

УДК: 681.586, 621.396.08

## СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ В КВЧ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОДИННЫХ ДАТЧИКОВ

Бортников И.Д., Люлякин А.П., Трубачев А.А., Юрченко А.В., Юрченко В.И.

В статье представлен анализ систем контроля в КВЧ диапазоне длин волн изделий в различных областях народного хозяйства, описаны некоторые разработанные и используемые на практике автодинные и гомодинные радиолокационные устройства, работоспособность которых подтверждена экспериментальными исследованиями и они освоены в опытном производстве в ОАО «НИИПП» и других предприятиях.

**Ключевые слова:** системы контроля, автодинные датчики, ближнеполевой микроскоп, активные антенны.

### Введение

В метрологической основе интенсивного освоения крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона лежат преимущества КВЧ диапазона (30÷300 ГГц) по сравнению с сверхвысокочастотным (0,3÷30 ГГц) диапазоном (более высокая разрешающая способность, меньшие габариты и масса аппаратуры). По сравнению с оптическим диапазоном имеются преимущества по прохождению электромагнитных волн в окнах прозрачности при любых погодных условиях, наличие полос поглощения в атмосфере, что обеспечивает скрытость связи между объектами.

Генераторы и автодины в волноводном исполнении не удовлетворяют требованиям по степени миниатюризации, технологичности изготовления и стоимости. Разработка генераторных модулей (ГМ) в виде гибридно-интегральных схем (ГИС) позволяет реализовать такие преимущества ГИС, как малый вес, простота изготовления, высокая технологичность, а также низкая стоимость. Разработка высоконадёжных, стабильных малогабаритных гибридно-интегральных схем КВЧ в значительной мере позволит решать данные задачи, что особенно важно для создания измерительной техники [1-3].

Использование в качестве активных элементов в гибридно-интегральных схемах КВЧ диодов Ганна (ДГ) по совокупности электрических параметров, таких как рабочая частота, спектральная плотность мощности шума, энергетический потенциал в автодинном режиме, низкое рабочее напряжение, является более предпочтительным, чем туннельные и лавинно-пролётные диоды или полевые транзисторы [4].

Автодинные модули используются также в качестве датчиков диагностической аппара-

туры: измерители частоты вращения (радиолокационные тахометры), измерители вибраций, созданы измерительные системы контроля параметров, характеристик и физических свойств различных материалов и изделий [5].

### Устройства ближней радиолокации на основе автодинных модулей для решения задач железнодорожного транспорта

Автодинные радиолокаторы позволяют измерять скорость роспуска отцепов на сортировочной горке и скорость движения поезда, обнаруживать препятствия на железнодорожном полотне и переездах, определять наличие подвижных единиц на стрелочных переводах и тормозных позициях, выявлять степень заполнения подгорочных путей на сортировочных горках, считывать информацию с подвижного состава, определять параметры движения подвижного состава и т.п.

Характерной особенностью радиолокаторов, применяемых на железно-дорожном транспорте, является то, что они работают на малых расстояниях. Указанные причины, а также специфика работы железнодорожного транспорта способствовали разработке радиолокаторов, построенных на автодинном принципе, которые наиболее полно отвечают перечисленным требованиям.

Применение в качестве автодинного датчика гибридно-интегральной схемы КВЧ на 2-х мезовом планарном диоде Ганна [4] позволяет, при сохранении энергетического потенциала автодина, снизить энергопотребление ещё на порядок по сравнению с корпусными серийными диодами Ганна.

### Радиоволновый автодинный тахометр 5-мм диапазона длин волн

Для автоматизированного управления вращением валов судовых дизельных двига-

## РАЗДЕЛ 4. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

телей, роторов турбин авиационных моторов и других вращающихся узлов и механизмов требуются датчики скорости вращения, у которых при отсутствии механического контакта с контролируемым объектом обеспечиваются достаточно высокая точность и быстродействие измерения. Данным требованиям наиболее полно удовлетворяет разработанный радиолокационный тахометр, выполненный на основе автодинного приемопередающего модуля (АППМ) [6,7]. В отличие от известных доплеровских измерителей скорости вращения, построенных по гомодинной схеме [6,7], данное устройство имеет существенно меньшие габариты и стоимость благодаря своей очевидной простоте конструкции.

Конструктивно тахометр состоит из двух блоков: датчика и блока преобразования. Датчик содержит АППМ и осесимметричную рупорную антенну, в раскрытие которой установлена диэлектрическая линза, формирующая плоский фазовый фронт, при этом датчик и антенна представляют собой единую конструкцию. В блоке преобразования собрана схема регистрации (выделения) автодинного сигнала, преобразователь «частота-напряжение», цифровой индикатор числа оборотов в минуту и блок питания.

Облучение поверхности вращающегося объекта производится под углом  $45^{\circ}$ . Необходимыми для нормальной работы тахометра неоднородностями, обеспечивающими диффузионное отражение зондирующего сигнала, являются естественные шероховатости на поверхности объекта, созданные с помощью накатки, углубления, выступы или шестерёнки передач.

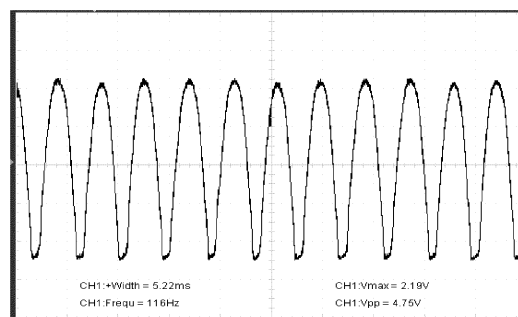
На рисунке 1 изображена осциллограмма и спектр сигнала, полученного при облучении вращающегося объекта.

Тахометр рассчитан на диапазон измеряемых скоростей вращения вала от 150 до 1500 об/мин. Погрешность измерения скорости вращения менее 1,5 об/мин в интервале скоростей 600-1100 об/мин и не хуже 3 об/мин в интервале скоростей во всём интервале. Диаметр вращающегося объекта, определяющий линейную скорость, учитывается коэффициентом тахометрии в преобразовательном блоке перед установкой на объект. Постоянная времени измерения, адаптированная к скорости вращения объекта не превышает 5 мсек.

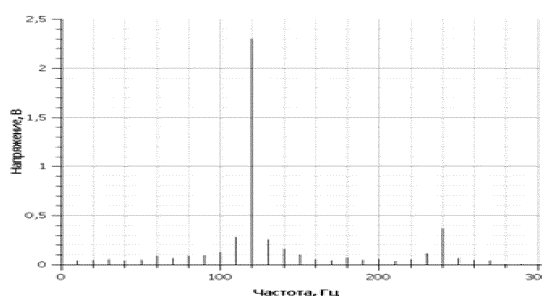
### Установка КВЧ дефектоскопии на основе автодинных ГИС

Развитие производства высококачественных материалов и требования к отсут-

ствию в них дефектов требует развития установок для их визуализации. Радиоволновые методы неразрушающего контроля используются для бесконтактного определения физических параметров различных материалов и в дефектоскопии. Основными элементами измерительных систем, обеспечивающими получение первичной информации об объекте контроля являются датчики, во многом определяющие параметры и характеристики всей системы.



а)



б)

Рисунок 1 - осциллограмма выходного сигнала (а) тахометра и его спектр (б).

В разработанной дефектоскопической установке [4,8] применён автодинный датчик М-55314 [4]. Установка позволяет осуществлять автоматизированный контроль плоских объектов и получать их изображения. Для уменьшения площади воздействия (до 0,1-0,3 мм) зондирующего КВЧ сигнала к датчику подключена антенна, состоящая из двух металлических пластин убывающей ширины, согласующая выходное волновое сопротивление датчика и свободное пространство. Повышение разрешающей способности установки может быть достигнуто оптимизацией конструкции антенны и уменьшением шага сканирования установки.

Полученные результаты, а также конструктивная простота, высокая надёжность и низкая стоимость разработанных автодинных ГИС КВЧ на мезапланарных ганновских структурах, наиболее важного узла различ-

## СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ В КВЧ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОДИННЫХ ДАТЧИКОВ

ных радиотехнических систем для бесконтактных измерений и контроля, позволяет надеяться на их широкое применение

В работах [4,8,9,10] приведены результаты экспериментов по неразрушающему контролю, принцип действия которых основан на эффекте автодинного детектирования: измерение толщины металлодиэлектрических структур и их диэлектрической проницаемости.

На рисунке 2 представлена структурная схема установки для измерения параметров по торцу монокристалла. При сравнении структуры измерительных установок на основе СВЧ резонатора (рисунок 2, а) и автодинного датчика (рисунок 2, б) видно, что измерительная установка на автодинном датчике имеет гораздо меньше дополнительного оборудования, что в свою очередь упрощает конструкцию, снижает цену и габариты установки.

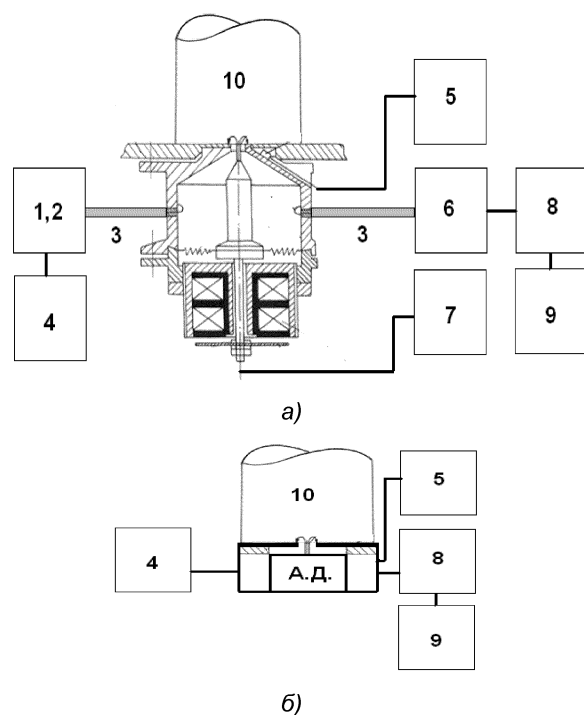


Рисунок 2 - Измерительная установка на основе а) СВЧ резонатора; б) автодинного датчика, где 1) источник сигнала; 2) резонатор; 3) волновод; 4) источник питания; 5) генератор импульсов; 6) детектор; 7) модуль управления; 8) устройство выделения сигнала; 9) компьютер; 10) образец.

### Применение автодинных приёмопередающих модулей в гибридно-интегральном исполнении на ММДГ для определения предаварийных деформаций лопаток турбомашин

Своевременное обнаружение предельных деформаций лопаток позволяет преду-

предить их поломку и избежать разрушения двигателя. В настоящее время известен ряд бесконтактных методов и измерительных средств [8], позволяющих получать информацию о состоянии лопаточного венца турбомашин.

Один из этих методов – дискретно-фазовый (ДФМ) – получил широкое распространение и развитие в авиационных и машиностроительных фирмах различных стран [8]. ДФМ основан на измерении временных интервалов между моментами прохождения торцов лопаток мимо импульсных датчиков, установленных неподвижно в корпусе турбомашин. Основное преимущество ДФМ – возможность определения деформаций одновременно всех лопаток колеса турбомашин.

Простота конструкции датчика на АППМ, малые габариты, простота схемной реализации и съёма информационного сигнала, малое энергопотребление, надёжность, вибрационная прочность, хорошая помехозащищённость (использование КВЧ диапазона в качестве рабочих частот), делают такие преобразователи привлекательными для разработчиков аппаратуры ДФМ. Важным преимуществом датчиков на АППМ с ДГ является возможность расширения температурного диапазона до необходимых 1200<sup>0</sup>С путём герметизации (заполнения) волноводной (рабочей) части датчика радиопрозрачной керамикой или кварцевым стеклом.

При введении первичного преобразователя на АППМ с ДГ в состав сигнализатора предаварийных деформаций лопаток, разработанного в Самарском государственном аэрокосмическом университете и используемом на магистральных газокomppressorных станциях, появляется возможность контроля текущего состояния лопаток не только компрессорных ступеней, но и рабочих лопаток турбины, экспресс-анализа их работоспособности, фиксирования их эксплуатационного состояния, протоколирования результатов их осмотра, создания технического паспорта любого конкретного лопаточного колеса.

### Ближнеполевой микроскоп

К настоящему времени существует довольно большое число работ, посвященных проблемам ближнеполевой СВЧ-микроскопии [9,10]. По-прежнему актуальна проблема повышения чувствительности ближнеполевых СВЧ-микроскопов. На данный момент к числу нерешенных задач в этой области можно отнести, например, определение предела разрешающей способности (в том числе с повышением частоты), выяснение механизмов

## РАЗДЕЛ 4. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

взаимодействия микрообъектов с ближним полем, влияния случайных возмущений на результаты измерений. Также не исследованы возможности повышения качества систем и используемых измерительных элементов ближнеполевого микроскопа. В связи с вышесказанным, представляет интерес поиск способов упрощения ближнеполевых КВЧ-систем, улучшения характеристик при управлении этими системами, возможностей повышения разрешения с увеличением частоты и использование автодинных датчиков.

В технике микроволнового контроля материалов и объектов широко используются датчики коаксиального типа с торцевой измерительной апертурой. Важнейшими преимуществами апертурных коаксиальных СВЧ-резонаторных датчиков перед объёмными являются возможность достижения высокого пространственного разрешения (до 0,1 мкм) и широкий частотный диапазон практической реализации, от 0,1 до 35 ГГц. При этом пространственная разрешающая способность ограничивается, в первую очередь, добротностью резонатора [11,12]. Следует отметить, что резонатор в апертурных коаксиальных датчиках является, как правило, четвертьволновым, поэтому его добротность в отсутствие объекта контроля определяется как СВЧ потерями в стенках, так и потерями на излучение в свободное пространство. В работе [10] показано, что наилучшей на данный момент является конструкция конусного коаксиального резонатора для решения задач ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии.

При конусном конструктиве коаксиального резонаторного датчика (рис. 5) накопительная часть I обеспечивает одновременное повышение добротности и согласование её с малоразмерной апертурой II, обеспечивающей заданную пространственную разрешающую способность [10].

Введение образца в поле зонда приводит к одновременному изменению резонансной частоты и добротности резонатора. Регистрация этих изменений в большинстве случаев предполагает определение параметров невозмущённого и возмущённого образцом зонда. Автодинный датчик служит измерителем разности излучаемых частот.

### Активные антенны

После анализа литературы было принято решение выбрать в качестве элемента датчиков активную микрополосковую антенну за счет простоты изготовления и наиболее подходящих характеристик для работы в КВЧ

диапазоне. Из всего многообразия общей геометрии антенны была выбрана двухэлементная патч-антенна с треугольными плечами (рисунок 3). Моделирование антенны показало, что размеры антенны с модой ТМ<sub>11</sub> в диапазоне 35-50 ГГц наилучшим образом подходят для монтажа бескорпусных диодов Ганна, антенна имеет линейную поляризацию и коэффициент направленного действия не менее 9 дБ.

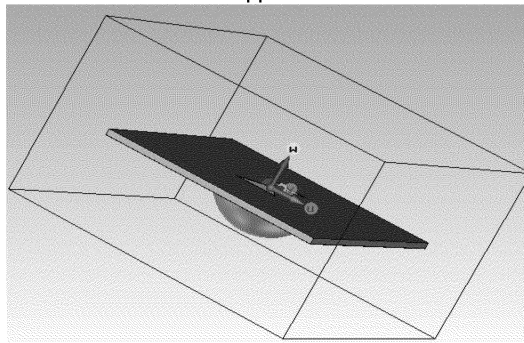


Рисунок 3 – Антенна

Вогнутая форма металлической пластины позволяет на порядок улучшить излучающие характеристики микрополосковой антенны. В частности, ширина главного лепестка диаграммы направленности в Н-плоскости уменьшилась в два раза при практически неизменном значении его ширины в Е-плоскости, достигнув значения 30 градусов. Коэффициент усиления также увеличился на 5дБ. Также подобная форма позволяет уменьшить распространение магнитного поля вдоль поверхности антенны, что не позволит влиять на соседние антенны в матрице датчиков из подобных патч-антенн.

### Выводы

1. В методической основе применения КВЧ автодинных датчиков для решения задач различного назначения лежит регистрация изменения автодинного сигнала, отраженного от измеряемого объекта.

2. Разработанные автодинные датчики применены при создании различных устройств контроля, в том числе материалов и живых систем.

3. Отсутствие механического контакта с контролируемым объектом обеспечивает достаточно высокую точность и быстродействие измерения при использовании автодинных датчиков КВЧ диапазона.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко, А.В. Автодинные датчики в измерительной технике. / А.В.Юрченко, В.И. Юрченко,

## СПОСОБ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ ЛОПАТОЧНОЙ РЕШЕТКИ СОПЛОВОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

- С.Д. Воторопин – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 128 с. (ISBN 5-98298-517-0).
- Юрченко, В.И. Развитие датчиков СВЧ диапазона/ В.И. Юрченко// Современная электроника №5 2010 С 34-35.
  - Божков, В.Г. Перфильев В.И. Монолитные и квазимонолитные модули и устройства миллиметрового диапазона длин волн./ В.Г. Божков, В.А. Генеберг, К.И. Куркан, В.И.Перфильев // Электронная промышленность. 2001г, №5, стр. 77-97.
  - Юрченко, А.В. Установка для визуализации и определения мест расположения дефектов в солнечных элементах на основе автодиных датчиков 5 мм диапазона длин волн/ А.В. Юрченко, С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко // VIII Крымская Международная Микроволновая Конференция “КрыМиКо’98” (сентябрь 1998, Севастополь). Сб. докл. – Севастополь, 1998. С. 324-326.
  - Люлякин, А.П. Активные автодиные КВЧ датчики для контроля различных объектов и технологических процессов/ А.П. Люлякин, А.А. Трубачев, В.И. Юрченко// Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск. – С. 348-352.
  - Воторопин, С. Д. Автодинный тахометр 5-и миллиметрового диапазона длин волн/ С. Д.Воторопин, В. Я. Носков, О. И.Зайцев // V-я Крымская конференция СВЧ-техника и спутниковый приём. – Севастополь. – 1995. – С. 561-562.
  - Трубачев, А.А. Автодинный тахометр/ А.А. Трубачев, В.И. Юрченко, А.А. Головин // Известия высших учебных заведений. Физика.– 2012. Т. 55. – №8/3.– С.27-30
  - Данилин, А.И. Применение автодиных генераторов М-55314 для контроля механических напряжений лопаток ГТД/ А.И. Данилин, С.Д. Воторопин, А.Ж. Чернявский // Электронная промышленность, 2002. – Вып. 2. – С. 131-134.
  - Усанов, Д.А. Радиоволновые измерители на основе эффекта автодиного детектирования в полупроводниковых СВЧ генераторах/ Д.А. Усанов, В.Д. Тупикин, А.В. Скрипаль, Б.Н., Коротин // Оптические радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества промышленной продукции: Тезисы докл. Всесоюзной научно-техн. конф. – Саратов, 1991. – С. 4–6.
  - Гордиенко, Ю.Е. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора/ Ю.Е. Гордиенко, Н.И. Слипченко, А.М. Яцкив // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо`2009): Матер. XIX Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2009. – С. 565–566.
  - Трубачев, А.А. КВЧ-микроскоп для биомедицинских исследований/ А.А. Трубачев, В.И. Юрченко // Доклады ТУСУРа, № 2 (24), часть 1, декабрь 2011 С.232-235.
  - Юрченко, А.В. Системы неразрушающего контроля структурно-неоднородного кремния на основе СВЧ автодиных датчиков/ А.Н. Новиков, П.Ф. Швадленко //Ползуновский вестник, 2010. -№ 2 -С. 89-93

*Бортников И.Д., студент-магистрант, idb1@tpu.ru; д.т.н., проф. Юрченко А.В., тел. 8-913-826-03-01, piirp@inbox.ru - Томский политехнический университет, кафедра информационно-измерительной техники; Люлякин А.П., аспирант; Трубачев А.А., аспирант - Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, office@tusur.ru, tusur.ru, (3822) 51-05-30; Юрченко В.И. – Научно - исследовательский институт полупроводниковых приборов.*

УДК: 621.7.08

## СПОСОБ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ ЛОПАТОЧНОЙ РЕШЕТКИ СОПЛОВОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Д.А. Осипович

В статье проанализированы существующие методы контроля геометрии проходного сечения лопаточных решеток. Выявлены возможные направления автоматизации контрольных операций. Разработан метод контроля, позволяющий помимо определения величины площади проходного сечения оценивать распределение отклонений измеренного сечения вдоль участков периметра проходного сечения.

**Ключевые слова:** оптические измерения, единая модель изделия, автоматизация контрольных операций, трехмерное моделирование

### Введение

В настоящее время все большее распространение получают бесконтактные способы контроля геометрии сложнопрофильных деталей и узлов как обеспечивающих более вы-

сокую скорость измерений с минимальными потерями точности по сравнению с традиционными контактными способами измерения, а также позволяющих добавлять в единую модель изделия информацию о геометрии фак-