

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНАМ
«Метрология, стандартизация и сертификация»
и
«Электрорадиоизмерения»

для специальности среднего профессионального образования
технического профиля
11.02.01 Радиоаппаратостроение

Практикум разработан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по специальности среднего профессионального образования 11.02.01 Радиоаппаратостроение (утверждённым приказом Министерства образования и науки РФ от 14.05.2014 №521)

Разработал проф. каф. РТ и РС Поздняков А.Д.

1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ИСПЫТАНИЙ И МОНИТОРИНГА

Аппаратной основой современных систем контроля, испытаний и мониторинга (СКИМ) становятся персональные компьютеры (ПК), дополненные встроенными и внешними средствами расширения.

Компьютерные технологии позволяют с наименьшими затратами обеспечить высокое качество, точность и достоверность результатов испытаний. Распространение компьютерных СКИМ определяется большой вычислительной мощностью ПК, наличием развитого периферийного оборудования, удобством интегрирования систем в локальные сети, относительно невысокой стоимостью основного оборудования, разнообразием программ обработки данных и документирования. Клавиатура и экран ПК, простота интегрирования с другими внешними устройствами и системами, предоставляют более широкие возможности пользователю по сравнению с теми, которые могут дать автономные приборы.

При создании СКИМ разработчики стремятся достичь универсальности, гибкости, доступности, реализуемости, совместимости и достаточности средств оценки параметров и характеристик РТС на разных стадиях жизненного цикла. При этом главными критериями могут рассматриваться унификация и экономическая эффективность средств контроля, испытаний и мониторинга.

Стратегия гибкости, универсальности и эффективности определяет принципы построения СКИМ на всех стадиях жизненного цикла РТС. Сегодня нужны такие СКИМ, которые могут адаптировать свои возможности в соответствии с совершенствованием выпускаемой продукции, они должны быть многофункциональными, модернизируемыми, перепрограммируемыми и при этом недорогими, быстро создаваемыми и доступными для отечественного производителя РТС.

Этим требованиям в полной мере соответствуют комплексы виртуальных приборов, реализующие алгоритмические методы оценки параметров РТС, включая унифицированные аппаратные средства и специальное программное обеспечение, модульное по структуре и адаптируемое к конкретной задаче. Принципы работы виртуальных приборов базируются на использовании развитых процедур цифровой обработки данных, т.е. не на аппаратном, а на программном уровне, поэтому алгоритмизация – это главный вектор развития СКИМ РТС.

Виртуальные СКИМ представляют собой гибкую совокупность аппаратно-программных средств, основой которых является ПК, обеспечивающий измерения, управление экспериментом, цифровую обработку данных, передачу и хранение информации. Суть нового подхода заключается в алгоритмизации измерений, при которой результат получается путем вычислений, т.е. на программном уровне при минимуме аппаратных средств. Аппаратной основой СКИМ становится ПК, который дополняется аналоговыми и цифровыми адаптерами ввода-вывода.

Особенностями виртуальных СКИМ является гибкость, наращиваемость, простота и быстрота адаптации к новым задачам, возможности расширения функций измерения, мониторинга и управления. Большое значение имеет развитое программное обеспечение СКИМ, использующее современные методы и алгоритмы цифровой обработки, снижающие требования к аппаратным средствам.

Комплексы виртуальных приборов (КВП) строятся на базе ПК. Благодаря современным аппаратно-программным средствам и возможностям графического представления данных компьютер легко преобразуется в виртуальный прибор (ВП) и испытательный комплекс. Для этого достаточно оснастить его быстродействующими

эффективно функционирующими в реальном масштабе времени преобразователями и формирователями, как показано на рис. 1 в виде плат расширения.

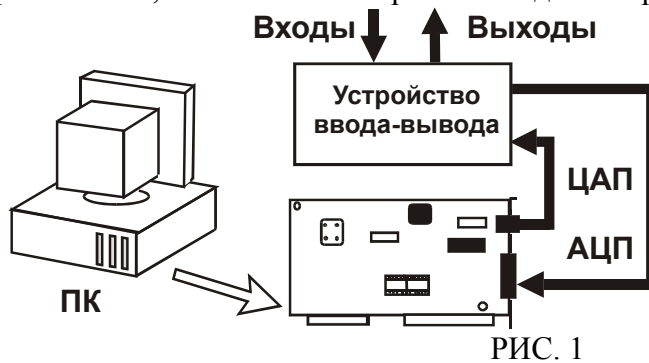


РИС. 1

ВП представляет собой комбинацию компьютера, универсальных аппаратных средств ввода/вывода сигналов и специализированного программного обеспечения (ПО). Использование серийных ПК закладывает основу относительно низкой стоимости КВП, которые имеют к тому же малые габариты. Аппаратная и программная база ВП в настоящее время очень интенсивно развивается, а полоса рабочих частот и быстродействие ВП уже приблизились к параметрам автономных приборов.

Анализ современного состояния аппаратно-программных средств испытаний и мониторинга показывает, что наиболее перспективными являются системы компьютерных приборов, которые при необходимости могут комбинироваться с приборно-модульными и крейтовыми системами. По возможностям реконфигурации, гибкости, наращиваемости, доступности, простоте ВП не имеют себе равных.

Следует отметить, что, в отличие от приборно-модульных комплексов, состоящих из совокупности устройств, каждое из которых выполняет предписанные ему функции (вольтметр измеряет напряжение, частотомер – частоту и т.д.), совершенствование вычислительной техники и развитие методов ЦОС обуславливают возможность реализации большого числа функций.

Основные предпосылки развития ВП:

1. Широкое распространение и доступность ПК, обладающих высокими техническими характеристиками и позволяющих создавать ВП, функционирующие в реальном времени.
2. Международная стандартизация аппаратных средств СКИМ различного назначения, ориентированных на использование унифицированных конструктивов, интерфейсов и протоколов обмена данными.
3. Совершенствование элементной базы и реализация в компактной форме сигнальных процессоров, цифровых БИС и СБИС, прецизионных усилителей и быстродействующих многоканальных АЦП.
4. Низкая стоимость ВП по сравнению с комплексом аналогичных серийных приборов, построенных на основе аппаратных принципов преобразования измерительной информации.
5. Создание развитого программного обеспечения цифровой обработки информации, позволяющего решать измерительные задачи на программном уровне без дополнительных аппаратных средств.

Области применения ВП:

- измерения, контроль и испытания с заменой комплекса универсальных приборов на их виртуальные аналоги, построенные на базе одного ПК и встроенных плат;

- измерения, контроль и испытания с расширенными функциями математической обработки и представления информации, использования методов косвенного измерения, цифровой фильтрации и т. д.;
- системы учебного назначения для подготовки студентов и операторов без базового аппаратного обеспечения.

Использование технологий ВП в системе образования актуально как с точки зрения минимизации затрат, поскольку приобрести компьютер с одной - двумя встроенными платами сегодня значительно дешевле чем купить 5-7 автономных приборов, так и с точки зрения углубления лабораторных исследований за счет типовых методик работы с комплексами ВП.

Варианты конфигурирования КВП следующие:

- Компьютерные платы аналогового и цифрового ввода - вывода.
- Внешние модули приборов и устройств сбора данных.
- Удаленные модули ввода и вывода, соединенные с компьютером последовательной шиной (USB, RS-232 и др.).
- Территориально-распределенные сетевые системы с главным ПК и контроллерами (внешними по отношению к ПК) в каждой ветви.

Компьютерные платы расширения, вставляемые в свободный слот ПК, являются одним из наиболее простых способов построения ВП. Такие платы используются в приложениях, где компьютер близок к измерительным датчикам. Серийно выпускаются привычные для пользователя *платы-приборы* (вольтметры, анализаторы спектра, осциллографы ...), а также *многофункциональные платы ввода – вывода* (АЦП, ЦАП, цифровой ввод – вывод ...).

Использование встраиваемых плат обеспечивает максимально возможное быстродействие, поскольку платы устанавливаются непосредственно в свободный слот расширения и адресуются как стандартные устройства ввода/вывода. Обмен данными между платой и компьютером происходит через механизм прерываний или посредством прямого доступа к памяти. Быстродействие при этом ограничено пропускной способностью шины.

Внешние модули получили распространение наряду с встраиваемыми в ПК модулями. Выносные модули приборов и многофункциональных плат имеют автономный конструктив и соединены с ПК универсальной или специальной шиной. Они лучше, чем встраиваемые платы, могут быть защищены от помех, позволяют укоротить линии связи с датчиками при практически любом удлинении шины связи с ПК, но они более дорогие и менее скоростные. В процессе удаленного сбора информации для связи с датчиками используются шины LAN, USB, RS-232 или RS-422/485, делая их совместимыми с любым компьютером.

Преимущества виртуальных приборов

Виртуальные приборы (ВП) представляют собой программную реализацию измерительных алгоритмов путем цифровой обработки первичных параметров исследуемых сигналов. Они получают широкое распространение для многих видов измерений благодаря более высокой точности, программируемости, простой конструкции и относительно низкой стоимости.

Основные преимущества ВП:

- Расширение функциональных возможностей приборов за счет реализации нескольких измерительных алгоритмов.
- Повышение точности прямых, косвенных, совместных и совокупных измерений за счет выполнения вычислительных операций.

- Обработка и представление данных в требуемом формате с получением информации о погрешностях и статистических характеристиках измеряемых величин: математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО).
- Уменьшение габаритных размеров и потребляемой мощности многоканальных измерительных систем и комплексов за счет многофункциональности ВП.
- Повышение надежности за счет уменьшения аналоговой части ВП, а также снижения количества паяных и разъемных соединений.
- Сокращение продолжительности разработки и модернизации ВП за счет перепрограммирования устройства управления и вычисления.
- Упрощенная интеграция ВП в состав измерительной системы или комплекса, содержащего ПК.
- Возможность динамических измерений и измерений в режиме реального времени.

В работе виртуальных приборов используются самые различные методы цифровой обработки и представления данных, в том числе: преобразования Фурье и Гильберта, цифровая фильтрация, аналитический аппарат описания сигналов и шумов, численные методы решения задач и систем уравнений, методы математической статистики и теории вероятности и другие. Применение методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) существенно снижает требования к аппаратной части, упрощает и удешевляет ее. Например, с целью повышения быстродействия и точности могут использоваться алгоритмы косвенных измерений по формулам и процедурам, недоступным для автономных приборов, но легко реализуемых в вычислительных приборах. При этом может значительно расширяться база рабочих алгоритмов.

Наличие в составе ВП вычислительного устройства или ПК позволяет уменьшить систематическую и случайную составляющие погрешности. Систематическая составляющая может быть уменьшена путем автокалибровки – минимизируется аддитивная и мультипликативная составляющие систематической погрешности. Влияние случайных погрешностей может быть уменьшено реализацией процедуры многократных измерений.

Фактически, имея двухканальный АЦП, сделав по одной выборке в каждом канале, можно рассчитать совокупность параметров сигналов и устройств: уровни и частоты сигналов, фазовые сдвиги, спектры, комплексные коэффициенты передачи, нелинейные искажения, задержку, и др. Цифровые методы обеспечивают минимальную погрешность обработки, высокую достоверность выходных результатов, значительную помехоустойчивость и функциональную гибкость программно-аппаратных средств.

Основные этапы цифровой обработки включают: аналого-цифровое преобразование (АЦП); обработку данных с получением информации о первичных параметрах сигналов; вторичную оценку параметров сигналов и устройств с реализацией вычислительных и косвенных измерений, включая обработку многократных измерений.

Аппаратные средства виртуальных приборов

Аппаратными средствами ВП являются специализированные контроллеры или ПК, интерфейсные платы, адаптеры аналогового и цифрового ввода-вывода, модули согласования и вспомогательные устройства. Рассмотрим требования к основным аппаратным средствам.

ПК и его функции в структуре ВП

В структуре ВП значительная часть приборных функций и операций осуществляется не аппаратно, а программно с помощью ПК, который является обязательным компонентом ВП и реализует процесс получения информации на алгоритмическом уровне. При этом

аппаратная часть ВП может быть реализована в виде автономного модуля или встраиваемой платы ПК.

Применение серийных ПК закладывает основу относительно низкой стоимости подобных систем, эффективно функционирующих в реальном масштабе времени. Основной набор функций, передаваемых компьютеру в структуре ВП, включает задачи интерактивного взаимодействия пользователя и прибора (управление, отображение информации, сигнализация и т.д.) в форме привычной для пользователя с сохранением всех внешних атрибутов (панелей, ручек управления, экранов и т.д.). В этом случае взаимодействие с виртуальными компьютерными системами оказывается подобным работе с традиционными приборами.

ПК, как элемент управления и обработки информации, обеспечивает:

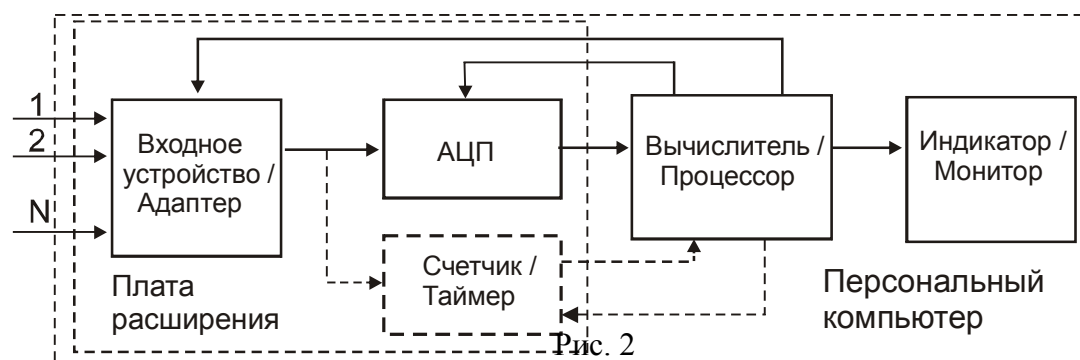
- цифровую обработку и преобразование сигнала (масштабирование, взвешивание, форматирование, статистический, спектральный и корреляционный анализ, интегрирование, логическую обработку и цифровую фильтрацию);
- анализ, представление и сохранение информации с использованием программных модулей (сжатие информации, систематизация и хранение результатов, отображение цифровой и графической информации и др.);
- выполнение интерфейсных функций (интерактивное управление виртуальными приборами и внешними средствами);
- ПК может решать другие вспомогательные задачи учета, паспортизации и хранения информации на предприятии, в цехе, на участке.

Среди всего многообразия ПК следует особо выделить класс промышленных компьютеров, предназначенных для использования в сложных условиях эксплуатации по температуре, влажности, помеховым электромагнитным полям, запыленности и вибрациям. Хотя стоимость таких ПК в несколько раз выше, их применение в структуре КВП оправдано высокой надежностью. Промышленные ПК предусматривают дополнительные интерфейсные возможности, они содержат большое число свободных слотов для плат расширения, могут комплектоваться специальными модулями ввода-вывода, коммутации и управления. В процессе своей работы такие компьютеры при выполнении прецизионных измерений допускают программируемое отключение монитора.

Встраиваемые платы

Встраиваемые платы обеспечивают многоканальный ввод/вывод аналоговых и дискретных сигналов, программируемые коэффициенты усиления и скорости преобразования, устанавливаемые индивидуально для каждого канала, содержат счетчики - таймеры, шину для синхронизации работы

нескольких плат, сигнальные процессоры для обработки сигналов. Схема многоканального ВП приведена на рис. 2.



Задачи цифрового синтеза радиосигналов с заданными параметрами могут решаться на основе виртуальных генераторов. Платы ЦАП позволяют превратить ПК в

функциональный многоканальный генератор, частотный и динамический диапазон которого определяются выбранным ЦАП. При этом можно создавать комбинированные сигналы непосредственно в одном рабочем канале. Виртуальный генератор позволяет сформировать любую необходимую функцию сигнала, шума, а также их комбинации. Он может работать как адаптивное устройство в различных комплексах и системах.

Аналого-цифровое преобразование

Дискретизация сигналов - это преобразование функций непрерывных переменных в функции дискретных переменных, по которым исходные непрерывные функции могут быть восстановлены с заданной точностью. Роль дискретных отсчетов выполняют, как правило, квантованные значения функций в дискретной шкале координат, как показано на рис. 3.

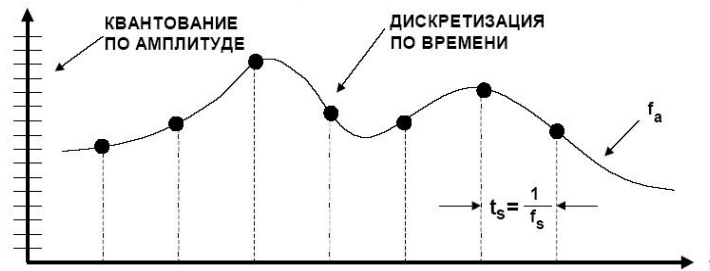


Рис. 3

Под квантованием понимают преобразование непрерывной по значениям величины в величину с дискретной шкалой значений из конечного множества разрешенных, которые называют уровнями квантования. Дискретизация называется равномерной с частотой $F=1/t_s$, если значение t_s постоянно по всему диапазону преобразования сигнала. При неравномерной дискретизации шаг отсчетов может изменяться.

Восстановление непрерывного сигнала по выборкам может проводиться на основе ортогональных или неортогональных базисных функций. Воспроизводящая функция $s'(t)$ соответственно представляется аппроксимирующим полиномом:

$$s'(t) = \sum_n c_n v_n(t),$$

где $v_n(t)$ - система базисных функций. Ортогональные базисные функции обеспечивают сходимость ряда к $s(t)$ при $n \Rightarrow \infty$. Оптимальными являются методы дискретизации, обеспечивающие минимальный числовой ряд при заданной погрешности воспроизведения сигнала. При неортогональных базисных функциях используются, в основном, степенные алгебраические полиномы вида:

$$s'(t) = \sum_{n=0}^N c_n t^n.$$

Если значения аппроксимирующего полинома совпадают со значениями выборок в моменты их отсчета, то такой полином называют интерполирующим. Для его реализации необходима задержка сигнала на интервал дискретизации и более, что в системах реального времени требует определенных технических решений.

Требованием к выбору частоты дискретизации является внесение минимальных искажений сигнала, которые тем меньше, чем выше частота дискретизации F . Однако, чем больше значение F , тем больше цифровых данных, и тем большее время будет затрачиваться на их обработку. В оптимальном варианте значение частоты дискретизации сигнала F должно быть необходимым и достаточным для обработки информационного сигнала с заданной точностью, т.е. обеспечивающим допустимую погрешность восстановления аналоговой формы сигнала (среднеквадратическую в целом по интервалу сигнала, либо по максимальным отклонениям от истинной формы в характерных информационных точках сигналов).

2. ВИРТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

2.1. Универсальные частотомеры

2.1.1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить виртуальный частотомер* - его принцип работы, органы управления и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы с прибором в различных режимах измерения.

Уровень 2: *Применить универсальный частотомер* для измерения частотно-временных параметров сигналов в одно- и двухканальном режиме, а также при наличии помехи и шума.

Уровень 3: *Изучить и освоить методики поверки частотомера* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку универсального частотомера (Ч) с помощью образцовых виртуальных приборов.

2.1.2. Назначение и принципы построения

Частотомёр (неправ. частотомер) — измерительный прибор для определения частоты периодического процесса или частот гармонических составляющих спектра сигнала. По области применения частотомеры включены в два больших класса средств измерений — электроизмерительные приборы и радиоизмерительные приборы.

Принцип действия электронно-счетных частотомеров (ЭСЧ) основан на подсчете количества импульсов, сформированных входными цепями из периодического сигнала произвольной формы, за определенный интервал времени. Интервал времени измерения также задается методом подсчета импульсов, взятых с внутреннего кварцевого генератора ЭСЧ или из внешнего источника (например стандарта частоты). Таким образом ЭСЧ является прибором сравнения, точность измерения которого зависит от точности эталонной частоты.

ЭСЧ является наиболее распространенным видом частотомеров благодаря своей универсальности, широкому диапазону частот (от долей герца до сотен мегагерц) и высокой точности. Для повышения диапазона до десятков гигагерц используются дополнительные блоки — делители частоты и переносчики частоты.

Некоторые ЭСЧ сочетают в себе электронно-счетный и гетеродинный методы измерения. Это не только расширяет диапазон измерения, но и позволяет определять несущую частоту импульсно-модулированных сигналов, что простым методом дискретного счета недоступно.

НАЗНАЧЕНИЕ: обслуживание, регулировка и диагностика радиоэлектронного оборудования различного назначения, контроль работы радиосистем и технологических процессов

ПРИМЕРЫ: ЧЗ-33, ЧЗ-54, ЧЗ-57, ЧЗ-84

Принцип действия резонансных частотомеров основан на сравнении частоты входного сигнала с собственной резонансной частотой перестраиваемого резонатора. В качестве резонатора может быть использован колебательный контур, отрезок волновода (объемный резонатор) или четвертьволновой отрезок линии. Контролируемый сигнал через входные цепи поступает на резонатор, с резонатора сигнал через детектор подается на индикаторное устройство (гальванометр). Для повышения чувствительности в некоторых частотомерах применяются усилители. Оператор настраивает резонатор по максимальному показанию индикатора и по лимбу настройки отсчитывает частоту.

НАЗНАЧЕНИЕ: настройка, обслуживание, контроль работы приемопередающих устройств, измерение несущей частоты модулированных сигналов

ПРИМЕРЫ: Ч2-33, Ч2-34, Ч2-45, Ч2-55

В основе работы серийных автономных электронно-счетных частотомеров (ЭСЧ) лежит метод дискретного (последовательного) счета. Это, как правило, многофункциональные приборы, измеряющие также период сигнала, длительность импульсов, интервалы времени, отношение частот, разность частот и др. Они измеряют число колебаний, фактически среднюю частоту периодического сигнала, за время счета.

ЭСЧ прямого дискретного счета

В основе работы лежит сравнение (см. рис. 2.1.1 и 2.1.2) измеряемого интервала Δt_x с дискретным интервалом, воспроизводящим единицу времени, $T_{обр} = T_{сч}$. Оценивается во сколько раз измеряемый интервал Δt_x больше $T_{сч} = 1/F_{сч}$.

Реализуется принцип сравнения f_x : определяется во сколько раз неизвестная частота больше образцовой ($f_x > F_{обр}$):

$$f_x = m / T_{обр} = m F_{обр}.$$

Измерения, строго говоря, косвенные. Для получения прямых показаний выбирают $T_{обр} = 10^{-k} с$; $K=0; \pm 1; \pm 2...$ Погрешности измерений f_x включают погрешности меры (стабильность кварцевого генератора) - $\delta_{кв}$ и сравнения (дискретизации):

$$\delta_q = \frac{\Delta}{f_x} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_{обр}} = \pm F_{обр} / f_x$$

Погрешность дискретизации при измерении НЧ может быть очень большой. Например для $f_x = 5 Гц$ и $T_{обр} = 1 с$ получим $\delta_q \approx 20\%$. Для уменьшения погрешности дискретизации:

- увеличивают время счета;
- умножают частоту исследуемого сигнала Nf_x ;
- усредняют результаты многократных измерений;
- измеряют не частоту, а период.

В последнем случае необходима операция деления $f_x = 1/T_x$, поэтому целесообразно использование МПС.

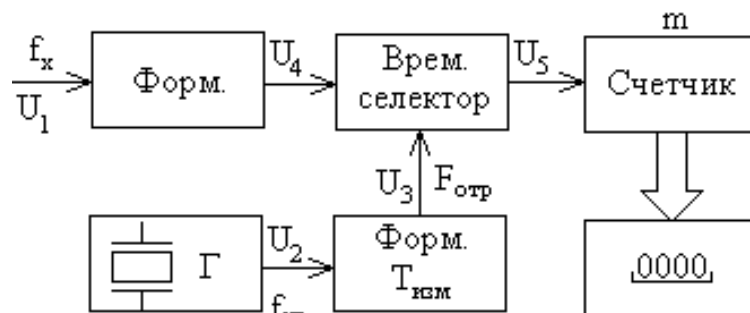


Рис. 2.1.1

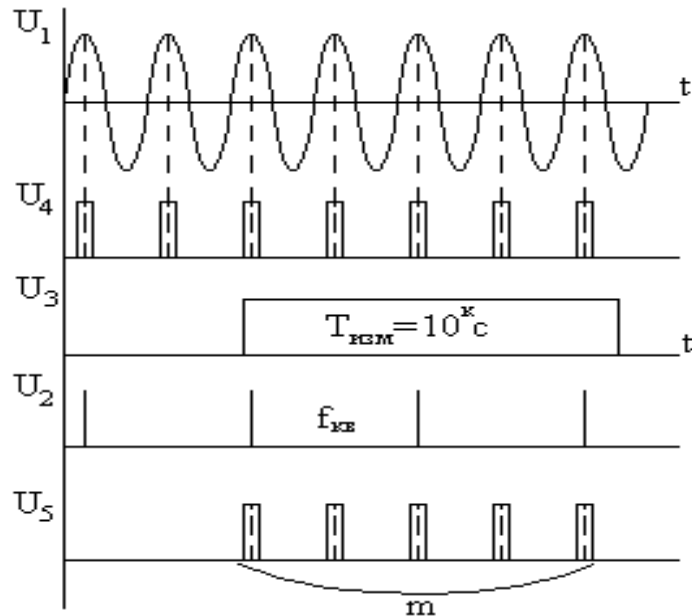


Рис. 2.1.2

ЭСЧ с постоянной погрешностью в диапазоне измерений

Здесь (см. рис. 2.1.3 и 2.1.4) время счета ($T_{обр}$) точно равно целому числу периодов сигнала.

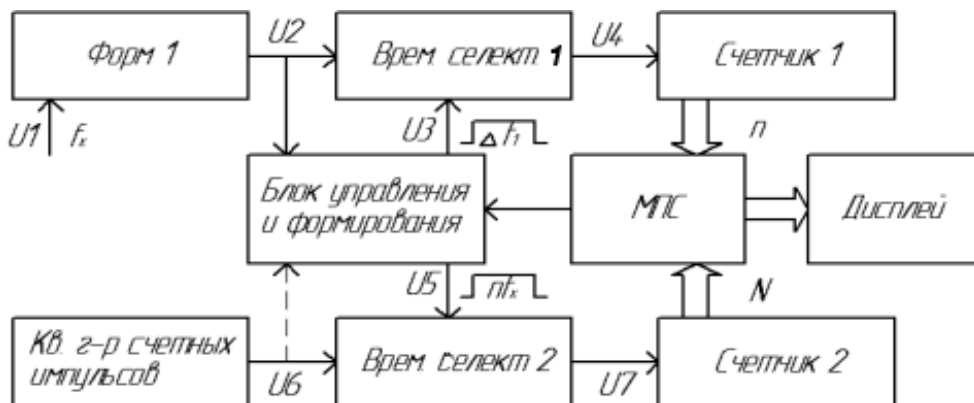
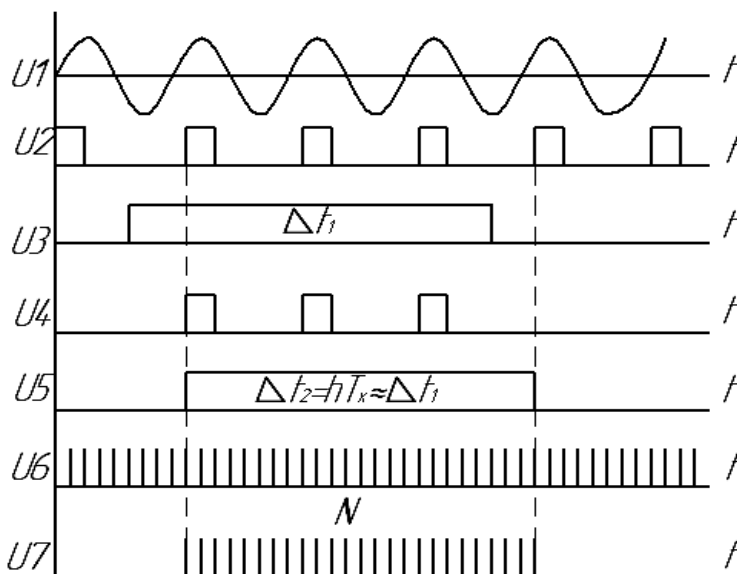


Рис. 2.1.3



В схеме формируются временные ворота Δt_1 и Δt_2 . Причем интервал Δt_1 формируется независимо от входного сигнала, имеющего период В общем случае $\Delta t_1 \neq nT_x$. Число n измеряется.

Временные ворота $\Delta t_2 = nT_x$ строго равны целому числу n периодов сигнала. Эти ворота заполняются стабильной частотой $F_{сч}$ и число импульсов N фиксируется: $\Delta t_2 = NT_{сч}$.

Рис. 2.1.4

При этом погрешность дискретизации постоянна во всем диапазоне.

$$\delta_q = \pm \frac{T_{сч}}{\Delta t_2} \approx \pm \frac{T_{сч}}{\Delta t_1} = \pm \frac{1}{F_{сч} \Delta t_1} = const$$

Для $F_{сч}=100$ МГц и $\Delta t_1=1$ с получим $\delta_y=10^{-8}$.

МПС не только вычисляет, но и выбирает режим, поддиапазон, устанавливает запятую, единицы (Гц, КГц, МГц). Могут измеряться путем обработки – фазовые сдвиги, периоды, усредняются результаты многократных измерений.

В диапазоне СВЧ применяют делители частот, а также методы переноса частоты (МПЧ) и дискретного гетеродинамирования (МДГ). Последние два метода предполагают проведение вычислений, поэтому целесообразно использование МПС.

В обоих методах оценка неизвестной частоты оценивается по формуле:

$f_x = n f_{гет} \pm f_{пч}$, но в методе переносчика частот $f_{пч}=const$ (может быть $f_{пч}=0$), а $f_{зем}=var$, в методе дискретного гетеродинамирования $f_{пч}=var$, а $f_{зем}=const$.

В виртуальных частотомерах могут применяться методы обработки дискретизированных сигналов, как во временной, так и в частотной области. Во временной области используются методы дискретного счета и интерполирования, а в частотной области хорошо работают алгоритмы БПФ.

В двухканальном виртуальном универсальном частотомере, используемом в лабораторных исследованиях, реализован вычислительный принцип измерения частоты и периода сигнала на основе БПФ. Прибор обеспечивает измерение в двух независимых каналах: частоты, периода, отношения частот и периодов, разности частот и периодов.

2.1.3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

1. Общие сведения

КВП содержит 4 двухканальных виртуальных приборов:

1. Генератор сигналов (ГС).
2. Осциллограф (О).
3. Анализатор спектра (АС).
4. Частотомер (Ч).

Двухканальный генератор построен на основе виртуального ЦАП, синтезирующего требуемую форму периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем частотой и уровнем. Измерительные модули имитируют работу автономных приборов в отсутствии и при наличии шумов.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.1.5. Выходные сигналы ГС поданы одновременно на соответствующие входы всех двухканальных приборов.

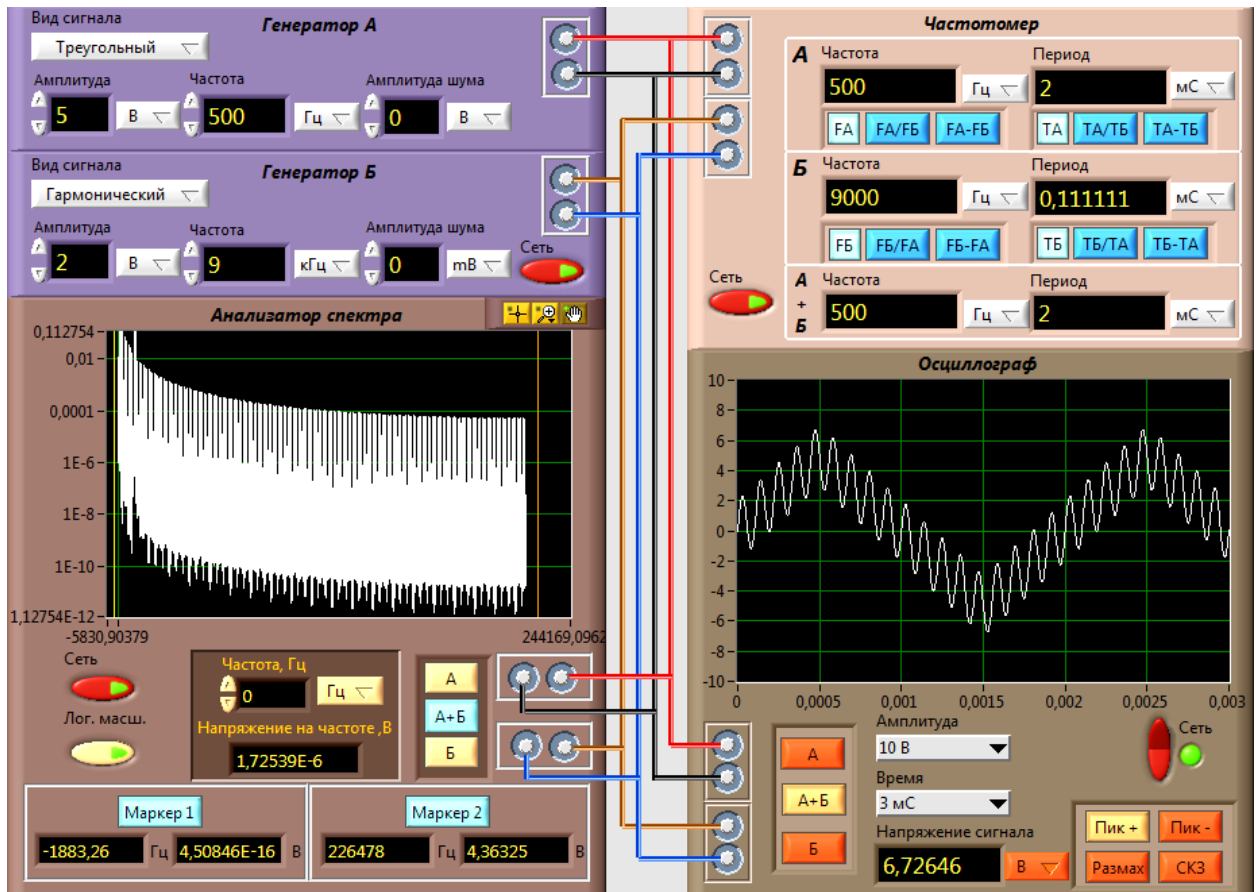


Рис. 2.1.5

Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно включить прибор и установить его в нужный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «Питание» или «Сеть» для включения.

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

1. *Стрелка слева – направо* для однократного запуска.
2. *Свернутые в кольцо две стрелки* для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
3. *Восьмиугольник* (активное состояние красного цвета).

2. Передние панели виртуальных приборов

Генератор сигналов (ГС)

При выполнении лабораторной работы ГС используется в качестве меры частоты (генератор – калибратор), с помощью которой определяются погрешности рабочего средства измерений.

ГС состоит из двух модулей: А и Б. В каждом модуле устанавливается вид сигнала, его амплитуда, частота и уровень шума (см. рис. 2.1.6). Поле индикатора «Амплитуда шума» может использоваться для точной установки амплитуды шума (например, 0,514 В). Для этого курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды шума и нажимается кнопка «Установить». Можно также выполнять точную регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «вверх» и «вниз», расположенные слева от поля ввода. При этом нажатие

кнопки «Установить» не требуется. Амплитуда регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 0,514| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (0,513| ... 0,515 ... 0,516| ...)). Размерность (В, мВ...) выбирается пользователем.



Рис. 2.1.6

Окно ввода «**Частота**» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично точной установке амплитуды шума. Частота устанавливается в пределах от 10 Гц до 50000 Гц.

Окно «**Вид сигнала**» устанавливает вид генерируемого сигнала: гармонический, меандр, треугольный, пилообразный.

Поле ввода «**Амплитуда**» служат для соответственно грубой и точной установки амплитуды сигнала. Методика установки уровня и размерности сигнала аналогична методике для генератора шума.

Осциллограф

Прибор применяется для визуального контроля формы сигнала.

На передней панели (см. рис. 2.1.7) имеется выплывающие меню:

«**Амплитуда**» – выбор пределов отображения уровня сигнала на экране осциллографа (на вертикальной оси).

«**Время**» – выбор предела отображения длительности сигнала или времени развертки на экране осциллографа (на горизонтальной оси).

Имеется также индикатор «**Напряжение сигнала**» с выбором размерности «**В / мВ**».

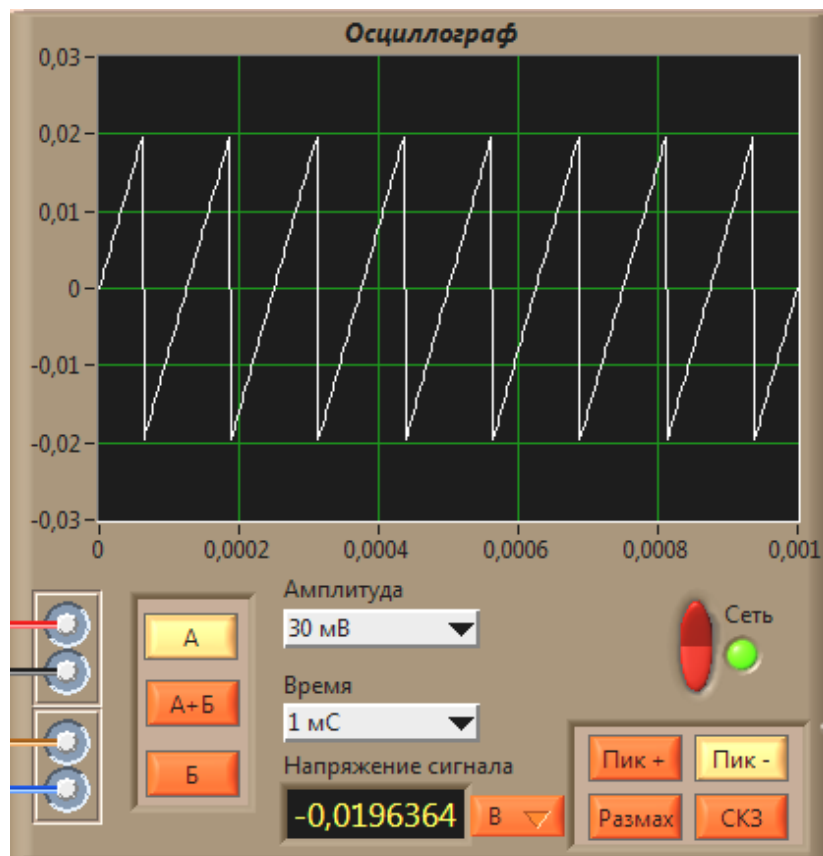


Рис. 2.1.7

Кнопки «А», «Б» и «А+Б» позволяют выбрать рабочий канал сигнала, представляемого на индикаторе осциллографа. Встроенный в осциллограф вольтметр имеет четыре режима измерения с индикацией:

- «Пик →» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «Пик +» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «Размах» - размаха сигнала;
- «СКЗ» - среднеквадратического значения сигнала.

Анализатор спектра

АС применяется для оценки соотношений гармонических и шумовых составляющих спектра сигнала подаваемых на вход частотомера в зонах устойчивой работы, а также в граничных состояниях, где работа неустойчивая.

Прибор (см. рис. 2.1.8) имеет кнопку «Лог. масш.» для переключения отображения вертикальной оси в линейном или в логарифмическом масштабе.

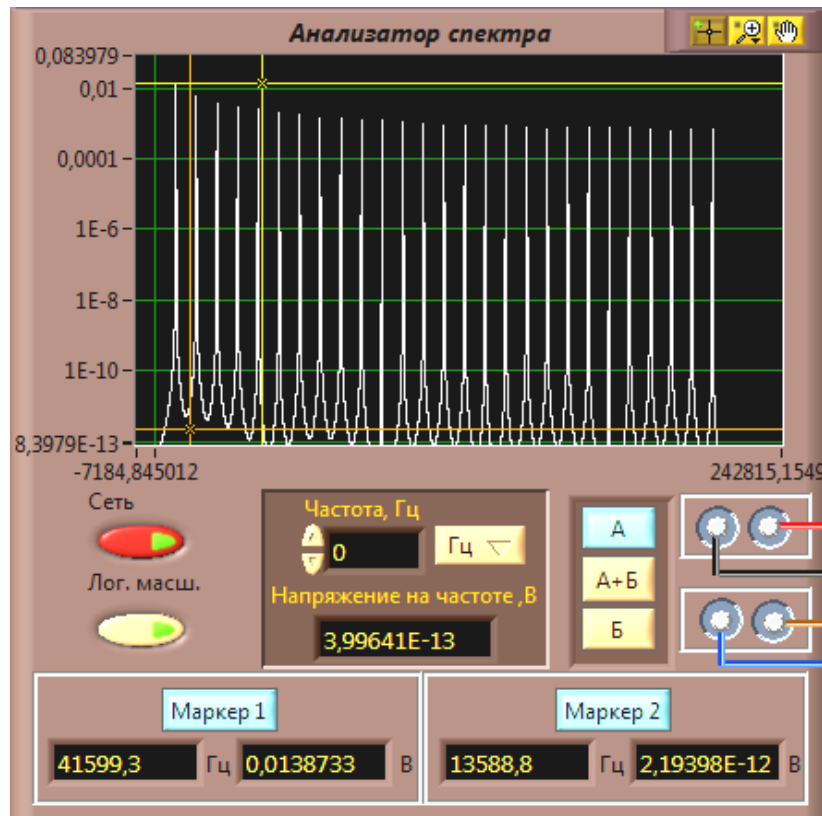


Рис. 2.1.8

Кнопки «А», «Б» и «А+Б» позволяют выбрать рабочий канал сигнала, который представляется на индикаторе АС.

Для более точного определения параметров спектра в конкретных точках имеется возможность включения на панорамном индикаторе одного или двух маркеров уровня и частоты. Маркеры (желтый и оранжевый) включаются кнопками «Маркер 1» и «Маркер 2», а информация об их положении отображается в соответствующих полях внизу лицевой панели.

Для точного измерения уровня частотной компоненты реализованы возможности встроенного селективного вольтметра. Окно ввода «Частота» с выбором размерности «Гц / кГц» позволяет установить частотное окно в интересующем участке рабочего диапазона, в котором на индикаторе «Напряжение на частоте, В» будет показан результат измерения СКЗ сигнала.

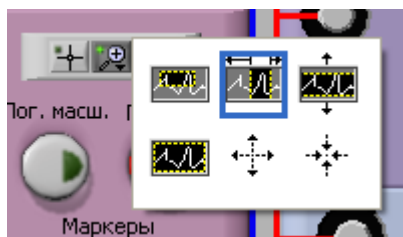
Прибор имеет ряд вспомогательных функций, кнопки вызова которых расположены в верхней правой части его лицевой панели:



- режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



- режим управления положения маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении;



- режимы лупы (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Частотомер

Универсальный частотомер позволяет измерять частоту, период, а также соотношение частот и периодов в двух идентичных каналах «А» и «Б».

В нижнем сегменте передней панели частотомера (см. рис. 2.1.9) представлена его работа при подаче на вход сигнала, являющегося суммой сигналов в каналах «А» и «Б».

Индикаторы «Частота» и «Период» с выбором размерности «Гц / кГц» и «с / мс / мкс» позволяют представить результаты в нужных единицах измерения.



Рис. 2.1.9

Кнопки «FA», «FB», «TA» и «TB» позволяют выбрать индикацию частоты или периода сигнала, кнопками «FA/FB», «TA/TB», «FB/FA» и «TB/TA» включается индикация отношений соответствующих частот или периодов сигналов в каналах. Разность частот и периодов сигналов включается кнопками «FA – FB», «TA – TB», «FB – FA» и «TB – TA».

2.1.4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;

- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

Для определения погрешности измерения частоты сигнала можно сравнить показания Ч с установленным значением частоты образцового ГС. Изменять частоту генератора следует в пределах от 1 Гц до 100 кГц. Относительная погрешность

$$\delta = \left(\frac{f_{\text{Ч}} - f_{\text{ГС}}}{f_{\text{ГС}}} \right) \cdot 100\% .$$

2.1.5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с прибором

1. Пробные измерения при отсутствии шума

Установить в каналах «А» и «Б» ГС амплитуды сигналов 100 и 200 мВ, а частоты 1 и 5 кГц. Подавать с выхода ГС на входы частотомера «А» и «Б» гармонические и импульсные сигналы в разной комбинации. Апробировать режимы работы Ч: измерение частоты, периода, отношения и разности частот и периодов сигналов в каналах. Формы и спектры сигналов контролировать на осциллографе и АС. Сравнить полученные результаты со шкалой ГС. Повторить измерения для других (близких и далеких друг от друга) значений уровней и частот ГС.

2. Пробные измерения при наличии шума

Установить в каналах «А» и «Б» ГС амплитуды шума и сигналов 100 мВ, а частоты сигналов 1 и 10 кГц. Подавать с выхода ГС на входы частотомера «А» и «Б» гармонические и импульсные сигналы в разной комбинации. Апробировать режимы работы Ч: измерение частоты, периода, отношения и разности частот и периодов сигналов в каналах. Формы и спектры сигналов с шумами контролировать на осциллографе и АС. Сравнить полученные результаты со шкалой ГС. Повторить измерения для других (близких и далеких друг от друга) значений уровней сигналов и шумов, а также частот ГС.

Уровень 2: Применение частотомера

1. Калибровка взаимного влияния каналов и проверка рабочего диапазона частот ГС с помощью образцового частотомера

Последовательно устанавливая в каналах «А» и «Б» ГС минимальные средние и максимальные частоты и амплитуды сигналов. В каждом состоянии оценить погрешности формирования частот в каналах ГС и проверить влияние одного канала на работоспособность другого при отсутствии и наличии шумов.

2. Калибровка оси частот каналов ГС с помощью образцового частотомера

Выбрать сетку частот и уровней сигналов для калибровки ГС. Подавать с выхода ГС на входы частотомера «А» и «Б» гармонические сигналы в соответствии с выбранной сеткой частот при амплитуде 100 мВ и отсутствии шумов. На каждой частоте оценить относительную погрешность, свести данные в таблицу и построить для каждого канала графики зависимости погрешности от частоты (лучше в логарифмическом масштабе).

Повторить измерения для тех же условий при наличии шумов и оценить их влияние на погрешности. Формы и спектры сигналов контролировать на осциллографе и АС.

3. *Измерение нестабильности частоты ГС*

Измерение нестабильности провести за 5, 10 и 20 минут в начале, в середине и в конце рабочего диапазона частот ГС. Сравнить значения нестабильности частоты, полученные на разных частотах за разный промежуток времени. Нестабильность частоты оценивается как относительная разница максимального и минимального показания Ч за время наблюдения.

4. *Измерения гармонического сигнала с помехой и/или шумами*

Проверить правильность работы в режиме суммарного сигнала «А + Б». Выяснить, какую частоту измеряет прибор при подаче сложного сигнала с шумами и помехой.

На один вход подать сигнал ГС, а на другой помеху. Изменяя соотношение уровней сигнала и помехи (контроль с помощью АС), измерить в режиме «А + Б» частоту гармонического сигнала при наличии гармонической или импульсной помехи. Оценить при каком соотношении уровней сигнала и помехи уверенно измеряется сигнал. Повторить измерения для близкой и далекой по частоте помехи.

Изменяя соотношение уровней сигнала, помехи и шума (контроль с помощью АС), измерить частоту сигнала. Оценить при каком соотношении уровней сигнала, помехи и шумов уверенно измеряется сигнал.

Уровень 3: Изучение методик и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик частотомера при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

При проведении поверки выполняются следующие операции:

1. Внешний осмотр.
2. Опробование.
3. Определение метрологических характеристик прибора:
 - определение погрешностей измерения;
 - определение диапазона рабочих частот и уровней сигнала.

Учебная поверка частотомера:

1. *Проверить работоспособность* (опробование) Ч во всех режимах измерения. Выбрать сетку частот и периодов, отношения частот и периодов, разницы частот и периодов для поверки Ч.
2. *Оценить минимальный уровень сигнала* устойчивого измерения в диапазоне рабочих частот Ч.
3. *Определить погрешности* измерения частот и периодов, отношения частот и периодов, разницы частот и периодов с помощью образцового ГС в диапазоне значений от 1 мВ до 100 В и в диапазоне частот сигнала 1 Гц – 100 кГц.
4. *Определить реальный диапазон рабочих частот* Ч по критерию допустимых значений относительной основной погрешности измерения частоты и периода.
5. *Определение помехоустойчивости* к гармонической, импульсной и шумоподобной помехам с проверкой правильного измерения, когда уровень измеряемой компоненты выше уровня любой помеховой компоненты, а спектры сигнала и помехи не налагаются друг на друга.

При определении устойчивости к гармонической и импульсной помехе контроль уровней и близость по частоте измеряемой и паразитной составляющих следует осуществлять с помощью АС.

2.1.6. Содержание отчета

1. Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
2. Задачи лабораторной работы.
3. Теоретические сведения (по усмотрению студента).
4. План экспериментальных исследований.
5. Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
6. Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

2.1.7. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Что измеряют с помощью Ч?
2. Чем отличаются виртуальные Ч от автономных?
3. Поясните метод дискретного счета.
4. Какова структура погрешности для метода дискретного счета?
5. Как работает ЭСЧ с постоянной погрешностью во всем диапазоне частот?
6. Какие измерения можно проводить с помощью исследуемого Ч?
7. Как работает виртуальный Ч?
8. Когда нужны двухканальные Ч?
9. Какие приборы использовались при исследованиях и для чего?
10. Какие органы управления имеет Ч?
11. Что показали пробные измерения?

Дополнительные вопросы для уровня 2

12. Как оценить взаимное влияние каналов ГС?
13. Как проверить рабочий диапазон частот ГС?
14. Как откалибровать ось частот ГС?
15. Как выбрать сетку частот и уровней сигналов для калибровки ГС?
16. Для чего используется в работе осциллограф и АС?
17. Как работает Ч при подаче на его вход комбинированного сигнала?
18. Какую частоту измеряет прибор при подаче сложного сигнала с шумами и помехой?
19. Как оценить нестабильность частоты во времени?

Дополнительные вопросы для уровня 3

20. Какими приборами можно проводить поверку?
21. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке Ч?
22. Как определить реальный диапазон рабочих частот и уровней Ч?
23. Как оценить минимальный уровень сигнала устойчивого измерения?
24. При каком соотношении уровней сигнала, помехи и шумов уверенно измеряется сигнал?
25. Как проверить влияние наложения спектров сигнала и помехи?
26. Поясните экспериментальные результаты.

2.2. Вольтметры

2.2.1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить вольтметры*, их принципы работы и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы в различных режимах измерения.

Уровень 2: *Применить вольтметры* для исследования нестабильности выходного напряжения во времени и неравномерности уровня при перестройке частоты генератора сигнала (ГС) с разными формами выходного напряжения.

Уровень 3: *Изучить и освоить методику поверки вольтметра* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку аналогового и цифрового вольтметров.

2.2.2. Назначение и виды вольтметров

Вольтметр (вольт + гр. μέτρον измеряю) — измерительный прибор непосредственного отсчёта для определения напряжения или ЭДС в электрических цепях. Подключается параллельно нагрузке или источнику электрической энергии.

Вольтметры являются основными приборами при исследовании радиоустройств и режимов их работы. В отдельные виды выделены вольтметры постоянного (В2) и переменного напряжения (В3), импульсные (В4) и селективные приборы (В6).

Универсальные вольтметры (В7) могут измерять постоянные и переменные напряжения, активные сопротивления и токи.

В соответствии с измеряемым параметром различают вольтметры амплитудного значения (пиковые), среднего, средневыпрямленного и среднеквадратического (действующего или эффективного) значений (СКЗ).

ПРИМЕРЫ: В4-24, В3-49, В3-63

В настоящее время разработаны новые типы вольтметров, такие как В7-83 и ВК3-78, с характеристиками, допускающими их применение в качестве рабочих эталонов.

Принципиальные различия между эталонными и рабочими средствами измерений заключаются в том, что первые официально утверждены и могут использоваться для поверки, в то время как рабочие предназначены только для измерений.

Государственная поверочная схема в общем случае включает государственные эталоны, вторичные эталоны, эталонные и рабочие средства измерений, а также методы передачи размера единиц (методы поверки).

По принципу действия вольтметры разделяются на электромеханические и электронные. Приборы для измерения напряжения могут быть аналоговыми, цифровыми, вычислительными и виртуальными. В процессе измерений могут оцениваться:

1. Мгновенные значения сигнала в определенные моменты времени.
2. Амплитудные значения – максимумы мгновенных значений сигналов, представляемых в аналитическом виде.
3. Пиковые значения – максимумы и минимумы полуволн несинусоидальных колебаний, не представляемых в аналитическом виде (для симметричных полуволн амплитуда равна пику).
4. Размах – сумма пиковых значений.
5. Среднеквадратическое за период напряжение

$$U_{CK} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}.$$

Для гармонического колебания $U(t) = U_m \sin(\omega t)$ получим $U_{CK} = U_m / \sqrt{2}$, а для негармонического U_{CK} определяется амплитудами гармоник (U_i) и постоянной составляющей (U_o) сигнала:

$$U_{CK} = \sqrt{U_o^2 + U_1^2 / 2 + \dots + U_n^2 / 2}$$

6. Среднее значение (среднеарифметическое за период)

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt.$$

7. Средневыпрямленное значение (среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений)

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt.$$

Для различных законов изменения напряжения связь амплитудного значения и среднеквадратического определяется коэффициентом амплитуды

$$K_a = U_m / U_{CK}.$$

Связь среднеквадратического значения (СКЗ) и средневыпрямленного определяется коэффициентом формы:

$$K_f = U_{CK} / U_{CP}.$$

Для гармонического закона $K_{az}=1,41$; $K_{фz}=1,11$.

Для пилообразного - $K_{an}=1,73$; $K_{fn}=1,16$.

Для меандра - $K_{am}=1$; $K_{fm}=1$.

Типовая структурная схема вольтметра приведена на рис. 2.2.1.



Рис. 2.2.1

В отличие от амперметра вольтметр включается параллельно источнику измеряемого напряжения, как показано на рис. 2.2.2. Здесь напряжение измеряется на сопротивлении делителя, и входное сопротивление прибора должно быть значительно больше сопротивления источника напряжения. Вольтметр не должен шунтировать источник.

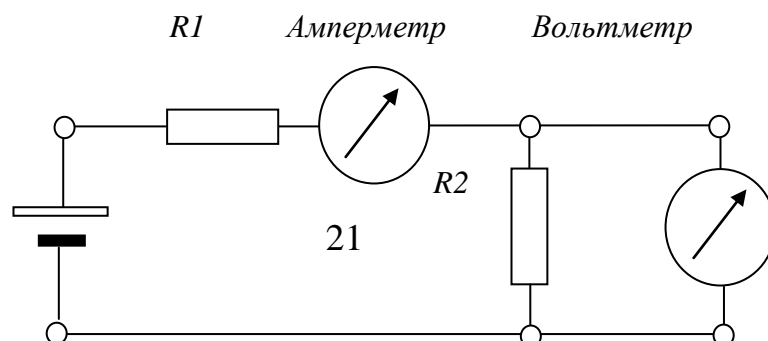


Рис. 2.2.2

Простейший многопредельный вольтметр может быть построен на основе электромеханического индикатора и добавочных сопротивлений, расширяющих пределы измерений и увеличивающих входное сопротивление прибора. Электронные вольтметры обладают большим входным сопротивлением, достигающим на постоянном токе 10 МОм, имеют широкий частотный диапазон до 3 ГГц и высокую точность измерения.

Основным узлом цифровых приборов является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий непрерывную измеряемую величину в цифровой код. В серийных цифровых вольтметрах используются время-импульсные, частотно-импульсные и кодово-импульсные АЦП.

В виртуальных вольтметрах могут применяться методы обработки дискретизированных сигналов, как во временной, так и в частотной области. Во временной области используются методы численного интегрирования, в частотной - хорошо работают алгоритмы БПФ.

В лабораторном виртуальном цифровом вольтметре (ЦВ) реализован вычислительный принцип измерения размаха сигнала, его среднеквадратического и пиковых значений. Прибор может считаться образцовым (эталонным), он измеряет переменное напряжение произвольной формы в диапазоне значений от 10 мВ до 50 В на частотах от 10 до 50000 Гц. Виртуальный аналоговый вольтметр (АВ) позволяет измерять среднеквадратическое переменное напряжение произвольной формы в диапазоне от 30 мВ до 300 В и диапазоне частот 10 ... 10000 Гц.

Проверку вольтметра, можно осуществлять по эталонным мерам (эталонному генератору – калибратору), по эталонному прибору (образцовому ЦВ) или по эталонному прибору и эталонным мерам (если прибор имеет недостаточно широкий диапазон измерений).

2.2.3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

1. Общие сведения

КВП содержит четыре одноканальных прибора:

1. Генератор сигналов (ГС).
2. Осциллограф (О).
3. Цифровой вольтметр (ЦВ).
4. Аналоговый вольтметр (АВ).

Генератор построен на основе виртуального ЦАП, синтезирующего требуемую форму периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем частотой и уровнем. Измерительные модули имитируют работу автономных приборов.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой виртуальных приборов (ВП). Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.2.3. Выходной сигнал ГС подан одновременно на входы всех приборов.

Передняя панель каждого ВП имеет типовые органы управления, с помощью которых можно установить его в нужный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «Питание» или «Сеть» для включения.

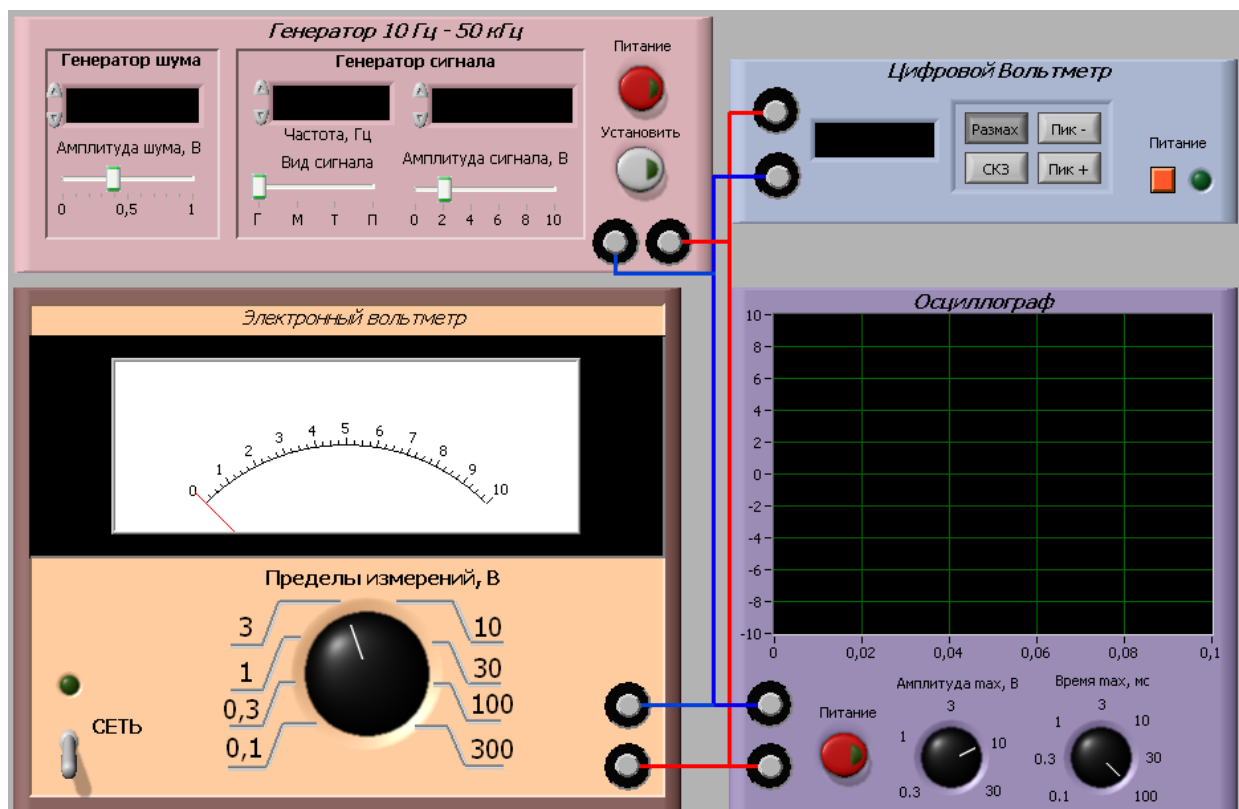


Рис. 2.2.3

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
- **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

2. Передние панели комплекса виртуальных приборов (КВП)

Генератор сигналов (ГС)

ГС состоит из двух модулей: «Генератор шума» и «Генератор сигнала» (см. рис. 2.2.4). Ползунок «Амплитуда шума, В» служит для грубой установки на индикаторе уровня шума в пределах от 0 до 1 В. Поле индикатора может использоваться для точной установки амплитуды шума (например, 0,514 В). Для этого курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды шума и нажимается кнопка «Установить». Можно также выполнять точную регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «*вверх*» и «*вниз*», расположенные слева от поля ввода. При этом нажатие кнопки «Установить» не требуется. Амплитуда регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 0,514| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (0,513| ... 0,515 ... 0,516| ...)).



Рис. 2.2.4

Окно ввода «**Частота, Гц**» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично точной установке амплитуды шума. Частота устанавливается в пределах от 10 Гц до 50000 Гц.

Ползунок «**Вид сигнала**» устанавливает вид генерируемого сигнала: «Г» – гармонический, «М» – меандр, «Т» – треугольный, «П» – пилообразный.

Ползунок «**Амплитуда сигнала, В**» и поле ввода над ним служат для соответственно грубой и точной установки амплитуды сигнала в пределах от 0 до 10 В. Методика установки аналогична методике для генератора шума.

Цифровой вольтметр

Вольтметр имеет статус образцового СИ и реализует четыре режима измерения (см. рис. 2.2.5) с индикацией:

- «**Пик -**» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «**Пик +**» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «**Размах**» - размаха сигнала;
- «**СКЗ**» - среднеквадратического значения сигнала.

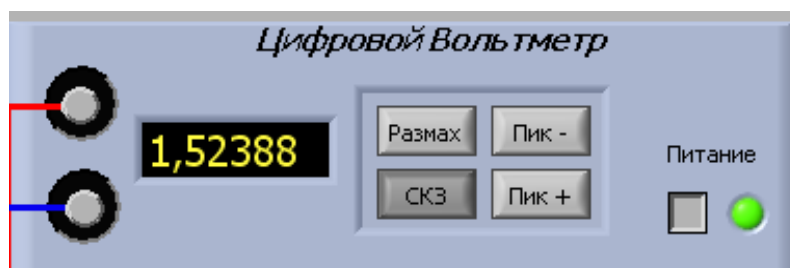


Рис. 2.2.5

При выполнении лабораторной работы с помощью ЦВ методом сличения определяется погрешность рабочего средства измерений (АВ).

Аналоговый вольтметр

Аналоговый вольтметр (см. рис. 2.2.6) используется для прямых измерений среднеквадратического значения переменного напряжения. При выполнении работы он играет роль рабочего средства измерений, погрешность которого подлежит определению.



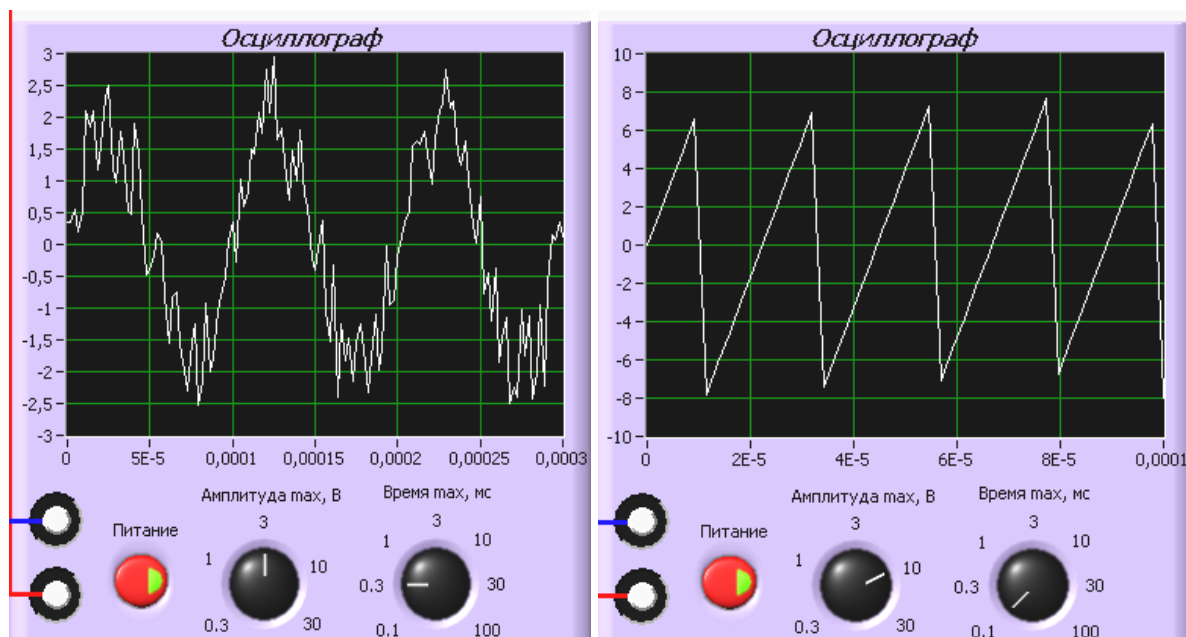
Рис. 2.2.6

Осциллограф (см. рис. 2.2.7) выполняет функцию вспомогательного панорамного индикатора формы испытательного сигнала.

На передней панели имеется две регулировочные ручки:

«Амплитуда **мах, В**» – устанавливает пределы отображения уровня сигнала в вольтах (от $\pm 0,3$ до ± 30 В) на экране осциллографа (вертикальная ось).

«Время **мах, мс**» – устанавливает время развертки в миллисекундах (от 0,1 до 100 мс) или предел отображения длительности сигнала на экране осциллографа (горизонтальная ось).



А) Гармонический сигнал с шумом

В) Пилообразный сигнал

2.2.4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям аналогового и цифрового вольтметров выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

2.2.5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с модулями КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки работы в различных режимах измерения путем пробных измерений:

3. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать сетку частот и уровней ГС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов. Обычно выбираются крайние точки диапазона и рабочие значения в середине диапазона.

4. Пробные измерения сигналов разных форм без шумов и с шумами

Измерить выходные сигналы ГС с помощью АВ и ЦВ во всех режимах работы последнего (СКЗ, Размах, Пик +, Пик -). Сравнить полученные результаты, контролируя форму сигналов на экране осциллографа. Изменяя форму, уровень шумов, амплитуду и частоту сигнала, проследить за изменениями показаний приборов и убедиться в их работоспособности.

Уровень 2: Применение вольтметров

Испытуемым является ГС, а ЦВ является образцовым прибором и может применяться для исследования нестабильности выходного напряжения во времени и неравномерности уровня при перестройке частоты ГС с разными формами выходного напряжения. Перед испытаниями необходимо выбрать сетку частот и уровней ГС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

1. Измерение выходного уровня ГС и его неравномерности при перестройке частоты, а также при наличии и отсутствии шумов:

а) установите уровень шума и амплитуду ГС равными нулю, а частоту гармонического сигнала - 10 Гц;

б) увеличивая выходное напряжение ГС от нуля до верхнего предела (снизу вверх), а затем, плавно уменьшая от верхнего предела до нуля (сверху вниз), фиксируйте показания ЦВ и оцените погрешность установки уровня ГС (амплитудная характеристика ГС);

в) повторите пп. а)...б), выбрав другие частоты ГС (до 50000 Гц);

г) повторите пп. а)...в), выбрав, установив различные уровни шумов;

д) по полученным данным для каждой рабочей частоты и фиксированного уровня шума и сигнала выбрать максимальное (U_{\max}) и минимальное (U_{\min}) показание ЦВ (частотная характеристика ГС);

е) оценить неравномерность в абсолютном и относительном масштабе:

$$\Delta = U_{\max} - U_{\min}, \text{ В}; \quad \delta = 200(U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min}), \text{ \%};$$

ж) построить графики относительной неравномерности (в %) в зависимости от частоты для нулевого и максимального шума;

з) повторите пп. а)...ж), выбрав другой вид сигнала.

2. Измерение нестабильности уровня ГС:

а) оценить с помощью ЦВ нестабильность амплитуды во времени за 5, 10 и 20 минут в начале, в середине и в конце рабочего диапазона частот ГС для разных форм сигналов при отсутствии и наличии шумов;

б) выбрать максимальное и минимальное значения (U_{\max} и U_{\min});

в) оценить нестабильность в абсолютном и относительном масштабе:

$$\Delta = U_{\max} - U_{\min}, \text{ В}; \quad \delta = 200(U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min}), \text{ \%};$$

г) сравнить значения нестабильности уровня, полученные на разных частотах за разный промежуток времени.

3. Оценка значения коэффициента амплитуды с помощью ЦВ:

а) собрать массив данных для оценки коэффициента амплитуды для разных видов сигналов при отсутствии и наличии шумов на средней и крайних частотах ГС;

б) оценить значения коэффициента амплитуды $K_a = U_m / U_{СК}$.

Уровень 3: Изучение методик и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик аналогового и цифрового вольтметров при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

Поверку ЦВ можно осуществлять по эталонной мере (эталонному генератору – калибратору), а поверку АВ - по эталонному прибору (образцовому ЦВ). При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

1. Внешний осмотр.
2. Опробование.
3. Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка ЦВ

1. Проверить работоспособность (опробование) ЦВ во всех режимах измерения. Выбрать сетку частот и уровней для поверки ЦВ.
2. Определить погрешности измерения амплитуды и СКЗ переменного напряжения сигналов различного вида с помощью образцового ГС в диапазоне значений от 10 мВ до 10 В и в диапазоне частот сигнала 10 – 50000 Гц.
3. Определить реальный диапазон рабочих частот ЦВ по критерию допустимой погрешности на верхней и нижней границе. Предел допустимых значений относительной основной погрешности измерения переменного напряжения примем $\delta_{\text{доп}} = \pm 0,5\%$.

Учебная поверка АВ

1. Проверить работоспособность (опробование) АВ, выбрать сетку частот и уровней.

2. *Определить погрешности* измерения СКЗ переменного напряжения с помощью образцового ЦВ в диапазоне значений от 10 мВ до 10 В и в диапазоне частот сигнала 10 – 50000 Гц.
3. *Определить реальный диапазон рабочих частот* ЦВ по критерию допустимой погрешности на верхней и нижней границе. Предел допустимых значений относительной основной погрешности измерения переменного напряжения примем равным цене деления шкалы АВ

$$\delta_{\text{доп}} = \pm(1 + U_{\text{П}}/U_{\text{X}})\%,$$

где $U_{\text{П}}$ – предел измерения, В; U_{X} – измеряемое напряжение, В.

2.2.6. Содержание отчета

1. Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
2. Цели и задачи лабораторной работы.
3. Теоретические сведения (по усмотрению студента).
4. План экспериментальных исследований.
5. Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
6. Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

2.1.7. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Что измеряют с помощью вольтметров?
2. Чем отличаются виртуальные вольтметры от автономных?
3. Какие измерения можно проводить с помощью исследуемого ЦВ?
4. Какие виды вольтметров выпускаются серийно?
5. Как обозначаются вольтметры постоянного и переменного напряжения, импульсные и селективные приборы?
6. Что делает аналого-цифровой преобразователь?
7. Какие виды АЦП используются в серийных вольтметрах?
8. Как работает виртуальный вольтметр?
9. Какие виртуальные приборы использовались при исследованиях и для чего?
10. Какие органы управления имеет ЦВ и АВ?
11. Какие режимы работы ЦВ и АВ позволяет исследовать КВП?
12. Поясните экспериментальные результаты (по каждому пункту отдельно).
13. Что такое поверка и зачем она выполняется?
14. Дайте определение следующих понятий: погрешность средства измерений, класс точности средства измерений, погрешность поверки.

Дополнительные вопросы для уровня 2

15. Как оценить неравномерность выходного напряжения при перестройке частоты генератора?
16. Как оценить нестабильность выходного напряжения во времени?
17. Как оценить значения коэффициентов амплитуды и формы для сигналов различного вида?

18. Что покажет прибор в режимах «СКЗ» и «Пик +», если на его вход подать меандр с амплитудой 1 В?
19. Что покажет прибор в режимах «СКЗ» и «Пик +», если на его вход подать пилообразный сигнал с амплитудой 1 В?
20. Что покажет прибор в режимах «СКЗ» и «Пик +», если на его вход подать шумовой сигнал с амплитудой 1 В?
21. Что покажет прибор в режимах «СКЗ» и «Пик +», если на его вход подать треугольный сигнал и шум с амплитудой 1 В?
22. Что покажет прибор в режимах «СКЗ» и «Пик +», если на его вход подать меандр и шум с амплитудой 1 В?

Дополнительные вопросы для уровня 3

23. Каким образом осуществляется передача размера единиц от эталонов образцовым и рабочим средствам измерений?
24. Что такое эталон, образцовое средство измерений, рабочее средство измерений?
25. Какие способы поверки существуют? Чем определяется выбор того или иного способа поверки?
26. Какими критериями необходимо руководствоваться при выборе образцовых средств измерений, с помощью которых поверяются рабочие средства измерений?
27. Почему в данной работе ЦВ был выбран в качестве образцового?
28. Какими приборами можно проводить поверку?
29. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке ЦВ?
30. Как определить реальный диапазон рабочих частот ЦВ?
31. Поясните результаты поверки ЦВ.
32. Поясните результаты поверки АВ.

2.3. Осциллографы

2.3.1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить осциллографы* - их принципы работы, органы управления и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы с прибором.

Уровень 2: *Применить осциллограф* для исследования гармонического, импульсного (прямоугольного, треугольного и пилообразного), шумового и комбинированного сигнала.

Уровень 3: *Изучить и освоить методики поверки осциллографа* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку с помощью образцовых виртуальных приборов.

2.3.2. Назначение, схемы, принципы работы и возможности

Общие сведения

Осциллограф предназначен для наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов. Он позволяет осуществлять качественное и количественное исследование сигнала во времени.

Цифровой запоминающий осциллограф предназначен для мониторинга, измерения временных и амплитудных параметров, а также регистрации как случайных, так и периодических сигналов. Он позволяет обеспечивать запись одиночных и периодических сигналов с частотой выборки до сотен мегагерц. В режиме стробирования периодического сигнала полоса пропускания может достигать единиц гигагерц. ПК обеспечивает

возможности длительного мониторинга и обработки сигнала с использованием интерполяции, фильтрации и т. д.

Осциллограф – один из наиболее универсальных приборов, позволяющий измерять самые разнообразные характеристики и параметры сигналов и цепей (частоту, период, скважность, амплитуду, длительность фронта, спад вершины и др.). Двухлучевой осциллограф позволяет оценить разность фаз сигналов, задержки и др.

Подгруппы осциллографов: С1 – универсальные, С7 – стробоскопические, С8 – запоминающие, С9 – специальные.

Осциллограф характеризуют следующие параметры:

- количество каналов (1,2,4...) одновременно исследуемых сигналов;
- ширина полосы пропускания (универсальные - до десятков МГц, высокочастотные - до сотен МГц, стробоскопические - до десятков ГГц);
- чувствительность канала вертикального отклонения (мВ/дел);
- индикация (электроннолучевая трубка - ЭЛТ, жидкокристаллический индикатор - ЖКИ);
- условия эксплуатации и т.д.

Универсальный осциллограф

Типовая схема (см. рис. 2.3.1) содержит следующие модули:

1. Входной блок включает attenuаторы, цепи согласования и развязки.
2. Линия задержки (ЛЗ) обеспечивает задержку сигнала по отношению к развертке.
3. ГЛИН - генератор линейно изменяющегося напряжения (генератор развертки по X для горизонтального отклонения луча).
4. Система синхронизации вырабатывает синхросигнал начала развертки из сигнала внешнего запуска, внутреннего, от сети или др.
5. ПУ – предварительный усилитель.
6. УВО и УГО – усилители вертикального и горизонтального отклонения.
7. Устройства управления яркостью (канал Z).
8. ЭЛТ - электроннолучевая трубка.

Не показаны средства измерения параметров сигнала, которые позволяют измерить напряжение (уровень) и интервалы времени. Это могут быть калибраторы усиления и развертки, с помощью которых проверяют и осуществляют градуировку экрана по X и Y. В простейшем случае применяют генераторы сигналов с известными параметрами: длительностью импульсов и амплитудой (например, меандр: 10 мс, 100 мВ).

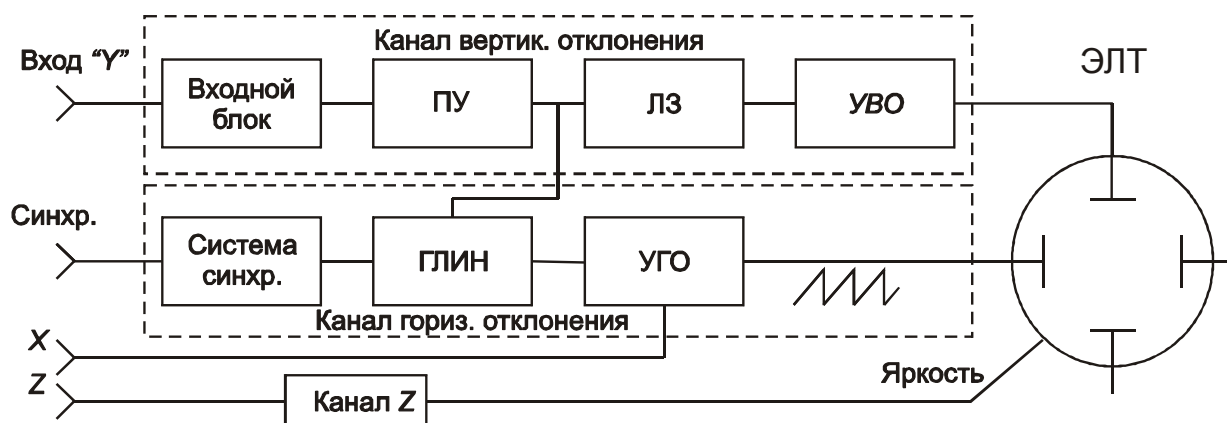


Рис. 2.3.1

В более сложных приборах могут использоваться встроенные цифровые измерители уровней и длительностей по положению меток (или линий) времени и уровня. Именно так сделано в лабораторном макете.

На вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ подается испытуемое управляющее напряжение с выхода усилителя вертикального отклонения (УВО). Его мгновенное значение пропорционально исследуемому сигналу на входе соответствующего канала вертикального отклонения «Y».

На горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ подается управляющее напряжение с выхода УГО. Так как напряжение развертки имеет линейную пилообразную форму, луч на экране ЭЛТ будет перемещаться в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. В результате получится график зависимости уровня исследуемого сигнала от времени в прямоугольных координатах - осциллограмма.

Входной блок служит для согласования входа осциллографа с выходом источника сигнала. Линия задержки и система синхронизации служат для координации моментов прихода управляющих напряжений на вертикальные и горизонтальные пластины ЭЛТ.

Погрешность воспроизведения формы исследуемого сигнала на экране ЭЛТ будет определяться:

1) точностью, с которой соблюдается отношение пропорциональности между текущим значением исследуемого напряжения и значением управляющего напряжения, приложенного к вертикальным пластинам;

2) точностью, с которой соблюдается постоянство скорости луча при его перемещении вдоль горизонтальной оси ЭЛТ.

Для нормирования характеристик осциллографа используется коэффициент отклонения канала «Y» - K_g , называемый также коэффициентом вертикального отклонения, и коэффициент развертки - K_p .

Под коэффициентом отклонения понимают отношение значения напряжения U на входе канала вертикального отклонения к величине вертикального перемещения h луча на экране ЭЛТ:

$$K_g = U / h.$$

Эта величина имеет размерность В/см, мВ/см или В/дел, мВ/дел. Погрешность K_g нормируется в соответствии с классом осциллографа (см. табл. 1).

Под коэффициентом развертки K_p понимают отношение длительности прямого хода T_n луча на экране ЭЛТ к величине горизонтального перемещения L луча на экране ЭЛТ:

$$K_p = T_n / L$$

Эта величина имеет размерность время/см, или время/дел. Погрешность нормируется в соответствии с классом осциллографа (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметр	Норма для осциллографа класса			
	I	II	III	IV
Основная погрешность коэффициента отклонения, % не более	2,5	4	8	10

Основная погрешность коэффициента развертки, % не более	2,5	4	8	10
--	------------	----------	----------	-----------

Полоса пропускания осциллографа

Приборы, которые измеряют переменные сигналы, имеют некоторую максимальную частоту, выше которой точность измерения ухудшается. Эта частота определяет полосу пропускания прибора и обычно определяется, как частота, на которой амплитуда сигнала уменьшается на 3дБ.

Для цифрового осциллографа характерны две принципиально разные полосы пропускания: полоса для повторяющихся сигналов и полоса для однократных сигналов. Цифровые осциллографы, работая в режиме стробирования, имеют полосу пропускания для повторяющихся сигналов гораздо более высокую, чем может обеспечить их частота дискретизации. При этом полоса пропускания повторяющихся сигналов становится характеристикой аналоговых усилителей осциллографа.

Полоса пропускания для непериодических (однократных) сигналов, которые оцифровываются за один такт, зависит от частоты дискретизации осциллографа. Соотношение между частотой дискретизации и полосой пропускания для однократных сигналов может изменяться. Если осциллограф имеет встроенные средства интерполяции, тогда это соотношение равно 4:1. В противном случае, используется соотношение 10:1, когда на периоде будет не менее 10 точек дискретизации.

Полоса пропускания аналогового осциллографа должна быть по крайней мере в три раза больше по частоте по сравнению с основной частотной исследуемого сигнала. Чтобы провести точные измерения амплитуды, полоса пропускания осциллографа должна быть в десять раз больше, чем частота измеряемого сигнала.

Для измерений временных параметров справедливо следующее правило: чем больше соотношение длительности фронта сигнала (T_C) и фронта осциллографа (T_Φ), тем меньше ошибка измерения (см. табл. 2). Чем больше полоса пропускания осциллографа, тем короче фронт и тем более точными будут результаты измерений.

Таблица 2

Соотношение T_C к T_Φ	Вычисленная ошибка
1:1	41.4%
3:1	5.4%
5:1	2.0%
10:1	0.5%

Методы измерений

1. *Метод калиброванных шкал и разверток* - основной метод непосредственной оценки. Процесс измерения сводится к подсчету числа клеток по вертикали (амплитуда) и горизонтали (длительность).

2. *Компенсационный метод* – метод сравнения с мерой. Индикатор осциллографа является нуль – индикатором. При этом можно использовать самую чувствительную шкалу осциллографа, подавая на дифференциальный вход компенсирующий сигнал.

Измерение значения напряжения методом непосредственной оценки сводится к определению вертикальных размеров изображения h на экране ЭЛТ. Значение измеряемого напряжения

$$U_x = K_g \times h .$$

По сути, осциллографические измерения методом непосредственной оценки являются косвенными измерениями. Следовательно, предел относительной погрешности результатов измерения напряжения можно оценить по формуле:

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta h}{h}$$

Погрешность коэффициента отклонения - инструментальная погрешности. Она зависит, в первую очередь, от толщины линии луча на экране ЭЛТ. Его ширина составляет от 0,2 мм до 1,0 мм. Погрешность определения размеров по оси Y также по своей сути является инструментальной, но в нее входит и погрешность параллакса, поэтому обычно ее называют погрешностью отсчета. Она тем меньше, чем больше размер изображения, наблюдаемого на экране, и чем тоньше луч. Современные осциллографы имеют поперечные размеры экрана 10-15 см, типовая погрешность отсчета для них составляет от 0,5% до 2%.

При измерении напряжения с помощью осциллографа методом сравнения с мерой используется разновидность метода, известная как метод замещения. Метод замещения состоит в том, что измеряемая величина замещается известной величиной воспроизводимой мерой (например, встроенным калибратором амплитуды). Напряжение на выходе калибратора, при котором показания осциллографа такие же, как при измерении искомого напряжения, равно измеряемому значению.

Измерение периода T_X методом непосредственной оценки выполняется практически так же, как измерение U_x , и сводится к определению K_p , являющегося ценой деления шкалы, и к определению горизонтальных размеров изображения L_X на экране ЭЛТ. Для калибровки используется калибратор длительности. Оценка длительности измеряемого периода производится по формуле:

$$T_X = K_p \times L_X.$$

Измерения косвенные, и предел относительной погрешности результатов измерения периода вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta K_p}{K_p} + \frac{\Delta L}{L}.$$

Значение частоты определяется по формуле: $f = 1/T$. Для определения значения круговой (циклической) частоты ω служит соотношение $\omega = 2\pi f$.

Угол сдвига фаз представляет собой модуль разности фаз двух гармонических сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$ одинаковой частоты. Таким образом, если $U_1(t) = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1)$, а $U_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2)$, то согласно определению угол сдвига фаз φ равен: $\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$. При $\varphi = 0$ гармонические напряжения называются синфазными, при $\varphi = \pm\pi$ - противофазными.

Измерение угла сдвига фаз методом непосредственной оценки может выполняться способом линейной развертки. В первом случае на экране дулулучевого осциллографа получают изображение кривых $U_1(t)$ и $U_2(t)$, взаимное расположение которых несет исковую информацию (см. рис. 2.3.2).

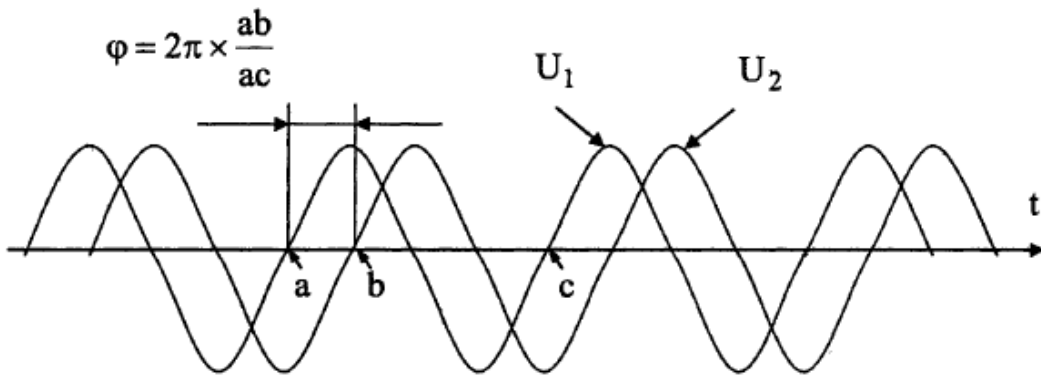


Рис. 2.3.2

Значение угла сдвига фаз φ в градусах вычисляют по формуле:

$$\varphi = 2\pi \times \frac{ab}{ac},$$

где ab и ac - длина соответствующих отрезков осциллограммы.

Измерения косвенные, следовательно, предел относительной погрешности измерения угла сдвига фаз можно вычислить по формуле:

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta ab}{ab} + \frac{\Delta ac}{ac}.$$

В целом абсолютная погрешность измерения этим методом составляет, как правило, $\pm(5^\circ \div 10^\circ)$.

При измерении угла сдвига фаз путем сравнения с мерой используется так называемый нулевой метод, когда в цепь опорного сигнала включают образцовый регулируемый фазовращатель. Этот метод измерений заметно точнее, погрешность измерений составляет $\pm(0,5^\circ \div 1^\circ)$.

Стробоскопические осциллографы

Стробоскопические приборы, позволяющие исследовать периодические сигналы, имеют на входе стробоскопический преобразователь или трансформатор спектра. Коэффициент трансформации временного масштаба может достигать $10^7 \dots 10^8$.

Короткие строб-импульсы осуществляют выборку мгновенных значений сигнала со сдвигом по времени через n периодов. На рис. 2.3.3 показана выборка каждый период.

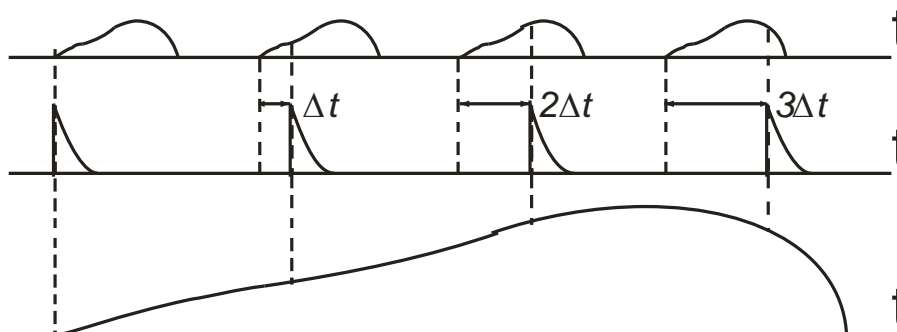


Рис. 2.3.3

Простейшая схема строб – преобразователя приведена на рис. 2.3.4

Диод должен быть быстродействующий, работающий в ключевом режиме. При отсутствии строб-импульса диод заперт напряжением смещения $+U_{см}$.

Строб – импульс отпирает диод, что приводит к заряду конденсатора C до значения мгновенного напряжения сигнала, т.е. напряжение на C пропорционально входному сигналу в точке стробирования. Период строб-импульсов близок к целому числу периодов сигнала, но имеет заданный сдвиг, равный шагу считывания:

$$T_{сн} = nT \pm \Delta t, \text{ где } n = 1, 2, 3 \dots$$

Трансформированный период огибающей равен $nT/\Delta t$, где интервал Δt – шаг считывания, T – период сигнала. Число выборок $k = T/\Delta t$. Условие неискаженной передачи вытекает из теоремы Котельникова.

2.3.3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

1. Общие сведения

КВП содержит два двухканальных прибора:

1. Синтезатор сигналов (СС).
2. Осциллограф (О).

СС построен на основе виртуального ЦАП, синтезирующего требуемую форму периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем формой, частотами и уровнями используемых компонент, включая шумы.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.3.5.

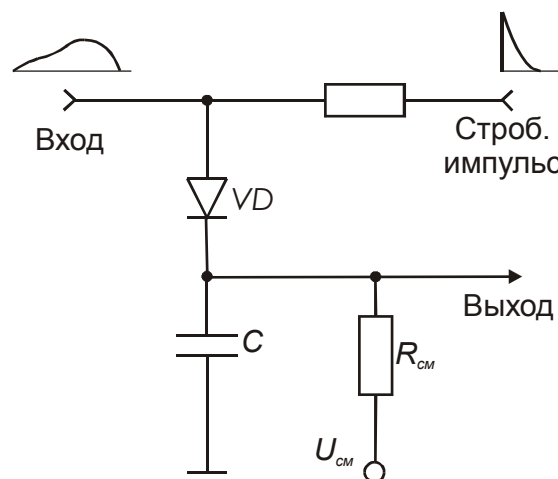


Рис. 2.3.4

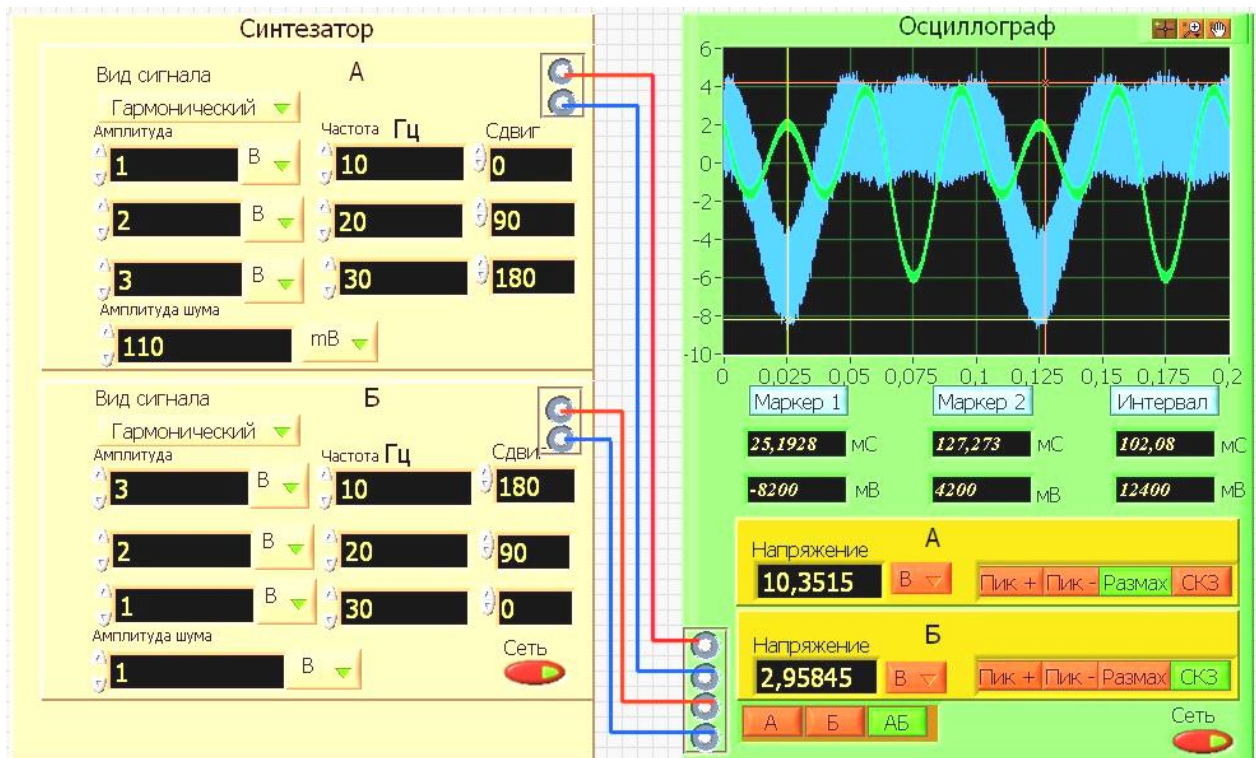


Рис. 2.3.5

Осциллограф, построенный на основе двухканального АЦП, содержит в своей структуре двухканальный вольтметр и систему формирования маркерных линий с вычислением расстояния между ними отдельно по осям абсцисс и ординат.

Передние панели приборов имеет органы управления, с помощью которых можно левой кнопкой мыши включить прибор (кнопкой «Сеть») и установить его в нужный режим работы.

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
- **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

2. Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигналов (СС)

СС (см. рис. 2.3.6) состоит из двух генераторных блоков: А и Б. В каждом блоке имеется возможность синтеза сигнала тремя периодическими компонентами выбираемой формы и шумовым сигналом. Для каждой периодической составляющей регулируется амплитуда, частота и начальная фаза или временная задержка («Сдвиг»).



Рис. 2.3.6

Окно «**Вид сигнала**» устанавливает форму генерируемого сигнала: гармонический, меандр, треугольный, пилообразный.

Три поля ввода «**Амплитуда**» служат для установки уровней всех используемых компонент сигнала. При этом курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Можно набрать требуемое значение или регулировать уровень в младшем разряде, используя клавиши в виде стрелок «*вверх*» и «*вниз*», расположенные слева от поля ввода. Амплитуда меняется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 514| позволяет стрелками клавиатуры изменять именно этот разряд (514| ...515...)). Для выбора размерности применяется выплывающее меню справа от индикатора (мВ/В).

Аналогично поле индикатора «**Амплитуда шума**» используется для установки уровня шума. Вводится необходимое значение амплитуды и выбирается размерность (мкВ/мВ/В).

Окно ввода «**Частота Гц**» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично установке амплитуды. Частота устанавливается в пределах от 10 Гц до 50000 Гц.

Окно ввода «**Сдвиг**» (φ) используется для установки начальной фазы φ или эквивалентной временной задержки, для расчета которой используется формула:

$$T_{\text{зад}} = T_C \varphi / 360.$$

Оциллограф

Прибор имеет двухканальный панорамный индикатор, а также ряд вспомогательных панелей и переключателей:

Внизу слева расположен переключатель режима индикации с выбором каналов А, Б и АБ (см. рис. 2.3.7).



Рис. 2.3.7

Под панорамным индикатором расположена панель включения маркерных линий (см. рис. 2.3.8). Маркеры включаются кнопками «**Маркер 1**» и «**Маркер 2**», а информация об их положении отображается в соответствующих полях внизу лицевой панели. Изменение положений маркеров оценивается в виде интервала, как по уровню, так и по времени (кнопка «**Интервал**»).

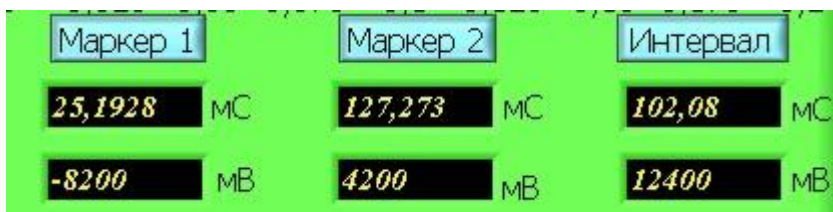


Рис. 2.3.8

Ниже располагается панель двухканального встроенного вольтметра (см. рис. 2.3.9), позволяющего оценить параметры сигналов на входах осциллографа. В каждом канале реализовано четыре режима измерения и индикации:

- «Пик –» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «Пик +» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «Размах» - размаха сигнала;
- «СКЗ» - среднеквадратического значения сигнала.

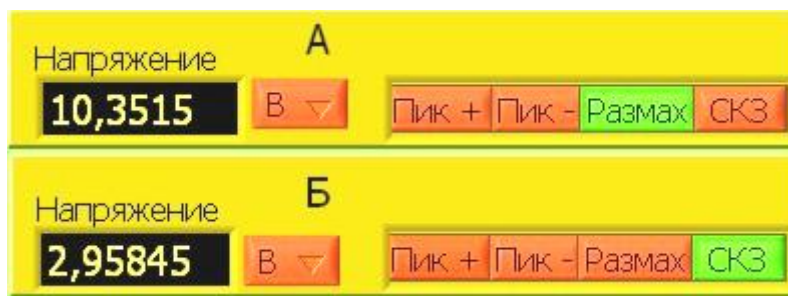


Рис. 2.3.9

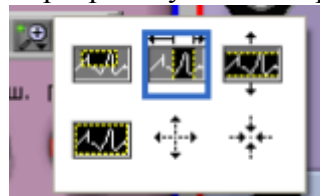
Осциллограф имеет ряд вспомогательных функций, кнопки вызова которых расположены справа в верхней части его лицевой панели:



- режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



- режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении;



- режимы лупы с рабочими состояниями:

- Увеличение участка горизонтальной оси (регулировка коэффициента развертки).
- Возврат к полному отображению графика.

2.3.4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям осциллографа выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- изучить методики измерений амплитуды, периода, частоты и фазового сдвига сигналов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов;
- получить индивидуально допуск к выполнению запланированных исследований.

2.3.5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с модулями КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их возможности, передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки работы в различных режимах измерения путем пробных измерений:

1. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать виды сигналов, сетку частот и амплитуд сигналов СС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

2. Пробные измерения сигналов разных форм без шумов и с шумами

Подать на входы гармонические сигналы разного уровня и разной частоты без шумов. Сравнить полученные результаты с установленным уровнем СС. Оценить влияние на результаты шумов разного уровня.

Выполнить пробные измерения пиковых значений, амплитуды, частоты и периода гармонических, полигармонических, импульсных и комбинированных сигналов, вырабатываемых СС.

Измерение амплитуды переменного напряжения

- Установите частоту и уровень гармонического сигнала СС: в канале А - 1 кГц, 100 мВ; в канале Б – 2 кГц, 150 мВ.
- В режиме индикации АБ, используя лупу, установите коэффициент развертки таким, чтобы на экране умещалось несколько периодов исследуемого сигнала.
- Измерьте с помощью маркерных линий уровня, а также встроенным вольтметром амплитуду и размах каждого сигнала.
- Сравните результаты с установками СС и оцените погрешности.
- Выполните измерения для различных амплитуд и частот сигнала СС.
- Повторите пп. б)...д) для шумового сигнала, а также для других форм сигнала с шумами и без шумов.

Измерение периода и частоты переменного напряжения

- Установите частоту и уровень гармонического сигнала СС: в канале А - 1 кГц, 100 мВ; в канале Б – 2 кГц, 150 мВ.
- В режиме индикации АБ, используя лупу, установите коэффициент развертки таким, чтобы на экране умещалось несколько периодов (близкое к целому числу) сигнала (от 1 до 5 для использования всего экрана).
- Измерьте с помощью маркерных линий времени целое число полупериодов сигнала в каждом канале (по точкам прохождения через 0).
- Оцените периоды и частоты сигналов в каждом канале.
- Сравните результаты с установками СС и оцените погрешности.

- д) Выполните измерения для различных амплитуд и частот сигнала СС.
- е) Повторите пп. б)...д) для других форм сигнала с шумами и без шумов.

Измерение угла фазового сдвига

- а) Установите частоту и уровень гармонического сигнала СС: в канале А - 1 кГц, 100 мВ, 0°; в канале Б – 1 кГц, 150 мВ, 30°.
- б) В режиме индикации АБ, используя лупу, установите коэффициент развертки таким, чтобы на экране умещалось несколько периодов сигнала.
- в) Измерьте с помощью маркерных линий времени по точкам прохождения через 0 период сигнала и временную задержку сигнала в канале Б.
- г) Оцените сдвиг фазы.
- д) Сравните результаты с установкой сдвига СС и оцените погрешности.
- д) Выполните измерения для различных частот и фазовых сдвигов, соотношений амплитуд сигналов СС.
- е) Повторите пп. б)...д) для сигналов с шумами.

Уровень 2: Применение осциллографа

Считается, что осциллограф является образцовым и с его помощью измеряются параметры двухканального СС. Исследуются характеристики гармонического, треугольного, прямоугольного (меандра), пилообразного, шумового и комбинированных сигналов, вырабатываемых исследуемым ГС. Предварительно выбрать сетку частот, уровней и сдвига фаз сигналов.

1. *Исследование СС в режимах двухканального формирования гармонических и полигармонических сигналов без шумов и с шумами*

Подать на входы О гармонические сигналы СС и измерить их амплитуды, периоды, частоты и фазовые сдвиги. Исследования выполнить в нескольких точках и на краях диапазонов рабочих частот (10 Гц – 50 кГц), амплитуд (1 мВ – 10 В) и сдвиг фазы сигналов СС, как без шумов, так и с шумами. Сравнить полученные результаты с установками СС.

Подать на входы О полигармонические сигналы СС и измерить их амплитуды, периоды и частоты для 1-й гармоники при разных соотношениях начальной фазы каждой компоненты. Исследования выполнить в нескольких точках, как без шумов, так и с шумами.

2. *Исследование СС в режимах двухканального формирования периодического импульсного сигнала без шумов и с шумами*

Подать на входы О треугольные сигналы СС и измерить их амплитуды, периоды, частоты и задержки. Исследования выполнить в нескольких точках и на краях диапазонов рабочих частот (10 Гц – 50 кГц), амплитуд (1 мВ – 10 В) и задержек сигналов СС, как без шумов, так и с шумами. Сравнить полученные результаты с установками СС.

Выполнить аналогичные исследования для пилообразных и прямоугольных (меандра) импульсов.

3. *Оценка возможности определения СКЗ с помощью О*

Оценить адекватность результатов оценки СКЗ встроенным вольтметром и расчетным способом по амплитудным данным, полученным с помощью маркерных линий, для периодических сигналов различной формы (гармонического, треугольного, прямоугольного (меандра), пилообразного, шумового и комбинированных сигналов) вырабатываемых исследуемым ГС.

4. Оценка метрологических характеристик СС и О

По данным проведенных экспериментальных исследований СС оценить его метрологические характеристики, а также возможности использования О для их определения.

5. Косвенные измерения СКЗ различных сигналов

Уровень 3: Изучение методик и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик О при учебной поверке проводится в предположении, что используемый в работе СС является образцовым, т.е. имеет ранг ОСИ соответствующего разряда.

При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

- Внешний осмотр.
- Опробование.
- Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка:

1. Проверить работоспособность О во всех режимах измерения. Выбрать сетку периодов, частот, амплитуд и фазовых сдвигов для поверки двухканального О, исходя из возможностей образцового СС.
2. Определить погрешности измерения амплитуды, периода, частоты и фазового сдвига гармонических сигналов образцового ГС в диапазоне уровней (10 мВ ... 10 В; 0,01... 50 кГц). Построить графики погрешностей. Выбрать формы представления относительных погрешностей (одночленной или двухчленной формулой) и записать аппроксимирующие выражения погрешностей с учетом 2-кратного запаса и рекомендуемого ряда чисел коэффициентов. Например, предел допускаемой относительной погрешности измерения амплитуды сигнала можно записать в виде
$$\delta_{\text{доп}} \pm (b + aU_{\text{П}}/U_{\text{X}})\%,$$
где $U_{\text{П}}$ – предел измерения, В; U_{X} – измеряемое напряжение, В.
3. Определить порог чувствительности О на частоте 1 кГц и в других точках рабочего диапазона по критерию 2-кратного превышения сигнала над заданным уровнем шумов. Оценить динамический диапазон работы О как отношение максимального сигнала к порогу чувствительности в логарифмическом масштабе
$$D=20\lg U_{\text{MAX}}/U_{\text{ПОРОГ}}.$$
4. Определить полосу пропускания О. При этом оценивается число точек отсчета на период сигнала и величина фронта осциллографа при «идеальном» прямоугольном импульсе на входе.
5. Определить неравномерность АЧХ исследуемого О с помощью образцового СС путем измерения амплитуды в диапазоне рабочих частот с выбором максимального и минимального значений сигнала. Тогда неравномерность в абсолютном и относительном масштабе:

$$\Delta = U_{\text{max}} - U_{\text{min}}; \quad \delta = 200(U_{\text{max}} - U_{\text{min}})/(U_{\text{max}} + U_{\text{min}}), \%$$

2.3.6. Содержание отчета

1. Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
2. Задачи лабораторной работы.
3. Теоретические сведения (по усмотрению студента).
4. План экспериментальных исследований.
5. Графики погрешностей, таблицы, осциллограммы;

6. Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

2.3.7. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально и защищает его, отвечая на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Что измеряют с помощью O ?
2. Назовите основные метрологические характеристики O .
3. Чем отличаются виртуальные O от автономных приборов?
4. Какие измерения можно проводить с помощью исследуемого O ?
5. Как работает виртуальный O ?
6. Какие органы управления имеет O ?
7. Какие узлы содержит универсальный осциллограф?
8. Поясните работу стробоскопического осциллографа.
9. Какие параметры характеризуют гармоническое напряжение?
10. Как измерить частоту гармонического сигнала?
11. Как измерить амплитуду гармонического сигнала?
12. Как измерить СКЗ гармонического сигнала?
13. Как измерить СКЗ меандра?
14. Как измерить СКЗ треугольного сигнала?
15. Как измерить СКЗ пилообразного сигнала?
16. Как измерить фазовый сдвиг гармонического сигнала?
17. Как измерить задержку пилообразного сигнала?
18. Как измерить задержку меандра?
19. Как определить погрешность измерения амплитуды сигнала?
20. Как определить погрешность измерения частоты сигнала?
21. Как определить погрешность измерения фазового сдвига?
22. Поясните экспериментальные результаты.

Дополнительные вопросы для уровня 2

23. Как оценить коэффициенты развертки и отклонения?
24. Поясните методы измерений с помощью осциллографа.
25. Какое влияние на результаты измерений амплитуды оказывает шум при использовании встроенного вольтметра и маркерных линий?
26. Какое влияние на результаты измерений частоты оказывает шум при использовании встроенного вольтметра и маркерных линий?
27. Как минимизировать погрешность измерения?
28. Какова структура погрешности при измерении интервала времени?
29. Какова структура погрешности в режиме измерения уровня?

Дополнительные вопросы для уровня 3

30. Какими приборами можно проводить поверку?
31. Как выбрана сетка амплитуд, частот и фазовых сдвигов для поверки?
32. Как оценить динамический диапазон прибора?
33. Как оценить неравномерность АЧХ каналов прибора?
34. Как оценить порог чувствительности прибора?
35. Как определить реальный диапазон рабочих частот O ?

36. Как определить полосу пропускания?

2.4. Селективные вольтметры

2.4.1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить виртуальный селективный вольтметр* - его принцип работы, органы управления и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы с прибором.

Уровень 2: *Применить селективный вольтметр* для исследования спектральных составляющих гармонического, импульсного (прямоугольного, треугольного и пилообразного), шумового и комбинированного сигнала.

Уровень 3: *Изучить и освоить методики поверки вольтметра* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку селективного вольтметра (СВ) с помощью образцовых виртуальных приборов.

2.4.2. Назначение и принципы построения СВ

Селективные вольтметры (СВ) используются при измерении малых гармонических напряжений в условиях действия помех, при исследовании спектров периодических сигналов и в целом ряде других случаев.

Селективные вольтметры (В6) – это избирательные вольтметры для узкополосных измерений. Позволяют исследовать отдельные спектральные составляющие, определять спектральную плотность шумов, измерять нелинейные искажения. Применяют гетеродинное преобразование и имеют высокую чувствительность. Обычно это селективные микровольтметры.

Спектр периодического сигнала является дискретным или линейчатым. В общем случае периодический сигнал содержит постоянную составляющую и набор гармонических колебаний с частотами $\omega_k = K\omega_1$, $K=1,2,3,\dots$, кратными основной частоте ω_1 .

Например, сигнал пилообразной формы может быть представлен суперпозицией бесконечного количества синусоидальных сигналов, частоты которых кратны основной частоте. Амплитуда и мощность этих синусоид уменьшаются с увеличением их частоты. По мере добавления каждой гармоники, форма сигнала становится более похожей на идеальную. Ряд Фурье пилообразного сигнала имеет вид:

$$E_n = \frac{2A}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \frac{1}{4} \sin 4\omega t + \dots \right)$$

Идеальный сигнал прямоугольной формы включает в себя бесконечное количество нечетных гармоник. В таком случае ряд Фурье выглядит как:

$$E_n = \frac{4A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right)$$

Так как амплитуда гармоник высоких порядков во много раз меньше амплитуды основной частоты, то, как правило, вычисляют ограниченное число гармоник (до 5-го ... 9-го порядка).

Непериодические сигналы имеют непрерывный спектр, т.е., в их составе присутствуют все частоты без исключения. Амплитуды отдельных спектральных составляющих бесконечно малы, поэтому их спектральный состав описывают не амплитудами отдельных гармоник, а спектральной плотностью, под которой понимают отношение приращения амплитуды ΔA к приращению частоты $\Delta \omega$ на некоторой частоте.

Автономный серийный СВ представляет собой по существу супергетеродинный приемник (см. рис. 2.4.1). Частотная селекция входного сигнала осуществляется с помощью перестраиваемого гетеродина, смесителя и узкополосного усилителя промежуточной частоты, который обеспечивает высокую чувствительность и требуемую избирательность. Если чувствительность и избирательность недостаточны, может быть применено двукратное, а иногда и трехкратное преобразование частоты. Панорамный СВ с осциллографическим индикатором и гетеродином в виде генератора качающейся частоты (ГКЧ) становится анализатором спектра (АС).

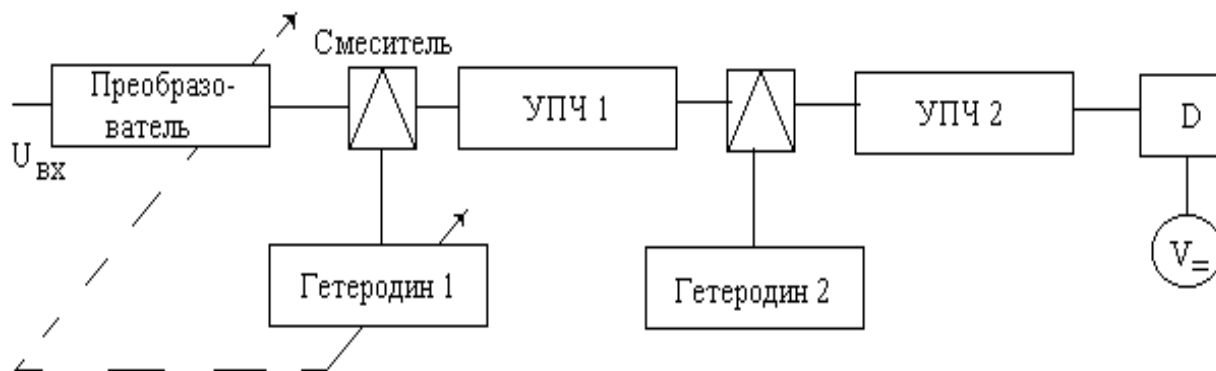


Рис. 2.4.1

Измеряемый сигнал подается на входной преобразователь, функции которого такие же, как у измерительного приемника, т.е. здесь может быть калиброванный аттенюатор, УВЧ, фильтр. Усиление реализуется на промежуточных частотах. Входной преобразователь перестраивается вместе с гетеродином.

В селективном вольтметре обычно имеется система автоматической подстройки частоты и калибратор. *Калибратор* — образцовый генератор переменного напряжения фиксированного уровня, позволяющий исключить погрешности из-за изменения напряжения гетеродина при его перестройке, а также изменения коэффициентов передачи узлов вольтметра, влияния внешних факторов и т. д.

В виртуальных СВ применяются методы обработки дискретизированных сигналов в частотной области. В частности, в виртуальном СВ, используемом в лабораторных исследованиях, реализован вычислительный принцип оценки СКЗ сигнала в полосе пропускания СВ на основе алгоритма БПФ.

ПРИМЕР:

Вольтметр селективный ВК6-18 предназначен для селективного высокоточного измерения напряжения, частоты, амплитуды и спектров радиосигналов в диапазоне частот от 20 Гц до 2 ГГц в жестких условиях эксплуатации. Прибор имеет два измерительных входа 20 Гц - 30 МГц и 30 МГц - 2 ГГц, калибраторы, вход внешнего опорного сигнала. Прибор позволяет осуществлять слуховой контроль АМ и ЧМ -сигналов в эфире, а в комплекте с антеннами, пеленговать источники радиоизлучения в эфире. Возможен также суточный мониторинг электромагнитной обстановки по заданной программе с помощью внешней ПЭВМ.

Минимальная погрешность измерения частоты входного сигнала $5 \times 10^{-8} F_c + F$ (F_c — частота сигнала, F — полоса пропускания), или опционально $5 \times 10^{-9} F_c + F$. Полоса пропускания F : от 10 Гц до 10 МГц с шагом 1,2,5 по уровню -3 дБ; 200 Гц, 9, 20, 120 кГц по уровню -6 дБ.

Уровень собственных шумов в полосе 10 Гц не более -30 дБмкВ.

Диапазон измерений от -20 до +140 дБмкВ..

Погрешность измерения уровня 1,6 дБ.

Входное сопротивление 50 Ом, 1 МОм.

Интерфейс USB-2.0.

2.4.3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

1. Общие сведения

КВП содержит шесть одноканальных приборов:

1. Генератор сигналов (ГС).
2. Осциллограф (О).
3. Цифровой вольтметр (ЦВ).
4. Селективный вольтметр (СВ).
5. Анализатор спектра (АС).
6. Измеритель искажений (ИИ).

Генератор построен на основе виртуального ЦАП, синтезирующего требуемую форму периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем частотой и уровнем. Измерительные модули имитируют работу автономных приборов.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.4.2. Выходной сигнал ГС подан одновременно на входы всех приборов.

Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно включить прибор и установить его в нужный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «**Питание**» или «**Сеть**» для включения.

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
- **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

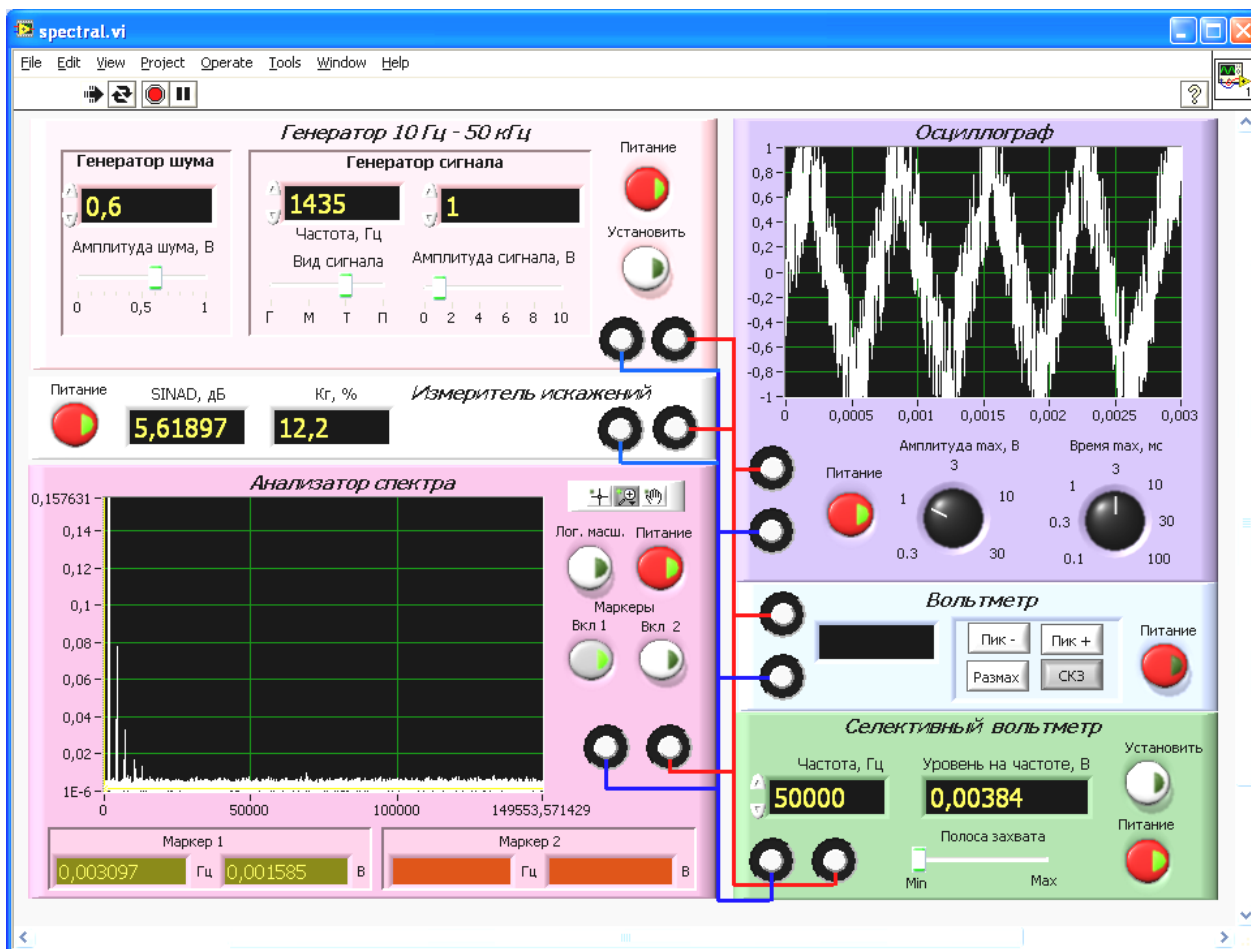


Рис. 2.4.2

2. Передние панели виртуальных приборов Генератор сигналов (ГС)

ГС состоит из двух модулей: «Генератор шума» и «Генератор сигнала» (см. рис. 2.4.3). Ползунок «Амплитуда шума, В» служит для грубой установки на индикаторе уровня шума в пределах от 0 до 1 В. Поле индикатора может использоваться для точной установки амплитуды шума (например, 0,514 В). Для этого курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды шума и нажимается кнопка «Установить». Можно также выполнять точную регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «вверх» и «вниз», расположенные слева от поля ввода. При этом нажатие кнопки «Установить» не требуется. Амплитуда регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 0,514| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (0,513| ... 0,515 ... 0,516| ...)).

При выполнении лабораторной работы ГС используется в качестве меры (генератор – калибратор), с помощью которой определяются погрешности рабочего средства измерений.



Рис. 2.4.3

Окно ввода «**Частота, Гц**» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично точной установке амплитуды шума. Частота устанавливается в пределах от 10 Гц до 50000 Гц.

Ползунок «**Вид сигнала**» устанавливает вид генерируемого сигнала: «Г» – гармонический, «М» – меандр, «Т» – треугольный, «П» – пилообразный.

Ползунок «**Амплитуда сигнала, В**» и поле ввода над ним служат для соответственно грубой и точной установки амплитуды сигнала в пределах от 0 до 10 В. Методика установки аналогична методике для генератора шума.

Цифровой вольтметр

При выполнении лабораторной работы ЦВ используется как вспомогательное образцовое средство измерений (ОСИ), с помощью которого методом сличения определяются погрешности рабочего средства измерений.

Вольтметр имеет четыре режима измерения (см. рис. 2.4.4) с индикацией:

«**Пик -**» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;

«**Пик +**» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;

«**Размах**» - размаха сигнала;

«**СКЗ**» - среднеквадратического значения сигнала.

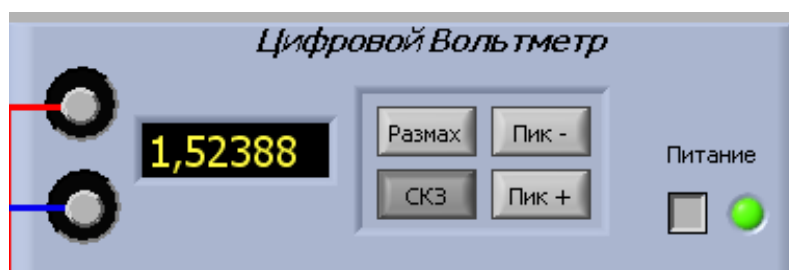


Рис. 2.4.4

Осциллограф

Прибор применяется для контроля формы сигнала. На передней панели (см. рис. 2.4.5) имеется две регулировочные ручки:

«**Амплитуда max, В**» – устанавливает пределы отображения уровня сигнала (от $\pm 0,3$ до ± 30 В) на экране осциллографа (вертикальная ось).

«**Время max, мс**» – устанавливает время развертки в миллисекундах (от 0,1 до 100 мс) или предел отображения длительности сигнала на экране осциллографа (горизонтальная ось).

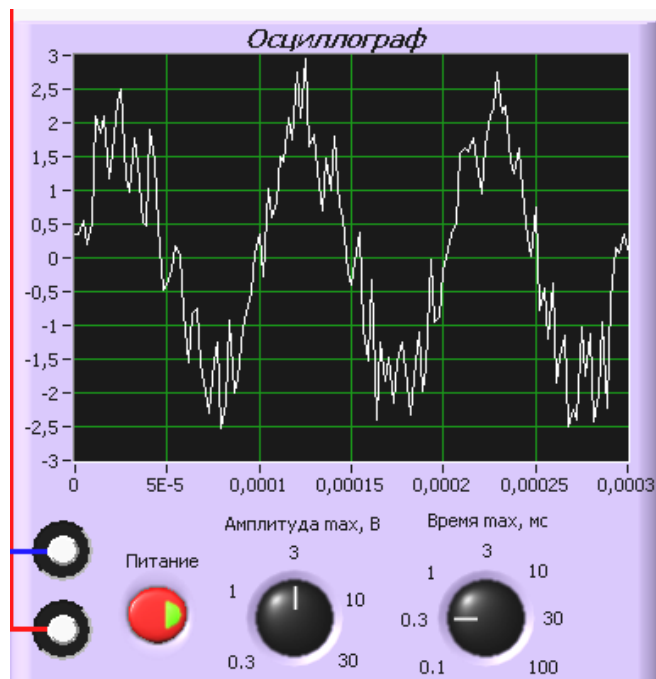


Рис. 2.4.5

Селективный вольтметр

Прибор применяется для оценки погрешностей АС при оценке уровня высших гармоник. На индикаторе (см. рис. 2.4.6) «**Уровень на частоте, В**» высвечивается результат измерения СКЗ сигнала на установленной частоте в полосе 15-20 Гц.

Исследуемая частота устанавливается в герцах в поле «**Частота, Гц**» с подтверждением ввода кнопкой «**Установить**» или нажатием кнопок слева от поля ввода в виде стрелок «**вверх**» и «**вниз**». Частота регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 5014| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (5013| ... 5015 ...)).

Ползунок «**Полоса захвата**» регулирует от «**Min**» до «**Max**» диапазон частот, в котором селективный вольтметр (СВ) обеспечивает захват основной частоты.

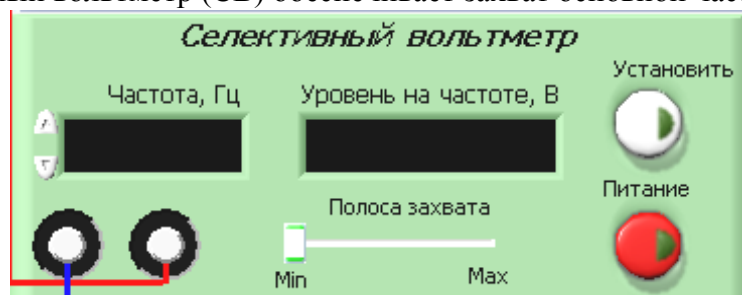


Рис. 2.4.6

Анализатор спектра

Прибор (см. рис. 2.4.7) имеет кнопку «**Лог. масш.**» для переключения отображения вертикальной оси в линейном или в логарифмическом масштабе.

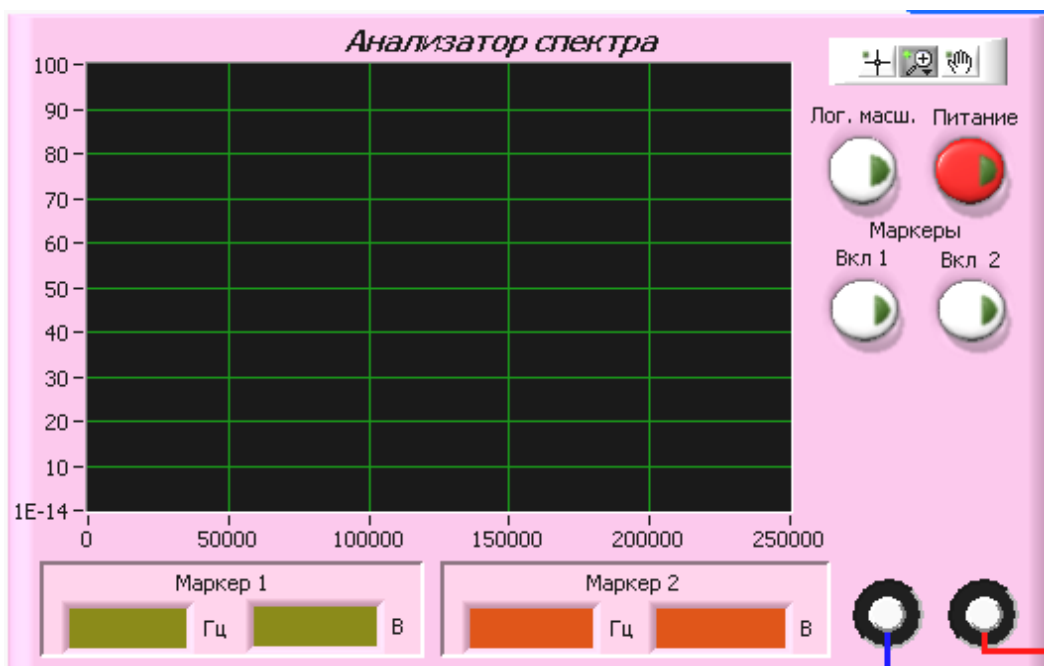


Рис. 2.4.7

Для более точного определения параметров спектра в конкретных точках имеется возможность включения на панорамном индикаторе одного или двух маркеров уровня и частоты. Маркеры (желтый и оранжевый) включаются кнопками «Вкл. 1» и «Вкл. 2», а информация об их положении отображается в полях «Маркер 1» и «Маркер 2» внизу лицевой панели.

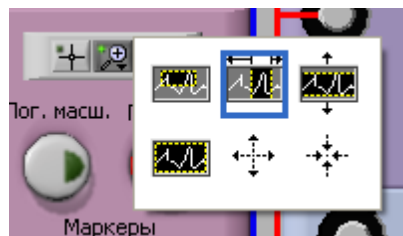
Прибор имеет ряд вспомогательных функций, кнопки вызова которых расположены в верхней части его лицевой панели:



- режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



- режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении;



- режимы лупы (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Измеритель искажений

Прибор (см. рис. 2.4.8) измеряет «SINAD, дБ» сигнала (Signal In Noise And Distortion) - выраженное в децибелах отношение уровня полного сигнала к суммарному уровню шума и искажений:

$$\text{SINAD} = \frac{P_{\text{signal}} + P_{\text{noise}} + P_{\text{distortion}}}{P_{\text{noise}} + P_{\text{distortion}}}$$

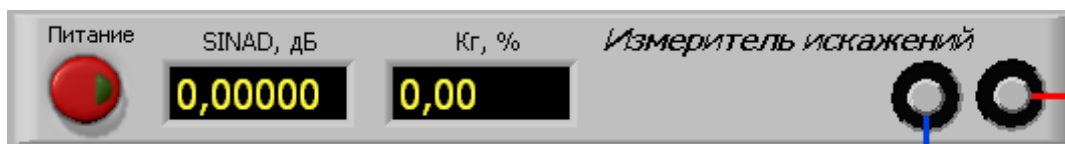


Рис. 2.4.8

Прибор измеряет коэффициент гармоник сигнала «Кг, %» в процентах по 25-ю гармонику включительно:

$$\text{Кг} = 100 \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{24}^2 + U_{25}^2}}{U_1}, \%$$

2.4.4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям СВ выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

Для определения погрешности измерения частоты сигнала можно сравнить показания СВ с установленным значением частоты образцового ГС. Изменять частоту генератора следует в пределах от 0,01 до 50 кГц. Относительная погрешность

$$\delta = \left(\frac{f_{\text{СВ}} - f_{\text{ГС}}}{f_{\text{ГС}}} \right) \cdot 100\% .$$

Для определения погрешности измерения уровня гармонического сигнала можно сравнить показания СВ и ГС, для негармонического сигнала можно сравнить показания АС и настроенного на ту же частоту СВ. При этом показания ГС и АС принимаются как достоверные.

Изменяя частоту ГС, фиксируется уровень СВ и образцового прибора (ГС или АС). Тогда относительная погрешность

$$\delta = \left(\frac{U_{CB} - U_{OBR}}{U_{OBR}} \right) \cdot 100\% .$$

При анализе комбинированных сигналов выходное напряжение является суммой сигнала ГШ и ГС: синусоидального, треугольного, пилообразного или прямоугольного (меандра).

2.4.5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с модулями КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их возможности, передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки работы в различных режимах измерения путем пробных измерений:

1. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать сетку частот и уровней ГС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

2. Пробные измерения сигналов разных форм без шумов и с шумами

Подать на вход гармонический сигнал разного уровня и разной частоты без шумов. Оценить правильность измерения уровня основной гармоники. Сравнить полученные результаты с установленным уровнем ГС и с показаниями приборов ЦВ, АС и О. Оценить влияние на спектр шумов разного уровня.

Выполнить пробные измерения гармонического состава импульсных и комбинированных сигналов, вырабатываемых исследуемым ГС.

Уровень 2: Применение СВ

Исследуются спектры гармонического, треугольного, прямоугольного (меандра), пилообразного, шумового и комбинированных сигналов, вырабатываемых исследуемым ГС. Предварительно выбрать сетку частот и уровней сигнала.

1. Исследование спектра гармонического сигнал без шумов и с шумами

Подать на вход СВ гармонический сигнал ГС без шумов и измерить уровень первой гармоники. Оценить ширину спектральной линии на уровнях -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями АС.

2. Исследование спектра треугольного сигнал без шумов и с шумами

Подать на вход СВ треугольный сигнал ГС без шумов и измерить уровень первых 10 гармоник. Оценить отношение высших гармоник к основной составляющей спектра. Оценить ширину спектральных линий на уровнях -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями АС.

3. Исследование спектра меандра без шумов и с шумами

Подать с выхода ГС на вход СВ меандр без шумов и измерить уровень его первых 10 гармоник. Оценить отношение высших гармоник к основной составляющей спектра. Оценить ширину спектральных линий на уровнях -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями АС.

4. Исследование спектра пилообразного сигнал без шумов и с шумами

Подать на вход СВ пилообразный сигнал ГС без шумов и измерить уровень первых 10 гармоник. Оценить отношение высших гармоник к основной составляющей спектра.

Оценить ширину спектральных линий на уровнях -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями АС.

5. *Косвенные измерения коэффициента гармоник различных сигналов*

Оценить для фиксированной частоты и максимального выходного уровня величину коэффициента нелинейных искажений (коэффициент гармоник) K_G сигналов с шумами и без шумов по формуле:

$$K_G = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100\%.$$

КНИ показывает вес высших гармонических составляющих в спектре сигнала по отношению к первой гармонике в процентах. Сравнить результаты с показаниями образцового ИИ.

6. *Косвенные измерения СКЗ различных сигналов*

Оценить для фиксированной частоты СКЗ выходного сигнала ГС можно суммируя величины СКЗ всех его гармоник по формуле:

$$U_{СКЗ} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}.$$

Сравнить результаты с показаниями образцового ЦВ.

Уровень 3: Изучение методик и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик СВ при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

Поверку СВ можно осуществлять по эталонной мере (эталонному генератору – калибратору) и по эталонным приборам (ИИ, АС, ЦВ).

При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

- Внешний осмотр.
- Опробование.
- Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка СВ:

1. Проверить работоспособность СВ во всех режимах измерения. Выбрать сетку частот и уровней для поверки, исходя из возможностей образцового ГС.
2. Определить погрешности измерения частоты и СКЗ гармонического сигнала образцового ГС в диапазоне уровней (10 мВ ... 10 В; 0,01 ... 50 кГц). Построить графики погрешностей в зависимости от частоты для разных уровней сигнала и в зависимости от уровня для разных частот сигнала ГС. Выбрать формы представления относительных погрешностей (одночленной или двухчленной формулой) по уровню и по частоте и записать аппроксимирующие выражения погрешностей с учетом 2-кратного запаса и рекомендуемого ряда чисел для коэффициентов. Например, предел допускаемой относительной погрешности измерения уровня сигнала можно записать

$$\delta_{\text{доп}} \pm (4 + 2U_{\text{П}}/U_{\text{X}})\%,$$

где $U_{\text{П}}$ – предел измерения, В; U_{X} – измеряемое напряжение, В.

3. Определить порог чувствительности СВ на частоте 1 кГц и в других точках рабочего диапазона по критерию 2-кратного превышения сигнала над установленным уровнем шума. Оценить динамический диапазон работы СВ как отношение максимального сигнала к порогу чувствительности в логарифмическом масштабе

$$D=20\lg U_{\text{MAX}}/U_{\text{Порог}}$$

4. *Определить полосу пропускания СВ* (разрешающую способность по частоте). При этом оценивается возможность раздельного измерения соседних частотных компонент на заданном уровне сигнала (-20, -40, -60 дБ).
5. *Определить неравномерность АЧХ* исследуемого СВ с помощью образцового ГС путем измерения уровня в диапазоне рабочих частот с выбором максимального и минимального значений сигнала. Тогда неравномерность в абсолютном и относительном масштабе:

$$\Delta=U_{\text{max}} - U_{\text{min}}; \delta=200(U_{\text{max}} - U_{\text{min}})/(U_{\text{max}} + U_{\text{min}}), \%$$

2.4.6. Содержание отчета

1. Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
2. Задачи лабораторной работы.
3. Теоретические сведения (по усмотрению студента).
4. План экспериментальных исследований.
5. Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
6. Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

2.4.7. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Что измеряют с помощью СВ?
2. Чем отличаются виртуальные СВ от автономных приборов?
3. Какие вольтметры называют селективными?
4. Для чего нужен калибратор в схеме селективного вольтметра?
5. Какие измерения можно проводить с помощью исследуемого СВ?
6. Как работает виртуальный вольтметр?
7. Какие виртуальные приборы использовались при исследованиях?
8. Какие органы управления имеет СВ?
9. Что покажет прибор, если на его вход подать меандр?
10. Какой спектр имеет шумоподобный сигнал?
11. Какой спектр имеет гармонический сигнал?
12. Как выглядит спектр меандра?
13. Как выглядит спектр пилообразного сигнала?
14. Как выглядит спектр треугольного сигнала?
15. Как измерить частоту гармонического сигнала?
16. Как определить погрешность измерения частоты сигнала?
17. Как измерить напряжение гармонического сигнала?
18. Почему отличаются показания СВ и ЦВ при подаче на них импульсного сигнала?
19. Почему отличаются показания СВ и ЦВ при подаче на них шумоподобного сигнала?
20. Как выглядит спектр комбинированного сигнала
21. Поясните экспериментальные результаты.

Дополнительные вопросы для уровня 2

22. Как исследовать спектр неидеального гармонического сигнала?

23. Что делает со спектром гармонического сигнала ограничитель?
24. Как исследовать спектр импульсного сигнала?
25. Как исследовать спектр шумоподобного сигнала?
26. Как измерить уровни шумов и гармоник периодических сигналов?
27. Как измерить отношение высших гармоник к первой?
28. Как оценить коэффициент нелинейных искажений сигнала?
29. Как выделить помехи и измерить их уровни?

Дополнительные вопросы для уровня 3

30. Какими приборами можно проводить поверку?
31. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке СВ?
32. Как определить реальный диапазон рабочих частот СВ?
33. Как определить полосу пропускания (разрешающую способность по частоте) СВ на заданном уровне?
34. Как определить погрешность измерения уровня сигнала?
35. Как оценить динамический диапазон прибора?
36. Как оценить неравномерность АЧХ каналов прибора?
37. Как оценить порог чувствительности прибора?

2.5. Измерители искажений

2.5.1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить способы оценки нелинейных искажений гармонических сигналов;* освоить органы управления и оценить метрологические характеристики модулей специализированного комплекса виртуальных приборов (КВП). Приобрести практические навыки работы с приборами.

Уровень 2: *Применить КВП для* исследования шумов и нелинейных искажений сигнала. Оценить влияние соотношений уровня помехи, сигнала и шума на оценку параметров гармонического и полигармонического сигнала.

Уровень 3: *Изучить и освоить на практике методику поверки измерителя нелинейных искажений (ИНИ)* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку ИНИ с помощью образцовых виртуальных приборов.

2.5.2. Параметры сигналов и их измерение

Сигналы могут быть непрерывными и модулированными, узкополосными и широкополосными, импульсными и гармоническими, детерминированными и случайными.

Гармонические и полигармонические сигналы характеризуют форма и спектр, оцениваемые соответственно с помощью осциллографа (О) и анализатора спектра (АС). С энергетической точки зрения важным параметром является среднеквадратическое значение (СКЗ) сигнала или среднеквадратическое за период напряжение

$$U_{СК} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}.$$

Для гармонического колебания $U(t) = U_m \sin(\omega t)$ получим $U_{СК} = U_m / \sqrt{2}$, а для негармонического $U_{СК}$ определяется амплитудами гармоник (U_{mi}) и постоянной составляющей (U_o) сигнала:

$$U_{CK} = U_{\Sigma} = \sqrt{U_o^2 + U_{m1}^2 / 2 + \dots + U_{mn}^2 / 2}.$$

Частота высшей гармоники периодического сигнала всегда кратна его основной частоте. От соотношения амплитуд и начальных фаз гармоник зависит форма полного сигнала. Помехой можно считать сигнал, расположенный в полосе рабочих частот сигнала и изменяющий его спектр.

Без учета постоянной составляющей

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2},$$

где U_i - СКЗ соответствующей (i) гармоники.

Искажения гармонического сигнала оценивают коэффициентом гармоник (K_G), который показывает вес высших гармонических составляющих в спектре сигнала по отношению к первой гармонике в относительном масштабе или в процентах:

$$K_G = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100\%.$$

Методы измерения искажений

1. Спектральные – на базе селекции гармоник (приборы АС и СВ).
2. Квазиспектральные – на базе подавления первой гармоники (ИНИ).

Спектральный метод с применением АС сложен аппаратно, а с применением СВ требует длительных измерений и вычислений, поэтому в автономных приборах (подгруппа Сб) широкое распространение получил квазиспектральный метод измерения коэффициента нелинейных искажений (КНИ), который прост аппаратно и отличается от спектрального тем, что в выражении для K_G другой знаменатель:

$$K_H = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_{\Sigma}} 100\%.$$

Коэффициент гармоник (K_G) связан с КНИ (K_H) соотношением:

$$K_G = K_H \sqrt{1 - K_H^2}$$

Подобная замена упрощает схему прибора и алгоритм его работы, но вносит методическую погрешность в уравнение измерения, хотя заметные отличия результатов проявляются только при $K_G > 10\%$.

КНИ — величина для количественной оценки нелинейных искажений, равная отношению среднеквадратичной суммы спектральных компонентов выходного сигнала, отсутствующих в спектре входного сигнала, к среднеквадратичной сумме спектральных компонентов входного сигнала, иногда используется нестандартизованный синоним — клирфактор (нем.).

Коэффициент гармоник - величина, выражающая степень нелинейных искажений устройства (усилителя и др.),

В низкочастотном (НЧ) диапазоне (до 100—200 кГц) для измерения КНИ применяются режекторные ИНИ. На более высоких частотах используют косвенные измерения с помощью анализаторов спектра или селективных вольтметров.

Типовые значения КНИ:

0 % — форма сигнала представляет собой идеальную синусоиду.

3 % — форма сигнала отлична от синусоидальной, но искажения не заметны на глаз.
 5 % — отклонение формы сигнала от синусоидальной заметно на глаз по осциллограмме.

10 % — стандартный уровень искажений, при котором считают реальную мощность (RMS).

21 % — например, сигнал трапецеидальной или ступенчатой формы.

43 % — например, сигнал прямоугольной формы.

В простейшем виде ИНИ состоит из перестраиваемого режекторного фильтра с автоматической регулировкой усиления (АРУ) и вольтметра среднеквадратических значений. Фильтр с АРУ осуществляет нормирование чувствительности прибора при измерении первой гармоники, а вольтметр измеряет среднеквадратическое значение напряжения высших гармоник, как правило, до пятой включительно. Многие ИНИ дополнительно выполняют функцию квадратичного широкополосного вольтметра.

Типовая схема режекторного ИНИ приведена на рис. 2.5.1. Входной сигнал $U(t)$, имеющий высшие гармоники, через входной блок (делитель) соединен с усилителем сигнала. В режиме калибровки сигнал, минуя фильтр, проходит на вольтметр среднеквадратического значения. Показания индикатора устанавливаются на 100 (точка 100%), при этом весь сигнал проходит на вольтметр СКЗ.

Если в 10 раз увеличить коэффициент передачи входного блока и усилителя, то также в 10 раз повысится чувствительность прибора (см. рис. 2.5.2) со шкалой измерения 10 %. Если увеличить коэффициент передачи входного блока и усилителя в 100 и 1000 раз, то соответственно получим шкалы 1 % и 0,1 %.

Рис. 2.5.1

В режиме измерения КНИ включается

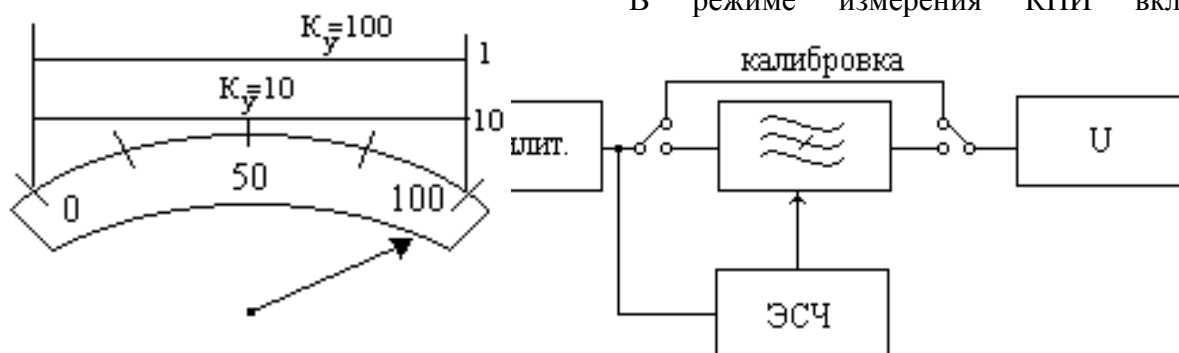


Рис. 2.5.2

режекторный фильтр, вырезающий первую гармонику. Для этого частота первой гармоники измеряется с помощью встроенного ЭСЧ, и в соответствии с результатами измерения осуществляется настройка фильтра. На выходе фильтра вольтметр измеряет СКЗ суммы всех гармоник без первой, определяя их вес по отношению к полному сигналу, который при калибровке был принят за 100%.

Шкала прибора градуируется в % или дБ. Образцовые ИНИ имеют погрешность 0,01...0,05%.

Спектр любого периодического сигнала является дискретным или линейчатым. В общем случае периодический сигнал содержит постоянную составляющую и набор гармонических колебаний с частотами $\omega_K = K\omega_1$, $K=1,2,3,\dots$, кратными основной частоте ω_1 .

Так как амплитуда гармоник высоких порядков во много раз меньше амплитуды основной частоты, то, как правило, вычисляют ограниченное число гармоник.

В вычислительных ИНИ применяются методы обработки дискретизированных сигналов в частотной области. В частности, в виртуальном ИНИ, используемом в лабораторных исследованиях, реализован принцип оценки K_T на основе алгоритма БПФ.

Чаще всего ИНИ используют в диапазоне низких частот при контроле и испытании высококачественных усилителей мощности звукового диапазона, звуковоспроизводящих и звукозаписывающих устройств, для контроля модулирующих трактов передатчиков и другой подобной аппаратуры.

Некоторые примеры: С6-11, С6-12, СК6-18, СК6-20

2.5.3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

1. Общие сведения

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.5.3. Выходной сигнал СС подан одновременно на входы всех приборов.

КВП содержит четыре одноканальных прибора:

1. Синтезатор сигнала (СС).
2. Осциллограф (О).
3. Анализатор спектра (АС).
4. Измеритель искажений (ИИ).

Синтезатор сигнала (СС) построен на основе многоканального виртуального ЦАП, который формирует требуемый периодический сигнал из регулируемых по частоте, амплитуде и фазе 16 гармонических сигналов с добавлением необходимого уровня шумов.

Все измерительные приборы осуществляют расчет искомых параметров по массиву данных мгновенных значений, получаемых в результате работы виртуального АЦП.

Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно включить прибор и установить его в нужный режим работы. Каждый прибор имеет входные клеммы и кнопку «Сеть» для его включения. В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

1. **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
2. **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
3. **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

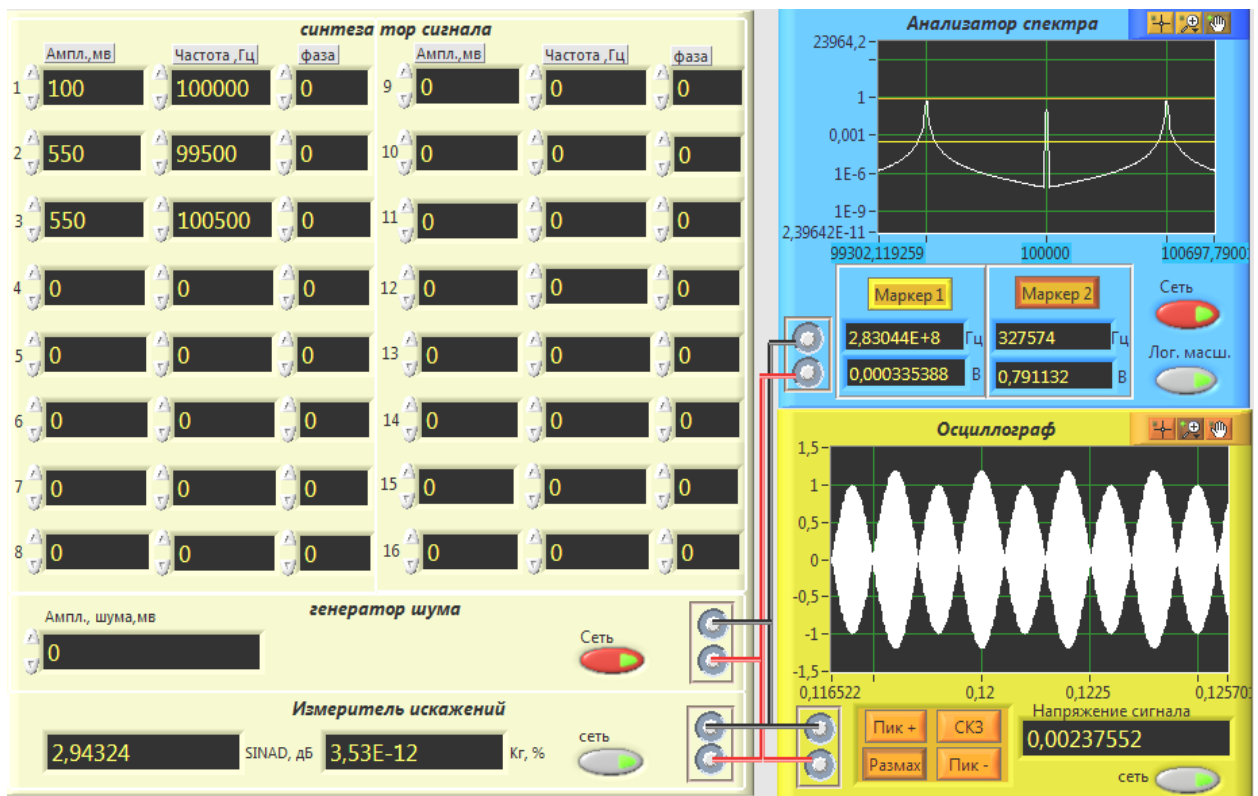


Рис. 2.5.3

2. Передние панели виртуальных приборов

Измеритель искажений (рис. 2.5.4)

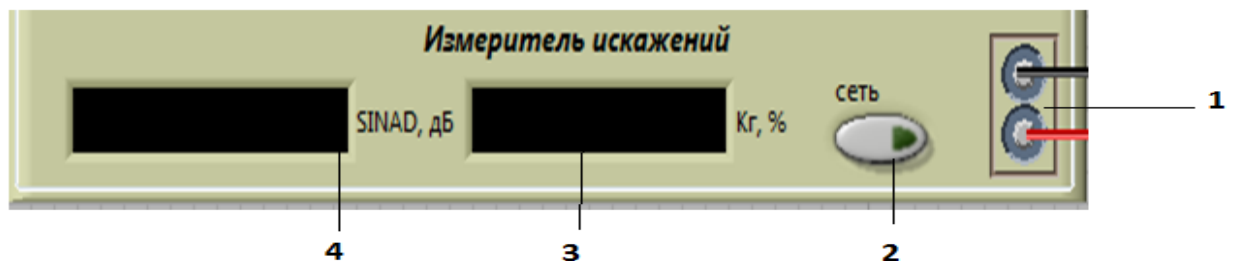


Рис. 2.5.4

Цифрами обозначены:

- 1 - вход прибора, на который поступает суммарный сигнал с шумами;
- 2 - выключатель;
- 3 - индикатор измеренного коэффициента гармоник сигнала;
- 4 – индикатор измеренного значения $SINAD$;

Прибор измеряет выраженное в децибелах отношение уровня полного сигнала к суммарному уровню шума и искажений (*Signal In Noise And Distortion* – $SINAD$, дБ):

$$SINAD = 10 \lg \frac{P_{signal} + P_{noise} + P_{distortion}}{P_{noise} + P_{distortion}}, \text{ дБ.}$$

Прибор измеряет КНИ сигнала «Кг, %» в процентах с учетом 25 гармоник включительно:

$$K_{\Gamma} = 100 \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{24}^2 + U_{25}^2}}{U_1}, \%$$

Анализатор спектра (рис. 2.5.5)

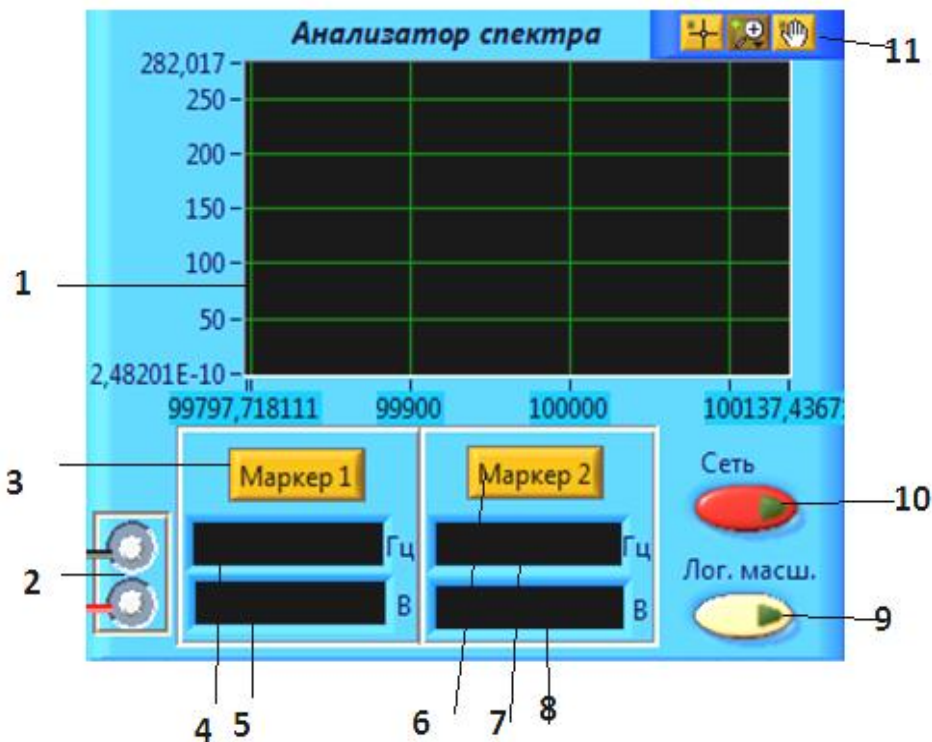




Рис. 2.5.5

Цифрами обозначены:

- 1 - панорамный индикатор (экран) для воспроизведения спектра суммарного сигнала в координатах «уровень – частота» (частотное представление сигнала с шумами);
- 2 - вход прибора;
- 3 - включение «Маркера 1»;
- 4 – индикатор положения «Маркера 1» на оси частот;
- 5 – индикатор положения «Маркера 1» на оси уровней;
- 6 - включение «Маркера 2»;
- 7 – индикатор положения «Маркера 2» на оси частот;
- 8 – индикатор положения «Маркера 2» на оси уровней;
- 9 – включение логарифмического масштаба по оси уровней;
- 10 – включение прибора;
- 11 - иконки: крестик, лупа и рука.

«Крестик»  - режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении.

«Рука»  - режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении.

«Лупа»  - имеет 6 подрежимов (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Синтезатор сигнала (СС) (рис. 2.5.6)

Цифрами обозначены:

- 1 - индикатор и поле для установки амплитуды для всех 16-ти генераторов гармонического сигнала (мВ);
- 2 - индикатор и поле для установки частоты для всех 16-ти генераторов гармонического сигнала (Гц);
- 3 - индикатор и поле для установки начальной фазы для всех 16-ти генераторов гармонического сигнала (град.);
- 4 - индикатор и поле для установки амплитуды шума сигнала (мВ);
- 5 - выключатель питания;
- 6 - выход синтезируемого сигнала и шума.

СС состоит из двух модулей: «Генератор шума» и «Синтезатор сигнала». Поле индикатора используется для точной установки амплитуды шума (например, 51,4 мВ). Для этого курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды шума и нажимается левая кнопка мышки в произвольной точке графического интерфейса. Можно также выполнять регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «*вверх*» и «*вниз*», расположенные слева от поля ввода. Амплитуда регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 51,4| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (51,3| ...51,6| ...)).

Окна ввода «**Амплитуда, мВ**», «**Частота, Гц**» и «**Фаза**» (град.) служат для задания параметров гармонических составляющих сложного генерируемого сигнала. Установка осуществляется аналогично установке амплитуды шума.

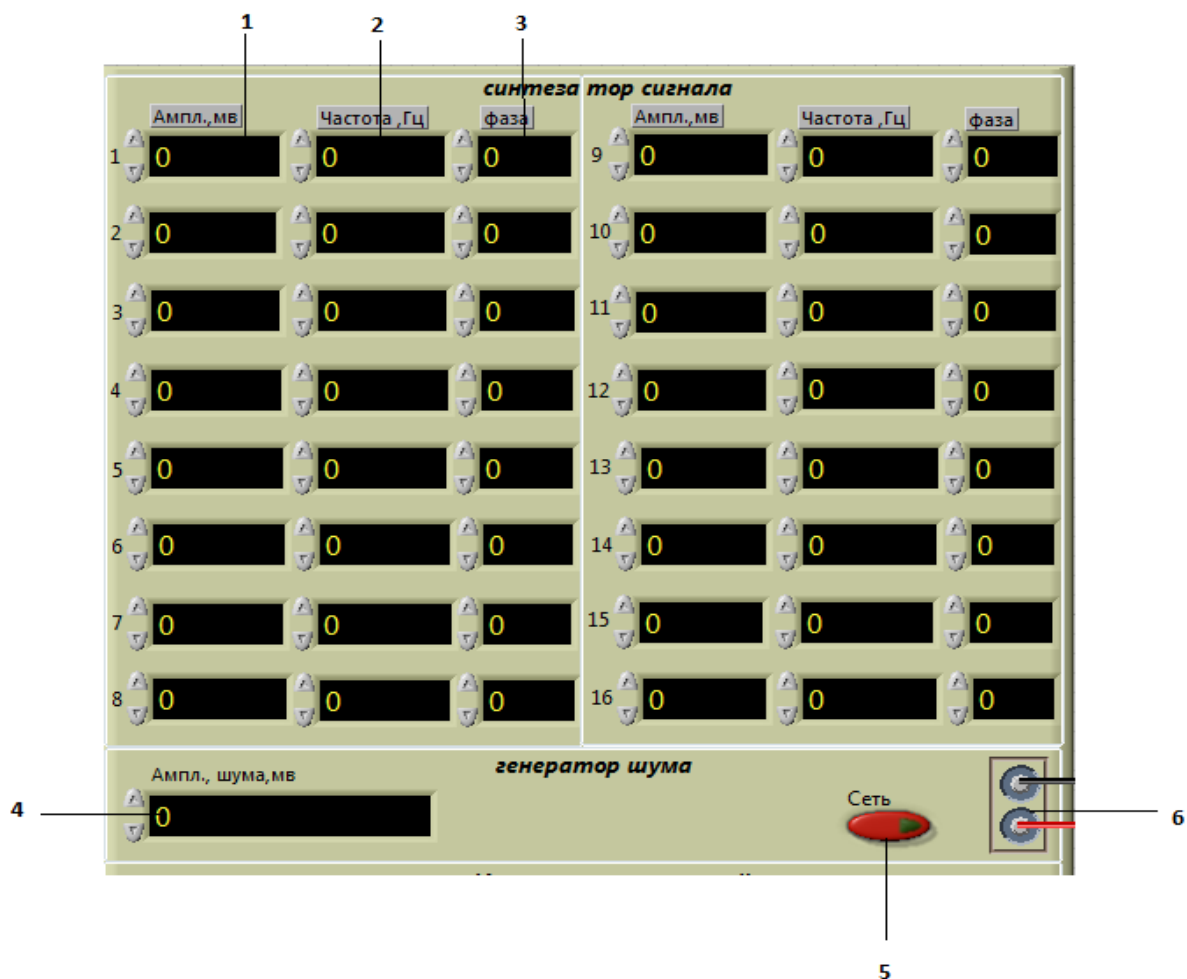


Рис. 2.5.6
Оциллограф (рис. 2.5.7)


Цифрами обозначены:

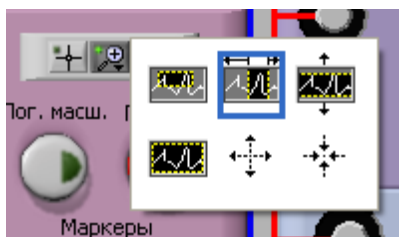
- 1 - оциллографический индикатор (экран) для воспроизведения суммарного сигнала в координатах мгновенный уровень – время (временное представление сигнала с шумами);
- 2 - вход прибора;
- 3 - поле выбора измеряемого параметра встроенного вольтметра;
- 4 - индикатор измеренного параметра;
- 5 - выключатель;
- 6 – выплывающее меню для выбора единицы измерения;

Вольтметр имеет четыре режима измерения с индикацией:

- «Пик –» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «Пик +» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «Размах» - размаха сигнала;
- «СКЗ» - среднеквадратического значения сигнала.

На передней панели в верхнем правом углу имеются три иконки: крестик, лупа и рука. Первая иконка при работе с прибором не используется.

«Рука»  - режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



«Лупа» - имеет 6 подрежимов (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

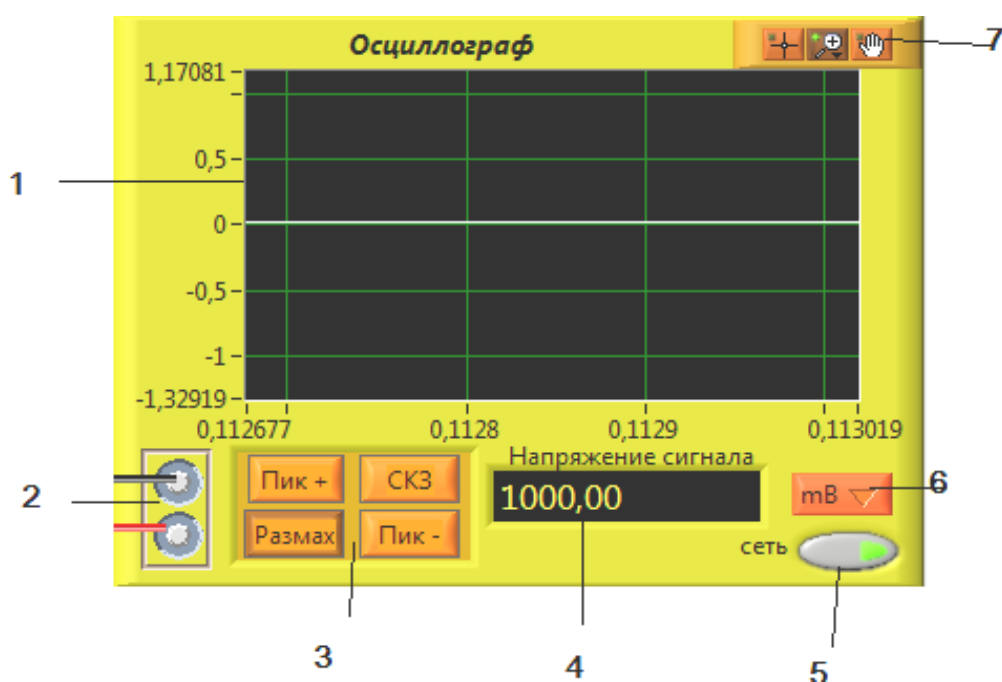


Рис. 2.5.7

2.5.4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям ИНИ выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

2.5.5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с модулями КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их возможности, передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки в различных режимах работы путем пробных измерений:

1. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать структуры сигналов, сетку частот и уровней СС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

2. Пробные измерения гармонического сигнала без шумов и с шумами

Подать на вход ИНИ гармонический сигнал разного уровня и разной частоты без шумов и с шумами. Оценить правильность измерения уровня основной гармоники с помощью АС и О. Сравнить полученные результаты с установленным уровнем СС. Оценить влияние сигнала помехи близкой (некратной) к частоте сигнала. Объяснить показания ИНИ (K_{Γ} и $SINAD$).

3. Пробные измерения $SINAD$ полигармонических сигналов без шумов и с шумами

Подавать на вход ИНИ полигармонические сигналы разного уровня и разной частоты без шумов и с шумами. Устанавливать частоты кратные и некратные основной частоте. Оценить правильность измерения K_{Γ} и $SINAD$ с помощью АС и ИНИ. Сопоставить результаты и оценить влияние шумов и структуры гармоник.

Уровень 2: Применение КВП для исследования спектральных составляющих полигармонического, шумового и комбинированного сигнала. Предварительно выбрать для измерений известные структуры полигармонических сигналов, включая амплитуды, частоты и фазы всех гармоник. Оценить влияние соотношения амплитуд, частот и начальных фаз компонент спектра на форму и СКЗ сигнала.

1. Исследование спектра, K_{Γ} и $SINAD$ известного гармонического сигнала без шумов и с шумами, с помехой и без помехи

Для типовых исследований предлагается сформировать гармонический сигнал с шумами и без шумов, а также двухчастотный сигнал с кратными и некратными (близкими и далекими) частотами. Объяснить различия значений K_{Γ} и $SINAD$. Сравнить результаты измерений с ожидаемыми значениями и значениями, полученными с помощью АС.

2. Исследование спектра, K_{Γ} и $SINAD$ известных полигармонических сигналов при их синтезе ограниченным числом составляющих (до 16) без шумов и с шумами, с помехой и без помехи

Для типовых исследований предлагается синтезировать полигармонический сигнал с шумами и без шумов, с кратными и некратными (близкими и далекими) частотами. Объяснить различия значений K_{Γ} и $SINAD$. Сравнить результаты измерений с ожидаемыми значениями и значениями, полученными с помощью АС.

3. Исследование возможностей и особенностей применения ИНИ и АС для оценки отношения сигнал/шум (С/Ш) для гармонических и полигармонических сигналов

Для типовых исследований предлагается провести измерения отношения С/Ш и объяснить данные, получаемые с помощью ИНИ и АС, при изменении уровня шума для разной структуры сигнала.

Уровень 3: Изучение методики и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик ИНИ при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

Поверку ИНИ можно осуществлять по эталонной мере (эталонному синтезатору – калибратору) и по эталонному прибору (АС).

При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

- Внешний осмотр.
- Опробование.
- Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка:

1. Проверить работоспособность ИНИ путем подачи известного сигнала. Выбрать сетку частот и уровней для поверки, исходя из возможностей образцового СС.
2. Определить погрешности измерения КНИ и SINAD сигнала образцового СС в диапазоне уровней и частот (1 мВ ... 10 В; 10 Гц... 100 кГц). Для этого сравнить результаты измерения с расчетными значениями КНИ и SINAD, с учетом формы сигнала и его спектра, представленных на О и АС. Уменьшая уровень сигнала с 10 В до 1 мВ оценить правильность роста КНИ сигнала при неизменном уровне шума. Построить графики погрешностей в зависимости от частоты для разных уровней сигнала, а также в зависимости от уровня для разных частот сигнала СС:

$$\delta = \frac{K_{Гиз} - K_{Грасч}}{K_{Грасч}}, \text{ где } K_{Грасч} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}.$$

3. Выбрать формы представления погрешностей (одночленной или двухчленной формулой) и записать аппроксимирующие выражения погрешностей с учетом 2-кратного запаса и рекомендуемого ряда чисел для коэффициентов.
4. Измерения гармонического сигнала с гармонической помехой

Апробировать работу ИНИ в диапазоне частот при подаче гармонического сигнала в присутствии близкой и далекой по частоте гармонической помехи. Сравнить результаты измерения с ожидаемыми значениями КНИ, исходя из формы и спектра сигнала с помехой, представленных на О и АС. Оценить погрешности и построить график. Объяснить показания K_G и SINAD.

2.5.6. Содержание отчета

1. Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
2. Задачи лабораторной работы.
3. Теоретические сведения (по усмотрению студента).
4. План экспериментальных исследований.
5. Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
6. Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

2.5.7. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Что такое нелинейные искажения, как и чем их оценивают?

2. Назовите методы измерения КНИ.
3. Какой метод не дает методической погрешности?
4. Поясните работу режекторного ИНИ.
5. Какой метод используется в серийных ИНИ?
6. Назовите основные метрологические характеристики ИНИ.
7. Чем отличаются виртуальные ИНИ от автономных приборов?
8. Какие измерения можно проводить с помощью исследуемого ИНИ?
9. Как работает виртуальный ИНИ?
10. Какие виртуальные приборы использовались при исследованиях и для чего?
11. Какие органы управления имеет ИНИ?
12. От чего зависит КНИ и *SINAD* гармонического сигнала с шумом?
13. Как влияет на работу ИНИ гармоническая помеха?
14. Как синтезировать сигнал с заданным уровнем КНИ и *SINAD*?
15. Как оценить число учитываемых в ИНИ гармоник?
16. Как оценить полосу частот, в которой измерен КНИ?
17. Какой спектр имеет шумоподобный сигнал?
18. Какой спектр имеет гармонический сигнал?
19. Как выглядит спектр меандра?
20. Как выглядит спектр пилообразного сигнала?
21. Как выглядит спектр комбинированного сигнала

Дополнительные вопросы для уровня 2

22. Как оценить коэффициент нелинейных искажений сигнала?
23. Как исследовать спектр неидеального гармонического сигнала?
24. Как сравнить показания ИНИ и АС?
25. Как оценить погрешность измерения?
26. Как влияет форма сигнала на КНИ и *SINAD*?
27. Почему при уменьшении уровня сигнала возрастает КНИ?
28. Как влияет помеха на КНИ и *SINAD*?
29. Поясните результаты эксперимента.

Дополнительные вопросы для уровня 3

30. Какими приборами можно проводить поверку?
31. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке ИНИ?
32. Как определить реальный диапазон рабочих частот ИНИ?
33. Как определить погрешности измерения КНИ и *SINAD* с помощью образцового СС?
34. Как определить погрешности измерения КНИ и *SINAD* с помощью образцового АС?
35. Какая принципиальная разница КНИ и *SINAD*?
36. Поясните результаты поверки.
37. Какова структура погрешности (с классификацией) ИНИ?
38. На какой шкале, и с какой погрешностью можно измерить $K_{\Gamma}=(0,05+0,01N)\%$, если класс точности прибора 0,01 (N – номер студента по списку группы)?

2.1. Фазометры

2. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить работу фазометров* - их принципы действия и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы с виртуальным

прибором в режимах измерения фазового сдвига гармонического сигнала и задержки периодических импульсов.

Уровень 2: Применить фазометр для измерения параметров сигналов при наличии и отсутствии шумов, а также для испытаний регулируемого фазовращателя, линии задержки и двухканального осциллографа.

Уровень 3: Изучить и освоить методики поверки фазометра путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку фазометра с помощью образцовых виртуальных приборов.

3. Назначение и принципы построения фазометров

Фазой гармонического напряжения называется аргумент функции $U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$. Сдвиг фазы представляет собой модуль разности аргументов двух гармонических сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$ одинаковой частоты $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$. Если φ_1 и φ_2 постоянны, то $\Delta\varphi$ от времени не зависит. При $\Delta\varphi = 0$ гармонические напряжения называются синфазными, при $\Delta\varphi = \pm\pi$ - противофазными.

Физически разность фаз двух сигналов возникает в результате задержки одного из них по отношению к другому. При этом для работы многих электронных устройств сдвиг фазы имеет существенное значение и подлежит измерению и регулировке. Для негармонических колебаний применяют понятия сдвиг или задержка по времени.

Измерение сдвига фазы может выполняться методами непосредственной оценки и сравнения. Измерительные приборы называются фазометрами.

Основные методы измерений:

1. Осциллографические (на основе меток линейной развертки)

Наиболее просто фазовый сдвиг можно измерить двухканальным осциллографом, сделав отсчеты по горизонтальной оси времени или в относительных единицах оси X:

$$\Delta\varphi = 360^\circ \Delta t / T = 360^\circ \Delta x / X.$$

Достижимая погрешность $2...5^\circ$ определяется разрешающей способностью осциллографа. Диапазон частот также ограничивается осциллографом.

2. Компенсационные (на основе сравнения измеряемого и образцового фазового сдвига)

Схема приведена на рис. 2.1.1. Диапазон рабочих частот очень широкий, включает СВЧ. Точность на порядок выше $0,2...0,5^\circ$.

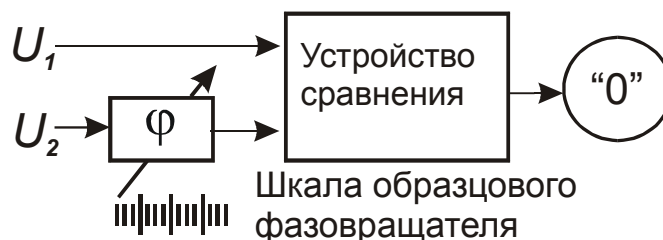
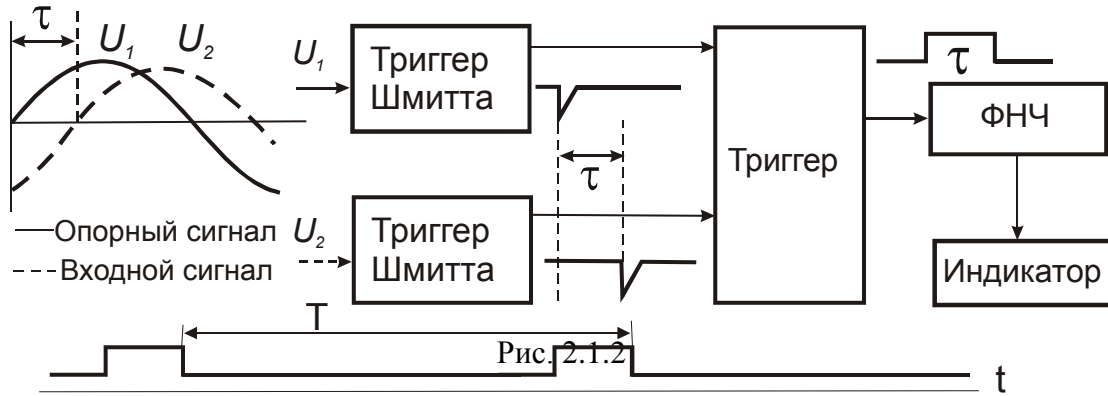


Рис. 2.1.1

3. С преобразованием фазового сдвига в напряжение, во временной интервал и др.

Например, в триггерном фазометре опорный и исследуемый сигналы поступают (см. рис. 2.1.2) на входы триггеров Шмитта, вырабатывающих импульсы запуска формирователя интервала задержки измеряемого сигнала по отношению к опорному.



ФНЧ и индикатор интегрируют импульсы τ за период T . Постоянное напряжение на выходе фильтра низких частот (ФНЧ) пропорционально относительной длительности импульса τ/T на выходе триггера и, соответственно, разности фаз между опорным и исследуемым сигналами. Через измерительный индикатор протекает ток, среднее значение которого пропорционально измеряемой величине. Электронные аналоговые фазометры позволяют измерять сдвиг фаз в диапазоне частот от десятков герц до единиц мегагерц. Относительная погрешность таких фазометров составляет 1-2%, разрешающая способность до 1° .

4. Цифровые (на основе метода дискретного счета)

Существующие схемы построения цифровых фазометров можно разделить на схемы уравнивающего и прямого преобразования. Компенсационные фазометры строятся по классическим схемам измерительных приборов уравнивающего преобразования, основанных на последовательном или поразрядном уравнивании. Цифровые фазометры прямого преобразования по своим структурам более разнообразны: с преобразованием фазовый сдвиг (ФС) – напряжение – код, ФС – интервал времени – код, а также корреляционные и ортогональные.

В серийных автономных цифровых фазометрах обычно используется принцип преобразования измеряемого сдвига фазы во временной интервал, длительность которого пропорциональна значению измеряемой величины, определяется методом дискретного (последовательного) счета (см. рис. 2.1.3 и 2.1.4).

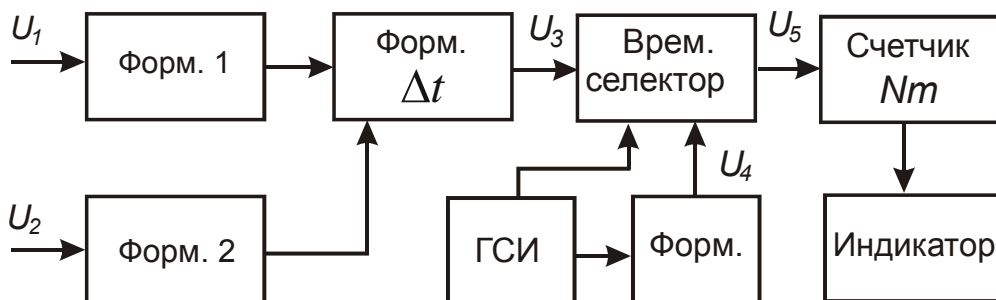


Рис. 2.1.3

В интервал $T_{изм}$ попадает большое число импульсов счета в виде N пачек. Данный фазометр прямопоказывающий, так как сдвиг фазы пропорционален числу счетных импульсов за время $T_{изм}$:

$$\Delta\varphi = 360^\circ \frac{\Delta t}{T} = 360^\circ \frac{N\Delta t}{NT} \approx \frac{360^\circ NmT_{сч}}{T_{изм}} = 10^k Nm,$$

где $10^k = 360^\circ T_{сч} / T_{изм}$; $\Delta t \approx mT_{сч}$; $NT \approx T_{изм}$.

Так как здесь осуществляется преобразование $\Delta\varphi$ во временной интервал, то составляющие погрешности те же, что и при измерении временного интервала: погрешность меры и дискретизации. Добавляется погрешность, обусловленная нецелым числом периодов сигнала в интервале измерения $T_{изм}$. Эта погрешность при работе с низкими частотами может быть очень высокой, поэтому время измерения увеличивают, оно может достигать десятков секунд.

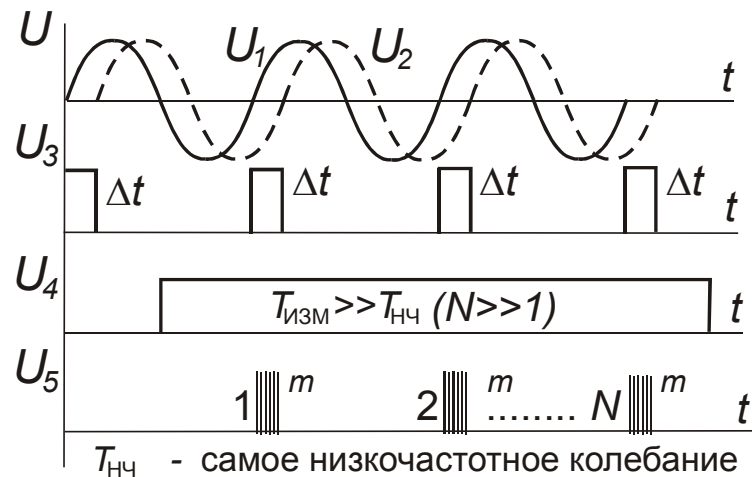
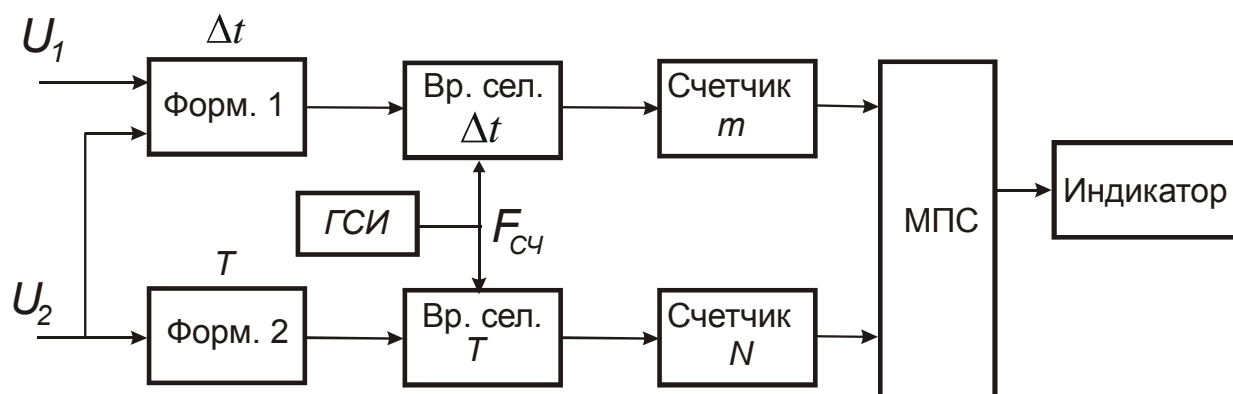


Рис. 2.1.4

Микропроцессорный фазометр (см. рис. 2.1.5) обладает высоким быстродействием и позволяет измерять фазовые сдвиги за один период сигнала. Здесь два канала, в одном канале измеряется число счетных импульсов m , которое соответствует фазовому сдвигу, в другом канале измеряется число счетных импульсов N , которое соответствует периоду. Фазовый сдвиг вычисляется по формуле:

$$\Delta\varphi = 360^\circ \frac{\Delta t}{T} \approx 360^\circ \frac{m}{N}$$



ис. 2.1.5

Р

Возможен расчет за несколько периодов, т.е. можно оценить средний фазовый сдвиг, это позволяет оценивать флуктуации фазовых сдвигов, оценивать их статистические характеристики.

В современных цифровых **фазометрах** могут применяться методы обработки дискретизированных сигналов не только во временной, но и в частотной области. Например, в виртуальном **фазометре**, используемом в лабораторных исследованиях, реализован вычислительный принцип измерения фазового сдвига сигнала на основе БПФ.

4. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

3. Общие сведения

КВП содержит 4 виртуальных прибора:

- Синтезатор сигналов (СС) или калибратор фазового сдвига и времени задержки периодического сигнала.
- Осциллограф (О).
- Фазовращатель и линия задержки (ФВ).
- Фазометр (ФМ).

Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.1.6.

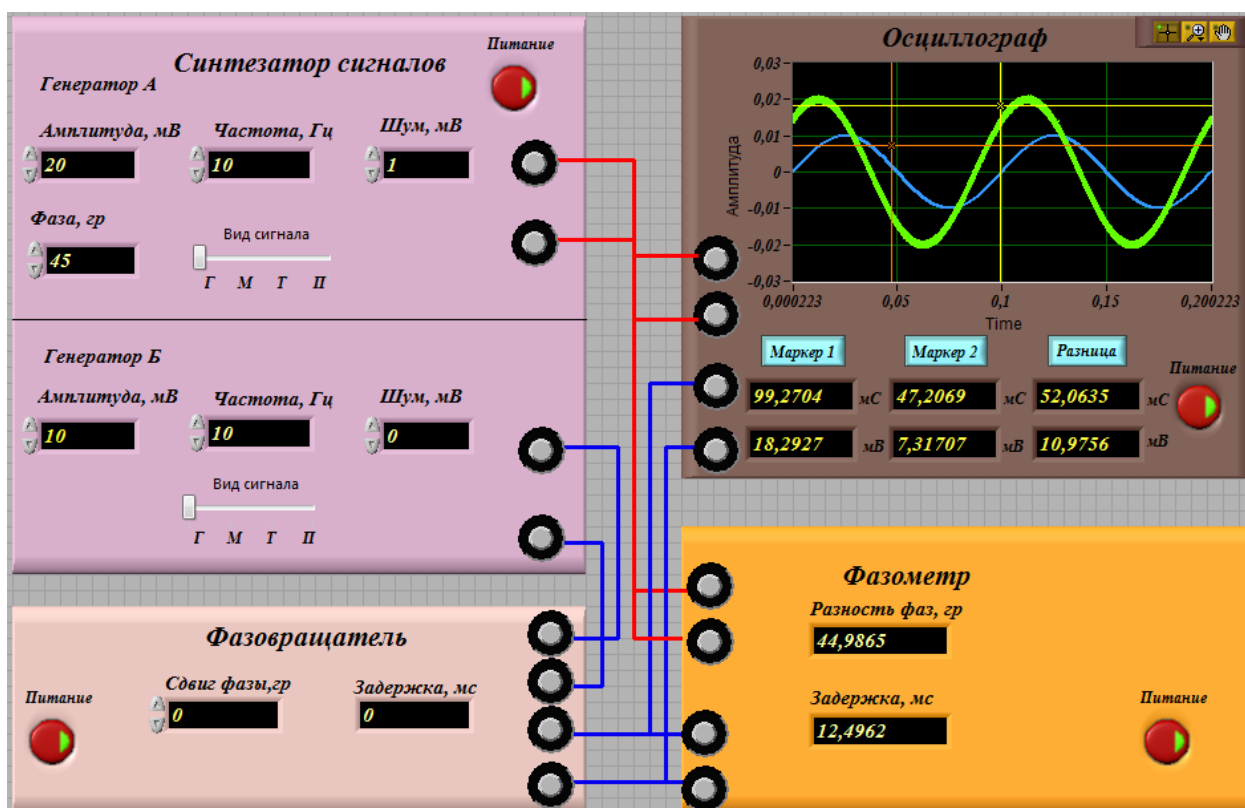


Рис. 2.1.6

Двухканальный генератор построен на основе виртуального ЦАП, синтезирующего требуемую форму периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем частотой и уровнем. Измерительные модули имитируют работу автономных приборов в отсутствии и при наличии шумов.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Выходные сигналы СС поданы одновременно на соответствующие входы всех двухканальных приборов. Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно включить прибор и установить его в нужный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «Питание» для включения.

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
- **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

4. Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигналов (СС)

СС состоит из двух модулей - генераторов А и Б. В каждом модуле устанавливается вид сигнала, его амплитуда, частота и уровень шума (см. рис. 2.1.7).



Рис. 2.1.7

Поле индикатора «Шум» может использоваться для точной установки амплитуды шума (например, 51 мВ). Для этого курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды шума и нажимается кнопка «Установить». Можно также выполнять точную регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «вверх» и «вниз», расположенные слева от поля ввода. При этом нажатие кнопки «Установить» не требуется. Размерность – милливольты (мВ).

Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно включить прибор и установить его в нужный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «Питание» для включения.

Окно ввода «Частота» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично точной установке амплитуды шума. Частота устанавливается в пределах от 10 Гц до 50000 Гц. Окно «Вид сигнала» устанавливает форму генерируемого сигнала: гармонический (Г), меандр (М), треугольный (Т), пилообразный (П).

Оциллограф

Прибор применяется для визуального контроля форм сигналов на входах ФМ (см. рис. 2.1.8).



Рис. 2.1.8

Для более точного определения параметров сигнала в конкретных точках имеется возможность включения на панорамном индикаторе одного или двух маркеров уровня и времени. Маркеры включаются кнопками «Маркер 1» и «Маркер 2», а информация об их положении отображается в соответствующих полях внизу лицевой панели. Изменение положений маркеров оценивается в виде сдвига, разницы или смещения точек, как по уровню, так и по времени.

Прибор имеет ряд вспомогательных функций, кнопки вызова которых расположены в верхней правой части его лицевой панели:



- режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



- режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении

маркера в нужном направлении;

- режимы лупы (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Фазовращатель (ФВ)

Прибор применяется для установления значения сдвига фаз между сигналами (рис. 2.1.9). Поле индикатора «Сдвиг фазы» может использоваться для точной установки разницы значений фаз сигналов (например, 10°).

Индикатор «Задержка» показывает - на сколько миллисекунд выходной сигнал ФВ отстает от входного.

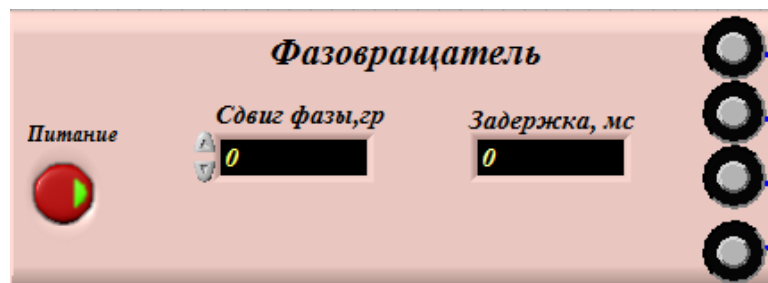


Рис. 2.1.9

Фазометр

Прибор позволяет измерять сдвиг фазы или задержку сигналов (рис. 2.1.10). Окно «Разность фаз» показывает изменение фазы сигнала в градусах, а окно «Задержка» - в миллисекундах.



Рис. 2.1.10

5. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

Для определения погрешности измерения фазового сдвига можно сравнить показания ФМ с установленными значениями сдвига образцового СС и ФВ. Изменять частоту генератора можно в пределах от 1 Гц до 100 кГц.

Абсолютная погрешность в градусах

$$\Delta = \varphi_{\text{ФМ}} - (\varphi_{\text{СС}} + \varphi_{\text{ФВ}}).$$

Относительная погрешность в процентах

$$\delta = \left[\frac{\varphi_{\text{ФМ}} - (\varphi_{\text{СС}} + \varphi_{\text{ФВ}})}{\varphi_{\text{СС}} + \varphi_{\text{ФВ}}} \right] \cdot 100\% .$$

6. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение и работа с прибором

5. Пробные измерения при отсутствии шума

Установить в каналах «А» и «Б» СС амплитуды сигналов 100 и 200 мВ на частоте 1 кГц с фазовым сдвигом 90° . Подавая с выхода СС на входы ФМ и О гармонические или импульсные сигналы, апробировать работу ФМ при измерении разности фаз и времени задержки для различных состояний ФВ. Формы сигналов контролировать на осциллографе. Сравнить полученные результаты с учетом состояния ФВ.

6. Пробные измерения при наличии шума

Установить в каналах «А» и «Б» СС амплитуды шума и сигналов 100 мВ при частоте 1 кГц. Подавая с выхода ГС на входы ФМ гармонические или импульсные сигналы, апробировать работу ФМ при измерении разности фаз и времени задержки для различных состояний ФВ. Формы сигналов контролировать на осциллографе. Сравнить полученные результаты с учетом состояния ФВ.

7. Измерения в диапазоне частот

Повторить пп.1 и 2 на краях диапазона рабочих частот СС.

8. Измерения при разных соотношениях уровней сигналов в каналах

Повторить пп.1 и 2 на краях диапазона рабочих уровней СС.

9. Измерения при разных соотношениях уровней сигналов и шумов в каналах

Повторить пп.1 и 2 на краях диапазона рабочих уровней сигналов и шумов СС.

Уровень 2: Применение фазометра для измерения параметров сигналов и устройств при наличии и отсутствии шумов. При эксперименте испытаниям подвергаются регулируемый фазовращатель/линия задержки, двухканальный осциллограф, а также калибратор фазового сдвига (СС) и временной задержки.

5. Калибровка (градуировка) и проверка рабочего диапазона частот регулируемого ФВ гармонического сигнала

Выбрать сетку частот, уровней сигнала и шумов для проведения измерений ФВ. Последовательно устанавливая в каналах «А» и «Б» СС минимальные, средние и максимальные частоты и амплитуды гармонических сигналов. В каждом состоянии оценить погрешности формирования фазового сдвига при отсутствии и наличии шумов.

6. Калибровка (градуировка) и проверка рабочего диапазона частот регулируемой линии задержки импульсного сигнала

Для выбранной сетки частот, уровней сигнала и шумов последовательно устанавливая в каналах «А» и «Б» СС различные формы, а также минимальные, средние и максимальные частоты и амплитуды импульсных сигналов. В каждом состоянии оценить погрешности формирования задержки при отсутствии и наличии шумов.

7. *Проверка рабочего диапазона частот двухканального осциллографа в режимах измерения фазового сдвига и задержки сигнала*

Выбрать сетку частот, уровней сигнала и шумов для проведения измерений. Последовательно устанавливать в каналах «А» и «Б» СС минимальные, средние и максимальные частоты и амплитуды гармонических сигналов. В каждом состоянии оценить погрешности измерения фазового сдвига осциллографом при отсутствии и наличии шумов. Провести аналогичные измерения для импульсных сигналов в режиме измерения времени задержки.

8. *Проверка рабочего диапазона частот двухканального СС в режимах формирования фазового сдвига и задержки сигнала*

Выбрать сетку частот и уровней сигнала для проведения испытаний СС. Последовательно устанавливать в каналах «А» и «Б» СС минимальные, средние и максимальные частоты и амплитуды гармонических и импульсных сигналов. В каждом состоянии оценить погрешности формирования фазового сдвига гармонического сигнала и временной задержки импульсов.

9. *Проверка компенсационного метода измерения фазового сдвига и задержки сигнала СС*

Компенсационный метод предполагает использование ФМ в качестве «0» индикатора равенства фазового сдвига или временной задержки сигнала формируемого в СС и скомпенсированного в ФВ. Предварительно выбираются виды сигналов, сетка частот и уровней. Далее проводятся измерения, аналогичные пп. 4.

Уровень 3: Изучение методик и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик ФМ при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

При проведении поверки выполняются следующие операции:

4. Внешний осмотр.
5. Опробование.
6. Определение метрологических характеристик прибора:
 - определение погрешностей измерения;
 - определение диапазона рабочих частот и уровней сигнала.

Учебная поверка ФМ:

6. *Проверить работоспособность* (опробование) ФМ во всех режимах измерения. Выбрать сетку частот и уровней сигналов для проведения поверки.

7. *Оценить минимальный уровень сигнала без шумов* при устойчивом измерении в диапазоне рабочих частот ФМ.

8. *Определить погрешности* измерения фазового сдвига и задержки с помощью образцовых СС и ФВ в диапазоне значений от 1 мВ до 10 В и в диапазоне частот сигнала 1 Гц – 100 кГц.

9. *Определить реальный диапазон рабочих частот* ФМ по критерию допустимых значений абсолютной или относительной основной погрешности измерения фазового сдвига и задержки.

10. *Определение границы допустимых шумов* путем оценки отношения сигнал/шум, при котором нарушается устойчивое и правильное измерение фазового сдвига и задержки.

7. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
- Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

8. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

27. Что измеряют с помощью ФМ?
28. Назовите методы измерения фазового сдвига.
29. Чем отличаются виртуальные ФМ от автономных?
30. Какие сигналы называются синфазными и противофазными?
31. Как измерить сдвиг фазы осциллографом?
32. Поясните компенсационный метод измерения.
33. Как работает триггерный фазометр?
34. Поясните схему и принцип работы автономного цифрового фазометра.
35. Поясните работу микропроцессорного фазометра.
36. Как реализуется принцип преобразования измеряемого сдвига фазы во временной интервал?
37. Что и как определяется методом дискретного счета?
38. Поясните метод дискретного счета для измерения сдвига фазы.
39. Какова структура погрешности для метода дискретного счета?
40. Что можно измерить с помощью исследуемого ФМ?
41. Как работает виртуальный ФМ?
42. Почему ФМ всегда двухканальный?
43. Какие приборы использовались при исследованиях и для чего?
44. Какие органы управления имеет ФМ?
45. Поясните экспериментальные результаты.

Дополнительные вопросы для уровня 2

46. Как проверить рабочий диапазон частот СС, О и ФВ в режимах измерения и формирования сдвига фазы и задержки?
47. Как оценивается абсолютная и относительная погрешность ФМ?
48. Как оценивается абсолютная и относительная погрешность ФВ?
49. Как оценивается погрешность формирования фазового сдвига и задержки СС?
50. Как оценивается погрешность измерения фазового сдвига и задержки О?
51. Что показали исследования фазовращателя/линии задержки?
52. Что показали исследования двухканального осциллографа?
53. Что показали исследования калибратора фазового сдвига (СС) и временной задержки?
54. Как выбрать сетку частот, уровней сигнала и шумов для проведения измерений параметров ФВ, СС и О?

55. Как отградуировать и оценить рабочий диапазон частот регулируемой линии задержки импульсного сигнала?
56. Поясните результаты оценки рабочего диапазона частот двухканального осциллографа в режимах измерения фазового сдвига и задержки сигнала.
57. Поясните результаты оценки рабочего диапазона частот двухканального СС в режимах формирования фазового сдвига и задержки сигнала.
58. Поясните результаты измерения компенсационным методом фазового сдвига и задержки сигнала СС.
59. Как оценить нестабильность частоты во времени?

Дополнительные вопросы для уровня 3

60. Какими приборами можно проводить поверку?
61. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке ФМ?
62. Как определить диапазон рабочих частот и уровней ФМ?
63. Как оценить минимальный уровень сигнала устойчивого измерения?
64. При каком соотношении уровней сигнала, помехи и шумов уверенно измеряется сигнал?
65. Как проверить влияние наложения спектров сигнала и помехи?
66. Как оценить минимальный уровень измерительного сигнала?
67. Как определить погрешности измерения фазового сдвига и задержки сигнала?
68. Как определение границы допустимых шумов?

2.2. Синтезаторы сигналов специальной формы

1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить синтезатор сигналов специальной формы (сокращенно «синтезатор форм» - СФ)* - принцип работы, органы управления и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы с прибором.

Уровень 2: *Применить СФ* для формирования и исследования гармонического, импульсного (прямоугольного, треугольного и пилообразного), шумового и комбинированного сигнала.

Уровень 3: *Изучить и освоить методику поверки СФ* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку с помощью образцового осциллографа.

2. Назначение, принципы работы и возможности

Для измерений и контроля РЭА, проведения технологических испытаний необходимы генераторы специальных и комбинированных (сложных по структуре) сигналов с компьютерным управлением их параметров.

Измерительный генератор (генератор сигналов, от лат. generator) — электронное устройство для воспроизведения электромагнитного сигнала (синусоидального, импульсного, шумового или специальной формы). Генераторы применяются для проверки и настройки радиоэлектронных устройств, каналов связи, при поверке и калибровке средств измерений и в других целях.

С помощью измерительных генераторов осуществляется:

- тестирование аналого-цифровых устройств (радиоприемников, усилителей, преобразователей и фильтров, и т.д.);
- проверка параметров сигнала;

- моделирование шума и помех;
- тестирование каналов связи, передачи данных и сетей (Ethernet и др.);
- другое.

По ГОСТ 15094 генераторы подразделяются на: низкочастотные, высокочастотные, импульсные, сигналов специальной формы, шумовых сигналов и качающейся частоты. Однако, классификационные границы условны, некоторые генераторы занимают промежуточное положение между низко- и высокочастотными, некоторые бывают комбинированными по виду сигнала. Принятые обозначения:

- Г2 — генераторы шума, имитируют белый или розовый шум (Г2-37, Г2-47, Г2-59);
- Г3 — генераторы низкой частоты (ГНЧ), обычно от 20 Гц до 200 кГц, реже до 2 или 10 МГц, модуляция сигнала в ГНЧ, как правило, не предусмотрена (Г3-109, Г3-118, Г3-119, Г3-122);
- Г4 — генераторы высокой частоты, предназначены для работы в радиочастотном диапазоне с различными видами модуляции (Г4-83, Г4-129, Г4-153, Г4-154, РГ4-14, РГ4-17-01А, Г4-219, Г4-220);
- Г5 — генераторы импульсов, воспроизводят последовательности прямоугольных импульсов, некоторые генераторы способны генерировать кодовые импульсные последовательности (Г5-54, Г5-80, Г5-89, Г5-100, Г5-109);
- Г6 — генераторы сигналов специальной формы, воспроизводят последовательности импульсов разного вида: треугольного, пилообразного, трапецеидального и др. (Г6-17, Г6-22, Г6-39);
- Г7 — синтезаторы частот, используют различные методы синтеза частоты из опорного сигнала, могут иметь в своем составе модуляторы (Г7-14, Г7-15, Г7М-20, Г7М-40);
- Г8 — генераторы качающейся частоты.

Сигналы сложной/специальной формы могут формироваться путем суммирования сигналов нескольких автономных генераторов: импульсных, гармонических и шумовых.

Автономный серийный генератор является радиоэлектронным устройством, содержащий в зависимости от вида и способа формирования сигнала разные функциональные узлы. Общими узлами, для разных видов генераторов, являются: источник исходного сигнала, усилители, делители и умножители частоты, фильтры и формирователи сигнала, выходной аттенюатор, устройства и цепи управления, цепи стабилизации выходного уровня сигнала и блок питания. Источник исходного сигнала представляет собой перестраиваемый автогенератор на колебательных RC-контурах или стабилизированный кварцевый генератор. Дополнительно, в состав генератора могут быть включены модуляторы, формирователи временных интервалов, измерительные и другие устройства. Генераторы сигнала оптического диапазона работают на принципах квантовой электроники и содержат соответствующие узлы.

Альтернативой автономных приборов являются генераторы сигналов сложной/специальной формы, использующие принцип прямого цифрового синтеза формы сигнала с помощью ЦАП. По сути – это синтезаторы сигналов специальной формы (СФ). Следует заметить, что некоторые современные приборы, имеющие встроенный одноплатный компьютер, также используют принцип прямого синтеза сигнала.

Прямой синтез осуществляется под управлением процессора, вычисляющего в каждый момент времени мгновенный уровень формируемого комбинированного сигнала с любым числом составляющих: гармонических, импульсных, шумовых. При этом СФ

обеспечивает высокую стабильность частоты, точность уровня выходного сигнала и позволяет генерировать чистые синусоидальные сигналы с малым уровнем искажений. Можно формировать двух- и многотональные сигналы с шумом и без шума, заменив таким образом от двух до пяти автономных приборов.

СФ обладают всеми возможностями и гибкостью автономных серийных приборов, тщательное экранирование сводит к минимуму выходные шумы. Ограничениями являются разрядность (динамический диапазон) и диапазон рабочих частот используемого для синтеза ЦАП. Вариант компьютерного СФ в виде виртуального генератора, представлен на рис. 2.2.1.

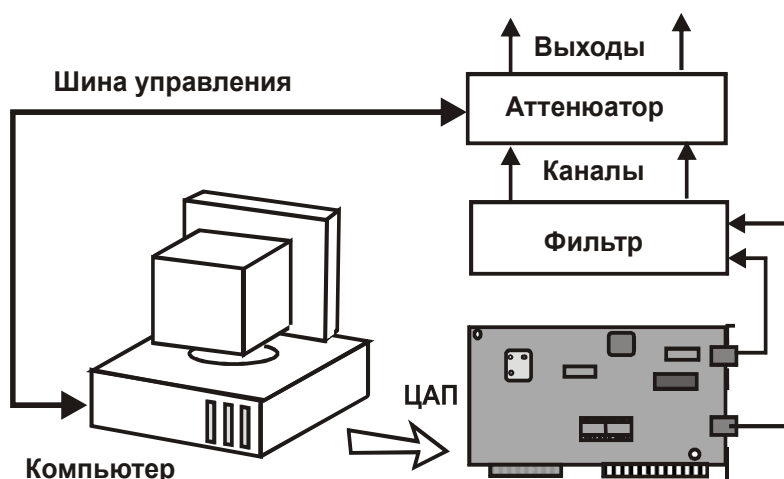


Рис. 2.2.1

Виртуальный генератор (ВГ) реализует цифровой синтез сигнала в соответствии с его математической моделью. Плата расширения позволяет превратить ПК в многоканальный генератор, частотный и динамический диапазон которого определяет ЦАП.

В приведенной схеме используются управляемые с помощью ПК ЦАП и аттенюатор, расширяющий динамический диапазон уровней сигнала. Фильтр очищает испытательный сигнал, формируемый ЦАП от составляющих частоты дискретизации.

Как правило, автономный генератор имеет один рабочий канал, а у виртуального - их может быть несколько. При этом можно синтезировать комбинированные сигналы непосредственно в одном рабочем канале.

В отличие от автономных приборов, виртуальный генератор позволяет сформировать любую необходимую функцию сигнала, шума, а также их комбинации. Он может работать как адаптивное устройство в различных комплексах и системах.

Преимущества:

- Можно формировать любой сигнал от одиночного импульса до длинных кодовых последовательностей, вычисляемых непосредственно в процессе вывода сигнала. Ограничений по сложности форм и последовательностей нет.
- Возможно прецизионное формирование сигналов низких и инфранизких частот, что на аппаратном уровне очень сложно.
- Можно задавать любой программно регулируемый сдвиг фазы между сигналами разных каналов. Один из каналов может модулировать частоту другого, а форма сигналов для каждого канала при этом задается произвольно.

- Имеется возможность адаптивного изменения параметров в экспериментах со следящей обратной связью. Это позволяет создавать устройства и системы автоматического управления с использованием возможностей ПК.
- На основе виртуального генератора можно создавать управляемый генератор качающей частоты для исследования АЧХ. При этом потребуется плата ЦАП и одна из измерительных плат АЦП. Процесс калибровки и измерений можно полностью автоматизировать.

3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит два двухканальных прибора:

- Синтезатор сигналов специальной формы (СФ).
- Осциллограф (О).

Синтезатор сигналов специальной формы построен на основе виртуального ЦАП, формирующего требуемый вид периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем формой, частотами и уровнями используемых компонент, включая шумы.

Осциллограф, построенный на основе двухканального АЦП, содержит в своей структуре двухканальный вольтметр и систему формирования маркерных линий с вычислением расстояния между ними отдельно по осям абсцисс и ординат.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.2.2.

Передние панели приборов имеет органы управления, с помощью которых можно левой кнопкой мыши включить прибор (кнопкой «Сеть») и установить его в нужный режим работы.

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- ***Стрелка слева – направо*** для однократного запуска.
- ***Свернутые в кольцо две стрелки*** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- ***Восьмиугольник*** (активное состояние красного цвета).

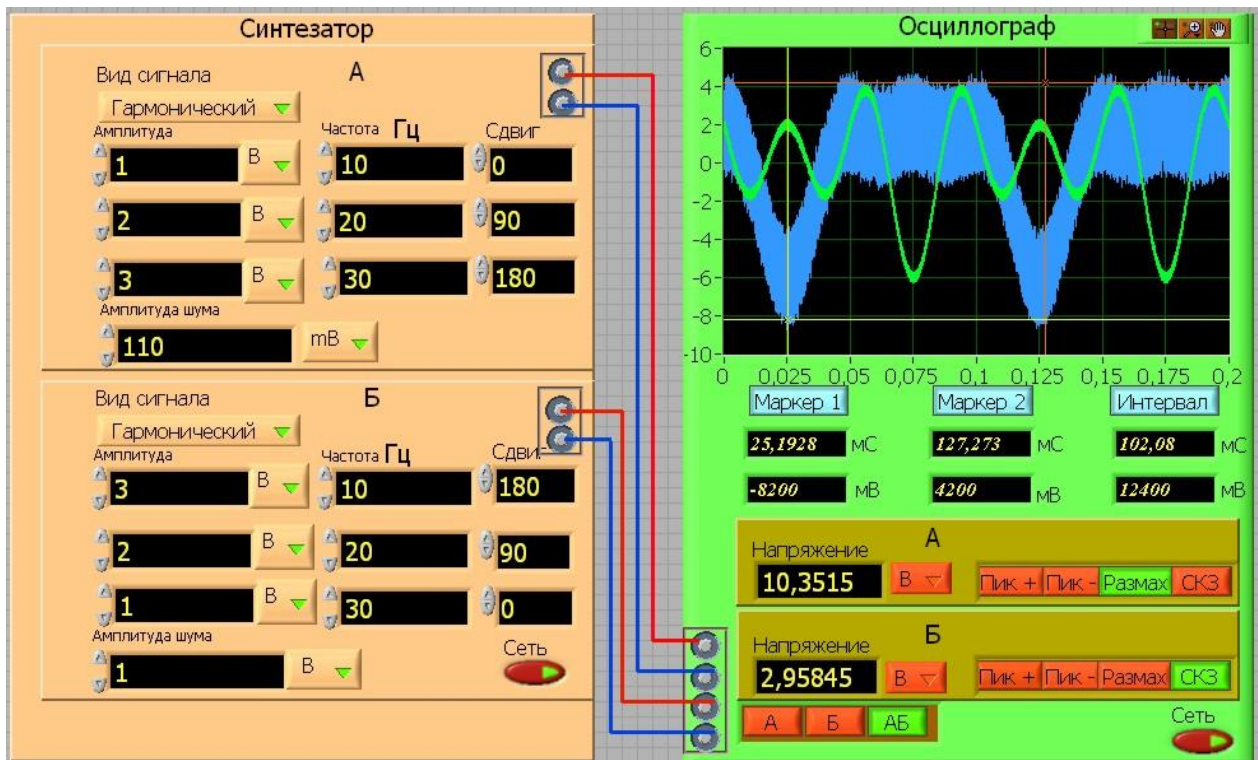


Рис. 2.2.2

Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигналов специальной формы (СФ)

СФ (см. рис. 2.2.3) состоит из двух генераторных блоков: А и Б. В каждом блоке имеется возможность синтеза сигнала тремя периодическими компонентами выбираемой формы и шумовым сигналом. Для каждой периодической составляющей регулируется амплитуда, частота и начальная фаза или временная задержка («Сдвиг»).

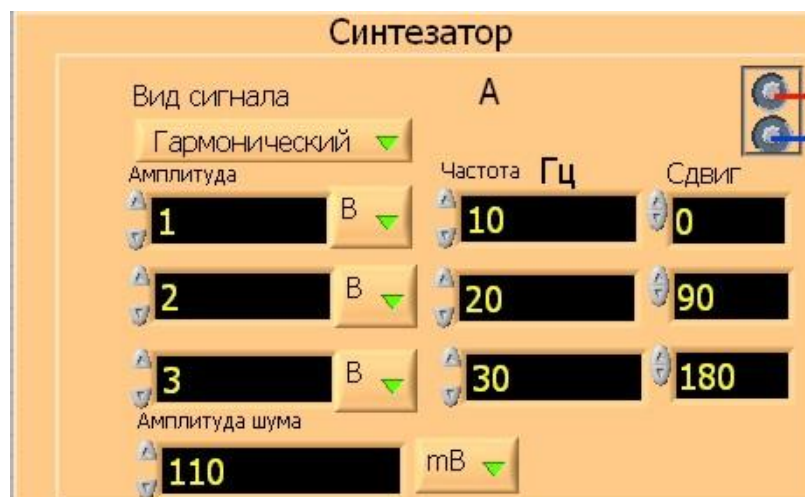


Рис. 2.2.3

Окно «Вид сигнала» устанавливает форму генерируемого сигнала: гармонический, меандр, треугольный, пилообразный.

Три поля ввода «Амплитуда» служат для установки уровней всех используемых компонент сигнала. При этом курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Можно набрать требуемое значение или регулировать уровень в младшем разряде, используя клавиши в виде стрелок «*вверх*» и «*вниз*», расположенные слева от поля ввода. Амплитуда меняется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 514| позволяет стрелками клавиатуры изменять именно этот разряд (514| ...515...)). Для выбора размерности применяется выплывающее меню справа от индикатора (мВ/В).

Аналогично поле индикатора «Амплитуда шума» используется для установки уровня шума. Вводится необходимое значение амплитуды и выбирается размерность (мкВ/мВ/В).

Окно ввода «Частота Гц» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично установке амплитуды. Частота устанавливается в пределах от 10 Гц до 50000 Гц.

Окно ввода «Сдвиг» (φ) используется для установки начальной фазы φ или эквивалентной временной задержки, для расчета которой используется формула:

$$T_{\text{зад}} = T_C \varphi / 360.$$

Оциллограф

Прибор имеет двухканальный панорамный индикатор, а также ряд вспомогательных панелей и переключателей:

Внизу слева расположен переключатель режима индикации с выбором каналов А, Б и АБ (см. рис. 2.2.4).



Рис. 2.2.4

Под панорамным индикатором расположена панель включения маркерных линий (см. рис. 2.2.5). Маркеры включаются кнопками «Маркер 1» и «Маркер 2», а информация об их положении отображается в соответствующих полях внизу лицевой панели. Изменение положений маркеров оценивается в виде интервала, как по уровню, так и по времени (кнопка «Интервал»).

Маркер 1	Маркер 2	Интервал
25,1928 мС	127,273 мС	102,08 мС
-8200 мВ	4200 мВ	12400 мВ

Рис. 2.2.5

Ниже располагается панель двухканального встроенного вольтметра (см. рис. 2.2.6), позволяющего оценить параметры сигналов на входах осциллографа. В каждом канале реализовано четыре режима измерения и индикации:

- «Пик →» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «Пик +» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «Размах» - размаха сигнала;
- «СКЗ» - среднеквадратического значения сигнала.

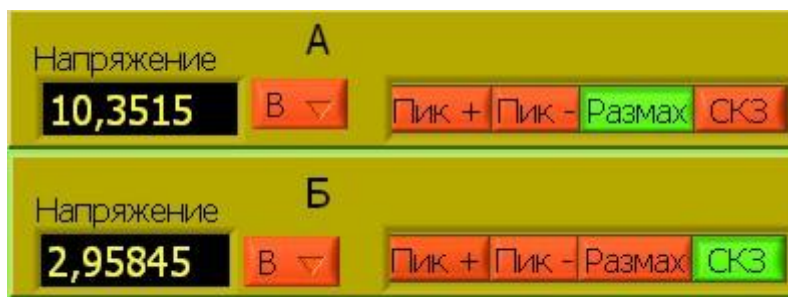


Рис. 2.2.6

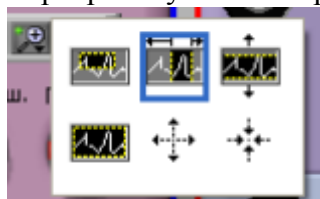
Осциллограф имеет ряд вспомогательных функций, кнопки вызова которых расположены справа в верхней части его лицевой панели:



- режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



- режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении;



- режимы лупы с рабочими состояниями:

- Увеличение участка горизонтальной оси (регулировка коэффициента развертки).
- Возврат к полному отображению графика.

4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям осциллографа выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- изучить принципы формирования и методики измерений амплитуды, периода, задержки, частоты и фазового сдвига сигналов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов;
- получить индивидуальный допуск к выполнению запланированных исследований.

5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их возможности, передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки в различных режимах работы приборов путем пробных измерений:

1. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать виды сигналов, сетку частот и амплитуд сигналов СФ для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

2. Пробные измерения сигналов разных форм без шумов и с шумами

Подать на входы гармонические сигналы разного уровня и разной частоты без шумов. Сравнить полученные результаты с установленным уровнем СФ. Оценить влияние на результаты шумов разного уровня.

Выполнить пробные измерения пиковых значений, амплитуды, частоты и периода гармонического, импульсных (меандра, треугольного и пилообразного) и комбинированных сигналов, вырабатываемых СФ.

Измерение амплитуды и СКЗ сигналов разного вида

- а) Установите параметры сигналов СФ в каналах А и Б такими, как показано на рис. 1.
- б) В режиме индикации АБ, используя лупу, установите коэффициент развертки таким, чтобы на экране помещалось несколько периодов исследуемого сигнала.
- в) Измерьте с помощью маркерных линий уровня, а также встроенным вольтметром амплитуду, размах и СКЗ каждого сигнала. Уточните результаты, используя лупу для приближения в точке измерения.
- г) Сравните результаты с установками СФ и оцените погрешности.
- д) Повторите пп. б)...г) для шумового сигнала, а также для других форм сигнала с шумами и без шумов.

Измерение периода и частоты сигналов разного вида

- а) Установите фазу, частоту и уровень гармонического сигнала СФ: в канале А – 90° , 1 кГц, 100 мВ; в канале Б – 90° , 2 кГц, 150 мВ.
- б) В режиме индикации АБ, используя лупу, установите коэффициент развертки таким, чтобы на экране помещалось несколько периодов (близкое к целому числу) сигнала (от 1 до 5 для использования всего экрана).
- в) Измерьте с помощью маркерных линий времени период сигнала в каждом канале (по точкам прохождения через 0). Уточните результаты, используя лупу для приближения в точке измерения.
- г) Сравните результаты с установками СФ и оцените погрешности.
- д) Повторите пп. б)...г) для других форм сигнала с шумами и без шумов.

Измерение угла фазового сдвига и времени задержки

- а) Установите частоту и уровень гармонического сигнала СФ: в канале А - 1 кГц, 100 мВ, 0° ; в канале Б – 1 кГц, 150 мВ, 30° (60° , 90° , 120°).
- б) В режиме индикации АБ, используя лупу, установите коэффициент развертки таким, чтобы на экране помещалось 2 - 3 периода сигнала.
- в) Измерьте с помощью маркерных линий времени по точкам прохождения через 0 период сигнала и временную задержку сигнала. Уточните результаты, используя лупу для приближения в точке измерения.
- г) Оцените сдвиг фазы и влияние шумов для разных значений сдвига на СФ.
- д) Сравните результаты с установкой сдвига СФ и оцените погрешности.
- е) По аналогии с пп. б)...д) проведите измерение времени задержки для сигналов других форм. Оцените задержку и погрешности по отношению к периоду.

Уровень 2: Применение СФ для синтеза комбинированных сигналов с шумами и без шумов. Предварительно выбрать структуры комбинированных сигналов, включая

амплитуды, частоты и фазы (задержки) всех составляющих. Оценить влияние соотношения амплитуд, частот и начальных фаз (задержек) компонент на форму и параметры комбинированного сигнала: его пиковых значений, размах и СКЗ.

6. *Формирование и анализ двухчастотных гармонических сигналов*

Для типовых исследований предлагается синтезировать двухчастотный гармонический сигнал с шумами и без шумов. Например, установить в каналах А и Б двухчастотные сигналы с одинаковыми параметрами: 100 Гц, 100 мВ, 0°. Исследовать изменение формы при малом и большом разносе фаз (30°, 60°, 90°, 120°.....), а затем частот (1, 2, 4, 8, 15, 25, 50, 100, 200, 400, 1000, 10000 Гц) в одном из каналов, сравнивая с сигналом в другом канале без сдвига фаз и частот.

7. *Формирование и анализ трехчастотных гармонических сигналов*

Для типовых исследований предлагается синтезировать трехчастотный гармонический сигнал с шумами и без шумов. Например, установить в каналах А и Б трехчастотные сигналы с параметрами: боковые частоты -10100 Гц, 10 мВ, 0° и 9900 Гц, 10 мВ, 0°; центральная частота - 10000 Гц, 100 мВ, 0°. Оценить глубину модуляции АМ сигнала по пиковым значениям огибающей суммарного сигнала A_{MAX} и A_{MIN} :

$$M = \frac{A_{MAX} - A_{MIN}}{A_{MAX} + A_{MIN}} 100\%.$$

Исследовать изменения формы сигнала при симметричном и несимметричном изменении начальной фазы и боковых частот в одном канале, оставляя неизменным сигнал второго канала. Оценить влияние шумов, неравномерного затухания, а также линейного и нелинейного изменения начальной фазы (влияние АЧХ и ФЧХ канала передачи сигнала).

8. *Формирование и анализ многочастотных сигналов сложной формы*

Для типовых исследований предлагается синтезировать двух- и трехчастотные сигналы с шумами и без шумов из сигналов пилообразной, треугольной и прямоугольной формы.

Уровень 3: Изучение методики и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик СФ при учебной поверке проводится в предположении, что используемый в работе виртуальный осциллограф является образцовым, т.е. имеет ранг ОСИ соответствующего разряда.

Поверку СФ можно осуществлять по эталонному синтезатору – калибратору и по эталонному измерительному прибору (О или/и АС). При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

- Внешний осмотр.
- Опробование.
- Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка:

1. *Проверить работоспособность СФ* путем формирования известных форм сигналов. Выбрать сетку частот и уровней для поверки, исходя из возможностей СФ и О.

2. *Определить погрешности формирования сигналов с известными формой путем измерений* с помощью образцового О в рабочем диапазоне уровней и частот (1 мВ ... 10 В; 10 Гц... 100 кГц). Сравнить результаты измерений с ожидаемыми значениями, оценить форму каждого сигнала. Оценить погрешности по частоте, уровню и установке начальной фазы при формировании всех видов сигнала.

3. *Выбрать формы представления погрешностей формирования по частоте, фазе и уровню сигнала* (одночленной или двухчленной формулой). Записать аппроксимирующие

выражения погрешностей с учетом 2-кратного запаса и рекомендуемого ряда значений коэффициентов.

4. *Оценить влияние шумов на погрешности формирования*

Исследовать погрешности формирования в рабочем диапазоне уровней и частот (1 мВ ... 10 В; 10 Гц... 100 кГц) при наличии шумов. Сравнить результаты измерения с ожидаемыми значениями.

6. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
- Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

7. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Какие сигналы можно формировать с помощью исследуемого СФ?
2. Как работает виртуальный СФ?
3. Какие ВП использовались при исследованиях и для чего?
4. Какие органы управления имеет СФ?
5. Как влияют на работу СФ шумы?
6. Что и как измеряется с помощью О?
7. Какие параметры характеризуют гармоническое напряжение?
8. Как измерить частоту и период сигнала?
9. Как измерить амплитуду сигнала?
10. Как измерить фазовый сдвиг гармонического сигнала?
11. Как измерить задержку пилообразного сигнала?
12. Как измерить задержку меандра?
13. Как определить погрешность формирования уровня сигнала?
14. Как определить погрешность формирования частоты сигнала?
15. Как определить погрешность формирования фазового сдвига?
16. Поясните экспериментальные результаты.

Дополнительные вопросы для уровня 2

17. Как синтезировать двухчастотный гармонический сигнал?
18. Как синтезировать АМ сигнал?
19. Как сформировать и оценить форму комбинированного сигнала без шумов и с шумами?
20. Как на результаты измерений амплитуды влияет шум при использовании встроенного в О вольтметра и маркерных линий?
21. Как на результаты измерений частоты влияет шум при использовании встроенного в О вольтметра и маркерных линий?
22. Как минимизировать погрешность измерения?

23. Какова структура погрешности при измерении интервала времени?
24. Какова структура погрешности в режиме измерения уровня?
25. Как с помощью лупы повысить точность измерений уровня?
26. Как с помощью лупы повысить точность измерений задержки?
27. Как с помощью лупы повысить точность измерений периода?

Дополнительные вопросы для уровня 3

28. Как проверить работоспособность СФ?
29. Какими приборами можно проводить поверку СФ?
30. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке СФ?
31. Как определить реальный диапазон рабочих частот СФ?
32. Как определить погрешности формирования сигнала СФ по частоте?
33. Как определить погрешности формирования сигнала СФ по уровню?
34. Как влияют шумы на погрешности формирования сигнала СФ?
35. Как можно представить погрешности СФ?
36. Поясните результаты поверки.

2.3. Синтезаторы полигармонического сигнала

1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить структуру и синтезировать полигармонические сигналы сложной формы.* Освоить органы управления модулей специализированного комплекса виртуальных приборов (КВП). Приобрести практические навыки работы с приборами.

Уровень 2: *Применить КВП* для формирования и исследования полигармонического, шумового и комбинированного сигналов. Оценить влияние соотношений амплитуд, частот и начальных фаз компонент спектра на форму и параметры полигармонического сигнала.

Уровень 3: *Изучить и освоить на практике методику поверки синтезатора полигармонического сигнала (СС)* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку СС с помощью образцовых виртуальных приборов.

2. Измерительные сигналы и их параметры

Сигналы могут быть непрерывными и модулированными, узкополосными и широкополосными, импульсными и гармоническими, детерминированными и случайными. В измерительных технологиях часто используют полигармонические сигналы, образованные в результате суммирования отдельных гармонических составляющих с заданными амплитудами, частотами и начальными фазами.

Спектр любого периодического сигнала является дискретным или линейчатым. В общем случае периодический сигнал содержит постоянную составляющую и набор гармонических колебаний с частотами $\omega_K = K\omega_1$, $K=1,2,3,\dots$, кратными основной частоте ω_1 .

Сигнал пилообразной формы может быть представлен суммой бесконечного количества синусоидальных сигналов, частоты которых кратны основной частоте. Амплитуда и мощность этих синусоид уменьшаются с увеличением их частоты. По мере добавления каждой гармоники, форма сигнала становится более похожей на идеальную. Ряд Фурье пилообразного сигнала имеет вид:

$$E_n = \frac{2A}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \frac{1}{4} \sin 4\omega t + \dots \right)$$

Сигнал прямоугольной формы вида «меандр» включает в себя бесконечное количество нечетных гармоник. В таком случае ряд Фурье выглядит как:

$$E_n = \frac{4A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right)$$

Так как амплитуда гармоник высоких порядков во много раз меньше амплитуды основной частоты, то, как правило, работают с ограниченным числом гармоник. Меандр и пилообразный сигналы, синтезированные из четырех гармоник, представлены на рис. 2.3.1 и 2.3.2 соответственно.

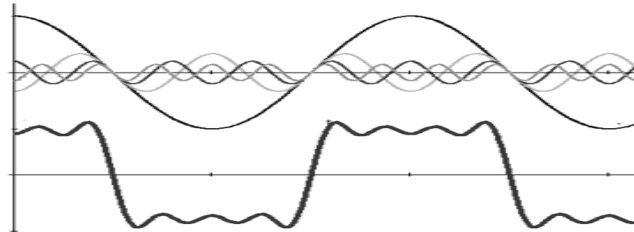


Рис. 2.3.1

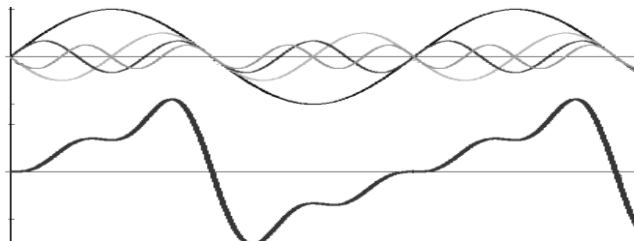


Рис. 2.3.2

Сигнал с амплитудной модуляцией (АМ), у которого изменяемым параметром является амплитуда несущего колебания, представлен на рис. 2.3.3.



Рис. 2.3.3

Сигнал с гармонической модуляцией может быть представлен в виде:

$$U_{am}(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) [1 + m \sin(\Omega t + \varphi)] .$$

Формула описывает несущий сигнал с частотой ω и начальной фазой θ , модулированный по амплитуде сигналом с частотой Ω и начальной фазой φ . Здесь $0 < m \leq 1$ - коэффициент модуляции. Спектр такого сигнала содержит три составляющие ω , $\omega + \Omega$, $\omega - \Omega$.

Следовательно, тремя компонентами можно синтезировать сигнал с АМ. Глубина модуляции в %:

$$M = \frac{A_{MAX} - A_{MIN}}{A_{MAX} + A_{MIN}} 100\%.$$

Гармонические и полигармонические сигналы характеризуют следующие параметры:

7. Мгновенные значения сигнала в характерных точках наибольшей крутизны, локальных экстремумов и т.д..

8. Амплитудные значения – максимумы мгновенных значений, входящие в аналитическое представление сигнала, например $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, где U_m - амплитуда.

9. Пиковые значения – максимумы и минимумы полувольт колебаний (для симметричных полувольт амплитуда равна пику).

10. Размах – сумма пиковых значений.

11. Среднеквадратическое за период напряжение

$$U_{СК} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}.$$

Для гармонического колебания $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ получим $U_{СК} = U_m / \sqrt{2}$, а для негармонического $U_{СК}$ определяется амплитудами гармоник (U_i) и постоянной составляющей (U_o) сигнала:

$$U_{СК} = \sqrt{U_o^2 + U_1^2 / 2 + \dots + U_n^2 / 2}.$$

Для различных законов изменения напряжения связь амплитудного значения и среднеквадратического определяется коэффициентом амплитуды:

$$K_a = U_m / U_{СК}.$$

Для гармонического - $K_{ac} = 1,41$;

Для пилообразного - $K_{an} = 1,73$;

Для меандра - $K_{ам} = 1,00$.

Искажения гармонического сигнала оценивают коэффициентом гармоник (K_r), который также называют коэффициентом нелинейных искажений (КНИ):

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100\%.$$

КНИ показывает вес высших гармонических составляющих в спектре сигнала по отношению к первой гармонике в относительном масштабе или в процентах.

3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит четыре одноканальных прибора:

- Синтезатор сигнала (СС).
- Осциллограф (О).
- Анализатор спектра (АС).

- Измеритель искажений (ИИ).

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.3.4. Выходной сигнал СС подан одновременно на входы всех приборов (О, ИИ, АС).

СС построен на основе многоканального виртуального ЦАП, который формирует требуемый периодический сигнал, суммируя регулируемые по частоте, амплитуде и фазе до 16 гармонических сигналов с добавлением необходимого уровня шумов.

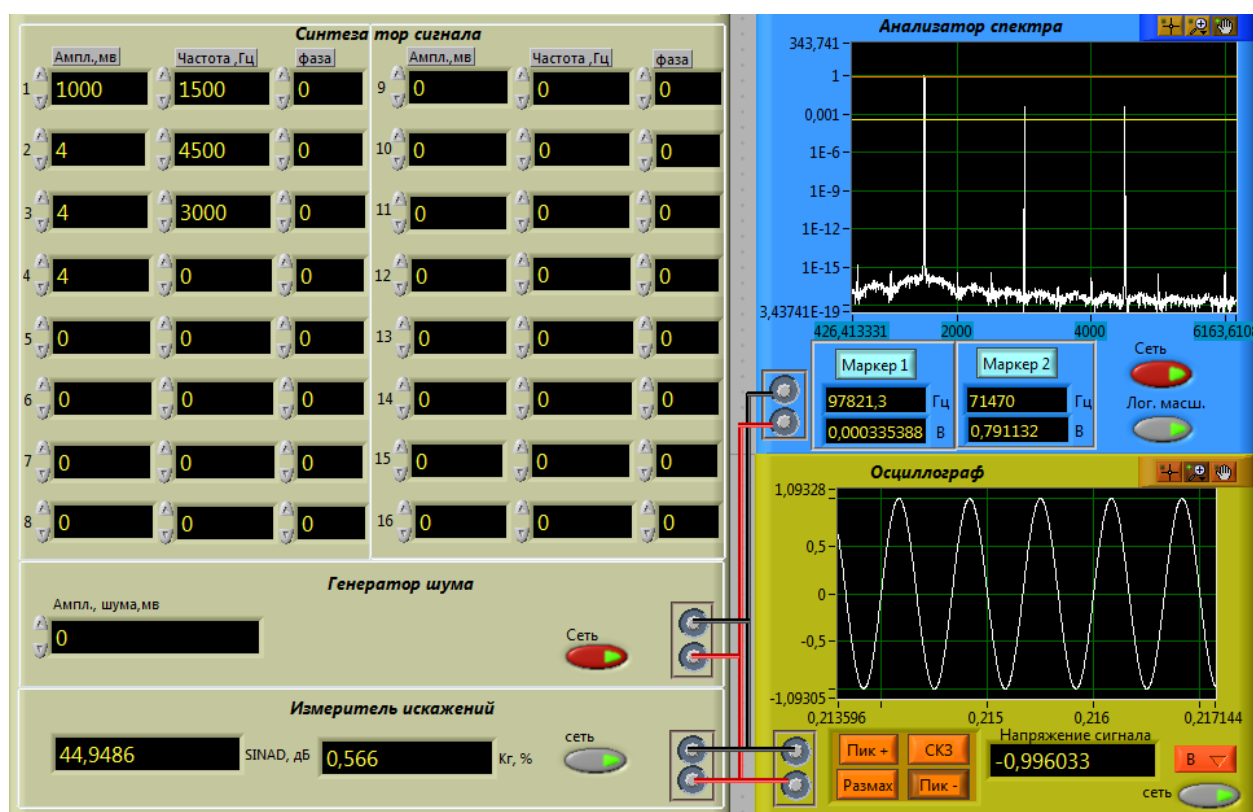


Рис. 2.3.4

Все измерительные приборы осуществляют расчет искомым параметров по массиву данных мгновенных значений, получаемых в результате работы одноканального виртуального АЦП.

Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно включить прибор и установить его в нужный режим работы. Каждый прибор имеет входные клеммы и кнопку «Сеть» для его включения. В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
- **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

4. Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигнала (СС)

Интерфейс СС представлен на рис. 2.3.5. Цифрами обозначены:

- 7 - индикатор и поле для установки амплитуды для всех 16-ти генераторов гармонического сигнала (мВ);
- 8 - индикатор и поле для установки частоты для всех 16-ти генераторов гармонического сигнала (Гц);
- 9 - индикатор и поле для установки начальной фазы для всех 16-ти генераторов гармонического сигнала (град.);
- 10 - индикатор и поле для установки амплитуды шума сигнала (мВ);
- 11 - выключатель питания;
- 12 - выход синтезируемого сигнала и шума.

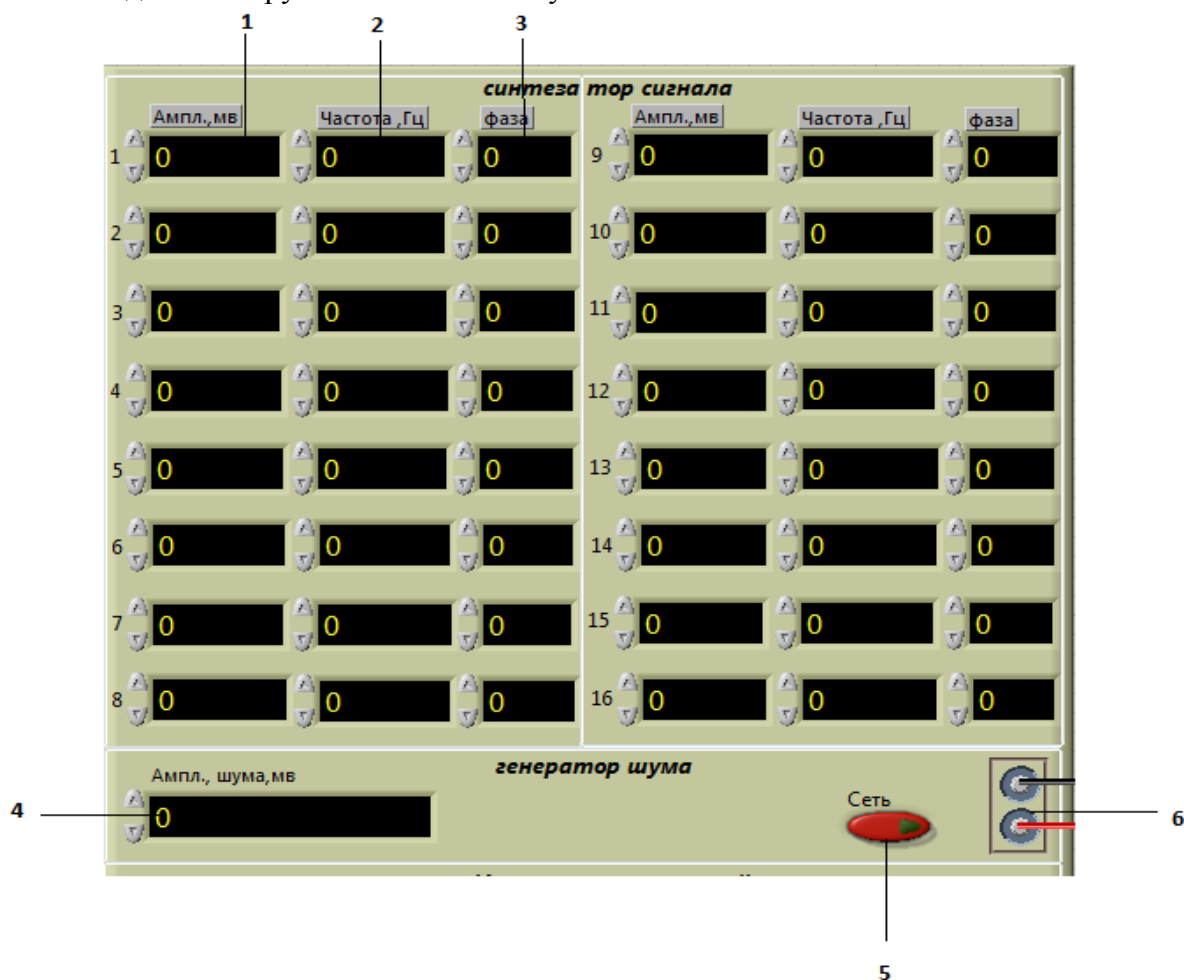


Рис. 2.3.5

СС состоит из двух модулей: «Генератора шума» и «Синтезатора сигнала». Поле индикатора используется для точной установки амплитуды шума (например, 51,4 мВ). Для этого курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды шума и нажимается левая кнопка мышки в произвольной точке графического интерфейса. Можно также выполнять регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «*вверх*» и «*вниз*», расположенные слева от поля ввода. Амплитуда регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 51,4| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (51,3| ...51,6|)).

Окна ввода «Амплитуда, мВ», «Частота, Гц» и «Фаза» (град.) служат для задания параметров гармонических составляющих сложного генерируемого сигнала. Установка осуществляется аналогично установке амплитуды шума.

Анализатор спектра (АС)

Интерфейс АС представлен на рис. 2.3.6. Цифрами обозначены:

- 12 - панорамный индикатор (экран) для воспроизведения спектра суммарного сигнала в координатах «уровень – частота»;
- 13 - вход прибора;
- 14 - включение «Маркера 1»;
- 15 - индикатор положения «Маркера 1» на оси частот;
- 16 - индикатор положения «Маркера 1» на оси уровней;
- 17 - включение «Маркера 2»;
- 18 - индикатор положения «Маркера 2» на оси частот;
- 19 - индикатор положения «Маркера 2» на оси уровней;
- 20 - включение логарифмического масштаба по оси уровней;
- 21 - включение прибора;
- 22 - иконки: крестик, лупа и рука.

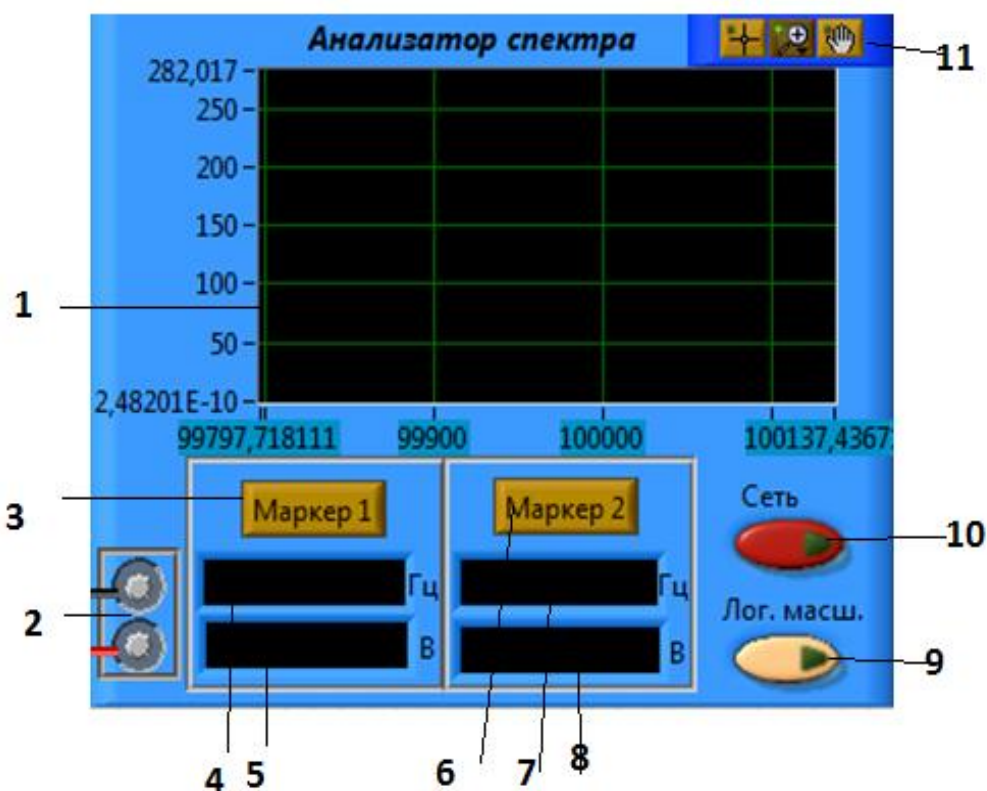


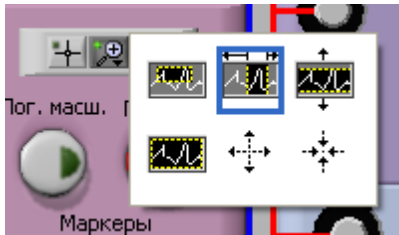


Рис. 2.3.6

«Крестик»  - режим управления положения маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении.

«Рука»  - режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении.



«Лупа» - имеет 6 подрежимов (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Осциллограф (O)

Интерфейс осциллографа представлен на рис. 2.3.7.

Цифрами обозначены:

- 7 - осциллографический индикатор (экран) для воспроизведения суммарного сигнала в координатах мгновенный уровень – время (временное представление сигнала с шумами);
- 8 - вход прибора;
- 9 - поле выбора измеряемого параметра встроенного вольтметра;
- 10 - индикатор измеренного параметра;
- 11 - выключатель;
- 12 – выплывающее меню для выбора единицы измерения;
- 13 - иконки: крестик, лупа и рука.

Встроенный вольтметр имеет четыре режима измерения с цифровой индикацией:

- «Пик →» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «Пик +» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «Размах» - размаха сигнала;
- «СКЗ» - среднеквадратического значения сигнала.

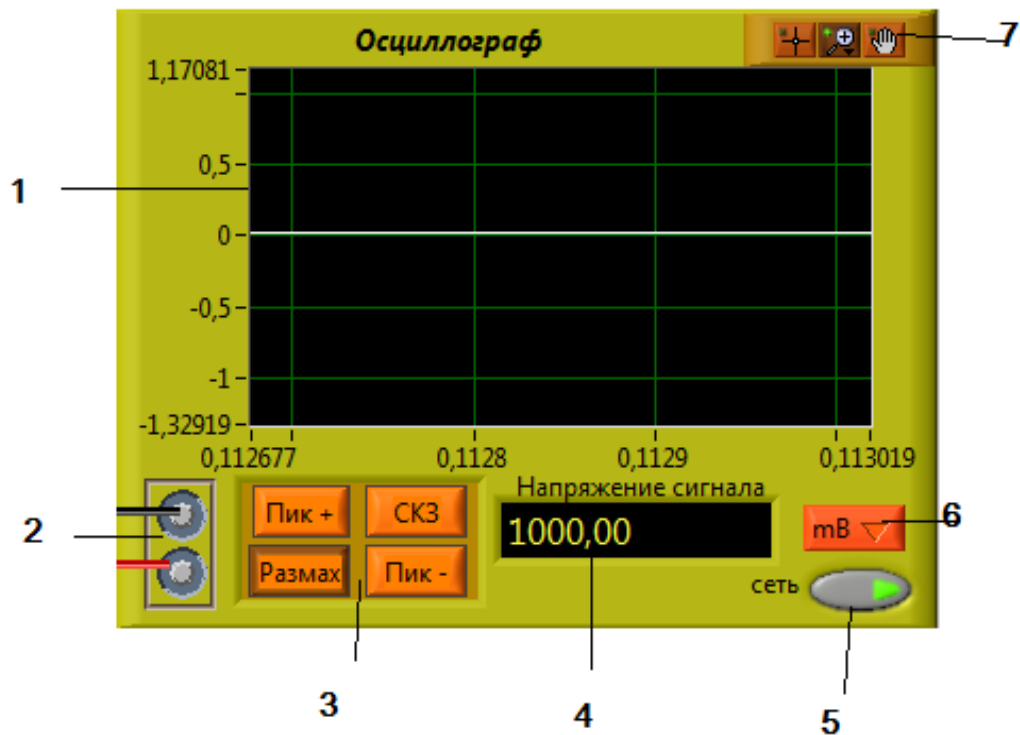

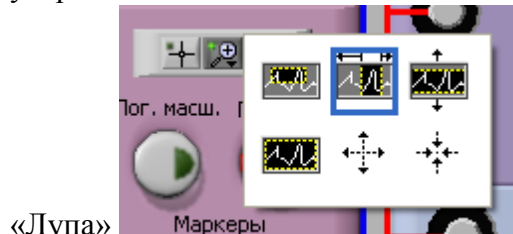


Рис. 2.3.7

На передней панели в верхнем правом углу имеются три иконки: крестик, лупа и рука. Первая иконка при работе с прибором не используется.

«Рука»  - режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



«Лупа» - имеет 6 подрежимов (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Измеритель искажений (ИИ) Интерфейс ИИ представлен на рис. 2.3.8. Цифрами обозначены:

- 5 - вход прибора, на который поступает сигнал с шумами;
- 6 - выключатель;
- 7 - индикатор измеренного коэффициента гармоник сигнала;
- 8 - индикатор измеренного значения $SINAD$;

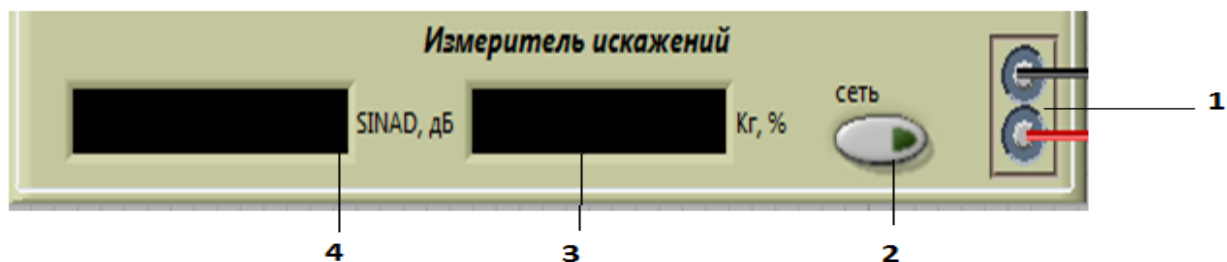


Рис. 2.3.8

Прибор измеряет выраженное в децибелах отношение уровня полного сигнала к суммарному уровню шума и искажений (*Signal In Noise And Distortion – SINAD*, дБ):

$$SINAD = 10 \lg \frac{P_{signal} + P_{noise} + P_{distortion}}{P_{noise} + P_{distortion}}, \text{ дБ.}$$

Прибор измеряет КНИ сигнала «Кг, %» в процентах с учетом 25 гармоник включительно:

$$K_{г} = 100 \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{24}^2 + U_{25}^2}}{U_1}, \%$$

5. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям СС выполняется дома и уточняется в начале занятий. При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

6. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение структуры и синтез полигармонических сигналов сложной формы

Изучаются полигармонические сигналы и используемые виртуальные приборы, их возможности, передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки в различных режимах работы путем пробных измерений:

1. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать структуры полигармонических сигналов, включая частоты и уровни гармоник СС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

2. Синтез и пробные измерения полигармонических сигналов

Последовательно сформировать полигармонические сигналы разного спектрального состава (от 2-х до 16 компонент) по уровню и частоте без шумов. С помощью АС оценить

правильность формирования уровней, и частот гармоник. Объяснить показания ИИ и О. Оценить влияние шумов, структуры гармоник на форму и спектр сигналов.

3. *Синтез и пробные измерения АМ сигнала*

Сформировать АМ сигнал разной глубиной гармонической модуляции (10, 60 и 100%) без шумов и с шумами. Оценить правильность измерения глубины модуляции с помощью О. Объяснить показания АС и ИИ.

4. *Синтез и изучение сигнала линейчатого спектра*

Установить 16 гармоник с одинаковой амплитудой и начальной фазой 90^0 . Объяснить форму сигнала на О. Оценить влияние начальных фаз на форму полного сигнала.

Уровень 2: Применение СС для синтеза спектральных составляющих полигармонического сигнала с шумами и без шумов. Предварительно выбрать известные структуры полигармонических сигналов, включая амплитуды, частоты и фазы всех гармоник. Оценить влияние соотношения амплитуд, частот и начальных фаз компонент спектра на форму и параметры полигармонического сигнала: его период, пиковых значений, размах и СКЗ.

1. *Формирование, а также оценка спектров (с помощью АС) и форм (с помощью О) сигналов при их синтезе малым числом гармонических составляющих без шумов и с шумами*

Для типовых исследований предлагается синтезировать двухчастотный гармонический сигнал с шумами (пример на рис. 2.3.9 и 2.3.10) и без шумов, а также амплитудно-модулированный сигнал (АМ).



Рис. 2.3.9

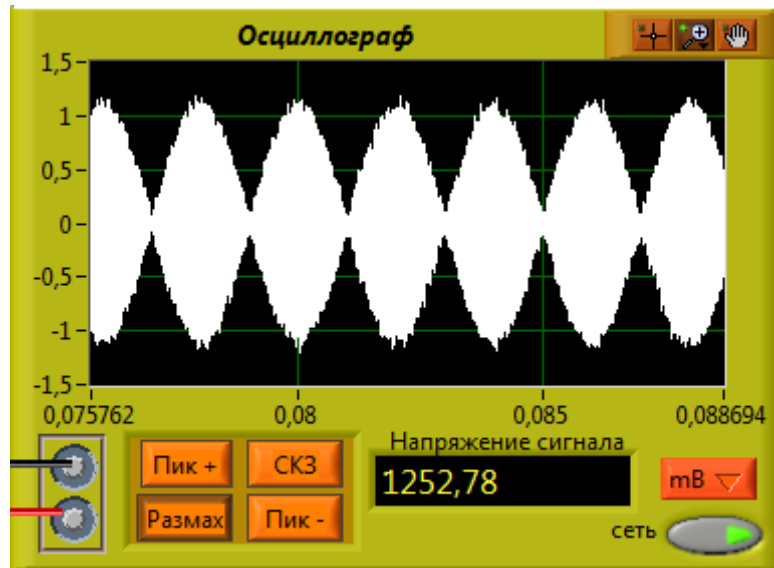


Рис. 2.3.10

2. *Формирование, а также оценка спектров (с помощью АС) и форм (с помощью О) известных полигармонических сигналов при их синтезе ограниченным числом составляющих (4, 8 и 16) без шумов и с шумами*

Для типовых исследований предлагается сформировать сигналы пилообразной и прямоугольной формы.

3. *Исследование спектров сложных полигармонических сигналов при их синтезе ограниченным числом составляющих (до 16) без шумов и с шумами*

Для типовых исследований предлагается сформировать сигнал с одинаковыми амплитудами всех гармоник (4, 8, 16) и начальными фазами 0° и 90° . Апробировать влияние линейного сдвига начальной фазы гармоник, например ее изменение на 10° на каждом шаге частоты, на форму сигнала. Оценить влияние соотношения амплитуд, частот и начальных фаз компонент спектра на форму и параметры полигармонического сигнала: его пиковых значений, размах и СКЗ.

4. *Формирование АМ сигнала со сложной формой огибающей*

Для типовых исследований предлагается сформировать огибающие (модулирующие сигнала) пилообразной и прямоугольной формы для несущей частоты 1 и 10 кГц.

5. *Формирование сигнала с заданным уровнем КНИ и SINAD*

Определить погрешности формирования сигнала с заданными КНИ и SINAD при контроле с помощью образцовых АС и ИИ в рабочем диапазоне уровней и частот (1 мВ ... 10 В; 10 Гц... 100 кГц). Сравнить результаты измерений с ожидаемыми значениями.

Уровень 3: Изучение методики и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик СС при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы (АС, ИИ и О) являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

Поверку СС можно осуществлять по эталонному синтезатору – калибратору и по эталонному измерительному прибору (АС). При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

- Внешний осмотр.
- Опробование.
- Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка:

1. Проверить работоспособность СС путем формирования известного сигнала. Выбрать сетку частот и уровней для поверки, исходя из возможностей образцового СС.
2. Определить погрешности формирования сигнала с известным спектром и формой путем измерений с помощью образцовых О, АС и ИИ в рабочем диапазоне уровней и частот (1 мВ ... 10 В; 10 Гц... 100 кГц). Сравнить результаты измерений с ожидаемыми значениями, оценить форму каждого сигнала и его спектр. Оценить погрешности по частоте, спектральному составу, установке начальной фазы при формировании гармонического и полигармонического сигнала.
3. Выбрать формы представления погрешностей формирования по частоте и уровню сигнала (одночленной или двухчленной формулой). Записать аппроксимирующие выражения погрешностей с учетом 2-кратного запаса и рекомендуемого ряда значений коэффициентов.
4. Оценить влияние гармонической помехи и шумов на погрешности формирования гармонического сигнала с заданным КНИ
Исследовать погрешности формирования в рабочем диапазоне уровней и частот (1 мВ ... 10 В; 10 Гц... 100 кГц) при подаче гармонического сигнала в присутствии близкой и далекой по частоте гармонической помехи с шумами и без шумов. Сравнить результаты измерения с ожидаемыми значениями.

7. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
- Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

8. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Какие сигналы можно формировать с помощью СС?
2. Как работает виртуальный СС?
3. Какие виртуальные приборы использовались при исследованиях?
4. Какие органы управления имеет СС?
5. Как влияет на работу СС гармоническая помеха?
6. Как синтезировать сигнал с заданным уровнем КНИ?
7. Какой спектр имеет шумоподобный сигнал?
8. Какой спектр имеет гармонический сигнал?
9. Как выглядит спектр меандра?
10. Какой спектр имеет АМ сигнал?
11. Как выглядит спектр пилообразного сигнала?
12. Как выглядит спектр комбинированного сигнала?
13. Что такое амплитудные и пиковые значения сигнала?

14. Что характеризует среднеквадратическое значение сигнала?
15. Как оценить коэффициент нелинейных искажений сигнала?
16. Как исследовать спектр неидеального гармонического сигнала?

Дополнительные вопросы для уровня 2

17. Как влияет соотношение амплитуд и начальных фаз компонент спектра на форму и параметры пилообразного сигнала?
18. Как влияет соотношение амплитуд и начальных фаз компонент спектра на форму и параметры прямоугольного сигнала?
19. Как влияет соотношение амплитуд, частот и начальных фаз компонент спектра на форму АМ сигнала?
20. Как синтезировать двухчастотный гармонический сигнал с шумами и без шумов, а также АМ сигнал?
21. Как сформировать и оценить спектр и форму полигармонического сигнала при использовании ограниченного числа составляющих?
22. Что представляет собой сигнал с одинаковыми амплитудами всех гармоник (4, 8, 16) и фазами 0° и 90° ?
23. Как определить погрешности формирования сигнала с известным КНИ в рабочем диапазоне уровней и частот (1 мВ ... 10 В; 10 Гц... 100 кГц)?
24. Поясните результаты эксперимента.

Дополнительные вопросы для уровня 3

25. Как проверить работоспособность СС?
26. Какими приборами можно проводить поверку СС?
27. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке СС?
28. Как определить реальный диапазон рабочих частот СС?
29. Как определить погрешности формирования сигнала по частоте?
30. Как определить погрешности формирования сигнала по амплитуде гармоник?
31. Как влияют шумы на погрешности формирования сигнала СС?
32. Как можно представить погрешности СС?
33. Поясните результаты поверки.

2.4. Анализаторы спектра

1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: *Изучить виртуальный анализатор спектра* - его принцип работы, органы управления и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы с прибором.

Уровень 2: *Применить анализатор спектра* для исследования спектров гармонического, импульсного (прямоугольного, треугольного и пилообразного), шумового и комбинированного сигнала.

Уровень 3: *Изучить и освоить методики поверки анализатора спектра* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку анализатора спектра (АС) с помощью образцовых виртуальных приборов.

2. Назначение и принципы работы АС

Анализатор спектра — прибор для наблюдения и измерения относительного распределения энергии электромагнитных колебаний в полосе частот. Он позволяет определить амплитуды и частоты спектральных компонент, входящих в состав

анализируемого процесса. Так как спектр колебания может в общем случае изменяться во времени, то оценивают текущий спектр.

Анализаторы НЧ предназначены для работы в диапазонах частот от нескольких герц до десятков — сотен килогерц, они бывают параллельного и последовательного типа и используются в акустике при исследовании характеристик шума, при разработке и обслуживании аудиоаппаратуры и в других целях. Анализаторы, используемые для контроля качества питающей электросети, называют анализаторами гармоник. ПРИМЕР: СК4-83

Большинство радиочастотных анализаторов являются широкополосными, они позволяют работать в полосе от нескольких килогерц до единиц — сотен гигагерц, как правило, это анализаторы последовательного типа. Применяются для анализа свойств радиосигналов, для исследования характеристик радиоустройств. ПРИМЕРЫ: СК4-84, С4-82.

Анализаторы параллельного типа (см. рис. 2.4.1 и 2.4.2) содержат набор идентичных узкополосных фильтров, каждый из которых настроен на определенную частоту. При одновременном воздействии исследуемого сигнала на все фильтры каждый из них выделяет соответствующую его настройке составляющую спектра.

Полоса пропускания фильтров определяет статическую разрешающую способность анализатора. Разрешающая способность анализатора — это его способность различать гармонические составляющие спектра с близкими частотами. Чем уже полоса пропускания фильтра, тем выше разрешающая способность. При широкой полосе пропускания несколько гармонических составляющих не будут разделяться.

Анализ осуществляется с помощью фильтров с не перекрывающимися или перекрывающимися частотными характеристиками. В первом случае возможна потеря информации о составляющих, лежащих вне полос пропускания фильтров. Во втором случае возможна регистрация одной составляющей двумя соседними фильтрами с ошибочным выводом о наличии обеих компонент. Сигналы с выхода фильтров детектируются, последовательно коммутируются, анализируются и подаются на индикатор.

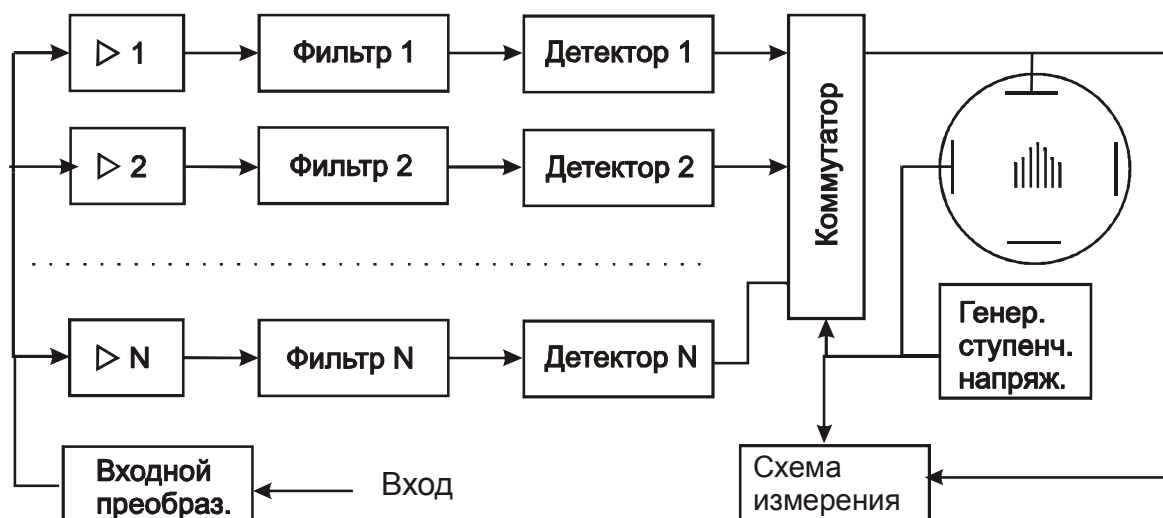
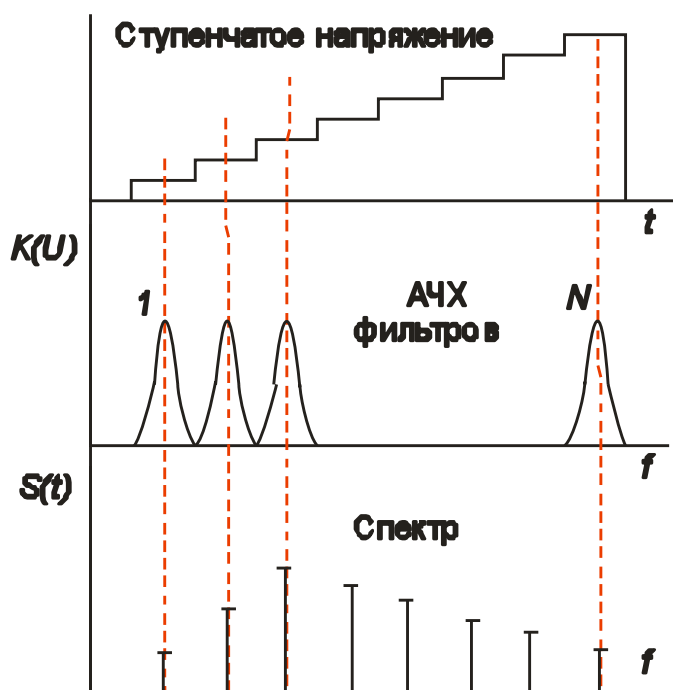


Рис. 2.4.1



Погрешность анализа определяют следующие факторы: конечность времени установления колебаний на выходе фильтра и зависимость ее от полосы пропускания последнего, а также отличие характеристик фильтров, настроенных на разные частоты.

Для выделения n спектральных компонент необходимо не менее n фильтров.

Рис. 2.4.2

Скорость анализа резко снижается при сужении полосы пропускания фильтра. К достоинствам анализаторов параллельного действия относятся малое время анализа и возможность регистрировать спектры

одиночных импульсов. Однако из-за сложности системы фильтров анализаторы не получили широкого распространения. Их применение целесообразно тогда, когда положение спектральных линий известно заранее, но неизвестны их амплитуды. Это задачи испытаний оборудования на регламентированных частотах (1000 Гц в звуковом диапазоне, фиксированные значения ПЧ приемников сигналов и др.).

Таким образом, метод сложен, требует много фильтров. Имеет узкое применение для анализа известных спектров. Параллельный АС имеет перед последовательным преимущество в скорости анализа, однако уступает ему в простоте.

Анализаторы последовательного типа являются наиболее распространенным видом анализаторов для исследования радиосигналов, принцип их действия состоит в сканировании полосы частот с помощью перестраиваемого гетеродина. Составляющие спектра последовательно переносятся на промежуточную частоту. Перестройка частоты гетеродина эквивалентна перемещению спектра исследуемого сигнала. Селективный УПЧ последовательно выделяет составляющие спектра, и, благодаря синхронной развёртке осциллографического индикатора, отклики каждой спектральной составляющей последовательно воспроизводятся на его экране.

На рис. 2.4.3 показана упрощенная структурная схема анализатора последовательного типа с двукратным преобразованием частоты. Двойное преобразование применяют для улучшения характеристик АС.

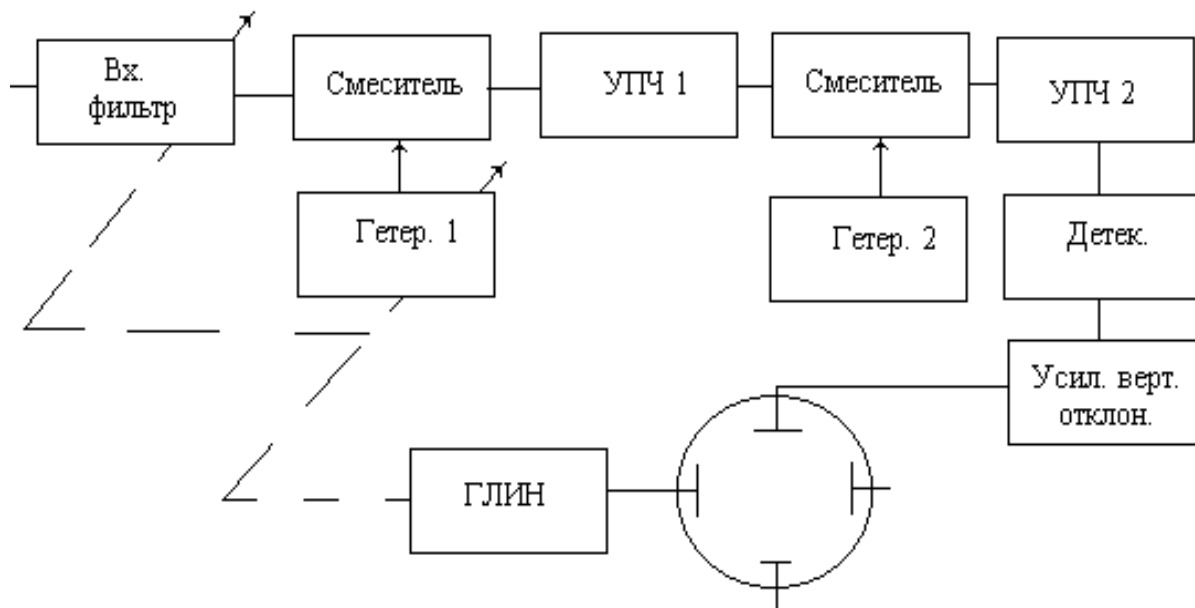


Рис. 2.4.3

Ось частот обычно градуируется с помощью сетки частотных меток с известным шагом или с помощью передвижного маркера частоты. *Динамическая разрешающая способность* анализатора спектра зависит от скорости изменения (перестройки) частоты. При увеличении скорости перестройки напряжение на выходе УПЧ не успевает изменяться с изменением напряжения на входе, так как энергия, запасенная в избирательной системе (например, в контуре), не может измениться мгновенно. Это явление имеет место в том случае, если длительность переходного процесса в УПЧ соизмерима со временем изменения частоты колебаний на входе и в пределах его полосы пропускания. Динамические искажения изображения спектра ограничивают допустимую скорость изменения частоты ГКЧ.

Необходимо, чтобы ширина спектра была меньше, чем $f_{нч}$, а $\Delta f_{унч}$ меньше расстояния между линиями спектра. Для повышения разрешающей способности используют АС последовательной фильтрации с двойным преобразованием частоты.

Цифровые анализаторы могут быть построены двумя способами. В первом случае это обычный анализатор последовательного типа, в котором измерительная информация, полученная методом сканирования полосы частот с помощью гетеродина, оцифровывается с помощью АЦП и, далее, обрабатывается цифровым методом. Во втором случае реализуется цифровой эквивалент параллельного типа в виде БПФ-анализатора, который вычисляет спектр с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). По сравнению с последовательными цифровые параллельные БПФ-анализаторы обладают определёнными преимуществами: более высоким разрешением и скоростью работы, возможностью анализа импульсных и однократных сигналов. Они способны вычислять не только амплитудный, но и фазовый спектр, а также одновременно представлять сигналы во временной и частотной областях, совмещая функции осциллографа. Однако БПФ-анализаторы из-за ограниченных возможностей АЦП работают в ограниченной полосе частот (до единиц ГГц).

Специальный алгоритм БПФ позволяет существенно ускорить анализ. Структурная схема приведена на рис. 2.4.4. Она содержит АЦП и вычислитель. Примером является прибор СК4-71.

В настоящее время серийно выпускаются панорамные АС перекрывающие диапазон частот от 10 Гц до 39,6 ГГц.

Области применения АС очень широкие. Можно оценивать и измерять: стабильность частоты, чистоту спектральной линии; устойчивость к внешним факторам; параметры модуляции, ширину спектра частот; уровень паразитных составляющих; динамический диапазон; частотные характеристики; потери и нелинейность преобразования, развязку; подавление спектральных составляющих; искажения сигналов и др.

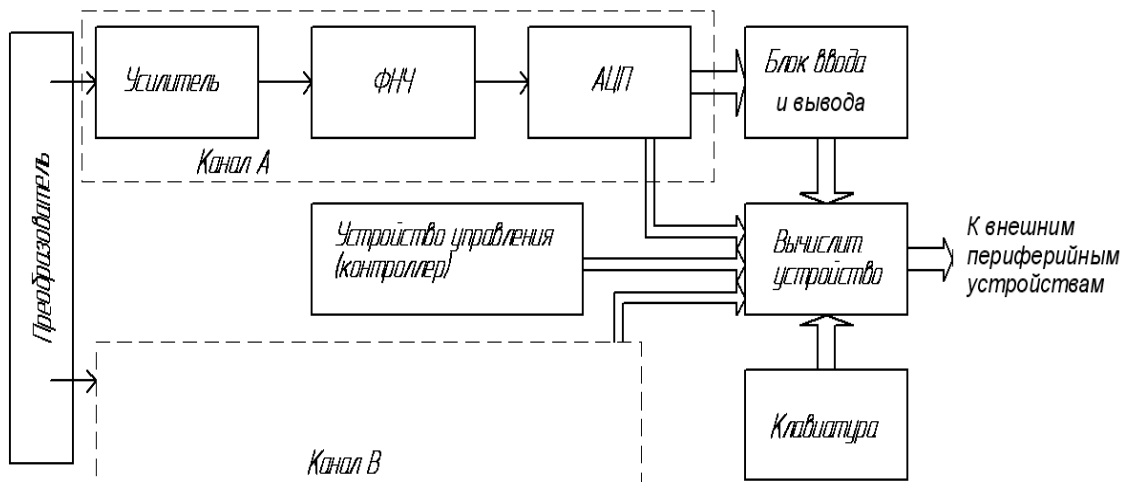


Рис. 2.4.4

Основные нормируемые характеристики:

- Диапазон частот
- Полоса обзора
- Полоса пропускания и разрешающая способность
- Погрешность измерения по частоте
- Погрешность измерения по амплитуде
- Чувствительность и динамический диапазон
- Относительный уровень собственных шумов
- Неравномерность АЧХ

Спектр периодического сигнала является дискретным или линейчатым. В общем случае периодический сигнал содержит постоянную составляющую и набор гармонических колебаний с частотами $\omega_k = K\omega_1$, $K=1,2,3,\dots$, кратными основной частоте ω_1 .

Например, сигнал пилообразной формы может быть представлен суперпозицией бесконечного количества синусоидальных сигналов, частоты которых кратны основной частоте. Амплитуда и мощность этих синусоид уменьшаются с увеличением их частоты. По мере добавления каждой гармоники, форма сигнала становится более похожей на идеальную. Ряд Фурье пилообразного сигнала имеет вид:

$$E_n = \frac{2A}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \frac{1}{4} \sin 4\omega t + \dots \right)$$

Идеальный сигнал прямоугольной формы включает в себя бесконечное количество нечетных гармоник:

$$E_n = \frac{4A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right)$$

Так как амплитуда гармоник высоких порядков во много раз меньше амплитуды основной частоты, то, как правило, вычисляют ограниченное число гармоник (до 5-го ... 9-го порядка).

Непериодические сигналы имеют непрерывный спектр, т.е., в их составе присутствуют все частоты без исключения. Амплитуды отдельных спектральных составляющих бесконечно малы, поэтому их спектральный состав описывают не амплитудами отдельных гармоник, а спектральной плотностью, под которой понимают отношение приращения амплитуды ΔA к приращению частоты $\Delta \omega$.

В виртуальном АС, используемом в лабораторных исследованиях, реализован вычислительный принцип оценки уровня и частоты спектральных составляющих на основе алгоритма БПФ. Рабочий диапазон частот АС от 10 Гц до 250 кГц.

3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит шесть одноканальных приборов:

- Генератор сигналов (ГС).
- Осциллограф (О).
- Цифровой вольтметр (ЦВ).
- Селективный вольтметр (СВ).
- Анализатор спектра (АС).
- Измеритель искажений (ИИ).

Генератор построен на основе виртуального ЦАП, синтезирующего требуемую форму периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем частотой и уровнем. Измерительные модули имитируют работу автономных приборов.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 2.4.5. Выходной сигнал ГС подан одновременно на входы всех приборов.

Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно левой кнопкой мыши включить прибор и установить его в нужный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «Питание» или «Сеть» для включения.

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
- **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

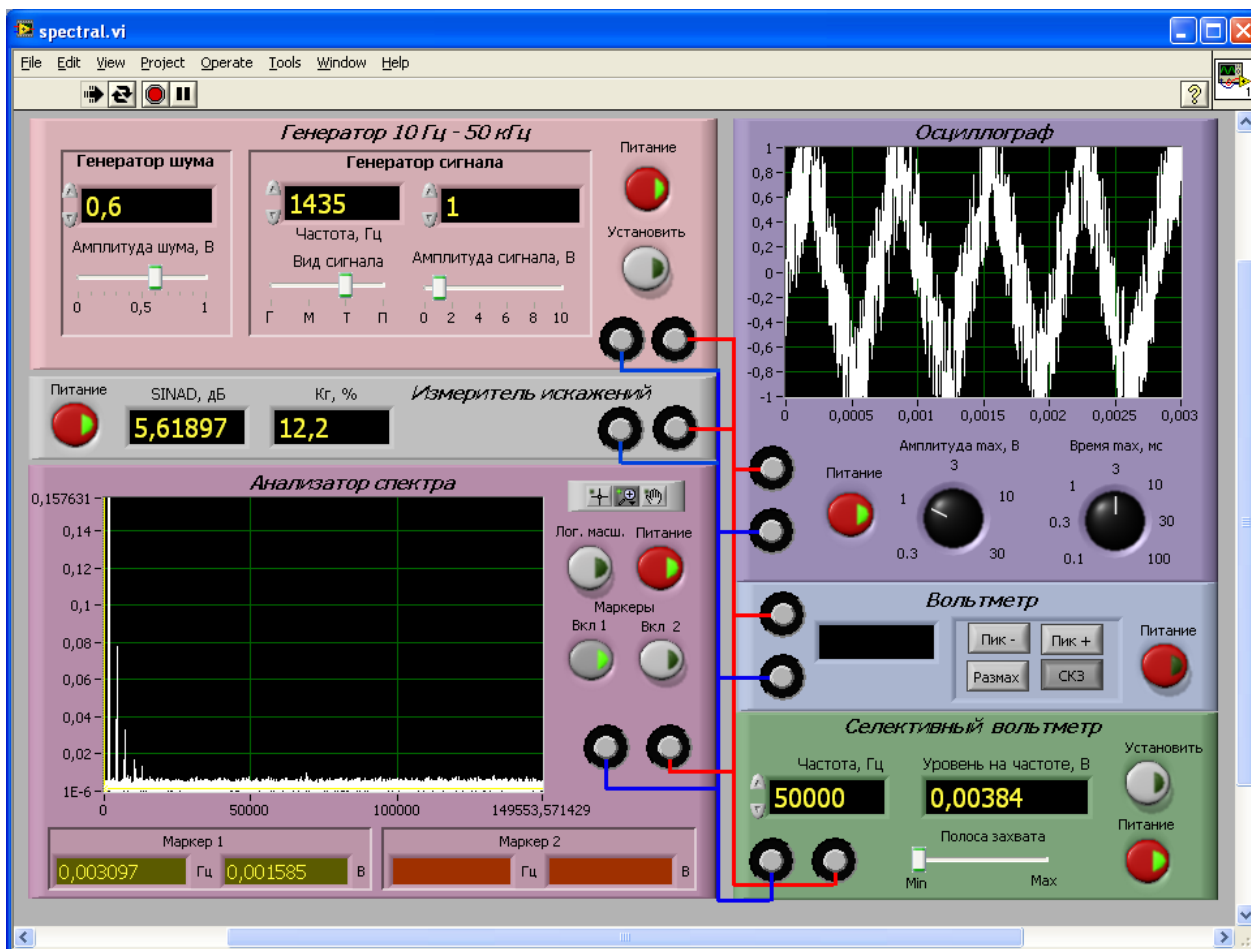


Рис. 2.4.5

Передние панели виртуальных приборов Генератор сигналов (ГС)

ГС состоит из двух модулей: «Генератор шума» и «Генератор сигнала» (см. рис. 2.4.6). Ползунок «Амплитуда шума, В» служит для грубой установки на индикаторе уровня шума в пределах от 0 до 1 В. Поле индикатора может использоваться для точной установки амплитуды шума (например, 0,514 В). Для этого курсор устанавливается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды шума и нажимается кнопка «Установить». Можно также выполнять точную регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «*вверх*» и «*вниз*», расположенные слева от поля ввода. При этом нажатие кнопки «Установить» не требуется. Амплитуда регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 0,514| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (0,513|.0,515...0,516|....)).

При выполнении лабораторной работы ГС используется в качестве меры (генератор – калибратор), с помощью которой определяются погрешности рабочего средства измерений.

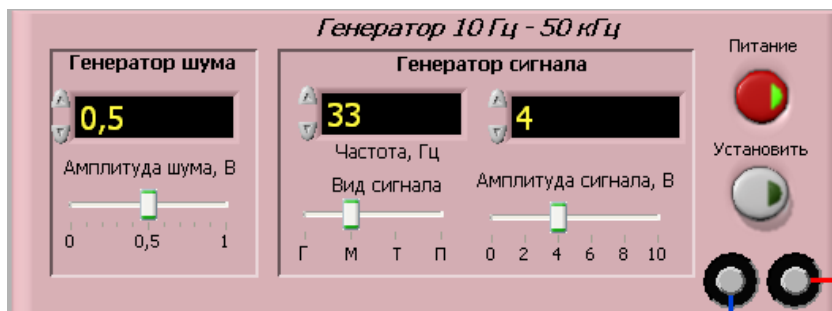


Рис. 2.4.6

Окно ввода «**Частота, Гц**» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично точной установке амплитуды шума. Частота устанавливается в пределах от 10 Гц до 50000 Гц.

Ползунок «**Вид сигнала**» устанавливает вид генерируемого сигнала: «Г» – гармонический, «М» – меандр, «Т» – треугольный, «П» – пилообразный. Ползунок «**Амплитуда сигнала, В**» и поле ввода над ним служат для соответственно грубой и точной установки амплитуды сигнала в пределах от 0 до 10 В. Методика установки аналогична методики для генератора шума.

Цифровой вольтметр

При выполнении лабораторной работы ЦВ используется как вспомогательное образцовое средство измерений (ОСИ), с помощью которого методом сличения определяются погрешности рабочего СИ.

Вольтметр имеет четыре режима измерения (см. рис. 2.4.7):

- «**Пик -**» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «**Пик +**» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «**Размах**» - размаха сигнала;
- «**СКЗ**» - среднеквадратического значения сигнала.

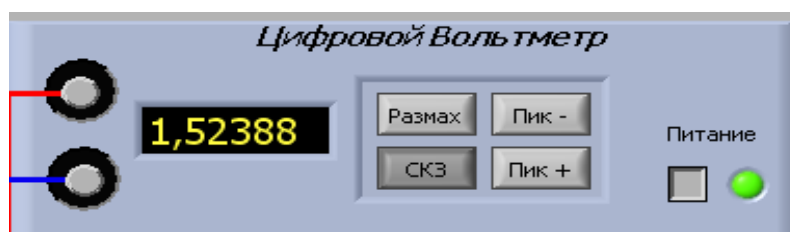


Рис. 2.4.7

Осциллограф

Прибор применяется для контроля формы сигнала. На передней панели (см. рис. 2.4.8) имеется две регулировочные ручки.

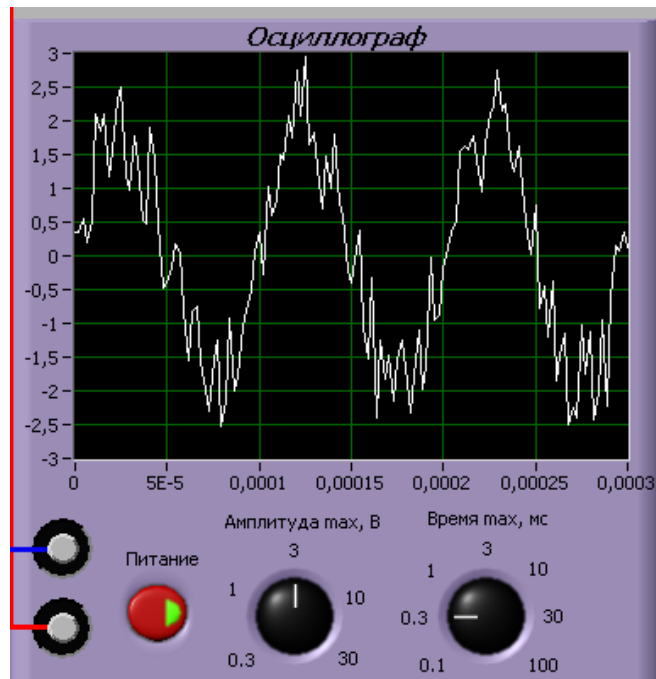


Рис. 2.4.8

«Амплитуда max, В» – устанавливает пределы отображения уровня сигнала (от $\pm 0,3$ до ± 30 В) на экране осциллографа (вертикальная ось).

«Время max, мс» – устанавливает время развертки в миллисекундах (от 0,1 до 100 мс) или предел отображения длительности сигнала на экране осциллографа (горизонтальная ось).

Селективный вольтметр

Прибор (см. рис. 2.4.9) применяется для оценки погрешностей АС при оценке уровня высших гармоник. На индикаторе «Уровень на частоте, В» высвечивается результат измерения СКЗ сигнала на установленной частоте в полосе 15-20 Гц.

Исследуемая частота устанавливается в герцах в поле «Частота, Гц» с подтверждением ввода кнопкой «Установить» или нажатием кнопок слева от поля ввода в виде стрелок «вверх» и «вниз». Частота регулируется в разряде слева от курсора (например, положение курсора справа от цифры 4 в числе 5014| позволяет стрелками изменять именно этот разряд (5013| ... 5015 ...).

Ползунок «Полоса захвата» регулирует от «Min» до «Max» диапазон частот, в котором селективный вольтметр (СВ) обеспечивает захват основной частоты.

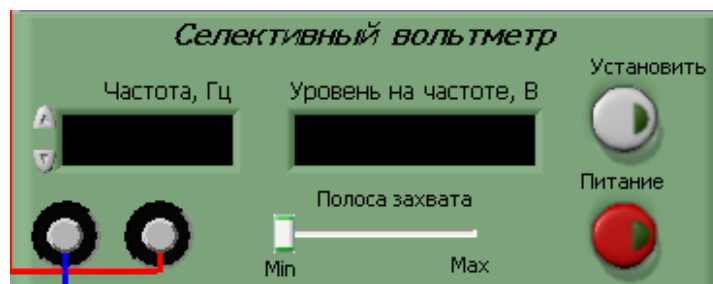


Рис. 2.4.9

Анализатор спектра

Прибор (см. рис. 2.4.10) имеет кнопку «Лог. маш.» для переключения отображения вертикальной оси в линейном или в логарифмическом масштабе.

Для более точного определения параметров спектра в конкретных точках имеется возможность включения на панорамном индикаторе одного или двух маркеров уровня и частоты. Маркеры (желтый и оранжевый) включаются кнопками «Вкл. 1» и «Вкл. 2», а информация об их положении отображается в полях «Маркер 1» и «Маркер 2» внизу лицевой панели.

Прибор имеет ряд вспомогательных функций, кнопки вызова которых расположены в верхней части его лицевой панели:



- режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



- режим управления положения маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении;



- режимы лупы (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

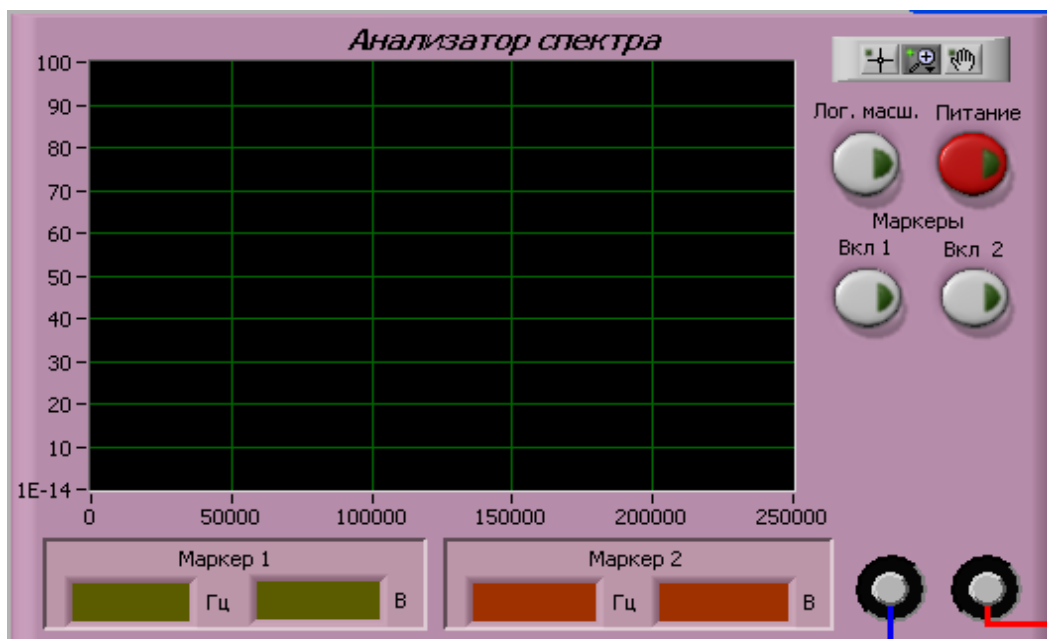


Рис. 2.4.10

Измеритель искажений

Прибор (см. рис. 2.4.11) измеряет «SINAD, дБ» сигнала (Signal In Noise And Distortion) - выраженное в децибелах отношение уровня полного сигнала к суммарному уровню шума и искажений:

$$\text{SINAD} = \frac{P_{\text{signal}} + P_{\text{noise}} + P_{\text{distortion}}}{P_{\text{noise}} + P_{\text{distortion}}}$$

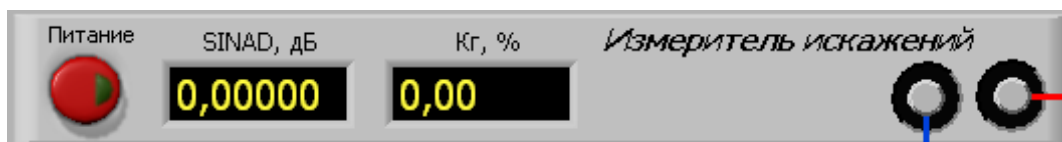


Рис. 2.4.11

Прибор измеряет коэффициент гармоник сигнала «Кг, %» в процентах по 25-ю гармонику включительно:

$$\text{Кг} = 100 \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{24}^2 + U_{25}^2}}{U_1}, \%$$

4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям АС выполняется дома и уточняется в начале занятий.

При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;

- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

При запуске КВП полоса обзора устанавливается максимальной (около 220 кГц). Для рассмотрения деталей можно воспользоваться лупой. Для измерений по оси частот нужно использовать горизонтальную стрелку маркера, для измерений по оси амплитуд нужно использовать вертикальную стрелку.

Для определения погрешности измерения частоты сигнала можно сравнить показания АС с установленным значением частоты образцового ГС. Изменять частоту генератора следует в пределах от 0,01 до 50 кГц. Относительная погрешность

$$\delta = \left(\frac{f_{AC} - f_{ГС}}{f_{ГС}} \right) \cdot 100\% .$$

Для определения погрешности измерения уровня гармонического сигнала можно сравнить показания ГС или ЦВ с показаниями АС, для негармонического сигнала можно сравнить показания АС и настроенного на ту же частоту показания СВ. При этом показания ГС, ЦВ и СВ принимаются как достоверные.

Изменяя частоту ГС, фиксируется уровень АС и образцового прибора. Тогда относительная погрешность

$$\delta = \left(\frac{U_{AC} - U_{ОБР}}{U_{ОБР}} \right) \cdot 100\% .$$

При анализе комбинированных сигналов выходное напряжение является суммой сигнала ГШ и ГС: синусоидального, треугольного, пилообразного или прямоугольного (меандра).

5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их возможности, передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки работы в различных режимах измерения путем пробных измерений:

1. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать сетку частот и уровней ГС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

2. Пробные измерения сигналов разных форм

Подать на вход гармонический сигнал разного уровня и разной частоты без шумов. Оценить правильность представления спектра в линейном и логарифмическом масштабе. Сравнить полученные результаты с установленным уровнем ГС и с показаниями приборов ЦВ, СВ и О. Оценить влияние на спектр шумов разного уровня.

Выполнить пробные измерения спектров импульсных и комбинированных сигналов, вырабатываемых исследуемым ГС.

Уровень 2: Применение АС

Исследуются спектры гармонического, треугольного, прямоугольного (меандра), пилообразного, шумового и комбинированных сигналов, вырабатываемых исследуемым ГС. Предварительно выбрать сетку частот и уровней сигнала.

1. *Исследование спектра гармонического сигнала*

Подать на вход АС гармонический сигнал ГС без шумов и измерить уровень первой гармоники. Оценить ширину спектральной линии на уровнях -3, -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями СВ.

2. *Исследование спектра треугольного сигнала*

Подать на вход АС треугольный сигнал ГС без шумов и измерить уровень первых 10 гармоник. Оценить отношение высших гармоник к основной составляющей спектра. Оценить ширину спектральных линий на уровнях -3, -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями СВ.

3. *Исследование спектра меандра*

Подать с выхода ГС на вход АС меандр без шумов и измерить уровень его первых 10 гармоник. Оценить отношение высших гармоник к основной составляющей спектра. Оценить ширину спектральных линий на уровнях -3, -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями СВ.

4. *Исследование спектра пилообразного сигнала*

Подать на вход АС пилообразный сигнал ГС без шумов и измерить уровень первых 10 гармоник. Оценить отношение высших гармоник к основной составляющей спектра. Оценить ширину спектральных линий на уровнях -3, -20 и -60 дБ. Исследовать спектр на разных частотах и для разных уровней сигнала ГС без шумов и с шумами. Сравнить полученные результаты с показаниями СВ.

5. *Косвенные измерения коэффициента гармоник*

Оценить для фиксированной частоты и максимального выходного уровня величину коэффициента нелинейных искажений (коэффициент гармоник) K_G сигналов с шумами и без шумов по формуле:

$$K_G = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100\%.$$

КНИ показывает вес высших гармонических составляющих в спектре сигнала по отношению к первой гармонике в процентах. Сравнить результаты с показаниями образцового ИИ.

6. *Косвенные измерения СКЗ различных сигналов*

Оценить для фиксированной частоты СКЗ выходного сигнала ГС можно суммируя величины СКЗ всех его гармоник по формуле:

$$U_{СКЗ} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}.$$

Сравнить результаты с показаниями образцового ЦВ.

Уровень 3: Изучение методик и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик АС при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

Поверку АС можно осуществлять по эталонной мере (эталонному генератору – калибратору) и по эталонным приборам (ИИ, СВ, ЦВ).

При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

- Внешний осмотр.
- Опробование.
- Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка АС:

1. Проверить работоспособность АС во всех режимах измерения. Выбрать сетку частот и уровней для поверки АС, исходя из возможностей образцового ГС.

2. Определить погрешности измерения частоты и СКЗ гармонического сигнала образцового ГС в диапазоне уровней (10 мВ ... 10 В; 0,01... 50 кГц). Построить графики погрешностей в зависимости от частоты для разных уровней сигнала и в зависимости от уровня для разных частот сигнала ГС. Выбрать формы представления относительных погрешностей (одночленной или двухчленной формулой) по уровню и по частоте и записать аппроксимирующие выражения погрешностей с учетом 2-кратного запаса и рекомендуемого ряда чисел коэффициентов. Например, предел допускаемой относительной погрешности измерения уровня сигнала можно записать

$$\delta_{\text{доп}} \pm (4 + 2U_{\text{П}}/U_{\text{X}})\%,$$

где $U_{\text{П}}$ – предел измерения, В; U_{X} – измеряемое напряжение, В.

3. Определить порог чувствительности АС на частоте 1 кГц и в других точках рабочего диапазона по критерию 2-кратного превышения сигнала над установленным уровнем шумов. Оценить динамический диапазон работы АС как отношение максимального сигнала к порогу чувствительности в логарифмическом масштабе

$$D=20\lg U_{\text{МАХ}}/U_{\text{ПОРОГ}}.$$

4. Определить полосу пропускания АС (разрешающую способность по частоте). При этом оценивается возможность раздельного измерения соседних частотных компонент на заданном уровне сигнала (-20, -40, -60 дБ).

5. Определить неравномерность АЧХ исследуемого АС с помощью образцового ГС путем измерения уровня в диапазоне рабочих частот с выбором максимального и минимального значений сигнала. Тогда неравномерность в абсолютном и относительном масштабе:

$$\Delta=U_{\text{max}} - U_{\text{min}}; \quad \delta=200(U_{\text{max}} - U_{\text{min}})/(U_{\text{max}} + U_{\text{min}}), \%$$

6. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики, таблицы и схемы измерений.
- Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

7. Защита результатов исследований

После выполнения всех запланированных исследований необходимо обработать, оформить и защитить результаты эксперимента. Отчет по лабораторной работе каждый студент оформляет индивидуально.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Что измеряют с помощью АС?
2. Назовите основные метрологические характеристики АС.
3. Чем отличаются виртуальные АС от автономных приборов?
4. Что такое амплитудно-частотный спектр колебаний?
5. Для чего используется спектральное представление сигналов?
6. Какие методы спектрального анализа используются в АС?
7. Какие измерения можно проводить с помощью АС?
8. Как работает виртуальный АС?
9. Какие ВП использовались при исследованиях и для чего?
10. Какие органы управления имеет АС?
11. Какой спектр имеет импульсный сигнал?
12. Какой спектр имеет шумоподобный сигнал?
13. Какой спектр имеет гармонический сигнал?
14. Как выглядит спектр гармонического сигнала с шумами?
15. Как выглядит спектр меандра?
16. Как выглядит спектр пилообразного сигнала?
17. Как выглядит спектр треугольного сигнала?
18. Как измерить частоту гармонического сигнала?
19. Как определить погрешность измерения частоты сигнала?
20. Как измерить напряжение гармонического сигнала?
21. Поясните экспериментальные результаты.
22. Как определить погрешность измерения уровня сигнала?

Дополнительные вопросы для уровня 2

23. Как оценить коэффициент нелинейных искажений сигнала?
24. Как исследовать спектр неидеального гармонического сигнала?
25. Что делает со спектром гармонического сигнала ограничитель?
26. Как исследовать спектр импульсного сигнала?
27. Как исследовать спектр шумоподобного сигнала?
28. Как измерить уровни гармоник периодических сигналов на фоне шумов?
29. Как выделить помехи и измерить их уровни?
30. Как измерить отношение высших гармоник к основной составляющей спектра?

Дополнительные вопросы для уровня 3

31. Какими приборами можно проводить поверку?
32. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке АС?
33. Как оценить динамический диапазон прибора?
34. Как оценить неравномерность АЧХ каналов прибора?
35. Как оценить порог чувствительности прибора?
36. Как определить реальный диапазон рабочих частот АС?
37. Как определить разрешающую способность по частоте?

2.5. Цифровые и вычислительные вольтметры

1. Цели и задачи исследований

Уровень 1: Изучить цифровые и виртуальные вычислительные вольтметры, их принцип работы и метрологические характеристики. Приобрести практические навыки работы в различных режимах измерения.

Уровень 2: *Применить виртуальный вычислительный вольтметр* для исследования параметров сигналов и устройств.

Уровень 3: *Изучить и освоить методики поверки вольтметра* путем определения его основных метрологических характеристик. Выполнить учебную поверку вольтметра.

2. Виды цифровых и вычислительных вольтметров

Вычислительные вольтметры (ВВ) – это, как правило, цифровые микропроцессорные или виртуальные (компьютерные) приборы. Основным узлом цифровых приборов является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий непрерывную измеряемую величину в цифровой код. В серийных цифровых вольтметрах используются время-импульсные, частотно-импульсные и кодово-импульсные АЦП.

В вычислительных вольтметрах могут применяться методы обработки дискретизированных сигналов, как во временной, так и в частотной области. Во временной области используются методы численного интегрирования, а в частотной применяются алгоритмы БПФ.

Времяимпульсный вольтметр (см. рис. 2.5.1) с преобразованием $U_x \rightarrow T_x$ и измерением T_x методом дискретного счета.

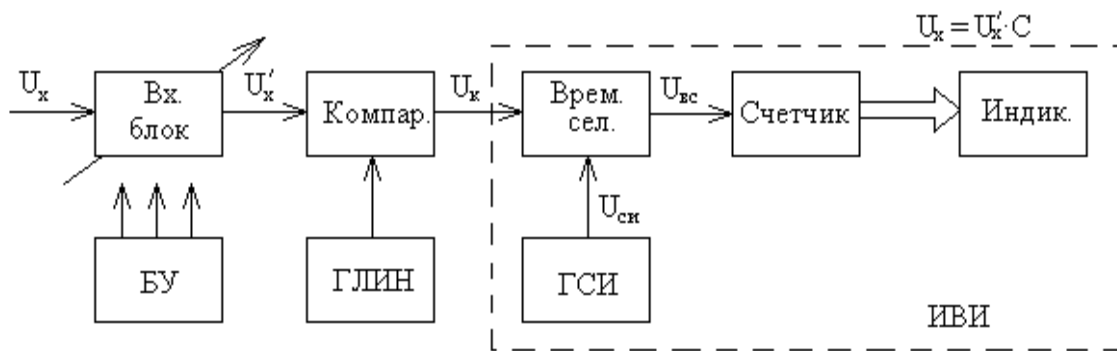


Рис. 2.5.1

Измеряемое напряжение U_x преобразуется в интервал времени T_x , который определяется (см. рис. 2.5.2) путем подсчета заполняющих его m импульсов кварцеванной частоты. При правильном выборе параметров схемы прибор прямопоказывающий:

$$U_x = mT_{сч} V = m \cdot 10^p$$

где p - целое число. Таким образом, при правильном выборе параметров схемы прибор прямопоказывающий.

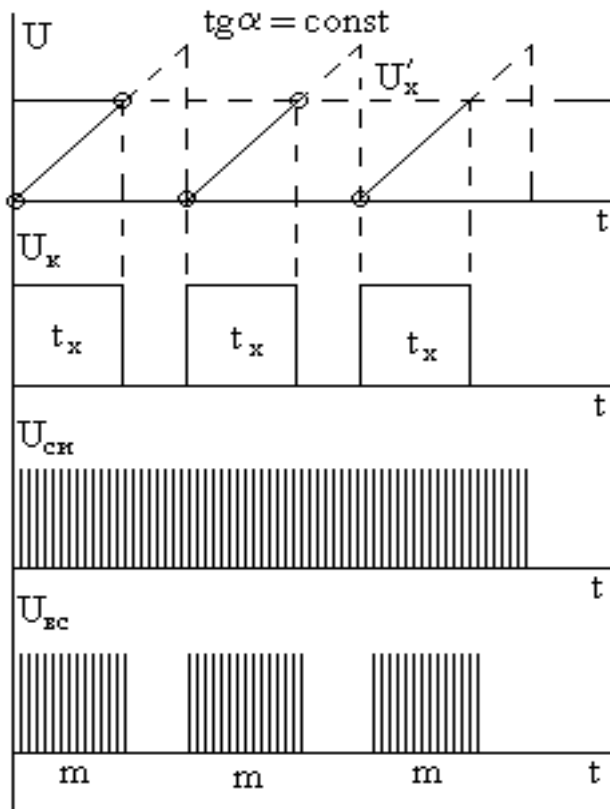


Рис. 2.5.2

Другими факторами, ограничивающими точность, является дрейф нуля во входном блоке, погрешность компаратора и погрешность измерителя интервала времени, обусловленная дискретностью и нестабильностью частоты генератора счетных импульсов. Основным недостатком метода - плохое подавление напряжения помех. Для устранения этого недостатка на входе включают фильтры, усложняющие прибор и увеличивающие время измерения.

Достоинство метода – его простота при удовлетворительной погрешности (достигается величина 0,1...0,05%).

Вольтметр двойного интегрирования (с интегрированием «вверх – вниз») несколько сложнее (см. рис 2.5.3 и 2.5.4), но лишен недостатков простого времяимпульсного преобразования, поэтому применяется сейчас очень широко.

Метод интегрирования “вверх-вниз” используется для повышения точности измерения. В течение калиброванной длительности t_1 на вход интегратора через компаратор поступает измеряемое напряжение u_x . Запускается интегрирование “вверх”.

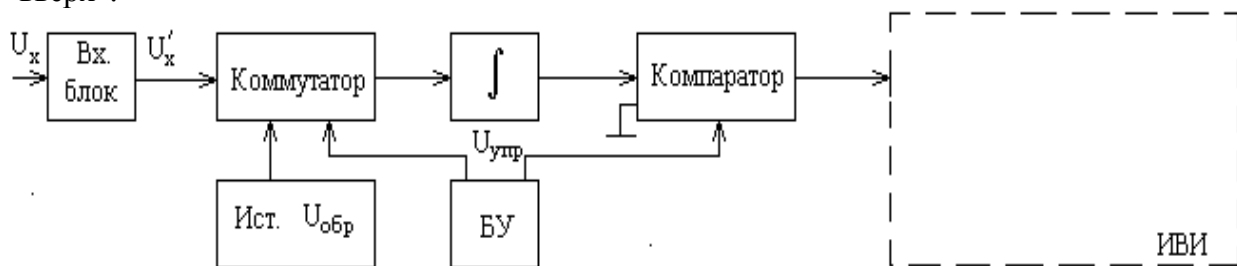


Рис. 2.5.3

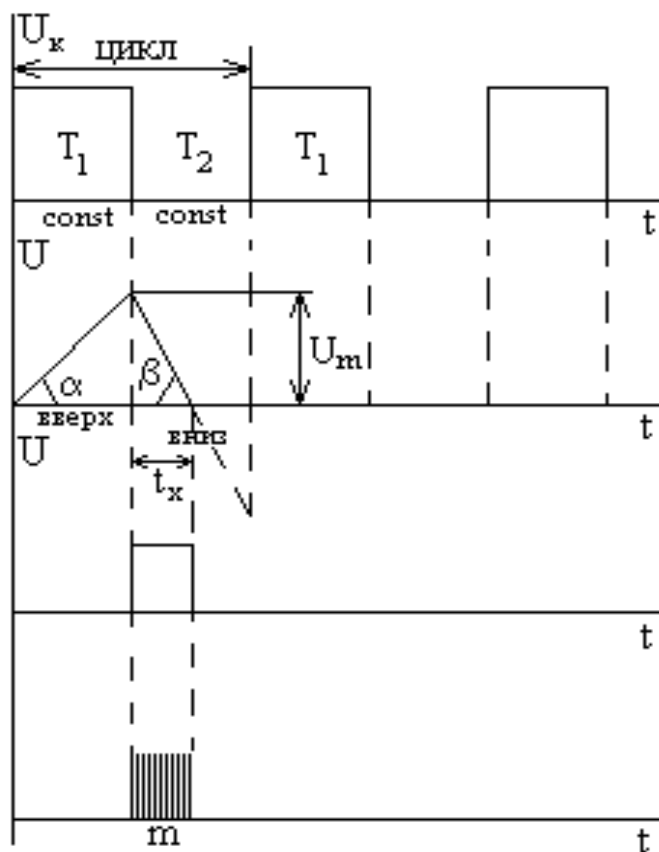


Рис. 2.5.4

временных интервалов. Медленные изменения характеристик интегратора (старение) не будут влиять на результат измерения.

При выборе интервала t_1 , равного целому числу периодов помехи обеспечивается их подавление помех более 40 дБ.

Высокочастотная помеха компенсируется, так как периодов много и число положительных полуволн приблизительно равно числу отрицательных. При этом изменение площади в конце интегрирования малое. Полная погрешность измерения 0,02 ... 0,005%.

Вольтметр поразрядного кодирования (см. рис. 2.5.5 и 2.5.6) осуществляет сравнение U_x с рядом образцовых напряжений, значения которых вырабатываются ЦАП и изменяются по определенному закону от большего значения к меньшему.

Крутизна (α) пропорциональна значению U_x . По окончании первого такта (интервала t_1) на вход интегратора подается образцовое напряжение другой полярности $U_{обр}$ и запускается интегрирование “вниз” до нулевого уровня с постоянной крутизной (β). В результате формируется импульс, длительность которого линейно зависит от входного напряжения. Эта длительность измеряется с помощью встроенного измерителя временных интервалов.

Цикл $T=T_1+T_2$ – формирует блок управления (БУ). Если за время T_x характеристики интегратора не изменились, тогда

$$U_x = U_{обр} \frac{T_{сч}}{T_1} \cdot m = m \cdot 10^p$$

Основные составляющие погрешности: преобразования, сравнения, квантования (дискретизации), формирования

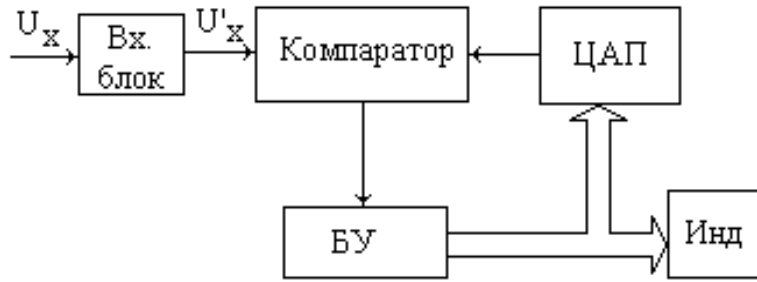


Рис. 2.5.5

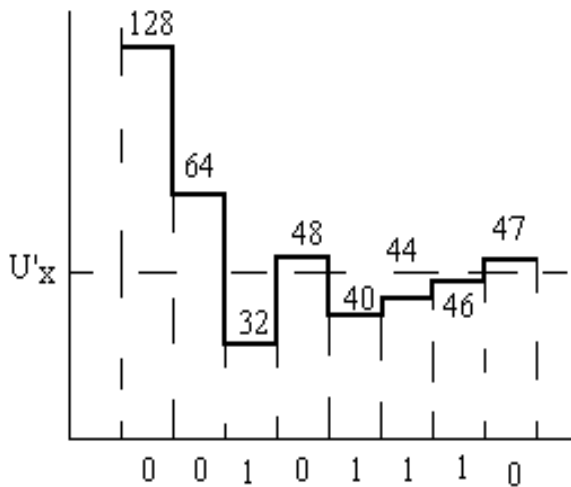


Рис. 2.5.6

Рассмотрим работу на конкретном примере. Пусть ЦАП имеет n двоичных разрядов: младший 1 мВ и далее 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 мВ.

Сравнение начинается со старшего разряда ЦАП. Ячейка остается включенной, если напряжение ЦАП в i -ом шаге компенсации остается меньше U_x ; если оно больше, то ячейка выключается. На каждом шаге вес включенных ячеек суммируется. Таким образом, приближение к U_x осуществляется снизу. Результат

$$U_x = q \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i,$$

где q – напряжение соответствующее единице младшего разряда; $a_i=0,1$ в зависимости от соотношения U_x и $U_{ЦАП} = U_{ki}$.

Пусть на вход подано напряжение 46,7 мВ. Компенсирующее напряжение и код a_i для каждого такта работы представлены на временной диаграмме. Результат измерения 46 мВ.

В реальных вольтметрах напряжение ячеек ЦАП может изменяться по двоично-десятичному коду, когда каждый разряд представлен 4 ячейками в коде 1-2-4-8. Основные погрешности вольтметров этого типа: погрешности ЦАП, компаратора, дискретности, входных цепей. Метод очень чувствителен к помехам, поэтому нужны хорошие входные фильтры. Достоинства приборов взвешивания: малая погрешность 0,05...0,001% и высокое быстродействие.

Частотно – импульсный вольтметр реализует преобразование входного напряжения в частоту, которая измеряется встроенным ЭСЧ. Для преобразования $U \rightarrow f$ используются интегрирование сигнала (см. рис. 2.5.7).



Рис. 2.5.7

Напряжение в частоту преобразуется за счет использования импульсной обратной связи (ОС). Входное напряжение интегрируется до опорного (порогового) уровня. При этом скорость интегрирования

$$V = \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{\text{порог}}}{T_x} \sim U_x$$

При равенстве U_x и $U_{\text{порог}}$ срабатывает компаратор и формируется импульс ОС, возвращающий интегратор в исходное состояние. Частота срабатывания компаратора пропорциональна измеряемому напряжению: $U_x \sim U_{\text{пор}} F_x$. Путем выбора параметров схемы можно обеспечить $U_x = 10^p \cdot F_x$, где $p = \pm 1, 2, \dots$, т.е. сделать прибор прямопоказывающим.

Измеряемое напряжение преобразуется в частоту по линейному закону. Если при измерении усреднение частоты производится за время, равное целому числу периодов помехи, или время измерения много больше периода помехи, тогда измеренное среднее значение частоты равно частоте сигнала без помехи. Короткие импульсные помехи практически не изменяют частоту и не влияют на результат.

Приборы, реализующие методы преобразования напряжения в частоту, обеспечивают погрешность измерения 0,1...0,005%, высокое подавление помех (более 40 дБ), высокую чувствительность (0,1...1 мкВ).

Современные ЦВ, как правило, микропроцессорные, многофункциональные, с автокалибровкой, автоматическим выбором полярности и предела, с самопроверкой, с возможностями математической обработки и усреднения результатов многократных измерений.

Наиболее простые времяимпульсные методы. Чаще применяют двойное интегрирование. Предел допускаемой основной погрешности ЦВ обычно задается двухчленной формулой:

$$\delta = \pm \left[b + a \left| \frac{A_k}{A_n} \right| \right] \quad \text{или} \quad \delta = \pm \left[c + d \left| \frac{A_k}{A_n} - 1 \right| \right], \quad \text{где } a, b, c \text{ и } d -$$

постоянные числа; A_n – показания; A_k – предел измерения.

В лабораторном виртуальном ВВ реализован вычислительный принцип измерения размаха сигнала, его среднеквадратического и пиковых значений.

Предусмотрено введение поправочных чисел для компенсации шумов и нелинейности амплитудной характеристики. Это позволяет повысить чувствительность прибора, расширить его динамический диапазон.

Алгоритм обработки может быть следующий. До подачи сигнала U_c измеряется средний квадрат шумового ($U_{ш}$) сигнала и запоминается $U_{шcp}^2$ при подаче сигнала считается, что шум тот же. Сумма ($U_{ш} + U_c$) возводится в квадрат и усредняется.

$$[U_c(t) + U_{ш}(t)]^2 = U_{шcp}^2(t) + 2U_c(t)U_{ш}(t) + U_{шcp}^2(t) = U_{шcp}^2(t) + U_{шcp}^2(t)$$

Здесь среднее значение произведения $2U_c(t)U_{ш}(t)$ равно нулю т.к. сигнал и шум независимы (некоррелированы). Из полученной суммы вычитается запомненный шум, извлекается квадратный корень и получается значение сигнала.

3. Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит четыре двухканальных виртуальных приборов:

- Двухканальный генератор сигналов (ГС).
- Двухканальный вычислительный вольтметр (ВВ).
- Однолучевой двухканальный осциллограф (О).
- Однолучевой двухканальный анализатор спектра (АС).

Интерфейс КВП показан на рис. 2.5.8.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Выходной сигнал ГС подан одновременно на входы всех приборов.

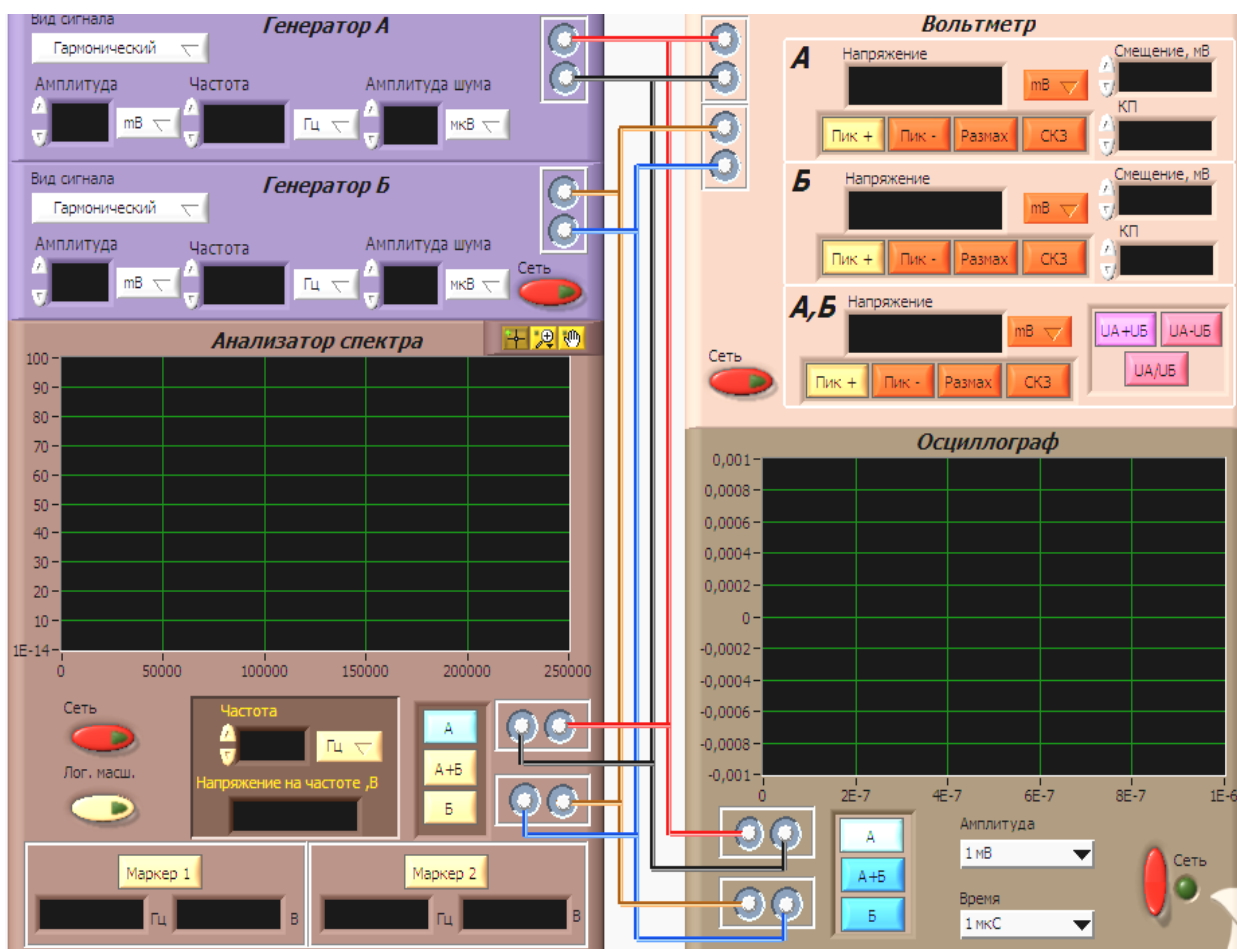


Рис.2.5.8

Передняя панель каждого прибора имеет органы управления, с помощью которых можно установить его в нужный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «Сеть» для включения питания.

В верхней части главного рабочего окна имеются пиктограммы:

- **Стрелка слева – направо** для однократного запуска.
- **Свернутые в кольцо две стрелки** для установки периодического внутреннего запуска (активное состояние черного цвета).
- **Восьмиугольник** (активное состояние красного цвета).

Передние панели виртуальных приборов

Двухканальный генератор сигналов (ГС)

Генератор построен на основе двухканального виртуального ЦАП, синтезирующего независимо в каждом канале требуемые шумы и периодический сигнал в соответствии с выбранной пользователем формой, частотой и уровнем (см. рис. 2.5.9). При выполнении лабораторной работы ГС используется в качестве объекта исследования, а также как калибратор уровня сигнала (генератор – калибратор), с помощью которого определяются погрешности испытуемого ВВ.

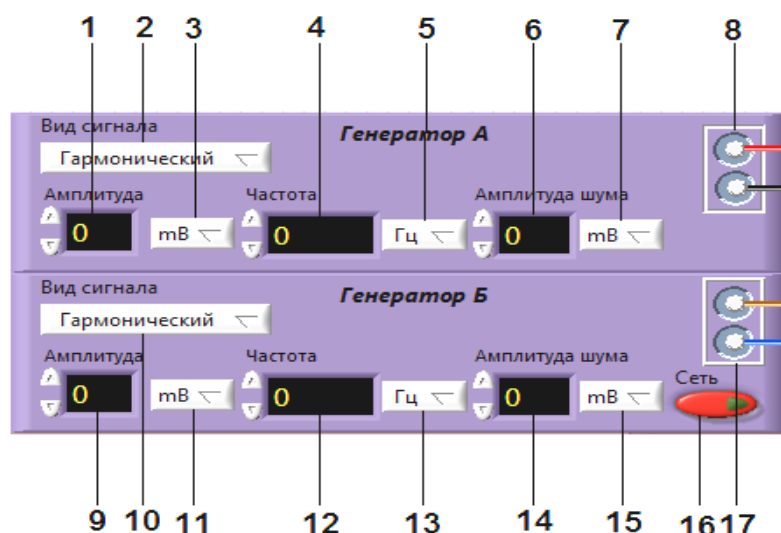


Рис. 2.5.9

На рис. 2.5.9 цифрами обозначены:

- 1,9 - индикаторы амплитуды сигнала в каналах А и Б;
- 2,10 - выплывающие меню вида сигнала (гармонический, треугольный, меандр, пилообразный) в каналах А и Б;
- 3,11 - выплывающие меню единиц амплитуды сигнала (mV, V);
- 4,12 - индикаторы частоты сигнала в каналах А и Б;
- 5,13 - выплывающие меню единиц частоты сигнала (Гц, кГц);
- 6,14 - индикаторы амплитуды шума сигнала в каналах А и Б;
- 7,15 - выплывающие меню единиц амплитуды шума (mV, V);
- 16 – выключатель питания;
- 8,17 - выходы генераторов А и Б.

ГС состоит из двух модулей: А и Б. В каждом модуле выбирается вид сигнала, его амплитуда, частота и уровень шума.

Поле ввода «Амплитуда» служит для установки уровня генерируемого сигнала. При этом курсор перемещается в поле индикатора и активизируется левой кнопкой мышки. Затем вводится необходимое значение амплитуды сигнала. Можно выполнять регулировку уровня, используя клавиши в виде стрелок «вверх» и «вниз», расположенные слева от поля ввода.

Поле ввода «Амплитуда шума» служит для установки уровня шумов. Окно ввода «Частота» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Окно «Вид сигнала» устанавливает вид генерируемого сигнала: гармонический (Г), меандр (М), треугольный (Т), пилообразный (П).

Двухканальный вычислительный вольтметр (ВВ)

ВВ содержит два независимых рабочих каналов, а также канал комплексной обработки информации в обоих рабочих каналах. В каждом канале реализовано четыре режима измерения (см. рис. 2.5.10) с индикацией:

- «Пик –» - пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;
- «Пик +» - пикового уровня положительной полуволны сигнала;
- «Размах» - размаха сигнала;
- «СКЗ» - среднеквадратического значения сигнала.

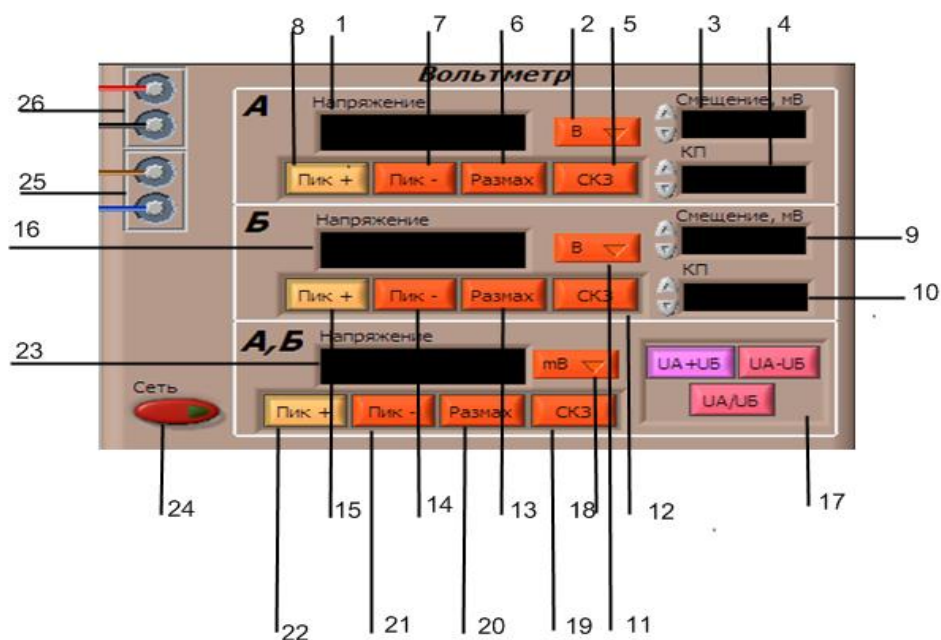


Рис. 2.5.10

В рабочих каналах имеются поля ввода поправочных чисел для коррекции амплитудной характеристики (аддитивная и мультипликативная поправки): коррекция смещения «0» и коррекция коэффициента передачи в канале измерения.

Канал комплексной обработки позволяет оценивать сумму, разность и отношение результатов, получаемых в рабочих каналах.

На рис. 2.5.10 цифрами обозначены:

- 1,16,23 - индикаторы измеряемого напряжения в каналах А,Б и АБ;
- 2,11,18 - выплывающие меню единиц напряжения (V, mV);
- 3,9 - индикаторы для установления смещения в каналах А и Б;
- 4,10 - индикаторы для установления коэффициента передачи в каналах;
- 5,12,19 – включение режима измерения СКЗ сигнала;
- 6,13,20 - включение режима измерения размаха напряжения;
- 7,14,21 - включение режима измерения минимального напряжения;
- 8,15,22 - включение режима измерения максимального напряжения;
- 17 – панель выбора режима обработки информации в каналах (разность, сумма или отношение напряжений каналов А и Б);
- 24 – выключатель питания;
- 25,26 - входы каналов А и Б.

Однолучевой двухканальный осциллограф

Прибор применяется для визуального контроля формы сигналов, подаваемых с выхода ГС.

На передней панели (см. рис. 2.5.11) имеются выплывающие меню:

- «Амплитуда» – выбор пределов отображения уровня сигнала на экране осциллографа (на вертикальной оси);
- «Время» – выбор предела отображения длительности сигнала или времени развертки на экране осциллографа (на горизонтальной оси).

Кнопки «А», «Б» и «А+Б» позволяют выбрать рабочий канал сигнала, представляемого на индикаторе осциллографа.

На рис. 2.5.11 цифрами обозначены:

- 1,3 - входы А и Б;
- 2 – панель выбора вида сигнала, выводимого на экран (А, Б или А+Б);
- 4 - всплывающее меню времени развертки (ось абсцисс);
- 5 - всплывающее меню амплитуды развертки (ось ординат);
- 6 – выключатель питания;
- 7 – панорамный индикатор (экран).

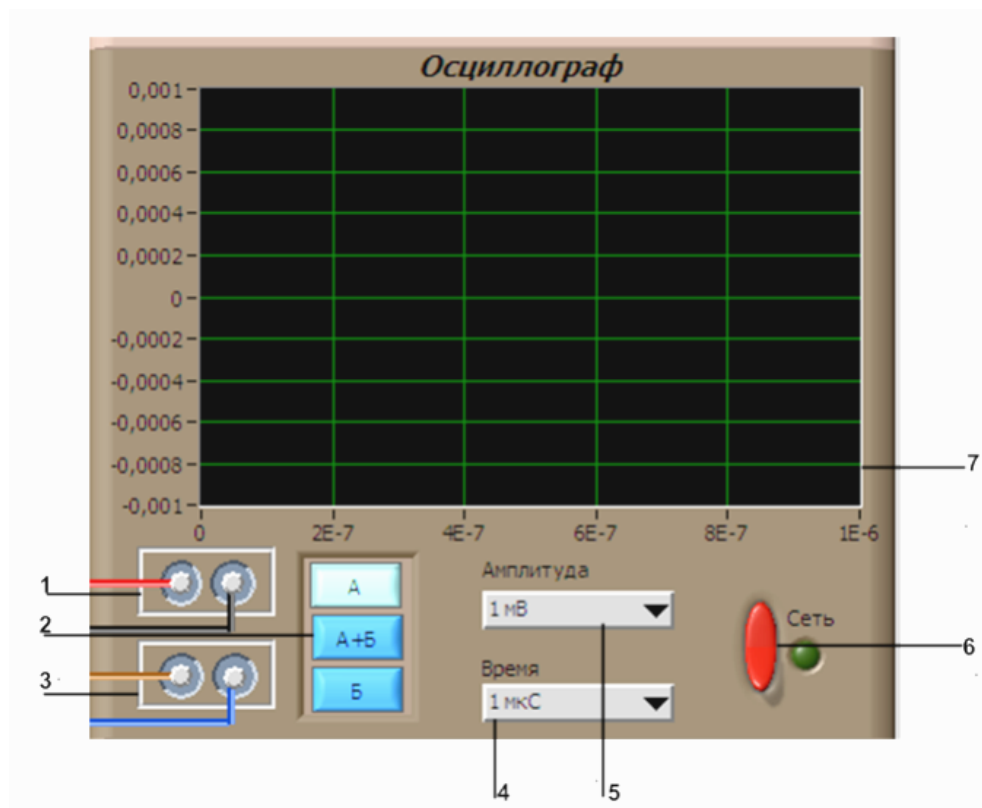


Рис. 2.5.11. Осциллограф

Одноручевой двухканальный анализатор спектра (АС)

АС применяется для оценки соотношений гармонических и шумовых составляющих спектра сигнала подаваемых на входы ВВ.

Прибор (см. рис. 2.5.12) имеет кнопку «Лог. масш.» для переключения отображения вертикальной оси в линейном или в логарифмическом масштабе. Кнопки «А», «Б» и «А+Б» позволяют выбрать рабочий канал сигнала, который выводится на индикатор АС.

Для более точного определения параметров спектра в конкретных точках имеется возможность включения одного или двух маркеров уровня и частоты. Маркеры включаются кнопками «Маркер 1» и «Маркер 2», а информация об их положении отображается в соответствующих полях внизу лицевой панели.

Для измерения уровня измеряемой частотной компоненты реализованы возможности встроенного селективного вольтметра. Окно ввода «Частота» с выбором

размерности «Гц / кГц» позволяет установить частоту компоненты. Результат (СКЗ) считывается с индикатора «Напряжение на частоте, В».

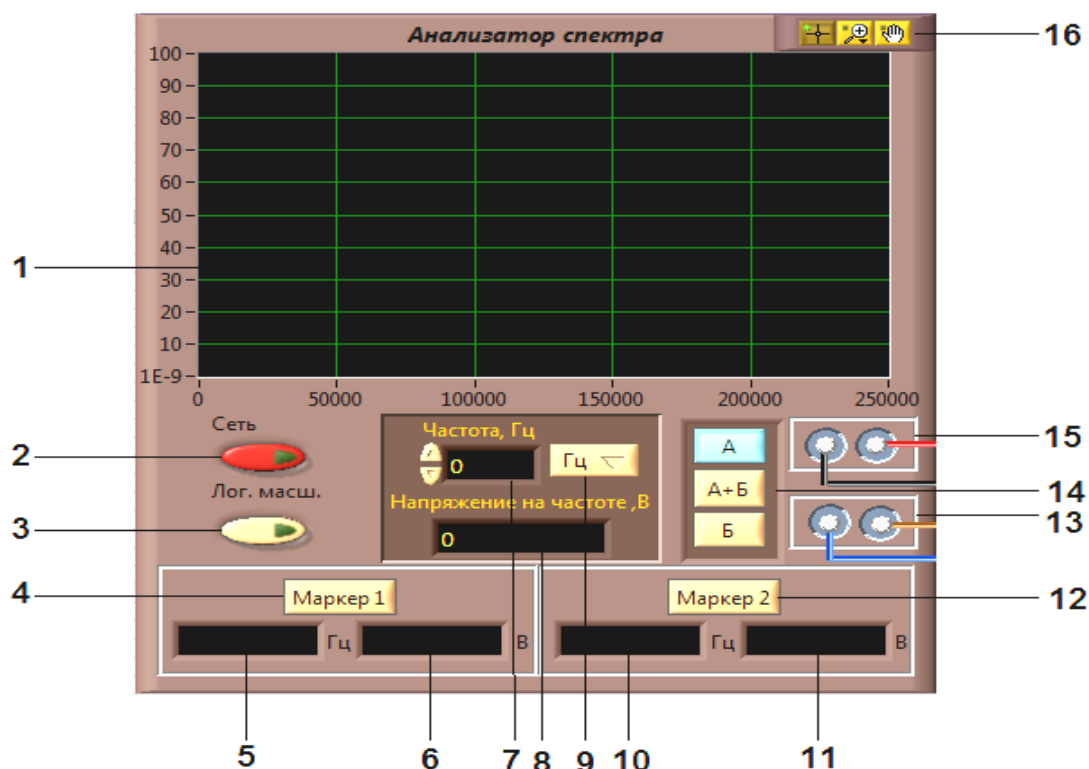


Рис. 2.5.12

На рис. 2.5.12 цифрами обозначены:

- 1 – панорамный индикатор (экран);
- 2 – выключатель питания;
- 3 – переключатель масштаба оси амплитуд (логарифмический/линейный);
- 4,12 – кнопки включения маркеров 1 и 2;
- 5,10 - индикаторы частоты в точках расположения маркеров 1 и 2;
- 6,11 - индикаторы уровня в точках расположения маркеров 1 и 2;
- 7 – индикатор выбранной частоты измерения уровня сигнала;
- 8 - индикатор напряжения на выбранной частоте измерения;
- 9 - всплывающее меню для выбора единицы частоты сигнала (Гц, кГц);
- 13,15 – входы А и Б;
- 14 – панель выбора вида спектра, выводимого на экран (А, Б или А+Б);
- 16 – панель управления положением маркеров и диапазоном представления данных по осям частот и амплитуд.

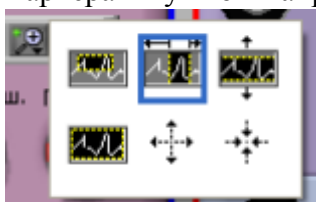
Для удобства работы в верхней правой части лицевой панели АС, расположены кнопки:



- режим управления положением окна индикации путем нажатия с удерживанием левой кнопки мыши и перемещением в нужном направлении;



- режим управления положения маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении;



- режимы лупы (слева направо и сверху вниз):

- Увеличение выбранной области.
- Увеличение участка горизонтальной оси.
- Увеличение участка вертикальной оси.
- Возврат к полному отображению графика.
- Приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши.
- Отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

4. Подготовка к выполнению исследований

Подготовка к исследованиям ВВ выполняется дома и уточняется в начале занятий.

При подготовке необходимо:

- изучить возможности и органы управления всех используемых в работе виртуальных приборов;
- составить план экспериментальных исследований;
- подготовить на бригаду форму отчета, содержащего план и методики исследований, заготовки таблиц и графиков;
- в начале занятия согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

После получения индивидуального допуска к работе выполнить запланированные исследования в полном объеме.

5. Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1: Изучение органов управления и работа с КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их возможности, передние панели и метрологические характеристики. Приобретаются практические навыки работы в различных режимах измерения путем пробных измерений:

1. Апробация работоспособности всех модулей КВП

Включить и запустить все приборы КВП, изучить реакцию приборов на изменения состояния органов управления. Выбрать сетку частот и уровней ГС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

2. Пробные измерения сигналов разных форм без шумов и с шумами

Измерить выходные сигналы ГС с помощью ВВ во всех режимах работы (СКЗ, Размах, Пик +, Пик -). Сравнить установленные и полученные данные, контролируя форму сигналов на экране осциллографа, а спектр на экране АС. Изменяя форму, уровень шумов, амплитуду и частоту сигнала, проследить за изменениями показаний приборов и убедиться в их работоспособности.

3. Пробные измерения сигналов разных форм с обработкой данных в рабочих каналах

Устанавливая в каналах различные уровни и частоты сигналов с шумами и без шумов, оценить правильность работы вычислительного канала А,Б. Контролировать результаты с помощью О и АС.

4. *Пробные измерения сигналов с введением аддитивной и мультипликативной поправки:*

а) сформировать в канале А сигнал (например 100 кГц, 1 мВ) с шумом (например 500 мкВ), а в канале Б - только шум такой же величины;

б) подобрать поправочные числа так, чтобы при неизменном уровне шума погрешность оценки уровня сигнала была минимальна в динамическом диапазоне до 10 - 20 дБ (линейная зависимость).

Уровень 2: Применение ВВ

Будем считать, что испытуемым является ГС, а ВВ является образцовым и может применяться для исследования характеристик его выходных сигналов всех форм: нестабильности выходного напряжения во времени и неравномерности уровня при перестройке частоты.

В режиме обработки комплексных данных каналов можно апробировать возможности компенсации шумов и нелинейности амплитудной характеристики канала передачи сигнала, а также вычисления параметров РЭА, например, коэффициента передачи (усиления, ослабления), апробировать возможности оценки дифференциального и суммарного сигнала.

Перед испытаниями для каждого вида сигнала и конкретной задачи необходимо выбрать сетку шумов, частот и уровней ГС для пробных измерений в границах работоспособности всех приборов.

1. *Измерение выходного уровня и его неравномерности в диапазоне частот для каждого канала ГС при наличии и отсутствии шумов :*

а) установите амплитуду гармонического сигнала ГС 1 мВ, частоту - 10 Гц, уровень шума 0 мВ;

б) увеличивая частоту ГС от 10 Гц до 200 кГц (в логарифмическом масштабе: 10, 20, 50, 100, 200, ...) фиксируйте показания ВВ;

в) повторите пп. а)...б), выбрав другие амплитуды ГС (10, 100 ...);

г) повторите пп. а)...в), выбрав уровень шума 1, 10, 100, 1000 мВ;

д) выбрать максимальное и минимальное значения (U_{max} и U_{min});

е) оценить неравномерность уровня сигнала ГС по частоте для всех уровней сигнала и шумов в абсолютном и относительном масштабе:

$$\Delta = U_{max} - U_{min}, \text{ В}; \quad \Delta = 200(U_{max} - U_{min}) / (U_{max} + U_{min}), \text{ \%};$$

ж) построить графики относительной неравномерности (в %) в зависимости от частоты для нулевого и максимального шума;

з) повторите пп. а)...ж), выбрав другой вид сигнала.

2. *Оценка идентичности сигналов в каналах А и Б:*

а) установить на выходах ГС синфазные гармонические сигналы 1 мВ, 100 Гц без шумов и оценить суммарный уровень сигнала на О и ВВ;

б) установить на выходах ГС противофазные гармонические сигналы (1 мВ и -1 мВ), 100 Гц без шумов и оценить суммарный уровень сигнала на О и ВВ;

в) повторить измерения по пп. а) и б) на других частотах и уровнях сигнала без шумов и с шумами;

- г) повторить измерения по пп. а) ...в) для сигналов других форм;
- д) проверить идентичность шумов в разных каналах при отсутствии сигналов.

3. *Оценка значений коэффициента амплитуды с помощью ВВ:*

- а) собрать массив данных для оценки коэффициентов амплитуды разных видов сигналов (идентичных в каналах А и Б) при отсутствии и наличии шумов на средней и крайних частотах ГС (10 Гц; 100 кГц);
- б) оценить коэффициенты амплитуды с использованием делителя А,Б:

$$K_a = U_m / U_{СКЗ}.$$

4. *Измерения с обработкой данных в канале А,Б:*

- а) сформировать в канале А сигнал (например 100 кГц, 1 мВ) с шумом (например 500 мкВ), а в канале Б - только шум такой же величины;
- б) в каналах ВВ выбрать режимы СКЗ и разности А-Б в качестве грубой оценки уровня сигнала без шумов;
- в) повторить измерения для разных частот и уровней сигнала и шума.
- г) рассчитать СКЗ сигнала без шумов, через уровни средних квадратов шумов и сигнала с шумами;
- д) сравнить оценки уровня сигнала в пп. в) и г).

Уровень 3: Изучение методик и проведение учебной поверки

Определение основных метрологических характеристик ВВ при учебной поверке проводится в предположении, что используемые в работе другие виртуальные приборы являются образцовыми, т.е. имеют ранг ОСИ соответствующего разряда.

Поверку ВВ осуществлять по эталонной мере (эталонному генератору – калибратору). При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:

- Внешний осмотр.
- Опробование.
- Определение метрологических характеристик прибора.

Учебная поверка ВВ

1. Проверить работоспособность (опробование) ВВ во всех режимах измерения. Выбрать сетку частот и уровней для поверки.
2. Определить погрешности измерения СКЗ переменного напряжения различного вида с помощью образцового ГС в диапазоне значений от 1 мВ до 10 В и в диапазоне частот сигнала 10 – 100000 Гц.
3. Определить реальный диапазон рабочих частот по критерию допустимой погрешности на верхней и нижней границе. Предел допустимых значений относительной основной погрешности измерения переменного напряжения примем $\delta_{доп} = \pm 0,1\%$.

Методика поверки (ГС образцовый, все погрешности в ВВ):

- а) установите амплитуду гармонического сигнала ГС 1 мВ, частоту - 10 Гц, уровень шума 0 мВ;
- б) увеличивая частоту ГС от 10 Гц до 100 кГц (в логарифмическом масштабе: 10, 20, 50, 100, 200, ...) зафиксируйте показания ВВ;
- в) повторите пп. а)...б), выбрав другие амплитуды ГС (10, 100 ...);
- г) повторите пп. а)...в), выбрав уровень шума 1, 10, 100 мВ;

д) выбрать максимальное и минимальное значения (U_{max} и U_{min}) для каждого уровня в диапазоне рабочих частот и оценить неравномерность АЧХ ВВ в абсолютном и относительном масштабе:

$$\Delta = U_{max} - U_{min}, \text{ В}; \quad \Delta = 200(U_{max} - U_{min}) / (U_{max} + U_{min}), \text{ \%};$$

ж) построить графики относительной неравномерности (в %) в зависимости от частоты для нулевого и максимального шума;

з) повторите пп. а)...ж), выбрав другой вид сигнала;

к) проверить правильность работы ВВ в режимах «Размах», «Пик-» и «Пик+».

л) проверить правильность работы канала А,Б в режиме вычислителя, подавая на входы А и Б известные сигналы;

м) проверить правильность ввода аддитивного и мультипликативного поправочного числа.

6. Содержание отчета

- Титульный лист в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Теоретические сведения (по усмотрению студента).
- План экспериментальных исследований.
- Экспериментальные графики, таблицы и схема измерений.
- Анализ полученных результатов и выводы по всем пунктам работы.

Контрольные вопросы к защите

Общие вопросы для всех уровней

1. Чем отличаются виртуальные вольтметры от автономных?
2. Какие измерения можно проводить с помощью исследуемого ВВ?
3. Поясните метод порязрядного кодирования.
4. Нарисуйте временную диаграмму процесса уравнивания для произвольного измеряемого напряжения и помехи.
5. Чем определяется погрешность при порязрядном кодировании?
6. Поясните метод преобразования напряжения в частоту.
7. Поясните процесс компенсации периодической помехи при преобразовании напряжения в частоту.
8. Чем определяется погрешность измерений при преобразовании напряжения в частоту?
9. Поясните метод времяимпульсного преобразования.
10. Нарисуйте временные диаграммы времяимпульсного преобразования при различных измеряемых напряжениях и наличии помехи.
11. Чем определяется погрешность измерения при времяимпульсном преобразовании?
12. Поясните метод двойного интегрирования.
13. Чем определяется погрешность при двойном интегрировании?
14. Как происходит подавление помех при двойном интегрировании?
15. Каковы особенности и преимущества микропроцессорных приборов?
16. Какие органы управления имеет ВВ?
17. Какие режимы работы ВВ позволяет исследовать КВП?
18. Что покажет ВВ в режимах «СКЗ» и «Пик +», если на его вход подать меандр?

19. Что покажет ВВ в режимах «СКЗ» и «Пик +», если на его вход подать шумовой сигнал?
20. Поясните экспериментальные результаты.
21. Что такое поверка и зачем она выполняется?
22. Дайте определение следующих понятий: погрешность средства измерений, класс точности средства измерений, погрешность поверки.

Дополнительные вопросы для уровня 2

23. Как оценить неравномерность выходного напряжения при перестройке частоты генератора?
24. Как оценить значения коэффициента амплитуды для сигналов различного вида?
25. Для чего предусмотрено введение поправочных чисел?
26. Как оценить уровень сигнала при наличии шума?
27. Как измерить амплитуду сигнала или шума?
28. Как скомпенсировать потери в измерительном кабеле?
29. Когда следует вводить аддитивную поправку в результат измерения?
30. Какая межканальная обработка осуществляется в ВВ?

Дополнительные вопросы для уровня 3

31. Что такое эталон, образцовое средство измерений, рабочее средство измерений?
32. Какие способы поверки существуют? Чем определяется выбор того или иного способа поверки?
33. Какими критериями необходимо руководствоваться при выборе образцовых средств измерений, с помощью которых поверяются рабочие средства измерений?
34. Почему в данной работе ГС был выбран в качестве образцового?
35. Какими приборами можно проводить поверку?
36. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке ВВ?
37. Как определить реальный диапазон рабочих частот ВВ?
38. Как проверить правильность работы ВВ в режимах «Размах», «Пик-» и «Пик+»?
39. Как проверить правильность работы вычислительного канала А,Б?
40. Как проверить правильность ввода аддитивного и мультипликативного поправочного числа?

Список рекомендуемой литературы

1. Гелль П. Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс: Пер. с франц. - 2-е изд., испр. - М.: ДМК. - 1999. - 144с. – ISBN 5-89818-026-5.
2. Поздняков А.Д. Автоматизация экспериментальных исследований, испытаний и мониторинга радиосистем / А.Д. Поздняков, В.А. Поздняков. – М.: Радиотехника. - 2004. – 208 с. – ISBN 5-93108-066-X.
3. Поздняков А.Д. Автоматизация экспериментальных радиофизических исследований: Практикум / Владим. гос. ун-т.- Владимир, 2004. - 128 с. – ISBN 5-89368-474-5.
4. Поздняков А.Д. Автоматизация радиоизмерений: Учеб. пособие. - Владимир: ВлГТУ. - 1995. -184 с. – ISBN 5-230-04783-6.
5. Поздняков А.Д. Курс лекций по дисциплине «Метрология и радиоизмерения»: Часть 1.- Владимир: ВлГУ, 2008. - 164 с. – ISBN 978-5-89368-863-4.
6. Поздняков А.Д. Курс лекций по дисциплине «Метрология и радиоизмерения»: Часть 2.- Владимир: ВлГУ, 2009. - 124 с. – ISBN 978-5-89368-976-1.
7. Поздняков А.Д. Алгоритмические методы определения параметров радиотехнических сигналов и цепей / Владим. гос. ун-т. - Владимир. - 2007. - 116 с. – ISBN 5-89368-736-1.
8. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. - Спб.: Питер. - 2005. - 604 с. – ISBN 5-318-00666-3.
9. Степанов А.В. Методы компьютерной обработки сигналов и систем радиосвязи / А.В. Степанов, С.А. Матвеев. – М.: СОЛОН – Пресс. - 2003. – 208 с. – ISBN 5-98003-031-X.

Оглавление

Основные сокращения.....	.....
Предисловие.....	.....
1. Алгоритмические измерения во временной области.....	.....
1.1. Принципы построения компьютерных приборов.....	.....
1.2. Аппаратные средства виртуальных приборов.....	.....
1.3. Аналого-цифровые преобразователи.....	.....
1.4. Аналитические методы оценки амплитуды, частоты и фазы сигнала по массиву мгновенных отсчетов.....	.....
1.5. Оценка среднеквадратического значения сигнала методом интегрирования.....	.....
1.6. Оценка параметров амплитудной модуляции.....	.....
1.7. Многоуровневое интерполирование при оценке периода сигнала ..	.....
1.8. Многоуровневое интерполирование при оценке фазового сдвига...	.....
1.9. Восстановление сигнала во временной области.....	.....
2. Алгоритмические измерения и синтез испытательных сигналов в частотной области.....	.....
2.1. Виртуальные приборы на базе спектрального анализа.....	.....
2.2. Оценка параметров сигнала по его спектру.....	.....
2.3. Оценка нелинейных искажений сигнала спектральным методом ...	.....
2.4. Восстановление сигнала по его спектру .....	.....
2.5. Оценка среднеквадратического значения сигнала в частотной области.....	.....
2.6. Определение частоты несущей по спектру дискретизированного сигнала.....	.....
2.8. Восстановление сигнала в частотной области.....	.....
2.9. Синтез сигналов.....	.....
3. Виртуальные приборы и комплексы	.....
3.1. Универсальные частотомеры .....	.....
3.2. Вольтметры.....	.....
3.3. Осциллографы.....	.....
3.4. Селективные вольтметры.....	.....
3.5. Измерители искажений.....	.....
3.6. Фазометры.....	.....
3.7. Синтезаторы сигналов специальной формы.....	.....
3.8. Синтезаторы полигармонического сигнала.....	.....
3.9. Анализаторы спектра .....	.....
3.10. Цифровые и вычислительные вольтметры.....	.....
Список рекомендуемой литературы.....	.....