

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА**

на правах рукописи

**ЛЕОНИДОВ Владимир Вячеславович**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ  
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ  
МНОГОКАНАЛЬНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ  
МОДУЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Магистерская диссертация

Научный руководитель -  
канд. техн. наук, доцент  
Макарчук В.В.

Москва – 2012 г.

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете  
им. Н.Э. Баумана.

**Научный руководитель:** доцент, кандидат технических наук Макарчук В.В.

**Ведущее предприятие:** ФГУП НПП «Пульсар» (Москва).

Защита диссертации на степень магистра состоится 15 июня 2012 г. на заседании Государственной квалификационной комиссии по направлению 551100: «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана (ауд. 278).

Ваши отзывы в двух экземплярах просьба высылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, ИУ4.

Автореферат разослан «1» июня 2012 г.

Ученый секретарь Государственной квалификационной комиссии по направлению 551100: «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств»  
доцент, кандидат технических наук Лавров А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Измерение параметров многоканальных радиочастотных модулей является обязательной частью технологического процесса при их производстве. Автоматизация измерений позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на проверку функционирования и наладку данных модулей, исключить «человеческий фактор», что во много раз повышает точность и достоверность получаемых результатов.

Устранение неполадок, выявленных в процессе приёмо-сдаточных испытаний, требует от персонала высокой квалификации. Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс включает в себя интеллектуальную систему локализации неисправностей. Это позволяет снизить требования к персоналу, увеличить качество выпускаемой продукции и производительность технологической линии предприятия.

Следующим этапом проведения приёмо-сдаточных операций является создание протокола результатов измерений на конкретный модуль. Разработанная платформа включает в себя систему автоматизированного создания протоколов с возможностью хранения результатов измерений в базе данных. Это позволяет систематизировать и структурировать параметры каждого из выпускаемых модулей, а также вести статистику по годной и бракованной продукции.

**Состояние проблемы.** Серийное производство радиочастотных модулей систем управления требует значительных ресурсов на их настройку, наладку и проведение приёмо-сдаточных испытаний. Выполнение контроля электрических параметров в ручном режиме требует определённой квалификации сотрудника, а также большие временные ресурсы, что неприемлемо при выпуске крупных партий изделий. Данная работа позволяет автоматизировать эти процессы, исключить человеческий фактор, тем самым увеличить производительность производственной линии и увеличить качество выпускаемой продукции.

**Цель работы** заключается в разработке интеллектуального программно-аппаратного комплекса, позволяющего производить автоматизированную диагностику многоканальных радиочастотных модулей систем управления (СУ).

### **Решаемые задачи:**

1. Произвести анализ параметров и методик их измерения для типовых радиочастотных модулей систем управления.
2. Разработать структурную схему программно-аппаратного комплекса.
3. Разработать схемотехнические решения электронных узлов, входящих в состав программно-аппаратного комплекса.

4. Разработать программное обеспечение низкого уровня для микроконтроллеров и ПЛИС, входящих в состав функциональных блоков комплекса.
5. Разработать пользовательское программное обеспечение высокого уровня для ПК.
6. Разработать интеллектуальную систему локализации неисправностей, обнаруженных в результате тестирования модулей.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработана интеллектуальная система локализации неисправностей тестируемых модулей.
2. Предложена методика реализации СВЧ-генератора входной мощности с линейной АЧХ на заданных уровнях мощности.
3. Предложена методика оптимизации измерения разности фаз СВЧ-сигнала.
4. Использование в программно-аппаратном комплексе вычислительной техники позволяет учесть нелинейности СВЧ-трактов и добиться максимальной точности измерения электрических параметров.

**Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы** подтверждена результатами проведённых экспериментальных исследований и результатами внедрения разработанного программно-аппаратного комплекса в ФГУП «НПП «Пульсар».

Полученные результаты достоверно демонстрируют эффективность разработанного комплекса для решения задач повышения качества выпускаемой продукции, увеличения процента выхода годных, а также роста производительности предприятия.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет автоматизировать процесс приёмо-сдаточных испытаний и наладки модулей систем управления. Это повышает точность измерений и производительность технологической линии предприятия.
2. Разработанный комплекс позволяет локализовать неисправность модуля, обнаруженную в процессе контроля его электрических параметров.
3. Разработанный комплекс имеет автоматизированную систему создания протоколов измерений. Систематизация протоколов позволяет хранить на сервере всю необходимую информацию о параметрах измеряемого модуля на протяжении всего жизненного цикла.
4. Предложенный программно-аппаратный комплекс представляет собой универсальную платформу для разработки комплексов автоматизированного измерения электронных модулей различной конфигурации, сложности и диапазона рабочих частот.

5. Данный комплекс состоит из взаимозаменяемых блоков, что значительно упрощает его ремонт и наладку. Программное обеспечение имеет возможность объединения нескольких комплексов в одну локальную сеть для автоматизации документооборота.

**Практическая значимость и результаты внедрения.** Разработанный в диссертации интеллектуальный программно-аппаратный комплекс внедрён в ФГУП «НПП «Пульсар». Производительность данного комплекса в 100 раз превышает производительность ручного метода измерений.

Основной практической ценностью платформы является возможность выявления неполадок на ранних этапах жизненного цикла радиочастотных модулей, а также значительное упрощение процесса их испытаний.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на XII и XIII Международной научно-технической конференции «Научоёмкие технологии и интеллектуальные системы» (Москва, 2010, 2011), на IX научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Звенигород, 2010), опубликованы в журнале «Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы» (Москва, 2011).

Работа отмечена дипломами молодёжных научно-технических конференций «Научоёмкие технологии и интеллектуальные системы» (Москва, 2010, 2011), дипломом открытого конкурса 2010 года на лучшую научную работу студентов вузов по направлению «Приборостроение, метрология, информационно-измерительные системы и приборы».

**Публикации.** По материалам и основному содержанию работы опубликовано 5 научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из них одна научная работа опубликована в рецензируемом издании, рекомендованном ВАК.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и списка литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, определяется научная новизна и практическая значимость защищаемых результатов.

**В первой главе** произведён обзор типовых радиочастотных модулей систем управления. Рассмотрены основные электрические параметры данных модулей, методы и средства их измерения. Произведён анализ существующих автоматизированных измерительных систем от сторонних производителей. К недостаткам данных систем относятся большая сложность реализации требуемых измерительных комплексов, отсутствие возможности адаптации

системы под сложные модули СУ, управляемые нестандартизированными протоколами обмена данных, а также их очень высокая стоимость.

Таким образом, было установлено, что на российском рынке аналогов разработанного комплекса на данный момент не имеется, что говорит об актуальности защищаемой работы.

**Во второй главе** разработана структурная схема программно-аппаратного комплекса (рисунок 1). В его состав входят два измерительных стенда (стенд для тестирования параметров передающих и приёмных каналов соответственно) и сервер БД и протоколов измерений. За каждым измерительным стендом закреплено отдельное рабочее место.

Стенды между собой объединяются посредством либо местной локальной сети лаборатории, либо общей локальной сети предприятия. Второй способ позволяет получать доступ к протоколам измерений и данным об измеренных и сданных модулях из любой точки предприятия.

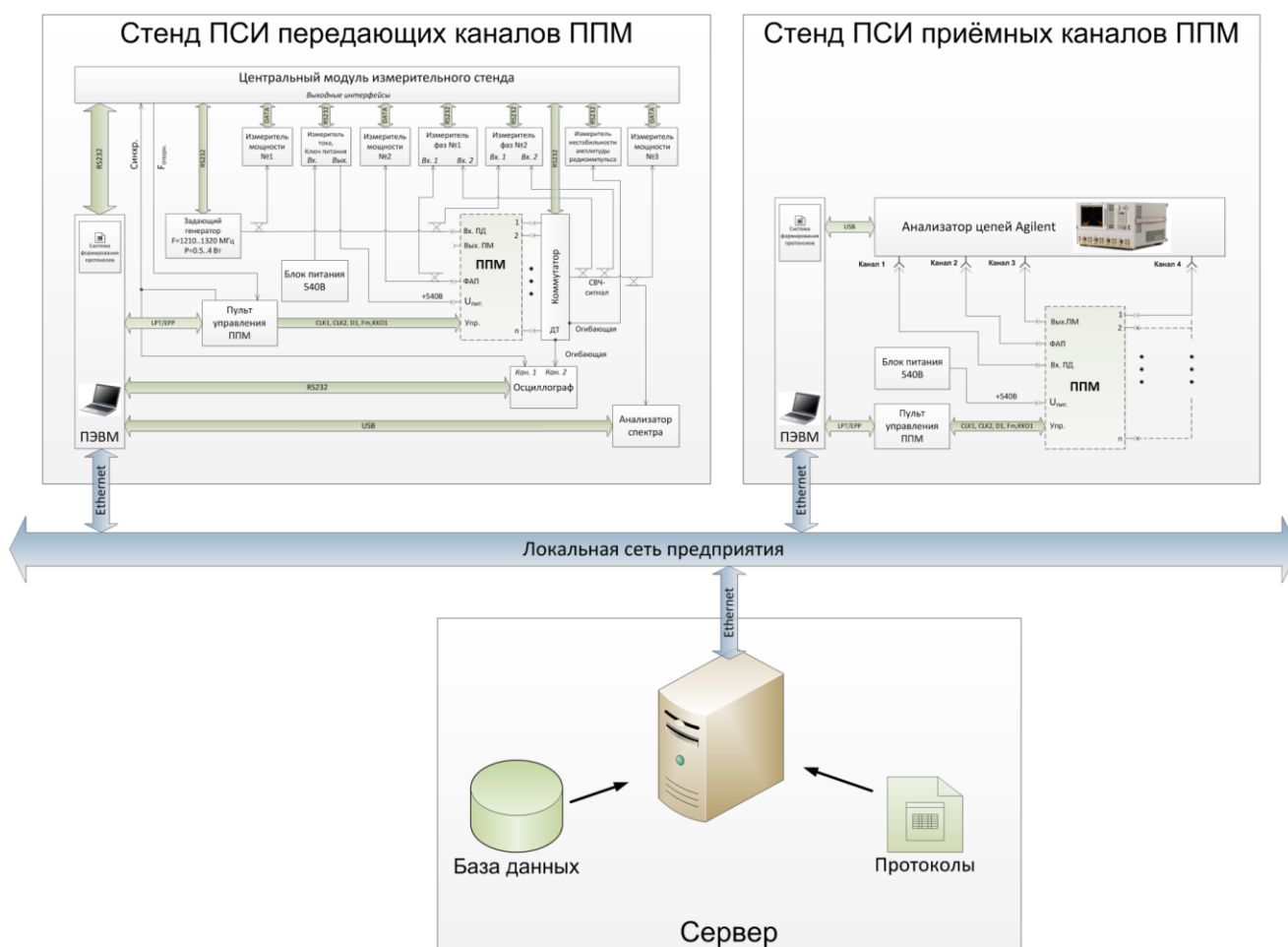


Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса

Разработанная концепция позволяет объединять в себе множество стендов как передающих, та и приёмных каналов, сохраняя при этом информацию обо всех модулях в едином хранилище, с возможностью дополнения и изменения

протоколов измерений одного и того же модуля, измеренного на разных рабочих местах.

На рисунке 2 представлена структурная схема стенда передающих каналов.

Центральный модуль измерительного стенда (ЦМИС) является основным функциональным блоком стенда передающих каналов. Также в его состав входят специально разработанные генератор входной мощности, измерители фаз, коммутатор СВЧ-сигнала и изделия от сторонних производителей: измерители мощности Я2М-66, анализатор спектра фирмы “Agilent”, цифровой осциллограф и блок питания фирмы “GW Instek”.

Входной генератор задает СВЧ-сигнал в рабочей полосе частот в диапазоне от 0.5 до 4Вт с шагом 0.25Вт. Коммутатор позволяет переключать один из выходов ППМ к измерительному тракту, а также получать огибающую импульса выходного сигнала каждого канала посредством установленных в нём детекторов. Измерители фаз позволяют измерять фазовые характеристики ППМ.

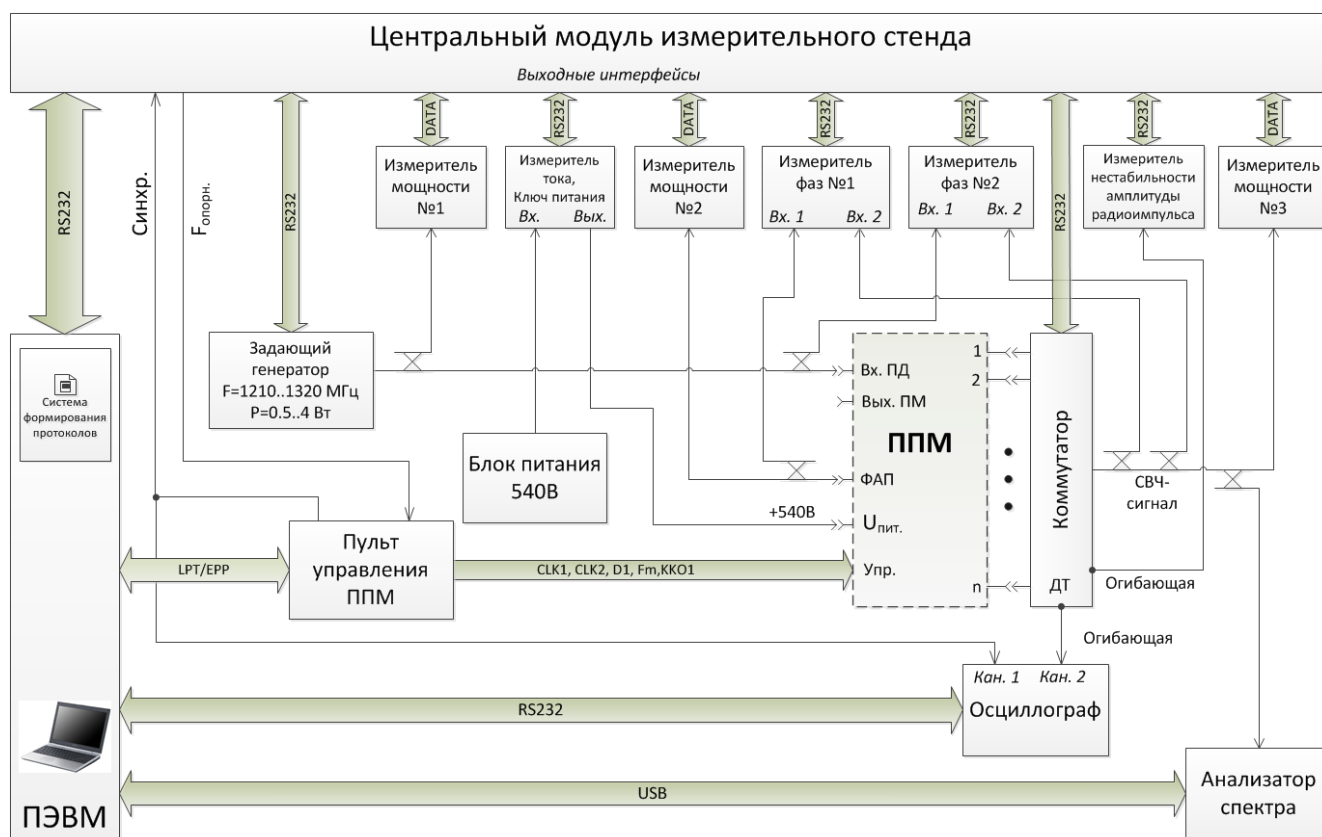


Рисунок 2 – Структурная схема стенда передающих каналов

В состав ЦМИС входит интерфейсный модуль, и до 16 периферийных модулей (плат расширения). Структурная схема ЦМИС представлена на рисунке 3. Интерфейсный модуль инициирует управление и сбор информации с

периферийных устройств, а также осуществляет обмен данными с ПК. Платы расширения через разъемы кроссплаты коммутируются с источниками +5В, ±15В, +24В, сигналами синхронизации и информационной шиной центрального модуля. Платы расширения не имеют фиксированного адреса и могут устанавливаться в разъемы кроссплаты в любой последовательности и в любой комбинации. Созданная конфигурация плат фиксируется в ПК и в дальнейшем не меняется.

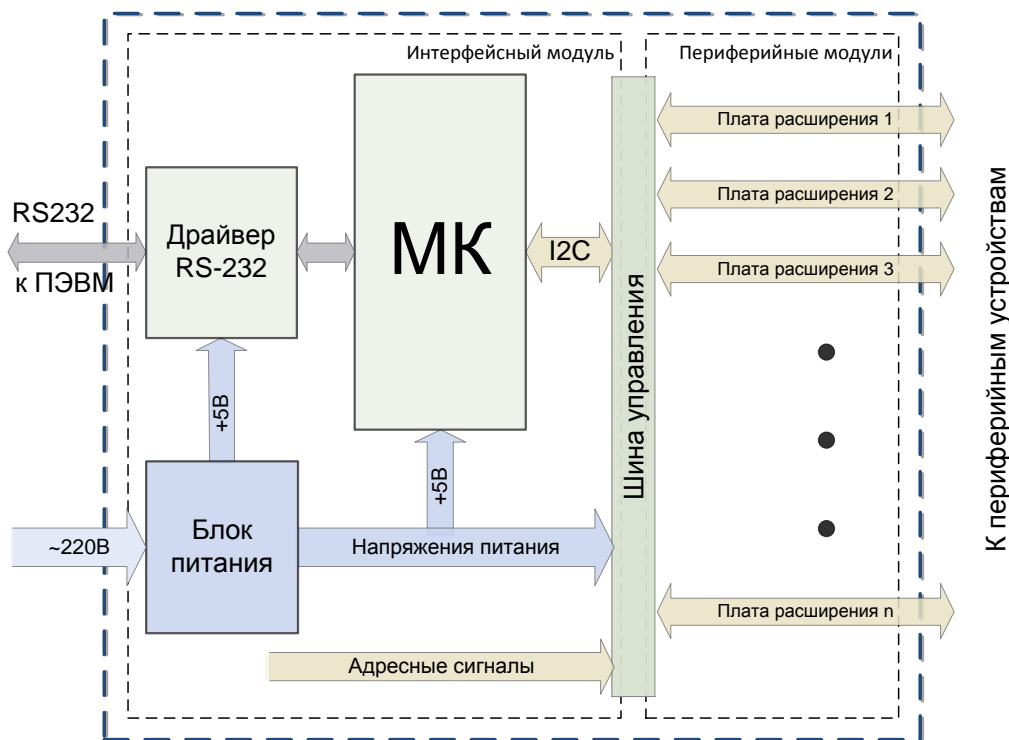


Рисунок 3 – Структурная схема ЦМИС

В состав ЦМИС могут входить следующие типы плат расширения:

1. Интерфейсная плата для периферийных устройств
2. Интерфейсная плата для измерителя мощности
3. Тактовый генератор 0 – 39999кГц
4. Платы специального назначения.

Разработана генератор входной мощности. Его структурная схема представлена на рисунке 4. Синтезатор формирует СВЧ-сигнал, который после предусилителя и модулятора усиливается на выходном каскаде, представляющем из себя биполярный транзистор в схеме включения с общей базой. Коэффициент усиления выходного каскада изменяется путём изменения тока эмиттера транзистора посредством программируемого генератора тока.



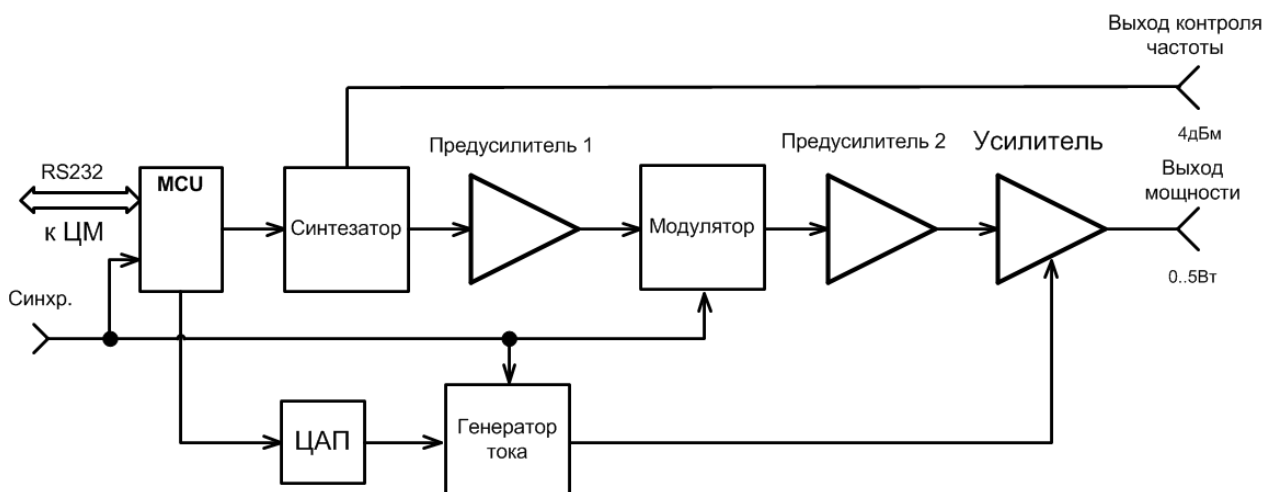
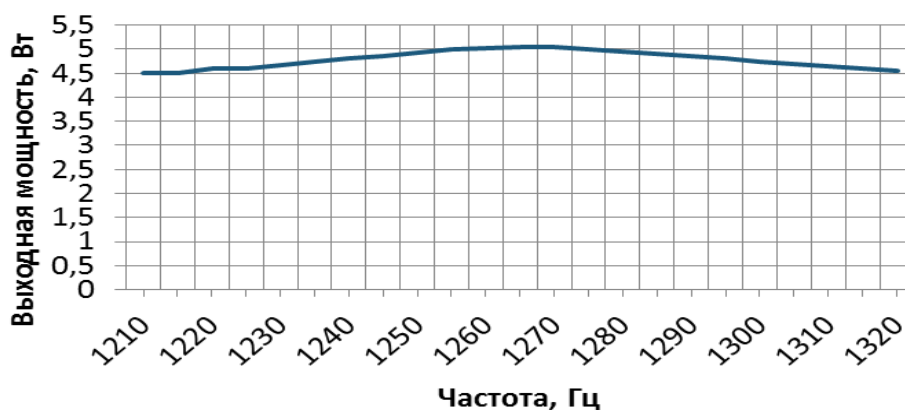
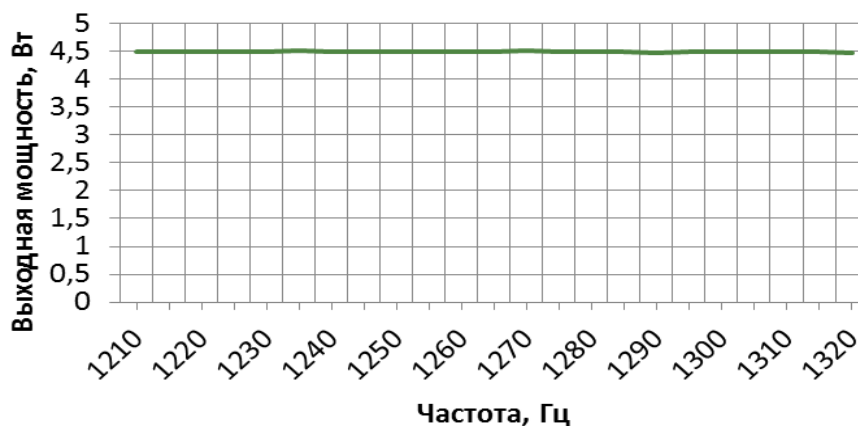


Рисунок 4 – Структурная схема генератора входной мощности

Из-за неравномерности АЧХ предусилителей и выходного усилителя (рисунок 5а), был предложен алгоритм её корректировки путём аппроксимации характеристики по методу наименьших квадратов полиномами первого и второго порядков. Полученные коэффициенты аппроксимации записываются в ПЗУ МК и учитываются при установке мощности и частоты. Это позволяет получить практически прямую АЧХ генератора (рисунок 5б)



а)



б)

Рисунок 5 – АЧХ задающего генератора: а) без коррекции б) с коррекцией

Для измерения фазовых характеристик модулей был разработан измеритель фаз, основой которого является ИМС AD8302 фирмы “Analog Devices”, выполняющая функцию фазового детектора. Указанная ИМС в широком динамическом диапазоне измеряет соотношение амплитуд и величину сдвига фаз между двумя независимыми входными сигналами и выдает аналоговое напряжение, пропорциональное соотношению указанных выше величин. На рисунке 5 представлена структурная схема измерителя фаз. Одной из сложностей при работе с данной ИМС является неопределенность знака разности фаз. Второй сложностью является увеличение ошибки измерения при увеличении частоты входных сигналов и приближении к областям  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Для того чтобы решить данные проблемы, в каждый измерительный тракт были введены независимые переключающиеся линии задержки, позволяющие сдвигать разность фаз на постоянное значение (рисунок 6).

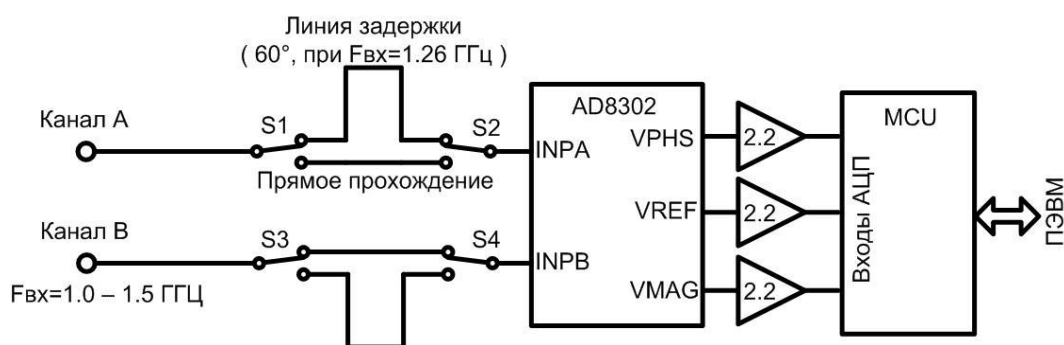


Рисунок 6 – Структурная схема измерителя фаз

Благодаря этому появляется возможность определить знак сдвига фаз и перейти из областей с низкой точностью в области с высокой точностью (рисунок 7).

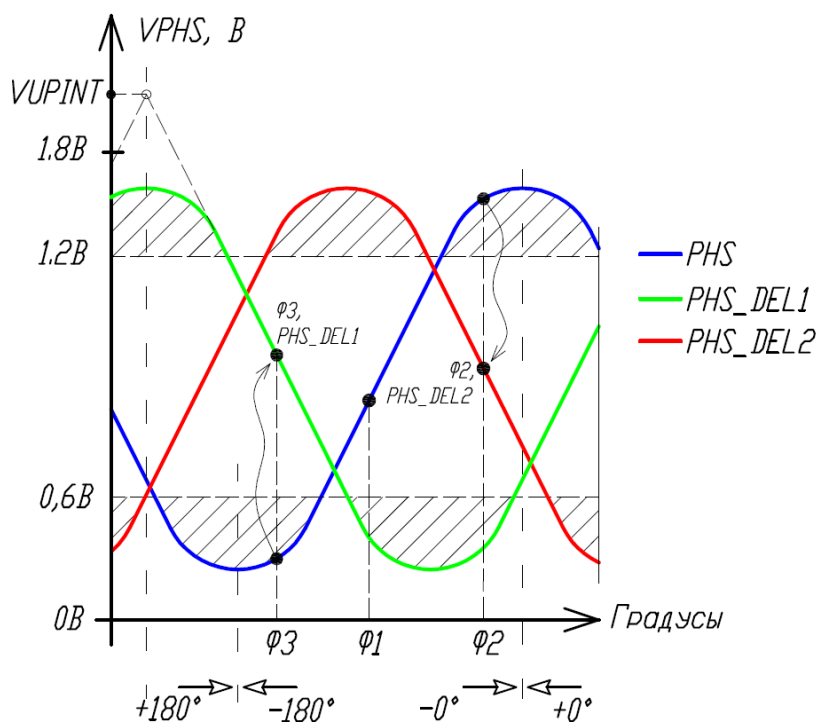


Рисунок 7 – Алгоритм измерения разности фаз

Аппроксимируя данные кривые для каждого из приборов полиномами второго порядка и записывая коэффициенты аппроксимации в ПЗУ МК, можно добиться измерения фазы с погрешностью, не превышающей  $\pm 1^\circ$ .

Коммутатор предназначен для переключения одного из выходных каналов модуля на измерительный тракт. Структурная схема коммутатора представлена на рисунке 8. Входная мощность понижается на аттенюаторах и поступает на коммутатор СВЧ-сигнала. Установленные детекторы позволяют формировать огибающую радиоимпульса, которая отдельным коммутатором переключается на вход цифрового осциллографа.

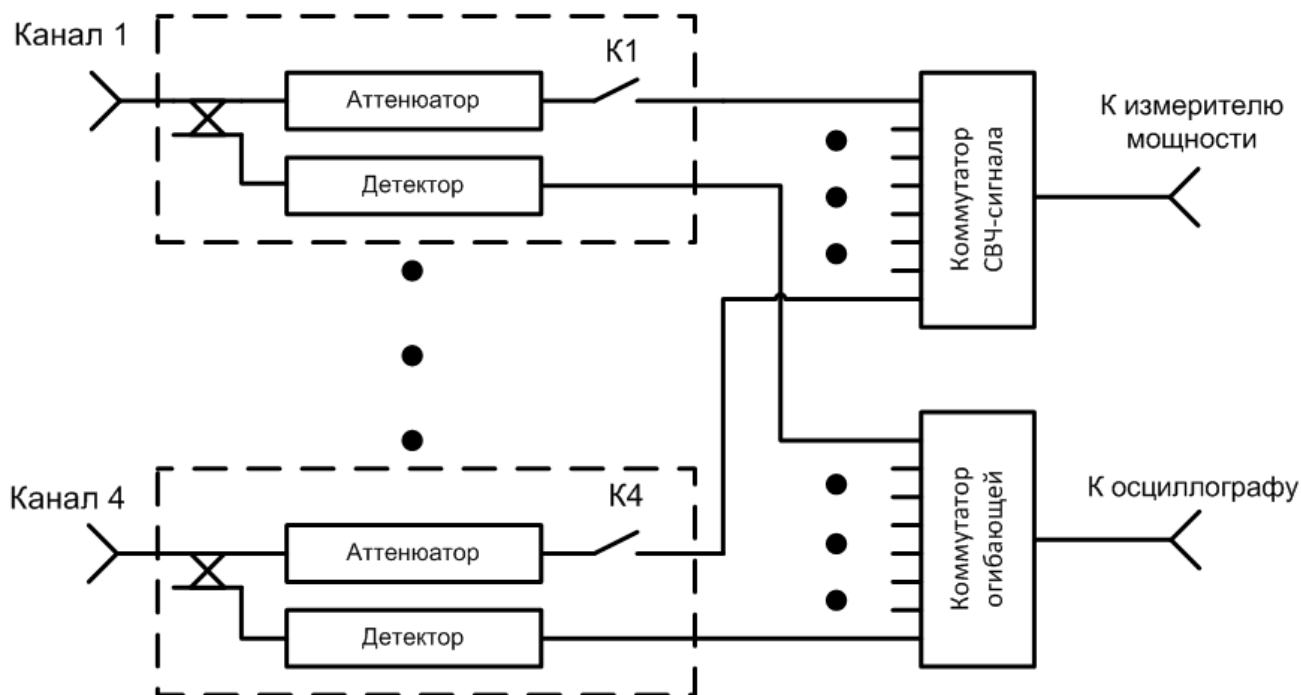


Рисунок 8 – Структурная схема коммутатора

Измеритель напряжения и тока предназначен для измерения напряжения питания ППМ, его номинального и пикового тока потребления, а также для удалённой коммутации напряжения питания на измеряемый модуль. На рисунке 9 представлена структурная схема данного блока.

Входное напряжение коммутируется ключом питания, который представляет из себя полевой транзистор и трёхфазное реле. МК предназначен для обмена данными с ЦМИС, обмена данными с АЦП и его калибровки. Данный измеритель позволяет измерять номинальный и пиковый токи потребления в диапазонах от 0.625А до 10А и напряжение питания в диапазонах от 62.5В до 1000В.

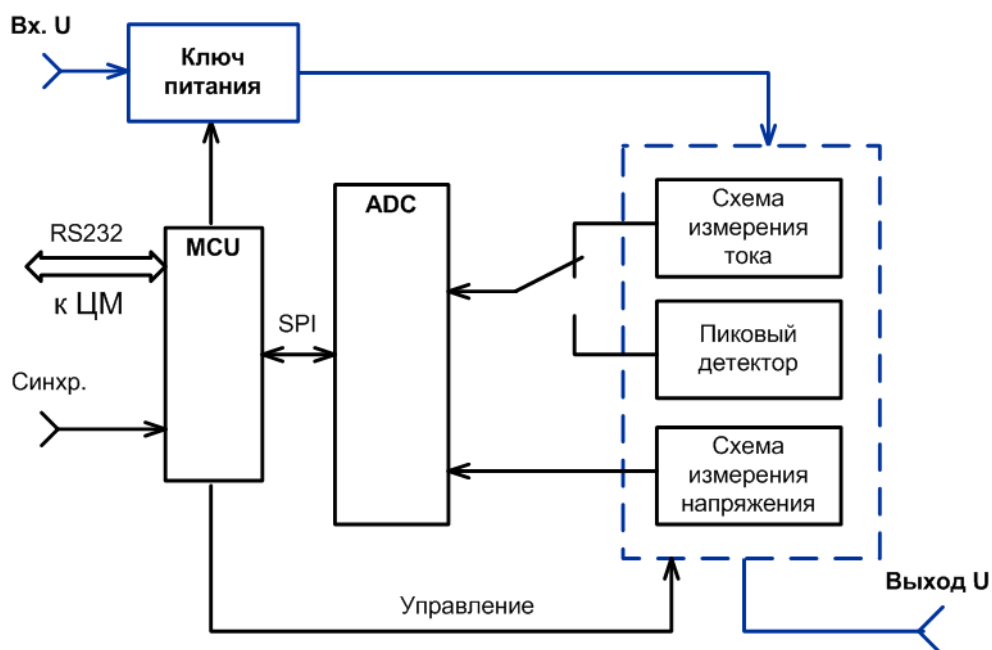


Рисунок 9 – Структурная схема измерителя напряжения и тока потребления

В состав стенда приёмных каналов (рисунок 10) входит анализатор цепей “Agilent”, который позволяет измерять S-параметры модуля в автоматическом режиме под управлением ПК. В качестве интерфейса для обмена данными с анализатором цепей используется последовательный интерфейс USB 2.0. Пульт управления ППМ в составе комплекса предназначен для передачи конфигурационных данных в измеряемый модуль.

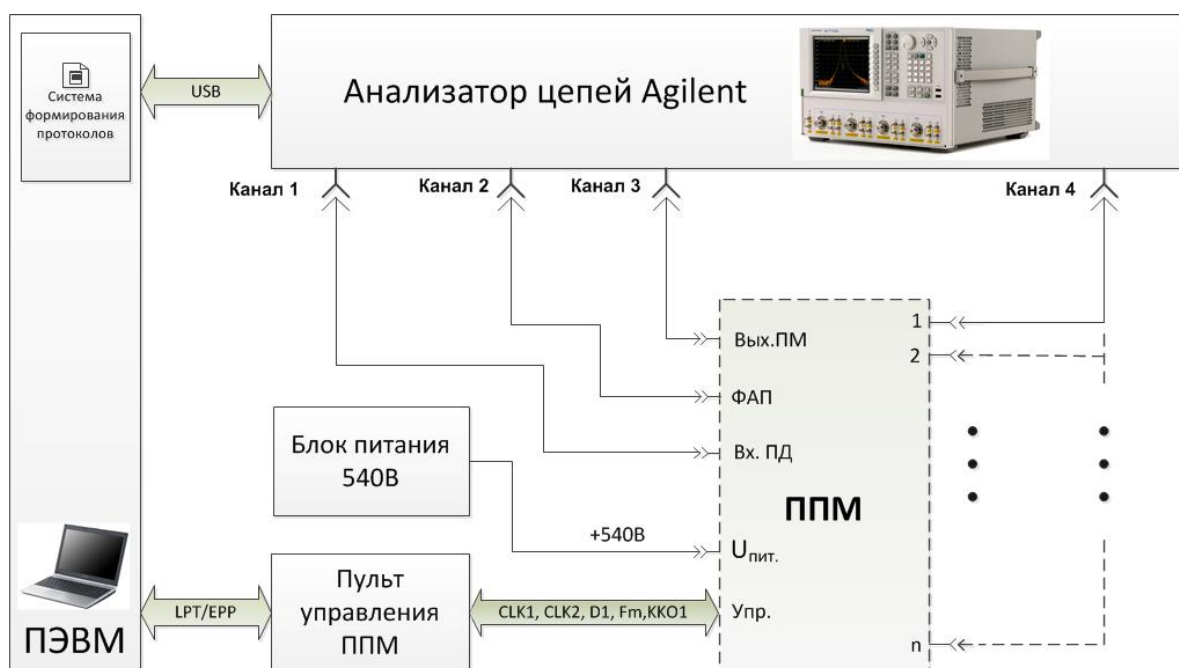


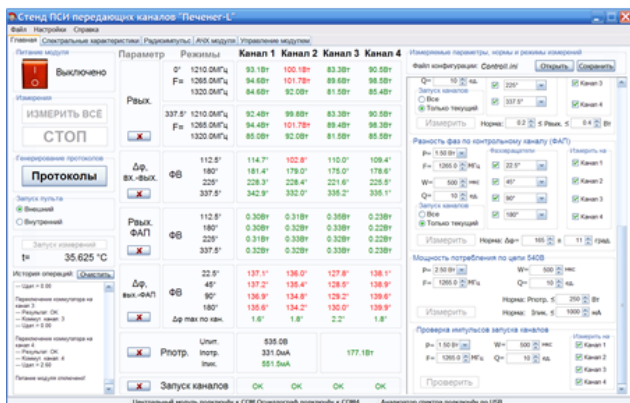
Рисунок 10 – Структурная схема стенда приёмных каналов

Программная часть разработанного комплекса состоит из программ низкого уровня для микроконтроллеров и пользовательского ПО высокого уровня для ПК.

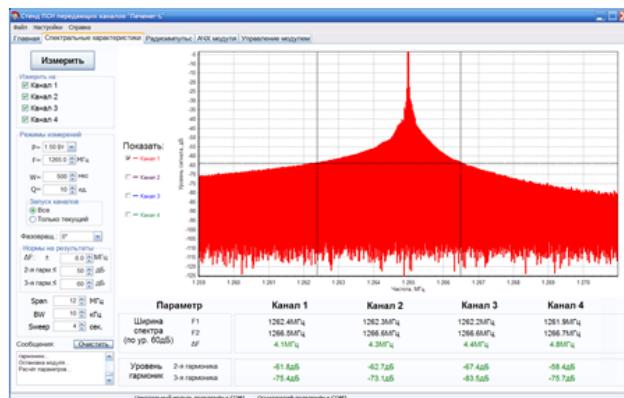
ПО для микроконтроллеров обеспечивает управление источниками токов, напряжений, а также задание кодов на ЦАПх, конфигурирование и чтение данных с АЦП и передачу результатов измерений в ПК.

Пользовательское ПО предназначено для управления всеми элементами программно-аппаратного комплекса, визуального представления и обработки результатов измерений, управления модулем в ручном режиме, а также для формирования протоколов по результатам произведённых измерений. На рисунке 11 представлен внешний вид окон пользовательского ПО стенда передающих каналов.

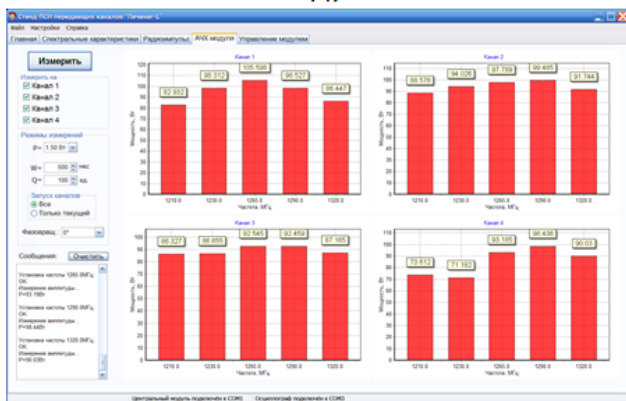
Основные параметры



Спектральные характеристики



АЧХ модуля



Параметры радиоимпульса

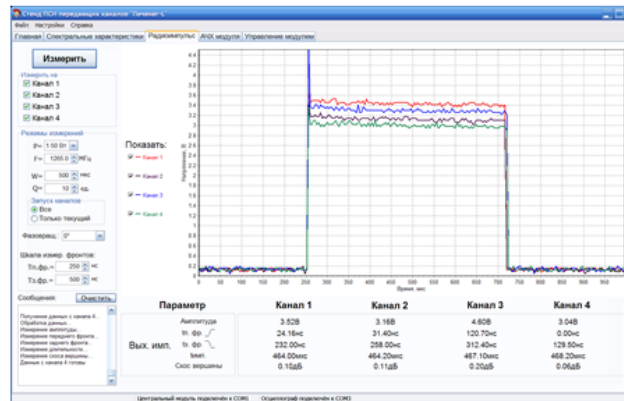


Рисунок 11 – Внешний вид окон пользовательского ПО стенда передающих каналов

ПО предназначено для работы на персональном компьютере под управлением Windows XP/2000/Vista/7. Оно имеет оконный интерфейс и содержит все инструменты, необходимые для работы с программно-аппаратным комплексом и управления измеряемым прибором. Для разработки пользовательского ПО использовалась среда разработки Embarcadero RAD Studio XE и язык программирования C++.

Программное обеспечение также включает в себя систему генерирования протоколов измерений. Она предназначена для автоматизированного внесения результатов измерения текущего модуля в протокол измерений с возможностью его дальнейшей распечатки или редактирования. Все протоколы хранятся на отдельном сервере, что позволяет синхронизировать работу всех стендов программно-аппаратного комплекса.

**В третьей главе** произведена разработка алгоритмов калибровки программно-аппаратного комплекса.

Наличие в каждом модуле программно-аппаратного комплекса микроконтроллера, а также использование ПК для обработки данных, позволяет учесть и скорректировать частотные зависимости входных и выходных трактов, нелинейности и частотные зависимости детекторов путем аппроксимации их полиномами 2–3 порядка, что значительно повышает точность получаемых результатов.

**В четвёртой главе** описаны результаты испытания разработанного программно-аппаратного комплекса на типовом приёмо-передающем радиочастотном модуле систем управления. В ходе эксперимента было установлено, что комплекс функционирует правильно, согласно предъявленным требованиям. Результаты измерений удовлетворяют требованиям, указанным в ГОСТе и ТУ на испытываемый модуль. Среднее время измерения всех электрических параметров как на стенде передающих, так и на стенде приёмных каналов составило 10 минут, что говорит о высокой производительности разработанной системы.

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработан программно-аппаратный комплекс автоматизированного измерения параметров многоканальных радиочастотных модулей систем управления. Параметры, измеряемые в автоматическом режиме:
  - 1) Выходная импульсная мощность передающих каналов (ПД)
  - 2) Выходная импульсная мощность контрольного канала (ФАП)
  - 3) Коэффициент передачи приёмных каналов (ПМ)
  - 4) Точность установки фазы передающих каналов
  - 5) Точность установки фазы приёмных каналов
  - 6) Коэффициент стоячей волны (КСВ) по входам приёмных каналов
  - 7) КСВ входа передающего канала
  - 8) КСВ входа канала ФАП
  - 9) КСВ выхода приёмных каналов

- 10) Точность контроля фазы передающих каналов по каналу ФАП
- 11) Точность контроля фазы приёмных каналов по каналу ФАП
- 12) Относительный фазовый сдвиг канала ФАП ПД относительно ФАП ПМ
- 13) Относительный коэффициент ослабления при закрытом состоянии ключей питания усилителей и ПМ
- 14) Характеристики радиоимпульса
  - форма радиоимпульса;
  - длительность радиоимпульса;
  - длительность фронтов радиоимпульса;
  - скос вершины радиоимпульса;
- 15) Спектральные характеристики модуля:
  - ширина спектра выходного сигнала по уровню -60дБ
  - уровень 2-й гармоники выходного сигнала;
  - уровень 3-й гармоники выходного сигнала;
- 16) Ток, пиковый ток, напряжение и мощность потребления по цепи питания +540В
- 17) АЧХ выходных каналов
- 18) Контроль корректности запуска передающих каналов

2. Разработан блок задающего генератора СВЧ-мощности, позволяющий задавать входную мощность в диапазоне от 0.5 до 4Вт в диапазоне частот 1210..1320МГц, модулированную по амплитуде импульсами длительностью до 500мкс с минимальной скважностью 10 ед. АЧХ задающего генератора линейна во всём рабочем диапазоне частот и мощностей.

3. Разработан измеритель фаз СВЧ-сигнала для L-диапазона частот. Получена точность измерения разности фаз двух сигналов  $\pm 1^\circ$ .

4. Разработан коммутатор СВЧ-сигнала, позволяющий переключать один из каналов модуля на измерительный тракт, а также содержащий выход огибающей радиоимпульса.

5. Разработан измеритель номинального и пикового тока потребления, напряжения питания модуля, который позволяет измерять номинальный и пиковый токи потребления в диапазонах от 0.625А до 10А и напряжение питания в диапазонах от 62.5В до 1000В.

6. Разработан центральный модуль измерительного стенда, объединяющий все периферийные устройства в единый измерительный комплекс. Данный модуль имеет возможность расширения функционала за счёт подключения дополнительных плат расширения.

7. Интеллектуальная система обнаружения и локализации неисправностей на основе анализа результатов измерений позволяет отбраковать модуль по отдельным параметрам и указать оператору на возникшую неисправность и способ её устранения.

8. Система автоматизированного генерирования протоколов позволяет в автоматическом режиме сформировать готовый протокол измерений, содержащий все результаты испытаний для данного модуля. Объединение стендов приёмных и передающих каналов в локальную сеть позволяет синхронизировать результаты измерений одного и того же модуля для разных стендов.

9. Разработанный программно-аппаратный комплекс представляет собой мощную платформу для разработки других программно-аппаратных комплексов для диагностики модулей различной степени сложности и функционального назначения (полупроводниковые приборы, приёмные, передающие, приёмно-передающие СВЧ-модули, модули управления воздушным движением, модули и приборы специального назначения и т.п.)

10. Разработанный комплекс внедрён в ФГУП «НПП «Пульсар», что позволило увеличить производительность технологической линейки по выпуску модулей систем управления данного типа практически в 100 раз: измерение всех параметров как на стенде приёмных, так и на стенде передающих каналов занимает порядка 10 минут, в то время как проведение тех же измерений в ручном режиме может занять около 5 часов, а также потребует от сотрудника высокой квалификации и опыта.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

1. Леонидов В.В., Гуляев И.Б., Колчин Г.С. Программно-аппаратная платформа автоматизированного измерения параметров электронных модулей и полупроводниковых приборов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2011.
2. Леонидов В.В., Григорян Р.М. Универсальная платформа для разработки программно-аппаратных комплексов автоматизированного измерения электрических параметров мощных многоканальных СВЧ передающих модулей // Научно-технические технологии и интеллектуальные системы 2011: Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции. 2011. С. 300-304.
3. Григорян Р.М., Колчин Г.С., Леонидов В.В., Гуляев И.Б. Программно-аппаратный комплекс автоматизированного измерения параметров мощных многоканальных радиочастотных передающих модулей // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы IX научно-технической конференции. 2010. С. 232-234.



4. Леонидов В.В., Григорян Р.М., Гуляев И.Б. Автоматизированный измерительный комплекс статических параметров n-канальных полевых транзисторов // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы IX научно-технической конференции. 2010. С. 234-236.
5. Леонидов В.В. Методики контроля статических параметров полевых транзисторов // Научно-технические технологии и интеллектуальные системы 2010: Сборник трудов XII Международной научно-технической конференции. 2010. С. 172-175.