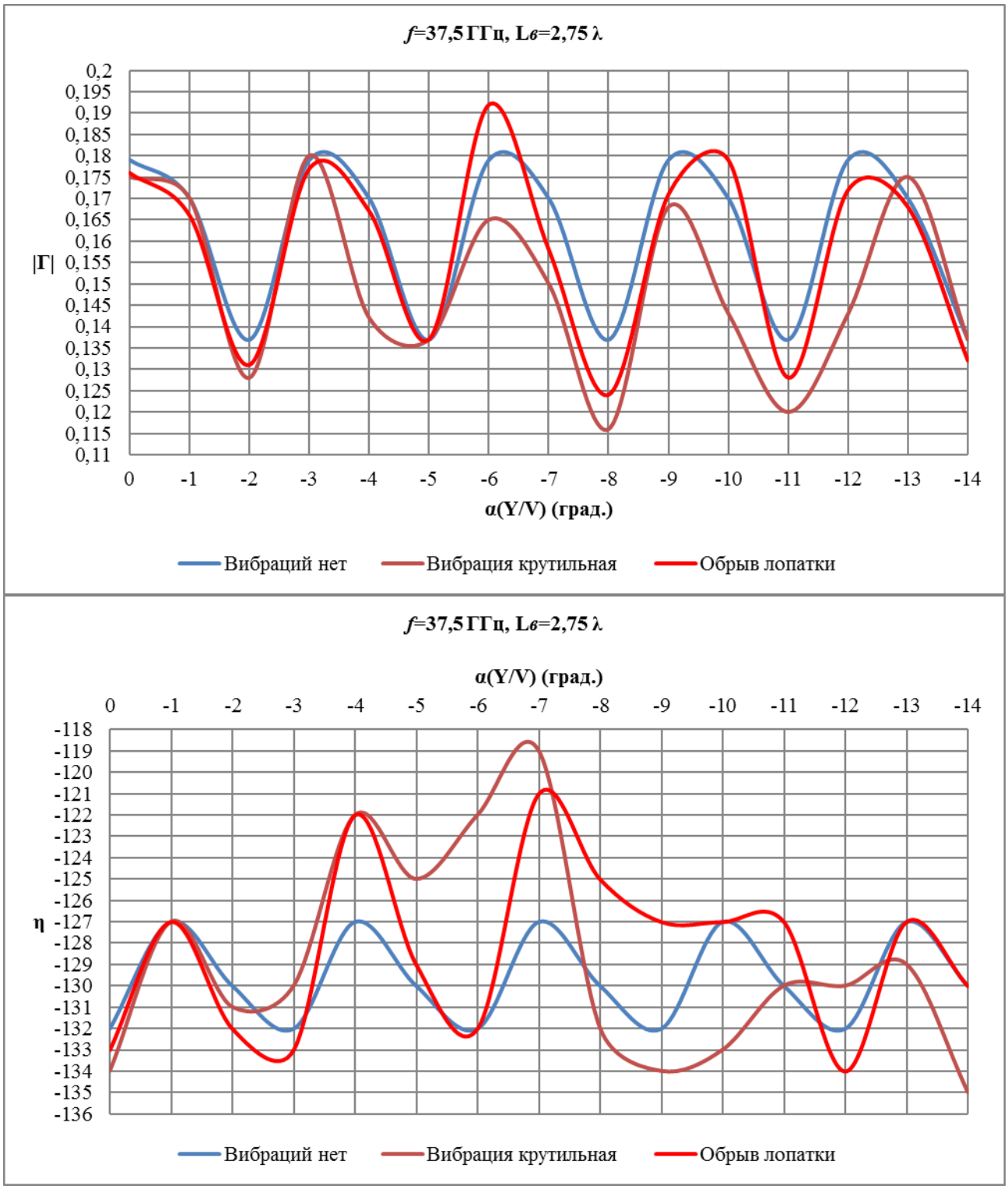


Рисунок 8А – Графики по таблице 8А