

**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.

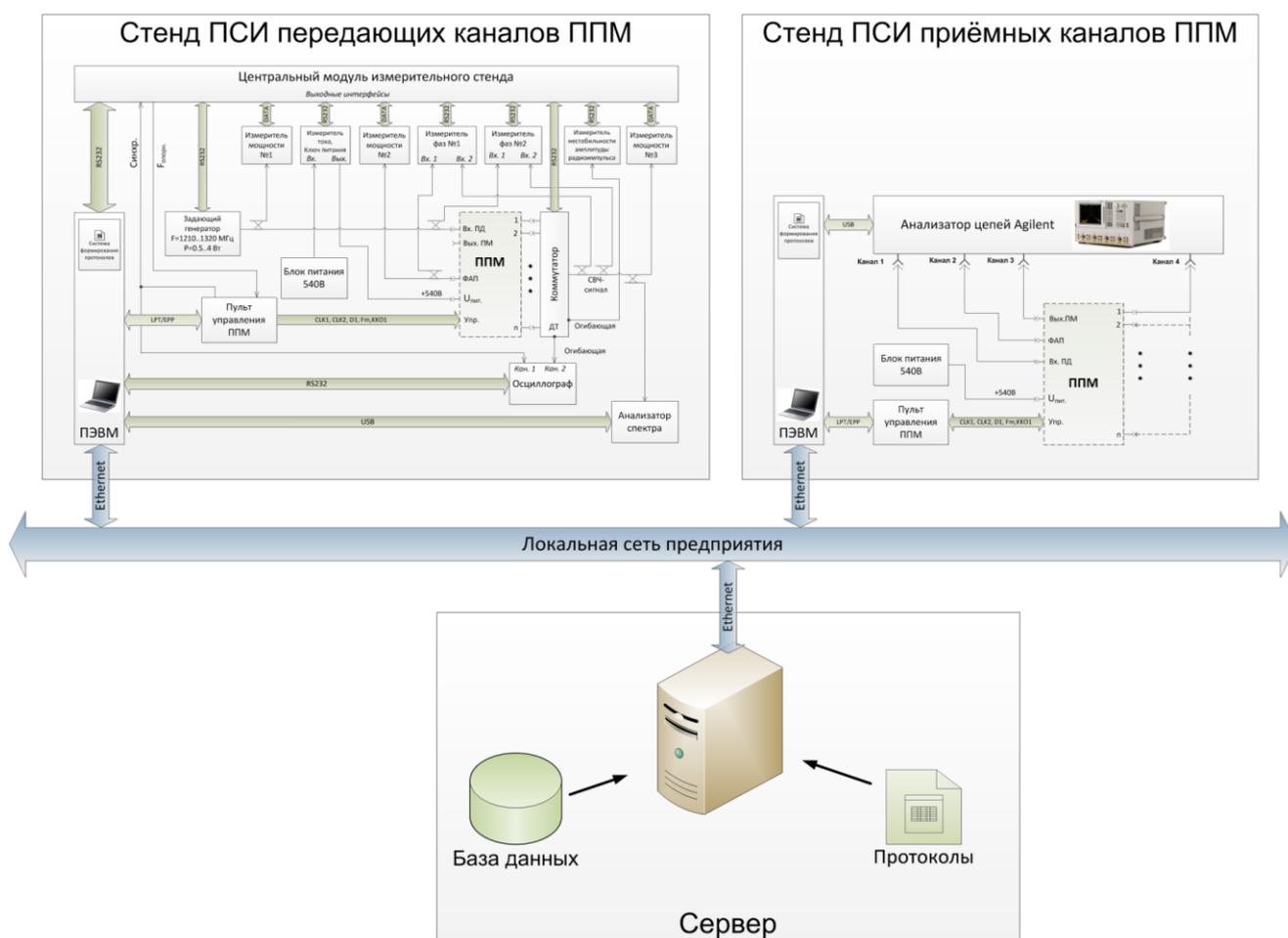


Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса

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.

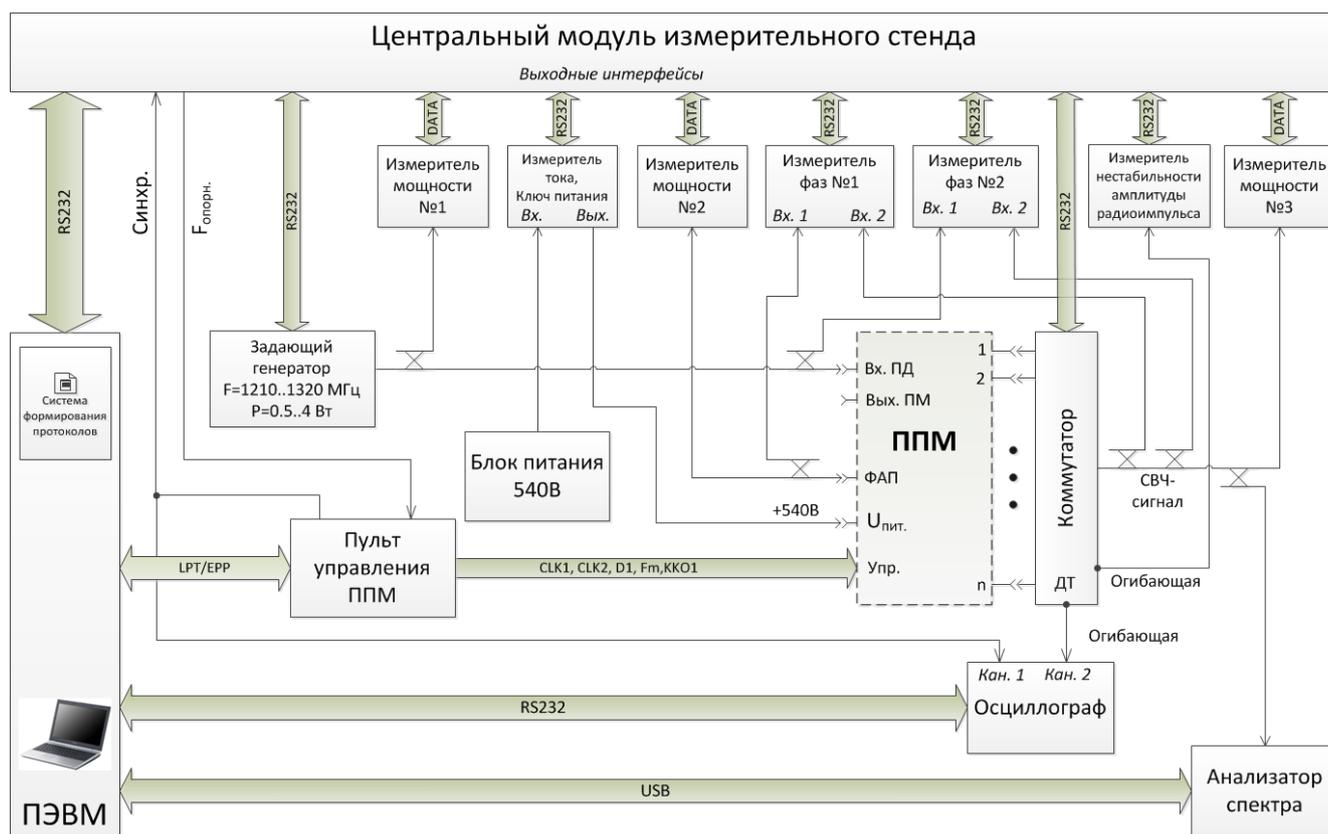


Рисунок 2 – Структурная схема стенда передающих каналов

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.

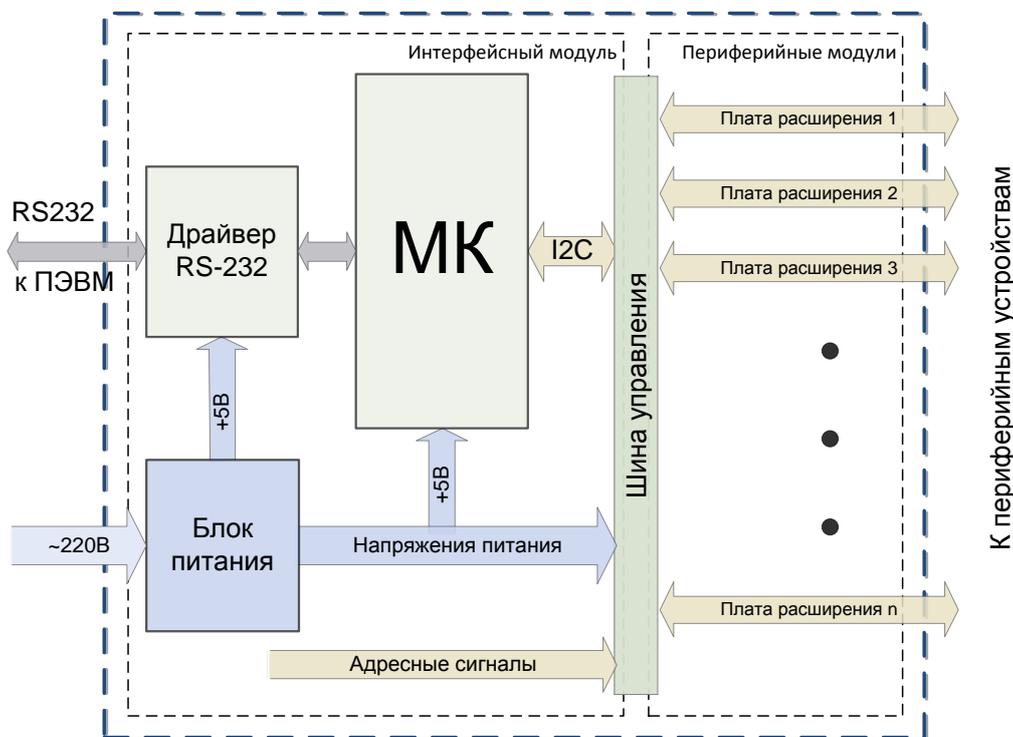


Рисунок 3 – Структурная схема ЦМИС

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.

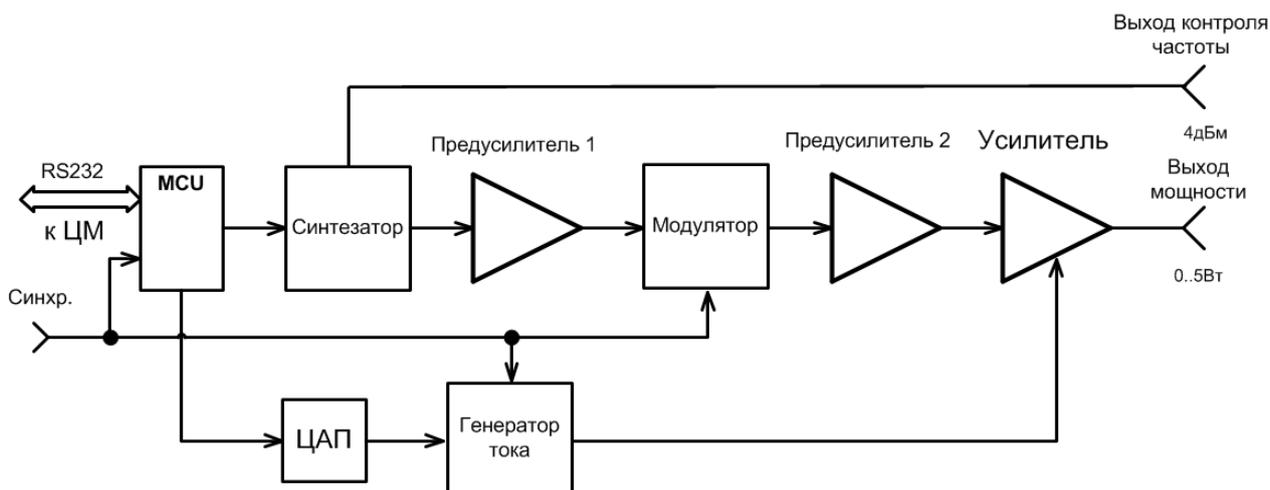
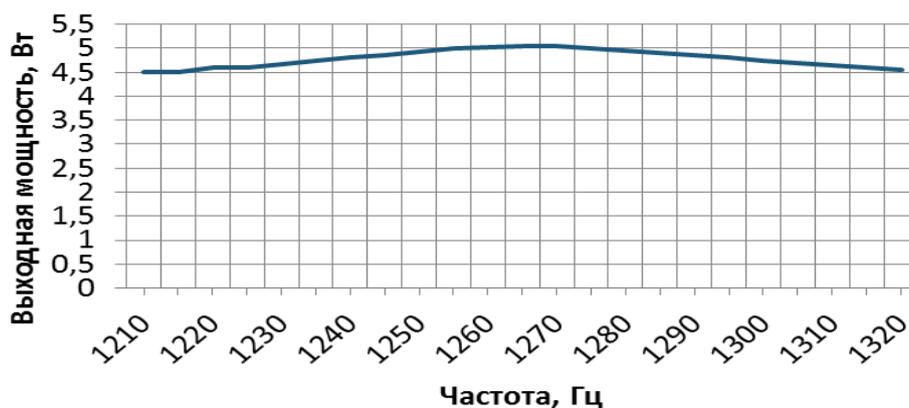
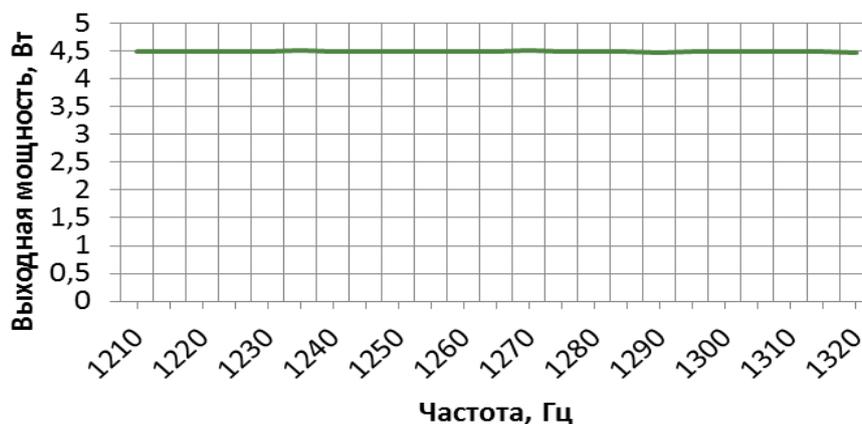


Рисунок 4 – Структурная схема генератора входной мощности

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° и 180° . 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).

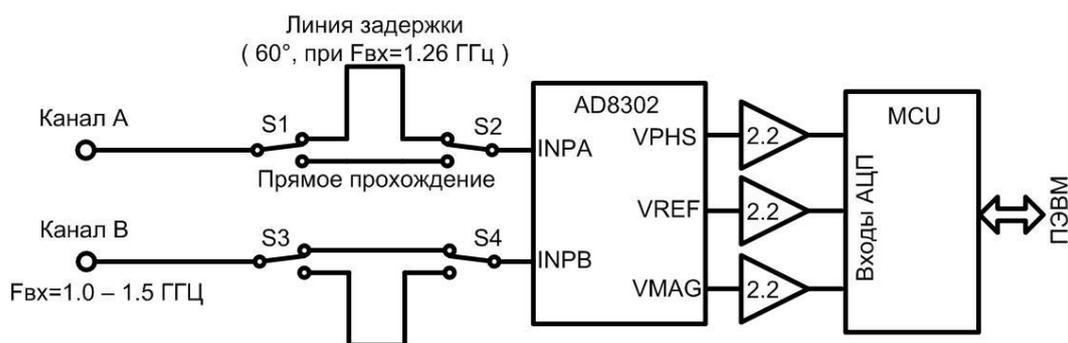


Рисунок 6 – Структурная схема измерителя фаз

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

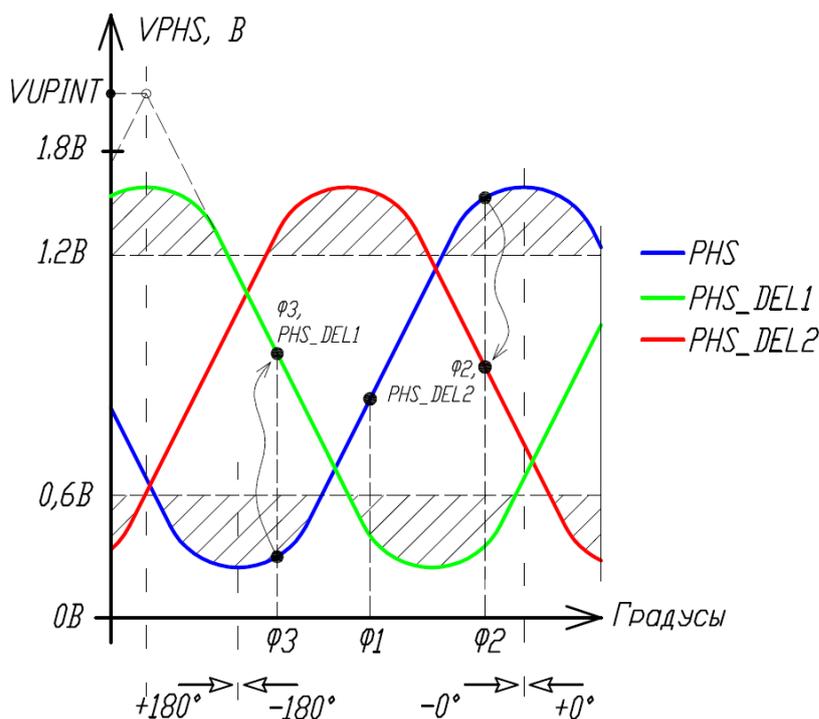


Рисунок 7 – Алгоритм измерения разности фаз

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.

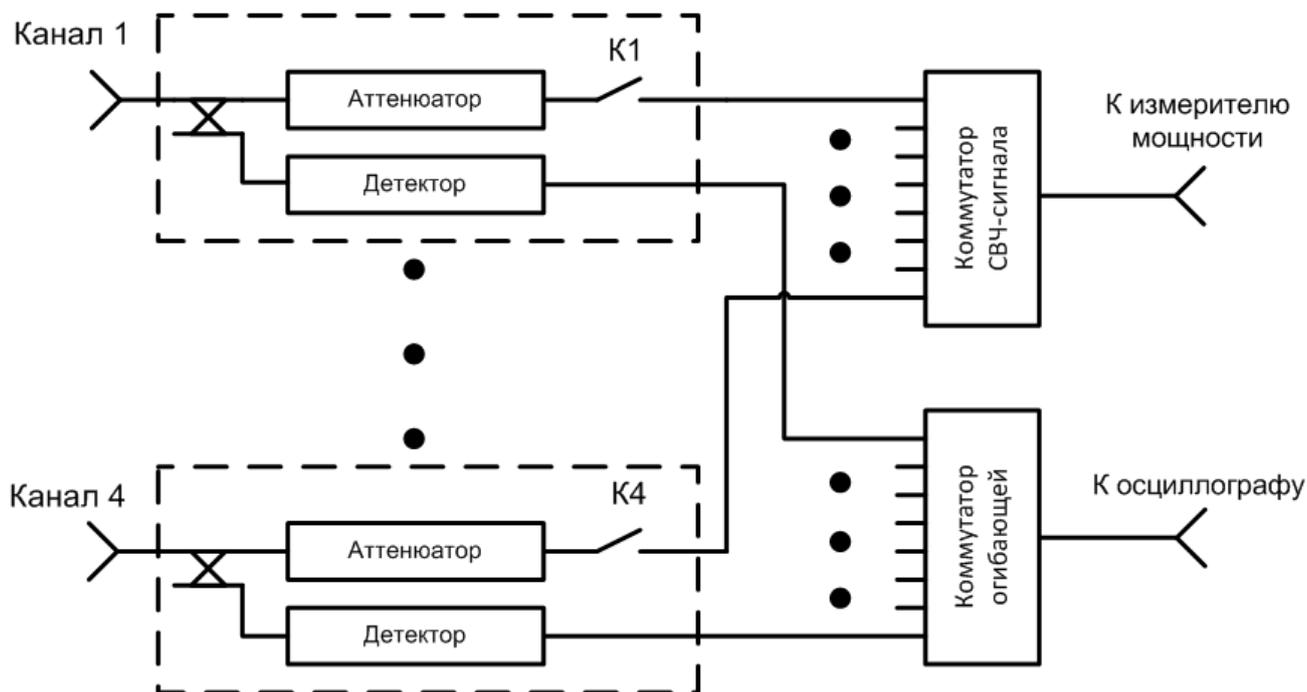


Рисунок 8 – Структурная схема коммутатора

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.

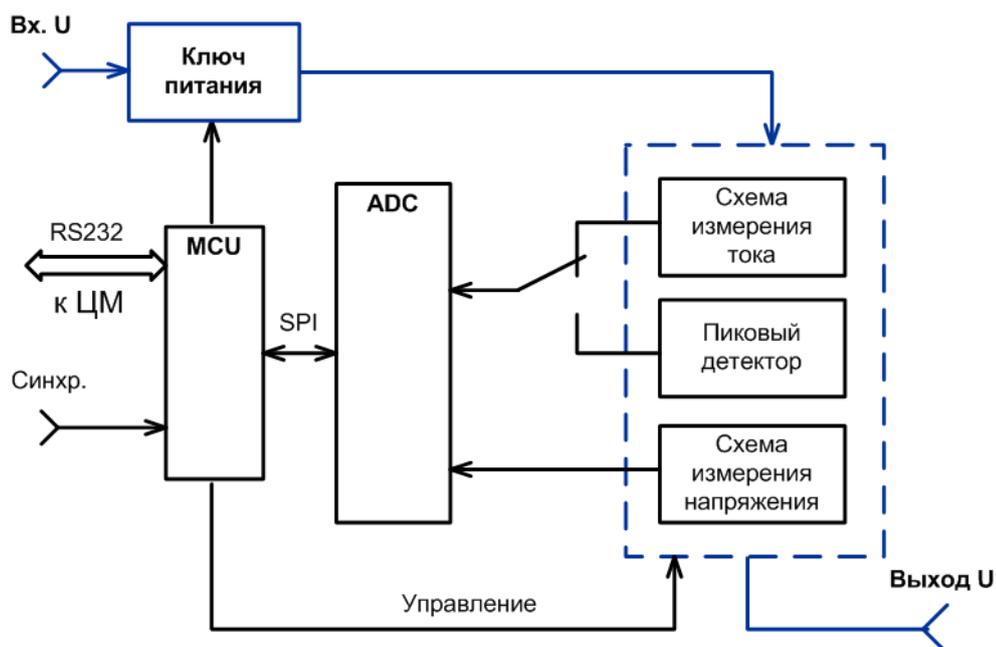


Рисунок 9 – Структурная схема измерителя напряжения и тока потребления

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.

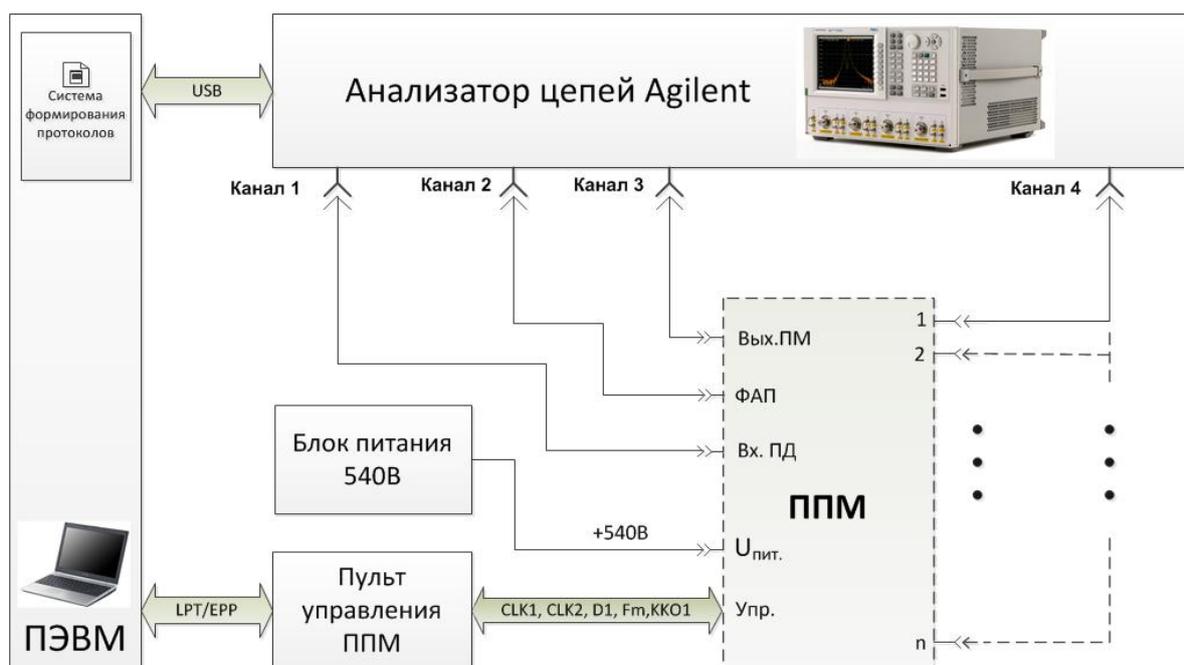


Рисунок 10 – Структурная схема стенда приёмных каналов

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

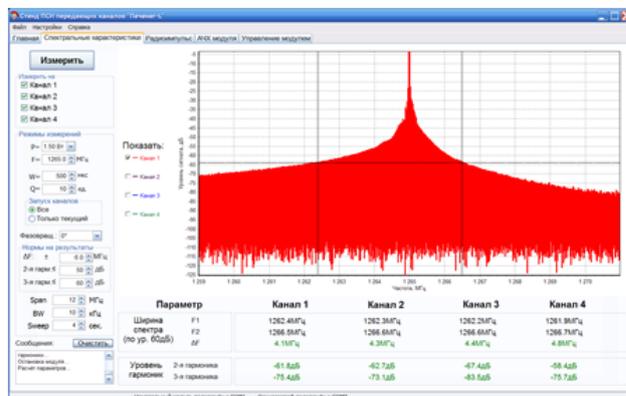
ПО для микроконтроллеров обеспечивает управление источниками токов, напряжений, а также задание кодов на ЦАПх, конфигурирование и чтение данных с АЦП и передачу результатов измерений в ПК.

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.

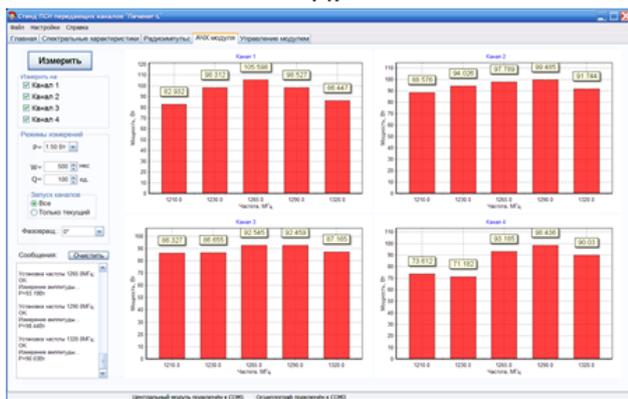
Основные параметры



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.