

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

С.Ф. Дмитриев, А.В. Ишков, Д.Н. Лященко, В.С. Федорук

Исследованы особенности применения беспроводных высокочастотных линий связи Bluetooth в составе измерительных программно-аппаратных комплексов - виртуализированных приборов, реализующих метод вихревых токов - ИЭНМ-20М и ИНПМП-5ФА. Первичный сверхминиатюрный датчик-преобразователь может быть непосредственно подключен к коммерческим Bluetooth-гарнитурам через типовой радиомодуль РВА 313 01/2, после оптимизации электрических параметров. Показано, что при организации линии связи между Bluetooth-адаптером D-Link DBT-122 и различными гарнитурами дальность связи, обеспечивающей приемлемые метрологические характеристики прибора составляет 4-5 м.

**Ключевые слова:** измерительные программно-аппаратные комплексы, высокочастотная беспроводная связь, метод вихревых токов, метрологические характеристики.

Реализация концепции виртуализированных измерительных приборов (**ВИП**), сочетающих в себе метрологические характеристики традиционных аналоговых или цифровых средств измерений (**СИ**), высокую скорость получения и обработки первичной измерительной информации, широкие возможности накопления, анализа и гибкого функционального преобразования измерительного сигнала, удобства предоставляемые интерфейсом современных ПК, высокую надежность, позволила нам создать целый ряд работоспособных измерительных программно-аппаратных комплексов, реализующих метод вихревых токов (**МВТ**) [1].

Эти приборы уже получили широкое распространение не только в исследовательских и образовательных лабораториях ВУЗ-ов, но и на производстве, так как по своим метрологическим характеристикам они могут заменить традиционные СИ, а также они могут использоваться в повседневной жизни человека - для мониторинга фона электромагнитного излучения от бытовых приборов, поиска скрытой проводки и пр. [2]. Еще большему распространению ВИП будет способствовать замена в них стационарных ЭВМ, к которым по проводным линиям подключаются внешние датчики, современными устройствами, функционирующими на платформах мобильных операционных систем и модернизация программного обеспечения.

Однако первые попытки использования нами в составе ВИП различных *hi-tech*-устройств (ноутбуков, карманных ПК и мини-ЭВМ, смартфонов и пр.) показали, что при существенном повышении их мобильности неизбежно ухудшается показатель цена/качество. Кроме того, возникают опреде-

ленные трудности при адаптации программной части приборов к ограниченным вычислительным возможностям мобильных ОС и, особенно, Java-машин.

Указанные проблемы может решить применение в составе передающего и измерительного тракта таких ВИП вместо проводной линии и вторичных измерительных преобразователей - различных устройств беспроводной связи.

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей использования беспроводной высокочастотной полнодуплексной линии связи *Bluetooth* в составе ВИП, реализующих МВТ.

### Экспериментальная часть

В качестве тестируемых ВИП-ов нами были использованы разработанные ранее приборы *ИЭНМ-20М* - измеритель электропроводности ферромагнитных материалов и *ИНПМП-5ФА* - измеритель напряженности переменного магнитного поля с Фурье-анализатором спектра [1, 2].

Для проведения исследований сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь (**СМВТП**) ВИП был адаптирован по уровню выходных и входных сигналов типовых *Bluetooth*-гарнитур ( $U_{ex} = 0,1-0,25$  мВ,  $U_{вых} = 1,0-1,5$  В), для чего изменялось число витков в его приемной и передающей катушках [3].

В программное обеспечение *ИЭНМ-20М* и *ИНПМП-5ФА* были внесены изменения, позволяющие им инициализировать драйверы *Bluetooth v 1.0* и *v 2.0* на соответствующих вкладках как звуковые устройства.

В качестве беспроводного устройства, подключаемого к ПК использовался *USB Bluetooth-адаптер D-Link DBT-122*.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Приемно-передающий тракт ВИП организовывался и обслуживался управляющей программой драйвера между *USB*-адаптером *DBT-122* и различными коммерческими *Bluetooth*-гарнитурами, к которым подключался СМВТП.

### Результаты и их обсуждение

Сопряжение СМВТП с коммерческими *Bluetooth*-гарнитурами осуществляется путем непосредственного подключения передающей катушки ВТП к телефонному выходу, а приемной - к микрофонному входу гарнитуры (рисунок 1).

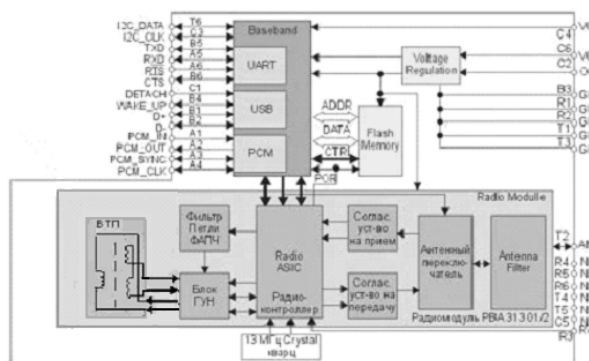


Рисунок 1 - Схема коммутации *Bluetooth*-радиомодуля с СМВТП

Типовой *Bluetooth*-чип-сет, используемый в большинстве доступных коммерческих гарнитур, содержит контроллер несущей частоты (*Baseband controller*), флэш-память, радиомодуль *PBA 313 01/2*, регулятор напряжения и кварцевый генератор - 13 МГц. Для полноценного функционирования *Bluetooth*-радиомодуль подсоединяется к *baseband* или эмулирующему его прибору. *Baseband controller* построен на основе процессора *ARM7*, осуществляющем чтение и запись информации во внутренние регистры радиоконтроллера *ASIC*. Эти регистры и используются для установки частоты, настройки и управления *PBA 313 01/2*.

После успешной коммутации *Bluetooth*-радиомодуля с СМВТП, нами было исследовано влияние характеристик коммерческих *Bluetooth*-гарнитур на устойчивую работу всего измерительного программно-аппаратного комплекса [4].

Известно, что в отличие от технологии, например инфракрасной связи *IrDA*, работающей по принципу «точка-точка» в зоне прямой видимости, технология *Bluetooth* разрабатывалась для работы как по принципу «точка-точка», так и в качестве многоточечного радиоканала между несколькими устройствами «точка-много точек», управляемого многоуровневым протоколом, похожим на прото-

кол мобильной связи *GSM* для пикосети или распределенной сети. При этом аппарат, иницирующий связь, является ведущим (*Master*), а остальные – ведомыми (*Slaves*).

Такая организация протокола обмена данными между устройствами при использовании беспроводного канала может существенно изменить как метрологические характеристики ВИП как СИ, так и его надежность. Однако, в приемно-передающем тракте ВИП ведущим всегда является более мощный *USB Bluetooth*-адаптер, подключенный к ПК, или встроенная плата *CPU* мини-ЭВМ. тогда использование *USB*-интерфейса ЭВМ делает внешний модуль *USB*-ведомым устройством для работы которого не требуется выделения отдельного ресурса, что не влияет на работу программной части ВИП.

Инициализация беспроводного канала в ВИП осуществляется посредством выбора установленного *Bluetooth*-устройства из списка звуковых в соответствующей экранной форме программы ВИП (рисунок 2).

При использовании *Bluetooth*-устройств в составе ВИП связь между ними может осуществляться как в синхронном (*SCO - Synchronous Connection Oriented*), так и в асинхронном (*ACL - Asynchronous Connectionless*) режиме.

При *SCO*, служащем, преимущественно, для передачи речевой информации и реализованном в *v 1.0*, происходит установление симметричного соединения «точка-точка» (рисунок 1), и скорость передачи информации равна 64 *Kbit/s*.

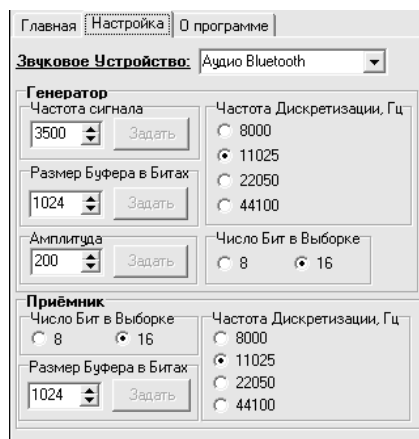


Рисунок 2 - Панель настройки ВИП ИЭНМ-20М и ИНПМП-5ФА

При *ACL*, предназначенном для пакетной передачи данных и реализованном в более поздних версиях *Bluetooth*, поддерживаются как симметричные, так и асимметричные соединения «точка-много точек», и скорость передачи возрастает до 721 *Kbit/s*. При

## РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

этом весь выделенный для *Bluetooth*-радиосвязи частотный диапазон 2,402-2,480 ГГц разбит на  $n$  частотных каналов, полоса каждого канала 1 МГц, разнос каналов 140-175 кГц, а кодирование пакетной информации осуществляется методом частотной манипуляции (рисунок 3).

Постоянное чередование частот позволяет радиоинтерфейсу *Bluetooth* транслировать информацию по всему разрешенному 2,4 ГГц-овому диапазону *ISM (Industrial, Scientific, Medical)* и избежать воздействия помех со стороны устройств, работающих в этом же диапазоне не участвующих в сеансе связи. Однако, несмотря на использование метода расширения спектра при скачкообразном изменении частоты (*FHSS - Frequency Hop Spread Spectrum*), *Bluetooth*-устройства не всегда могут исключить проблемы, связанные с воздействием помех, дифракции и интерференции сигнала в диапазоне 2,4 ГГц, поэтому помимо *FHSS* используется специальное кодирование сигналов и аутентификация.

Так при исследовании нескольких коммерческих *Bluetooth*-гарнитур (табл. 1), в составе передающего канала *ИЭНМ-20М* по параметрам длительности непрерывной работы ( $T$ ), максимального удаления от *master*-устройства ( $R$ ), массе ( $m$ ) и размеру ( $D$ ), наилучшими оказались две гарнитуры *SonyEricsson NBH-PV700* и *F1*, причем последняя модель обеспечивает и оптимальный уровень параметра цена/качество.

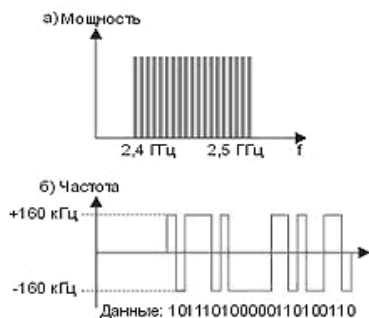


Рисунок 3 - Частотный диапазон *Bluetooth* (а) и способ кодирования пакетной информации в *ACL*-режиме (б)

Все это, в сочетании с тем, что маломощный (1,0-2,5 мВт) высокочастотный сигнал *Bluetooth*-устройств сложным образом изменяет свои характеристики при распространении в реальных средах, затрудняет использование беспроводного канала в передающем и преобразующем трактах ВПП.

В то же время, первоначально определенная величина  $R$  при экспериментальном

исследовании зависимости уровня сигнала ( $A/m$ ) на входе АЦП звукового адаптера изменилась, например для гарнитуры *SonyEricsson NBH-PV700* в зоне прямой видимости, она существенно снизилась (рисунок 4).

Таблица 1 - Некоторые характеристики коммерческих *Bluetooth*-гарнитур

Гарнитура	$T$ , час	$R$ , м	$m$ , гр	$D$ , мм
<i>Nokia HS-56W</i>	3	8,0	18	70×33×31
<i>Motorola HS820</i>	5	7,5	20	64×55×19
<i>Siemens HNB-505</i>	6	10,0	24	95×28×21
<i>SonyEricsson NBH-PV700</i>	5	9,0	22	60×32×22
<i>F1 (DaoBao,KHP)</i>	6	10,0	16	22×20×16

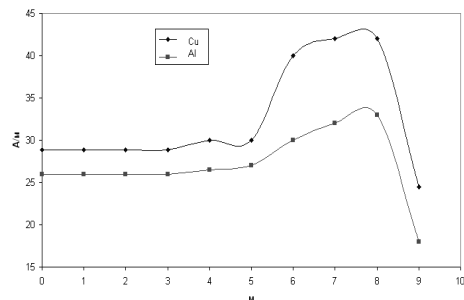


Рисунок 4 - Зависимость сигнала на входе АЦП для ГСО меди и алюминия от радиуса *Bluetooth*-пикосети между адаптером *DBT-122* и гарнитурой *SonyEricsson NBH-PV700*

Такое же, примерно двухкратное, снижение максимального удаления от *master*-устройства, при условии постоянного уровня сигнала на входе АЦП, наблюдается и для *Bluetooth*-гарнитуры *F1*.

На рисунок 5 показано семейство спектров сигнала, принимаемого ВПП *ИНПМП-5ФА* по беспроводной линии с *Bluetooth*-гарнитурой *F1* при возбуждении им вихревых токов в ГСО меди на частоте 3,51 кГц от расстояния между устройствами. Из сравнения приведенного рисунка с рисунком 4 видно, что при расстояниях между *Bluetooth*-устройствами (линия адаптер-гарнитура) до 4-5 м спектральные характеристики измерительного сигнала не изменяются, в интервале 5-8 м в спектре появляются высоко- и низкочастотные гармоники, интенсивность которых в 1,5-2 раза превосходит возбуждающий сигнал, при расстояниях между *Bluetooth*-адаптер *D-Link DBT-122* и гарнитурой *F1* более 8 м измерительный сигнал сильно осла-

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

беваает, а его спектральная характеристика становится ассиметричной.

Так как ВИП являются измерительными программно-аппаратными комплексами, то для получения значения измеряемой величины (электропроводности, напряженности поля, толщины покрытия и пр.), необходимо установить соответствие между уровнем сигнала на приемной катушке СМВТП и исследуемым параметром. Одним из вариантов установления этого соответствия может быть аппаратная кривая.

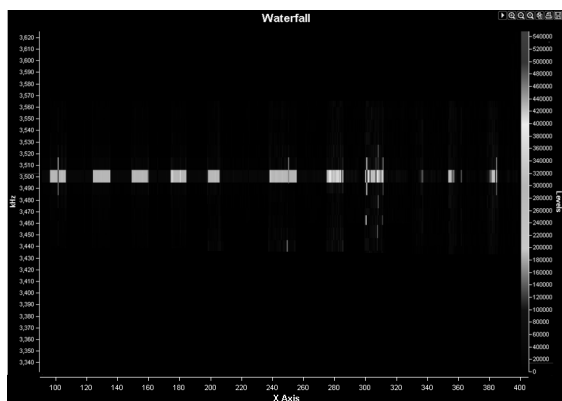


Рисунок 5 - Амплитудно-частотная зависимость измерительного сигнала от длины беспроводной линии, полученная Фурье-анализатором ВИП ИНПМП-5ФА

На рисунке 6, представлены семейства аппаратных функций зависимости электропроводности от величины сигнала (у.е.) СМВТП в ВИП ИЭНМ-20М при использовании беспроводной линии связи длиной 4 м на частоте возбуждения поля вихревых токов в образцах 3,51 кГц.

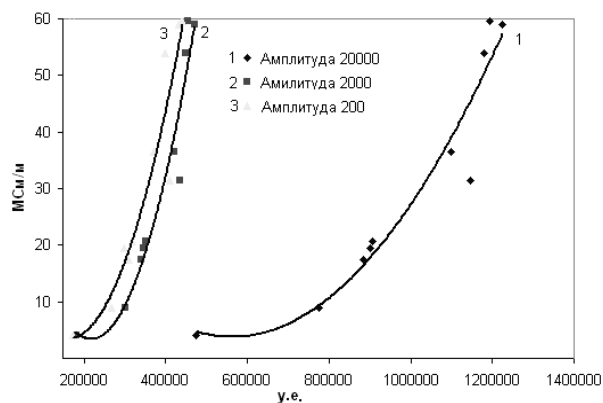


Рисунок 6 - Аппаратные функции ВИП ИЭНМ-20М, связанным беспроводной линией с Bluetooth-гарнитурой F1 на частоте 3,51 кГц

Аппроксимированные аппаратные кривые хорошо описываются полиномом второй степени  $y=ax^2+bx+c$ , что согласуется с литературными данными для МВТ [5]. Кривые 1-3 являются аппроксимацией первых высших гармоник измерительного сигнала. Коэффициенты аппроксимации приведены в табл. 2.

Зависимость 1 (рисунок 6) наиболее пологая, имеет максимальный перепад по аргументу и хорошо подходит в качестве градуировочного графика при определении величины электропроводности с помощью ВИП ИЭНМ-20М, связанным беспроводной линией с Bluetooth-гарнитурой F1 [6].

Таблица 2 - Коэффициенты аппроксимации квадратичной аппаратной функции для системы ИЭНМ-20М- F1

3,51 кГц			
I <sub>ампл.</sub> , у.е.	y=ax <sup>2</sup> +bx+c		
	a	b	c
20 000	1×10 <sup>-10</sup>	-1×10 <sup>-4</sup>	42,073
2 000	5×10 <sup>-9</sup>	-2×10 <sup>-4</sup>	22,203
200	9×10 <sup>-8</sup>	-5×10 <sup>-3</sup>	72,173
2 кГц			
20 000	5×10 <sup>-11</sup>	-6×10 <sup>-5</sup>	19,632
2 000	6×10 <sup>-10</sup>	-9×10 <sup>-5</sup>	4,451
200	1×10 <sup>-7</sup>	-4,7×10 <sup>-3</sup>	54,680

Таким образом, проведенные исследования позволили установить основные особенности использования беспроводной линии связи Bluetooth в составе виртуализированных измерительных приборов, реализующих метод вихревых токов.

### Выводы

На основе проведенных исследований были выявлены общие подходы при разработке ВИП, реализующих МВТ, с каналом беспроводной связи Bluetooth, а также определены некоторые особенности их работы:

1. Реализована общая схема коммутации СМВТП с Bluetooth-гарнитурой при подключении его катушек к радиомодулю РВА 313 01/2.
2. Исследовано влияние характеристик беспроводной линии связи и основных параметров коммерческих Bluetooth-гарнитур на работу измерительного программно-аппаратного комплекса ВИП.
3. Проведена аппроксимация аппаратных кривых ВИП ИЭНМ-20М при его работе с беспроводной линией в составе адаптера D-Link DBT-122 и гарнитур SonyEricsson NBH-PV700 и F1.

## РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-08-98016-р\_сибирь\_а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В. и др. Виртуализированные измерительные приборы: колл. монография. Кн. 27. / под ред. О.И. Кирикова. - Воронеж: Изд-во ВГПУ, 2010.
2. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В. и др. Виртуализированные измерительные приборы для образования и научных исследований. // Мат-лы III Всеросс. н.-п. конф. –Бийск: БГГУ им. В.М. Шукшина, 2010. С. 129-140.
3. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В. и др. Особенности реализации аппаратной части виртуализированных измерительных приборов в методе вихревых токов. // Ползуновский вестник, - 2010. -№2. -С. 118-122.
4. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. - СПб.: Питер, 2004.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества. -М.: Высшая школа, 1976.
6. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В. и др. Общие подходы при разработке специализированного программного обеспечения виртуализированных измерительных приборов // Ползуновский вестник. -2010. -№2. -С. 199-205.

*К.т.н., доцент С.Ф. Дмитриев, д.т.н., профессор А.В. Ишков, аспирант Д.Н. Лященко, тел.: 8-(3852)-62-83-80, e-mail: olg168@rambler.ru - ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет», 656049, г. Барнаул, пр-т Красноармейский, 98.*

УДК 537.86, 537.87

## СВЧ-ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА

Е.В. Емельянов, Г.Е. Дунаевский

В работе рассматривается радиофизический метод контроля и измерения влажности плоскопараллельных листовых материалов, который основан на использовании открытого СВЧ-резонатора в качестве измерительной ячейки. Затронут вопрос корректного расположения исследуемого объекта в рабочей области открытого резонатора.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, влажность, открытый резонатор, измерения на СВЧ, порог перколяции.

### Введение

Измерение влажности материалов необходимо для оптимизации технологических процессов и контроля качества конечного продукта [1, 2]. Среди принятых в настоящее время методов контроля влажности выделяют следующие радиофизические методы: кондуктометрические, емкостные, волноводные, резонаторные (объемные, микрополосковые, коаксиальные, диэлектрические и открытые резонаторы). К достоинствам радиофизических относятся: высокая чувствительность, быстродействие, выдача информации в цифровом виде, что позволяет легко автоматизировать процесс сбора и обработки данных. Для контроля влажности листовых, протяженных материалов в качестве измерительной СВЧ ячейки более предпочтительно использовать открытые резонаторы (ОР) [3].

Теория ОР достаточно развита для описания электродинамических характеристик резонатора и их изменений при внесении в его полость диэлектрических образцов различной формы [4]. Обычно предполагается положение образца в полости резонато-

ра строго фиксированным и неподвижным. Использование же ОР позволяет производить контроль влажности в непрерывном технологическом процессе [5].

Данная работа предлагает ознакомиться читателю с компактным СВЧ-датчиком для контроля влажности листовых материалов на основе открытого СВЧ-резонатора.

### Описание блок-схемы устройства

Блок-схема лабораторного макета СВЧ-датчика приведена на рисунке. Для проведения исследований использовалось оборудование ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ», аккредитованного в 2009 году на техническую компетентность в области измерения диэлектрической проницаемости на СВЧ. Измерительная установка включает в себя: ЭВМ, векторный анализатор цепей PNA E8363B фирмы Agilent Technology (генератор СВЧ-излучения, детектор, АЦП), 8-мм открытый резонатор, коаксиальные линии связи, а так же волноводно-коаксиальные переходы.