

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Ходжаков Тамерлан Таирович

«Анализ методов измерения в радиоэлектронике»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B06201 – Телекоммуникация

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизирующей и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ,
канд. техн. наук



Таштай Е.Т.
«30» мая 2024 г.




ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Анализ методов измерения в радиоэлектронике»

6В06201 – Телекоммуникация

Выполнил
Рецензент
к.т.н., профессор
АУЭС им.Г.Даукеева

Байкенов А.С.
«25» мая 2024 г.

Ходжаков Т.Т.
Научный руководитель
старший преподаватель

Джунусов Н.А.
«25» мая 2024 г.



Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

ОП «6В06201 Телекоммуникация»



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся *Ходжаков Тамерлан Таирович*

Тема: *Анализ методов измерения в радиоэлектронике*

Утверждена приказом Ректора Университета № 548 П/О от «4» декабря 2023 года.

Срок сдачи законченной работы «25» мая 2024 г.

Исходные данные к дипломной работе: Анализатор спектра в реальном времени С4-47 предназначенный для наблюдения и измерения спектров радиосигналов работает на частоте 160 МГц; СВЧ преобразователь работает на частотах 2-4 ГГц; полоса частот УПЧ1 составляет 10 МГц; Цифровой анализатор спектра СК4-71 диапазон частот 0-50 кГц; коэффициент усиления входных сигналов от 0,125 до 8 В; измерительные приемники ESH2 работает на диапазоне частот 9 кГц-30 МГц.

Краткое содержание дипломной работы:

- а) Анализ измерения радиосигналов в радиоэлектронике*
- б) Реализация схемы организации измерения радиосигналов*
- в) Выбор оборудования и измерительных приборов для различных методов измерения в радиоэлектронике*
- г) Расчет основных параметров радиосигналов в радиоэлектронике*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- 1. Структурная схема организации радиочастотных измерений*
- 2. Блок-схема цифровой анализатора спектра СК4-71*

3. Блок-схема измерительных приемников
4. Методы измерения и структурные схемы средств измерения
5. Моделирование радиосигналов в среде MATLAB
6. Рисунок – АЧХ и ФЧХ характеристики радиосигналов

Рекомендуемая основная литература:

- 1) Данилин А. А. Измерения в радиоэлектронике: учебное пособие для вузов / А. А. Данилин, Н. С. Лавренко / под редакцией А. А. Данилина. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 408 с.
- 2) Шкловский М. И., Ямпольский А. Г. Цифровые методы измерения в радиоэлектронике. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2015. - 224 с.
- 3) Хамадулин Э. Ф., Основы радиоэлектроники: методы и средства измерений : учеб. Пособие для СПО / Э. Ф. Хамадулин. – М. : Издательство Юрайт, 2018. – 365 с.
- 4) Королюк В. В., Соколов Г. В. Цифровые методы измерения в радиоэлектронике. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2019. - 224 с.
- 5) Гурвич Я. С., Шкловский М. И. Метрологическое обеспечение измерений в радиоэлектронике. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2018. - 192 с.
- 6) Bosch K. F., Estreich P., Estreich R. Handbook of Measurement Science and Technology. - 3rd ed. - Berlin: Springer, 2016. - 1243 p.



ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ измерения радиосигналов в радиоэлектронике	1.02.2024 - 1.03.2024	Выполнено
Реализация схемы организации измерения радиосигналов	1.03.2024 - 25.03.2024	Выполнено
Выбор оборудования и измерительных приборов для различных методов измерения в радиоэлектронике	25.03.2024 - 20.04.2024	Выполнено
Расчет основных параметров радиосигналов в радиоэлектронике	20.04.2024 – 12.05.2024	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу
с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Старший преподаватель Джунусов Н.А.	02.05.2024	
Нормоконтролер	Старший преподаватель кафедры ЭТиКТ., доктор Ph.D. Досбаев Ж.М.	05.05.2024	

Научный руководитель  Джунусов Н.А.

Задание принял к исполнению обучающийся  Ходжаков Т.Т.

Дата «20» декабря 2023 г.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе представлен всесторонний анализ методов измерений в радиоэлектронике с акцентом на измерение радиосигналов. В исследовании рассматриваются вопросы расчета ключевых параметров, реализации схем измерений и выбора оборудования и измерительных приборов. Цель исследования - улучшить понимание точных измерений радиосигнала и облегчить принятие обоснованных решений по выбору оборудования. Полученные результаты способствуют совершенствованию систем связи и внедрению инноваций в радиоэлектронике.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста радио сигналдарын өлшеуге баса назар аударатырып, радиоэлектроникадағы өлшеу әдістеріне жан-жақты талдау жасайды. Зерттеу негізгі параметрлерді есептеу, өлшеу схемаларын жүзеге асыру және жабдықтар мен өлшеу құралдарын таңдау мәселелерін қарастырады. Зерттеудің мақсаты-радиосигналдың нақты өлшемдерін түсінуді жақсарту және жабдықты таңдау бойынша негізделген шешімдер қабылдауды жеңілдету. Алынған нәтижелер байланыс жүйелерін жетілдіруге және радиоэлектроникада инновацияларды енгізуге ықпал етеді.

ANNOTATION

This diploma thesis provides a comprehensive analysis of measurement methods in radio electronics, focusing on the measurement of radio signals. The research explores the calculation of key parameters, implementation of measurement schemes, and selection of equipment and measuring instruments. The objective is to enhance the understanding of accurate radio signal measurement and facilitate informed decision-making for equipment selection. The findings contribute to the advancement of communication systems and drive innovation in radio electronics.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Анализ измерения радиосигналов в радиоэлектронике	9
1.1 Анализ радиоизмерения сигналов	9
1.2 Измерительные средства	11
1.3 Реализация схемы организации измерения радиосигналов	19
1.4 Постановка задачи	26
2 Выбор оборудования и измерительных приборов для различных методов измерения в радиоэлектронике	28
2.1 Осциллографы	28
2.2 Частотомеры и фазометры	35
2.3 Цифровые анализаторы спектра	36
3 Расчёт основных параметров радиосигналов в радиоэлектронике	43
3.1 Расчёт длины волны радиосигнала. Расчёт плотности мощности. Расчёт мощности, получаемой приёмной антенной.	43
3.2 Анализ параметров радиосигналов	45
3.3 Моделирование и анализ радиосигналов с использованием фильтров	47
3.4 Генерация и анализ амплитудно-модулированного сигнала	50
Заключение	55
Список используемой литературы	56

ВВЕДЕНИЕ

В постоянно развивающейся области радиоэлектроники точные методы измерений играют решающую роль в обеспечении надежности и производительности передачи и приема радиосигналов. Анализ методов измерений в радиоэлектронике имеет первостепенное значение, поскольку он позволяет разобраться в тонкостях измерения радиосигналов и принимать обоснованные решения относительно выбора соответствующего оборудования и измерительных приборов.

Цель данной дипломной работы – углубиться в область измерения радиосигналов в радиоэлектронике, изучить различные методы измерений и их применение. Цель состоит в том, чтобы провести анализ методов измерений, используемых в радиоэлектронике, с особым акцентом на выбор оборудования и измерительных приборов для различных сценариев измерений.

Дипломная работа начнется с изучения фундаментальных принципов измерения радиосигналов, с выделением ключевых параметров, которые необходимо учитывать. Это потребует тщательного изучения расчета основных параметров радиосигналов, таких как частота, амплитуда, фаза и характеристики модуляции.

Кроме того, в дипломной работе будет рассмотрена реализация схем измерения радиосигнала с учетом различных подходов и методов, используемых на практике. Это будет включать критическую оценку существующих схем измерения, выявление их сильных сторон, ограничений и потенциальных областей для улучшения. Анализируя эти схемы, исследователи могут получить представление о наилучших методах измерения радиосигналов, гарантирующих точные и надежные результаты.

Важным аспектом этой дипломной работы будет выбор оборудования и измерительных приборов для различных методов измерений в радиоэлектронике. Выбор оборудования имеет решающее значение, поскольку он напрямую влияет на точность и надежность измерений. Поэтому будет проведена всесторонняя оценка имеющегося оборудования и приборов с учетом таких факторов, как диапазон частот, чувствительность, разрешающая способность и возможности калибровки. Этот анализ поможет принимать обоснованные решения при выборе оборудования, наиболее подходящего для конкретных требований к измерениям.

1 Анализ измерения радиосигналов в радиоэлектронике

1.1 Анализ радиоизмерения сигналов

Современные технологии связи, радиовещания и телевидения представляют собой ключевые каналы передачи информации, основанные на использовании разнообразных радиосигналов и методов их обработки. В зависимости от сферы применения, типа передаваемой информации и характеристик сигналов различают непрерывные (аналоговые), импульсные и цифровые радиотехнические устройства и системы.

Аналоговые устройства и системы основаны на изменении непрерывных параметров радиосигналов для передачи сообщений. В импульсных системах параметры импульсных процессов изменяются, например, при использовании импульсной модуляции для передачи и обработки информации. В цифровых информационных системах сообщения кодируются цифровыми символами для передачи. Для эффективной работы постоянно развивающегося массива радиоэлектронных систем и технологий необходимо согласование характеристик радиосистем и их регулярный контроль в процессе эксплуатации. Широкий спектр задач требует создания различных радиоэлектронных устройств и систем. К счастью, виды радиоизмерений относительно невелики и могут быть легко классифицированы.

Методы радиоизмерений могут быть классифицированы на специализированные (такие как радиолокационные, антенные, телекоммуникационные и другие) и универсальные. Среди областей применения универсальных аналоговых радиоизмерений можно выделить измерение напряжений, анализ изменений формы колебаний и их спектров, изучение динамики изменения формы колебаний и спектров от частоты и времени, определение режимов работы приборов и устройств (по напряжению, токам и мощности), а также точное определение параметров электро- и радиоэлементов, параметров устройств и радиосистем.

Основными объектами радиоизмерений являются сами сигналы и их свойства, выраженные в физических величинах, таких как заряды, напряжения, токи, а также частотные и фазовые зависимости. Переменные физических величин радиосигналов играют ключевую роль и взаимосвязаны согласно физическим законам, на основе которых строятся физико-математические модели различных радиоустройств и систем. Характеристики и параметры радиосистем (включая дискретные элементы, узлы, линии связи и т. д.), подлежащие измерениям, также описываются физическими величинами.

Существует несколько критериев классификации видов измерений, которые определяются типом уравнения измерений, точностью (например, эталонные и контрольно-поверочные), количеством проводимых опытов (однократные и многократные) и так далее. Наиболее практичная классификация зависит от способа получения измерений и включает прямые, косвенные, кумулятивные и совместные методы.

Прямые измерения подразумевают непосредственное получение желаемого значения физической величины из экспериментальных данных. Они могут быть представлены формулой

$$Q = X, \quad (1.1)$$

где Q - обозначает искомое значение измеряемой величины;

X - значение, полученное непосредственно из экспериментальных данных.

Примером таких измерений является измерение тока амперметром или напряжения вольтметром.

Косвенные измерения определяют значение физической величины на основе известной зависимости между искомой величиной Q и величинами x_1, x_2, \dots, x_n значения которых получены при прямых измерениях. Тогда значение измеряемой физической величины Q вычисляются по формуле

$$Q = F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.2)$$

где F -известная функция от переменных x_1, x_2, \dots, x_n .

Примером косвенных измерений может служить определение удельного сопротивления проводника по измерениям сопротивления, длины и площади поперечного сечения образца.

Совокупные измерения включают повторные прямые измерения нескольких однотипных величин при различных сочетаниях значений и решение системы уравнений, составленных на основе результатов этих прямых измерений.

Совместные измерения представляют собой одновременное измерение двух или нескольких различных величин с целью установления функциональной зависимости между ними. Примером совместных измерений может служить построение двумерной зависимости сопротивления резистора от его измерений в зависимости от температуры и величины управляющего напряжения. В радиоизмерениях чаще всего используются прямые измерения.

Методы измерений представляют собой техники сопоставления измеряемой физической величины с ее стандартной единицей в соответствии с принципом измерения. Они определяются характером измеряемых физических величин (напряжения, тока, частоты и других), требуемой точностью, а также размерностью измерений. Методы измерений подразделяются на методы непосредственной оценки и методы сравнения. В методах непосредственной оценки численное значение измеряемой физической величины определяется по показаниям измерительного прибора, шкала которого откалибрована в единицах измерения данной величины (это так называемые прямые измерения). Методы сравнения основаны на сопоставлении измеряемой величины с эталоном той же физической природы. Среди методов сравнения можно выделить дифференциальные методы (измеряется разность между измеряемой величиной

и эталоном), нулевые методы (разность приравнивается к нулю) и методы замещения (получение одинакового результата при замене измеряемой величины эталоном) [1].

1.2 Измерительные средства

В современном быстро развивающемся технологическом ландшафте цифровые устройства и измерительные приборы стали незаменимыми инструментами в различных областях. Хотя у аналоговых аналогов есть свои достоинства, цифровая революция принесла огромное количество преимуществ, которые значительно повышают эффективность, точность и универсальность.

Убедительные причины, по которым цифровые устройства и измерительные приборы превосходят свои аналоговые аналоги по многим параметрам:

- Точность и аккуратность. Цифровые устройства обладают непревзойденной точностью и аккуратностью по сравнению с аналоговыми приборами. Цифровые сигналы дискретны и поддаются количественному измерению, что позволяет проводить точные измерения без присущих аналоговым системам погрешностей, таких как дрейф и шум. Такая точность особенно важна в научных исследованиях, машиностроении и промышленности, где незначительные отклонения могут иметь существенные последствия;

- Гибкость и универсальность. Цифровые приборы обладают беспрецедентной гибкостью и универсальностью, легко адаптируясь к различным приложениям и требованиям. В отличие от аналоговых приборов, конструкция которых ограничена, цифровые аналоги можно переконфигурировать, запрограммировать и модернизировать в соответствии с меняющимися потребностями. Такая адаптивность делает цифровые приборы незаменимыми в таких областях, как телекоммуникации, вычислительная техника и автоматизация, где необходимы быстрые изменения и адаптация;

- Обработка и анализ сигналов. Цифровые приборы отлично справляются с обработкой и анализом сигналов, используя передовые алгоритмы и вычислительные мощности для извлечения ценных сведений из сложных данных. В отличие от аналоговых приборов, ограниченных базовыми измерениями, цифровые устройства могут выполнять сложный анализ, включая преобразование Фурье, фильтрацию и статистическое моделирование, что позволяет исследователям и аналитикам разгадывать сложные закономерности и тенденции;

- Хранение и извлечение данных. Цифровые устройства обеспечивают бесперебойное хранение и извлечение данных, устраняя необходимость в ручных записях и громоздких журналах. Благодаря оцифровке измерений и наблюдений ценные данные можно легко архивировать, анализировать и распространять на различных платформах. Такая возможность улучшает

сотрудничество, облегчает соблюдение нормативных стандартов и упрощает процессы принятия решений в различных областях;

- Удаленный мониторинг и контроль. Цифровые приборы позволяют осуществлять удаленный мониторинг и контроль, революционизируя управление и оптимизацию систем и процессов. Благодаря возможностям подключения, таким как IoT (Интернет вещей) и облачная интеграция, цифровые устройства обеспечивают передачу данных в режиме реального времени и удаленный доступ, позволяя пользователям осуществлять мониторинг, диагностику и вмешательство практически из любого места. Эти возможности неопределимы в таких отраслях, как здравоохранение, энергетика и инфраструктура, где удаленные операции становятся все более распространенными;

- Интеграция с цифровыми экосистемами. Цифровые устройства легко интегрируются в более широкие цифровые экосистемы, способствуя взаимодействию и синергии во взаимосвязанных системах. Совместимость цифровых приборов с программными приложениями, коммуникационными сетями или другими цифровыми устройствами повышает их совместимость, масштабируемость и инновационность. Такая интеграция ускоряет технологический прогресс и позволяет создавать взаимосвязанные интеллектуальные системы.

Превосходство цифровых устройств и измерительных приборов над аналоговыми аналогами очевидно по всем параметрам. От точности и гибкости до обработки сигналов и возможностей подключения - цифровые технологии предлагают беспрецедентные преимущества, которые дают беспрецедентные возможности и знания.

Цифровые вольтметры и мультиметры. Цифровые вольтметры и мультиметры представляют собой приборы для измерения напряжения с цифровой индикацией результатов. Процесс преобразования аналоговых значений напряжения в цифровой формат осуществляется аналого-цифровым преобразователем прибора (АЦП). Цифровые вольтметры обычно классифицируют по типу используемого АЦП. Существуют две основные группы: интегрирующие цифровые вольтметры, которые интегрируют сигналы во времени для получения результата, и цифровые вольтметры мгновенных значений, которые мгновенно измеряют и отображают значения напряжения.



Рисунок 1.1 – Цифровые мультиметры
a – стационарный вид, *б* – портативный вид

Преимущества цифровых вольтметров по сравнению с аналоговыми вольтметрами включают:

- Высокую и предсказуемую точность измерений;
- Широкий диапазон измерения напряжения и высокую чувствительность;
- Отсутствие субъективной погрешности при интерпретации результатов;
- Многофункциональность, что позволяет выполнять различные измерения с одним прибором;
- Простоту автоматизации процесса измерений;
- Возможность подключения вольтметра к компьютеру или измерительным системам для дополнительной обработки данных и анализа.

К недостаткам цифровых вольтметров следует отнести:

- Относительную сложность схемы и высокую стоимость, что может повлиять на доступность для широкого круга пользователей;
- Ограниченную рабочую полосу частот и невысокую скорость измерений, что делает их менее подходящими для некоторых высокочастотных приложений;
- Некоторые типы цифровых вольтметров могут иметь низкую помехозащищенность, что может привести к искажению результатов измерений.

Для некоторых измерительных задач, таких как поиск максимума сигнала или настройка оборудования, отсутствие аналогового индикатора в вольтметре может усложнить процесс измерений, поскольку человеку труднее оценить изменения в реальном времени.

Структурная схема цифрового вольтметра общего применения включает основные блоки аналогового электронного вольтметра, однако вместо стрелочного индикатора предусмотрены аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой дисплей (рисунок 1.2).

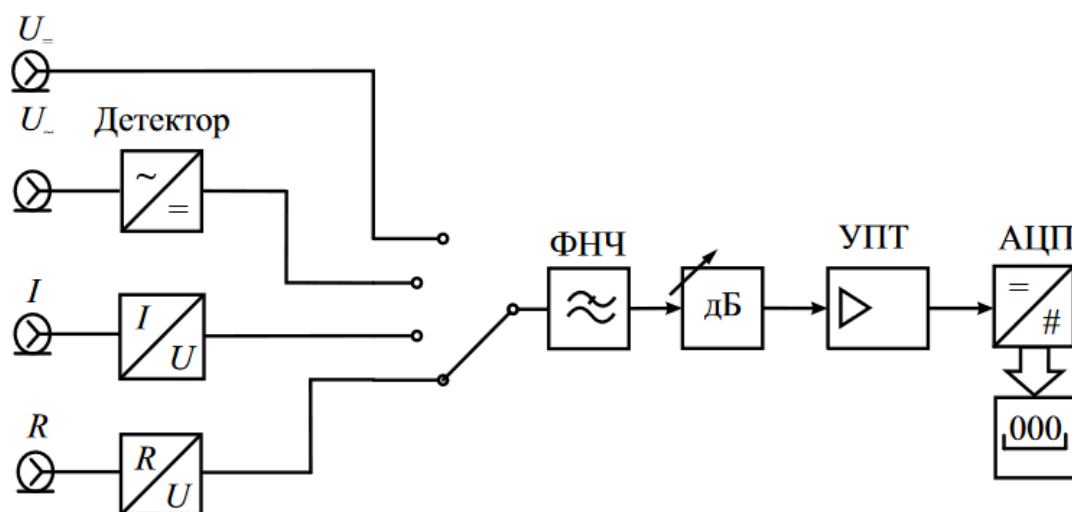


Рисунок 1.2 – Структурная схема цифрового вольтметра

Добавление дополнительных измерительных преобразователей позволяет превратить прибор в многофункциональный цифровой мультиметр (Digital MultiMeter - DMM). Мультиметр (от "мульти" - много и "метр" - измерять)

представляет собой комбинированный измерительный прибор, который объединяет в одном корпусе функции вольтметра, амперметра и омметра [2].

Цифровым осциллографом – это универсальный измерительный прибор, предназначенный для анализа электрических сигналов. Он осуществляет преобразование этих сигналов в цифровую форму и позволяет визуально наблюдать их на жидкокристаллическом дисплее. Осциллограф также используется для измерения амплитудных и временных параметров сигналов.

Основное различие между цифровыми и аналоговыми осциллографами заключается в методе обработки сигнала. В цифровых осциллографах мгновенные значения входного напряжения сначала преобразуются в цифровую форму с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП), после чего сохраняются в цифровом запоминающем устройстве (ОЗУ) и обрабатываются по различным алгоритмам перед отображением на экране. Это означает, что цифровые осциллографы не просто обладают цифровыми элементами, такими как микропроцессор, но и выполняют цифровое преобразование аналоговых сигналов, их хранение и отображение. Благодаря этому цифровые осциллографы способны предоставлять широкий спектр параметров сигнала - временные, частотные, статистические и другие.

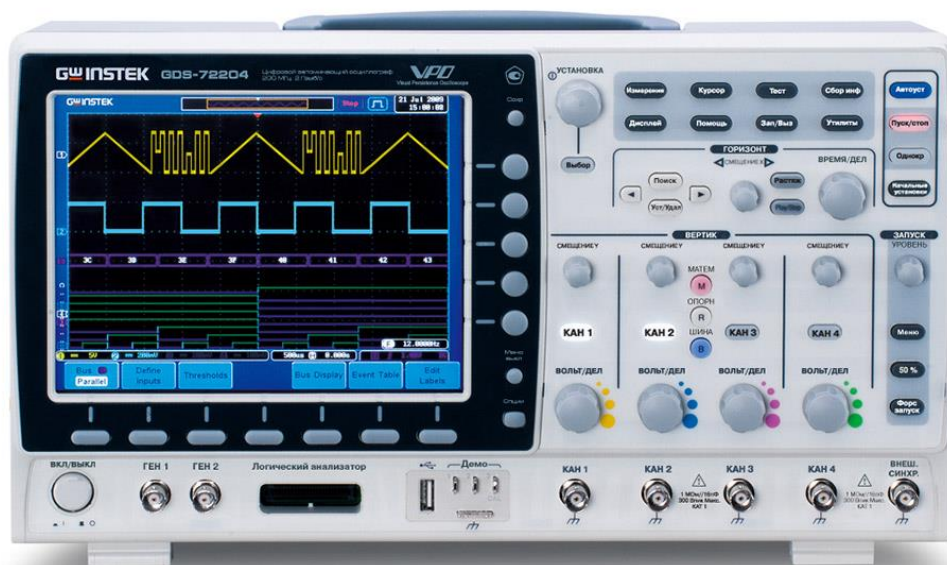


Рисунок 1.3 – Цифровой осциллограф

Цифровые измерения временных параметров радиосигналов. Цифровые измерения временных параметров радиосигналов, такие как частота периодических сигналов, интервалы времени и разности фаз между колебаниями одинаковой частоты, считаются одними из наиболее важных радиотехнических измерений. Частота сигналов является одной из наиболее точно измеряемых физических величин, и эталонные частоты обладают высокой точностью измерений в метрологической практике.

Большинство существующих методов измерения частоты и разности фаз периодических сигналов, как гармонических, так и импульсных, являются аналоговыми. Однако на протяжении последних 50 лет в технике измерений доминирует цифровой метод дискретного счета.

Метод дискретного счета основан на заполнении известного интервала времени T_0 импульсами неизвестной (измеряемой) длительности T_x или неизвестного (измеряемого) временного интервала импульсами известной длительности и счете числа заполняющих импульсов. Таким образом, известный временной интервал заполняется импульсами измеряемой частоты или неизвестный временной интервал - импульсами с известной частотой повторения.

Электронно-счетные частотомеры и фазометры, использующие метод дискретного счета, относят к приборам прямого преобразования, выполняющим счет числа идентичных событий за интервал времени измерения, и представляют модификацию метода сравнения.

Цифровые частотомеры – это многофункциональные измерительные приборы с автоматическим измерением частоты, периода, длительности импульсов, временных интервалов и отношения двух частот. Они имеют широкий диапазон измеряемых частот (от нескольких герц до сотен мегагерц) и позволяют получить результат измерения с высокой точностью (относительная погрешность измерения частоты составляет $10^{-6} \dots 10^{-9}$).

Основные различия между цифровыми и аналоговыми частотомерами касаются принципа работы и способа отображения результатов. Цифровые частотомеры измеряют частоту путем подсчета числа периодов за определенный интервал времени и вычисления частоты на основе этого счета с использованием цифровых схем и алгоритмов обработки данных. В то время как аналоговые частотомеры работают на основе аналоговых методов измерения, таких как использование аналоговых фильтров и схем сравнения частот.

Цифровые частотомеры обычно обладают более высокой точностью и разрешением измерения благодаря способности обрабатывать данные с высокой степенью точности. В отличие от этого, аналоговые частотомеры могут иметь меньшую точность из-за ограничений аналоговых компонентов и схем. Результаты измерений на цифровых частотомерах обычно отображаются цифровыми значениями на ЖК-дисплее или другом цифровом дисплее.

В общем, цифровые частотомеры предпочтительны благодаря своей высокой точности, удобству использования и дополнительным функциям.



Рисунок 1.4 – Цифровые частотомеры

Цифровые фазометры. Фазометр дискретного счета. Фазометры – это измерители сдвига фаз двух колебаний одинаковой частоты. Эти приборы могут иметь различные функции и возможности, включая измерение угла фазы между сигналами, а также измерение частоты и амплитуды сигналов. Цифровые фазометры представляют собой более современные версии классических аналоговых фазометров и обычно обладают улучшенной точностью и функциональностью. Они также могут иметь возможности записи данных, анализа и вывода результатов на цифровые дисплеи или компьютеры для дальнейшей обработки.



Рисунок 1.5 – Цифровой фазометр

Цифровые анализаторы спектров. Цифровой анализатор спектра (ЦАС) – это прибор, используемый для анализа спектра сигнала в широком диапазоне

частот. Он преобразует входной сигнал из временной области в частотную область, отображая амплитуду сигнала в зависимости от его частоты.

В отличие от аналоговых анализаторов спектра, измеряющих только амплитуды гармоник входного сигнала, с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ), точнее, алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), можно получать спектры самых сложных радиосигналов. Перед выполнением цифрового спектрального анализа исследуемые сигналы дискретизируются по времени и квантуются по уровням в быстродействующих АЦП. При этом частота дискретизации $f_d = 1/\Delta t$ должна не просто вдвое, но значительно превышать максимальную частоту в спектре исследуемого сигнала, чтобы избежать наложения спектров выборок. Таким образом, алгоритм работы цифровых анализаторов спектра включает в себя две основные процедуры: сначала анализатор собирает выборку во временной области, а затем с помощью алгоритма БПФ переводит ее в частотную область. Так как достижимая частота дискретизации ограничивает полосу рабочих частот, частотные диапазоны анализаторов спектра разделяют на участки, где анализ производится поочередно, а их результаты сводятся в одну спектрограмму [3].

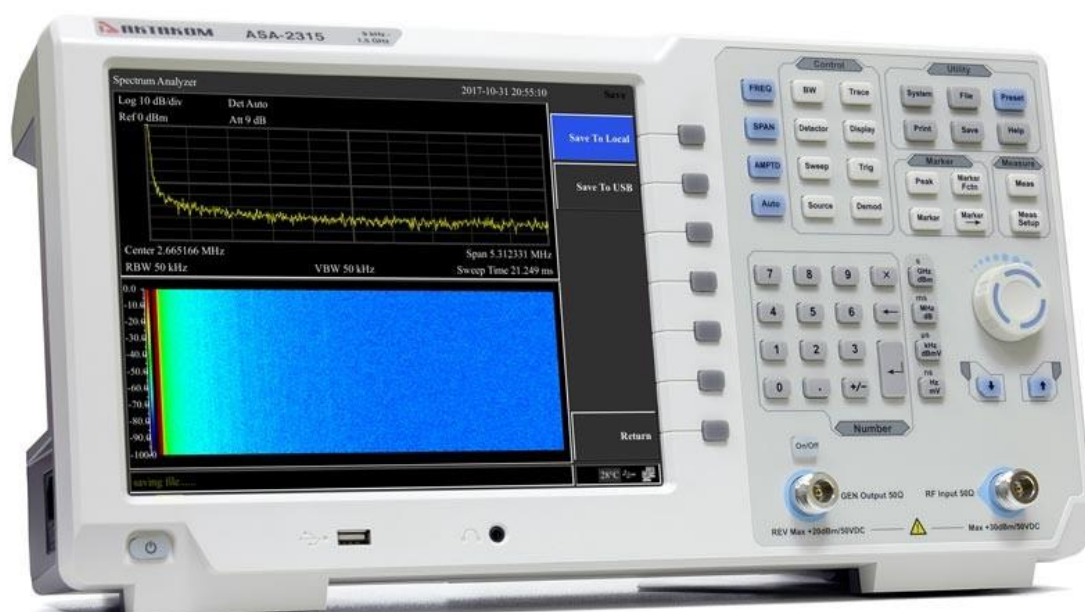


Рисунок 1.6 – Цифровой анализатор спектра

Радиочастотные измерения направлены на анализ радиочастотных каналов, а также систем беспроводной связи. Радиочастотные системы передачи охватывают все средства связи, использующие радиоволны в качестве среды передачи, включая радиорелейные и спутниковые системы. В радиорелейных системах передачи очень важна оценка параметра затухания из-за отражения от земли. В отличие от этого, задержка распространения сигнала является критически важным фактором для спутниковых систем. На рисунке 1.7

представлена схема цифровой первичной сети, использующей радиочастотные средства.

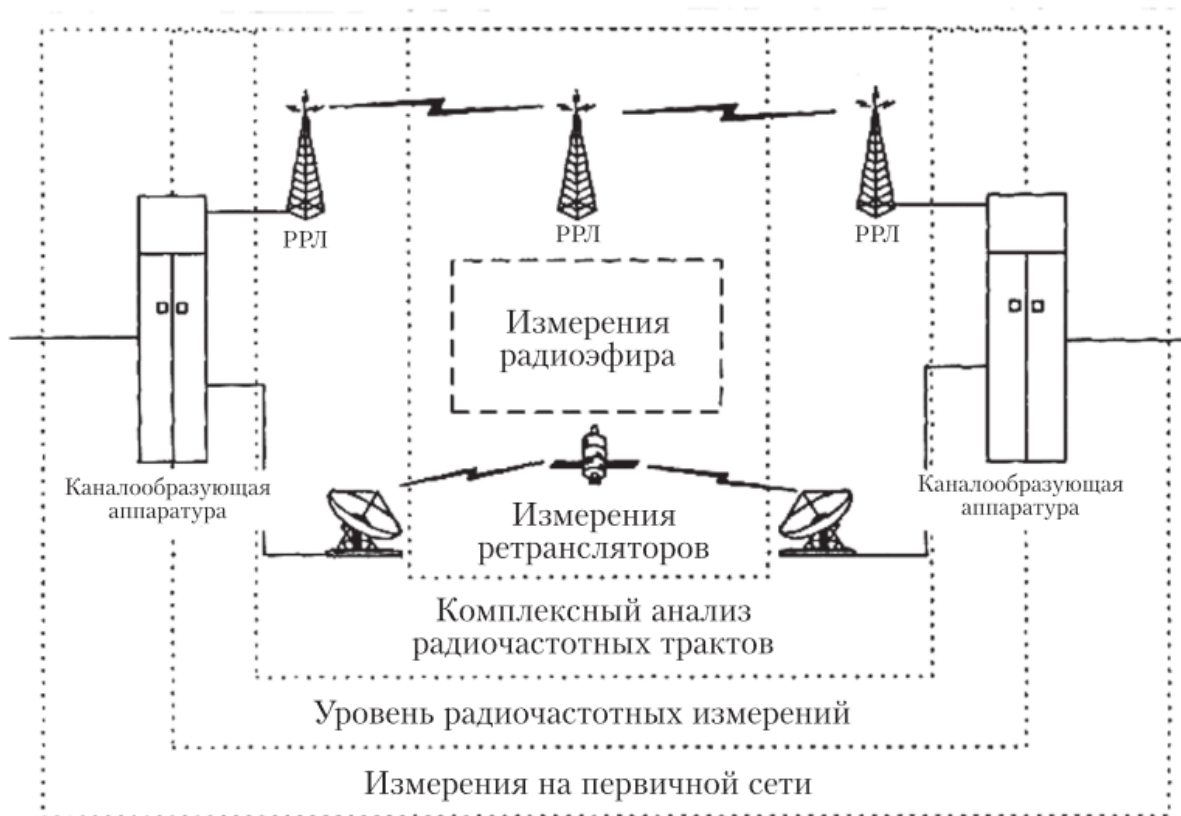


Рисунок 1.7 – Организация радиочастотных измерений на первичной сети

На схеме радиочастотные измерения являются неотъемлемой частью общих измерений на первичной сети. Эти измерения включают в себя оборудование и различные методы, используемые для оценки каналобразующих систем. Кроме того, радиочастотные измерения включают в себя анализ электромагнитной обстановки во всем спектре, используемом системой передачи.

Радиочастотные системы передачи зависят от использования ретрансляторов. В системах спутниковой связи для этого используется спутниковый ретранслятор, а в системах радиорелейной передачи - ретранслятор радиорелейной линии.

Ключевым параметром, измеряемым в этой области, является напряженность электромагнитного поля. Эти измерения необходимы для изучения распространения радиоволн по различным трассам, определения параметров и характеристик антенно-фидерных устройств и рассеивающих объектов, определения зоны обслуживания радиорелейных и спутниковых систем связи, оценки технических средств с точки зрения электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. [4].

1.3 Реализация схемы организации измерения радиосигналов

Общая структура и принцип действия двухканального цифрового запоминающего осциллографа. В цифровом осциллографе невозможно осуществлять обработку информации в темпе ее поступления, поэтому цифровой сигнал записывается в блок запоминающего устройства, превращая цифровой осциллограф в запоминающий. Цифровые запоминающие осциллографы обычно многоканальные (как минимум двухканальные). Все цифровые осциллографы по принципу действия и структурной схеме мало различаются. Общий принцип действия цифрового осциллографа можно рассмотреть на примере двухканального цифрового запоминающего осциллографа.

На рисунке 1.8 представлена упрощенная структурная схема двухканального цифрового запоминающего осциллографа. Схема включает пять базовых систем: вертикальную развертку, горизонтальную развертку, систему запуска, систему отображения и микроконтроллер (или микропроцессор).

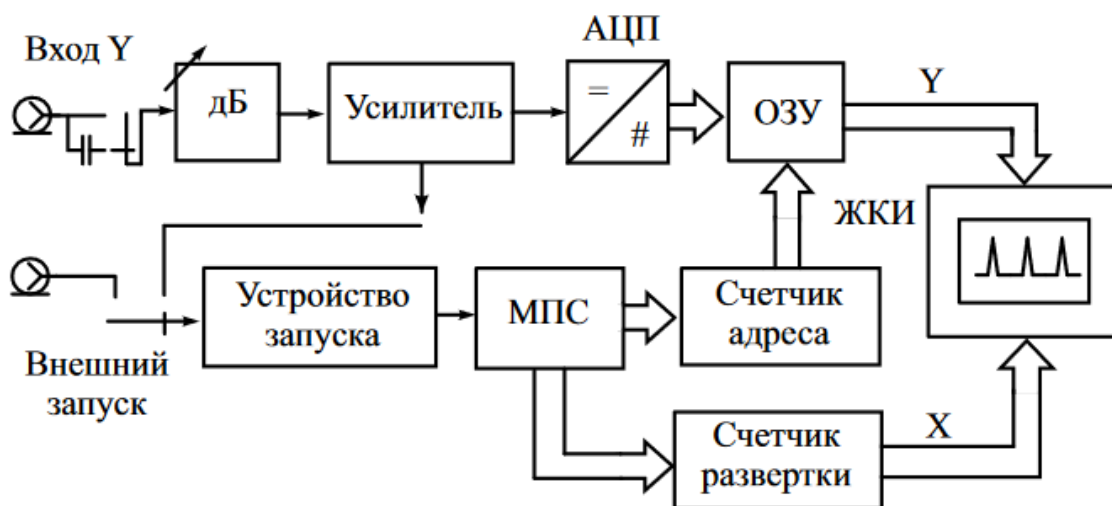


Рисунок 1.8 – Структурная схема цифрового осциллографа

В цифровом осциллографе происходит поэтапная обработка сигнала:

1. Аналоговый входной блок:
 - Регулирует амплитуду сигнала (чувствительность);
 - Обеспечивает выбор между "открытым" и "закрытым" режимами работы входа;
 - Усиливает сигнал.
2. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП):
 - Преобразует аналоговый сигнал в последовательность цифровых значений;
 - Дискретизация: Частота тактового генератора АЦП определяет моменты времени, когда происходит измерение сигнала (частота дискретизации);
 - Квантование: Разрядность АЦП определяет точность представления амплитуды сигнала (количество уровней квантования);

- Используется равномерная дискретизация: отсчеты сигнала берутся через равные промежутки времени (интервалы дискретизации), каждому из них присваивается цифровой код, соответствующий ближайшему уровню квантования.

3. Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ):

- Хранит массив цифровых данных, полученных с АЦП.

4. Формирование изображения на дисплее:

- Данные из ОЗУ последовательно извлекаются и используются для формирования изображения на дисплее;

- Счетчик адресов обеспечивает доступ к нужным ячейкам памяти;

- Счетчик развертки генерирует линейно нарастающие сигналы, имитирующие развертку луча на экране осциллографа. Эти сигналы подаются на вход канала X.

5. Дисплей:

- В современных цифровых осциллографах чаще всего используются матричные дисплеи (монохромные или цветные);

- Традиционные электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) заменены жидкокристаллическими панелями.

6. Устройство запуска:

- Определяет момент начала формирования изображения;

- Отправляет импульс синхронизации микропроцессору, когда начинается входной сигнал или сигнал внешнего запуска.

7. Параметры АЦП:

- Используются АЦП мгновенных значений невысокой разрядности (обычно 8 бит, реже 10-12 бит) для обеспечения высокой скорости работы;

- Частота дискретизации выбирается в зависимости от модели осциллографа: от 10 до 100 МГц для бюджетных моделей, до нескольких ГГц для высокоскоростных.

Цифровой осциллограф преобразует аналоговый сигнал в цифровую форму, сохраняет его, а затем отображает на дисплее в виде осциллограммы. Для достижения высокой точности и скорости используются высокопроизводительные АЦП и алгоритмы обработки данных.

Цифровые частотомеры. Микропроцессорные вычислительные частотомеры имеют расширенные функциональные возможности, повышенную точность измерения, высокий уровень автоматизации и ориентированы на использование в измерительных системах.

Упрощенная структурная схема частотомера в режиме измерения частоты представлена на рисунке 1.9.

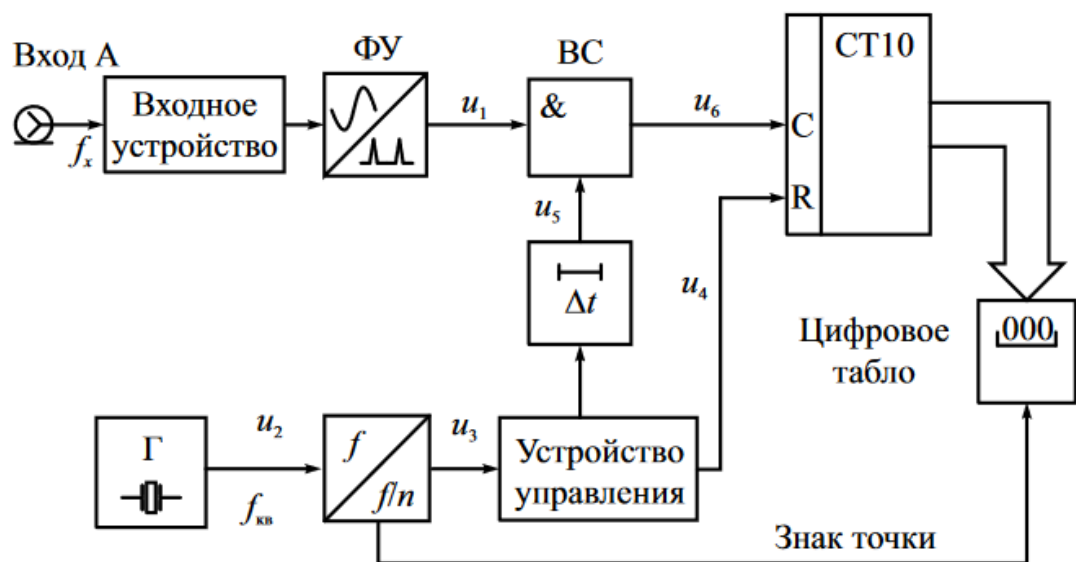


Рисунок 1.9 – Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты

Функционирование частотомера можно описать следующим образом:

1. На вход А частотомера поступает сигнал неизвестной частоты.
2. Входное устройство состоит из дискретного аттенуатора, усилителя с автоматической регулировкой уровня сигнала и переключаемого фильтра для борьбы с помехами. Оно имеет высокий входной импеданс (1 мегаом) для стандартных измерений и переключается на входной импеданс 50 Ом для радиочастотных измерений. Кроме того, в приборе предусмотрена защита от перегрузки и режим "закрытого" входа с использованием конденсатора для блокировки компонентов постоянного тока.
3. Блок формирования преобразует сигнал в короткие импульсы с помощью усилителя-лимитера, дифференцирующей схемы и импульсного диодного ограничителя. Каждый входной сигнал генерирует один импульс с частотой повторения, равной его частоте.
4. Счетные импульсы поступают на временной селектор, который выделяет импульсы в определенном временном интервале (временной затвор).
5. Селектор времени использует логическое умножение двух дискретных сигналов для определения длительности строба, что достигается делением частоты кварцевого генератора.
6. Высокостабильный кварцевый генератор вырабатывает сигнал образцовой частоты, обычно кратный 10.
7. Время измерения устанавливается путем деления частоты с помощью декадного делителя частоты.
8. Блок управления предлагает различные режимы работы, такие как периодический запуск, одиночный запуск или ручной запуск.
9. В начале измерения импульс сброса обнуляет счетчик, а прямоугольный стробирующий импульс, сдвинутый по времени через устройство задержки, запускает селектор времени.

10. Счетчик подсчитывает импульсы и отображает их количество на цифровом экране, включая десятичную точку и единицы измерения частоты (кГц, МГц) для масштабирования. Отображаемый счет, с учетом десятичной точки, непосредственно указывает на частоту в системных единицах.

Цифровое измерение фазовых. В начале электрическое напряжение передается на устройство, которое называется фазовращателем, и его работа контролируется специальным кодом с управляющего устройства. Постепенно изменяется разница между фазами до тех пор, пока не достигнется одинаковое положение фаз, известное как синфазность. Процесс настройки определяет направление изменения фазы с помощью детектора, специального для распознавания фаз. Результат этого определения передается на управляющее устройство. Управление процессом осуществляется методом кодирования импульсов. После достижения баланса входной код фазовращателя указывает на величину сдвига между фазами. Это основной принцип работы данного устройства.

Работа цифровых фазометров основана на принципе дискретного подсчета. Этот метод включает два этапа. Сначала происходит процесс преобразования сдвига фазы в показатель сигнала определенной длительности. Затем этот импульс подвергается изменению длительности с помощью дискретного подсчета. В структуре данного устройства присутствуют специальные компоненты: преобразователь для перевода сдвига фазы в импульс, селектор времени, генератор дискретных импульсов, а также счетчик и блок управления.



Рисунок 1.10 – Структурная схема цифрового фазометра

Цифровые анализаторы спектра. Реализация алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) в цифровых вычислительных анализаторах спектра повышает разрешающую способность. На рисунке 1.11 представлена структурная схема такого анализатора.

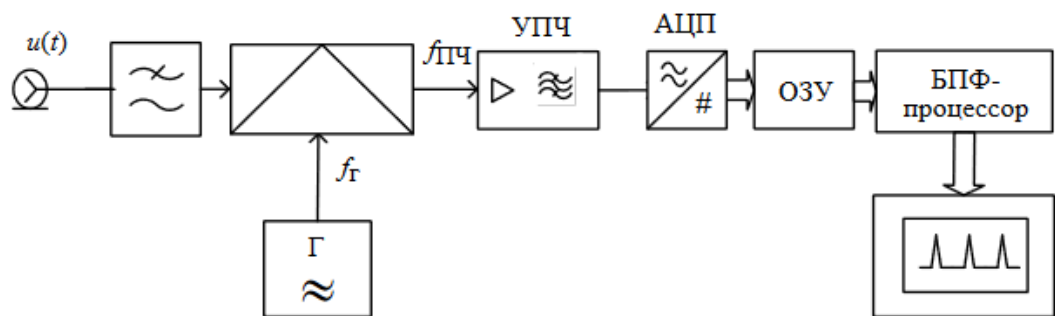


Рисунок 1.11 – Структурная схема вычислительного анализатора спектра

Борьба с помехами и анализ сигнала в цифровом осциллографе:

1. Фильтрация и преобразование частоты:

- Фильтр низких частот (ФНЧ): Ограничивает спектр входного сигнала сверху, устраняя высокочастотные помехи зеркального канала.

- Преобразователь частоты: Смещает полосу частот входного сигнала в область, где работает аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

2. Усиление и аналогово-цифровое преобразование:

- Широкополосный усилитель частоты (УПЧ): Усиливает сигнал в рабочей полосе частот АЦП.

- Аналого-цифровой преобразователь (АЦП): Преобразует аналоговый сигнал в последовательность цифровых значений.

3. Обработка цифрового сигнала:

- Быстрое преобразование Фурье (БПФ): Анализирует спектр цифрового сигнала, выделяя его составляющие по частоте.

- Полоса захвата: Часть спектра, которую анализирует БПФ в каждый момент времени.

- Оперативная память (ОЗУ): Хранит цифровые значения сигнала и результаты БПФ-преобразования.

4. Сборка и отображение спектрограммы:

- Итеративное сканирование: Анализатор последовательно перестраивается на разные полосы захвата, повторяя БПФ-анализ.

- "Сшивание" результатов: Объединение результатов БПФ-анализа для всех полос захвата.

- Спектрограмма: Отображение спектра сигнала на индикаторе, аналогичное тому, что получается в аналоговом анализаторе спектра (АС).

Преимущества:

- Высокая разрешающая способность: До единиц герц за счет использования БПФ.

- Приемлемое время анализа: За счет итеративного сканирования полос захвата.

- Широкие полосы обзора: За счет использования УПЧ с широкой полосой пропускания.

Цифровой осциллограф использует комбинацию фильтрации, преобразования частоты, усиления, аналого-цифрового преобразования, БПФ-анализа и "сшивания" результатов для борьбы с помехами и получения высокоточной спектрограммы входного сигнала.

Рассмотрим на примере цифрового анализатора СК4-71. Работа анализатора спектра цифрового основана на вычислительном принципе определения параметров сигналов. Структурная схема анализатора СК4-71 приведена на рисунке 1.12.

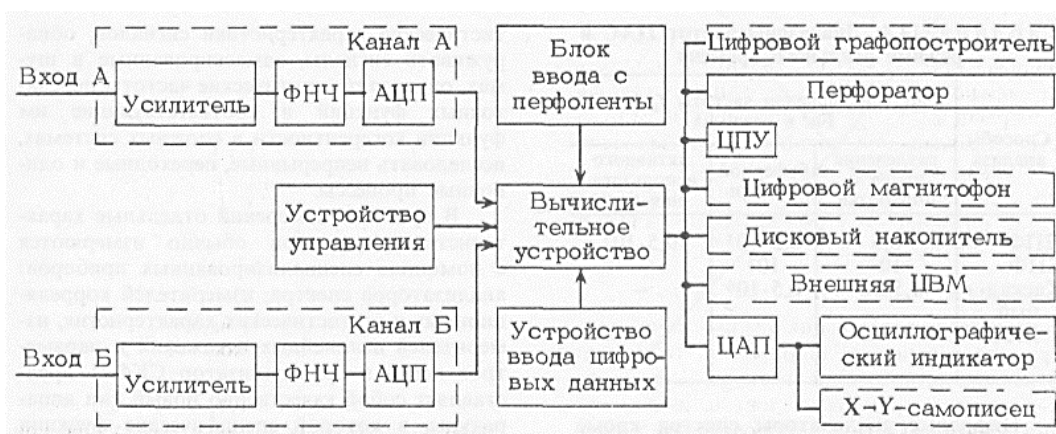


Рисунок 1.12 – Структурная схема анализатора СК4-71

Аналоговые входные сигналы, поступающие с одного (А) или двух (А, В) каналов, подвергаются усилению с регулируемым коэффициентом усиления для нормализации их амплитуды (в диапазоне от 0,125 до 8 В) для последующей обработки. Затем эти сигналы проходят через низкочастотный фильтр НЧ, определяя полосу частот для анализа; этот фильтр может быть отключен по команде оператора. Отфильтрованные сигналы поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий их в параллельный 10-битный двоичный код. Поддерживаются одноканальный и двухканальный режимы, причем в последнем случае сохраняется фазовая информация, необходимая для оценки взаимных характеристик за счет одновременного измерения значений сигналов в обоих каналах.

Кварцевый генератор задает частоту дискретизации, регулируемую оператором в диапазоне от 0,2 Гц до 100 кГц, определяя временную и частотную шкалу прибора. На протяжении всего пути сигнала от входа усилителя до выхода АЦП поддерживаются калиброванные значения усиления для всех частот и уровней напряжения. Эти данные об усилении и частоте дискретизации передаются в вычислительное устройство и учитываются при формировании окончательных результатов.

Цифровое вычислительное устройство выполняет запрограммированную последовательность, включающую различные вычислительные задачи (такие как расчет спектра, корреляционной функции и построение гистограммы), при этом устройство управления облегчает выбор необходимой подпрограммы.

Результаты выводятся на дисплей или записывающее устройство, сопровождаемые масштабными коэффициентами для перевода в физические единицы.

При анализе цифровых сигналов данные поступают в цифровое вычислительное устройство непосредственно через устройство ввода цифровых данных - либо с пульта управления в десятичном коде, либо с перфоленты [5-6].

Измерительные приемники – это независимые измерительные устройства, предназначенные для селективного измерения мощности слабых синусоидальных и шумовых сигналов. Они также выполняют функцию измерителей мощности в гетеродинных измерителях затухания. Все измерительные приемники работают по принципу супергетеродинного приемника. Измеряемый сигнал поступает на вход приемника, проходит через входной аттенюатор и фильтр нижних частот, а затем поступает на первый смеситель (См). В этот смеситель также подается первый сигнал гетеродина и сигнал калибровочного генератора.

Входной калиброванный аттенюатор, который варьируется от 0 до 50 дБ, регулирует амплитуду сигнала, чтобы обеспечить работу смесителя с минимальным изменением амплитуды, несмотря на диапазон изменений входного измеряемого сигнала. Фильтр нижних частот обеспечивает необходимое ослабление побочных каналов приема и гармоник сигнала. Используется калиброванный генератор, который может быть газоразрядным или диодным генератором шума, или генератор видеоимпульсов с известной амплитудой, длительностью и частотой. Мощность в заданном частотном диапазоне может быть определена путем расчета на основе этих известных значений. Важно отметить, что выходная мощность калибровочного генератора служит эталоном для измерений мощности, выполняемых с помощью приемника. Кроме того, входной аттенюатор, если он откалиброван, служит мерой соотношения амплитуды сигнала или ослабления

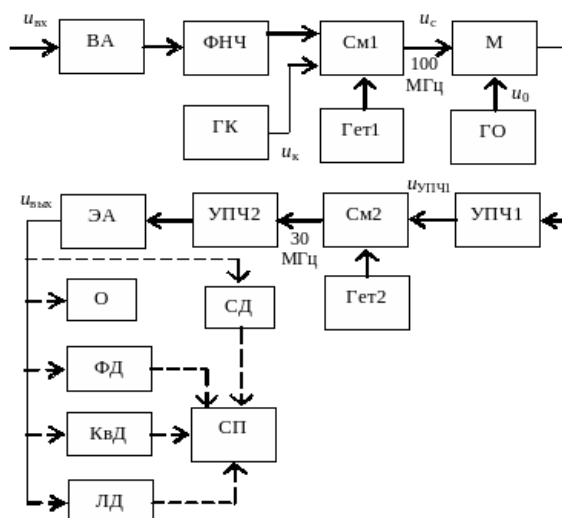


Рисунок 1.13 – Структурная схема измерительного приемника

Сигнал, принятый на частоте $\text{См}1$, преобразуется в сигнал первой промежуточной частоты, например 100 МГц, с помощью гетеродина. На этой частоте сигнал усиливается первым усилителем промежуточной частоты. Затем он преобразуется во вторую промежуточную частоту, например 30 МГц, с помощью смесителя $\text{См}2$ и гетеродина $\text{Гет}2$. Основное усиление сигнала промежуточной частоты происходит в УПЧ2. В схему усилителя УПЧ2 включен эталонный аттенюатор (ЭА), который служит основным встроенным измерителем фактического значения затухания (отношения мощности сигнала) при измерениях затухания.

С выхода УПЧ2 сигнал поступает на одно из нескольких устройств, которые преобразуют его в форму, пригодную для визуализации и записи. К таким устройствам относятся линейные детекторы, квадратичные детекторы, фазовые детекторы, осциллографы, самописцы и другие.

Для повышения чувствительности измерительных приемников при измерении мощности непрерывных сигналов используется метод модуляции. При этом методе к входу УПЧ1 подключается модулятор, вырабатывающий напряжение квадратной волны u_m на частоте 1 кГц. К этому модулятору поочередно подключается либо сигнал смесителя $\text{См}1$ с напряжением u_c , либо сигнал вспомогательного генератора шума с напряжением $u_{\text{гш}} = u_0$. Уровень сигнала генератора вспомогательного шума $u_{\text{гш}}$ регулируется таким образом, чтобы при отсутствии входного сигнала выходное напряжение u_d было равно нулю. В этой установке детектируемые радиоимпульсы с частотой модуляции 1 кГц с выхода детектора усиливаются низкочастотным усилителем, настроенным на ту же частоту модуляции. Затем усиленный сигнал детектируется синхронным детектором и через усилитель постоянного тока подается на выход [7].

1.4 Постановка задачи

Цель данной дипломной работы заключается в исследовании и анализе современных методов измерения в радиоэлектронике с учетом их применимости и эффективности. Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие задачи:

- Провести обзор и классификацию существующих методов измерения в радиоэлектронике, включая как традиционные, так и современные подходы;
- Изучить принципы работы каждого метода измерения и определить их преимущества и недостатки;
- Провести сравнительный анализ выбранных методов измерения с точки зрения их применимости к конкретным задачам радиоэлектроники;
- Разработать рекомендации по выбору наиболее подходящих методов измерения для конкретных сценариев использования в радиоэлектронике;
- На примере выполнить моделирование и расчет основных параметров.

Точное измерение радиосигналов является важнейшим аспектом радиоэлектроники, обеспечивающим надежность и производительность систем связи. Однако сложность и запутанность измерений радиосигналов создает значительные трудности для инженеров и исследователей. Отсутствие всестороннего анализа методов измерений, включая расчет ключевых параметров, внедрение схем измерений и выбор соответствующего оборудования и измерительных приборов, препятствует разработке эффективных и надежных методов измерений. Данное исследование направлено на устранение этого пробела путем тщательного изучения методов измерений в радиоэлектронике.

2 Выбор оборудования и измерительных приборов для различных методов измерения в радиоэлектронике

2.1 Осциллографы

Осциллограф – это устройство, которое позволяет наблюдать характеристики процессов в электронных схемах в графической форме. Он записывает временные параметры и амплитуду электрического сигнала, поступающего на его вход. Также осциллограф измеряет искажения, вызванные неисправностями в схеме, и определяет изменения уровня шума и другие характеристики. Полученные данные могут быть отображены на экране устройства или сохранены в записи. С помощью измерительного преобразователя осциллограф может использоваться для контроля различных природных явлений.

Существуют два основных типа осциллографов: цифровые и аналоговые. По способу регистрации времени существуют приборы реального времени и эквивалентного времени.

Цифровые и аналоговые приборы заметно различаются по способу представления сигналов на экране прибора, что проявляется прежде всего в разном уровне яркости. Аналоговые осциллографы используют развертку сигнала и взаимодействуют с динамическими физическими величинами, такими как напряжение. Цифровые осциллографы, напротив, фиксируют атрибуты сигнала с помощью дискретных двоичных чисел, представляющих собой значения напряжения, а триггерные события определяются на основе наблюдаемых процессов.

Аналоговые системы запуска, управляемые усилителями, могут вносить линейные и нелинейные искажения, такие как задержка и амплитудные флуктуации, что приводит к смещению положения триггера или заметному дрожанию триггера на экране. В отличие от них, цифровые триггерные системы работают с большей точностью и минимальными искажениями за счет непосредственной обработки данных АЦП.

Отличительные атрибуты цифровых приборов включают в себя:

1. Эквивалентная функциональность в режиме реального времени с широкой полосой пропускания, превышающей 70 ГГц;
2. Прямой захват оптических сигналов с помощью специализированных модулей;
3. Низкий уровень шума, обычно менее 200 пс;
4. Постоянная, повторяющаяся работа, позволяющая наблюдать характеристики сигнала.

Информация с цифровых устройств обычно представляется на экране в текстовом формате, что обеспечивает более точное отображение, чем графики аналоговых осциллографов. Обработка сигнала преимущественно основана на методе Фурье, а данные часто хранятся в памяти компьютера и доступны для

печати. Разновидности цифровых осциллографов включают в себя запоминающие, люминофорные и стробоскопические типы.

Разновидности цифровых осциллографов.

Цифровые осциллографы привлекают своей точностью и широким набором функций, в отличие от аналоговых аналогов. В основе этих приборов лежит аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который преобразует измеряемый сигнал в цифровой формат. Оцифрованные данные сохраняются в памяти прибора, что облегчает их последующий анализ и вывод на экран.

Функциональность цифровых осциллографов включает в себя несколько ключевых аспектов:

- Обработка сигналов с входных каналов;
- Представление результатов исследования на экране;
- Хранение записей процесса для удобного масштабирования и расширения;
- Временная регистрация событий для справки;
- Выполнение различных математических операций, включая вычисление средних значений, измерение амплитуд, периодов, времени нарастания/спада импульсов и др.



Рисунок 2.1 – Осциллограф (RIGOL DS1102D)

Варианты осциллографов:

- Традиционные цифровые запоминающие осциллографы (DSO) отличаются длительным периодом хранения данных и расширенными возможностями по скорости поиска информации, что приводит к замедленному воспроизведению событий в сигнале. В эту категорию входят как карманные, так и стационарные модели;

- Фосфорные цифровые приборы (DPO) воспроизводят колебания сигнала и отображают на экране подробные модулированные характеристики сигнала, подобно аналоговым аналогам. Эти приборы анализируют и сохраняют сигналы для последующего изучения;

- Стробоскопические цифровые приборы работают за счет использования последовательного стробирования сигнала, позволяющего выбирать мгновенные значения в определенных точках. Известные своей широкой полосой пропускания, они отлично справляются с анализом коротких периодических сигналов;

- Портативные осциллографы отличаются компактными размерами, легкой конструкцией и низким энергопотреблением. Широко используются в научных исследованиях и для выявления неисправностей в транспортных средствах и оборудовании.



Рисунок 2.2 – Портативный осциллограф JINHAN JDS2012A со встроенным мультиметром

Критерии выбора осциллографа.

Основное требование при выборе - это рабочие характеристики, которые соответствуют потребностям пользователя.

Полоса пропускания.

Этот параметр определяет диапазон сигналов, отображаемых на экране, и характеризуется скоростью нарастания фронта анализируемого сигнала. У цифровых моделей имеется широкая полоса пропускания, позволяющая работать с высокими гармониками, частота которых превышает основную частоту. Преимущество цифрового осциллографа заключается в возможности расширения полосы пропускания для выполнения конкретной задачи.

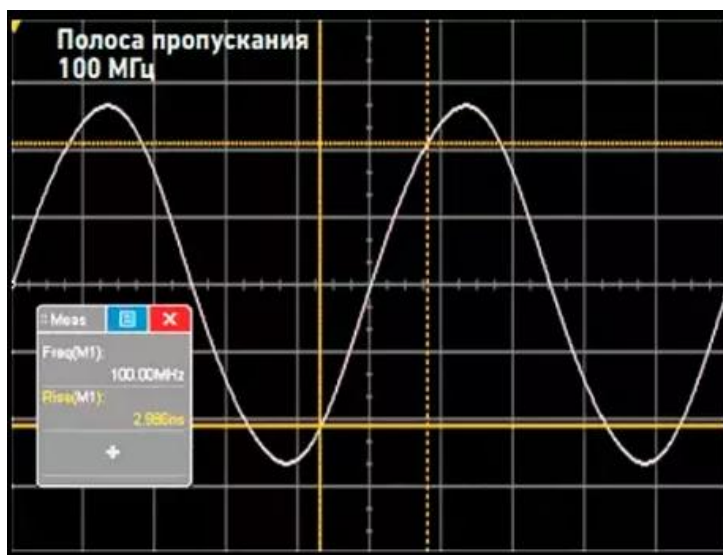


Рисунок 2.3 – Тактовая полоса пропускания (100 МГц)

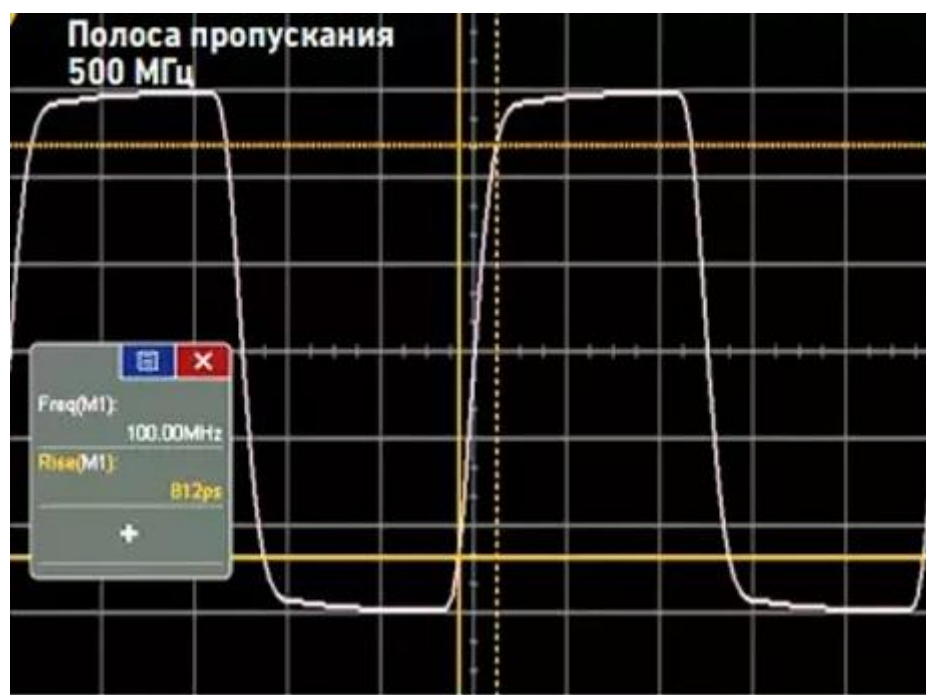


Рисунок 2.4 – Тактовая полоса пропускания (500 МГц)

Чтобы определить подходящую полосу пропускания, нужно применить "правило пяти раз", основанное на максимальной частоте наблюдаемого сигнала. Несоблюдение требуемой полосы пропускания создает риск пропуска компонентов сигнала, что может привести к амплитудным искажениям и размытым краям. Недостаточная полоса пропускания может привести к неполным осциллограммам и повышенным погрешностям.

Например, модели с полосой пропускания более 500 МГц необходимы для тщательного анализа сложных цифровых сигналов на высоких скоростях и сигналов последовательных шин. И наоборот, приборы с меньшей полосой

пропускания подойдут начинающим радиолюбителям, которые ищут экономичные решения без дополнительных функций.

В заключение следует отметить, что расширение полосы пропускания уменьшает ошибки наблюдения и позволяет фиксировать отдельные события по мере их развития.

Количество каналов.

Аналоговые входные каналы принимают сигналы и преобразуют их в цифровой формат. Приборы, оснащенные встроенным логическим анализатором, могут проанализировать аналоговые и цифровые каналы одновременно в многочисленных точках тестирования, упрощая декодирование многоразрядных параллельных шин.

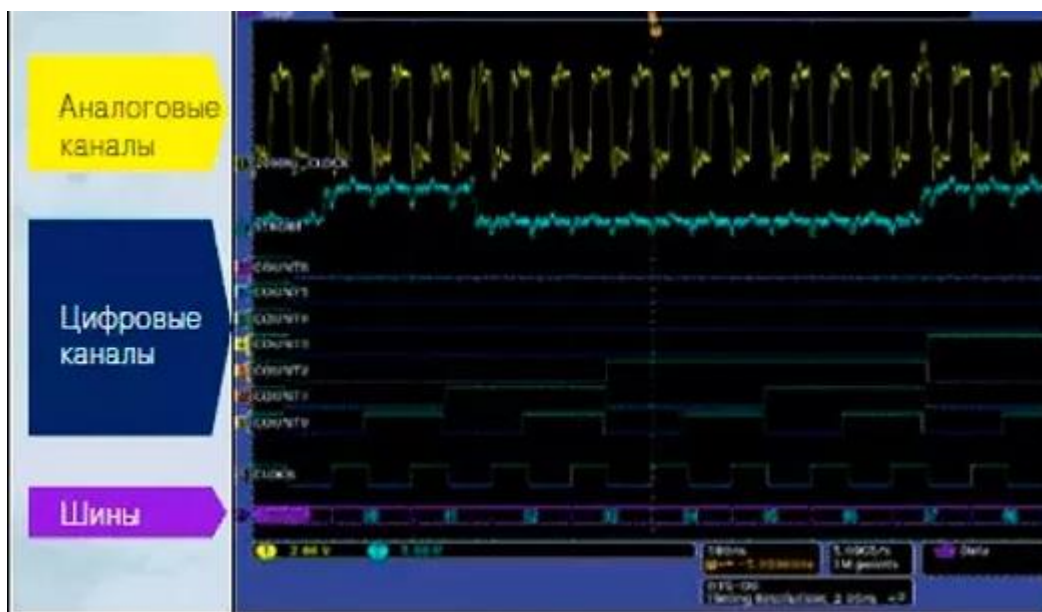


Рисунок 2.5 – Вилы каналов

Тем не менее, избыток каналов не всегда означает превосходные диагностические возможности. Для каких задач лучше всего подходит определенное количество каналов:

1. Для оценки и сопоставления временных характеристик сигналов, поступающих от аналоговых устройств, достаточно двух или четырех каналов;
2. При отладке цифровой системы 8 или 16 каналов оказываются бесценными для параллельного извлечения данных;
3. Высокочастотные измерения требуют дополнительных каналов, особенно в multifunctional устройствах с радиочастотными входами;
4. Каналы с гальванической развязкой предпочтительны для задач, требующих изоляции от электрических токов;
5. Для синхронизированной по времени регистрации и одновременного анализа сигналов необходимо не менее двадцати каналов.

Поэтому каналы должны обладать оптимальным частотным диапазоном, линейностью, точностью усиления, равномерной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и устойчивостью к электростатическому разряду.

Частота дискретизации.

Частота выборки данных во времени, называемая частотой дискретизации, определяет способность прибора улавливать и отображать тончайшие нюансы анализируемого сигнала.

При выборе частоты дискретизации осциллографа рекомендуется придерживаться "правила пяти раз", чтобы частота прибора в пять раз превышала самую высокочастотную составляющую исследуемого сигнала. Кроме того, это значение должно как минимум в 2,5-3 раза превышать ширину полосы пропускания аналогового сигнала. Для приборов начального уровня рекомендуется частота дискретизации от 1 до 2 гигаэмплов в секунду, а для устройств эконом-сегмента достаточно от 5 до 10 гигаэмплов в секунду.

Более высокая частота дискретизации улучшает визуализацию сигнала и способствует сохранению информации. Кроме того, повышенная частота дискретизации увеличивает разрешение, позволяя с высокой точностью обнаруживать одновременные события, такие как неперiodические сбои.

Глубина памяти.

Частота дискретизации имеет прямое влияние на количество информации, которое может быть запомнено. Расчет объема памяти осуществляется путем умножения времени, отображаемого на экране, на требуемую частоту дискретизации. Например, при декодировании сигнала шины USB, регистрация пакетов происходит в течение 200 микросекунд и требует, чтобы длина записи составляла 1 миллион точек.

Рекомендация по выбору: после определения объема памяти осциллографа необходимо проверить его эффективность. Оцените скорость реагирования прибора при заданном объеме памяти.

Скорость обновления осциллограмм.

Этот параметр отражает скорость, с которой изображения обновляются на экране. Быстрое обновление обеспечивает более точный захват и регистрацию редких событий, таких как выбросы. Более высокая скорость обновления означает более оперативную работу прибора и более точную фиксацию событий.

При выборе прибора рекомендуется обращать внимание на указанную производителем максимальную скорость обновления. Однако стоит помнить, что для достижения этого максимального значения могут потребоваться дополнительные режимы захвата, которые могут ограничить другие параметры, такие как глубина памяти, частота дискретизации и качество отображения сигналов. Скорость обновления – это параметр, который повышает удобство использования прибора и позволяет более точно регистрировать события.

Триггер.

Схема синхронизации обеспечивает стабильность изображения, позволяя прибору синхронизировать развертку сигнала с определенным событием, тем самым обеспечивая одновременное отображение отдельных событий. Эта

функция особенно полезна для эффективного захвата синхронизированных снимков.

Осциллограф может работать с сигналами в которых часто оснащаются несколькими последовательными интерфейсами. Эти интерфейсы облегчают декодирование протоколов последовательных шин и позволяют запускать триггеры по разным интерфейсам. Количество интерфейсов напрямую влияет на доступный функционал и возможности устройства.

Обилие интерфейсов имеет решающее значение для таких задач, как передача данных в Интернет или на компьютерную программу просмотра, а также для обмена проанализированными данными между членами исследовательской группы.

Кроме того, осциллографы обычно поставляются в комплекте с прикладным программным обеспечением, включающим статические и математические функции, в том числе быстрое преобразование Фурье, что помогает выявить нарушения целостности сигнала. Для полного раскрытия возможностей прибора необходимо использовать соответствующее программное обеспечение.

Разрешение экрана.

Разрешение экрана - важнейший параметр, определяющий количество пикселей на дисплее и напрямую влияющий на точность и четкость отображаемой информации. Повышенное разрешение означает более мелкие детали, различимые в изображении сигнала.

Для оптимальной обработки сигналов рекомендуется использовать приборы с разрешением экрана не менее 800x480 пикселей. Однако слишком высокое разрешение может привести к увеличению времени отклика экрана и снижению производительности. Поэтому очень важно найти баланс между разрешением.

Многие современные осциллографы оснащены функцией автономной настройки, которая обеспечивает быструю и простую настройку прибора на необходимые параметры. Например, данная функция может автоматически подобрать диапазон измерения и масштаб времени, что значительно упрощает процесс работы.

Рекомендация при выборе: Функция автономной настройки значительно повышает эффективность работы с осциллографом и улучшает точность измерений. Тем не менее, осциллограф может выдавать ошибки, что подчеркивает важность проверки точности полученных данных.

Для работы осциллографа необходим либо пассивный пробник, либо пробник, оснащенный делителем сигнала. Согласование пробника включает соответствие его полосы пропускания и характеристик прибора.

При выборе нужно учитывать параметры измеряемого сигнала: напряжение, ток, частота, амплитуда, сопротивление [8].

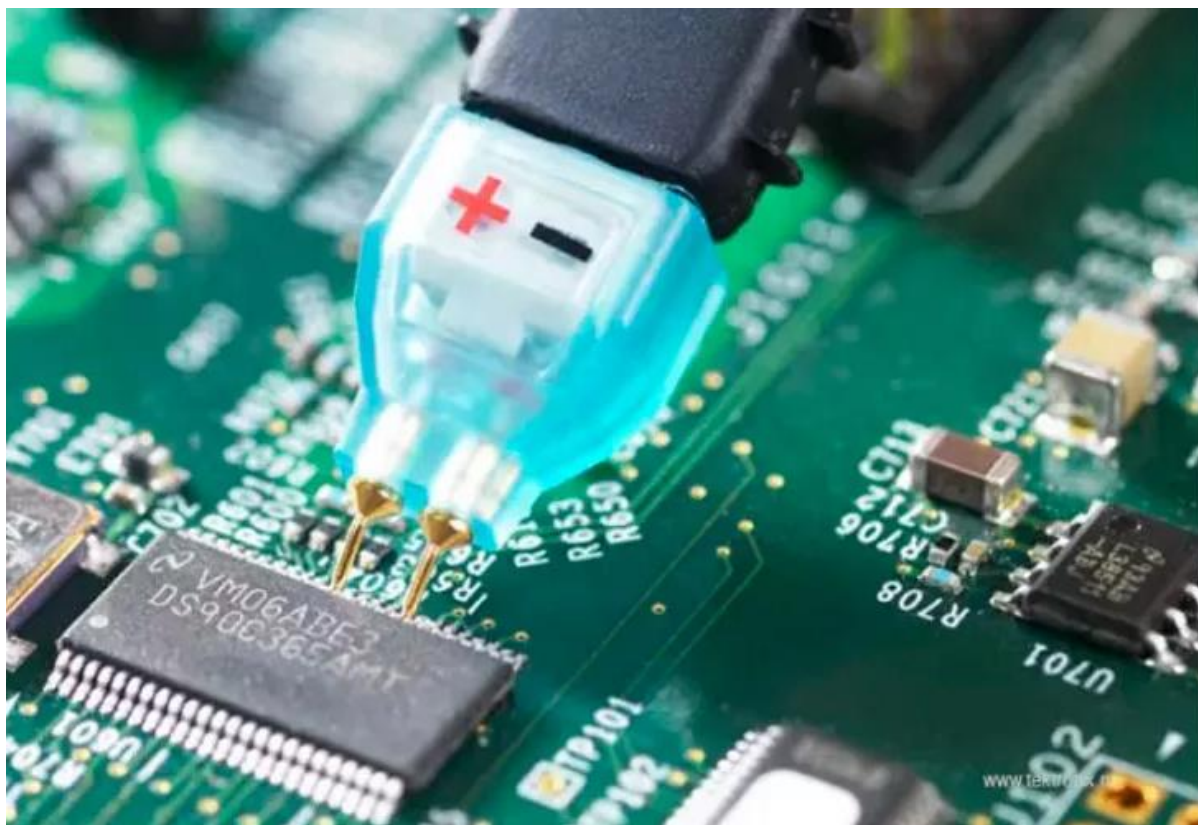


Рисунок 2.6 – Специальный пробник для отображения тока, мощности и напряжения

2.2 Частотомеры и фазометры

Цифровой частотомер. Он может измерять частоту сигналов различных типов, включая постоянные, переменные и импульсные сигналы. Цифровые частотомеры обычно имеют широкий диапазон измерения и высокую точность. Они могут быть использованы для измерения частоты радиосигналов, таких как сигналы радиостанций, сигналы GPS, сигналы синхронизации и другие.

Цифровые фазометры обычно используются для измерения фазы между двумя сигналами или для измерения фазового сдвига сигнала относительно опорного сигнала. Они могут быть использованы в приложениях, таких как синхронизация систем связи, измерение времени, фазовая модуляция и другие.

Цифровые частотомеры и фазометры обычно оснащены цифровыми дисплеями, которые показывают измеряемые значения. Они также могут иметь функции автоматического измерения, хранения данных и анализа сигналов. Некоторые приборы могут иметь возможность измерения нескольких параметров одновременно, таких как частота, фаза и амплитуда.

В зависимости от конкретных требований и приложений, существует множество различных моделей цифровых частотомеров и фазометров. Они могут различаться по диапазону измерения, точности, скорости измерения и другим характеристикам. При выборе цифрового частотомера или фазометра

важно учитывать требования вашего конкретного приложения и обратить внимание на соответствующие технические характеристики прибора.

Вот несколько примеров цифровых частотомеров и фазометров, а также основные критерии, которые могут быть использованы при выборе прибора:

1. Agilent 53230A: Это высокоточный цифровой частотомер с широким диапазоном измерения (до 350 МГц) и высокой скоростью измерения. Он также имеет функции измерения периода и времени задержки. При выборе этого прибора можно обратить внимание на его точность, диапазон измерения и возможности анализа сигналов.

2. Tektronix FCA3000: Это цифровой фазометр с высокой точностью и широким диапазоном измерения фазы. Он также имеет функции измерения времени задержки и анализа сигналов. При выборе этого прибора можно обратить внимание на его точность, диапазон измерения фазы и возможности анализа сигналов.

3. Keysight 53200 Series: Это серия цифровых частотомеров и фазометров, которые предлагают широкий диапазон измерения, высокую точность и различные функции анализа сигналов. При выборе прибора из этой серии можно обратить внимание на требования вашего конкретного приложения, такие как диапазон измерения, точность и функциональность.



Рисунок 2.7 – Цифровой частотомер Agilent 53220A

2.3 Цифровой анализатор спектра

Цифровой анализатор спектра – это устройство, позволяющее визуализировать, измерять и анализировать информацию в спектральной области. Он дает спектральное изображение анализируемых данных, позволяя оценить амплитуду сигнала на различных частотах в заданном диапазоне и выявить ярко выраженные гармоники. Данный инструмент незаменим, так как широко используется для решения различных задач.

Классы цифровых анализаторов. Устройства можно разделить на 2 типа Это последовательные и параллельные. Количество блоков является отличительной частью данных устройств. Данные блоки обрабатывают входной сигнал.

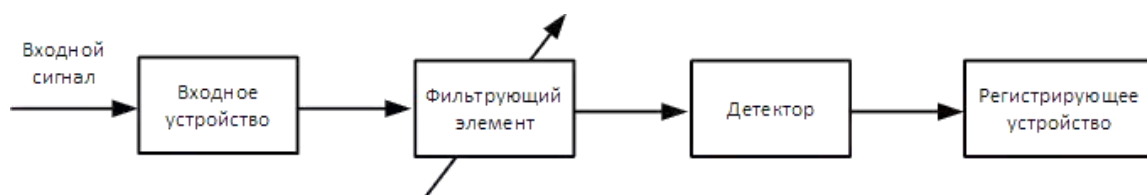


Рисунок 2.8 – Схема обрабатывающих блоков последовательного типа.

Спектральные анализаторы последовательного типа базируются на автоматически перестраиваемых супергетеродинах, что позволяет им преобразовывать входящий сигнал в фиксированный промежуточный сигнал, который затем усиливается. Они осуществляют пошаговое по частоте сканирование и последующую цифровую обработку данных, выделяя и анализируя отдельные компоненты поочередно. Эти приборы, хотя и просты в устройстве, менее эффективны, но хорошо подходят для изучения периодических импульсов благодаря широкому рабочему диапазону.

Спектральные анализаторы параллельного типа работают путем генерации эквивалента входного сигнала и анализа его спектра с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Они имеют набор настроенных резонаторов и отличаются оперативностью и эффективностью, способны анализировать импульсные и одиночные сигналы. Однако такие приборы более сложны с технической точки зрения и могут работать только с низкочастотной информацией.

Классификация спектроанализаторов может быть проведена на основе рабочего диапазона, который определяет диапазон частот, используемых в устройстве:

- Широкополосные спектроанализаторы позволяют анализировать данные в широком диапазоне, начиная от низких килогерц и до высоких гигагерц. Эта характеристика делает их универсальными и пригодными для решения различных задач.

- Оптические спектроанализаторы предназначены для анализа данных, передаваемых по оптоволоконным линиям связи, а также для других специализированных задач в оптическом диапазоне.

- Низкочастотные спектроанализаторы используются для исследования данных в звуковом и радиочастотном диапазонах.

Спектроанализаторы могут быть разделены на два типа в соответствии с характером анализа: скалярные и векторные. Скалярные спектроанализаторы предоставляют информацию только о амплитудах гармонических компонентов спектра. Векторные спектроанализаторы предоставляют соотношения фазы компонентов.

Оборудование делится на две категории: портативное и стационарное. Портативные устройства оснащены встроенными аккумуляторными батареями, что позволяет оператору работать независимо от электрической сети и перемещаться без привязки к конкретному месту. Такие устройства находят широкое применение при выполнении измерений на местах, в труднодоступных местах и в других особых ситуациях. Доступные по цене портативные спектроанализаторы часто привлекают любителей и тех, кто впервые решает приобрести такое оборудование.

Стационарные приборы, с другой стороны, нужны для выполнения интенсивных профессиональных задач. Они поддерживают долгосрочные исследования, обычно обладают расширенными возможностями и обеспечивают повышенную точность измерений.

Основные характеристики.

Характеристики спектроанализатора включают следующие аспекты:

- Диапазон частот. Этот параметр определяет диапазон частот, на котором производится анализ информации. Каждый диапазон может быть разделен на поддиапазоны;

- Уровень собственных шумов. Это значение определяет минимальный уровень сигнала, который прибор может отличить от фонового шума;

- Разрешение. Этот показатель указывает на минимальное расстояние между соседними спектральными компонентами, которые могут быть выделены и измерены с высокой точностью;

- Время анализа. Этот параметр определяет время, необходимое для выполнения анализа в определенном диапазоне частот. Фактическая скорость зависит от нескольких факторов, включая ширину полосы разрешения, скорость перестройки гетеродина и время обработки данных;

- Погрешность по частоте. Это значение отражает точность определения частоты спектральных компонент;

- Погрешность по амплитуде. Этот параметр определяет точность измерения амплитуды спектральных компонент;

- Фазовый шум. Это значение отражает частотную стабильность гетеродина;

- Динамический диапазон. Этот показатель отражает способность прибора обрабатывать сигналы различной амплитуды;

- Интермодуляционные искажения относятся к дополнительным спектральным компонентам, которые создаются нелинейными характеристиками;

- Уровень паразитных спектральных компонент. Это значение отражает уровень искажений на выходе прибора из-за паразитных компонент;

- Единая полоса анализа – это диапазон, в котором исследуются и обрабатываются спектральные компоненты.



Рисунок 2.9 – Анализаторы спектра разных версий и моделей

Прибор RIGOL DSA815-TG, оснащён встроенным генератором слежения, что расширяет его возможности для работы в качестве анализатора спектра скалярного типа. Эта функция позволяет анализировать АЧХ различных устройств, таких как фильтры, микросхемы, адаптеры, разъемы и т. д., подавая тестовый сигнал через разъем следящего генератора.

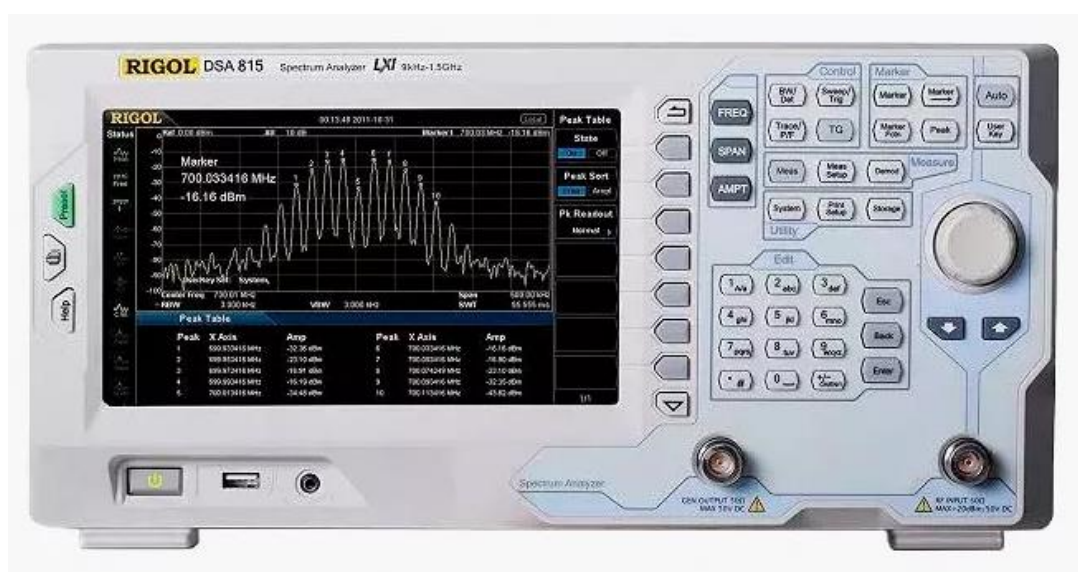


Рисунок 2.10 – Цифровой анализатор спектра DSA815-TG.

Это легкий портативный спектроанализатор, идеальный как для новичков, так и для профессионалов, с удобной клавиатурой и жидкокристаллическим дисплеем. Он работает на прямом преобразовании частоты и охватывает диапазон 9 кГц – 1,5 ГГц. Благодаря встроенному предусилителю этот анализатор спектра обладает исключительной чувствительностью, позволяющей точно обрабатывать низкочастотные импульсы. Имея полосу обзора от 100 Гц до 1,5 ГГц, он обеспечивает точное разделение близко расположенных сигналов и

обнаружение помех высокой плотности. С погрешностью амплитуды менее $\pm 0,4$ дБ и интуитивным интерфейсом, он обеспечивает удобное использование. Измерения упрощают процесс настройки и анализа, предлагая такие функции, как запись минимальных, средних и максимальных значений для дополнительного удобства. Его информативный экран диагональю 8 дюймов детально отображает спектрограмму.

Еще одной примечательной особенностью является включение следящего генератора, позволяющего оценить работу пассивных элементов. Очень важно, что Ultra Spectrum программное обеспечение широко расширяет возможности прибора по анализу и обработке данных, бесперебойно функционируя. Наряду с обычными измерениями имеются и расширенные функции, такие как измерение мощности канала, спектральной плотности мощности и другие. Основные функции включают установку маркеров, автоматическое масштабирование, выбор диапазонов, коррекцию АЧХ, а также различные режимы детектирования и настройки времени сканирования. Прибор позволяет сохранять данные как во встроенной памяти, так и на внешнем USB-носителе, и обеспечивает быстрое включение сохраненных установок. Также доступен тест на годность с аудиооповещением. Этот спектроанализатор способен отображать до четырех кривых одновременно, каждая из которых обозначается своим цветом.

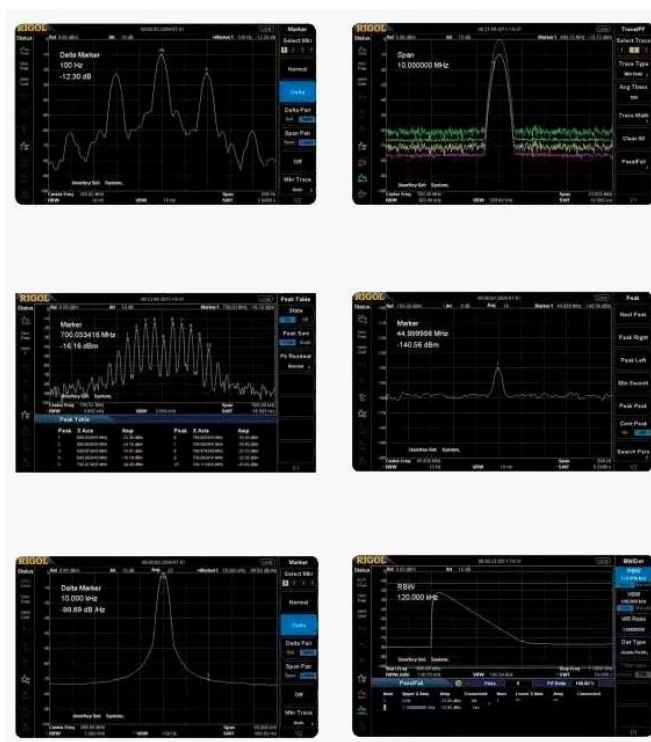


Рисунок 2.11 – Экраны RIGOL DSA815-TG

RIGOL DSA 710 принадлежит к среднему ценовому сегменту и представляет собой спектроанализатор, специализирующийся в основном на настройке радиоэлектронных устройств любителей, создании IoT-устройств,

исследовании низкочастотного оборудования и использовании в образовательных целях.

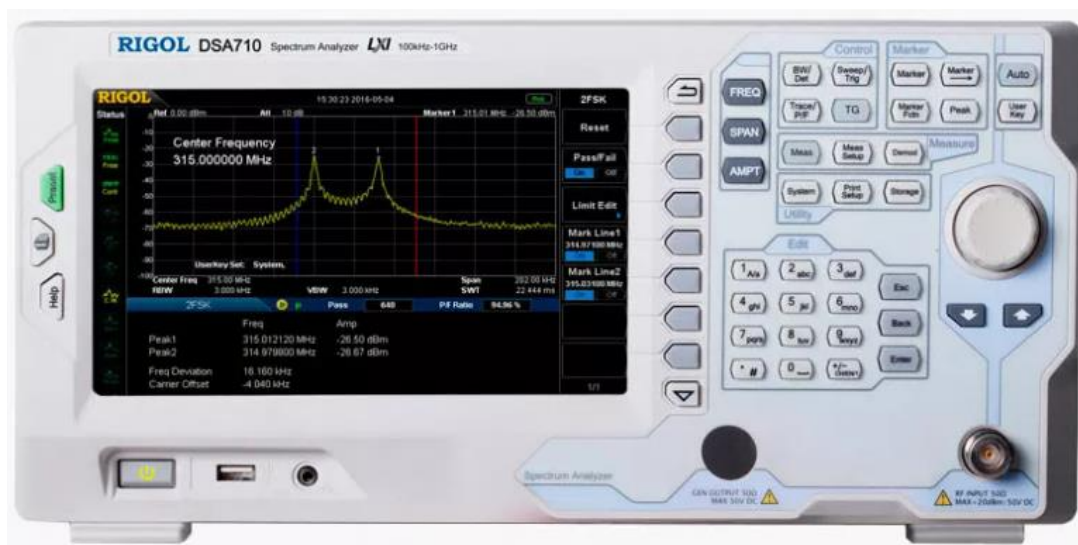


Рисунок 2.12 – Анализатор спектра DSA710

Преимущества спектроанализатора включают:

- Повышенная скорость измерений достигается за счет применения технологии цифрового ПЧ, повышающей точность и избирательность полосы пропускания. Этот эффективный механизм фильтрации не только сокращает продолжительность сканирования, но и повышает скорость измерений;
- Исключительно низкий уровень шума, достигающий -130 дБ, облегчает обнаружение и анализ слабых сигналов, таких как гармоники и источники помех, тем самым упрощая процесс поиска и устранения неисправностей;
- Минимальная полоса пропускания (RBW) до 100 Гц, что позволяет обнаруживать слабые сигналы без ущерба для разрешения;
- Минимальная погрешность до 1,5 дБ обеспечивает высокую точность измерений;
- Оснащен стандартным предусилителем, оптимизированным для эффективной обработки маломощных импульсов;
- В качестве опции доступна предварительно разработанная функция измерения электромагнитных помех, позволяющая очень тонко настраивать параметры;
- Профессиональное программное обеспечение, поставляемое опционально, предлагает различные методы взаимодействия с персональными компьютерами.

Бывают случаи, когда требуется экономичный и портативный анализатор спектра. Основные преимущества портативности включают возможность работы в труднодоступных местах и в местах с ограниченным пространством, а также быструю первичную оценку оборудования. В этом контексте спектроанализатор TinySA может стать удобным инструментом.

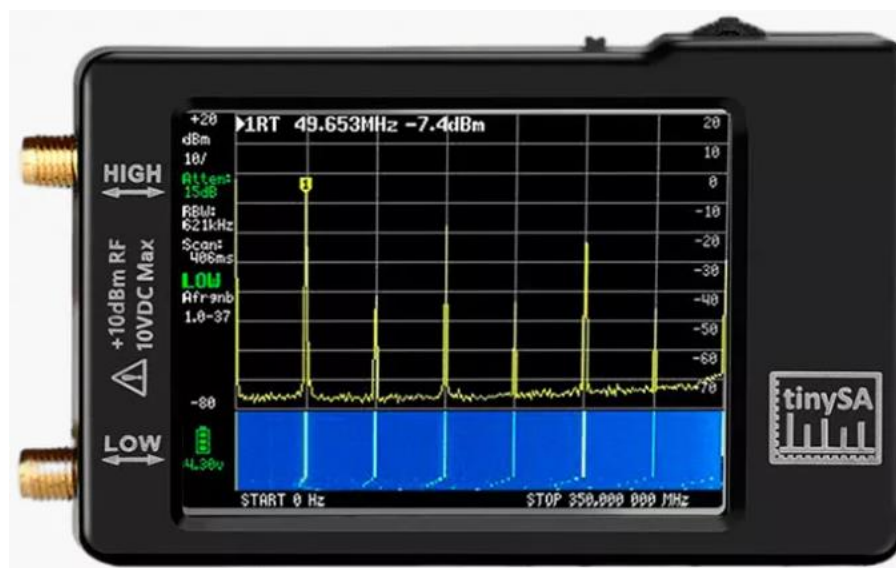


Рисунок 2.13 – Спектроанализатор TinySA

TinySA - это компактный портативный спектроанализатор с встроенным генератором. Он обладает рядом полезных функций:

1. Устройство оснащено двумя высокочастотными и одним низкочастотным входами:

- Вход LOW анализирует в радиодиапазонах средней частоты, высокой частоты и очень высокой частоты;

- Вход HIGH анализирует в радиодиапазоне ультравысокая частота;

2. Каждый вход выполняет функцию генератора:

- Выход LOW может генерировать синусоидальные волны в диапазоне 100 кГц – 350 МГц;

- Выход HIGH может генерировать прямоугольные импульсы в диапазоне 240 – 960 МГц.

3. Полосовой фильтр который имеет фиксированное разрешение в может работать диапазоне 3 кГц – 600 кГц.

4. Устройство оснащено 2,8-дюймовым цветным сенсорным экраном, разрешение которого составляет 320x240 точек, который позволяет отображать сканирования 290 точек. Данное сканирование обеспечивает эффективное представление спектрограммы в двух режимах.

5. Входной аттенюатор имеет рабочий диапазон от 0 до 31 дБ.

6. Максимальный уровень входного сигнала не превышает 10 дБм.

7. Также прибор позволяет подключаться к ПК через USB для доступного управления осциллятором, а также спектроанализатором [9].

3 Расчёт основных параметров радиосигналов в радиоэлектронике

3.1 Расчёт длины волны радиосигнала. Расчёт плотность потока мощности. Расчёт мощности, получаемой приёмной антенной.

При расчёте параметров радиосигнала в радиосистемах используются основные законы и формулы электромагнитных волн. Рассмотрим теорию, необходимую для решения задач такого типа.

1. Длина волны.

Длина волны λ электромагнитного сигнала определяется как расстояние, которое проходит волна за один период колебания. Она вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (3.1)$$

где c – скорость света в вакууме (3×10^8 м/с),

f – частота сигнала

2. Плотность потока мощности.

Плотность потока мощности S — это количество мощности, проходящей через единичную площадь, перпендикулярную к направлению распространения волны. В условиях свободного пространства плотность потока мощности от изотропного передатчика на расстоянии d рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{P_t}{4\pi d^2}, \quad (3.2)$$

где P_t – передаваемая мощность,

d – частота сигнала

Если используется направленная антенна с усилением G_t , формула модифицируется:

$$S = \frac{P_t \times G_t}{4\pi d^2}, \quad (3.3)$$

3. Усиление антенны.

Усиление антенны G характеризует, степень которая усиливает плотность потока мощности в определенном направлении по сравнению с изотропным источником. Усиление антенны часто выражается в децибелах (дБ):

$$G(\text{линейное}) = 10^{\frac{G(\text{дБ})}{10}}, \quad (3.4)$$

4. Эффективная площадь антенны.

Эффективность площадь A_r приёмной антенны связана с её усилением G_r и длиной волны λ :

$$A_r = \frac{G_r \times \lambda^2}{4\pi}, \quad (3.5)$$

5. Приёмная мощность.

Мощность, получаемая приёмной антенной P_r , рассчитывается через плотность потока мощности S на месте приёмника и эффективную площадь приёмной антенны A_r [10]:

$$P_r = S \times A_r, \quad (3.6)$$

Расчёт:

У нас есть радиопередатчик, работающий на частоте $f = 2.4$ ГГц, и передающая антенна с выходной мощностью $P_t = 100$ мВт. Антенна имеет усиление $G_t = 10$ дБ. Передатчик находится на расстоянии $d = 2$ км от приёмной антенны, которая имеет усиление $G_r = 5$ дБ.

1. Длина волны радиосигнала:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{2.4 \times 10^9 \text{ Гц}} = 0.125 \text{ м}$$

2. Плотность потока мощности на расстоянии d :

Усиление антенны в линейном масштабе:

$$G(\text{линейное}) = 10^{10/10} = 10$$

Плотность потока мощности:

$$S = \frac{100 \times 10^{-3} \text{ Вт} \times 10}{4\pi \times (2000 \text{ м})^2} = \frac{1 \text{ Вт}}{4\pi \times 4 \times 10^6 \text{ м}^2} \approx 1.99 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$$

3. Эффективная площадь приёмной антенны:

Усиление антенны в линейном масштабе:

$$G(\text{линейное}) = 10^{5/10} \approx 3.162$$

Эффективная площадь:

$$A_r = \frac{3.162 \times (0.125)^2}{4\pi} \approx 0.00395 \text{ м}^2$$

4. Мощность, получаемой приёмной антенной:

$$P_r = 1.99 \times 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \times 0.00395 \text{ м}^2 \approx 7.86 \times 10^{-11} \text{ Вт} = 78.6 \text{ пВт}$$

Таким образом:

1. Длина волны радиосигнала: 0.125 м;
2. Плотность потока мощности на расстоянии 2 км: $1.99 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$;
3. Мощность, получаемая приёмной антенной: 78.6 пВт.

Применение данной теории позволяет рассчитать важные параметры радиосигнала, такие как длина волны, плотность потока мощности и мощность, получаемую приёмной антенной. Эти расчёты необходимы для эффективного проектирования и анализа радиосистем.

3.2 Анализ параметров радиосигналов.

1. Совместимость по частотам.

Совместимость различных устройств в радиосистемах часто определяется диапазонами их рабочих частот. Для двух устройств (например, анализатора спектра и СВЧ преобразователя) важно, чтобы их рабочие частоты пересекались. Если рабочие частоты не пересекаются, устройства не могут работать вместе напрямую[11].

2. Мощность сигнала.

Мощность P электрического сигнала связана с напряжением U и сопротивлением нагрузки R . Она рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (3.7)$$

где U – напряжение сигнала,

R – сопротивление нагрузки.

Диапазон мощностей рассчитывается для минимального и максимального напряжений.

3. Диапазон частот

Диапазон частот определяет спектр частот, в котором устройство может работать. Для сравнения диапазонов частот различных устройств необходимо убедиться, что один диапазон частот полностью или частично попадает в другой.

Исходные данные:

1. Анализатор спектра в реальном времени С 4-47 предназначен для наблюдения и измерения спектров радиосигналов на частоте 160 МГц;
2. СВЧ преобразователь работает на частотах 2-4 ГГц;
3. Полоса частот УПЧ1 составляет 10 МГц;
4. Цифровой анализатор спектра СК4-71 имеет диапазон частот 0-50 кГц;

5. Коэффициент усиления входных сигналов от 0,125 до 8 В;
6. Измерительные приемники ESH2 работают на диапазоне частот 9 кГц - 30 МГц.

Расчёт:

1. Совместимость анализатора спектра С4-47 и СВЧ преобразователя:

- Частота работы анализатора спектра С4-47: 160 МГц.

- Диапазон частот СВЧ преобразователя: 2-4 ГГц.

Анализатор спектра С4-47 работает на частоте 160 МГц, что не попадает в диапазон 2-4 ГГц СВЧ преобразователя. Таким образом, С4-47 не совместим с СВЧ преобразователем по частотам напрямую.

2. Вычисление длины волны для минимальной и максимальной частот СВЧ преобразователя:

Длина волны λ рассчитываются по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Для минимальной частоты (2 ГГц):

$$\lambda_{min} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{2 \times 10^9 \text{ Гц}} = 0.15 \text{ м}$$

Для максимальной частоты (4 ГГц):

$$\lambda_{max} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{4 \times 10^9 \text{ Гц}} = 0.075 \text{ м}$$

3. Расчёт диапазона мощностей для цифрового анализатора спектра СК4-71:

Для минимального напряжения (0.125 В):

$$P_{min} = \frac{(0.125 \text{ В})^2}{50 \text{ Ом}} = \frac{0.015625 \text{ В}^2}{50 \text{ Ом}} = 0.0003125 \text{ Вт} = 312.5 \text{ мкВт}$$

Для максимального напряжения (8 В):

$$P_{max} = \frac{(8 \text{ В})^2}{50 \text{ Ом}} = \frac{64 \text{ В}^2}{50 \text{ Ом}} = 1.28 \text{ Вт}$$

Таким образом диапазон мощностей для цифрового анализатора спектра СК4-71 составляет от 312.5 мкВт до 1.28 Вт.

4. Покрывают ли измерительные приемники ESH2 диапазон частот цифрового анализатора спектра СК4-71:

- Диапазон частот цифрового анализатора спектра СК4-71: 0-50 кГц.
- Диапазон частот измерительных приемников ESH2: 9 кГц - 30 МГц.

Диапазон частот цифрового анализатора спектра частично перекрывается диапазоном измерительных приемников ESH2, так как ESH2 работает начиная с 9 кГц, что выше нижней границы диапазона СК4-71 (0 кГц). Верхняя граница СК4-71 (50 кГц) полностью находится в диапазоне ESH2 (до 30 МГц). Таким образом, ESH2 покрывает частоты СК4-71, за исключением самого нижнего диапазона от 0 до 9 кГц.

Итог:

1. Анализатор спектра С4-47 не совместим с СВЧ преобразователем по частотам.
2. Длина волны для частот СВЧ преобразователя:
 - Минимальная (2 ГГц): 0.15 м
 - Максимальная (4 ГГц): 0.075 м
3. Диапазон мощностей для Цифрового анализатора спектра СК4-71: от 312.5 мкВт до 1.28 Вт.
4. Измерительные приемники ESH2 покрывают диапазон частот цифрового анализатора спектра СК4-71, за исключением частот ниже 9 кГц.

3.3 Моделирование и анализ радиосигналов с использованием фильтров.

Радиосигналы представляют собой электромагнитные волны, передающие информацию через пространство. Анализ характеристик радиосигналов и их фильтрация являются важными задачами в радиотехнике и телекоммуникациях.

Необходимо провести моделирование радиосигналов в среде MATLAB и построить графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) для системы с заданными параметрами.

Параметры системы:

1. Частота радиосигналов: $f = 100$ МГц;
2. Амплитуда радиосигнала: $A = 1$;
3. Полоса пропускания фильтра: $\Delta f = 10$ МГц;
4. Тип фильтра: Низкочастотный фильтр (Low-pass filter).

Моделирование:

1. Создание модели радиосигнала в MATLAB:

В MATLAB создаём временную ось и синусоидальный сигнал с заданной частотой и амплитудой.

2. Построение АЧХ и ФЧХ для низкочастотного фильтра:

Используем функции для построения и анализа фильтра в MATLAB, такие как `butter` для создания фильтра и `freqz` для анализа его частотной характеристики.

```

>> % Параметры
f = 100e6; % Частота радиосигнала (100 МГц)
A = 1; % Амплитуда радиосигнала
fs = 1e9; % Частота дискретизации (1 ГГц)
t = 0:1/fs:1e-6; % Временная ось (1 мкс)
signal = A * sin(2 * pi * f * t); % Радиосигнал

% Параметры фильтра
Fc = 10e6; % Частота среза фильтра (10 МГц)
[b, a] = butter(5, Fc/(fs/2), 'low'); % Низкочастотный

% Частотные характеристики фильтра
[H, W] = freqz(b, a, 1024, fs);

% АЧХ и ФЧХ
magnitude = 20*log10(abs(H));
phase = angle(H);

% Построение графиков
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(W, magnitude);
title('Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплитуда (дБ)');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(W, phase);
title('Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Фаза (радианы)');
grid on;

```

Рисунок 3.1 – Моделирование радиосигнала

Объяснение кода:

1. Параметры радиосигнала:
 - Устанавливаю частоту сигнала $f = 100$ МГц и амплитуду $A = 1$;
 - Устанавливаю частоту дискретизации $f_s = 1$ ГГц и создаю временную ось для моделирования сигнала на протяжении 1 мкс.
2. Создание радиосигнала:
 - Генерирую синусоидальный сигнал с заданной частотой и амплитудой.

3. Параметры фильтра:
 - Устанавливаю частоту среза низкочастотного фильтра $F_c = 10$ МГц;
 - Создаю низкочастотный фильтр Баттерворта 5 – го порядка с помощью функции «butter».
4. Анализ фильтра:
 - Использую функцию «freqz» для вычисления частотных характеристик фильтра;
 - Вычисляю амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазо-частотную характеристику (ФЧХ).
5. Построение графиков:
 - Построение графиков АЧХ и ФЧХ с помощью функции «plot».

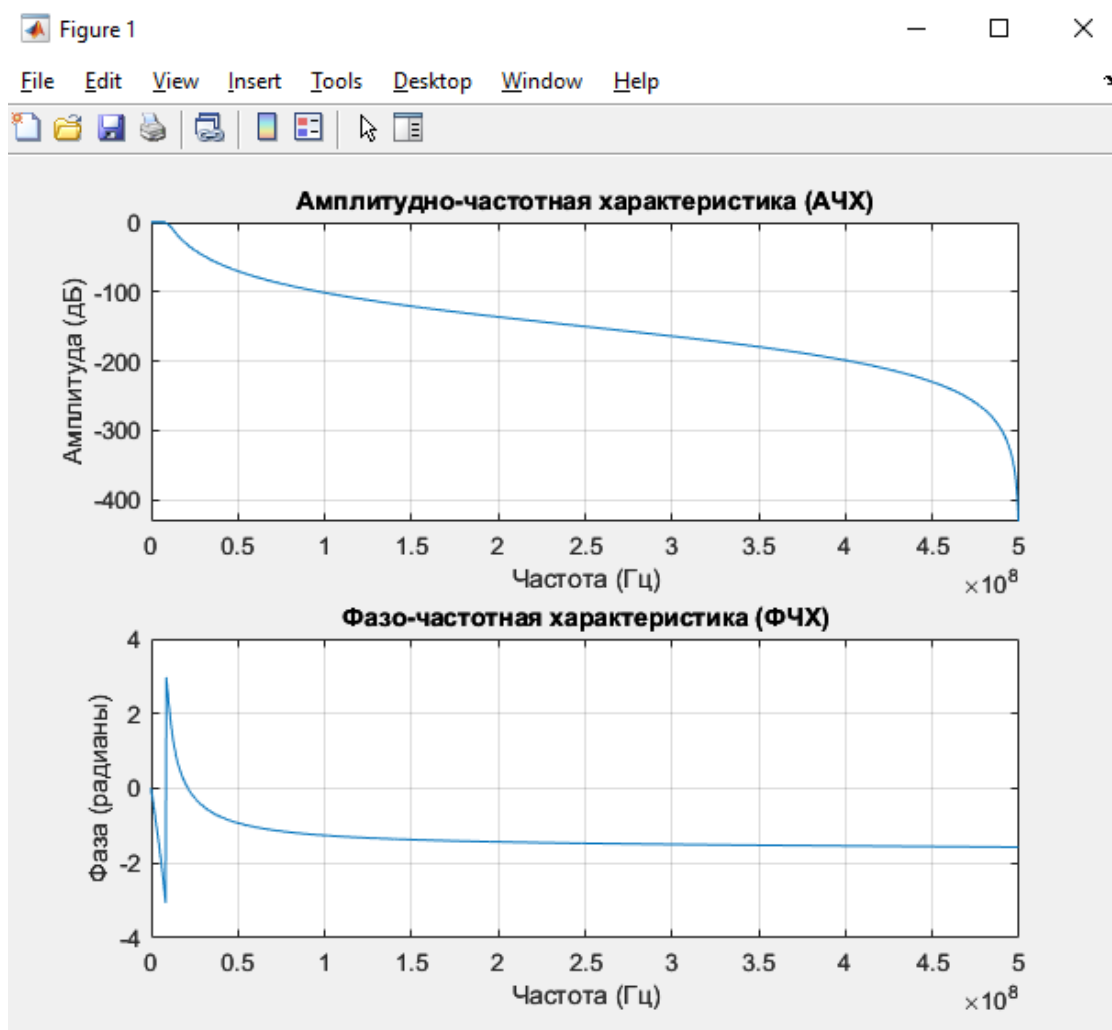


Рисунок 3.2 – Амплитудно-частотная характеристика и фазо-частотная характеристика

В результате выполнения данного кода в среде MATLAB я создал модель радиосигнала с заданными параметрами. Применил к нему низкочастотный фильтр и построил графики амплитудно-частотной и фазо-частотной

характеристик, что позволяет проанализировать поведение системы на заданных частотах.

3.4 Генерация и анализ амплитудно-модулированного сигнала.

Амплитудная модуляция - один из основных методов модуляции, при котором амплитуда несущего сигнала изменяется в зависимости от мгновенного значения модулирующего сигнала.

1. Амплитудная модуляция:

- При амплитудной модуляции амплитуда несущей волны изменяется в соответствии с модулирующим сигналом.

- Общая форма амплитудно-модулированного сигнала:

$$s(t) = [1 + m(t)] \times c(t), \quad (3.8)$$

где $m(t)$ – модулирующий сигнал,

$c(t)$ – несущая волна.

2. Несущая волна:

- Это высокочастотный сигнал, который модулируется информационным (модулирующим) сигналом.

- Обычно представляется как:

$$c(t) = A_c \sin(2\pi f_c t), \quad (3.9)$$

где A_c – амплитуда несущей волны,

f_m - частота модулирующего сигнала.

Шаги реализации:

- Создать несущую волну с частотой 10 кГц и амплитудой 1 В.

- Создать модулирующий сигнал с частотой 1 кГц и амплитудой 0.5 В.

- Сформировать амплитудно-модулированный сигнал.

- Построить графики исходного, модулирующего и модулированного сигналов.

- Построить спектр амплитудно-модулированного сигнала.

```

>> % Параметры
fs = 100e3; % Частота дискретизации (100 кГц)
t = 0:1/fs:0.01; % Временная ось (10 мс)

% Несущая волна
fc = 10e3; % Частота несущей (10 кГц)
Ac = 1; % Амплитуда несущей
carrier = Ac * sin(2 * pi * fc * t); % Несущая волна

% Модулирующий сигнал
fm = 1e3; % Частота модулирующего сигнала (1 кГц)
Am = 0.5; % Амплитуда модулирующего сигнала
modulating = Am * sin(2 * pi * fm * t); % Модулирующий сигнал

% Амплитудно-модулированный сигнал
AM_signal = (1 + modulating) .* carrier;

```

Рисунок 3.3 – Определение параметров

Параметры:

- «fs»: Частота дискретизации, определяет, с какой частотой будут измеряться значения сигнала. Здесь она равна 100 кГц;
- «t»: Временная ось, которая создается с шагом 1/fs, покрывая диапазон времени от 0 до 0.01 секунд (10 мс).

Генерация несущей волны:

- «fc»: Частота несущей волны, установлена на 10 кГц;
- «Ac»: Амплитуда несущей волны, равна 1 В;
- «carrier»: Несущая волна, задается как синусоида с частотой fc и амплитудой Ac.

Генерация модулирующего сигнала:

- «fm»: Частота модулирующего сигнала, установлена на 1 кГц;
- «Am»: Амплитуда модулирующего сигнала, равна 0.5 В;
- «modulating»: Модулирующий сигнал, задается как синусоида с частотой fm и амплитудой Am.

Формирование амплитудно-модулированного сигнала:

- «AM_signal»: Амплитудно-модулированный сигнал. Формула «[1 + modulating] .* carrier» означает, что амплитуда несущей волны изменяется в зависимости от модулирующего сигнала.

```

% Построение графиков сигналов
figure;
subplot(3, 1, 1);
plot(t, carrier);
title('Несущая волна');
xlabel('Время (с)');
ylabel('Амплитуда (В)');
grid on;

subplot(3, 1, 2);
plot(t, modulating);
title('Модулирующий сигнал');
xlabel('Время (с)');
ylabel('Амплитуда (В)');
grid on;

subplot(3, 1, 3);
plot(t, AM_signal);
title('Амплитудно-модулированный сигнал');
xlabel('Время (с)');
ylabel('Амплитуда (В)');
grid on;

% Построение спектра модулированного сигнала
figure;
N = length(AM_signal);
f = linspace(-fs/2, fs/2, N);
AM_signal_fft = fftshift(fft(AM_signal)/N);
plot(f, abs(AM_signal_fft));
title('Спектр амплитудно-модулированного сигнала');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплитуда');
grid on;

```

Рисунок 3.4 – Построение графиков сигналов

Создаются три подграфика:

1. График несущей волны.
2. График модулирующего сигнала.
3. График амплитудно-модулированного сигнала.

Построение спектра модулированного сигнала:

- «N»: Длина АМ-сигнала, количество отсчетов в сигнале.

- «f»: Ось частот для отображения спектра, создается с использованием «linspace» для равномерного распределения частот от «-fs/2» до «fs/2».
- «AM_signal_fft»: Спектр АМ-сигнала, вычисленный с помощью дискретного преобразования Фурье (БПФ). Функция «fftshift» используется для центровки нуля частоты в середине спектра.
- «plot(f, abs(AM_signal_fft))»: Построение графика амплитуды спектра в зависимости от частоты.

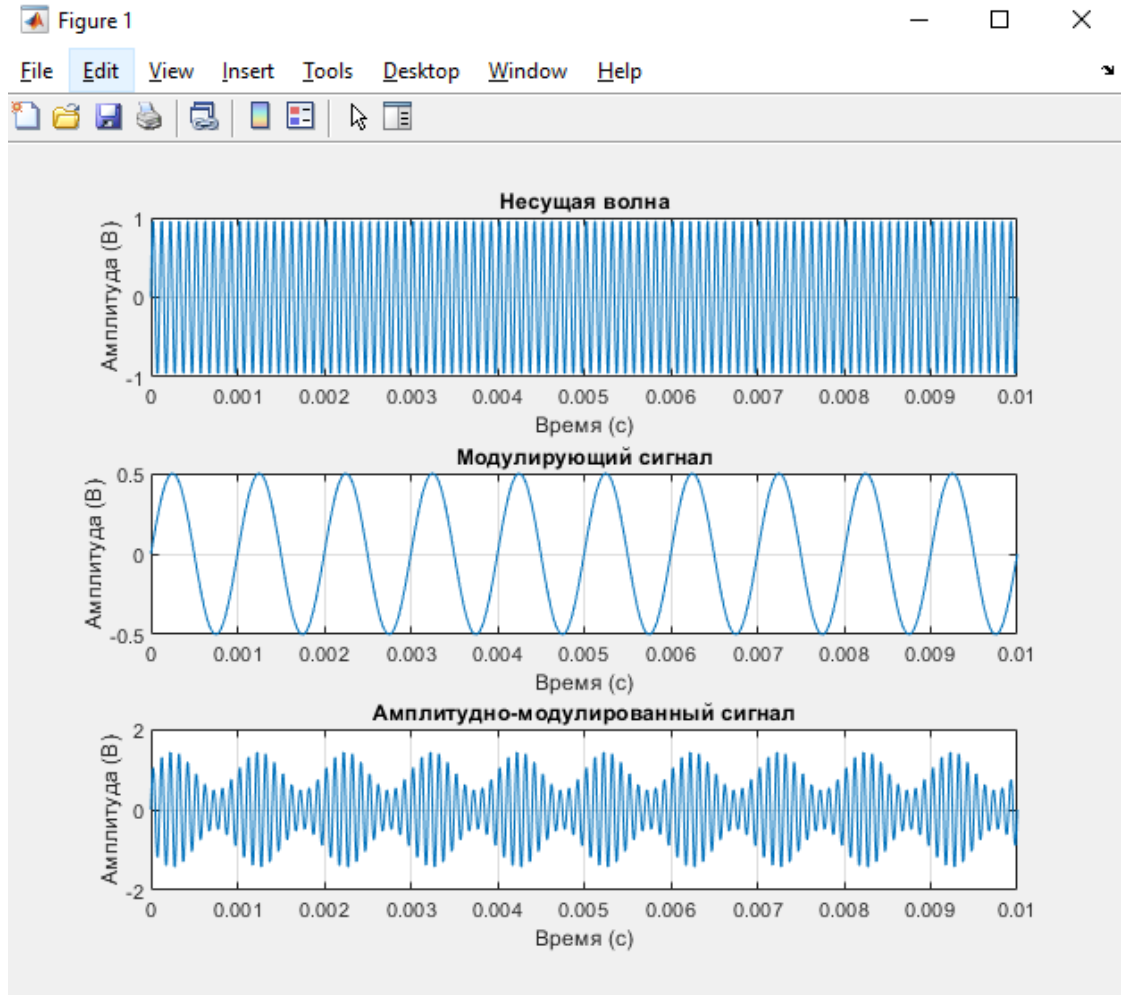


Рисунок 3.5 – Графики сигналов

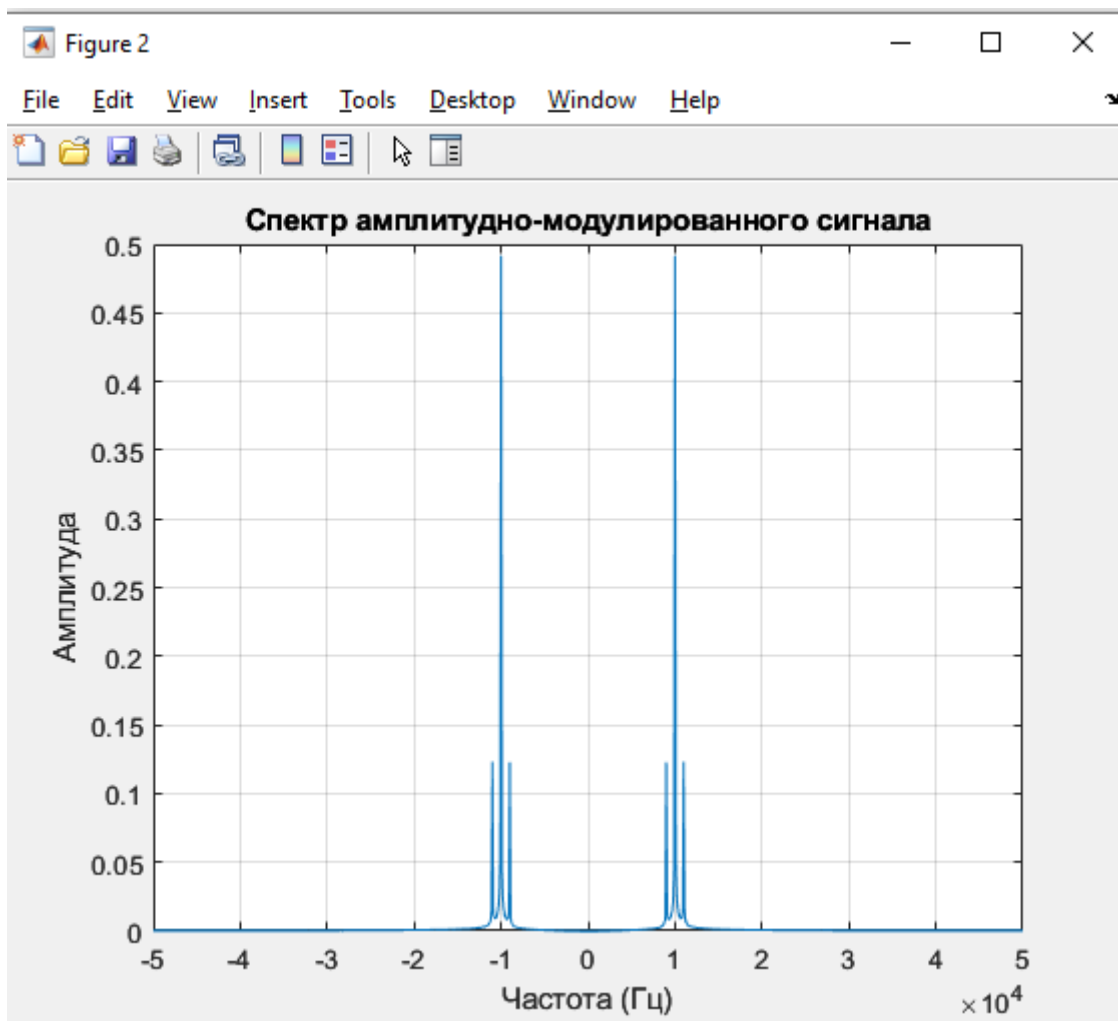


Рисунок 3.6 – Спектра амплитудно-модулированного сигнала

Таким образом, данный код позволяет:

1. Сгенерировать амплитудно-модулированный сигнал.
2. Построить временные графики несущей волны, модулирующего сигнала и модулированного сигнала.
3. Выполнить спектральный анализ АМ-сигнала и построить его спектр.

Таким образом, можно визуализировать поведение АМ-сигнала как во временной области, так и в частотной, что полезно для понимания процесса амплитудной модуляции и её влияния на сигналы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что в данной дипломной работе представлен всесторонний анализ методов измерений в радиоэлектронике с акцентом на измерение радиосигналов, реализацию схем измерений, выбор оборудования и измерительных приборов, а также расчет ключевых параметров. Благодаря этому исследованию были получены ценные сведения о тонкостях, связанных с точным измерением радиосигналов и обеспечением надежности и производительности систем связи.

Анализ методов измерения выявил важность понимания фундаментальных принципов и параметров радиосигналов. Эти знания необходимы для оптимизации систем связи и обеспечения эффективной передачи и приема сигналов.

Изучение внедрения измерительных схем поможет для реализации различных подходов и методов, используемые на практике. Критически оценивая существующие схемы, исследователи могут определить их сильные стороны, ограничения и области, требующие улучшения.

Выбор оборудования и измерительных приборов был ключевым аспектом этой работы. Выбор оборудования напрямую влияет на точность и надежность измерений. Благодаря всесторонней оценке имеющегося оборудования с учетом таких факторов, как диапазон частот, чувствительность, разрешающая способность и возможности калибровки, инженеры и исследователи могут принимать обоснованные решения при выборе оборудования, наиболее подходящего для их конкретных требований к измерениям.

Выводы, полученные в результате этого исследования, помогут разобраться в тонкостях измерения радиосигналов, внедряя эффективные схемы измерений и выбирая соответствующее оборудование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоизмерения : учебное пособие для студентов, обучающихся по физическим специальностям / А. В. Хохлов, В. В. Семенов, К. А. Гребенюк. - Саратов : [б. и.], 2022. - 170 с
2. Данилин А. А. Измерения в радиоэлектронике : учебное пособие для вузов / А. А. Данилин, Н. С. Лавренко / под редакцией А. А. Данилина. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 408 с.
3. Шкловский М. И., Ямпольский А. Г. Цифровые методы измерения в радиоэлектронике. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2015. - 224 с.
4. Радиочастотные измерения – <https://studfile.net/preview/9113096/page:46/>
5. Хамадулин Э. Ф., Основы радиоэлектроники: методы и средства измерений : учеб. Пособие для СПО / Э. Ф. Хамадулин. – М. : Издательство Юрайт, 2018. – 365 с.
6. Вычислительные анализаторы спектра – <https://studfile.net/preview/311035/page:6/>
7. Гетеродинные измерители ослабления. Измерительный приемник – <https://studfile.net/preview/17960284/page:69/>
8. Как выбрать осциллограф – https://supereyes.ru/articles/oscilloscope/kak_vybrat_ostsillograf_dlia_nachinaiuschego/
9. Как работает анализатор спектра: назначение, применение, обзор моделей – https://supereyes.ru/articles/other/obzor_analizatorov_spektra/#kak-vibratasya
10. Гурвич Я. С., Шкловский М. И. Метрологическое обеспечение измерений в радиоэлектронике. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2018. - 192 с.
11. Данилин А. А., Москалец Д. О., Сосновский В. А. Д18 Приборы и техника радиоизмерений в вопросах и ответах: учеб. пособие /под ред. А. А. Данилина. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 124 с.

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

Дипломная работа

Ходжаков Тамерлан Таирович

6В06201-Телекоммуникация
(наименование и шифр специальности)

Тема: «Анализ методов измерения в радиоэлектронике»

Тема дипломной работы является актуальной, так как в данной работе представлен анализ методов измерения в радиоэлектронике. Студент обширно исследовал различные методики и подходы к измерениям в этой области, представив обзор современных технологий и методов.

В работе рассмотрена систематизация и классификация методов измерения, многообразии подходов в радиоэлектронике. Особое внимание уделено выбору оборудования такие как осциллограф, цифровой анализатор спектра для различных методов измерения в радиоэлектронике.

В целом, общие требования к созданию, изложению, оформлению текстовых и графических материалов работы выполнены в соответствии с заданными стандартами.

А дипломная работа отвечает требованиям, предъявляемым к дипломной работе, и заслуживает оценки «отлично» (90%), а дипломант Ходжаков Тамерлан Таирович достоин академической степени «бакалавр» техники и технологии по специальности 6В06201-Телекоммуникация.

Научный руководитель:

Ст.преподаватель каф.ЭТиКТ

 Джунусов Н.А.

«01» июня 2024 ж.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

РЕЦЕНЗИЯ

На дипломную работу

Ходжаков Тамерлан Таирович

6B06201 – Телекоммуникация

На тему: «Анализ методов измерения в радиоэлектронике»

Выполнено:

а) теоретическая часть на 34 листах

б) практическая часть на 12 листах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Нет ссылок на литературу по тексту.

Оценка работы

Дипломная работа представляет собой тщательное исследование и анализ различных методов измерения в радиоэлектронике.

В дипломной работе студента демонстрируется глубокое понимание основных принципов и методик измерения в области радиоэлектроники. В обзоре дипломной работы студент представил детальный и информативный анализ существующих методов и параметров измерения, используемых в радиоэлектронных системах.

Студент показал хорошее знание теоретического материала, работа выполнена согласно задания дипломной работы, соблюдены все стандарты университета по написанию дипломных работ.

Считаю, что дипломная работа выполнена на оценку хорошо (B+, 85%), а дипломат, Ходжаков Тамерлан, заслуживает присвоения академической степени «бакалавр» по специальности 6B06201 – Телекоммуникация.

Рецензент

к.т.н., профессор

АУЭС им. Г.Даукеева



Байкенов А.С.

«26» мая 2024 г.

Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю

Шаманов 3.40

Қызметі	05	аты-жөні
«30»		2024 ж.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Ходжаков Тамерлан Таирович

Тақырыбы: Анализ методов измерения в радиоэлектронике

Жетекшісі: Нуридин Джунусов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 4

2-ұқсастық коэффициенті (5): 1.4

Дәйексөз (35): 0.8

Әріптерді ауыстыру: 1

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 0

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

30.05.2024
Күні

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ходжаков Тамерлан Таирович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ методов измерения в радиоэлектронике

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 4

Коэффициент Подобия 2: 1.4

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 1

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

30.05.2024.
Дата

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ходжаков Тамерлан Таирович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ методов измерения в радиоэлектронике

Научный руководитель: Нуридин Джунусов

Коэффициент Подобия 1: 4

Коэффициент Подобия 2: 1.4

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 1

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

30.05.2024.
Дата


Маркисул Е
проверяющий эксперт