

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 681.2.089

Герасимова
Александра Александровна

Автоматизация калибровки испытательных камер СВЧ диапазона ТЕМ типа

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-38 80 01 «Приборостроение, метрология и
информационно-измерительные приборы и системы»

Научный руководитель
Белошицкий Анатолий Павлович
кандидат технических наук,
доцент

Минск 2017

ВВЕДЕНИЕ

Понятие электромагнитной совместимости (ЭМС) возникло еще в начале развития радиотехники и имело узкое смысловое значение – выбор частотного диапазона. В настоящее время Международная электротехническая комиссия (МЭК) определяет ЭМС, как способность радиоэлектронного оборудования или системы удовлетворительно работать в данной электромагнитной обстановке без внесения в нее какого-либо недопустимого электромагнитного возмущения. Электромагнитная совместимость нарушается, если уровень помех слишком высок, а помехоустойчивость оборудования недостаточна.

Над проблемой ЭМС долгое время не задумывались, пока не были зарегистрированы сбои в банковских системах при воздействии помех. Сегодня человек настолько зависит от используемой электро- и радиотехники, что проблема обеспечения ЭМС стала для него жизненно важной.

Обеспечение электромагнитной совместимости, т.е. достижение такого состояния, когда электротехнические, электронные и радиоэлектронные устройства, системы и установки будут пригодны к выполнению своих функций по назначению при воздействии на них непреднамеренных помех, стало необходимым условием научно-технического прогресса.

Возможности обеспечения ЭМС в электронных системах сильно зависят от наличия точных и надежных методов измерения, позволяющих определять и контролировать характеристики электромагнитных помех (ЭМП). В течение последних лет значительные усилия были направлены на разработку более совершенных методов измерения характеристик ЭМП. Так, в частности, особое внимание уделяется разработке методов испытаний, обеспечивающих измерения уровня ЭМП и восприимчивости к ЭМП. Эти методы позволяют дать обоснованное описание характеристик ЭМС и ЭМП системы в реальных условиях эксплуатации.

В настоящее время измерения уровня ЭМП и восприимчивости к ЭМП проводятся в различных внешних условиях: в свободном пространстве, в экранированной безэховой камере и в экранированной камере. В каждом из этих случаев имеются свои преимущества и недостатки технического и экономического характера. Измерения в условиях свободного пространства являются примером прямого подхода к решению задачи определения характеристик ЭМП в данной системе, но для проведения таких измерений необходим открытый полигон, который не обеспечивает защиту испытательной аппаратуры от воздействия атмосферных условий и подвержен влиянию погодных условий. Экранированная безэховая камера служит для имитации

условий свободного пространства, обеспечивая при этом защиту измерительной аппаратуры от воздействия внешней среды. К недостаткам применения безэховых камер следует отнести их стоимость, которая быстро растет с увеличением их размеров. Применение экранированной камеры обеспечивает защиту от воздействия окружающей среды, но создает трудности при проведении измерений, связанных с многократными отражениями, резонансами, искажениями полей излучения и с изменениями характеристик излучения ЭМП и восприимчивости к ЭМП испытуемых систем.

Для измерений и испытаний радиотехнической аппаратуры, излучающей радиоволны в свободное пространство, широко применяют безэховые камеры. Безэховой камерой называется помещение, облицованное изнутри радиопоглощающим материалом (РМП), позволяющими приблизить условия измерений к «свободному пространству».

Во многих случаях испытания радиотехнических устройств в таких камерах позволяет резко сократить или полностью исключить натурные испытания, что приводит к значительной экономии средств, а главное – времени разработки сложной радиотехнической аппаратуры.

Одной из разновидностей таких камер является *GTEM*-камера, которая представляет собой *TEM*-волновод с верхней границей частоты, захватывающей гигагерцовый диапазон. Это недорогое альтернативное устройство для измерений, как параметров излучения, так и устойчивости к излучению.

При использовании таких камер в метрологической практике необходимо периодически проверять их метрологические характеристики (МХ). Эти характеристики определяются при калибровке камер. Для проведения калибровки *GTEM*-камер необходимо разработать методику калибровки (МК). Поэтому задачи разработки научно обоснованных МК и автоматизации ее проведения является очень важной и актуальной.

Целью данной магистерской диссертации является разработка методики калибровки *GTEM*-камер, способов и алгоритмов автоматизации ее проведения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Учитывая развитие технологий в сфере создания радиоэлектронных средств со значительным увеличением количества выпуска и использования радиооборудования проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) становится все более острой и актуальной. Для обеспечения ЭМС необходимо определять уровни электромагнитного излучения испытываемого оборудования и таким образом оценивать влияние этого оборудования на работоспособность окружающей аппаратуры.

При измерениях и испытаниях радиотехнического оборудования, излучающего радиоволны в свободное пространство, широко применяются безэховые камеры (БЭК). Во многих случаях испытания радиоэлектронных средств в таких камерах позволяет резко сократить и полностью исключить натурные испытания, что приводит к значительной экономии средств, а главное – времени разработки сложной радиотехнической аппаратуры. Для практического использования БЭК в метрологической практике необходимо определить их метрологические и электромагнитные характеристики, что возможно при калибровке БЭК.

Одной из разновидностей таких камер является *GTEM*-камера, которая представляет собой *TEM*-волновод с верхней границей частоты, захватывающей гигагерцовый диапазон. Это недорогое альтернативное устройство для измерений, как параметров излучения, так и устойчивости к излучению.

Целью данной магистерской диссертации является разработка методики калибровки *GTEM*-камер, способов и алгоритмов автоматизации ее проведения.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- анализ методов и средств измерений для оценки ЭМС и ЭМП;
- анализ сферы применения и принципа устройства *GTEM*-камер, а также определение их параметров;
- разработка методики калибровки *GTEM*-камеры;
- разработка алгоритма и ПО автоматизации процедуры калибровки *GTEM*-камеры;
- экспериментальные исследования *GTEM*-камеры, с использованием разработанной методики.

Новизна работы определяется следующими результатами:

- разработана и обоснована методика калибровки испытательных камер СВЧ диапазона *GTEM* типа;

- предложены алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований испытательных камер при их калибровке и оценке неопределенности измерений;

- предложены алгоритмы ПО и автоматизации калибровочных работ, с последующим формированием итогового протокола и свидетельства о калибровке.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные и исследованные методика калибровки и алгоритмы по ее автоматизации являются основой для написания методик калибровки испытательных камер СВЧ диапазона конкретных типов и автоматизации успешно применяются в работе НИИЛ ЭМИ НИИЦ ОАО «Гипросвязь».

Результаты работы апробированы на 9-ой Международной НТКМУС «Новые направления развития приборостроения» – БНТУ (Минск, 20-22 апреля 2016 г.), 52-ой Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Телекоммуникационные системы и сети» – БГУИР (Минск, 25-30 апреля 2016 г.) и опубликованы в материалах этих конференций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводятся результаты анализа методов и средств измерений для оценки ЭМС и ЭМП. Существующие в настоящее время методы и средства позволяют оценивать ЭМС и ЭМП с достаточной для измерительной практики точностью в диапазоне частот в СВЧ. Каждый из использованных методов измерения имеет свои преимущества, особенности применения и недостатки. Результаты сравнительной характеристики методов оценивания ЭМС и ЭМП приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов измерений для оценки ЭМС и ЭМП

Метод	Достоинства	Недостатки
Измерения на открытых полигонах	<ul style="list-style-type: none">- наиболее простой метод оценки ЭМС электронной аппаратуры;- удобно выполнять испытания крупных устройств.	<ul style="list-style-type: none">- местность не должна содержать металлических объектов;- отсутствует изоляция измерительной установки от внешних электромагнитных воздействий;- на установку влияют неблагоприятные погодные условия;- расхождение между результатами измерений и теоретическими данными
Измерения с использованием экранированных камер	<ul style="list-style-type: none">- обеспечивают хорошую изоляцию от внешних источников электромагнитных полей и от местных источников помех;- результаты измерений чрезвычайно чувствительны к размерам и форме экранированной камеры, к положению испытуемой аппаратуры и измерительной антенной.	<ul style="list-style-type: none">- отражения от стенок камеры существенно влияют на результаты любых измерений характеристик излучений;- может возникнуть большая погрешность измерения уровня ЭМП;- испытываемую аппаратуру необходимо поворачивать.

Продолжение таблицы 1

<p>Измерения с использованием безэховых камер</p>	<ul style="list-style-type: none"> - создает наилучшие условия для измерения характеристик электромагнитных излучений в закрытом помещении; - рабочий объем защищен от воздействия внешней среды; - отпадает необходимость в получении соответствующего разрешения Государственной комиссии связи для работы на необходимых для испытаний частотах; - уменьшается вероятность возникновения ошибки в результатах измерений характеристик исследуемых излучений; - поглощается энергия, излучаемую внутри камеры. 	<ul style="list-style-type: none"> - высокая стоимость; - ограничения по применению на низких частотах; - испытываемую аппаратуру необходимо поворачивать.
<p>Измерения с использованием реверберационных камер</p>	<ul style="list-style-type: none"> - не требуется переворачивать испытываемую аппаратуру; - позволяют осуществлять весьма эффективное преобразование мощности источника в высокоинтенсивные поля внутри экранированного объема для проведения испытаний на ЭМС и ЭМП больших узлов оборудования и целых участков. 	<ul style="list-style-type: none"> - при интерпретации результатов измерений, выполненных в камере, нет полной уверенности в плане их коррелированности с реальными рабочими условиями; - теряются необходимые для описания ИА поляризационные свойства.

Во **второй** главе описываются сфера применения, принцип действия и методы и средства определения параметров безэховых испытательных камер СВЧ диапазона.

GTEM-камера представляет собой закрытую линию передачи специальной формы, у которой внешний проводник имеет форму прямоугольной расширяющейся пирамиды. В основании внешнего пирамидального расширяющегося проводника на сферической панели, расположены высокочастотные поглотители и резистивная нагрузка. Со

стороны вершины пирамидального расширяющегося проводника имеется согласованный переход к генератору или приемнику сигналов. К внешнему пирамидальному расширяющемуся проводнику на диэлектрических нитях, асимметрично по высоте, подвешен жесткий плоский внутренний проводник. Такая конструкция исключает появление резонансов и обеспечивает плоскую частотную характеристику от постоянного тока до частот, существенно превышающих 1 ГГц.

Задачи изучения излучения и рассеяния электромагнитных волн состоят в необходимости определения поля в области больших электрических размеров (под электрическим размером понимается отношение геометрического размера к длине волны в свободном пространстве). Особое значение при этом приобретает правильный выбор программы моделирования, т.к. дискретизация больших областей порождает задачи огромной размерности. В этом случае строгие методы электродинамики необходимо дополнить, так называемыми, асимптотическими методами: физической оптики (ФО), геометрической теории дифракции (ГТД) и т.д.

Конструкция и принцип работы, калибруемой *GTEM*-камеры СВЧ диапазона подробно изложены в пункте 2.2 второй главы диссертационной работы. Эскиз внешнего вида измерительной *GTEM*-камеры представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Эскиз внешнего вида измерительной *GTEM*-камеры

Средства калибровки должны обеспечивать воспроизведение и (или) хранение единиц физических величин с точностью, необходимой для передачи

размера единиц от соответствующих национальных эталонов. При этом калибровка должна проводиться с применением эталонов, погрешность которых как минимум в 3 раза меньше требуемой погрешности измерения, и имеющих действующие калибровочные клейма и (или) свидетельства о калибровке.

С учетом этих требований было выбрано следующее оборудование для проведения калибровки: генератор тестового сигнала *CNE V* и анализаторы спектра *Rohde & Schwarz* серии *FSL (R&S FSL6)*.

В третьей главе приводятся результаты разработки методики калибровки *GTEM*-камеры в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц. В этой методике установлены методы и средства калибровки *GTEM*-камеры в этом диапазоне частот, описана процедура измерений при определении коэффициента затухания и напряженности электрического поля *GTEM*-камеры. Для этих режимов калибровки разработаны методики обработки результатов измерений и оценки неопределенности калибруемых параметров.

Для оценки неопределенности определения коэффициента затухания выбрана следующая модель:

$$K_{kp} = (\alpha_f + \lambda\alpha_f) - (\alpha_{pf} + \lambda_{apf}) + \Delta_{\text{поз}}, \quad (1)$$

где α_f – уровень мощности, излучаемый эталонным генератором тестового сигнала *CNE V* при вертикальной поляризации на частоте f , определяемой на расстоянии трех метров от измерительной антенны по результатам калибровки генератора, дБм;

α_{pf} – измеренное значение уровня мощности на частоте f на выходе камеры, дБм;

λ_{af} – поправка на неточности уровня мощности эталонного генератора тестового сигнала, дБ;

λ_{apf} – поправка, обусловленная неточностью анализатора спектра при измерениях уровней мощности от генератора тестового сигнала, дБ;

$\Delta_{\text{поз}}$ – поправка на неточность установки генератора тестового сигнала в одну и ту же точку рабочей области определяется геометрическими размерами от центра рабочей области до коаксиального разъема камеры, дБ.

Для оценки неопределенности определения напряженности электрического поля используется следующая модель:

$$E = E_{CNE} + [(\varepsilon_f + \gamma_{ef}) - (\varepsilon_{cf} + \gamma_{ecf})] + \Delta_{\text{поз}}, \quad (2)$$

где E_{CNE} – напряженность электрического поля, определяемая из калибровочных характеристик эталонного генератора тестового сигнала, дБмкВ/м;

ε_f – измеренная амплитуда сигнала от испытуемого устройства на частоте f , дБмкВ;

ε_{cf} – измеренная амплитуда сигнала от эталонного генератора тестового сигнала на частоте f , дБмкВ;

γ_{ef} – поправка, обусловленная неточностью анализатора спектра при измерениях напряжения, дБ;

γ_{ecf} – поправка, обусловленная неопределенностью калибровочных характеристик генератора тестового сигнала при измерениях напряжения от испытуемого устройства, дБ;

$\Delta_{\text{поз}}$ – поправка на неточность установки генератора тестового сигнала в одну и ту же точку рабочей области определяется геометрическими размерами от центра рабочей области до коаксиального разъема камеры, дБ.

Для этих параметров составлены бюджеты неопределенности и приведены выражения стандартной и расширенной неопределенности измерения калибруемых параметров.

В **четвертой главе** приведены результаты разработки алгоритма и ПО автоматизации процедуры калибровки *GTEM*-камеры.

Программа автоматизации калибровки заключается в работе с базой данных на предприятии и управлении анализатором спектра. Был сделан выбор работы с базой данных *UniTesS* и со средой программирования (написания скриптов) *UniTesS Script Language*. *UniTesS Script Language* содержит в себе основу языка программирования *C* с некоторыми поправками. Скриншоты работы с базой данных приведены в приложении А диссертационной работы.

Исходя из полученных данных и имеющихся возможностей автоматизации, был составлен алгоритм работы программы для управления анализатором спектра сигналов и оценки неопределенности результатов измерений.

В **пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований безэховой испытательной камеры СВЧ диапазона *GTEM* типа при ее калибровке. Приведены результаты калибровки *GTEM*-камеры в калибруемой точке 100 МГц. Для калибруемой точки составлены бюджеты неопределенности и оценены действительные значения калибруемых параметров. Проведено тестирование процедуры автоматизации, в результате которого были сформированы протокол испытаний и свидетельство о калибровке в формате *doc..* Проведено сравнение результатов опробования методики калибровки и тестирования программы ее автоматизации. При сравнении результатов экспериментальных исследований опробования методики калибровки *GTEM*-камеры и тестирования ПО автоматизации калибровки можно сделать вывод о том, что алгоритм и ПО процедуры калибровки составлены корректно и не вносят ошибок при обработке результатов измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведен обзор существующих методов и средств измерений ЭМС и ЭМП, а так же существующих *GTEM*-камер, рассмотрено устройство и принцип их работы, разработана структурная схема подключения оборудования для измерений.

Разработана методика калибровки *GTEM*-камеры, предназначенной для испытаний на электромагнитную совместимость.

Разработаны и обоснованы методики оценки неопределенности измерений коэффициента затуханий и напряженности электрического поля *GTEM*-камер. С использованием предложенной методики проведены экспериментальные исследования МХ *GTEM*-камеры, обработаны их результаты с оценкой неопределенности результатов измерений.

Разработаны алгоритмы и ПО автоматизации измерений измеряемого уровня мощности, амплитуды подаваемых сигналов, расчетов коэффициента затухания и напряженности электрического поля и оценки неопределенности результатов измерений. Эти алгоритмы включают в себя основную часть измерений и расчетов, а также конечный результат калибровки *GTEM*-камеры в виде рассчитанных коэффициента затухания и напряженности электрического поля в камере и оценки неопределенности результатов измерений. Программа автоматизации измерений и расчетов создана на базе скриптового языка программирования *UniTesS*, позволяющего напрямую взаимодействовать с анализатором спектра *R&S FSL6* и с внутренней базой данных лаборатории. Проведены экспериментальные исследования, сделаны выводы по полученным данным.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные и исследованные методика калибровки и алгоритмы по ее автоматизации являются основой для написания методик калибровки испытательных камер СВЧ диапазона конкретных типов и автоматизации.

Результаты работы успешно внедрены в работу НИИЛ ЭМИ НИИЦ ОАО «Гипросвязь».

Результаты работы апробированы на 9-ой Международной НТКМУС «Новые направления развития приборостроения» – БНТУ (Минск, 20-22 апреля 2016 г.), 52-ой Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Телекоммуникационные системы и сети» – БГУИР (Минск, 25-30 апреля 2016 г.) и опубликованы в материалах этих конференций.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 Герасимова, А.А., Белошицкий А.П. Автоматизация калибровки безэховой испытательной камеры *GTEM* типа: материалы 9-ой международной НТКМУС «Новые направления развития приборостроения» – БНТУ в 2-х ч. Ч. 2 – Минск, 2016 – С.161.

2 Герасимова, А.А., Белошицкий А.П. Калибровка испытательной камеры *GTEM* типа и основные направления ее автоматизации: материалы 52-ой Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Телекоммуникационные системы и сети» – БГУИР – Минск, 2016 – С.18 – 19.