

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

А. Д. ПОЗДНЯКОВ В. А. ПОЗДНЯКОВ

ВИРТУАЛЬНЫЕ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

Учебное пособие



Владимир 2015

УДК 621.396

ББК 32.844

П47

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой радиотехники и радиосистем
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
О. Р. Никитин

Доктор технических наук
доцент кафедры динамики электронных систем
Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова
А. Л. Приоров

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Поздняков, А. Д.

П47 Виртуальные радиоизмерительные приборы и комплексы :
учеб. пособие / А. Д. Поздняков, В. А. Поздняков ; Владим. гос.
ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ,
2015. – 232 с. – ISBN 978-5-9984-0571-6.

Рассмотрены вычислительные алгоритмы синтеза и оценки параметров радиосигналов во временной и частотной областях, обеспечивающие метрологические характеристики, достаточные для практических применений в автономных и встроенных средствах контроля, измерения и мониторинга. Приведены описания десяти исследовательских виртуальных лабораторных комплексов, созданных в среде LabVIEW для изучения принципов построения, возможностей и методик проверки широко применяемых измерительных приборов: вольтметров, частотомеров, осциллографов и измерителей искажения, фазометров, анализаторов спектра, цифровых вольтметров, синтезаторов форм и полигармонических сигналов.

Предназначено для студентов всех форм обучения по направлениям 210400 – Радиотехника и 210700 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 110. Табл. 4. Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.396

ББК 32.844

ISBN 978-5-9984-0571-6

© ВлГУ, 2015

Оглавление

Предисловие	5
1. Виртуальные компьютерные приборы	8
1.1. Принципы построения виртуальных приборов	8
1.2. Преимущества виртуальных приборов	13
1.3. Аппаратные средства виртуальных приборов	15
1.4. Аналого-цифровое преобразование	18
1.5. Параметры и характеристики АЦП	23
2. Алгоритмические измерения сигналов	
во временной области	27
2.1. Аналитические методы оценки амплитуды, частоты и фазы сигнала по массиву мгновенных отсчетов	27
2.2. Оценка среднеквадратического значения сигнала методом интегрирования	30
2.3. Оценка параметров амплитудной модуляции	31
2.4. Многоуровневое интерполирование при оценке периода сигнала	33
2.5. Многоуровневое интерполирование при оценке фазового сдвига	37
2.6. Восстановление сигнала во временной области	40
3. Алгоритмические измерения и синтез испытательных сигналов	
в частотной области	50
3.1. Оценка параметров сигнала по его спектру	50
3.2. Оценка нелинейных искажений сигнала спектральным методом	52
3.3. Восстановление сигнала по его спектру	55
3.4. Оценка среднеквадратического значения сигнала в частотной области	56
3.5. Определение несущей частоты по спектру дискретизированного сигнала	59
3.6. Восстановление сигнала в частотной области	60
3.7. Использование оконных функций	65
3.8. Синтез сигналов	68

4. Экспериментальные исследования виртуальных приборов и поверочных комплексов	75
4.1. Универсальные частотомеры	75
4.2. Аналоговые вольтметры	88
4.3. Осциллографы	101
4.4. Селективные вольтметры	119
4.5. Измерители искажений	133
4.6. Фазометры	148
4.7. Синтезаторы сигналов специальной формы	160
4.8. Синтезаторы полигармонического сигнала	172
4.9. Анализаторы спектра	187
4.10. Цифровые и вычислительные вольтметры	202
5. Реализация комплексов виртуальных приборов	217
5.1. Комплекс виртуальных приборов широкого применения	217
5.2. Система мониторинга радиоканала	220
Список рекомендуемой литературы	231

Основные сокращения

АМ – амплитудная модуляция
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БПФ – быстрое преобразование Фурье
ВП – виртуальный прибор
ДПФ – дискретное преобразование Фурье
ИКТ – инфокоммуникационная техника
ИЧХ – импедансная частотная характеристика
КВП – комплекс виртуальных приборов
МДК – метод дискретизации по Котельникову
МИС – метод интерполяции сигнала
МНС – метод несинхронизированного стробирования
МСС – метод синхронизированного стробирования
ПО – программное обеспечение
ПК – персональный компьютер
РТС – радиотехническая система
СКЗ – среднеквадратическое значение
СКИМ – система контроля, испытаний и мониторинга
ФЧХ – фазочастотная характеристика
ХГВЗ – характеристика группового времени запаздывания
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь
ЦОС – цифровая обработка сигналов

Предисловие

Современное производство инфокоммуникационной техники (ИКТ) и радиоаппаратуры характеризуется частым перепрофилированием и обновлением выпускаемой продукции. В условиях жесткой конкуренции производитель вынужден регулярно осваивать выпуск новых видов изделий лучшего качества, что требует эквивалентного обновления технологического процесса, который должен быть максимально гибким и быстро адаптируемым к новым задачам. Таким образом, при высоких темпах развития для снижения общих затрат необходимо модернизировать не только продукцию, но и технологии испытаний, искать пути сокращения издержек на контроль качества, доля которых может достигать 50 % общих производственных расходов.

Качество радиотехнических систем (РТС) закладывается на стадии проектирования, обеспечивается в процессе изготовления и поддерживается на стадии эксплуатации. Для получения информации о качестве на всех стадиях жизненного цикла применяют технический контроль, испытания и мониторинг параметров РТС. Критерием оценки является степень соответствия экспериментально полученных значений параметров и показателей качества РТС требованиям нормативно-технической документации.

Техническим контролем называют проверку соответствия РТС установленным техническим требованиям с получением информации о состоянии изделия и выдачей суждения о соответствии или несоответствии фактических данных. По результатам контроля возможна автоматическая регулировка технологического процесса изготовления РТС или ее модулей и узлов.

Испытаниями принято называть экспериментальное определение количественных и качественных характеристик РТС в реальных или специальных условиях работы. Условия проведения испытаний характеризуются совокупностью воздействующих факторов и режимов функционирования РТС. По результатам испытаний принимают решение о состоянии годности РТС и ее дальнейшем использовании.

Мониторингом считают непрерывный контроль количественных и качественных характеристик РТС в реальных условиях эксплуатации. При этом оценивается состояние и возможность дальнейшего

использования РТС, а также собирается база данных, характеризующих статистические зависимости параметров от питания, внешних условий, времени года, продолжительности непрерывной работы и других факторов. Полученные результаты мониторинга могут использоваться для создания математических моделей, прогнозирования работоспособности и совершенствования РТС.

Роль контроля, испытаний и мониторинга параметров РТС с помощью специальных технических средств существенно возросла за последние годы, что объясняется значительным повышением требований к надежности и качеству продукции.

Технологический процесс предусматривает проведение тренировки радиотехнических систем (РТС) с проверкой функционирования и различные виды испытаний: сравнительные, определительные, контрольные, климатические, приемо-сдаточные, периодические, технологические, полигонные, стендовые и др. Определяющим фактором гибкости производства становится использование компьютерных автоматизированных систем контроля, испытаний и мониторинга (СКИМ) [1, 2, 3].

Испытаниям РТС и их компоненты подвергаются не только на стадии производства, но также на всех остальных стадиях жизненного цикла: в процессе исследований, проектирования и эксплуатации. На стадии проектирования выполняются исследовательские, доводочные, предварительные, приемочные и другие испытания. На этапе эксплуатации основными задачами является контроль работоспособности, диагностика, прогнозирование.

Направление алгоритмизации измерений развивается давно, но наибольший интерес к нему возник сравнительно недавно в связи с появлением быстродействующих ЦАП, АЦП и средств цифровой обработки (микропроцессоров, сигнальных процессоров и компьютеров). Значительный вклад в алгоритмизацию измерений внесли известные ученые П. А. Арутюнов, Б. Голд, Л. М. Гольденберг, И. Н. Желбаков, М. Я. Минц, А. И. Найденов, П. П. Орнатский, В. С. Попов, Л. Р. Рабинер, В. Н. Сретенский, А. П. Трифонов, Р. В. Шафер, Ю. С. Шинаков, В. П. Шувалов, Б. Уидроу, М. К. Чмых и др.

В пособии приведены вычислительные алгоритмы оценки параметров радиосигналов, эффективно функционирующие в реальном времени и обеспечивающие метрологические характеристики виртуальных приборов (ВП), достаточные для многих практических при-

ложений. Приведены описания десяти исследовательских работ, созданных в среде LabVIEW, для изучения принципов построения и работы, а также методик поверки вольтметров, частотомеров, осциллографов и измерителей искажения, фазометров, анализаторов спектра, синтезаторов форм и полигармонических сигналов.

Пособие предназначено для студентов и специалистов в области проектирования и обслуживания компьютерных контрольно-измерительных и испытательных систем различного назначения.

Каждая исследовательская работа в соответствии с предварительной подготовкой студентов предполагает трехуровневый план проведения экспериментальных исследований ВП:

Уровень 1-й – ознакомительный (удовлетворительный). Студенты колледжа и младших курсов бакалавриата знакомятся с номенклатурой радиоизмерительных приборов, их принципом действия, органами управления и метрологическими характеристиками; учатся выполнять прямые измерения параметров сигналов.

Уровень 2-й – пользовательский (хороший). Студенты бакалавриата изучают структурные схемы и работу приборов, методики выполнения радиоизмерений, а также учатся применять приборы для прямых и косвенных измерений параметров сигналов и устройств РТС и ИКТ при наличии и отсутствии шумов.

Уровень 3-й – профессиональный (отличный). Студенты изучают методики поверки радиоизмерительных приборов с определением их основных метрологических характеристик и выполняют учебную поверку с помощью образцовых приборов.

1. ВИРТУАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРИБОРЫ

1.1. Принципы построения виртуальных приборов

Технологичность контрольно-измерительной техники в значительной степени повысилась в связи с появлением и развитием нового класса интеллектуальных устройств – виртуальных приборов.

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 значительно 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.

Активно работающие в области испытаний зарубежные компании, такие как *Hewlett-Packard*, *National Instruments*, *Tektronix*, предлагают унифицированные комплексы аппаратно-программных средств для компоновки виртуальных СКИМ.

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) [1 – 5] 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 пре-

образователями и формировавателями, как показано на рис. 1.1, в виде плат расширения.

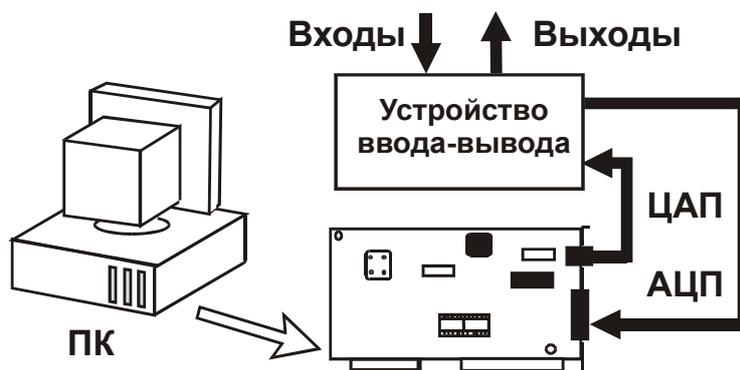


Рис. 1.1

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 габаритные размеры. 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 (платы расширения, вставляемые в свободные слоты ПК).
- Внешние модули приборов и устройств сбора данных (имеющие свой конструктив и соединенные с компьютером шиной).
- Удаленные модули ввода и вывода, соединенные с компьютером последовательной шиной (USB, RS-232 и др.).

- Территориально-распределенные 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 и т.д.), а также *многофункциональные платы ввода-вывода* (АЦП, ЦАП, цифровой ввод-вывод и т.д.).

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 используют шины LAN, USB, RS-232 или RS-422/485, делая их совместимыми с любым компьютером. Внешние модули переднего уровня обеспечивают сопряжение с первичными преобразователями и выполняют функции коммутации, усиления и фильтрации аналоговых сигналов, а в ряде случаев – аналого-цифровое преобразование.

Распределенный ввод-вывод требуется в промышленных приложениях, когда объект испытаний территориально занимает значительное пространство и расположен далеко от компьютера. Распределенное управление предполагает иерархическую схему построения с главным ПК, что позволяет принимать основные решения дистанционно, а частные – оперативно на месте. Это увеличивает надежность, так как распределенная система может функционировать даже тогда, когда главный ПК выключен.

1.2. 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:

1. Расширение функциональных возможностей приборов за счет реализации нескольких измерительных алгоритмов.

2. Повышение точности прямых, косвенных, совместных и совокупных измерений за счет выполнения вычислительных операций.

3. Обработка и представление данных в требуемом формате с получением информации о погрешностях и статистических характеристиках измеряемых величин: математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО).

4. Уменьшение габаритных размеров и потребляемой мощности многоканальных измерительных систем и комплексов за счет многофункциональности ВП.

5. Повышение надежности за счет уменьшения аналоговой части ВП, а также снижения количества паяных и разъемных соединений.

6. Сокращение продолжительности разработки и модернизации ВП за счет перепрограммирования устройства управления и вычисления.

7. Упрощенная интеграция ВП в состав измерительной системы или комплекса, содержащего ПК.

8. 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 др. 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 алгорит-

мы 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.

Приведем не претендующий на всеобъемлющий охват перечень областей эффективного применения ВП для оценки вычисляемых параметров сигналов, устройств и систем:

1. Исследования нестабильности и спектров узкополосных и широкополосных сигналов.

2. Исследование отношения сигнал/шум и чувствительности радиоприемных устройств, оценка коэффициента шума модулей.

3. Исследование импульсных и частотных характеристик каналов, устройств и модулей (АЧХ, ФЧХ, ХГВЗ, ИЧХ).

4. Исследование рабочего диапазона уровней и нелинейных искажений сигнала генератора, а также усилителя с оценкой его амплитудной характеристики.

5. Исследование нестабильности частоты и уровня сигнала генератора, а также нестабильности передаточной характеристики тракта.

6. Оценка параметров модуляции, нелинейных искажений огибающей, стабильности характеристик модуляторов и демодуляторов.

7. Импедансные и антенные измерения, оценка согласования входов и выходов устройств РТС.

8. Другие применения.

Цифровые методы обеспечивают минимальную погрешность обработки, высокую достоверность выходных результатов, значи-

тельную помехоустойчивость и функциональную гибкость программно-аппаратных средств.

Основные этапы цифровой обработки: 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.

1.3. 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. Программное обеспечение позволяет ПК выполнять роль системного контроллера с реализацией функций, предусмотренных в соответствующих стандартах.

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. Выпускаются недорогие платы, отличающиеся функциональными возможностями, скоростью оцифровки в десятки мегагерц, наличием специализированных микросхем для организации аналогового и цифрового ввода/вывода.

Для нормализации реальных сигналов служат отдельные согласующие модули или система согласующих модулей, обеспечивающих усиление, мультиплексирование, питание датчиков, переключение, развязку и фильтрацию сигналов. Современные платы АЦП и ЦАП

позволяют совместно с ПК реализовать широкий спектр многоканальных ВП, в том числе следующие:

- характериографы, вольтметры, осциллографы и анализаторы спектра в полосе частот свыше 100 МГц;
- генераторы стандартных сигналов, импульсов, качающейся частоты, шума, телевизионных сигналов в полосе свыше 100 МГц;
- прецизионные приборы для измерения и синтеза сигналов с точностью до 0,003 % в динамическом диапазоне не хуже 90 дБ;
- анализаторы потока цифровых данных, логические анализаторы на 64 канала и более с тактовой частотой свыше 1 ГГц.

Точностные и частотные характеристики приборов на сегодняшний день ограничиваются возможностями АЦП и способами цифровой обработки данных. Схема многоканального ВП приведена на рис. 1.2.

Применение методов цифровой обработки сигналов существенно снижает требования к аппаратной части, упрощает и удешевляет ее. С целью повышения достоверности и точности измерений могут использоваться алгоритмы косвенных измерений по формулам и процедурам, недоступным для автономных приборов, но легко реализуемых в ПК. Цифровые методы обеспечивают минимальную погрешность обработки, высокую достоверность выходных результатов, значительную помехоустойчивость и функциональную гибкость программно-аппаратных средств. Основные этапы цифровой обработки: аналого-цифровое преобразование; обработка и преобразование данных; оценка параметров сигналов и устройств.

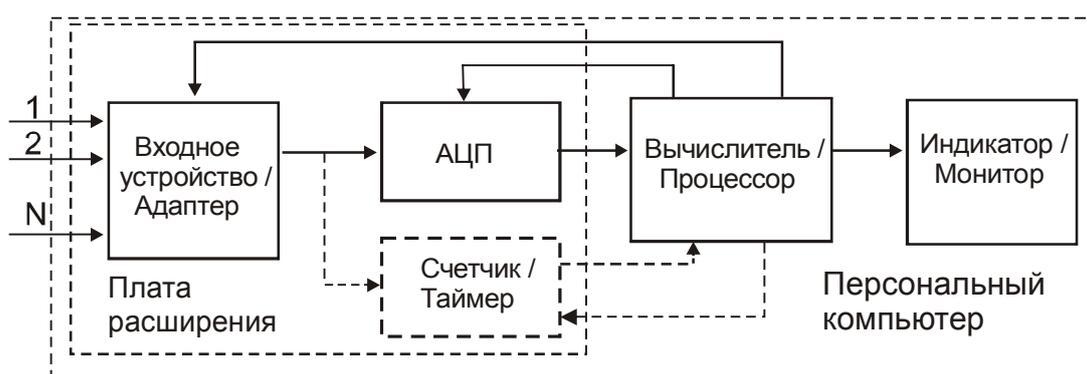


Рис. 1.2

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.

1.4. 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. 1.3. Под квантованием понимают преобразование непрерывной по значениям величины в величину с дискретной шкалой значений из конечного множества разрешенных, которые называют уровнями квантования.

Рациональное выполнение дискретизации и квантования исходных данных дает возможность снизить затраты на хранение и обработку информации. Кроме того, использование цифровых сигналов позволяет применять методы кодирования информации с возможностью последующего обнаружения и исправления ошибок при обращении информации, а цифровая форма сигналов облегчает унификацию операций преобразования информации на всех этапах ее обращения.

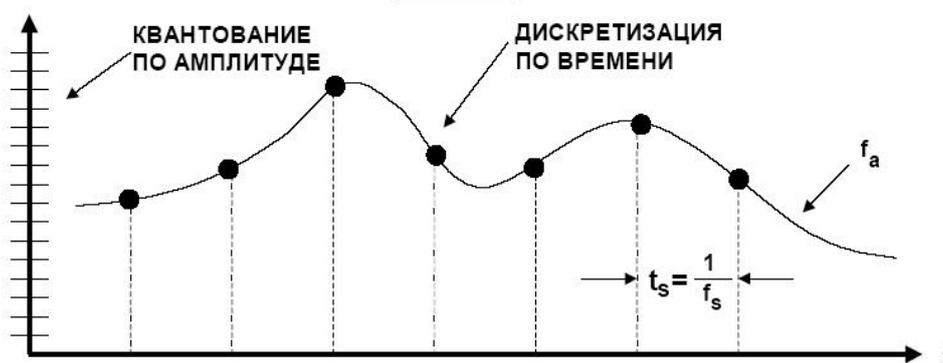


Рис. 1.3

Дискретизация называется равномерной с частотой $F=1/t_s$, если значение t_s постоянно по всему диапазону преобразования сигнала.

При неравномерной дискретизации значение $\Delta t = t_s$ между выборками может изменяться по определенной программе или в зависимости от изменения каких-либо параметров сигнала.

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).

Спектр дискретного сигнала представляет собой *непрерывную периодическую функцию* с периодом F , совпадающую (при конечности спектра непрерывного сигнала) с огибающей спектра непрерывного сигнала $s(t)$ в пределах центрального периода от $-f_N$ до f_N , где

$f_N = 1/2\Delta t = F/2$. Частоту f_N называют частотой Найквиста. Центральный период функции $S_F(f)$ называют главным частотным диапазоном.

Если спектр главного частотного диапазона с точностью до постоянного множителя совпадает со спектром непрерывного сигнала, то по этому спектру может быть восстановлена форма не только дискретного сигнала, но и исходного непрерывного сигнала.

Для того чтобы периодическое повторение спектра, вызванное дискретизацией аналогового сигнала, не изменяло спектр в главном частотном диапазоне (по отношению к спектру исходного аналогового сигнала), необходимо и достаточно, чтобы максимальные частотные составляющие f_{\max} в спектре аналогового сигнала не превышали частоты Найквиста ($f_{\max} \leq f_N = F/2$). Это означает, что частота дискретизации сигнала должна быть как минимум в два раза выше максимальной частотной составляющей в спектре сигнала: $F = 1/\Delta t \geq 2f_{\max}$.

На рис. 1.4 показаны возможные варианты соотношения различных частот гармонического сигнала с постоянной частотой дискретизации.

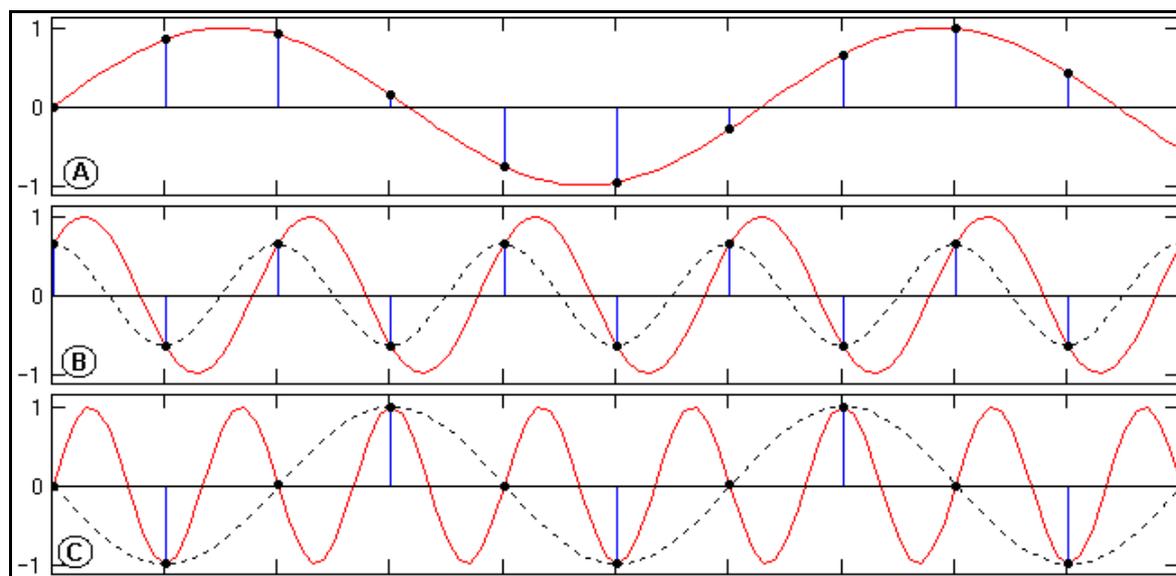


Рис. 1.4

1. График А – частота гармонического сигнала меньше частоты Найквиста. Дискретным отсчетам может соответствовать только исходная гармоника, амплитуда, частота и фаза которой могут быть однозначно определены по любым трем последовательным точкам (три уравнения, три неизвестных).

2. График В – частота гармонического сигнала равна частоте Найквиста. Это означает периодическое повторение каждой пары последовательных отсчетов, а следовательно, для решения имеются только два уравнения с тремя неизвестными с возможностью определения только частоты, и то при условии, что начальная фаза сигнала не совпадает с начальной фазой частоты дискретизации (в этом случае все отсчеты нулевые). Амплитуда и фаза сигнала определяются однозначно только при условии совпадения отсчетов с экстремумами гармоники.

3. График С – частота гармонического сигнала больше частоты Найквиста. Решение трех уравнений по трем последовательным точкам позволяет определить амплитуду гармоники, но дает искаженные значения частоты и фазы колебания (показано пунктиром). Это так называемый эффект *появления ложных (кажущихся) частот* (aliasing). Частоты гармонических колебаний выше частоты Найквиста как бы зеркально "отражаются" в главный частотный диапазон.

Дискретизируемые сигналы, как правило, содержат широкополосные шумы, высокочастотные составляющие которых неизбежно перекрываются при периодизации спектра, и увеличивают погрешность восстановления сигналов. Для исключения этого фактора перед проведением дискретизации должно быть обеспечено подавление всех частот выше частоты Найквиста, т.е. выполнена низкочастотная фильтрация сигнала. Если последнее не проведено, то при дискретизации целесообразно в 2 – 4 раза уменьшить интервал дискретизации относительно оптимального и первой операцией обработки данных, выполнить низкочастотную цифровую фильтрацию, после чего можно провести децимацию данных.

Децимацией (прореживанием, сокращением) цифровых данных принято называть уплотнение данных с удалением избыточной информации. Последнее имеет место, если шаг дискретизации данных был установлен излишне подробным. Децимация может потребоваться и в том случае, если массивы данных представлены с разным шагом дискретизации.

Децимация может проводиться с использованием интерполяционного ряда Котельникова – Шеннона (равно как и любого другого интерполяционного многочлена) или преобразования Фурье. Последнее выполняется путем перевода сигнала в частотную форму и воз-

вращением в координатную форму с новым шагом $\Delta t' = p\Delta t$, при этом низкочастотная фильтрация может производиться непосредственно в частотном диапазоне.

Интерполяция данных отличается от децимации только значением коэффициента $p < 1$ с соответствующим увеличением частоты Найквиста и не требует низкочастотной фильтрации.

Для децимации и интерполяции данных разработаны также специальные высокоскоростные методы и алгоритмы (цифровые фильтры) – экспандеры и компрессоры.

Аналого-цифровое преобразование является обязательной процедурой при практической реализации разнообразных методов ЦОС. АЦП на аппаратном уровне могут быть дополнены:

- усилителем сигнала с программируемым коэффициентом передачи для более полного использования динамического диапазона АЦП;
- фильтром нижних частот с программируемой граничной частотой для ограничения спектра сигнала перед его дискретизацией;
- схемой гальванической развязки по входу или выходу.

Процедуру аналого-цифрового преобразования можно разделить на операции: дискретизация – преобразование функции времени в непрерывную последовательность и квантование – преобразование непрерывной последовательности в дискретную. Главной формой дискретизации является равномерная, в основе которой лежит теорема Котельникова или теорема отсчетов. Поскольку спектры реальных сигналов стремятся к нулю лишь асимптотически, то применение равномерной дискретизации приводит в системах обработки информации к возникновению искажений, для уменьшения которых необходимо либо увеличивать частоту дискретизации, либо использовать перед АЦП дополнительный фильтр нижних частот, ограничивающий спектр исходного сигнала.

В общем случае выбор частоты дискретизации будет зависеть от вида функции сигнала и допустимого уровня погрешностей, возникающих при восстановлении исходного сигнала по его отсчетам. Для узкополосных сигналов дискретизацию можно выполнять с помощью самих АЦП и совмещать с операцией квантования. Основной проблемой при этом является то, что за счет конечного времени преобразования и неопределенности момента его окончания, зависящего в об-

щем случае от параметров сигнала, не удастся получить однозначного соответствия между значениями отсчетов и моментами времени, к которым их следует отнести. В результате при работе с изменяющимися во времени сигналами возникают динамические погрешности.

Эффект неопределенности проявляется либо как погрешность мгновенного значения сигнала при заданных моментах измерения, либо как погрешность момента времени, в который производится измерение при заданном мгновенном значении сигнала. При равномерной дискретизации следствием является возникновение амплитудных погрешностей, которые численно равны приращению сигнала в течение интервала времени неопределенности. Если использовать другую интерпретацию эффекта неопределенности, то ее наличие приводит к смещению истинных моментов времени, в которые берутся отсчеты сигнала, по отношению к равноотстоящим на оси времени моментам. В результате вместо равномерной дискретизации со строго постоянным периодом осуществляется дискретизация с флюктуирующим периодом повторения, что приводит к нарушению условий теоремы отсчетов и появлению дополнительных погрешностей, называемых апертурными.

Обычно для оценки апертурных погрешностей используют синусоидальный испытательный сигнал $U(t) = U_m \sin \omega t$, для которого максимальное относительное значение $\Delta U_a / U_m = \omega t_a$. Если принять, что для N -разрядного АЦП с разрешением 2^{-N} апертурная погрешность не должна превышать шага квантования, то между частотой сигнала ω , апертурным временем t_a и относительной апертурной погрешностью имеет место соотношение $1/2^N = \omega t_a$.

Например, для дискретизации синусоидального сигнала 100 кГц с допустимой погрешностью 1 % время преобразования АЦП должно быть равно 25 нс, частота дискретизации – 40 МГц. Однако по теореме отсчетов с помощью такого АЦП принципиально можно дискретизировать сигналы, имеющие ширину спектра порядка 20 МГц, т.е. ресурс АЦП при этом не используется в полной мере.

1.5. Параметры и характеристики АЦП

При оценке характеристик АЦП пользуются следующими регламентируемыми параметрами: число разрядов АЦП; время установления; время преобразования или частота дискретизации; ФЧХ и

АЧХ; нелинейность; диапазон входных напряжений; коэффициент усиления программируемого усилителя и др. Возникновение динамических погрешностей связано с дискретизацией сигналов, изменяющихся во времени. Можно выделить следующие параметры АЦП, определяющие его динамическую точность.

Максимальная частота дискретизации (преобразования) – это наибольшая частота, с которой происходит образование выборочных значений сигнала при условии, что выбранный параметр АЦП не выходит за заданные пределы. Измеряется числом выборок в секунду.

Время преобразования (t_{np}) – это время, отсчитываемое от начала импульса дискретизации или начала преобразования до появления на выходе устойчивого кода, соответствующего данной выборке. Для одних АЦП, например, последовательного счета или многотактного интегрирования, эта величина является переменной, зависящей от значения входного сигнала, для других, таких как параллельные или последовательно-параллельные АЦП, а также АЦП последовательного приближения, – примерно постоянной.

Время выборки (стробирования) – время, в течение которого происходит образование одного выборочного значения. При работе без устройства выборки и хранения равно времени преобразования АЦП.

Дифференциальная нелинейность ($\delta_{диф}$) – это отклонение разности двух аналоговых сигналов, соответствующих последовательной смене кодов. При монотонном увеличении сигнала на выходе АЦП может возникать код, который соответствует одному и тому же входному сигналу, в то время как сам входной сигнал изменился более одного шага квантования.

Число эффективных разрядов в зависимости от частоты входного гармонического сигнала – это комплексный динамический параметр.

В настоящее время известно большое число методов преобразования напряжение-код. Эти методы существенно различаются потенциальной точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации. В основу классификации АЦП положен признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. Преобразования могут осуществляться с помощью последовательной, параллельной или последовательно-параллельной процедур приближения к преобразуемой величине.

Особенности параллельных АЦП

АЦП этого типа осуществляют квантование сигнала одновременно с помощью набора компараторов, включенных параллельно источнику входного сигнала. Благодаря одновременной работе компараторов параллельный АЦП является самым быстрым. Например, восьмиразрядный преобразователь типа МАХ104 позволяет получить 10^9 отсчетов в секунду при времени задержки прохождения сигнала не более 1,2 нс. Недостатком является высокая сложность, поскольку N -разрядный параллельный АЦП содержит 2^{N-1} компараторов. Результаты преобразования записываются в запоминающее устройство выборки-хранения (УВХ). Некоторые интегральные микросхемы параллельных АЦП, например МАХ100, снабжаются сверхскоростными УВХ, имеющими время выборки порядка 0,1 нс. В некоторых АЦП (например, МАХ1151) при параллельном преобразовании используется двухтактный цикл: сначала состояния выходов компараторов фиксируются, а затем в него записывают выходное слово АЦП.

В настоящее время построены АЦП параллельного счета, работающие на частоте дискретизации до 2 ГГц. В них сигнал преобразуется в цифровую форму за один такт, так как все компараторы запускаются одновременно. Однако параллельная архитектура имеет ряд недостатков: схемотехническую сложность из-за большого числа входных компараторов и необходимость обеспечения точной синхронизации различных узлов АЦП; высокое энергопотребление. Высокоскоростные АЦП параллельного счета могут иметь несколько схем дискретизации, которые работают с чередованием во времени.

Вопросы выбора АЦП

Возможности компьютерной СКИМ во многом определяются техническими характеристиками АЦП, однако правильный выбор типа и модели АЦП должен осуществляться не только на основании технических характеристик. Очень важными становятся гибкость и доступность прикладного программного обеспечения, так как оно гарантирует возможность включения новых процедур обработки сигналов в процессе эксплуатации комплекса.

Ведущие мировые производители АЦП, такие как фирмы *Hewlett Packard*, *Analog Devices*, *Texas Instruments* и *Advantech*, поставляют на рынок самые разнообразные модели, способные удовлетворить всем предъявленным требованиям пользователя. Модули

АЦП этих фирм, специально предназначенные для преобразования быстро изменяющихся сигналов, имеют низкий уровень искажений, разрешение до 24 разрядов и время преобразования менее 2 нс.

В некоторых случаях оправданной альтернативой использованию специализированных модулей АЦП может стать применение серийных звуковых карт. Они обеспечивают возможность оцифровки входных аналоговых сигналов в 16-разрядном формате. Частота дискретизации входного сигнала достигает 192 кГц.

Характеристики плат АЦП следующие:

- отношение сигнал/шум выше 90 дБ;
- коэффициент гармонических искажений до 98 дБ;
- реальный динамический диапазон до 96 дБ;
- задающий кварцевый генератор и встроенные таймеры;
- запуск программный от внешнего генератора частоты дискретизации или от внутреннего кварцевого генератора;
- синхронизация от одного из аналоговых каналов или от внешнего источника сигнала по фронту или уровню;
- обмен данными с ПК по прерываниям, по ПДП и программный;
- базовое программное обеспечение включает утилиты сбора и отображения аналогового сигнала, драйверы для Windows, Linux;
- примеры программирования для широко распространенных пакетов (LabView NI, MS VC++, Borland Delphi...);
- дополнительный сигнальный процессор;
- дополнительное ПО: цифровые фильтры; преобразования Фурье и Гильберта; непрерывный сбор данных и др.

В настоящее время появились сверхбыстродействующие АЦП для преобразования радио- и видеосигналов, которые с успехом могут использоваться в СКИМ. Уже сегодня перспективные АЦП фирм *Analog Devices* и *Hewlett Packard*, использующие режим стробирования, могут оцифровывать периодические сигналы в полосе до нескольких гигагерц.

Для расширения диапазона рабочих частот в задачах алгоритмической оценки параметров радиосистем могут быть применены различные методы преобразования сигнала, в том числе методы стробоскопического преобразования или трансформации спектра, приводящие к изменению масштаба времени.

2. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

2.1. Аналитические методы оценки амплитуды, частоты и фазы сигнала по массиву мгновенных отсчетов

Для решения широкого класса задач испытаний и мониторинга необходимо получать оценки мгновенных значений амплитуды, частоты и фазы сигнала. К таким задачам относятся поиск и обнаружение сигналов, оценка отношения сигнал/шум, определение текущего состояния канала связи, анализ вида и параметров модуляции сигнала и т. д.

Радиосигнал представляет собой модулированное гармоническое колебание с переменной фазой и амплитудой. Такое определение радиосигнала является общим и может быть использовано при описании практически любого вида модуляции. Математически в каждый конкретный момент времени сигнал можно представить в следующем виде:

$$u(iT_\delta) = A(iT_\delta) \cos[\theta(iT_\delta)], \quad (2.1)$$

где $u(iT_\delta)$, $A(iT_\delta)$, $\theta(iT_\delta)$ – сигнал, его амплитуда и фаза в моменты времени iT_δ ; T_δ – период дискретизации; $i = 1, \dots, N$ – номер отсчета.

Процесс изменения амплитуды сигнала во времени принято определять через понятие «огибающая». Математически огибающая сигнала представляет собой функцию, позволяющую описывать сигнал в виде (2.1) так, что в те моменты времени, когда она совпадает с сигналом, они имеют равные производные.

Величину, равную производной мгновенной фазы по времени, называют мгновенной частотой сигнала. В дискретном виде мгновенная частота

$$f(iT_\delta) = \frac{\theta(iT_\delta) - \theta(iT_\delta - T_\delta)}{2\pi T_\delta}.$$

Закон изменения фазы любого сигнала в общем случае может быть представлен в виде суммы трех компонентов:

$$\theta(iT_\delta) = 2\pi f_0 + 2\pi f(iT_\delta) + \theta_0(iT_\delta),$$

где f_0 – центральная частота сигнала, параметры $f(iT_\delta)$ и $\theta_0(iT_\delta)$ отражают законы изменения мгновенной частоты и мгновенной начальной фазы сигнала в зависимости от применяемого вида модуляции.

Из выражения (2.1) следует, что в общем случае по одной только функции $u(iT_\delta)$ без наличия каких-либо дополнительных условий невозможно определить две неизвестные функции $A(iT_\delta)$ и $\theta(iT_\delta)$. Однако в частных задачах имеются ограничения на поведение функций огибающей и фазы сигнала. Например, при АМ спектр сигнала имеет симметричную форму и центральная частота сигнала равна средней частоте спектра. Похожая ситуация имеет место для узкополосных сигналов, у которых ширина спектра значительно уже значения его средней частоты, которая может быть принята в качестве центральной частоты сигнала.

Известно, что в случае обработки гармонического сигнала, в предположении, что на интервале $\{iT_\delta - T_\delta, iT_\delta + T_\delta\}$ сигнал является синусоидальным с неизменными параметрами, мгновенные значения $A(iT_\delta)$ и $f(iT_\delta)$ могут быть найдены путем измерения значений сигнала в точках $iT_\delta - T_\delta, iT_\delta, iT_\delta + T_\delta$ и решения системы тригонометрических уравнений:

$$f(iT_\delta) = \frac{1}{2\pi T_\delta} \arccos \left(\frac{u(iT_\delta - T_\delta) + u(iT_\delta + T_\delta)}{2u(iT_\delta)} \right),$$

$$A(iT_\delta) = \sqrt{\frac{u^2(iT_\delta) - u(iT_\delta - T_\delta)u(iT_\delta + T_\delta)}{1 - \{[u(iT_\delta - T_\delta) + u(iT_\delta + T_\delta)]/2u(iT_\delta)\}^2}}.$$

Пусть анализируемый сигнал является узкополосным с известной центральной частотой f_0 . Например, такой сигнал будет на выходе усилителя промежуточной частоты радиоприемного устройства. В предположении, что значения его мгновенной амплитуды в трех соседних точках приблизительно равны, после ряда тригонометрических преобразований можно получить следующее выражение для вычисления мгновенной амплитуды

$$A(iT_\delta) = \frac{1}{2\pi f_0 T_\delta} \sqrt{u^2(iT_\delta) - u(iT_\delta - T_\delta)u(iT_\delta + T_\delta)}.$$

Очевидно, что приведенные выражения для получения оценок мгновенной частоты и амплитуды могут быть использованы при достаточно высоком соотношении сигнал/шум. В противном случае будет нарушена корректность их вывода, полученного на допущении постоянства оцениваемых параметров в соседних точках гармонического сигнала.

Известны методы оценки разности фаз, основанные на измерениях мгновенных значений сигналов в определенные моменты времени с последующим расчетом фазового сдвига. Например, можно определить разность фаз двух исследуемых сигналов путем деления мгновенных значений одного из них на мгновенные значения другого с получением величин частного $A(t)$. Для этого в выбранном интервале сигнала-делителя измеряют два мгновенных значения в моменты времени t_1 и t_2 , равноотстоящие от середины выбранной полуволны, и определяют сдвиг фаз по формуле

$$\varphi_0 = \pi n + \arctg \left(\frac{A(t_1) - A(t_2)}{A(t_1) + A(t_2)} \right),$$

где значение n принимается равным -1 , 0 или $+1$ в зависимости от полученных величин $A(t_1)$ и $A(t_2)$.

Во многих случаях неудовлетворительная точность измерений фазового сдвига сигналов обусловлена имеющимися нелинейными искажениями. Для данного способа допускаются искажения одного из сигналов в области его экстремальных значений. Нелинейные искажения второго сигнала, а также нелинейные искажения вне области экстремальных значений, наличие постоянной составляющей, а также паразитная амплитудная модуляция будут вносить дополнительные погрешности измерений.

Для достижения погрешности не более $0,01^\circ$ требуется обеспечить отношение интервала дискретизации к четверти периода сигнала не менее $1/6000$. При этом допустимая погрешность нахождения мгновенных отсчетов сигнала – частного $A(t_1)$, $A(t_2)$ не более $0,03\%$. Недостатком способа являются очень высокие требования к частоте дискретизации и точности определения мгновенных значений сигналов. Например, для обеспечения погрешности до $0,01^\circ$ необходимо, чтобы отношение частоты дискретизации к частоте сигнала $f_0 / f > 24000$, т.е. на одном периоде должно быть не менее 24000 точек дискретизации. А для того чтобы обеспечить заданную погрешность нахождения значений сигнала – частного $0,03\%$, необходимо определять мгновенные значения сигналов с погрешностью не хуже $0,03\% / \sqrt{2} \approx 0,02\%$.

Для уменьшения случайных погрешностей, в частности погрешности квантования, применяют статистическое усреднение результатов многократных измерений. Во всех случаях для обеспечения высокой разрешающей способности необходима высокая частота дискретизации.

2.2. Оценка среднеквадратического значения сигнала методом интегрирования

Среднеквадратическое значение (СКЗ) сигнала – фундаментальная физическая характеристика процесса. Среди средств оценки уровня любого сигнала особое внимание уделяется средствам измерений его СКЗ. Это обусловлено тем, что единственной истинной мерой мощности электрического сигнала является его СКЗ независимо от того, какого он вида: постоянный, синусоидальный, переменный с постоянным смещением, случайный или представляет собой последовательность импульсов.

Необходимость прямого измерения СКЗ приобретает особую важность в связи с распространением сигналов несинусоидальной формы (прямоугольных, треугольных, шумоподобных и т. д.). При определении количества и качества электроэнергии, измерениях мощности, проверке систем связи, контроле уровня шума в звуковом диапазоне частот и измерениях в цифровых системах полезную информацию о сигнале может дать только его СКЗ. На основе измерительных преобразователей СКЗ напряжений строят вольтметры, ваттметры поглощаемой мощности, анализаторы спектра, измерители нелинейных искажений, корреляционные измерительные устройства.

Усредняющие устройства на основе цифрового интегрирования представляют собой один из наиболее распространенных вариантов цифровых фильтров, реализующих приближенное численное интегрирование непрерывной функции.

По определению среднеквадратическое значение (СКЗ) сигнала $u(t)$ с периодом T_c может быть представлено в виде следующего выражения:

$$U_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} u^2(t) dt}. \quad (2.2)$$

При дискретизации периодического сигнала с применением АЦП получают массив отсчетов с постоянным шагом оцифровки.

В общем случае постоянный шаг оцифровки не является целой частью периода входного сигнала. Если в (2.2) заменить интеграл на сумму и вычислять ее приближенно по формуле прямоугольников, то для периода дискретизации T_0 получим выражение

$$U_{СКЗ} \approx \sqrt{\frac{1}{T_c} \sum_{i=1}^N u_i^2 \cdot T_\delta} . \quad (2.3)$$

В дискретном виде формула (2.2) вычисления СКЗ может быть записана

$$U_{СКЗ} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2} , \quad (2.4)$$

где $N = T_c/T_\delta$ – количество точек, дискретизированных на одном периоде сигнала.

В практических задачах, когда частоту дискретизации нельзя изменить так, чтобы выполнялось условие $NT_\delta = T_c$, вычисление СКЗ по формуле (2.4) приведет к возрастанию погрешности. Например, при $T_\delta = 1$ мкс и $T_c = 402,51$ мкс получим $T_c/T_\delta = 402,5$. Для уменьшения погрешности можно модифицировать формулу (2.3) так, чтобы сумма находилась точно на одном периоде сигнала. Для этого последний интервал суммирования приводится в строгое соответствие с известным периодом сигнала путем определения его по формуле $\Delta t_N = T_c - NT_\delta$.

Если считать, что $N = \text{ent}(T_c/T_\delta)$ – целое число, полученное путем отбрасывания дробной части, тогда нецелый интервал суммирования Δt_N находится в диапазоне от 0 до T_δ и значение СКЗ будет вычисляться по формуле

$$U_{СКЗ} \approx \sqrt{\frac{1}{T_c} \left[\sum_{i=1}^{N-1} u_i^2 \cdot T_\delta + u_N^2 (T_c - NT_\delta) \right]} . \quad (2.5)$$

Величина погрешности нахождения СКЗ по формуле (2.5) на два порядка меньше погрешности оценки СКЗ по формуле (2.4).

2.3. Оценка параметров амплитудной модуляции

Амплитудно-модулированный сигнал может быть представлен в соответствии с выражением

$$A(t) = A_{НЧ}(t) \cos(\omega_{ВЧ} t + \theta),$$

где $\omega_{ВЧ}$ – несущая частота; θ – начальная фаза; $A_{НЧ}(t)$ – модулирующий низкочастотный сигнал.

Для оценки параметров модуляции можно использовать вычислительный метод с решением системы уравнений. Так как максимальная частота низкочастотного сигнала $F_{\text{MAX}} \ll f_{\text{BЧ}}$, то изменением огибающей на участке времени соседних стробирующих отсчетов $(t_2 - t_1) \ll 1/F_{\text{MAX}}$ можно пренебречь. При таком допущении для нахождения $A_{\text{HЧ}}(t)$ можно решить систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} A_{\text{HЧ}}(t) \cos(\omega_{\text{BЧ}} t_1 + \theta) = A(t_1), \\ A_{\text{HЧ}}(t) \cos(\omega_{\text{BЧ}} t_2 + \theta) = A(t_2). \end{cases}$$

Выразим значения начальной фазы и огибающей из этих уравнений:

$$\theta = -\omega_{\text{BЧ}} t_1 - \arctg \frac{A(t_1) \cos(\omega_{\text{BЧ}} t_1 - \omega_{\text{BЧ}} t_2) - A(t_2)}{A(t_1) \cos(\omega_{\text{BЧ}} t_1 - \omega_{\text{BЧ}} t_2)}, \quad (2.6)$$

$$A_{\text{HЧ}}(t) = \frac{A(t_1) \cos(\omega_{\text{BЧ}} t_2 + \theta)}{\cos(\omega_{\text{BЧ}} t_1 + \theta)}. \quad (2.7)$$

Таким образом, если дискретизировать сигнал $A(t)$ с частотой дискретизации $f_{\delta} \gg F_{\text{MAX}}$ и некратной несущей частоте, то, используя формулы (2.6) и (2.7), можно находить значение $A_{\text{HЧ}}(t)$ для каждой двух точек дискретизированного сигнала. Далее можно найти максимальное A_{MAX} и минимальное A_{MIN} значения $A_{\text{HЧ}}(t)$ за интервал времени больше периода модулирующего сигнала и оценить глубину модуляции по формуле

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

Допустим, что $f_{\text{HЧMAX}} = 10$ кГц, тогда при $(t_2 - t_1) = 0,2$ мкс максимальная абсолютная погрешность нахождения $A_{\text{HЧ}}(t)$ будет в области наибольшей крутизны гармонического сигнала и может быть представлена в виде выражения

$$\Delta_A = A_{\text{HЧ}} \sin[2\pi f_{\text{HЧMAX}}(t_2 - t_1)] \approx 0,0126 A_{\text{HЧ}},$$

где $A_{\text{HЧ}}$ – амплитуда модулирующего сигнала. Погрешность нахождения максимума и минимума функции $A_{\text{HЧ}}(t)$ в области экстремумов гармонического сигнала может быть представлена в виде выражения

$$\Delta_{\vartheta} = A_{HЧ} \left\{ \cos [2\pi f_{HЧ\text{MAX}}(t_2 - t_1)] - 1 \right\} \approx 7,9 \cdot 10^{-5} A_{HЧ}.$$

Тогда погрешность вычисления глубины модуляции не будет превосходить величины $\delta_M = 2\delta_{\vartheta}$. Полная методическая погрешность оценки глубины модуляции для принятых условий в диапазоне значений 10 – 90 % будет не более 0,05 %, что можно считать более чем достаточным. Таким образом, метод стробирования может с успехом применяться в задачах оценки глубины АМ радиосигналов.

2.4. Многоуровневое интерполирование при оценке периода сигнала

Рассмотрим задачу измерения частоты на основе обработки в персональном компьютере массива дискретных отсчетов мгновенных значений периодического сигнала, получаемых с помощью ПК и быстродействующего АЦП, как это показано на рис. 2.1.

Будем считать, что АЦП имеет встроенный кварцевый генератор частоты, задающий временной интервал считывания данных T_{δ} , нестабильность которого соизмерима с параметрами встроенной меры автономного электронно-счетного частотомера (ЭСЧ), т.е. порядка $10^{-6} - 10^{-8}$. Получение мгновенных отсчетов периодического сигнала при одноуровневой интерполяции представлено на рис. 2.2.



Рис. 2.1

Когда интервал дискретизации значительно меньше периода сигнала ($T_{\delta} \ll T_c$), можно выбрать достаточно большое время измерения kT_c и определить неизвестную частоту методом дискретного счета: $f_c = 1/T_c \approx (N+1/2)/(T_{\delta}k)$. При этом целое число периодов сигнала k может быть найдено алгоритмически с учетом выбранного уровня измерения путем подсчета периодов сигнала в интервале kT_c , а максимальная относительная методическая погрешность квантования по модулю будет достигать значения $T_{\delta}/(2kT_c)$. Например, для $kT_c = 1$ с и $T_{\delta} = 10$ мкс получим погрешность на уровне 10^{-5} , что не удовлетво-

ряет многим измерительным задачам. Значение $T_\delta=10$ мкс было взято как наиболее часто используемый период дискретизации в недорогих АЦП ($f_\delta = 100$ кГц). В условиях наложения внешних помех и влияния собственных шумов АЦП результирующая погрешность может дополнительно увеличиться.

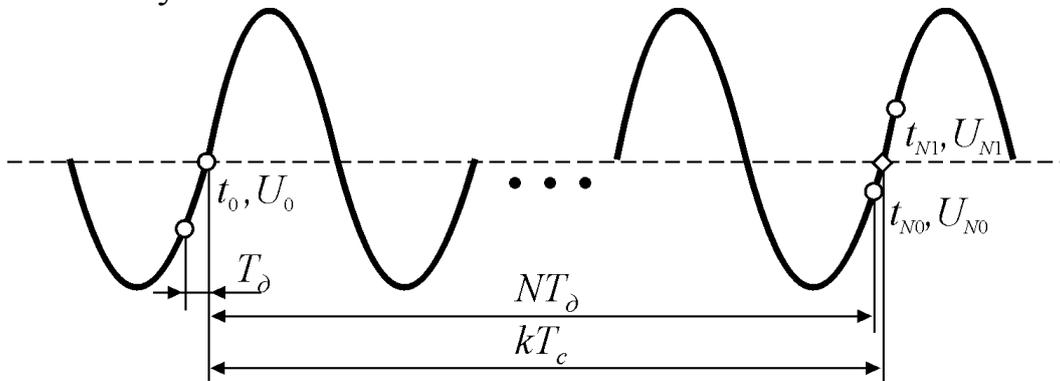


Рис. 2.2

Если вместо обычного счетчика использовать АЦП, можно в процессе обработки данных учесть информацию о мгновенных значениях сигнала в каждой точке и за счет этого повысить помехозащищенность, быстродействие и точность измерений. Для этого, во-первых, используется интерполяция, например линейная, между ближайшими отсчетами; во-вторых, усредняются результаты по совокупности измерений частоты, выполненных на нескольких уровнях начального и конечного монотонных интервалов, признанных пригодными для вычислений. Для линейной интерполяции между точками (t_{N0}, U_{N0}) и (t_{N1}, U_{N1}) интервал времени kT_c , равный целому числу k периодов сигнала T_c , можно вычислить по формуле

$$kT_c = NT_\delta + T_\delta \frac{U_0 - U_{N0}}{U_{N1} - U_{N0}}, \quad (2.8)$$

где $N = \text{ent}(kT_\delta/T_c)$ – целое число отсчетов (остаток отбрасывается) мгновенных значений сигнала, укладываемых в интервале времени kT_δ ; U_0 – мгновенное значение из массива дискретных данных, полученных на начальном участке изменения сигнала, удовлетворяющего требованиям монотонности; U_{N0} и U_{N1} – ближайšie к U_0 снизу и сверху мгновенные значения соответственно, выбранные из массива дискретных данных, полученных на конечном монотонном участке сигнала.

Формула (2.8) может быть использована для измерения частоты ($f_c=1/T_c$) с помощью ПК в том случае, если в процессе получения мгновенных значений не было заметного влияния помех и шумов АЦП. Когда помехами и шумами пренебречь нельзя, следует провести измерение частоты на нескольких уровнях, как показано на рис. 2.3, и затем усреднить результаты. Предварительную обработку массива данных следует осуществлять для поиска монотонных участков изменения периодического сигнала на передних и задних его «фронтах». В простейшем случае можно сравнивать пошаговое приращение или убывание отсчетов мгновенных значений.

Среднее значение для q уровней измерения и усреднения можно найти по формуле

$$\overline{kT} = NT_\delta + \frac{T_\delta}{q} \sum_m \frac{U_m - U_{Nm}}{U_{Nm+1} - U_{Nm}}.$$

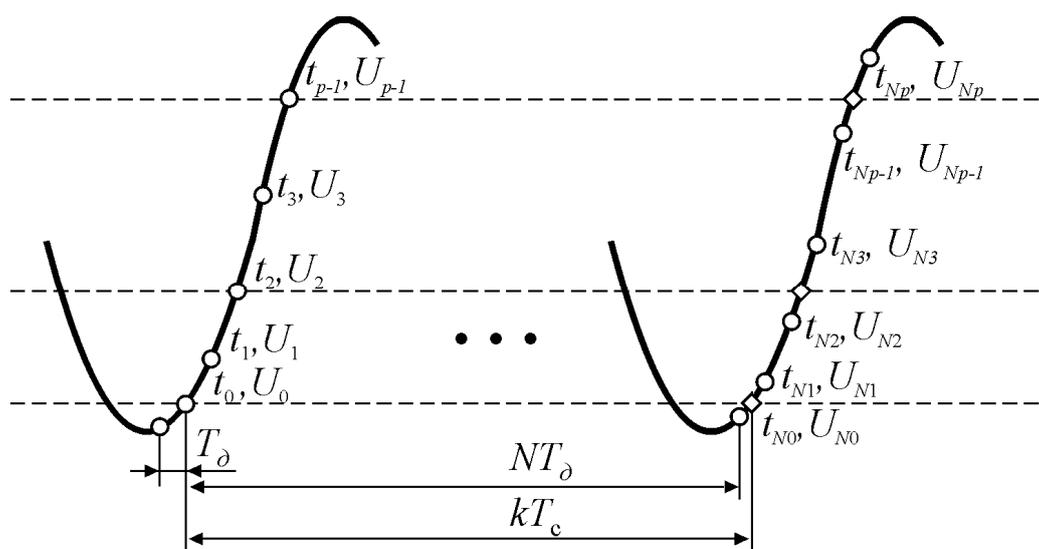


Рис. 2.3

Усреднять результаты измерения частоты на нескольких уровнях можно с использованием всей совокупности данных или по совокупности только независимых отсчетов, когда каждое значение используется в вычислениях только один раз. В последнем случае на начальном участке сигнала надо взять отсчеты через один, а на конечном – все. Возьмем для усреднения q уровней интерполяции в

точках, соответствующих моментам времени t_0, t_2, \dots, t_{p-1} . Текущее значение $m = 0, 2, 4 - 2(q - 1)$. При этом $p = 2q$ и среднее значение периода сигнала будет вычисляться по формуле

$$\bar{T} = \frac{NT_\partial}{k} + \frac{T_\partial}{kq} \sum_m \frac{U_m - U_{Nm}}{U_{Nm+1} - U_{Nm}}.$$

Погрешность измерения периода зависит от погрешностей мгновенных значений, обусловленных шумами и помехами.

Примем, что среднеквадратические отклонения оценки мгновенных значений всех отсчетов, обусловленные помехами и шумами АЦП, одинаковые и равны:

$$\sigma_U = \sqrt{\sigma_{\text{битн}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2},$$

где $\sigma_{\text{битн}}$ – составляющая, обусловленная конечной битностью АЦП; $\sigma_{\text{ш}}$ – составляющая, обусловленная внешними и внутренними шумами АЦП.

Тогда формула для абсолютного значения СКО оценки периода сигнала будет иметь вид

$$\sigma_T = \sigma_U \frac{T_\partial}{kq} \left(\sqrt{\sum_m \left(\frac{1}{\Delta U_{Nm}^2} + \left(\frac{\Delta U_m}{\Delta U_{Nm}^2} - \frac{1}{\Delta U_{Nm}} \right)^2 + \frac{\Delta U_m^2}{\Delta U_{Nm}^4} \right)} \right).$$

Относительную величину СКО можно представить в виде выражения

$$\sigma \approx \frac{\sigma_U \frac{1}{\sqrt{q}} \left(\sqrt{2(\Delta U_{Nm}^2 - \Delta U_m \Delta U_{Nm} + \Delta U_m^2)} \right)}{\Delta U_{Nm} (N\Delta U_{Nm} + \Delta U_m)}.$$

Результаты анализа и моделирования позволяют сделать вывод о целесообразности применения метода многоуровневого интерполирования и усреднения результатов в задачах оценки частоты при наличии внешних и внутренних шумов квантования. При этом могут решаться задачи повышения быстродействия, подавления шумов и повышения точности оценки частоты периодического сигнала.

2.5. Многоуровневое интерполирование при оценке фазового сдвига

Рассмотренный в предыдущем пункте метод многоуровневого интерполирования можно с некоторой доработкой применить для оценки фазового или временного сдвига двух сигналов, один из которых опорный, а другой измерительный. Рассмотрим задачу оценки фазового сдвига путем обработки в персональном компьютере массивов дискретных отсчетов мгновенных значений опорного и исследуемого сигналов. Для этого нужен двухканальный АЦП, информация с выходов которого поступает в ПК, как показано на рис. 2.4. Получение массива мгновенных отсчетов на выходе АЦП при одноуровневой и многоуровневой интерполяции для периодического сигнала представлено на рис. 2.5.

Как правило, АЦП имеет встроенный кварцевый генератор частоты, задающий временной интервал считывания данных T_δ . Будем считать, что его нестабильность порядка $10^{-6} - 10^{-8}$.



Рис. 2.4

Для нахождения временного или фазового сдвига методом многоуровневого аналого-цифрового преобразования и интерполирования необходимо провести нормировку полученных данных, при которой каждый отсчет делится на среднеквадратическое значение (СКЗ) сигнала соответствующего канала. После выполнения процедуры нормировки всех значений в обоих каналах временная задержка между двумя идентичными по форме сигналами может определяться на любом уровне.

На рис. 2.5, а показан принцип определения временного сдвига τ_0 между двумя идентичными по форме сигналами. При использовании линейной интерполяции (рис. 2.5, б) между точками U_{20} (момент времени t_{20}) и U_{21} (момент времени t_{21}) задержку τ_0 можно вычислить по формуле

$$\tau_0 = DT_\delta + T_\delta \frac{U_{10} - U_{20}}{U_{21} - U_{20}},$$

где $D = \text{ent}(\tau_0 / T_\delta)$ – целое число отсчетов (остаток отбрасывается) сигнала, укладываемых в интервале времени τ_0 ; U_{10} – минимальное мгновенное значение из массива дискретных данных, полученных на начальном участке первого сигнала; U_{20} и U_{21} – ближайшие к U_{10} соответственно снизу и сверху мгновенные значения, выбранные из массива дискретных данных, полученных для второго канала.

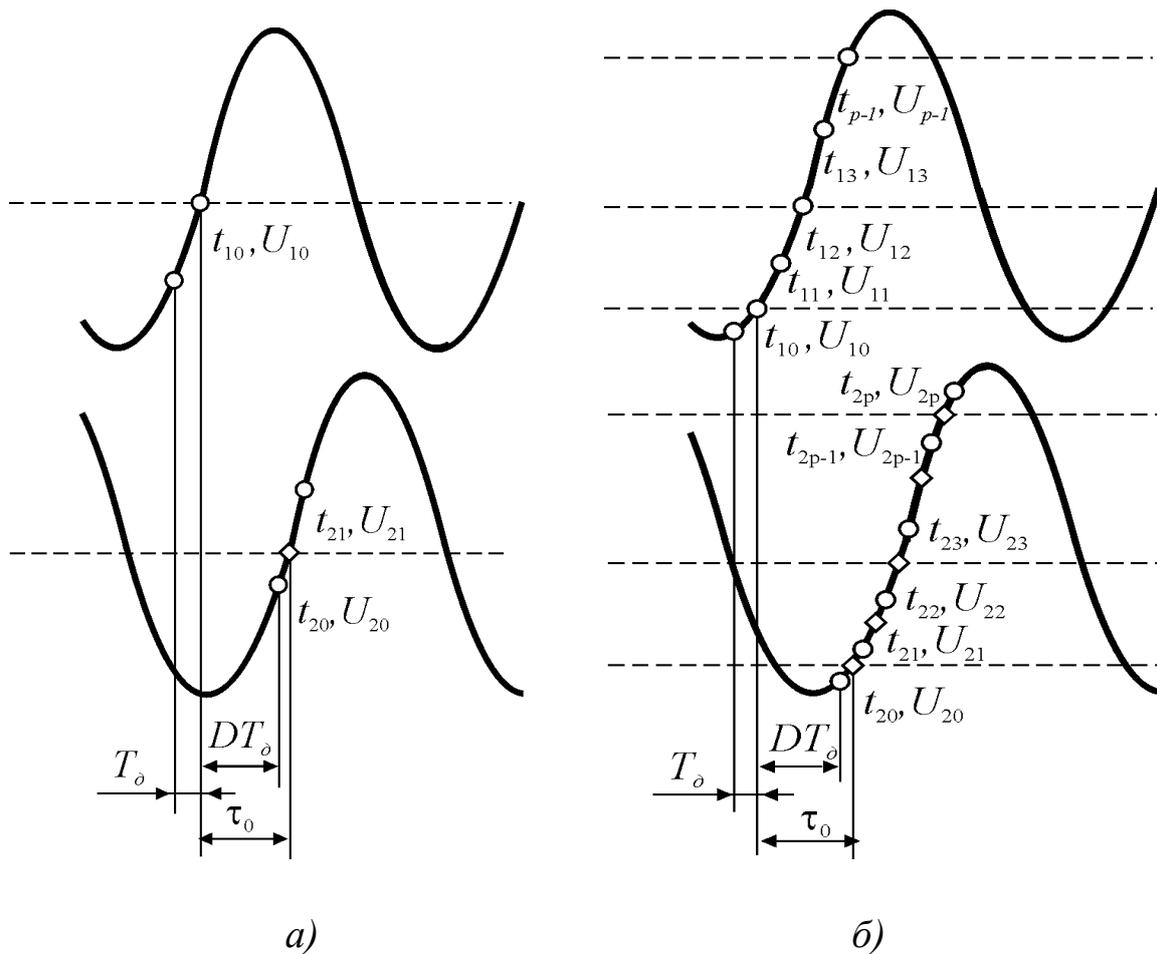


Рис. 2.5

Среднее значение задержки можно найти по формуле

$$\bar{\tau} = DT_\delta + \frac{T_\delta}{q} \sum_m \frac{U_{1m} - U_{2m}}{U_{2m+1} - U_{2m}},$$

где $q = \text{round}(p/2)$ – количество уровней измерения; $m = 0, 2, 4 - 2(q - 1)$.

Примем, что СКО оценки мгновенных значений отсчетов задержанного и опорного сигналов соответственно равны:

$$\sigma_{U\tau} = \sqrt{\sigma_{\tau_{\text{бум}}}^2 + \sigma_{\tau_{\text{ш}}}^2} ; \sigma_{UT} = \sqrt{\sigma_{T_{\text{бум}}}^2 + \sigma_{T_{\text{ш}}}^2} ,$$

где $\sigma_{\text{бум}}$ и $\sigma_{\text{ш}}$ – составляющие, обусловленные конечной разрядностью АЦП и шумами, накладываемыми на сигнал.

Выражение для абсолютного значения среднеквадратического отклонения (СКО) оценки задержки сигнала будет иметь вид

$$\sigma_{\tau} = \frac{T_{\text{д}}}{kq} \left(\sqrt{\sum_m \left(\frac{\sigma_{UT}^2}{\Delta U_{Nm}^2} + \left(\frac{\sigma_{U\tau} \cdot \Delta U_m}{\Delta U_{Nm}^2} - \frac{\sigma_{U\tau}}{\Delta U_{Nm}} \right)^2 + \frac{\sigma_{U\tau}^2 \cdot \Delta U_m^2}{\Delta U_{Nm}^4} \right)} \right),$$

где $m = 0, 2, 4 - 2(q - 1)$.

Относительное значение СКО оценки задержки может быть записано в виде следующего выражения:

$$\sigma_{\tau} \approx \frac{1}{\sqrt{q}} \frac{\left(\sqrt{\sigma_{UT}^2 \cdot \Delta U_{Nm}^2 + \sigma_{U\tau}^2 \cdot \Delta U_{Nm}^2 - 2\sigma_{U\tau}^2 \cdot \Delta U_{Nm} \cdot \Delta U_m + 2\sigma_{U\tau}^2 \cdot \Delta U_m^2} \right)}{\Delta U_{Nm} (D\Delta U_{Nm} + \Delta U_m)},$$

где $m = 0, 2, 4 - 2(q - 1)$.

Разницу фаз между сигналами можно найти из выражения

$$\bar{\varphi} = 2\pi \frac{\bar{\tau}}{T} = 2\pi \left(\frac{DT_{\text{д}}}{T} + \frac{T_{\text{д}}}{Tq} \sum_m \frac{U_{1m} - U_{2m}}{U_{2m+1} - U_{2m}} \right).$$

Если считать, что σ_{τ} и σ_T независимы, то выражение для относительного значения среднеквадратического отклонения (СКО) оценки фазового сдвига будет иметь вид

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_{\tau}^2} = \sqrt{\frac{2\sigma_{UT}^{*2}}{q_T \cdot N} + \frac{\sigma_{UT}^{*2} + \sigma_{U\tau}^{*2}}{q_{\tau} \cdot D}}.$$

Увеличение числа уровней измерения способствует фильтрации случайной погрешности, которая уменьшается пропорционально \sqrt{q} . Увеличение числа шагов N дискретизации периода сигнала на порядок так же на порядок уменьшает СКО. Это особенно важно в области оценки малых фазовых сдвигов, так как нельзя измерить фазовый сдвиг, если в его временном интервале не укладывается хотя бы один интервал.

Используя АЦП большей разрядности, можно уменьшить шумы квантования и дополнительно повысить точность оценки фазового сдвига. Для увеличения количества уровней в два раза можно оцифровывать сигналы не только на участках возрастания, но и на участках убывания функций, т.е. использовать оба фронта сигнала.

Анализ полученных данных показывает, что предлагаемый метод многоуровневого аналого-цифрового преобразования и интерполирования позволяет в условиях использования базы данных на ограниченном временном отрезке в 2 – 3 периода сигнала добиться значительного повышения точности оценки фазового сдвига. По сравнению с методом дискретного счета благодаря использованию процедуры интерполирования данных только на одном уровне даже при наличии шумов и помех точность повышается в среднем на порядок. Дополнительно еще примерно на порядок можно повысить точность за счет усреднения по результатам оценки сдвига фазы на 100 уровнях.

Результаты анализа и моделирования позволяют сделать вывод о целесообразности применения метода многоуровневого интерполирования и усреднения результатов в задачах оценки фазового сдвига при наличии внешних и внутренних шумов. При этом могут решаться задачи повышения быстродействия, подавления шумов и повышения точности оценки сдвига фазы или задержки периодического сигнала.

2.6. Восстановление сигнала во временной области

Оценим полосу рабочих частот АЦП при последующем восстановлении сигнала во временной области по его выборкам с постоянным шагом дискретизации. При выборе метода обработки важным является соотношение частот сигнала f_{max} и дискретизации f_{δ} .

Метод дискретизации и интерполяции (МДИ)

В этом методе $f_{\delta} \gg f_{max}$ можно восстановить дискретизированный сигнал путем интерполяции и оценить его характеристики во временной области. Время сбора массива данных равно максимальному интервалу восстановления функции, например периоду гармонического, полигармонического или модулирующего сигнала.

При простейшей линейной интерполяции соседние дискретные точки на графике восстанавливаемой функции соединяют прямыми

линиями. Наибольшая погрешность при этом будет получена там, где модуль второй производной функции максимален. Для синусоиды наибольшая погрешность будет наблюдаться в районах экстремумов, когда два соседних отсчета располагаются симметрично относительно точки экстремума. При этом интерполирующая линия пройдет горизонтально и погрешность может быть найдена как разность между амплитудой синусоиды и ее значением, соответствующим одному из отсчетов. Наибольшую приведенную к амплитуде погрешность восстановления синусоиды с частотой f_c можно оценить по формуле

$$\gamma_{\partial} = 1 - \cos \frac{\pi}{N_T} \approx \frac{\pi^2}{2N_T^2},$$

где $N_T = 1/(f_c T_{\partial})$ – отношение периода сигнала ($1/f_c$) к интервалу дискретизации T_{∂} (предполагается, что $N_T \gg 1$).

Отсюда следует, что $N_T \geq \pi / \sqrt{2\gamma_{\partial}}$.

При допустимой погрешности восстановления синусоиды, равной 1 %, потребуется не менее 23 отсчетов на один период. Если необходимо повысить точность на два порядка, то число отсчетов следует увеличить на порядок. При линейной интерполяции требуется устанавливать частоту дискретизации значительно более высокой, чем частота высшей гармоники. Для восстановления модулированного сигнала необходимо собрать массив данных на периоде модулирующей частоты T_M , получая на периоде несущей не менее N_T отсчетов. Общий объем выборки при этом может быть очень большим. Например, если $T_M/T_C = 10^5$ (несущая частота 100 МГц, модулирующая частота 1000 Гц), то потребуется обработать $10^5 N_T$ отсчетов.

Если задана допустимая погрешность восстановления, то период дискретизации может быть найден по формуле $T_{\partial} \leq \sqrt{2\gamma_{\partial}} / (\pi f_c)$.

При возможном выборе частоты дискретизации от $f_{\partial \min}$ до $f_{\partial \max}$ максимальная частота сигнала высшей гармоники в спектре сигнала $f_{c \max} \leq f_{\partial \max} \sqrt{2\gamma_{\partial}} / \pi$.

Например, для допустимой погрешности 1 % и частоты дискретизации 100 МГц максимальная рабочая частота сигнала будет только 4,45 МГц.

Минимальная рабочая частота первой гармоники сигнала может быть сколь угодно малой, поскольку даже если АЦП имеет ограниче-

ние по установке f_{dmin} , в процессе обработки можно отбирать данные с прореживанием, например брать каждый 100-й отсчет. Можно считать, что полоса пропускания начинается с постоянного напряжения. Линейная интерполяция позволяет воспроизводить исходную кривую непосредственно в процессе эксперимента.

Метод синхронизированного стробирования и интерполяции

Здесь период дискретизации близок к целому числу периодов сигнала, но не равен ему. При каждом повторении целого числа периодов сигнала интервал стробирующего аналого-цифрового преобразования (САЦП) сдвигается во времени, и таким образом сигнал последовательно считывается по точкам. При восстановлении сигнала во временной области сдвиг ограничивается теми же условиями, что и для МДИ. В методе синхронизированного стробирования (МСС) осуществляется линейная трансформация временного и частотного масштабов сигнала. Огибающая полученных отсчетов повторяет форму исходного сигнала, поэтому его можно восстановить путем интерполяции. Если гармоника сигнала по частоте выше рабочей гармоники дискретизации, то при таком восстановлении сохраняется направление оси времени.

При стробоскопическом преобразовании (см. рис. 2.6) положение каждого стробирующего импульса синхронизируется с периодом исследуемого сигнала так, чтобы получить требуемое разрешение по времени τ . Частота стробирующих импульсов должна строго соответствовать выражению $F = 1/(NT_s + \tau)$, где N – целое число; T_s – период сигнала. Эквивалентная частота дискретизации при этом будет равна $1/\tau$.

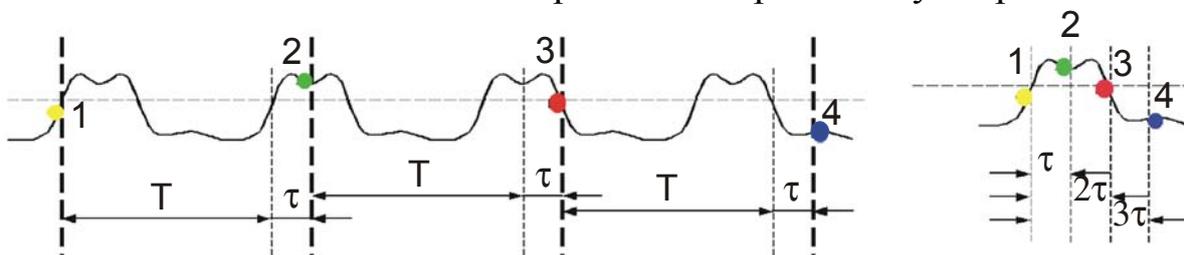


Рис. 2.6

На выходе стробоскопического преобразователя образуется последовательность расширенных импульсов напряжения, огибающая амплитуд которых повторяет форму исходного сигнала. Так как счи-

тывание дискретных значений сигнала происходит в течение многих его повторений, то длительность вновь полученного сигнала значительно больше длительности исходного. Выделяя с помощью фильтра огибающую расширенных импульсов, можно получить аналоговый сигнал, идентичный по форме исходному.

Заменить аналоговое стробоскопическое преобразование можно цифровым, реализуемым на уровне вычислительных процедур по данным мгновенных отсчетов сигнала, получаемых с помощью стробирующего АЦП.

Оценить полосу и границы рабочего диапазона частот при восстановлении сигнала во временной области можно по тем же соображениям, что были сделаны в МДИ. Максимальная частота сигнала его высшей гармоники определяется полосой пропускания АЦП:

$$f_{c \max} = f_B = \max \left\{ cf_{\partial} \frac{q}{q \pm 1} \right\}, \quad q = \frac{af_c}{\pm(af_c - cf_{\partial})} = \frac{af_c}{f_{np}},$$

где a и c – целые положительные числа.

При заданной приведенной к амплитуде погрешности восстановления синусоиды отношение максимального эквивалентного интервала между соседними выборками АЦП Δt к минимальному периоду сигнала может быть найдено по формуле

$$\Delta t / T_{c \min} \leq \sqrt{2\gamma_{\partial}} / \pi.$$

При этом предполагается, что точность установки требуемой частоты дискретизации от $f_{\partial \min}$ до $f_{\partial \max}$ позволяет получить соседние отсчеты со сдвигом Δt . Тогда максимальная частота сигнала высшей гармоники в спектре сигнала может быть найдена по формуле

$$f_{c \max} \leq \sqrt{2\gamma_{\partial}} / (\pi \Delta t).$$

Как и в МДИ, минимальная частота сигнала может быть сколь угодно малой, если реализовать прореживание данных. Практически можно работать от постоянного напряжения. Применение вычислительных средств позволяет легко изменить направление оси времени и дополнительно работать в «нижнем» поддиапазоне, когда каждая гармоника сигнала по частоте ниже соответствующей гармоники дискретизации. Только одно это действие расширяет диапазон рабочих частот АЦП в два раза.

Стробирующий высокочастотный АЦП с регулируемой частотой дискретизации позволяет решить многие проблемы на вычисли-

тельном (программном) уровне и реализовать трансформацию спектра и временного масштаба без применения сложных аппаратных цепей задержки, синхронизации и фильтрации. Современные стробирующие АЦП имеют полосу пропускания до единиц гигагерц при частоте дискретизации порядка сотен мегагерц, что позволяет обеспечить прямой сбор данных в широком диапазоне радиочастот.

Метод восстановления в полосе Котельникова

В этом методе частота дискретизации должна быть выше максимальной рабочей частоты или гармоники сигнала в два раза ($f_d > 2f_{\text{сmax}}$). При этом можно восстановить сигнал без искажений. Будем далее называть этот метод дискретизации по Котельникову (МДК), он может накладываться на метод интерполяции сигнала (МИС) в низкочастотной области, что позволяет путем выбора или комбинирования оптимизировать обработку массива полученных цифровых данных. Этот диапазон частот, как правило, указан во всех литературных источниках.

Восстановление по Котельникову возможно только после получения всех точек исследуемой кривой, т.е. путем вычислительной процедуры, примененной к массиву данных, собранных в требуемом объеме.

При этом восстановить сигнал без искажений можно как во временной области, воспользовавшись рядом Котельникова, так и в частотной области методами спектрального анализа сигнала, базирующимися на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ).

Метод несинхронизированного стробирования и перестановки

Период дискретизации в этом методе может принимать значения в широких пределах кроме некоторых «кратных» величин, в том числе он не должен быть равен целому числу полупериодов сигнала. При каждом повторении целого числа периодов сигнала интервал САЦП сдвигается во времени таким образом, чтобы получить массив неповторяющихся данных мгновенных значений сигнала без какой-либо обязательной временной последовательности. В методе несинхронизированного стробирования (МНС) или нелинейной трансформации временного и частотного масштаба каждая точка восстанов-

ленного сигнала получается в результате реализации вычислительных процедур.

Верхняя граница рабочих частот в МНС определяется теми же требованиями, что и для МСС, т.е. она, прежде всего, зависит от времени выборки АЦП. Нижняя граница диапазона частот при работе во временной области такая же, как и в МСС. Учесть растекание компонент спектра можно путем сужения рабочего диапазона на величину bf_δ / N_{\min} .

Положительный эффект достигается тем, что измеряют частоту входного сигнала, и все полученные отсчеты располагают на оси времени в правильном порядке, который определяется в результате вычислений, т.е. алгоритмическим методом. Принцип работы поясняет рис. 2.7.



Рис. 2.7

Вначале измеряются период или частота входного сигнала. Массив полученных отсчетов высокочастотного сигнала запоминается, и полученные данные располагаются на оси времени в необходимом порядке t_i в соответствии с выражением

$$t_i = jT_\delta - iT_c,$$

где j – порядковый номер (целое число) временного отсчета сигнала; i – целое число, для которого выполняется условие $nT_c \geq jT_\delta - iT_c > 0$; n – требуемое число периодов восстановленного сигнала; T_c и T_δ – периоды сигнала и дискретизации.

Период дискретизации может быть меньше, чем период сигнала, а также больше или значительно больше, чем период сигнала. Рекомендуемый период дискретизации задается выражением $T_{\delta} = MT_c / N$, где N – требуемое количество точек (целое число) при восстановлении одного периода сигнала; M – целое число, которое задается исходя из возможностей установки требуемого значения T_{δ} ; M/N – простая дробь.

Если работать с рекомендуемым периодом дискретизации, то полное время считывания данных (оцифровки) определяется выражением $T_M = NT_{\delta}$. Увеличение времени анализа приведет к повторному считыванию тех же точек сигнала (в тех же временных точках восстановленного сигнала).

Если задать T_{δ} с высокой точностью не удастся, то при считывании и восстановлении сигнала точки группируются, образуя при увеличении времени анализа N групп точек. Для выбранного периода дискретизации $T_{\delta 1}$ следует проверить, что функция $f = \frac{M}{N} - \frac{T_{\delta 1}}{T_c}$ имеет минимум при выбранных ранее значениях M и N . Если это не выполняется, то количество точек на период восстановленного сигнала будет определяться новым значением N , при котором функция имеет минимум.

Диапазон возможных значений: $N = T_M / T_{\delta}$, $M \in [1, \text{ent}(\frac{T_M}{T_c})]$.

Вариант построения схемы, реализующей способ несинхронизированного стробирования, представлен на рис. 2.8.

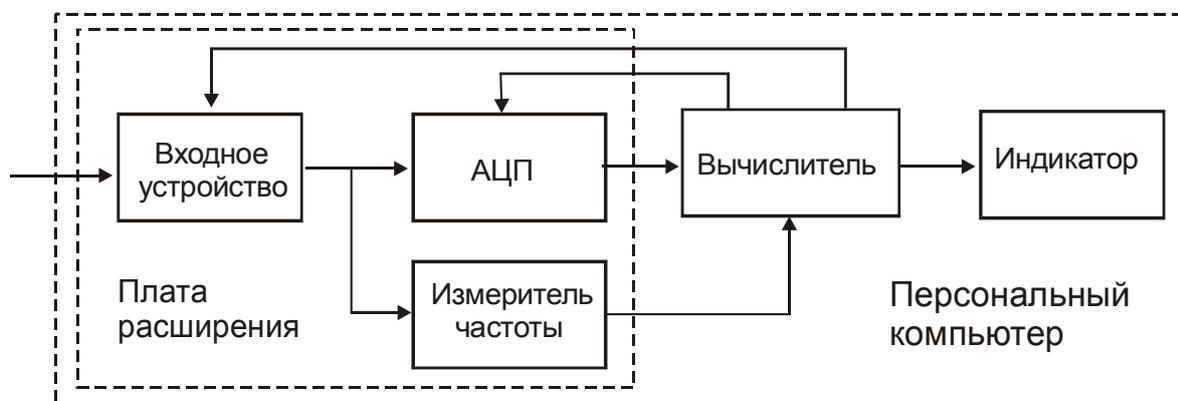


Рис. 2.8

Схема содержит входное устройство, АЦП, измеритель частоты, индикатор формы сигнала и вычислитель, в котором реализуется процедура перестановки точек. В зависимости от частоты сигнала вычислитель может корректировать частоту стробирования, которая для данной схемы является частотой дискретизации АЦП.

Интерфейс программы при восстановлении двух периодов сигнала представлен на рис. 2.9.

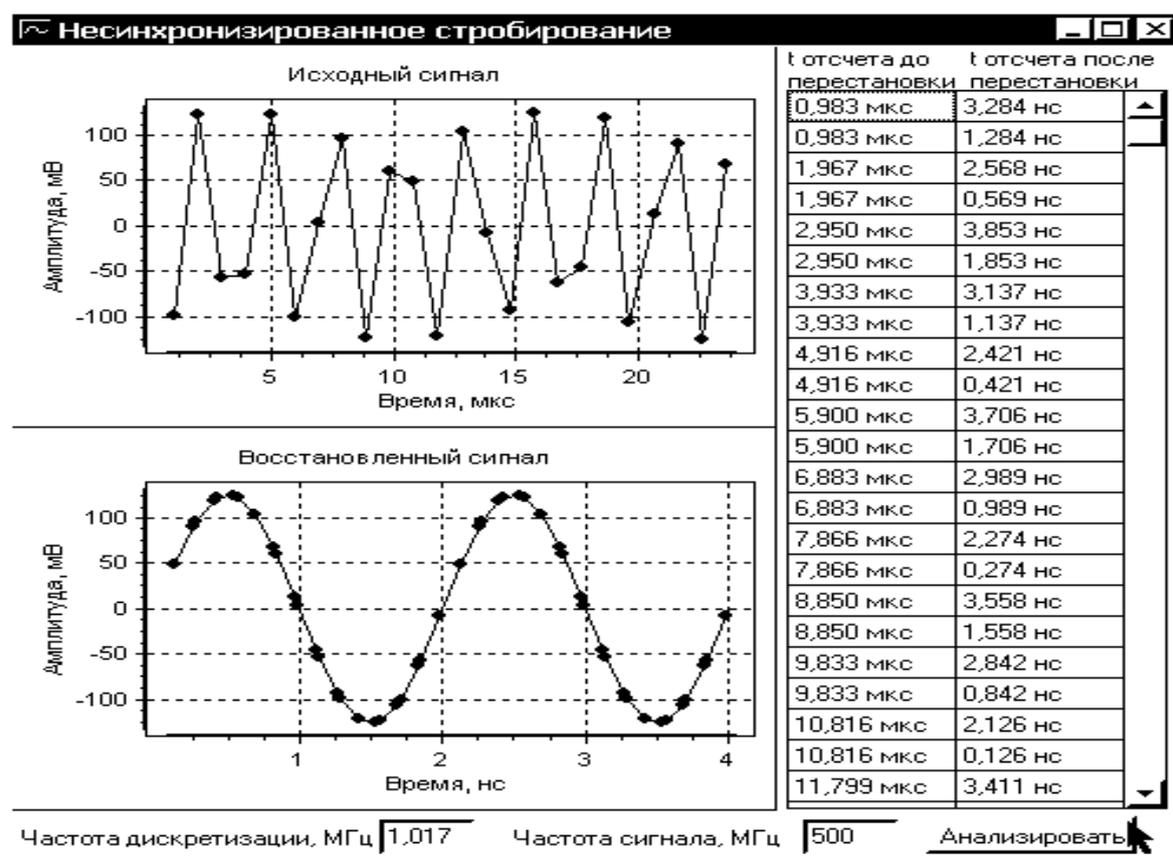


Рис. 2.9

Граф-схема компьютерного алгоритма несинхронизированного стробирования приведена на рис. 2.10.

Частота дискретизации может быть выбрана из любой физически реализуемой частоты, удовлетворяющей формулам $F_d = 1/T_d$, $T_d = MT_c/N$. При этом нет необходимости изменять частоту дискретизации в широком диапазоне, что значительно упрощает аппаратную часть преобразователя.

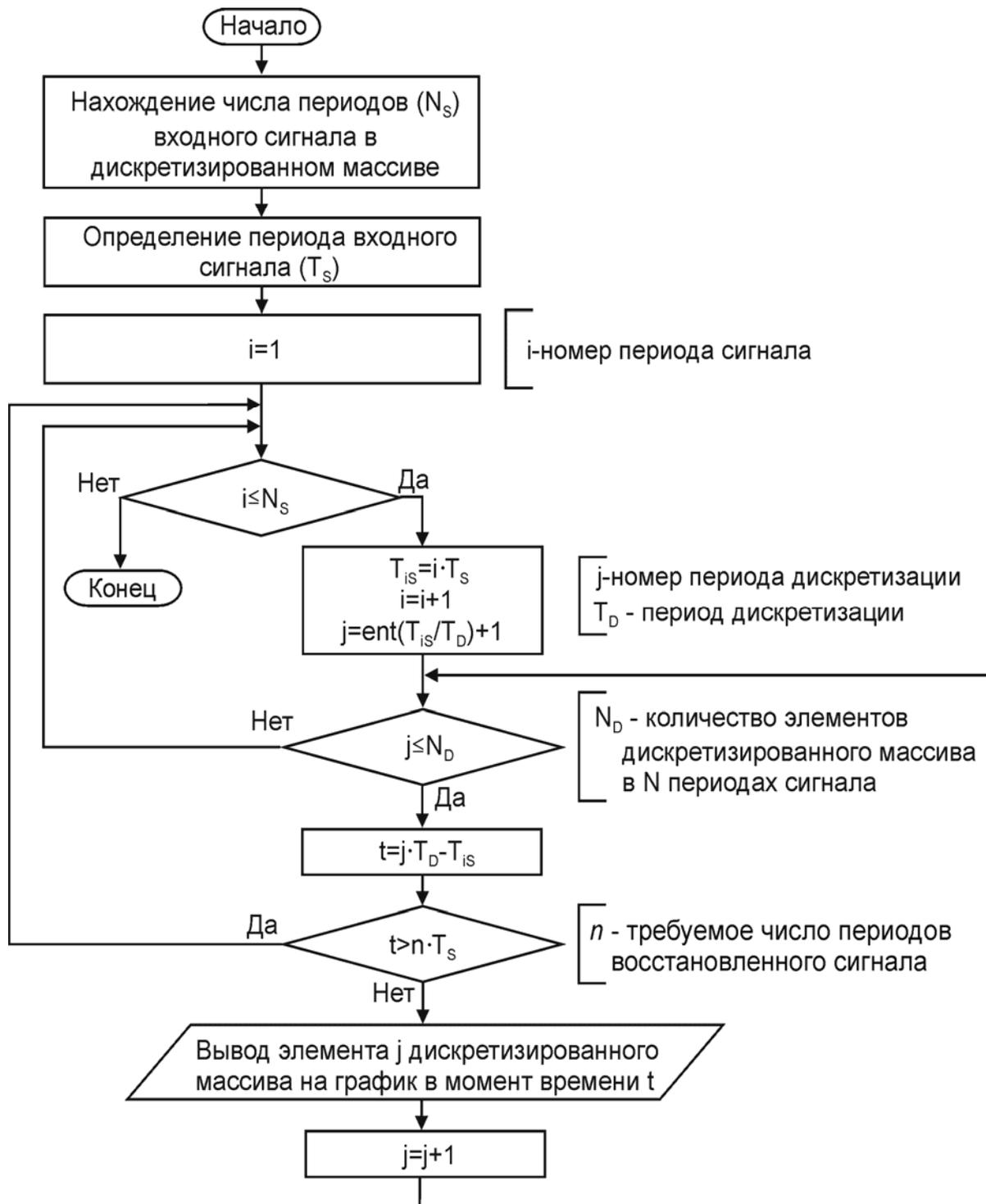


Рис. 2.10

На графиках (см. рис. 2.9) представлена кусочно-линейная аппроксимация между получаемыми точками: вверху – точками, считываемыми последовательно; внизу – точками, временное положение которых восстановлено.

Пример

Исходные данные: частота сигнала 500 МГц ($T_s = 0,002$ мкс); $M = 6883$; $N = 14$ (для наглядности графического представления N выбрано малым). Тогда $T_\delta = MT_s / N = 6883 \cdot T_s / 14 = 0,983285714$ мкс; $F_\delta = 1/T_\delta = 1,0169984$ МГц.

Если такую частоту дискретизации практически задать невозможно, но есть близкая физически реализуемая частота 1,017 МГц, то в этом случае при увеличенном времени восстановления в периоде восстановленного сигнала будет не 14 точек, а 14 групп близко расположенных точек.

Наибольший эффект может быть достигнут в измерительных комплексах, содержащих в своей структуре компьютер. При использовании современных плат расширения, содержащих АЦП и вставляемых в свободный слот компьютера, схема может быть значительно упрощена. Функции входного устройства, АЦП и измерителя частоты может выполнять одна плата расширения, работающая в методе стробирования. Компьютер при этом выполняет функции вычислителя и обеспечивает всю дальнейшую обработку и представление данных, получаемых на выходе АЦП.

3. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СИНТЕЗ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

3.1. Оценка параметров сигнала по его спектру

В результате работы АЦП получается массив цифровых данных, обработка которых позволяет оценить первичные характеристики радиосигнала: амплитудный, частотный и фазовый спектр. Путем последующей обработки первичных характеристик сигналов на входах и выходах РТС можно оценить практически любые параметры испытуемого объекта.

Получающийся в результате стробирующего аналого-цифрового преобразования массив данных позволяет получить спектр сигнала и оценить его базовые характеристики: СКЗ, частоту и фазу. Приведем некоторые примеры косвенных измерений.

1. Оценка мощности сигнала

Мощность интересующей сигнальной гармоники, находящейся вблизи пиковой по уровню компоненты h сетки частот БПФ, можно оценить, суммируя мощности спектральных линий сетки вблизи пика:

$$P(h) \approx k_p \sum_{i=h-d}^{h+d} |S[i]|^2,$$

где k_p – коэффициент, учитывающий влияние окна и нагрузки; $S[i]$ – уровень (напряжение) i -й спектральной линии; d – интервал суммирования растекания.

Мощность всех учитываемых компонент сигнала может быть оценена путем суммирования мощностей отдельных компонент:

$$P_{\Sigma} \approx k_p \left\{ \sum_{i=h_1-d}^{h_1+d} |S[i]|^2 + \sum_{i=h_2-d}^{h_2+d} |S[i]|^2 + \sum_{i=h_3-d}^{h_3+d} |S[i]|^2 + \dots + \sum_{i=h_{\max}-d}^{h_{\max}+d} |S[i]|^2 \right\}, \quad (3.1)$$

где $h_1, h_2, h_3, \dots, h_{\max}$ – учитываемые сигнальные компоненты.

При этом интервал компонент суммирования, должен выбираться исходя из характеристик налагаемого окна и уровня шумов. Чем шире главные лепестки окна, тем больше компонент следует учитывать. Однако, если две сигнальные компоненты, которые следует оце-

нить отдельно, находятся очень близко, то ослабить их взаимное влияние можно путем уменьшения числа d . При этом лучше заменить и тип налагаемого окна, имеющего меньшую утечку в соседний диапазон.

2. Оценка уровня шумов и отношения сигнал/шум

Уровень шумов каждой частотной компоненты оценивается так, как будто он был измерен через интервал сетки ДПФ. Чтобы оценить мощность шумов, необходимо просуммировать все линии энергетического спектра, исключая пики сигнальных составляющих и нулевую компоненту:

$$P_{\text{шш}} \approx k_p \left\{ \sum_{i=1}^{h1-d} |S[i]|^2 + \sum_{h1+d}^{h2-d} |S[i]|^2 + \sum_{h2+d}^{h3-d} |S[i]|^2 + \dots + \sum_{h_{\text{max}}+d}^{N/2-1} |S[i]|^2 \right\}, \quad (3.2)$$

где $h1, h2, h3, \dots, h_{\text{max}}$ – вырезаемые сигнальные компоненты.

Чтобы вычислить отношение сигнал/шум, следует оценить отдельно мощность на представляющих интерес гармониках сигнала (3.1) и уровень широкополосных шумов (3.2).

Если число вырезаемых компонент велико, то можно скорректировать результат и вырезанным линиям сетки ДПФ присвоить средний уровень ближайших шумовых составляющих.

3. Оценка частоты сигнальной компоненты

Частоту спектральной линии сигнала можно оценить по частоте максимальной компоненты, расположенной близи искомой частоты. При этом погрешность оценки будет достигать половины шага частотной сетки ДПФ. Искомую величину можно найти с более высоким разрешением, чем дает БПФ, если по методу моментов выполнить средневзвешенную оценку положения совокупности компонент вблизи пика энергетического спектра с учетом его растекания.

Применительно к задаче оценки частоты сигнальной спектральной линии, занявшей несколько линеек сетки ДПФ, алгоритм следует модернизировать. Необходимо вести суммирование в ограниченной зоне растекания, которая определяется выбранным окном:

$$f_{nc} \approx \frac{f_d \sum_{i=n-d}^{n+d} i |S[i \cdot f_d / N]|^2}{N \sum_{i=n-d}^{n+d} |S[i \cdot f_d / N]|^2},$$

где n – индекс линейки пика мощности для выбранной частоты.

Если данных недостаточно, то рекомендуется выбрать интервал взвешивания ± 3 ($d = 3$) компоненты сетки частот ДПФ, потому что он шире, чем главные лепестки основных окон. Когда в пределах шести компонент сетки ДПФ имеются два пика мощности или больше, то они будут искажать фактические частоты. Устранить этот эффект можно уменьшая число d .

4. Оценка начальной фазы и сдвига фазы сигнала

Искомая фаза сигнальной компоненты может быть определена в области промежуточных частот путем линейной интерполяции между точками начальных фаз $\varphi(h_j)$ и $\varphi(h_j + 1)$ соседних линий сетки частот ДПФ $f(h_j)$ и $f(h_j + 1)$. При этом предполагается, что частоты $f(h_j) = hf_\delta/N$ и $f(h_j + 1) = (h_j + 1)f_\delta/N$ расположены по отношению к частоте f_{ncj} снизу и сверху соответственно.

3.2. Оценка нелинейных искажений сигнала спектральным методом

В соответствии с определением коэффициент гармоник, или коэффициент нелинейных искажений, определяется по формуле

$$K_G = \sqrt{\sum_{i=2}^H U_i^2} / U_1,$$

где H – номер учитываемой высшей гармонической составляющей; U_1 – амплитуда или СКЗ первой гармоники сигнала; U_i – амплитуда или СКЗ первой гармонической составляющей от 2 до H .

Метод оценки при этом называют спектральным, он может быть реализован тогда, когда известны значения всех гармонических составляющих сигнала. Если спектральные компоненты находятся через преобразование Фурье, а при дискретизации в окно преобразования попадает не целое число периодов сигнала, то происходит растекание спектра. Для уменьшения этого эффекта целесообразно применение временных окон, которые приводят к одинаковому уменьшению всех спектральных составляющих, поэтому соотношения между ними не изменятся.

Реальная полоса пропускания с учетом явления растекания спектра может быть определена в соответствии с теоремой Котельникова, по которой информацию о сигнале можно передать без потерь,

если частота дискретизации более чем в два раза выше максимальной частоты спектра сигнала ($f_\delta > 2f_{\max}$). Чтобы учесть растекание спектра, необходимо уменьшить снизу и сверху частотные границы на величину bf_δ/N , где N – число полученных дискретных отсчетов в массиве данных.

Положение первой гармоники может быть найдено из предположения, что она больше других компонент, полученных в результате преобразования Фурье с разрешением по частоте f_δ/N в диапазоне рабочих частот bf_δ/N до $f_\delta/2 - bf_\delta/N$. Для того чтобы найти ее амплитуду, нужно, как и в рассмотренном выше методе измерения СКЗ основной гармоники, просуммировать некоторое количество компонент слева и справа относительно спектральной составляющей, максимальной по уровню в сравнении с остальными компонентами. В результате получим

$$U_1 = \max_{j \in (b, N/2 - b)} \sqrt{\sum_{j=Ni-d}^{Ni+d} u_j^2} = \sqrt{\sum_{j=N1-d}^{N1+d} u_j^2},$$

где $N1 = \text{round}(Nf/f_\delta)$ – номер спектральной компоненты U_1 в найденном через преобразование Фурье спектре, соответствующий положению первой гармоники спектра сигнала; f – частота сигнала первой гармоники, которая может быть найдена с использованием преобразований Фурье; u_j – спектральные компоненты, получаемые в результате преобразования Фурье с разрешением по частоте f_δ/N ; d – число компонент слева и справа относительно выбранной спектральной составляющей, которое учитывает растекание спектра.

Для того чтобы найти амплитуды остальных гармоник, нужно также просуммировать d компонент слева и справа относительно каждой спектральной составляющей, частота которой кратна U_1 , т.е.

$$U_i = \sqrt{\sum_{j=Ni-d}^{Ni+d} u_j^2},$$

где $Ni = \text{round}(Nf_i/f_\delta)$ – номер спектральной компоненты U_i в найденном спектре, соответствующий положению i -й гармоники спектра сигнала.

После преобразований формула для вычисления коэффициента гармоник примет следующий вид:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^H \sum_{j=Ni-d}^{Ni+d} u_j^2}{\sum_{j=N1-d}^{N1+d} u_j^2}}.$$

В некоторых случаях необходимо реализовать квазиспектральный метод оценки с «вырезанием» первой гармоники. При этом оценивается вес всех компонент спектра без первой гармоники, но с включением шумовых составляющих, расположенных между гармониками основной частоты, по отношению к полному сигналу. Подобный подход, например, используется при оценке чувствительности приемных устройств. В этом случае формула расчета через преобразование Фурье будет иметь вид

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{j=b}^{N/2-b} u_j^2 - \sum_{j=N1-d}^{N1+d} u_j^2}{\sum_{j=b}^{N/2-b} u_j^2}}.$$

Здесь под корнем квадратным в числителе представлен полный сигнал с шумами, но без первой гармоники, а в знаменателе – полный сигнал. Поскольку реальные значения коэффициента гармоник при оценке чувствительности высокие, порядка 25 %, то возникают заметные методические погрешности, которые можно исключить путем легко реализуемой модернизации, если используется преобразование Фурье. Для этого в числителе должен быть полный сигнал с шумами, но без первой гармоники, а в знаменателе – только первая гармоника:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{j=b}^{N/2-b} u_j^2 - \sum_{j=N1-d}^{N1+d} u_j^2}{\sum_{j=N1-d}^{N1+d} u_j^2}}.$$

Модернизированный квазиспектральный метод может быть полезен в тех случаях, когда необходим учет всех шумов в рассматриваемой полосе пропускания.

3.3. Восстановление сигнала по его спектру

Методы спектрального анализа могут быть использованы для решения задач восстановления формы периодического сигнала и его визуального представления на экране виртуального стробоскопического осциллографа, который может быть запоминающим и многоканальным. Действительно, получив всю необходимую информацию об амплитуде, частоте и начальной фазе каждой спектральной составляющей, можно восстановить сигнал, синтезировав его форму по совокупности данных об исследованных гармониках в соответствии с их реальными параметрами. Приведем упрощенный алгоритм работы такого анализатора по шагам.

1. С помощью АЦП получают массив $u[i/f_\delta]$ в объеме N дискретных отсчетов сигнала. Частота дискретизации может быть скорректирована в процессе работы с полученными данными.

2. Получают массивы данных, оптимизированные для конкретной задачи более точной оценки основных параметров (амплитуды, частоты или начальной фазы) всех спектральных линий. Для этого в зависимости от допустимой погрешности и априорных данных о сигнале на массив $u[i/f_\delta]$ может накладываться индивидуальное или общее окно.

3. Для каждого массива вычисляют прямое быстрое преобразование Фурье, получая комплексный спектр $S[i f_\delta / N] = \text{FFT}(u[i/f_\delta])$. Далее для простоты записи опустим множитель f_δ / N , т.е. $S[i f_\delta / N] = S[i]$.

4. Анализируют спектр по наличию достаточного расстояния между локальными максимумами сигнальных компонент с запасом, существенно превышающим растекание. При этом оцениваются возможности смещения сигнальных компонент при перестройке частоты дискретизации с учетом априорных данных о полосе частот сигнала. Также проверяется близость и возможное движение сигнальных компонент к нулю и частоте Найквиста.

5. Вычисляют частоту основной гармоники сигнала f .

6. Для каждой (j -й) гармоники вычисляют: $f_{ПЧ j} = jf - n_j f_\delta$, где $n_j = \text{ent}(jf/f_\delta)$; $h_j = \text{round}(f_{ПЧ j} / (f_\delta / N))$ – номер спектральной составляющей j -й гармоники сигнала.

7. Определяют амплитуду всех гармоник $f_{ПЧ j}$ по формуле

$$U_j \approx k \sqrt{\sum_{i=m_j-d}^{m_j+d} |S[i]|^2},$$

где d – число, учитывающее растекание j -й спектральной составляющей; $|S[i]|$ – амплитуды соответствующих спектральных компонент; k – весовой коэффициент (для окна Кайзера при $b_k = 12$ и $d = 5$ оптимальное значение $k = 1,971309650$. Для окна Ханна $k = 1,632993162$, а для окна Хемминга $k = 1,586302719$).

8. Вычисляют $h_j = \text{ent}(f_{СПj} / (f_\delta / N))$.

9. Определяют начальную фазу для спектральной составляющей h_j :

$$\varphi(h_j) = \text{arctg} \left(\frac{S_{IM}[h_j]}{S_{RE}[h_j]} \right), \text{ если } S_{IM}[h_j] > 0 \text{ и } S_{RE}[h_j] > 0;$$

$$\varphi(h_j) = \text{arctg} \left(\frac{S_{IM}[h_j]}{S_{RE}[h_j]} \right) + 180, \text{ если } S_{IM}[h_j] > 0 \text{ и } S_{RE}[h_j] < 0;$$

$$\varphi(h_j) = \text{arctg} \left(\frac{S_{IM}[h_j]}{S_{RE}[h_j]} \right) - 180, \text{ если } S_{IM}[h_j] < 0 \text{ и } S_{RE}[h_j] < 0;$$

$$\varphi(h_j) = \text{arctg} \left(\frac{S_{IM}[h_j]}{S_{RE}[h_j]} \right), \text{ если } S_{IM}[h_j] < 0 \text{ и } S_{RE}[h_j] > 0.$$

10. Аналогично определяют фазы для спектральной составляющей h_j+1 .

Если $\varphi(h_j+1) > \varphi(h_j)$, то $\varphi(h_j+1) = \varphi(h_j+1) - 360$.

11. Определяют начальную фазу j -й гармоники φ_j путем линейной аппроксимации между точками:

$$\varphi(h_j), f(h_j) = h_j f_\delta / N \text{ и } \varphi(h_j+1), f(h_j+1) = (h_j+1) f_\delta / N.$$

Искомая фаза находится между частотами $f(h_j)$ и $f(h_j+1)$ на $f_{ПЧj}$.

12. Закон изменения сигнала от времени для H гармоник будет

$$\text{описываться выражением } u(t) = \sum_{j=1}^H U_j \cdot \cos(2\pi jft + \varphi_j).$$

3.4. Оценка среднеквадратического значения сигнала в частотной области

Задача оценки среднеквадратического значения (СКЗ) может решаться на основе представления сигнала в частотной области с использованием преобразования Фурье. Как правило, первая гармоника исследуемого сигнала по уровню превышает все остальные. Это позволяет реализовать нахождение основной гармоники путем простого

сравнения между собой спектральных линий. При необходимости алгоритм можно усложнить добавлением процедуры оценки высших и низших компонент в спектре для наиболее значимых составляющих, выделяемых по уровню.

Поскольку при реализации быстрого преобразования Фурье (БПФ) и применении временного окна происходит уменьшение энергии сигнала, то соответственно уменьшится и величина СКЗ. В процессе обработки данных это учитывается применением весового коэффициента.

Схема определения СКЗ сигнала представлена на рис. 3.1.

Сигнал поступает на входное устройство, представляющее собой усилитель-аттенюатор с регулируемым коэффициентом передачи. Затем сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

В зависимости от уровня оцифрованного сигнала вычислитель задает требуемый коэффициент передачи входного устройства. Правильный выбор коэффициента передачи обеспечит более полное использование рабочего диапазона АЦП, что будет способствовать высокой точности оцифровки. В зависимости от значения частоты основной гармоники вычислитель выбирает частоту дискретизации f_{δ} таким образом, чтобы сигнал на выходе АЦП находился в требуемом диапазоне частот. Массив оцифрованных данных $u[i/f_{\delta}]$ поступает в модуль вычислителя, который реализует метод работы по Фурье. Найденное значение СКЗ отображается на индикаторе.

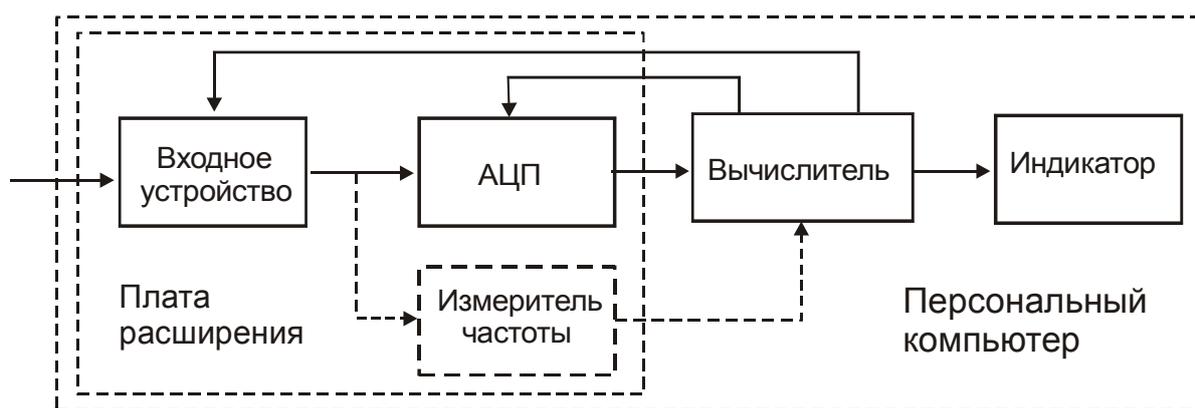


Рис. 3.1

Приведем алгоритм оценки СКЗ по шагам:

1. С помощью АЦП получают массив $u[i/f_{\delta}]$ в объеме N дискретных отсчетов сигнала.

2. Накладывают на массив дискретных отсчетов временное окно (например, Кайзера) и получают взвешенный массив.

3. Вычисляют прямое преобразование Фурье, получая комплексный спектр $S[i f_{\delta}/N]=\text{FFT}(u_l[i/f_{\delta}])$.

4. В спектре $S[i f_{\delta}/N]$ определяют номер M компоненты, амплитуда которой максимальна, считая ее первой гармоникой сигнала.

5. Вычисляют СКЗ сигнала. В зависимости от поставленной задачи можно найти СКЗ1 первой гармоники сигнала, СКЗ2 всех гармоник в рабочей полосе частот измерителя с учетом постоянной составляющей сигнала, СКЗ3 в заданной пользователем полосе пропускания:

$$a) \text{ СКЗ1} \quad U_{\text{СКЗ1}} \approx \frac{k}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=N1-d}^{N1+d} u_i^2};$$

$$б) \text{ СКЗ2} \quad U_{\text{СКЗ2}} \approx \frac{k}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N/2} u_i^2 + \sqrt{2}u_0^2};$$

$$в) \text{ СКЗ3} \quad U_{\text{СКЗ3}} \approx \frac{k}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=L}^H u_i^2},$$

где u_i – амплитуды соответствующих спектральных компонент; u_0 – постоянная составляющая сигнала; N – число полученных дискретных отсчетов в массиве данных; $N1 = \text{round}(Nf/f_{\delta})$ – номер спектральной компоненты с разрешением по частоте f_{δ}/N , соответствующий положению первой гармоники спектра сигнала; d – целое число спектральных составляющих, учитывающее растекание основной гармоники на соседние; $H = \text{round}(Nf_H/f_{\delta})$ – номер спектральной компоненты, соответствующий требуемой верхней границе полосы пропускания f_H ; $L = \text{round}(Nf_L/f_{\delta})$ – номер спектральной компоненты, соответствующий требуемой нижней границе полосы пропускания f_L ; k – весовой коэффициент, учитывающий влияние вида используемого временного окна на величину СКЗ сигнала.

Сравнение полученных данных с результатами оценки СКЗ во временной области показало, что для одинакового объема выборки в области малых и средних значений отношения частоты сигнала к частоте дискретизации (f/f_{δ} до 0,3) погрешности методов примерно равны, однако в области больших значений f/f_{δ} (0,3 – 0,46) метод Фурье обеспечивает меньшие погрешности. Преимущества временного под-

хода – это простота расчетов и быстрота сбора данных. Преимущество частотного подхода – более гибкая возможность оценки СКЗ по всем гармоникам и в требуемой полосе частот.

3.5. Определение несущей частоты по спектру дискретизированного сигнала

Ожидаемым преимуществом перехода в частотную область является возможность применения вычислительных методов для «очистки» неидеального сигнала от высших гармоник, шумов и паразитной амплитудной модуляции (ПАМ). Кроме того, при оценке параметров сигнала можно использовать всю базу полученных дискретных отсчетов, т.е. реализовать обработку данных без потерь.

Алгоритм работы может быть реализован с использованием схемы, приведенной на рис. 3.2.

Сигнал поступает на входное устройство, представляющее собой согласованный усилитель-аттенюатор с регулируемым коэффициентом передачи. Затем сигнал поступает на вход аналогоцифрового преобразователя (АЦП). В зависимости от уровня оцифрованного сигнала вычислитель задает требуемый коэффициент передачи входного устройства. Правильный выбор коэффициента передачи обеспечит более полное использование рабочего диапазона АЦП, что будет способствовать высокой точности оцифровки. В зависимости от значения частоты вычислитель задает частоту дискретизации f_{δ} таким образом, чтобы сигналы на выходе АЦП находились в требуемом диапазоне частот. Массив оцифрованных данных $u[i/f_{\delta}]$ поступает в вычислитель, который реализует метод работы по Фурье. Найденное значение частоты отображается на индикаторе.

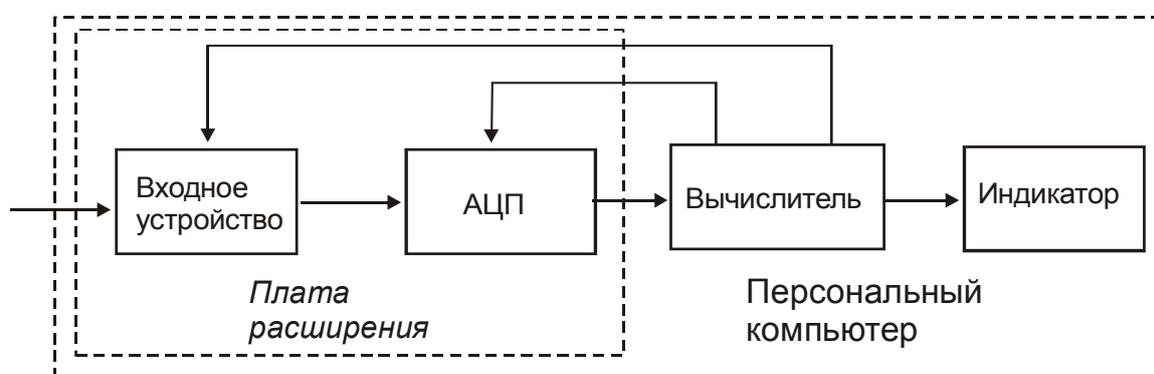


Рис. 3.2

Метод оценки частоты с преобразованием дискретизированного сигнала по Фурье показал высокую эффективность в широкой области рабочих частот. Даже в условиях значительных нелинейных искажений сигнала, наличия шумов, паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) и ограниченной разрядности АЦП достижима высокая точность оценки частоты с погрешностью $10^{-6} - 10^{-7}$ за время, значительно меньшее, чем требует метод дискретного счета.

При приближении к нижней границе диапазона рабочих частот погрешность оценки частоты сигнала определяется числом периодов колебаний, попавшим во временной интервал сбора дискретизированных данных. Общий объем выборки практически не влияет на точность. Снизить погрешность примерно на порядок позволяет отказ от процедуры «вырезания» первой гармоники, однако в этом случае можно работать только с синусоидальными сигналами.

3.6. Восстановление сигнала в частотной области

Рассмотрим полосу рабочих частот при восстановлении сигнала в частотной области по его выборкам с постоянным шагом дискретизации. При этом важным является соотношение частот сигнала $f_{\text{сmax}}$ и дискретизации f_{δ} .

Метод восстановления в полосе Котельникова

В этом методе частота дискретизации выше максимальной рабочей частоты или гармоники сигнала, а именно $f_{\delta} > 2f_{\text{сmax}}$. При этом теоретически можно восстановить сигнал без искажений, если массив собранных данных позволяет получить все его спектральные компоненты. Будем далее называть его методом дискретизации по Котельникову (МДК), он может накладываться и перекрывать полосу рабочих частот метода интерполяции сигнала (МИС) в низкочастотной области, что позволяет путем выбора или комбинирования оптимизировать обработку массива полученных цифровых данных как по частоте, так и во времени.

Восстановление по Котельникову возможно только после получения всех точек исследуемой кривой, т.е. путем вычислительной процедуры, примененной к массиву данных, собранных в требуемом объеме.

При этом восстановить сигнал без искажений можно как во временной области, воспользовавшись рядом Котельникова, так и в частотной области методами спектрального анализа сигнала, базирующимися на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ).

Последнее проработано более глубоко, что обусловлено целым рядом преимуществ ДПФ, в том числе наличием готовых математических решений на уровне подпрограмм и функций, реализованных и адаптированных для конкретных процессоров и языков программирования высокого уровня. Задачи анализа и восстановления сигнала спектральными методами имеют различные варианты решения в зависимости от целей и объема выборки, числа периодов сигнала, на которых сделана выборка, и т.д. Спектр сигнала на выходе АЦП должен быть расположен в диапазоне частот от 0 до $f_s/2$.

Если работа осуществляется в высокочастотной части МДК, тогда число точек дискретизации на период сигнала невелико и для получения заданного объема выборки приходится осуществлять сбор данных на большом числе периодов. В общем случае частота измеряемого сигнала неизвестна, поэтому преобразование Фурье должно осуществляться на нецелом числе периодов, что приводит к известному явлению «растекания» спектра. Для уменьшения растекания необходимо наложить на массив полученных дискретных отсчетов временное прямоугольное окно (Ханна, Хемминга, Кайзера или др.).

При расчетах учесть растекание можно путем уменьшения сверху и снизу границ допустимых рабочих частот на величину bf_s/N . С учетом растекания спектра скорректированная верхняя граница рабочих частот будет $f_s/2 - bf_s/N$. Величина b показывает, на какое число спектральных составляющих растекается спектр, а также минимально допустимое количество периодов сигнала в окне преобразования. Для получения достаточной точности необходимо до 10 периодов сигнала или огибающей и более, если сигнал модулированный.

Когда сбор данных осуществляется в низкочастотной части МДК, тогда число точек дискретизации на период сигнала может быть большим. При необходимости можно реализовать процедуру прореживания числа точек в заданное число раз. В этом случае нижняя рабочая граница частот равна bf_s/N . Минимальная рабочая частота сигнала f_{cmin} может быть достаточно низкой, поскольку даже ес-

ли АЦП имеет ограничение по выбору $f_{\text{дmin}}$, в процессе обработки можно данные прореживать. Для допустимых значений максимального времени сбора данных $T_{\text{сдmax}}$ и минимального объема выборки N_{min} получим неравенство $f_{\text{сmin}} > N_{\text{min}} / T_{\text{сдmax}}$.

Однако если имеется утечка, то необходимо дополнительно учесть диапазон растекания по частоте $bf_{\text{д}}/N$, который тем уже, чем больше объем выборки, поэтому одним из способов расширения диапазона рабочих частот может быть увеличение объема выборки. Чтобы в сетке частот ДПФ была основная компонента сигнала с учетом растекания, необходимо, чтобы $f_{\text{сmin}} > bf_{\text{д}} / N_{\text{min}}$.

Метод несинхронизированного стробирования

Период дискретизации в этом методе может принимать значения в широких пределах кроме некоторых «кратных» величин, в том числе он не должен быть равен целому числу полупериодов сигнала. При каждом повторении целого числа периодов сигнала интервал восстановления при стробировании сдвигается во времени таким образом, чтобы получить массив неповторяющихся данных мгновенных значений сигнала без какой-либо обязательной временной последовательности.

В методе несинхронизированного стробирования (МНС) или нелинейной трансформации временного и частотного масштаба каждая точка восстановленного сигнала получается в результате реализации вычислительных процедур. МНС может накладываться и перекрывать полосу рабочих частот метода синхронизированного стробирования (МСС), что позволяет путем выбора или комбинирования оптимизировать обработку массива полученных цифровых данных как во времени, так и по частоте.

Восстановить сигнал без искажений можно как во временной области путем вычислительной перестановки отсчетов (см. часть 1), так и в частотной области методами спектрального анализа сигнала, базирующимися на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ).

Верхняя граница рабочих частот в МНС определяется теми же требованиями, что и для метода синхронизированного стробирования (МСС), т.е. она, прежде всего, зависит от времени выборки АЦП. Нижняя граница диапазона частот при работе во временной области такая же, как в МСС.

Учесть растекание компонент спектра можно путем сужения рабочего диапазона на величину bf_{δ}/N_{\min} .

Принципиальным является то, что в МНС все спектральные линии преобразованного сигнала должны попасть в диапазон $0 < f_{np} < f_{\delta}/2$, не накладываясь друг на друга. На рис. 3.3 показан АМ-сигнал и особенности его преобразования на двух отличающихся частотах дискретизации АЦП при условии, что имеются нелинейные искажения несущей, которая представлена первой и второй гармониками f_{c1} и f_{c2} .

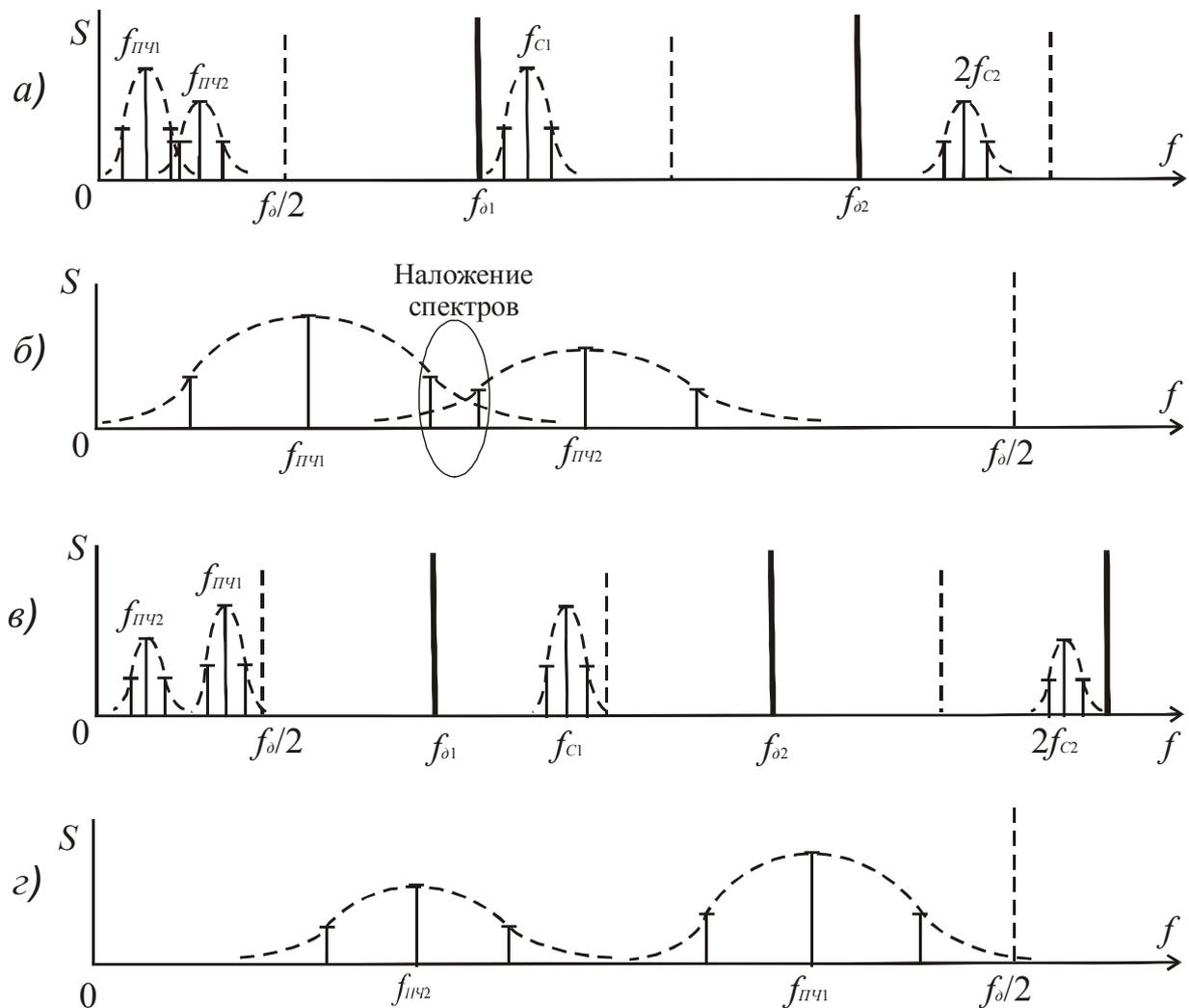


Рис. 3.3

На рис. 3.3, а и 3.3, б приведены спектры для такой частоты дискретизации АЦП, при которой реализуется линейное стробоскопическое преобразование, когда все частотные компоненты сигнала

трансформируются в область промежуточных частот с одинаковым сжатием временного и частотного масштабов. Однако на данной частоте дискретизации $f_{\partial 1}$ имеется зона очень близкого расположения соседних спектральных компонент, и они могут накладываться друг на друга, что не позволяет правильно восстановить сигнал и оценить его характеристики.

На рис. 3.3, в и 3.3, г приведены спектры для другой частоты дискретизации АЦП, при которой реализуется нелинейное стробоскопическое преобразование, когда частотные компоненты сигнала трансформируются в область промежуточных частот с неодинаковым сжатием временного и частотного масштабов. Для новой $f_{\partial 2}$ нет близко расположенных спектральных компонент, что позволяет правильно оценить характеристики сигнала. Следует заметить, что аналогичное взаимное проникновение компонент спектра может возникать и тогда, когда сигнал не модулирован, но имеется растекание спектра по сетке частот дискретизации с шагом f_{∂}/N .

Верхняя граница рабочих частот в МНС определяется теми же требованиями, что и для МСС, т.е. она, прежде всего, зависит от времени выборки АЦП. В МНС менее жесткие требования к диапазону и шагу перестройки f_{∂} , кроме того, при изменениях частоты сигнала не обязательно перестраивать частоту дискретизации, т.е. инструментальные требования упрощаются и повышается быстродействие на аппаратном уровне. При восстановлении в частотной области необходимо учесть растекание компонент спектра путем соответственного сужения рабочего диапазона на величину bf_{∂}/N_{\min} .

Нижняя граница диапазона частот при работе во временной области такая же, как в МСС. Учесть растекание компонент спектра можно путем сужения рабочего диапазона на величину bf_{∂}/N_{\min} .

Методы оценки параметров радиосигналов с переходом в частотную область позволяют применить вычислительные алгоритмы «очистки» неидеального сигнала от высших гармоник, шумов и паразитной модуляции. Кроме того, при оценке параметров можно использовать всю базу полученных дискретных отсчетов, т.е. реализовать обработку без потерь данных, которые неизбежны для временных методов, в частности для метода многоуровневого интерполирования.

В общем случае преобразование Фурье при неизвестной частоте сигнала осуществляется на нецелом числе периодов, поэтому для

уменьшения явления растекания спектра необходимо накладывать на массив полученных дискретных отсчетов временное прямоугольное окно. При этом для минимизации явления растекания приходится увеличивать базу данных не за счет числа отсчетов, а за счет числа периодов сигнала, что требует увеличения времени сбора информации.

При решении практических задач часто используются окна Кайзера, Хэмминга, Ханна, Flat-top, Блэкмана и т.д. Существуют также комбинированные типы окон, такие как окно Блэкмана – Харриса, Кайзера – Бэсселя и т.д.

3.7. Использование оконных функций

Известно, что если в интервал выборки АЦП попадает нецелое число периодов сигнала, на границах образуются разрывы, приводящие к появлению дополнительных спектральных компонент в частотной области. Это явление описывается в литературе как спектральная утечка. Для уменьшения влияния спектральной утечки принимаются специальные меры, основанные на предварительном сглаживании временной последовательности, что достигается умножением всех отсчетов сигнала на весовые коэффициенты специальной функции, называемой окном. Известно большое разнообразие окон, отличающихся по степени сглаживания, разрешающей способности и т.д.

Примеры временных окон

1. Окно Кайзера ($\beta \in [12,15]$). Временные и частотные характеристики окна представлены на рис. 3.4 и 3.5. Окно описывается выражением

$$\omega(n) = \frac{\left| I_0 \left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n - N - 1}{N - 1} \right)^2} \right) \right|}{I_0(\beta)},$$

где I_0 – модифицированная функция Бэсселя первого рода нулевого порядка; β – коэффициент, определяющий долю энергии, сосредоточенной в главном лепестке спектра оконной функции; N – количество точек массива оконной функции (ширина окна); n – индекс массива, $0 \leq n \leq N-1$.

2. Окно Хэмминга: $\omega(n) = 0,53836 - 0,46164 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$,

где N – количество точек массива оконной функции (ширина окна);
 n – индекс массива, $0 \leq n \leq N - 1$.

3. Окно Ханна: $\omega(n) = 0,5 - \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right)$,

где N – количество точек массива оконной функции (ширина окна);
 n – индекс массива, $0 \leq n \leq N - 1$.

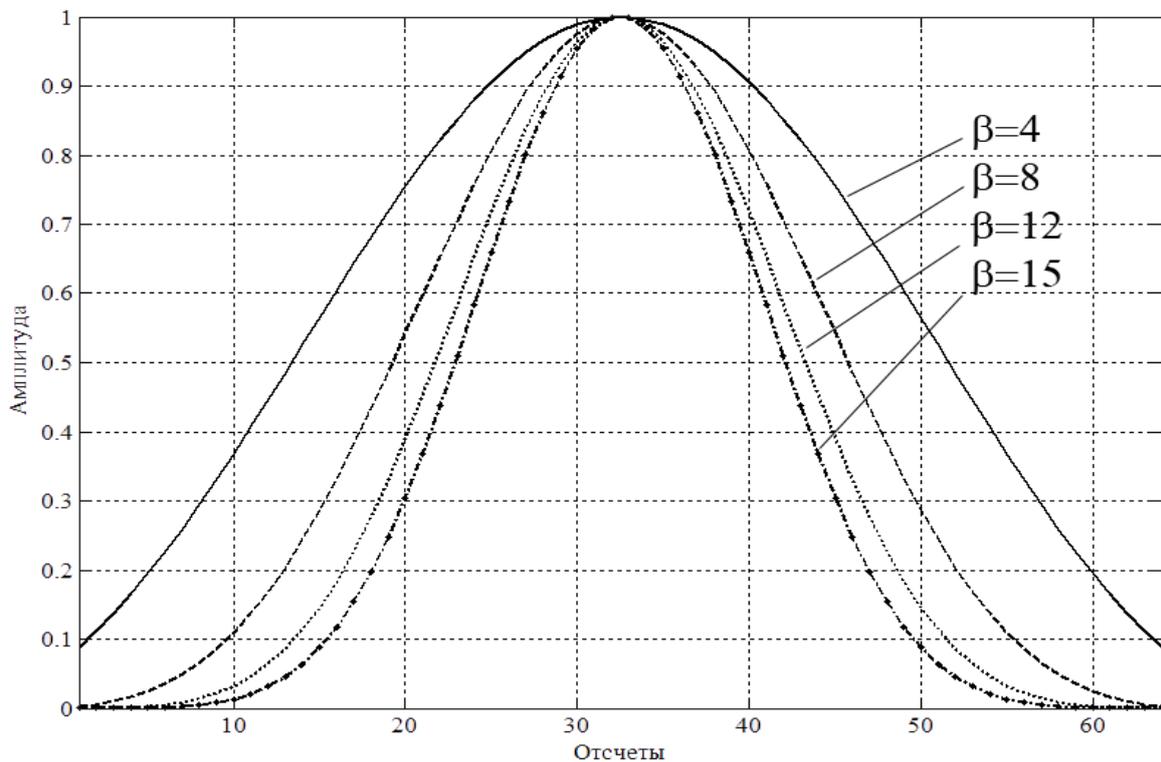


Рис. 3.4

Правильный выбор окна важен во всех основанных на ДПФ измерениях. Если в диапазон выборки АЦП укладывается целое количество периодов исходного сигнала, его частотные компоненты точно соответствуют сетке частот ДПФ, и ненулевым будет только главный лепесток, влияние боковых лепестков минимально, так как их нули находятся в сетке боковых частот. Однако, если выборка содержит нецелое число периодов исходного сигнала, в его спектре появляются боковые лепестки, обусловленные сдвигом между компонентами сигнала и сеткой частот ДПФ. Смещением главного лепестка объясняют-

ся и амплитудные искажения основных компонентов сигнала. Характеристики боковых лепестков непосредственно влияют на степень наложения друг на друга компонент соседних частот.

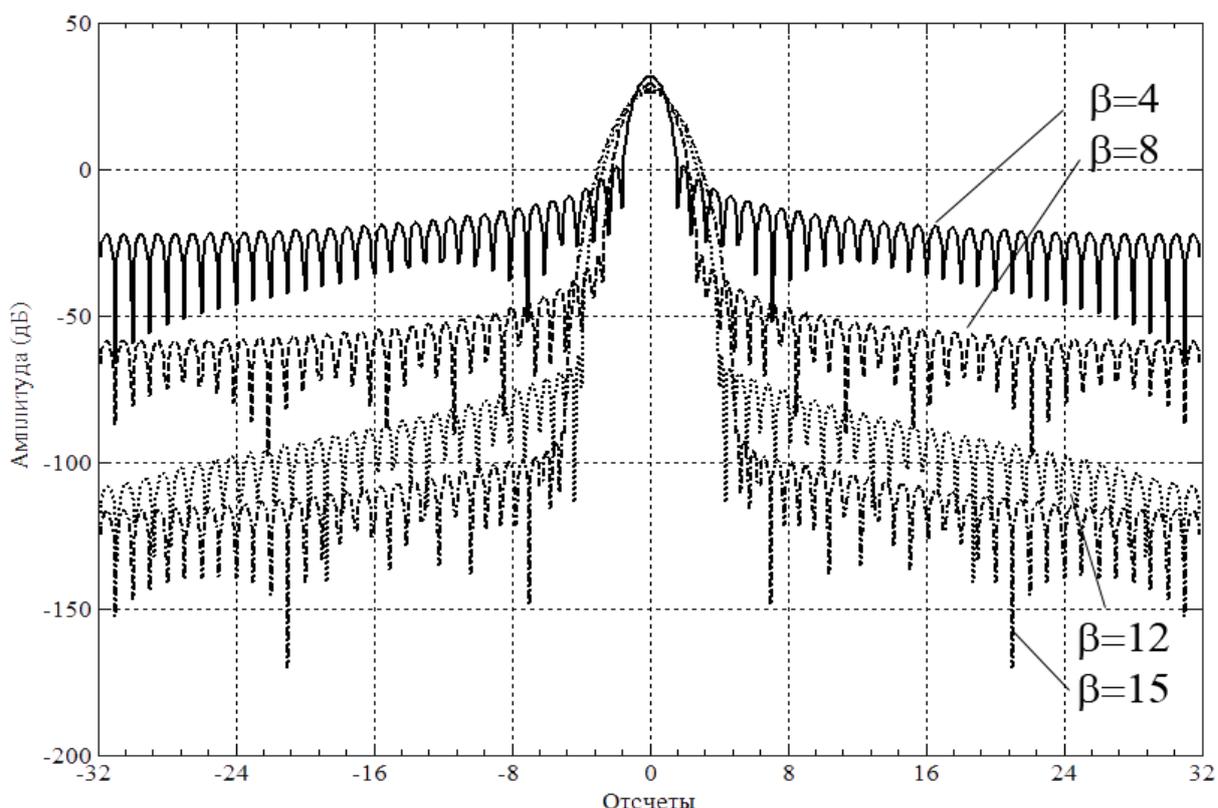


Рис. 3.5

При сужении главного лепестка увеличивается способность окна различать близко расположенные частотные компоненты. Обычно форма главного лепестка определяется его шириной на уровнях -3 и -6 дБ. Боковые лепестки отличаются скоростью спада характеристики и максимальным уровнем, т.е. отношением, в децибелах, пиков главного и бокового лепестков. Характеристики некоторых окон представлены в табл. 3.1. Если сигнал содержит частотные компоненты с сильной помехой, отдаленные от частоты, представляющей интерес, выбирают окно с наибольшей скоростью спада характеристики. Если имеются сильные сигналы помехи около частоты, представляющей интерес, стараются выбрать окно с низким максимальным уровнем боковых лепестков.

В табл. 3.2 приведены рекомендуемые окна в зависимости от вида входного сигнала.

Таблица 3.1

Окно	Ширина главного лепестка на уровне		Максимум бокового лепестка (dB)	Скорость затухания (dB /decade)
	-3 dB	-6 dB		
Прямоугольное	0,89	1,21	-13	20
Ханна	1,44	2,00	-31	60
Хэмминга	1,30	1,81	-43	20
Blackman-Harris	1,66	1,81	-71	20
Blackman	1,68	2,35	-58	60
Flat Top	2,94	3,56	-93	20

Таблица 3.2

Вид сигнала	Окно
Синусоида или комбинация синусоид	Hann
Синусоида (амплитудная точность важна)	Flat Top
Узкополосный случайный сигнал	Hann
Широкополосный (белый) шум	Uniform
Близко расположенные синусоиды	Uniform, Хэмминг
Неизвестный сигнал	Hann

Так как не существует никакого универсального подхода, то приведенные таблицы могут лишь помочь в начальном выборе, который основан на особенностях сигнала.

Известно, что если стоит задача оценить спектр с высоким разрешением, нецелесообразно использовать окна, характеристика которых резко падает к нулю на границах диапазона. Однако в случае измерения параметров модуляции, когда необходимо оцифровывать более 5 периодов медленного модулирующего колебания, наименьшую погрешность дают окна, позволяющие сосредоточить максимум энергии в основном лепестке, такие как окно Кайзера с параметром $\beta \geq 10$. Наименьшее значение погрешности определения девиации частоты достигается при использовании окна Кайзера с коэффициентом $\beta = 15$, при значении параметра $b > 5$.

3.8. Синтез сигналов

В соответствии с типовыми методиками при проведении испытаний радиотехнических устройств и систем на их входы требуется подавать различные сигналы: немодулированный сигнал при оценке

усиления несущей; одночастотный модулированный – при измерении чувствительности; двухчастотный – при измерении избирательности по соседним и побочным каналам приема; трехчастотный – при измерении интермодуляционной избирательности и др.

Комплект генераторов приборно-модульной СКИМ может содержать три генератора высоких частот и два генератора низких модулирующих частот. Современные технологии виртуальных приборов позволяют заменить все пять генераторов одним управляемым программно-виртуальным генератором (ВГ).

Для построения ВГ испытательных сигналов достаточно оснастить ПК цифроаналоговым преобразователем (ЦАП), платой фильтров (рис. 3.6) и специализированными программными средствами формирования сигналов управления ЦАП. Синтезироваться могут как простые сигналы (гармонические, пилообразные, треугольные, прямоугольные, ступенчатые и др.), так и сигналы сложных форм и видов модуляции (частотной, однополосной, комбинированной и др.).

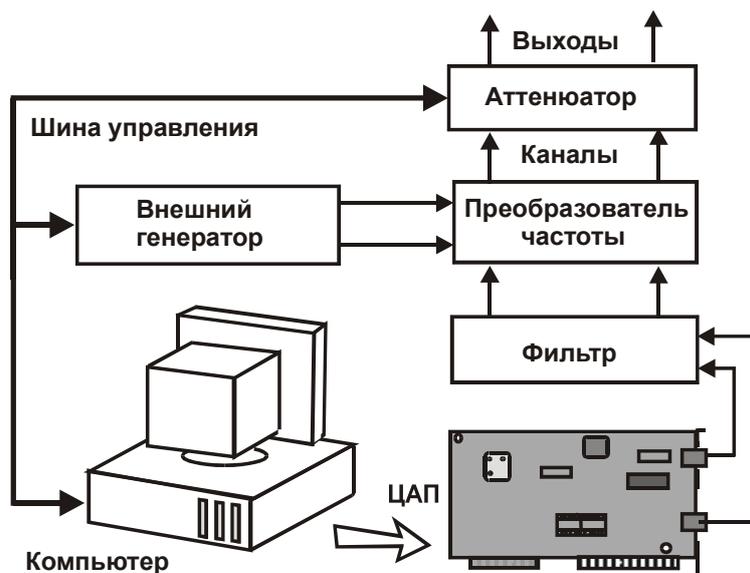


Рис. 3.6

Например, в соответствии с типовыми методиками при проведении испытаний радиостанций на вход приемника требуется подавать:

- одночастотный модулированный сигнал при измерении чувствительности;
- двухчастотный сигнал при измерении избирательности по соседним и побочным каналам приема;

- трехчастотный сигнал при измерении интермодуляционной избирательности.

Платы ЦАП позволяют превратить ПК в функциональный многоканальный генератор, частотный и динамический диапазоны которого определяются выбранным ЦАП. Как правило, автономные генераторы имеют один рабочий канал, а у виртуального прибора их может быть несколько. При этом можно создавать комбинированные сигналы непосредственно в одном рабочем канале, синтезируя их во временной или частотной областях.

Современные технологии виртуальных приборов позволяют заменить все пять генераторов одним управляемым программно-компьютерным виртуальным генератором.

Преимущества виртуальных генераторов сигнала следующие.

1. Виртуальный генератор может формировать любой сигнал от одиночного импульса до модулированных сигналов и кодовых последовательностей, вычисляемых в процессе вывода. Возможно прецизионное формирование сигналов инфранизких частот и комбинированных сигналов с заданным распределением шумов. Ограничений по сложности форм и последовательностей нет, если есть математическая модель.

2. Виртуальный генератор позволяет задавать любой программно-регулируемый сдвиг фазы и сдвиг частот между сигналами разных каналов. Один из каналов может модулировать частоту другого, а форма сигналов для каждого канала при этом задается произвольно.

3. Виртуальный генератор имеет возможность адаптивного изменения параметров в экспериментах со следящей обратной связью. Это дает возможным создавать устройства и системы автоматического управления с использованием возможностей ПК.

Достоинством ВГ цифровых сигналов является возможность работы в многоканальном методе с определением основных параметров цифрового бинарного канала: BITS (количество ошибочных битов), BER (параметр ошибки по битам) и ES (количество секунд, пораженных ошибками). Поскольку математическая модель сигнала синтезируется в ПК, то о ней имеется полная информация, позволяющая оценить все параметры даже в методе случайного синтеза тестовой последовательности.

Аппаратно-программный комплекс “Signal_Generator”

Комплекс обеспечивает двухканальный синтез одночастотных и многочастотных радиосигналов в реальном времени путем задания математических выражений их законов изменения. Каналы формирования имеют общую синхронизацию, что позволяет генерировать сигналы с заданным сдвигом по фазе или времени. Имеется дополняемая пользователем библиотека готовых сигналов с гибкими возможностями ее редактирования.

После запуска программы на экран выводится рабочий интерфейс, который содержит редактируемые поля для ввода формул из базы данных или записи оригинальных математических выражений. При работе с библиотекой можно добавить новую форму, выбрать готовый вариант или редактировать уже представленный сигнал. Примеры синтеза сигнала по его математической записи показаны на рис. 3.7 – 3.9.

Для описания синтезируемого сигнала используются стандартные функции синуса и косинуса, а также специальные функции *Step* и *Wrap*. Для задания переменной используется символ @. Введенные за ним символы являются именем переменной.

Примеры описания периодических сигналов

Гармонический сигнал (см. рис. 3.7)

При описании гармонических сигналов используются стандартные функции $\text{Sin}(\omega t + \varphi)$ или $\text{Cos}(\omega t + \varphi)$, где ω – круговая частота; φ – начальная фаза. С учетом сформулированных выше требований гармонический сигнал можно записать в виде следующего выражения:

$$\text{Sin}(2 * \text{Pi} * @\text{Freq} * t + \text{Pi} * @\text{Phase} / 180),$$

где *Freq* и *Phase* – значения частоты и начальной фазы соответственно.

Управление по амплитуде позволяет сформировать амплитудно-модулированный и амплитудно-манипулированный сигналы (см. рис. 3.8).

Сигнал с однотоновой угловой модуляцией

Приведем запись ЧМ сигнала при гармонической модуляции:

$$\text{Sin}(2 * \text{Pi} * @\text{Freq} * t + @m\text{FM} * \text{Sin}(2 * \text{Pi} * @\text{Freq}\text{FM} * t)),$$

где *Freq* – несущая частота; *mFM* – индекс угловой модуляции; *FreqFM* – фазовая модулирующая частота.

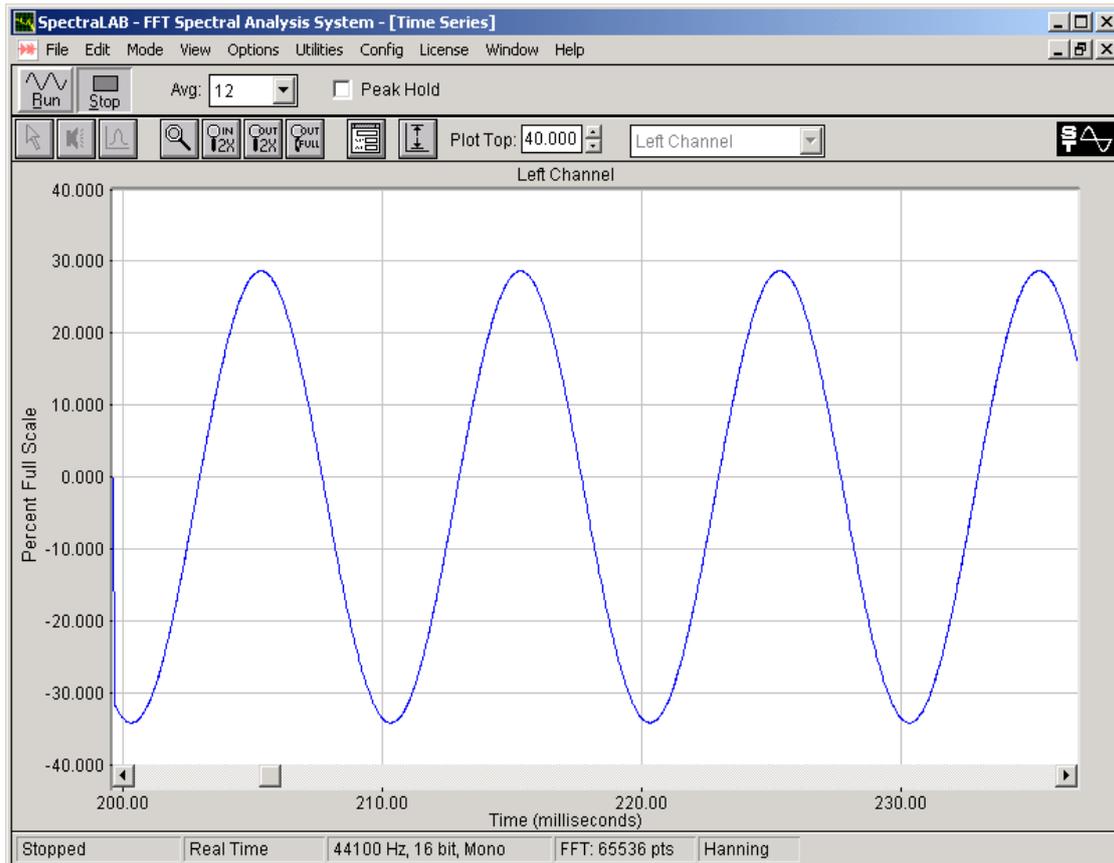


Рис. 3.7

Комбинация двух АМ сигналов с двумя несущими частотами

Для формирования двух АМ сигналов без учета их начальных фаз можно использовать выражение

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi f_1 t) (1 + M_1 \sin(2\pi F_1 t)) + \\ & + \sin(2\pi f_2 t) (1 + M_2 \sin(2\pi F_2 t)), \end{aligned}$$

где f_1 и f_2 – несущие частоты сигналов; F_1 и F_2 – модулирующие частоты; M_1 и M_2 – коэффициенты АМ сигналов.

Сигнал с амплитудной и частотной модуляцией (АМ и ЧМ)

Комбинированный АМ и ЧМ сигнал можно представить в виде (см. рис. 3.8):

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi f_{c1} t + m_{FM} \sin(2\pi f_{FM} t)) * \\ & * (1 + M \sin(2\pi f_{c2} t)), \end{aligned}$$

где f_{c1} – несущая частота; m_{FM} – индекс модуляции; f_{FM} – модулирующая частота ЧМ; M – коэффициент АМ; f_{c2} – частота огибающей АМ.

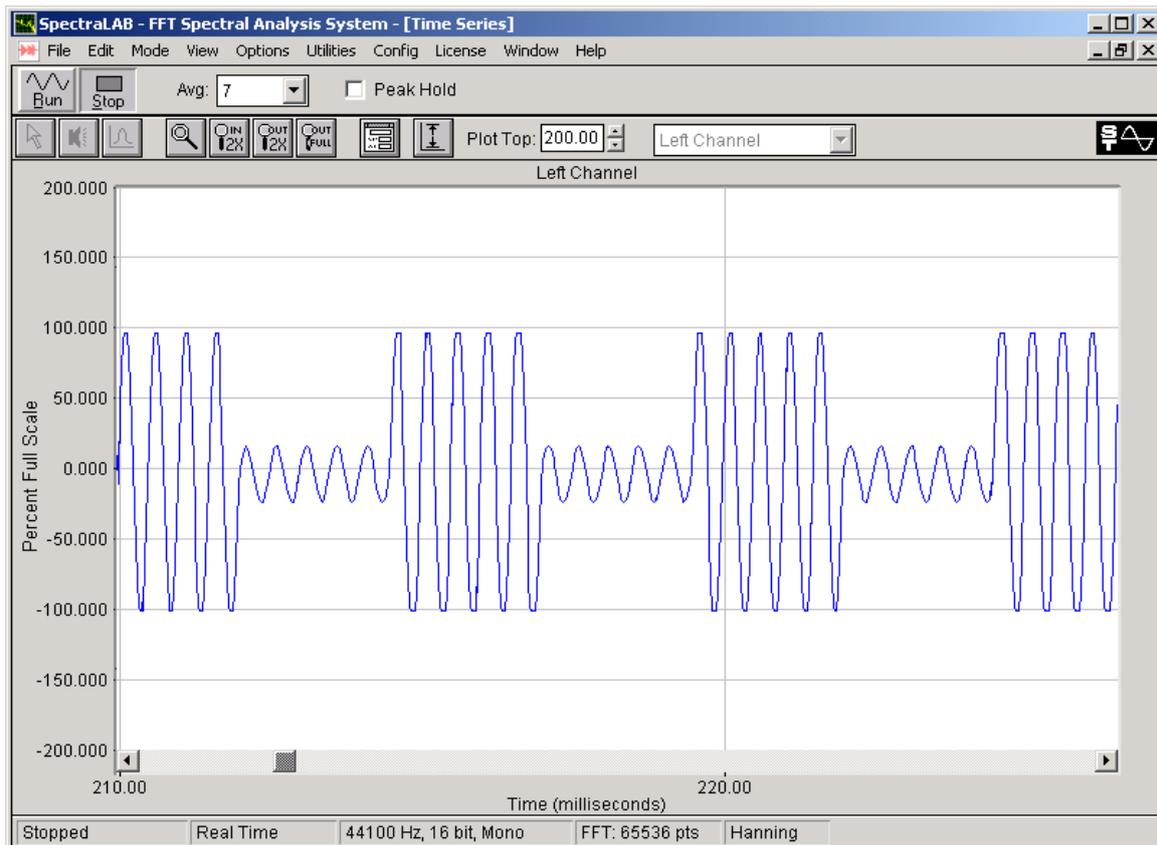


Рис. 3.8

Комбинация двух АМ сигналов с двумя несущими частотами

Для формирования двух АМ сигналов без учета их начальных фаз можно использовать выражение

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi f_1 t) (1 + M_1 \sin(2\pi F_1 t)) + \\ & + \sin(2\pi f_2 t) (1 + M_2 \sin(2\pi F_2 t)), \end{aligned}$$

где f_1 и f_2 – несущие частоты сигналов; F_1 и F_2 – модулирующие частоты; M_1 и M_2 – коэффициенты АМ сигналов.

Сигнал с амплитудной и частотной модуляцией (АМ и ЧМ)

Комбинированный АМ и ЧМ сигнал можно представить в виде (см. рис. 3.9):

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi f_{req1} t + m_{FM} \sin(2\pi f_{reqFM} t)) * \\ & * (1 + M \sin(2\pi f_{req2} t)), \end{aligned}$$

где f_{req1} – несущая частота; m_{FM} – индекс модуляции; f_{reqFM} – модулирующая частота ЧМ; M – коэффициент АМ; f_{req2} – частота огибающей АМ.

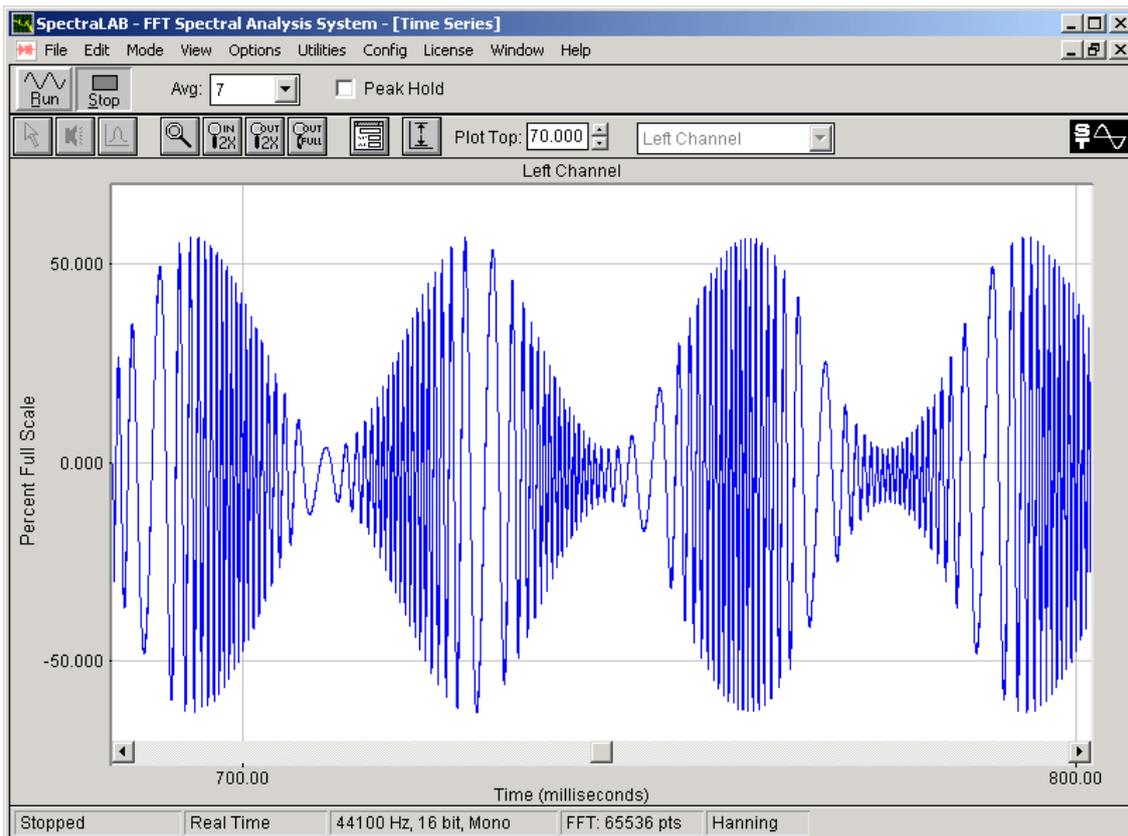


Рис. 3.9

Аналогично в виде математических выражений могут быть записаны другие сигналы и их комбинации.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ПОВЕРОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

4.1. Универсальные частотомеры

Цели и задачи исследований

Уровень 1. Изучить виртуальный частотомер – принцип его 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.

Назначение и принципы действия

Частотомёр (неправильно частотометр) – 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 гигагерц) 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.

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

ПРИМЕРЫ: ЧЗ-33, ЧЗ-54, ЧЗ-57, ЧЗ-84.

В основе работы серийных автономных электронно-счетных частотомеров 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. 4.1 и 4.2) измеряемого интервала Δt_x с дискретным интервалом, воспроизводящим единицу времени, $T_{обр} = T_{сч}$. Оценивается, во сколько раз измеряемый интервал Δt_x больше $T_{сч} = 1/F_{сч}$.

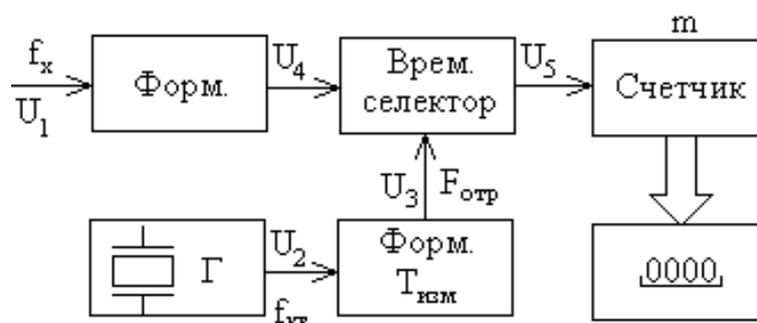


Рис. 4.1

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

$$f_x = m / T_{обр} = mF_{обр}.$$

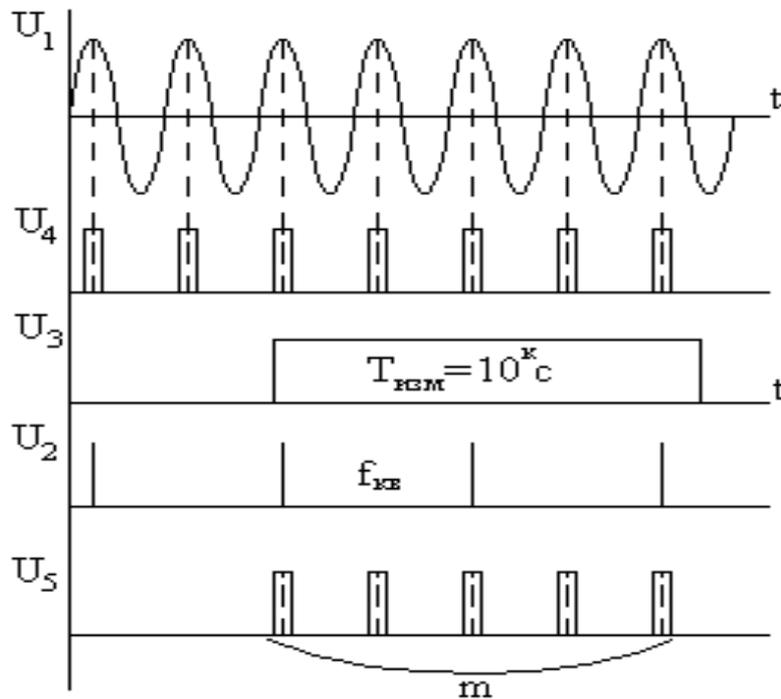


Рис. 4.2

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

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

Погрешность дискретизации при измерении НЧ может быть очень большой. Например, для $f_x = 5\text{Гц}$ и $T_{обp} = 1\text{с}$ 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.

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

му целесообразно использование МПС. В обоих методах оценка неизвестной частоты оценивается по формуле $f_x = nf_{\text{гет}} \pm f_{\text{пч}}$, но в методе переносчика частот $f_{\text{пч}} = \text{const}$ (может быть $f_{\text{пч}} = 0$), а $f_{\text{зем}} = \text{var}$, в методе дискретного гетеродинного преобразования $f_{\text{пч}} = \text{var}$, а $f_{\text{зем}} = \text{const}$.

В виртуальных частотомерах могут применяться методы обработки дискретизированных сигналов как во временной области, так и в частотной. 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 в двух независимых каналах измерение частоты, периода, отношения частот и периодов, разности частот и периодов.

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 4 двухканальных виртуальных прибора:

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 шумов и при их наличии.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Внешний вид программной оболочки на экране монитора представлен на рис. 4.3. Выходные сигналы ГС 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 нуж-

ный режим работы. Приборы имеют входные клеммы и кнопку «Питание» или «Сеть» для включения.

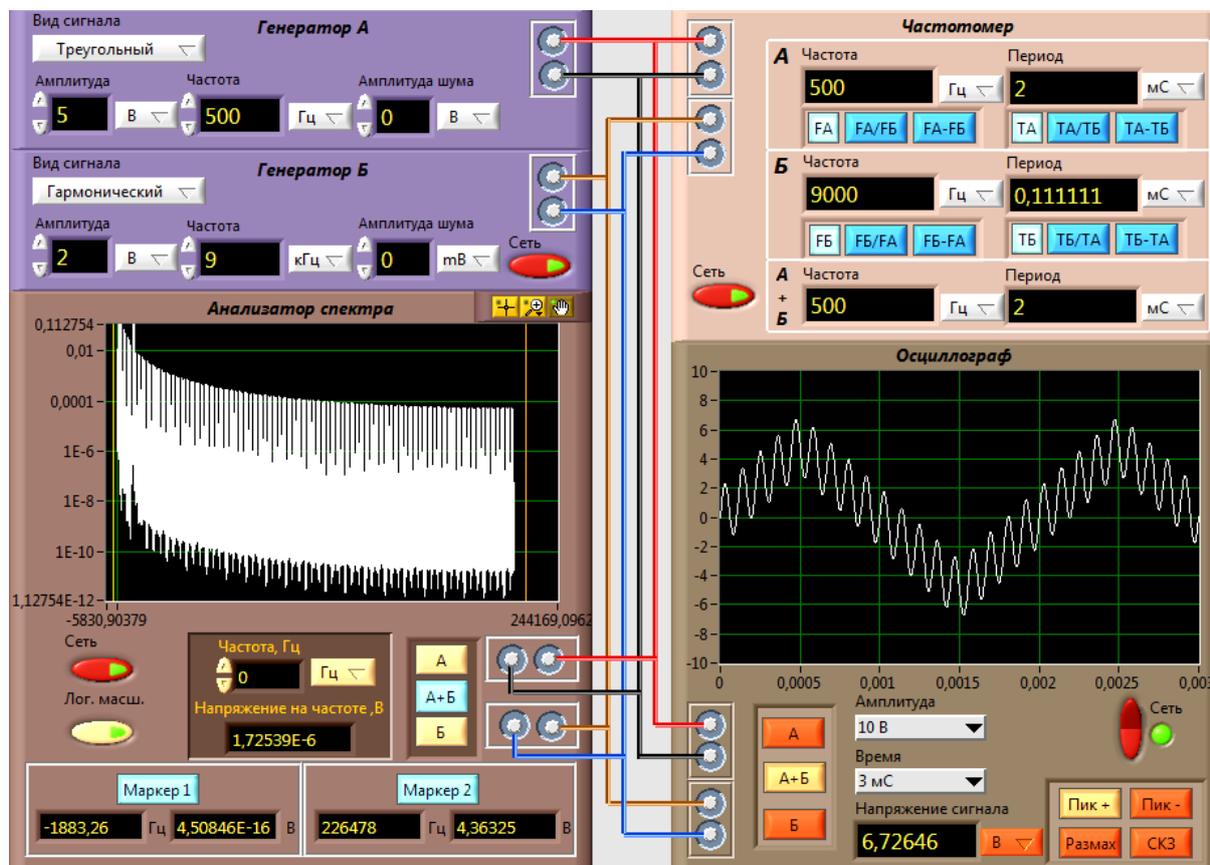


Рис. 4.3

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).

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 устанавливаются вид сигнала, его амплитуда, частота и уровень шума (рис. 4.4).



Рис. 4.4

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 (вольт, милливольт...) выбирается пользователем.

Окно ввода «**Частота**» служит для задания частоты генерируемого сигнала, в герцах. Установка осуществляется аналогично точной установке амплитуды шума. Частота устанавливается в пределах от 10 до 50 000 Гц.

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

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

Осциллограф (рис. 4.5)

Прибор применяется для визуального контроля формы сигнала.

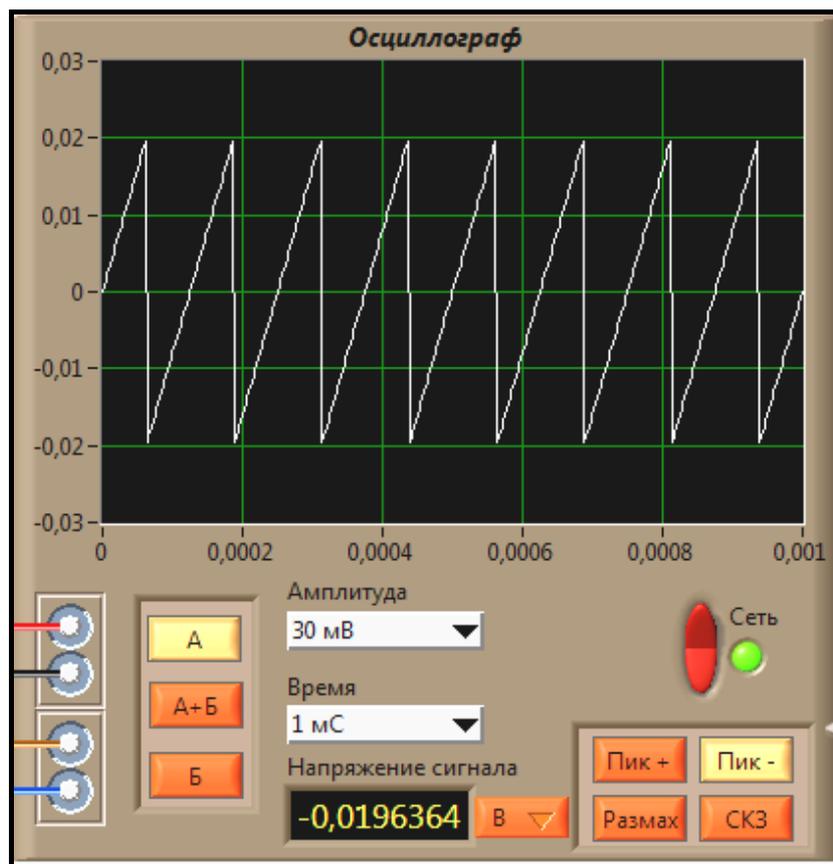


Рис. 4.5

На передней панели 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).

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

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 (рис. 4.6)

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.

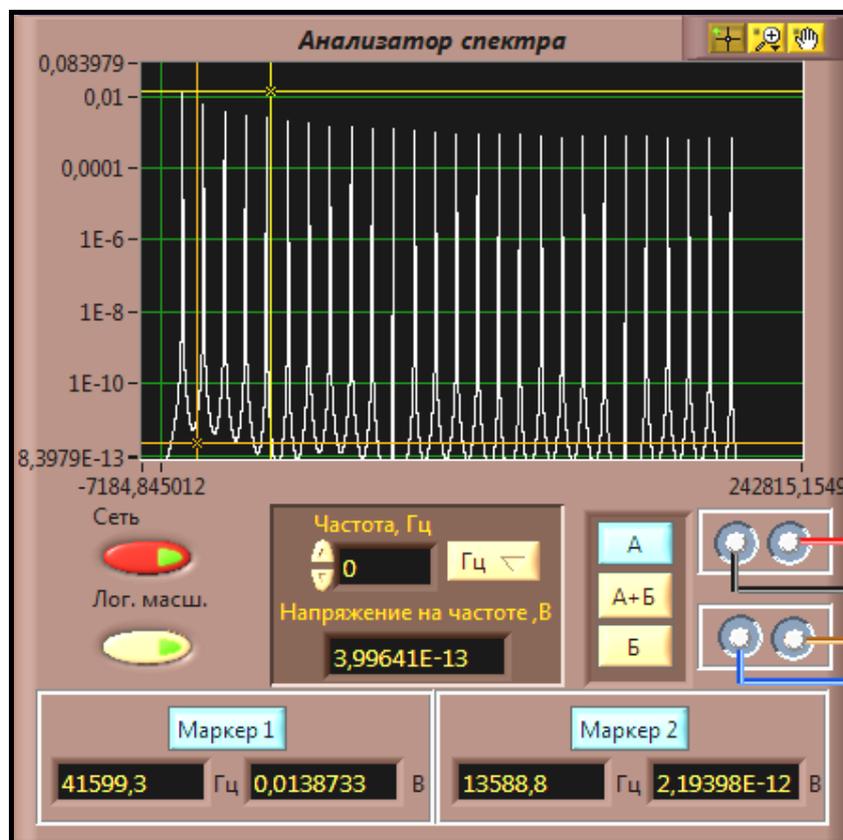


Рис. 4.6

Прибор имеет кнопку «Лог. масш.» для переключения отображения вертикальной оси в линейном или логарифмическом масштабе.

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;



– полное отображение графика;



– приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;



– отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Частотомер (рис. 4.7)

Частотомер (Ч) позволяет измерять частоту, период, а также соотношение частот и периодов в двух идентичных каналах «А» и «Б».

В нижнем сегменте передней панели частотомера 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.

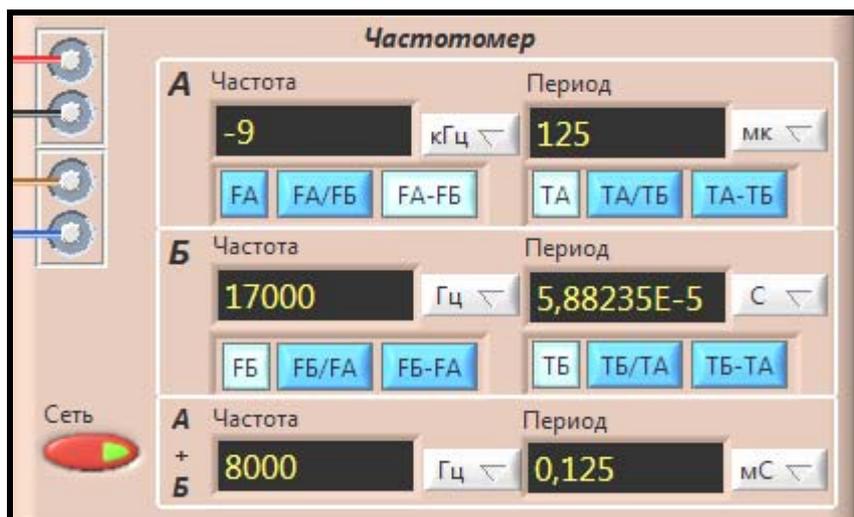


Рис. 4.7

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**».

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

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

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 мин в начале, середине и 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, а именно:
 - погрешностей измерения;
 - 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 помехам контроль уровней и близость по частоте измеряемой и паразитной составляющих следует осуществлять с помощью АС.

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.

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. Какие измерения можно проводить с помощью исследуемого Ч?
6. Как работает виртуальный Ч?
7. Когда нужны двухканальные Ч?
8. Какие приборы использовались при исследованиях и для чего?
9. Какие органы управления имеет Ч?
10. Что показали пробные измерения?

Дополнительные вопросы для уровня 2

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

Дополнительные вопросы для уровня 3

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

4.2. Аналоговые вольтметры

Цели и задачи исследований

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

Уровень 2. Применить аналоговый вольтметр 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.

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 – основные приборы 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) значения (СКЗ).

ПРИМЕРЫ: В4-24, В3-49, В3-63

В настоящее время разработаны новые типы вольтметров, такие как В7-83 и ВКЗ-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 аналоговые вольтметры разделяются на электромеханические и электронные. 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

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

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_i) и постоянной составляющей (U_o) сигнала:

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

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 (СКЗ) определяется коэффициентом амплитуды

$$K_a = U_m / U_{СК}.$$

Связь среднеквадратического значения и средневыпрямленного определяется коэффициентом формы

$$K_\phi = U_{СК} / U_{cp}.$$

Для гармонического закона $K_{aг} = 1,41$; $K_{\phiг} = 1,11$.

Для пилообразного $K_{aп} = 1,73$; $K_{\phiп} = 1,16$.

Для меандра $K_{aм} = 1$; $K_{\phiм} = 1$.

Типовая структурная схема вольтметра приведена на рис. 4.8.

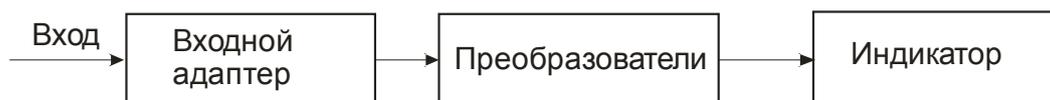


Рис. 4.8

Электромеханические амперметры и вольтметры – распространенный класс приборов непосредственной оценки. Используется как отдельно для измерения тока и напряжения, так и в качестве выходного преобразователя и отсчетного устройства большинства аналоговых РИП.

В зависимости от вида преобразования и принципа действия их делят на следующие системы:

- магнитоэлектрические, основанные на взаимодействии рамки с током и поля постоянного магнита;
- электродинамические, использующие силы взаимодействия подвижной и неподвижной катушек с током;
- электромагнитные, основанные на взаимодействии ферромагнитного сердечника с неподвижной катушкой;
- электростатические, основанные на взаимодействии электрически заряженных тел;
- и другие.

Электромеханические приборы с преобразователями применяются для различных аналоговых измерений, а также в качестве индикаторных устройств. Преобразователи расширяют пределы измерений и возможности электромеханических приборов. Комплектуя электромеханические приборы переключаемыми шунтами и добавочными сопротивлениями, строят многофункциональные приборы – мультиметры.

В виртуальных вольтметрах могут применяться методы обработки дискретизированных сигналов как во временной, так и в частотной областях. Во временной области используются методы численного интегрирования, в частотной – алгоритмы БПФ. Лабораторный виртуальный аналоговый вольтметр (АВ) позволяет измерять среднеквадратическое переменное напряжение произвольной формы в диапазоне от 30 мВ до 300 В и диапазоне частот 10 – 10 000 Гц.

Проверку вольтметра можно осуществлять по эталонным мерам (эталонному генератору – калибратору), эталонному прибору (образ-

цовому ЦВ) или эталонному прибору и эталонным мерам (если прибор имеет недостаточно широкий диапазон измерений). Прибор считается образцовым (эталонным), он измеряет переменное напряжение произвольной формы.

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 4 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 выбранными 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. 4.9. Сигнал ГС подан одновременно на входы всех приборов.

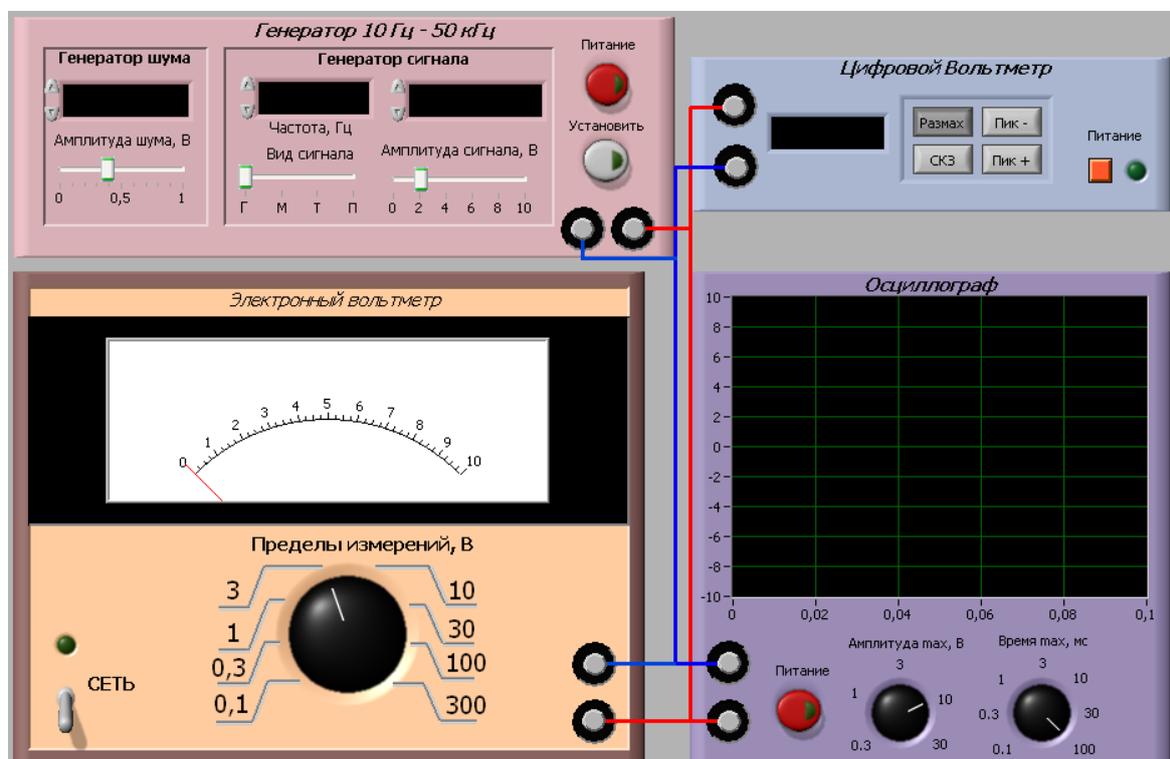


Рис. 4.9

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.

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

Генератор сигналов (ГС)

ГС состоит из двух модулей: «Генератор шума» и «Генератор сигнала» (рис. 4.10). 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. 4.10

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 до 50 000 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 грубой и точной установки амплитуды сигнала в пределах от 0 до 10 В соответственно. Методика установки аналогична методике для генератора шума.

Цифровой вольтметр

Вольтметр имеет статус образцового СИ и реализует 4 режима измерения (рис. 4.11) с индикацией:

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

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

«**Размах**» – размаха сигнала;

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

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

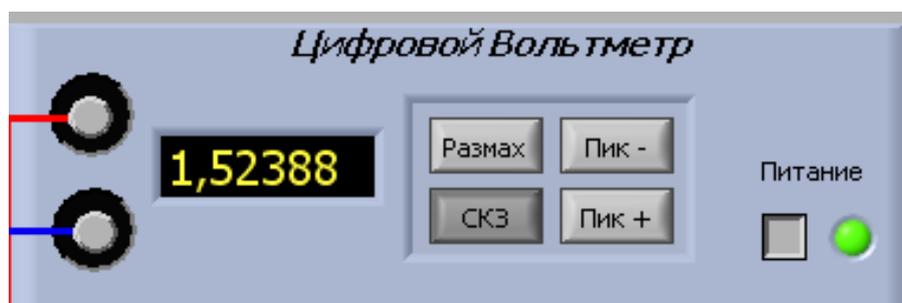


Рис. 4.11

Аналоговый вольтметр

Аналоговый вольтметр (рис. 4.12) используется для прямых измерений среднеквадратического значения переменного напряжения. При выполнении работы он играет роль рабочего средства измерений, погрешность которого подлежит определению.

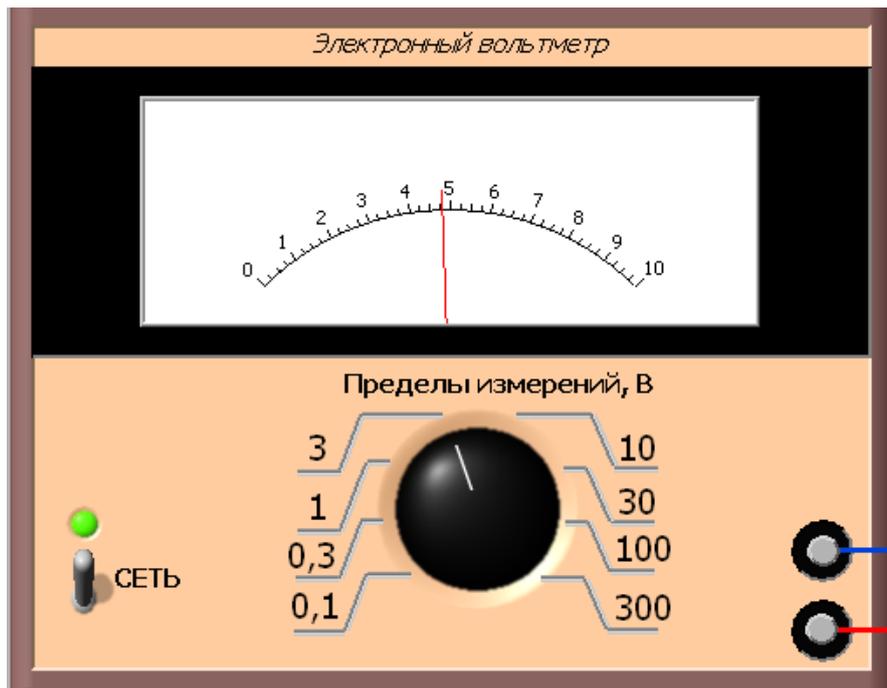


Рис. 4.12

Оциллограф (рис. 4.13) выполняет функцию вспомогательного панорамного индикатора формы испытательного сигнала. На передней панели имеется две регулировочные ручки:

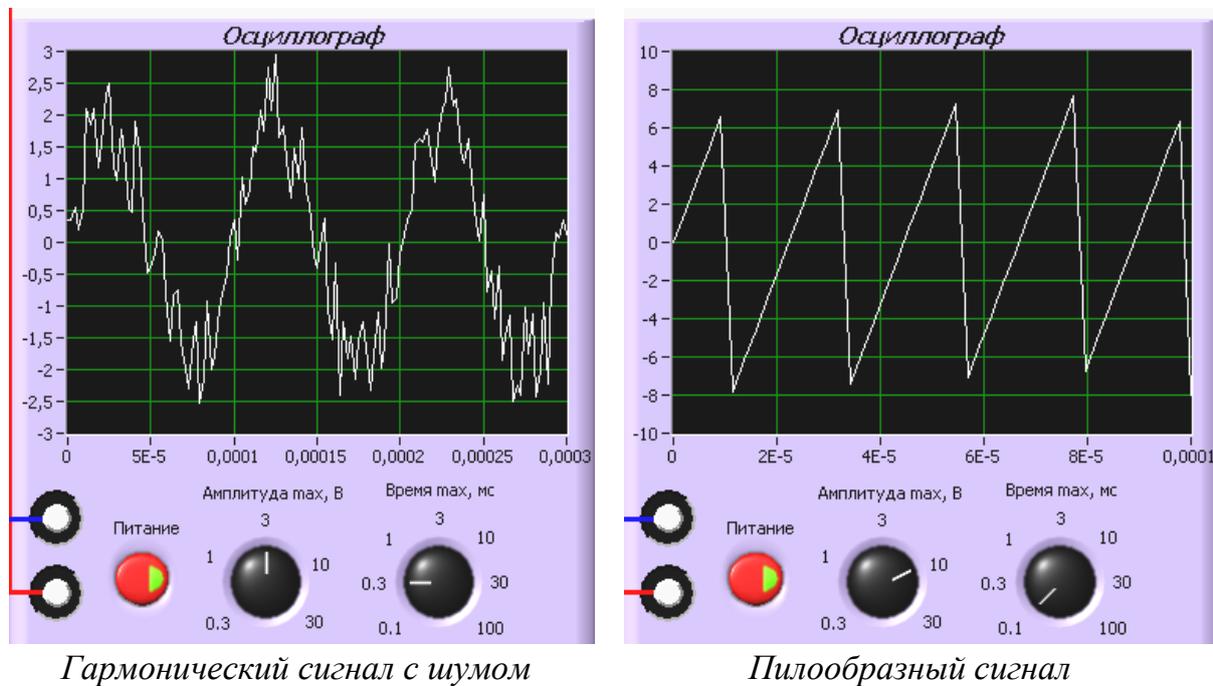


Рис. 4.13

«Амплитуда **max, В**» – устанавливает пределы отображения уровня сигнала в вольтах (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).

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;
- согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов.

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

Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1. Изучение органов управления и работа с КВП

Изучаются все виртуальные приборы, их 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. Обычно выбираются крайние точки диапазона и рабочие значения в середине диапазона.

2. 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 ча-

стоту 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 выберите максимальное (U_{\max}) и минимальное (U_{\min}) показание ЦВ (частотная характеристика ГС);

е) оцените неравномерность в абсолютном и относительном масштабах:

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

ж) постройте графики относительной неравномерности (в процентах) в зависимости от частоты для нулевого и максимального шумов;

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

2. *Измерение нестабильности уровня ГС:*

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

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

в) оцените нестабильность в абсолютном и относительном масштабах:

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

г) сравните значения нестабильности уровня, полученные на разных частотах за разные промежутки времени.

3. Оценка значения коэффициента амплитуды с помощью ЦВ:

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

б) оцените 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 работы. Выбрать сетку частот и уровней для поверки.
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 – 50 000 Гц.
3. Определить реальный диапазон рабочих частот ЦВ по критерию допустимой погрешности на верхней и нижней границах. 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* АВ по критерию допустимой погрешности на верхней и нижней границах. Предел допустимых значений относительной основной погрешности измерения переменного напряжения принять 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.

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.

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 имеют ЦВ и АВ?
11. Какие режимы работы ЦВ и АВ позволяют 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.

4.3. Осциллографы

Цели и задачи исследований

Уровень 1. Изучить осциллографы – принципы их 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 сигналов.

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

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 сигналов, так и периодических. 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 мониторинга и обработки сигнала с использованием интерполяции, фильтрации и т.д.

Осциллограф – один из наиболее универсальных приборов, позволяющий измерять самые разнообразные характеристики и парамет-

ры сигналов и цепей (частоту, период, скважность, амплитуду, длительность фронта, спад вершины и др.). Двухлучевой осциллограф позволяет оценить разность фаз сигналов и задержки.

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 мегагерц, высокочастотные – до сотен мегагерц, стробоскопические – до десятков гигагерц);
- чувствительность канала вертикального отклонения (мВ/дел);
- индикация (электронно-лучевая трубка – ЭЛТ, жидкокристаллический индикатор – ЖКИ);
- условия эксплуатации и т.д.

Универсальный осциллограф

Типовая схема (рис. 4.14) содержит следующие модули:

1. Входной блок включает аттенюаторы, 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 – электронно-лучевая 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 парамет-

рами: длительностью импульсов и амплитудой (например, меандр: 10 мс, 100 мВ).

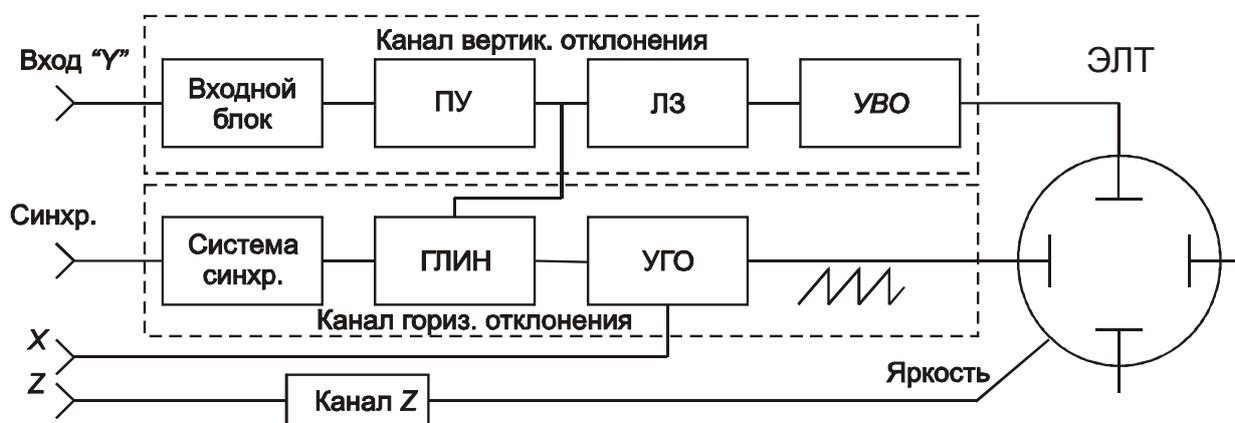


Рис. 4.14

В более качественных 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 точностью, с которой соблюдается:

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

2) постоянство скорости луча при его перемещении вдоль горизонтальной оси ЭЛТ.

Для нормирования характеристик осциллографа используются коэффициенты (вертикального) отклонения канала «Y» – K_g и 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 (табл. 4.1).

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. 4.1).

Таблица 4.1

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, то 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 частотой 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 (табл. 4.2). Чем больше полоса пропускания осциллографа, тем короче фронт и тем более точными будут результаты измерений.

Таблица 4.2

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

$$U_x = K_e \cdot h.$$

По сути, осциллографические измерения методом непосредственной оценки являются косвенными. 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. Она зависит, в первую очередь, от толщины линии луча на экране ЭЛТ. Его ширина составляет от 0,2 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

$$T_x = K_p \cdot L_x.$$

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. На экране двухлучевого осциллографа получают изображение сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$, затем оценивают их взаимное расположение (рис. 4.15).

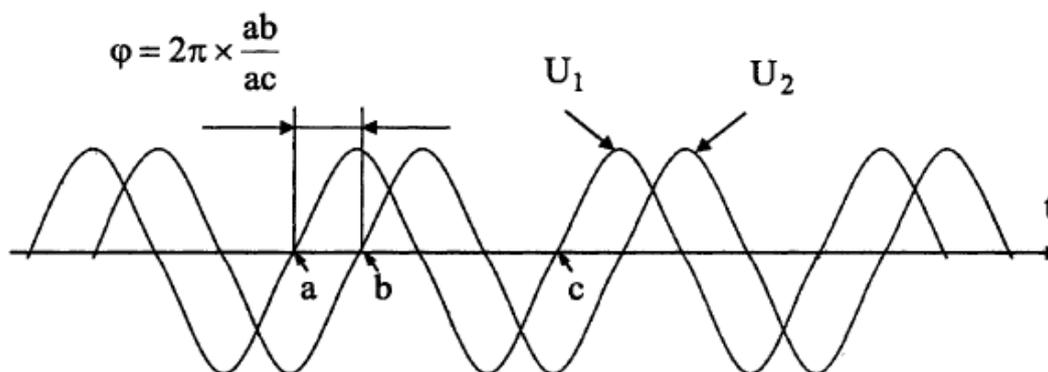


Рис. 4.15

Значение угла сдвига фаз φ в градусах вычисляют по формуле

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

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, $\pm(5-10^\circ)$.

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 $\pm(0,5-1^\circ)$.

Стробоскопические осциллографы

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

Короткие строб-импульсы осуществляют выборку мгновенных значений сигнала со сдвигом по времени через n периодов. На рис. 4.16 показана выборка в каждом периоде.

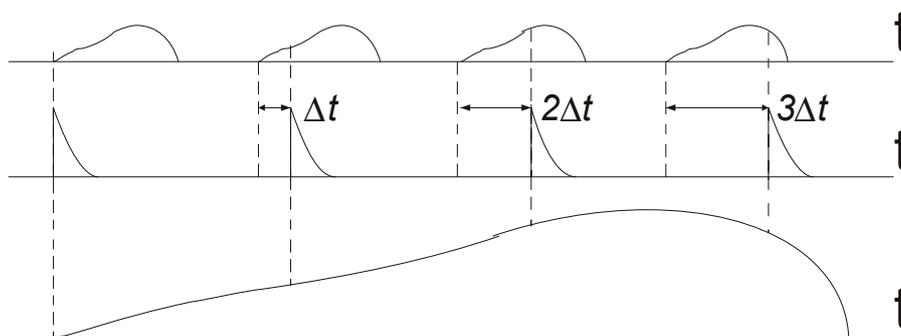


Рис. 4.16

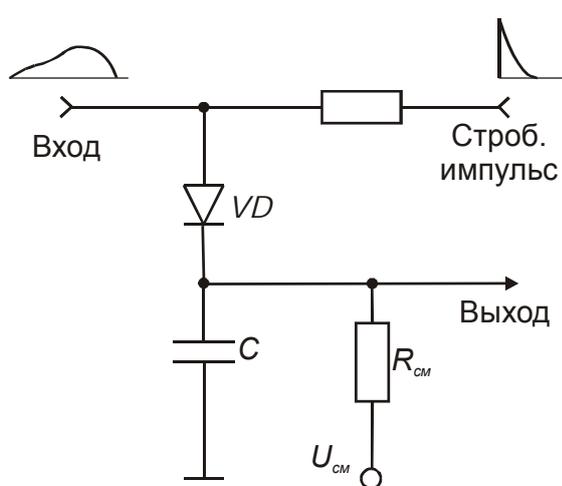


Рис. 4.17

Поясняющая схема стробоскопического преобразователя приведена на рис. 4.17.

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. напряже-

ние на C пропорционально входному сигналу в точке стробирования. Период строб-импульсов близок к целому числу периодов сигнала, но имеет заданный сдвиг, равный шагу считывания: $T_{cn} = nT + \Delta t$, 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.

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 2 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. 4.18.

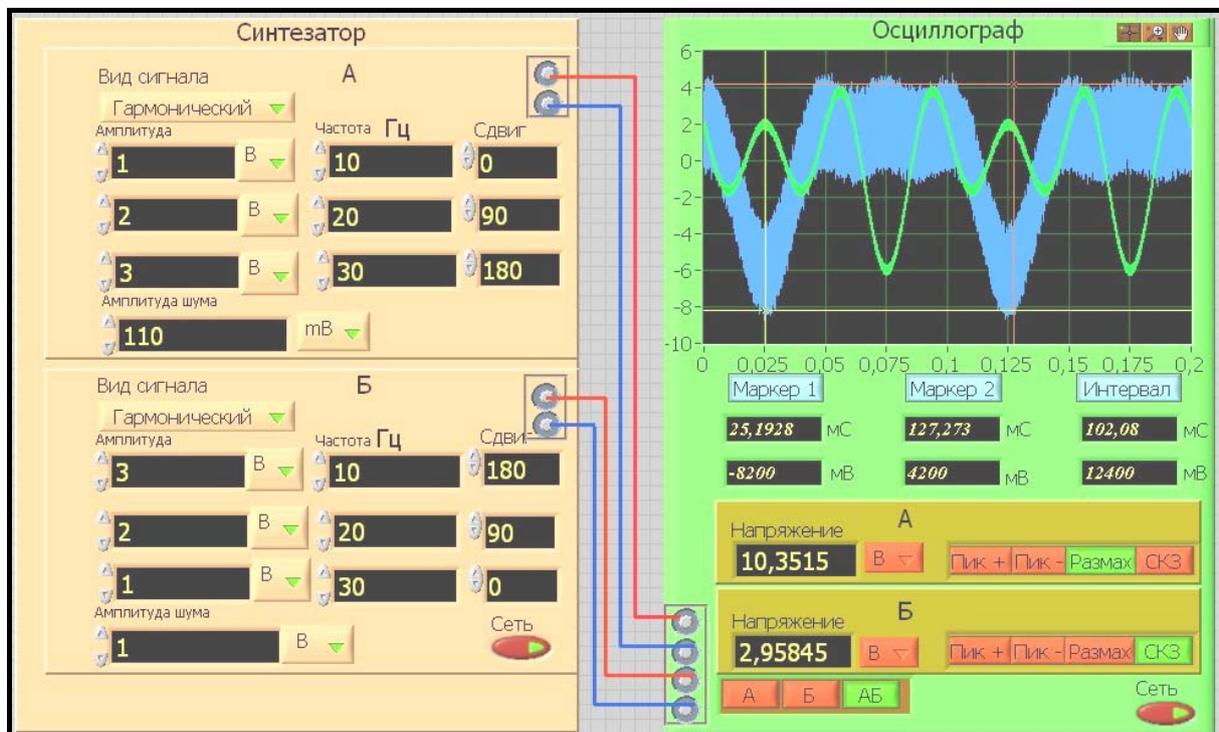


Рис. 4.18

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).

Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигналов (СС)

СС (рис. 4.19) 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 регулируются амплитуда, частота и начальная фаза или временная задержка («Сдвиг»).

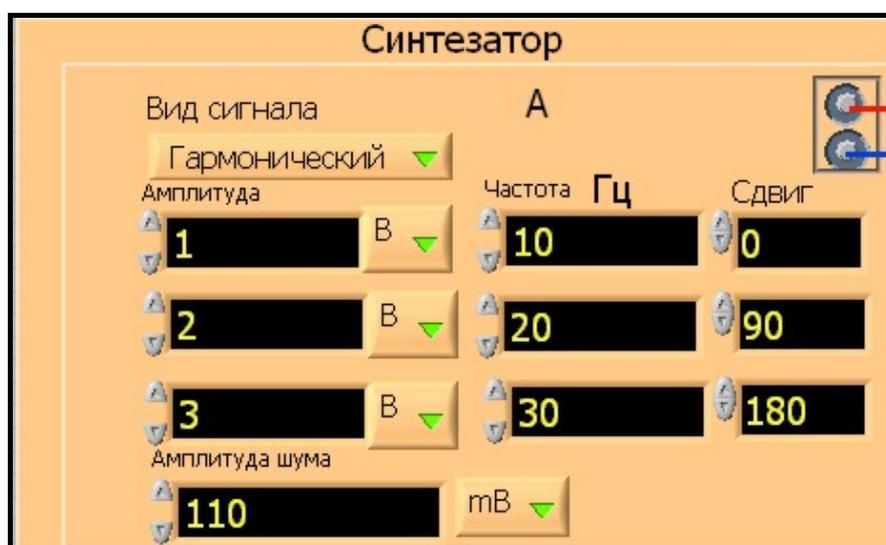


Рис. 4.19

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 до 50 000 Гц.

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

$$T_{\text{зД}} = T_{\text{с}} \varphi / 360.$$

Осциллограф

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 (рис. 4.20).



Рис. 4.20

Под панорамным индикатором расположена панель включения маркерных линий (рис. 4.21). 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. 4.21

Ниже располагается панель двухканального встроенного вольтметра (рис. 4.22), 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.

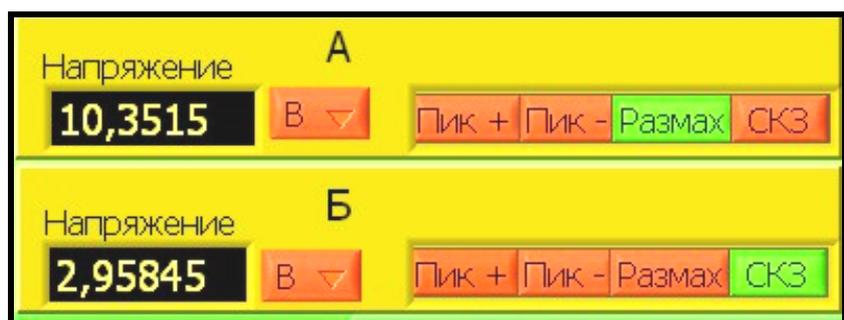


Рис. 4.22

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»:



– увеличение выбранной области;



– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение графика;



– приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;



– отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

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;
- согласовать с преподавателем план экспериментальных исследований и формы представления результатов;
- получить индивидуально допуск к выполнению запланированных исследований.

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 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

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

Измерение периода и частоты переменного напряжения

- а. Установите частоту и уровень гармонического сигнала СС: в канале А – 1 кГц, 100 мВ; в канале Б – 2 кГц, 150 мВ.
- б. 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).
- в. Измерьте с помощью маркерных линий времени целое число полупериодов сигнала в каждом канале (по точкам прохождения 0).
- г. Оцените периоды и частоты сигналов в каждом канале.
- д. Сравните результаты с установками СС и оцените погрешности.
- е. Выполните измерения для различных амплитуд и частот сигнала СС.
- ж. Повторите пп. «б» – «е» 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.
- е. Выполните измерения для различных частот и фазовых сдвигов, соотношений амплитуд сигналов СС.
- ж. Повторите пп. «б» – «е» 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 выполняются 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

$$\delta_{\text{доп}} \pm (b + aU_{\text{П}}/U_{\text{Х}})\%,$$

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

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

$$D = 20 \lg U_{MAX} / U_{ПОРОГ}.$$

4. *Определить полосу пропускания O . При этом оцениваются число точек отсчета на период сигнала и величина фронта осциллографа при «идеальном» прямоугольном импульсе на входе.*
5. *Определить неравномерность АЧХ исследуемого O 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:*

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

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.

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 О?
5. Как работает виртуальный О?
6. Какие органы управления имеет О?
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 О?
36. Как определить полосу пропускания?

4.4. Селективные вольтметры

Цели и задачи исследований

Уровень 1. Изучить виртуальный селективный вольтметр – принцип его 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 сигналов.

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.

Назначение и принципы построения СВ

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

Селективные вольтметры – 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, кратными основной частоте.

Сигнал пилообразной формы может быть представлен суммой бесконечного количества гармоник, амплитуды которых уменьшаются с увеличением частоты. По мере добавления каждой гармоники форма сигнала становится более похожей на идеальную. Ряд Фурье пилообразного сигнала имеет вид

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

Если у четных гармоник поставить знак «+», то «пила» вместо линейного роста изменится на линейный спад.

Сигнал, близкий к треугольной форме, включает в себя бесконечное количество нечетных гармоник:

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

Прямоугольный сигнал вида «меандр» содержит те же компоненты, что и треугольный, но все гармоники со знаком «+».

Так как амплитуда гармоник высоких порядков во много раз меньше амплитуды основной частоты, то, как правило, вычисляют ограниченное число гармоник (до 5 – 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 (рис. 4.23). 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).

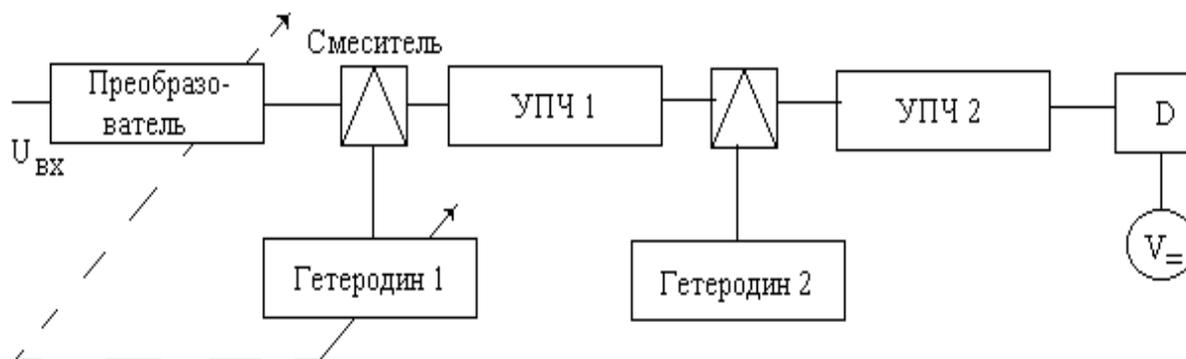


Рис. 4.23

Измеряемый сигнал подается на входной преобразователь, функции которого такие же, как у измерительного приемника, т.е. здесь может быть калиброванный аттенуатор, 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 $5 \cdot 10^{-8} Fc + F$ (Fc – частота сигнала, F – полоса пропускания), или опционально $5 \cdot 10^{-9} Fc + F$. 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*.

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 6 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. 4.24. Выходной сигнал ГС подан одновременно на входы всех приборов.

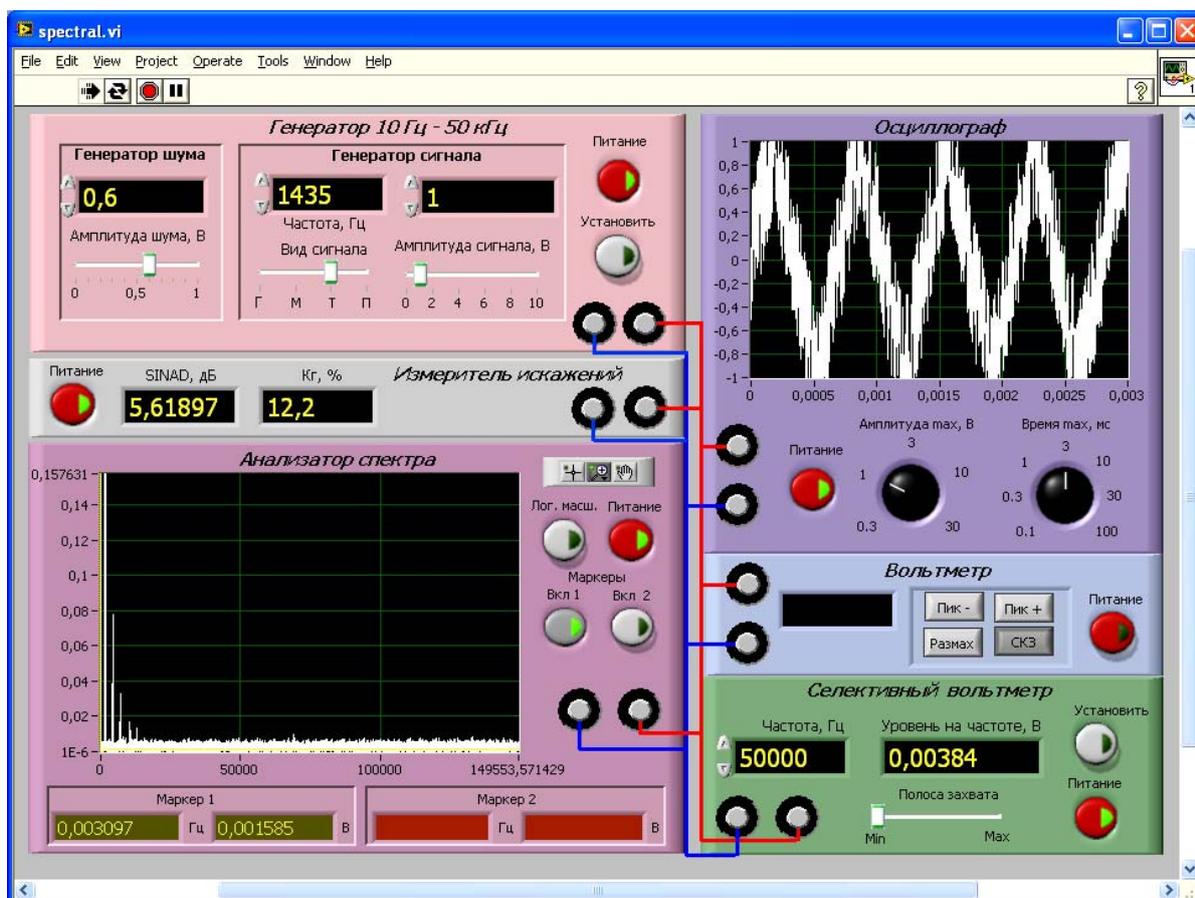


Рис. 4.24

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).

Передние панели виртуальных приборов

Генератор сигналов (ГС)

ГС состоит из 2 модулей: «Генератор шума» и «Генератор сигнала» (рис. 4.25). 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 определяют погрешности рабочего средства измерений.



Рис. 4.25

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 до 50 000 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 (рис. 4.26) с индикацией:

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

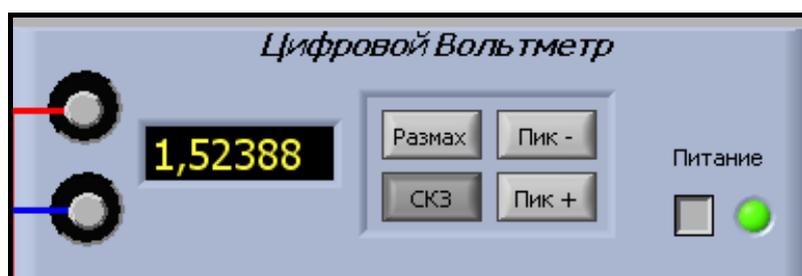


Рис. 4.26

Осциллограф

Прибор применяется для контроля формы сигнала. На передней панели (рис. 4.27) имеются 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).

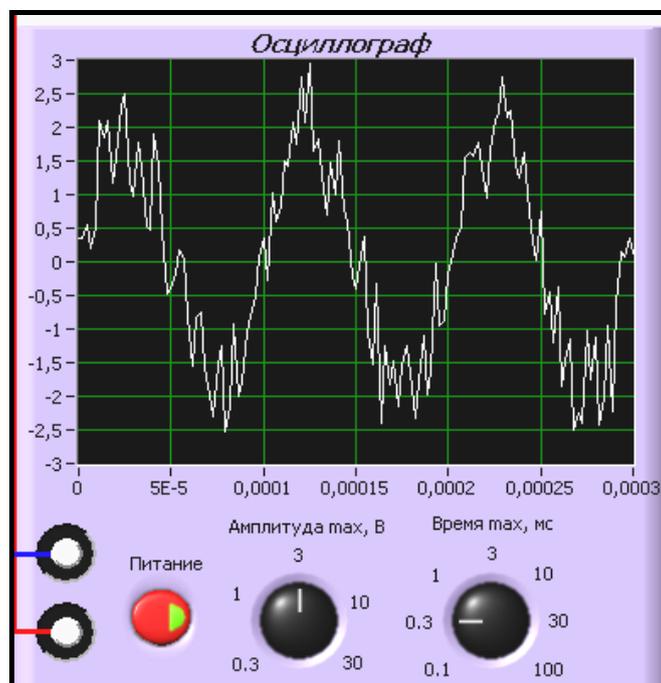


Рис. 4.27

Селективный вольтметр

Прибор применяется для оценки погрешностей АС при оценке уровня высших гармоник. На индикаторе (рис. 4.28) «**Уровень на частоте, В**» высвечивается результат измерения СКЗ сигнала на установленной частоте в полосе 15 – 20 Гц.



Рис. 4.28

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.

Анализатор спектра

Прибор (рис. 4.29) имеет кнопку «Лог. масш.» для переключения отображения вертикальной оси в линейном или в логарифмическом масштабе.

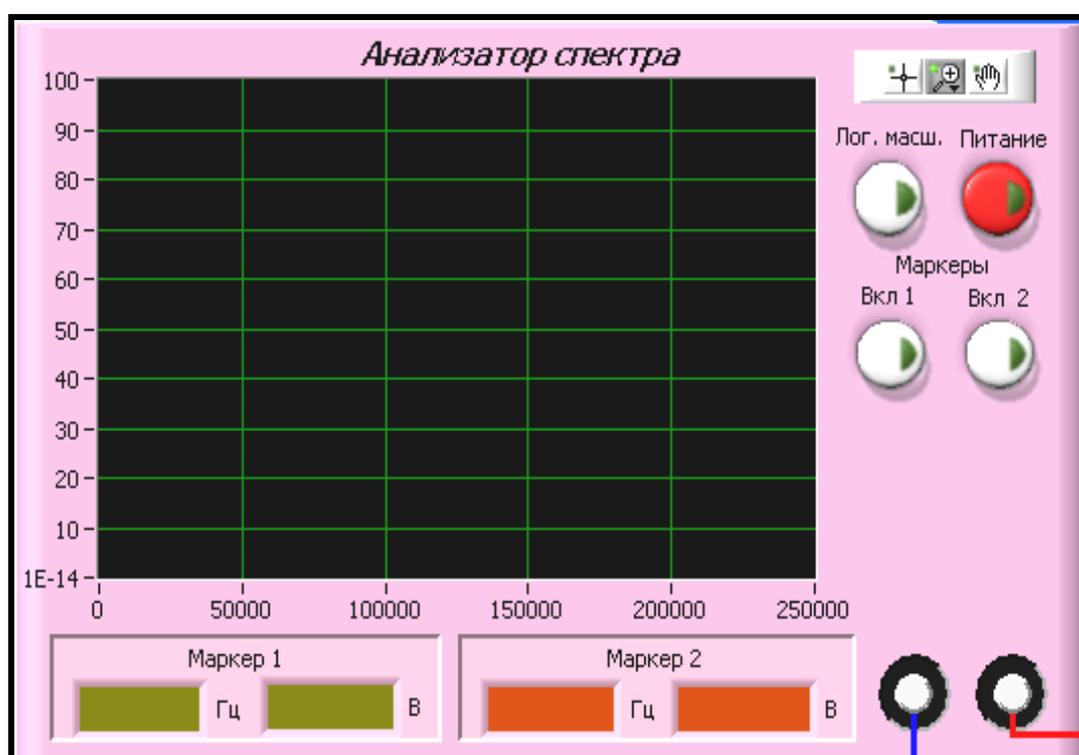


Рис. 4.29

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;



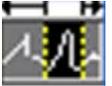
– режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении;

Режимы лупы (слева направо и сверху вниз):

Режимы «Лупы»:



– увеличение выбранной области;



– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение графика;



– приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;



– отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Измеритель искажений

Прибор (рис. 4.30) измеряет «**SINAD, дБ**» сигнала (Signal In Noise And Distortion) – выраженное в децибелах отношение уровня полного сигнала к суммарному уровню шума и искажений:

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

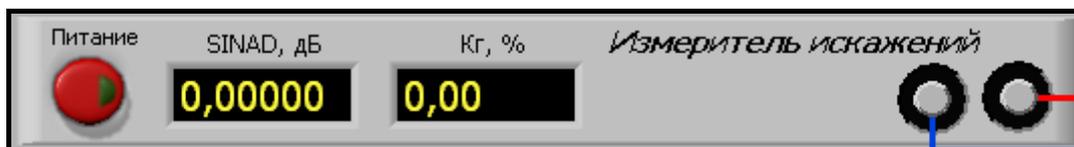


Рис. 4.30

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

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

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

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

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, фиксируют уровень СВ и уровень образцового прибора (ГС или АС). Тогда относительная погрешность

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

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

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 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 разных уровней и частот 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 сигнала 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 сигнала 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 сигнала 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 (коэффициента гармоник) K_G сигналов с шумами и без шумов по формуле

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

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 двучленной 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

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

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

$$D = 20\lg(U_{\text{МАХ}}/U_{\text{ПОРОГ}}).$$

4. *Определить полосу пропускания СВ* (разрешающую способность по частоте). При этом оценивается возможность отдельного 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 ча-

стот с выбором максимального и минимального значений сигнала. Тогда неравномерность в абсолютном и относительном масштабах

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

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.

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 различаются показания СВ и ЦВ при подаче на них импульсного сигнала?
19. Почему различаются 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?

4.5. Измерители искажений

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.

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_{m1}) и постоянной составляющей (U_0) сигнала:

$$U_{СК} = U_{\Sigma} = \sqrt{U_0^2 + U_{m1}^2 / 2 + \dots + U_{mn}^2 / 2}.$$

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

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

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 – селекция гармоник (АС и СВ).
2. Квазиспектральные – подавление первой гармоники (ИНИ).

Спектральный метод с применением АС сложен аппаратно, а с применением СВ требует длительных измерений и вычислений, поэтому в автономных приборах (подгруппа С6) 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 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 – идеальная синусоида.

3 % — форма сигнала отлична от синусоидальной, но искажения незаметны на глаз.

5 % – отклонение формы сигнала от синусоидальной заметно на глаз по осциллограмме.

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

21 % – сигнал трапецеидальной или ступенчатой формы.

43 % – 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. 4.31. 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.

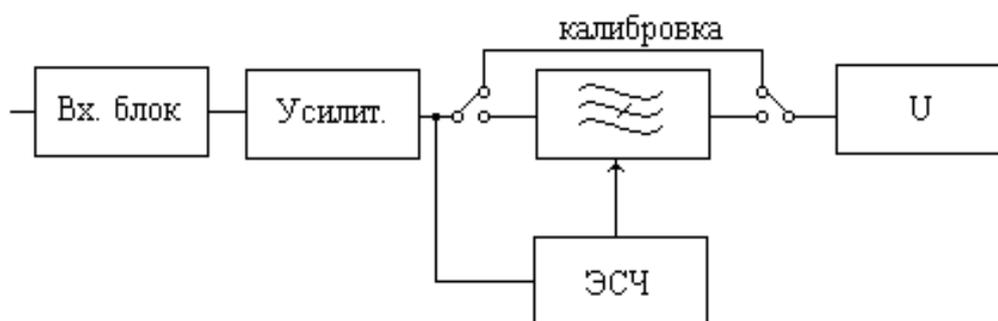


Рис. 4.31

Если в 10 раз увеличить коэффициент передачи входного блока и усилителя, то так же в 10 раз повысится чувствительность прибора со шкалой измерения 10 %. Если увеличить коэффициент передачи входного блока и усилителя в 100 и 1000 раз, то получим шкалы 1 % и 0,1 % соответственно.

В режиме измерения КНИ включается 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 процентах или децибелах. 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.

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

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. 4.32. Выходной сигнал СС подан одновременно на входы всех приборов.

КВП содержит 4 одноканальных прибора:

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

Синтезатор сигнала 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 искомым параметров по массиву данных мгновенных значений, получаемых в результате работы виртуального АЦП.

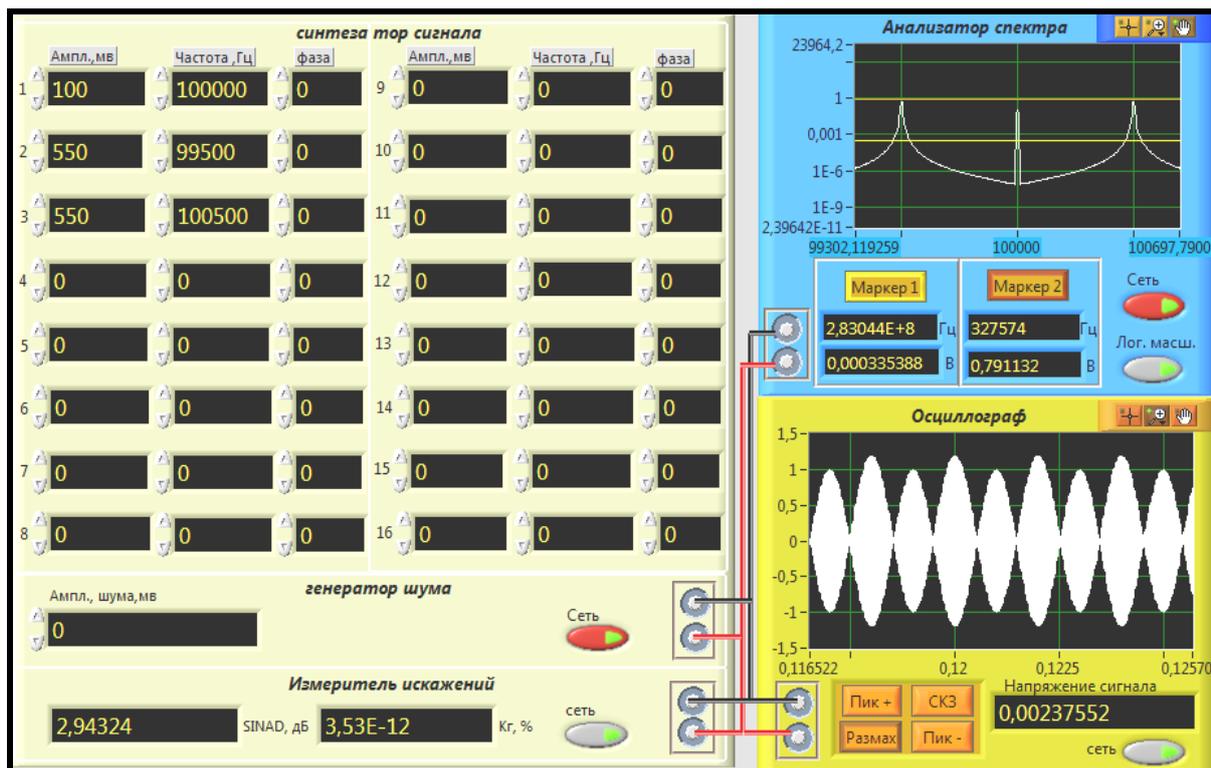


Рис. 4.32

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 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).

Передние панели виртуальных приборов
Измеритель искажений (рис. 4.33)



Рис. 4.33

На виртуальной панели расположены:

- вход прибора, на который поступает суммарный сигнал с шумами;
- выключатель;
- индикатор измеренного коэффициента гармоник сигнала;
- 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

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

Анализатор спектра (рис. 4.34)

На панели прибора расположены:

- панорамный индикатор (экран) для воспроизведения спектра суммарного сигнала в координатах «уровень – частота» (частотное представление сигнала с шумами);
- вход прибора;
- кнопка включения «Маркер 1»;
- индикатор положения «Маркер 1» на оси частот;
- индикатор положения «Маркер 1» на оси уровней;
- кнопка включения «Маркер 2»;
- индикатор положения «Маркер 2» на оси частот;
- индикатор положения «Маркер 2» на оси уровней;

- кнопка включения логарифмического масштаба по оси уровней;
- кнопка включение питания прибора;
- иконки: «Крестик», «Лупа» и «Рука».

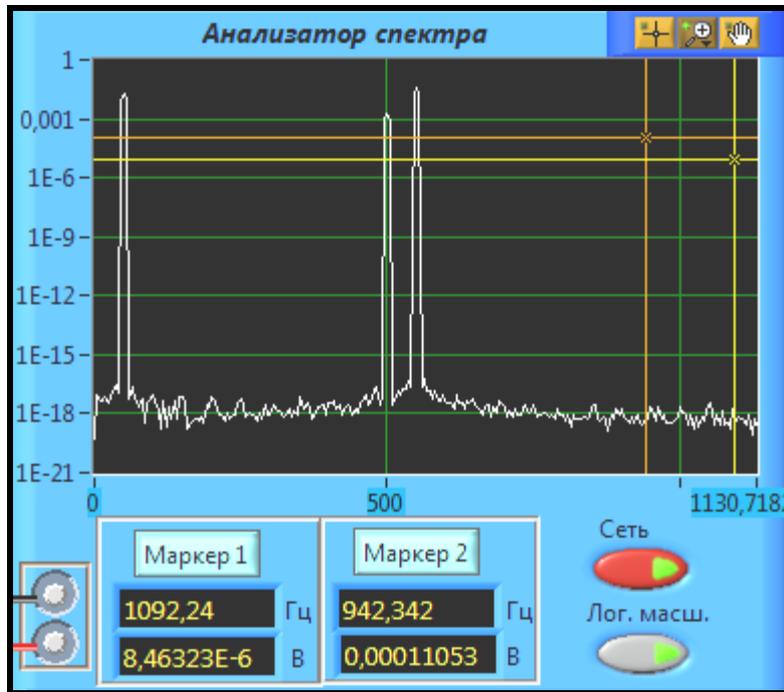


Рис. 4.34

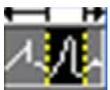
«Крестик»  – режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении.

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

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



– увеличение выбранной области;



– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение графика;



– приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;



– отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Синтезатор сигнала (СС) (рис. 4.35)

На виртуальной панели прибора расположены:

- индикатор и поле для установки амплитуды для всех 16 генераторов гармонического сигнала (мВ);
- индикатор и поле для установки частоты для всех 16 генераторов гармонического сигнала (Гц);
- индикатор и поле для установки начальной фазы для всех 16 генераторов гармонического сигнала (град.);
- индикатор и поле для установки амплитуды шума сигнала (мВ);
- выключатель питания;
- выход синтезируемого сигнала и шума.

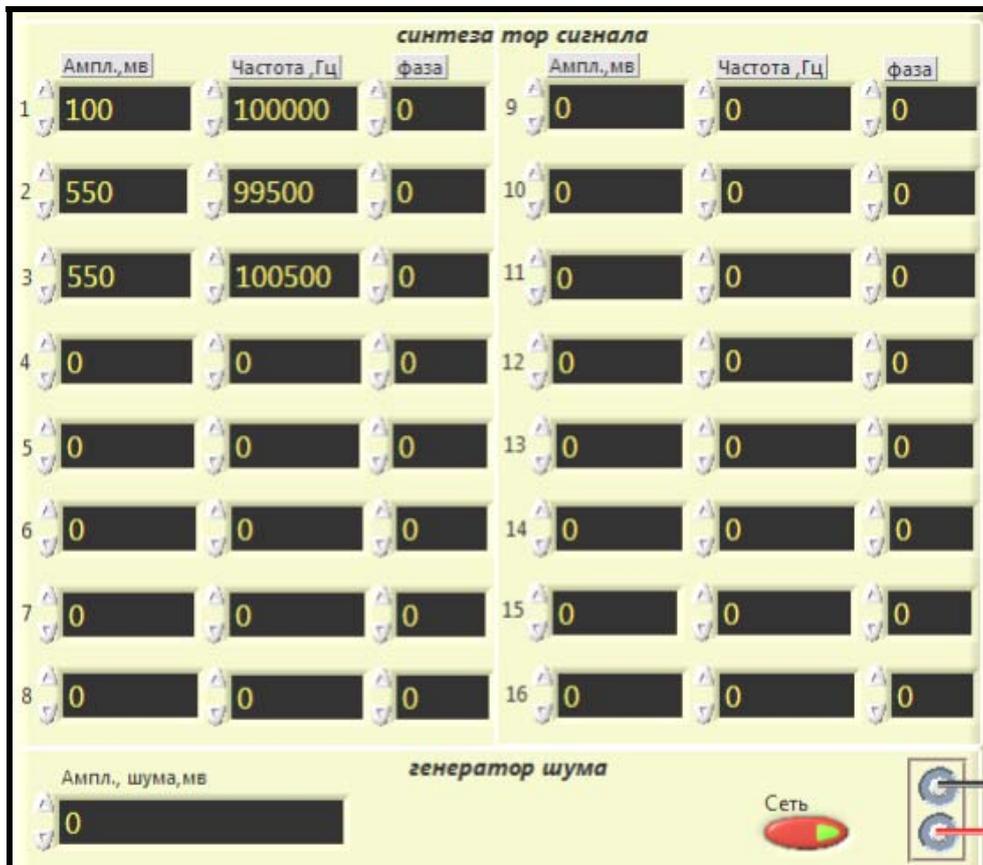


Рис. 4.35

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 изменить 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.

Осциллограф (рис. 4.36)

На панели прибора расположены:

- осциллографический индикатор (экран) для воспроизведения суммарного сигнала в координатах мгновенный уровень – время (временное представление сигнала с шумами);
- вход прибора;
- поле выбора измеряемого параметра встроенного вольтметра;
- индикатор измеренного параметра;
- выключатель;
- выплывающее меню для выбора единицы измерения.

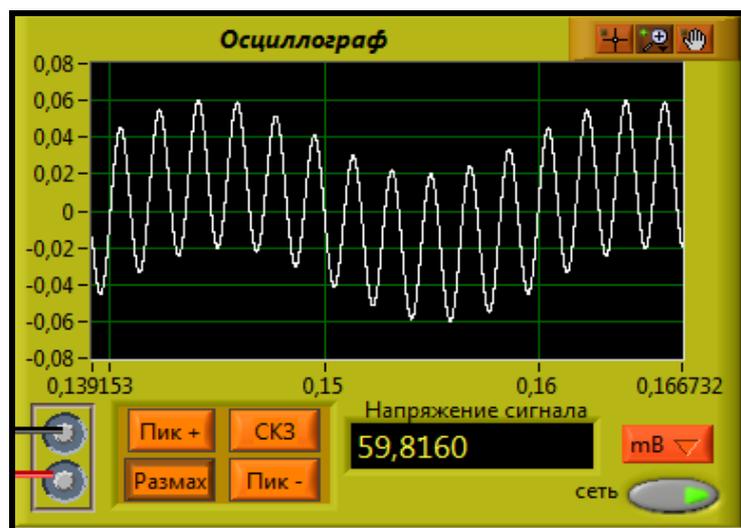


Рис. 4.36

Вольтметр имеет 4 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;

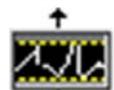
Режим «Лупа» имеет 6 подрежимов (слева направо и сверху вниз):



– увеличение выбранной области;



– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение графика;



– приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;



– отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

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.

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 разных уровней и частот 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) 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 разных уровней и частот 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 сигналов. 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 разных структур 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 (синтезатору или 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 $K_{НИ}$ 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 $K_{НИ}$ 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:

$$\delta = \frac{K_{Гиз} - K_{Грасч}}{K_{Грасч}},$$

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 $K_{Г}$ и $SINAD$.

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.

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 зависят 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. Какова 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 $K_T = (0,05 + 0,01N)\%$, если класс точности прибора 0,01 (N – номер студента по списку группы)?

4.6. Фазометры

Цели и задачи исследований

Уровень 1. Изучить работу фазометров – принципы их 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.

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 рабо-

ты 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).
2. Компенсационные (на основе сравнения измеряемого и образцового фазового сдвига).
3. С преобразованием фазового сдвига в напряжение, во временной интервал и др.
4. Цифровые (на основе метода дискретного счета).

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

Микропроцессорный фазометр (рис. 4.37) 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

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

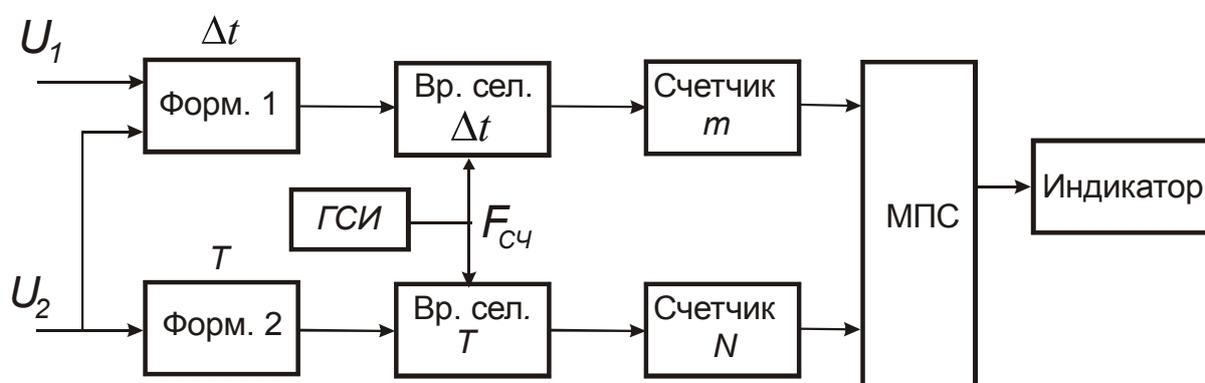


Рис. 4.37

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

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

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

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. 4.38.

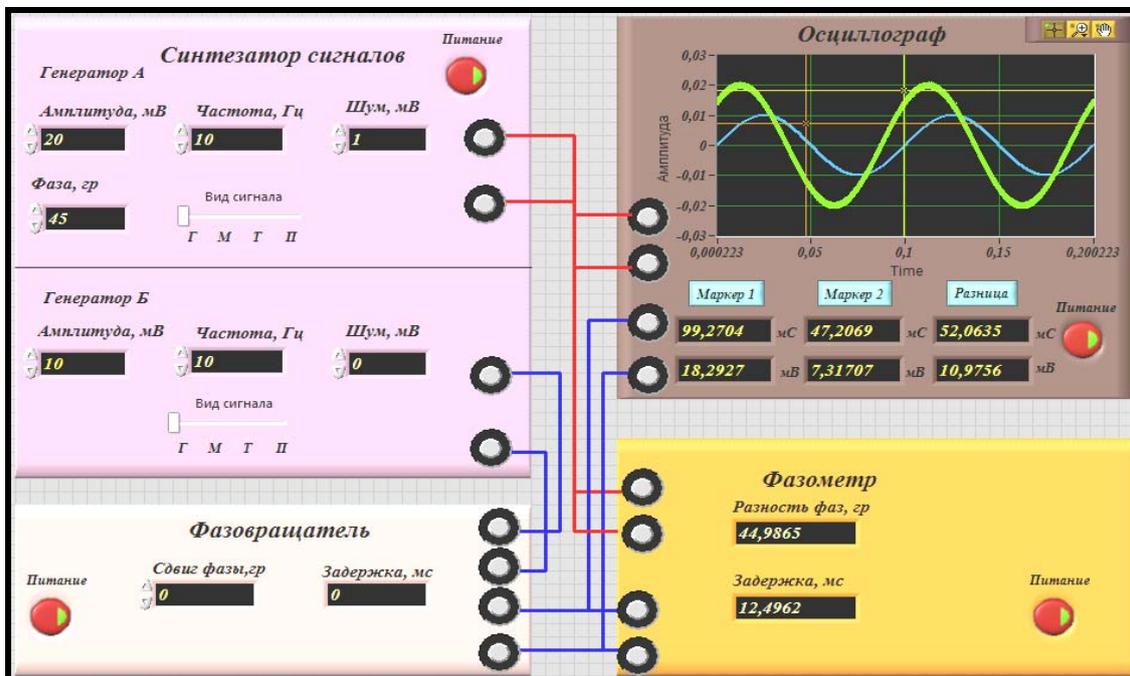


Рис. 4.38

Двухканальный генератор построен на основе виртуального ЦАП, синтезирующего требуемую форму периодического сигнала в

соответствии с выбранными 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).

Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигналов (СС)

СС состоит из двух модулей – генераторов А и Б. В каждом модуле устанавливаются вид сигнала, его амплитуда, частота и уровень шума (рис. 4.39).



Рис. 4.39

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 до 50 000 Гц. Окно «Вид сигнала» устанавливает форму генерируемого сигнала: гармонический (Г), меандр (М), треугольный (Т), пилообразный (П).

Осциллограф

Прибор применяется для визуального контроля форм сигналов на входах ФМ (рис. 4.40).



Рис. 4.40

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;

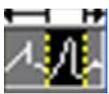


– режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении.

Режимы «Лупы»:



– увеличение выбранной области;



– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение 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. 4.41). 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.

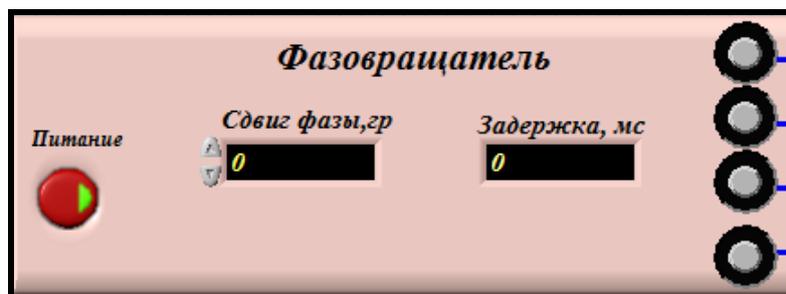


Рис. 4.41

Фазометр

Прибор позволяет измерять сдвиг фазы или задержку сигналов (рис. 4.42). Окно «Разность фаз» показывает изменение фазы сигнала в градусах, а окно «Задержка» – в миллисекундах.



Рис. 4.42

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

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

Типовые экспериментальные исследования

Уровень 1. Изучение и работа с прибором

1. 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.

2. 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.

3. Измерения в диапазоне частот

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

4. Измерения при разных соотношениях уровней сигналов в каналах

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

5. 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.

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

Выбрать сетку частот, уровней сигнала и шумов для проведения измерений ФВ. Последовательно устанавливать 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.

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

Для выбранной сетки частот, уровней сигнала и шумов последовательно устанавливать 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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 описанным в п. 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 выполняют следующие операции:

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

Учебная поверка ФМ

1. Проверить работоспособность (опробование) ФМ во всех режимах измерения. Выбрать сетку частот и уровней сигналов для проведения поверки.
2. Оценить минимальный уровень сигнала без шумов при устойчивом измерении в диапазоне рабочих частот ФМ.
3. 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.
4. Определить реальный диапазон рабочих частот ФМ по критерию допустимых значений абсолютной или относительной основной погрешности измерения фазового сдвига и задержки.
5. Определить границы допустимых шумов путем оценки отношения сигнал/шум, при котором нарушается устойчивое и правильное измерение фазового сдвига и задержки.

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.

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 ФМ?
2. Назовите методы измерения фазового сдвига.
3. Чем отличаются виртуальные ФМ от автономных?
4. Какие сигналы называются синфазными и противофазными?
5. Как измерить сдвиг фазы осциллографом?
6. Поясните компенсационный метод измерения.
7. Поясните схему и принцип работы автономного цифрового фазометра.
8. Поясните работу микропроцессорного фазометра.
9. Как реализуется принцип преобразования измеряемого сдвига фазы во временной интервал?
10. Что и как определяется методом дискретного счета?
11. Поясните метод дискретного счета для измерения сдвига фазы.
12. Какова структура погрешности для метода дискретного счета?
13. Что можно измерить с помощью исследуемого ФМ?
14. Как работает виртуальный ФМ?
15. Почему ФМ всегда двухканальный?
16. Какие приборы использовались при исследованиях и для чего?
17. Какие органы управления имеет ФМ?
18. Поясните экспериментальные результаты.

Дополнительные вопросы для уровня 2

19. Как проверить рабочий диапазон частот СС, О и ФВ в режимах измерения и формирования сдвига фазы и задержки?

20. Как оценивается абсолютная и относительная погрешность ФМ?
 21. Как оценивается абсолютная и относительная погрешность ФВ?
 22. Как оценивается погрешность формирования фазового сдвига и задержки СС?
 23. Как оценивается погрешность измерения фазового сдвига и задержки О?
 24. Что показали исследования фазовращателя/линии задержки?
 25. Что показали исследования двухканального осциллографа?
 26. Что показали исследования калибратора фазового сдвига (СС) и временной задержки?
 27. Как выбрать сетку частот, уровней сигнала и шумов для проведения измерений параметров ФВ, СС и О?
 28. Как отградуировать и оценить рабочий диапазон частот регулируемой линии задержки импульсного сигнала?
 29. Поясните результаты оценки рабочего диапазона частот двухканального осциллографа в режимах измерения фазового сдвига и задержки сигнала.
 30. Поясните результаты оценки рабочего диапазона частот двухканального СС в режимах формирования фазового сдвига и задержки сигнала.
 31. Поясните результаты измерения компенсационным методом фазового сдвига и задержки сигнала СС.
 32. Как оценить нестабильность частоты во времени?
- Дополнительные вопросы для уровня 3***
33. Какими приборами можно проводить поверку?
 34. Как выбирается сетка частот и уровней при поверке ФМ?
 35. Как определить диапазон рабочих частот и уровней ФМ?
 36. Как оценить минимальный уровень сигнала устойчивого измерения?
 37. При каком соотношении уровней сигнала, помехи и шумов уверенно измеряется сигнал?
 38. Как проверить влияние наложения спектров сигнала и помехи?
 39. Как оценить минимальный уровень измерительного сигнала?
 40. Как определить погрешности измерения фазового сдвига и задержки сигнала?
 41. Как определение границы допустимых шумов?

4.7. Синтезаторы сигналов специальной формы

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 сигналов.

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

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 параметрами.

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, фильтров и т.д.);
- проверка параметров сигнала;
- моделирование шума и помех;
- тестирование каналов связи, передачи данных и сетей (Ethernet и др.) и др.

По ГОСТ 15094 генераторы подразделяются: на низкочастотные, высокочастотные, импульсные, сигналы специальной формы, шумовые сигналы 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 форм могут формироваться путем суммирования сигналов нескольких автономных генераторов: импульсных, гармонических и шумовых.

Автономный серийный генератор – радиоэлектронное устройство, содержащее 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 формователи 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, формователи 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. 4.43. Виртуальный генератор (ВГ) реализует цифровой синтез сигнала в соответствии с его математической моделью.

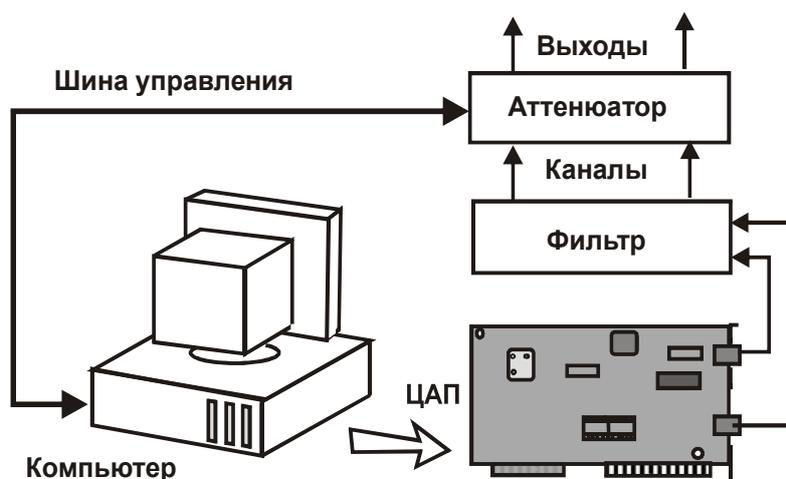


Рис. 4.43

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 2 двухканальных прибора:

1. Синтезатор сигналов специальной формы (СФ).
2. Осциллограф (О).

Синтезатор сигналов специальной формы построен на основе виртуального ЦАП, формирующего требуемый вид периодического сигнала в соответствии с выбранной пользователем формой, частотой 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. 4.44.

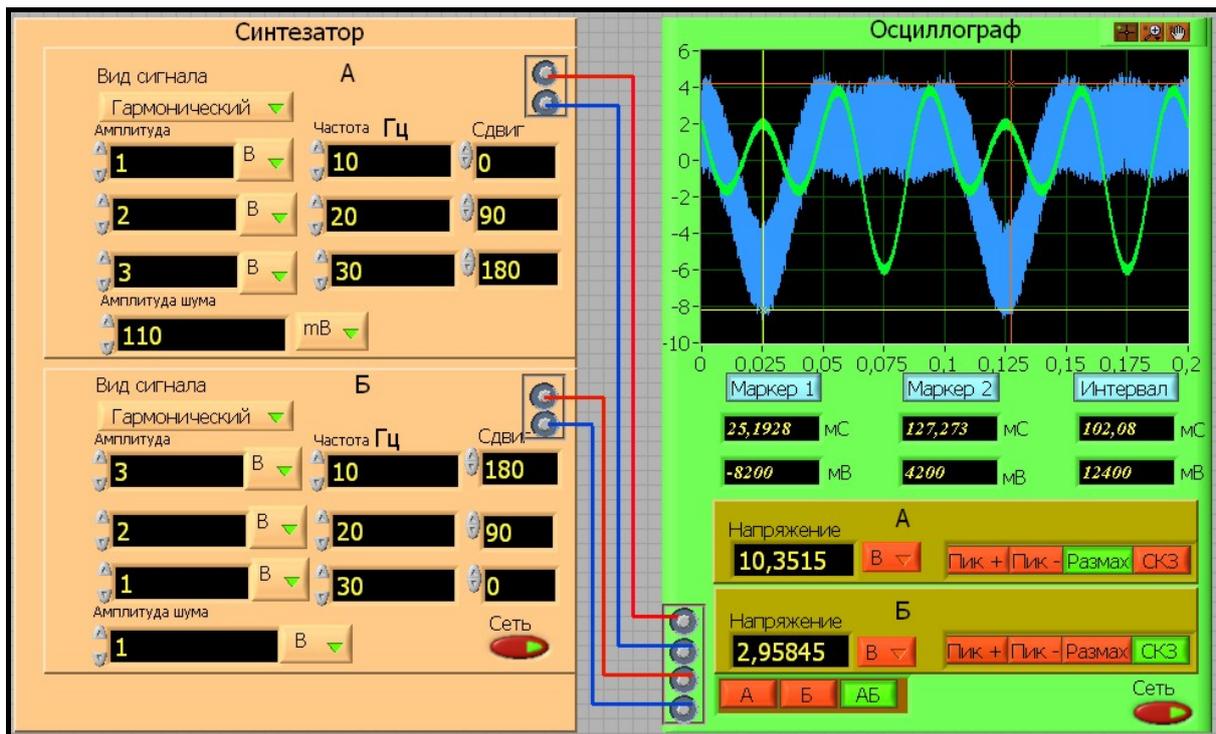


Рис. 4.44

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).

Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигналов специальной формы (СФ)

СФ (рис. 4.45) 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 регулируются амплитуда, частота и начальная фаза или временная задержка («Сдвиг»).

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).

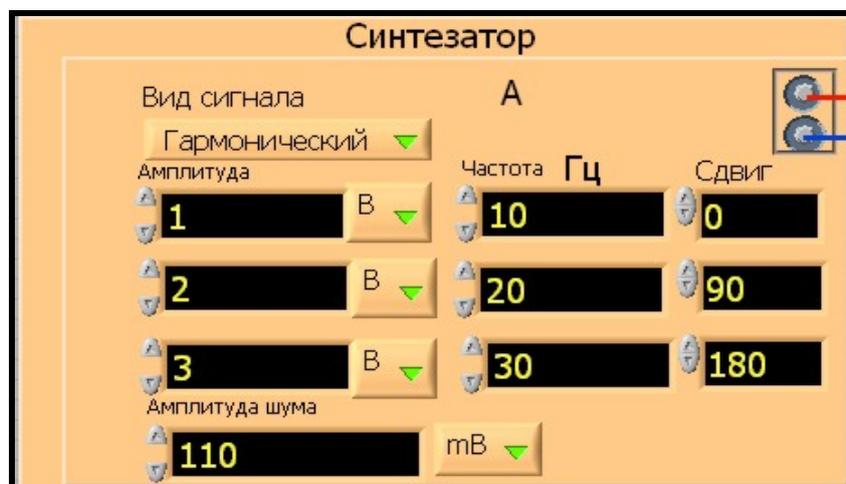


Рис. 4.45

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 до 50 000 Гц.

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

$$T_{\text{ззд}} = T_c \varphi / 360.$$

Осциллограф

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 (рис. 4.46).



Рис. 4.46

Под панорамным индикатором расположена панель включения маркерных линий (рис. 4.47). 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. 4.47

Ниже располагается панель двухканального встроенного вольтметра (рис. 4.48), позволяющего оценить параметры сигналов на вхо-

дах 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.

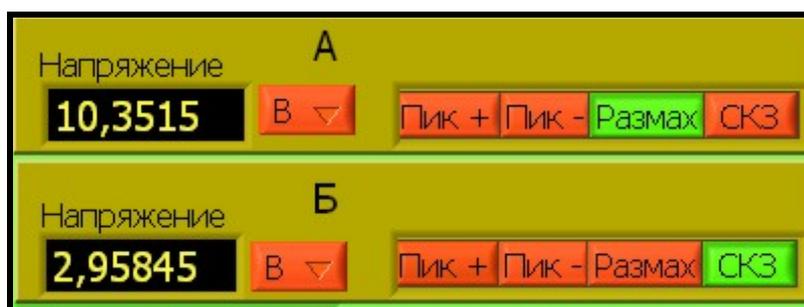


Рис. 4.48

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»:



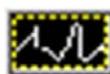
– увеличение выбранной области;



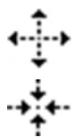
– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение графика;



- приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;

- отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

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.

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 и комбинированных сигналов, вырабатываемых СФ.

Измерение амплитуды и СКЗ сигналов разного вида

- а. Установите параметры сигналов СФ в каналах А и Б, удобные для измерения осциллографом.
- б. В режиме индикации АБ, используя лупу, установите коэффициент развертки таким, чтобы на экране О умещалось 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 умещалось несколько периодов 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 нуль). 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 умещалось 2 – 3 периода сигнала.
- в. Измерьте с помощью маркерных линий времени по точкам прохождения через нуль 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.

1. *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.

2. *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).

3. *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 форм.

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 известной 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.

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.

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.

4.8. Синтезаторы полигармонического сигнала

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.

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 гармоник, кратных основной частоте. Их амплитуда уменьшается с увеличением частоты. По мере добавления каждой гармоники форма сигнала становится более похожей на идеальную. Ряд Фурье пилообразного сигнала имеет вид

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

Если у четных гармоник поставить знак «+», то «пила» вместо линейного роста изменится на линейный спад.

Сигнал, близкий к треугольной форме, включает в себя бесконечное количество нечетных гармоник:

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

Прямоугольный сигнал вида «меандр» содержит те же компоненты, что и треугольный, но все гармоники со знаком «+».

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. 4.49 и 4.50 соответственно.

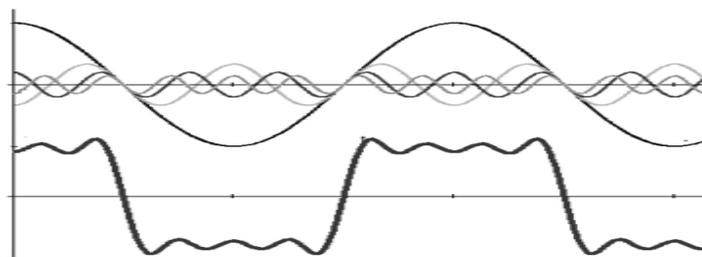


Рис. 4.49

Сигнал с амплитудной модуляцией (АМ), у которого изменяемым параметром является амплитуда несущего колебания, представлен на рис. 4.50.

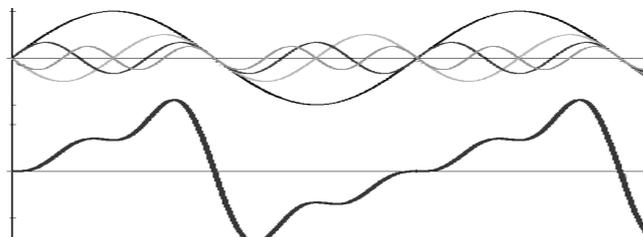


Рис. 4.50

Сигнал с амплитудной модуляцией (АМ), у которого изменяемым параметром является амплитуда несущего колебания, представлен на рис. 4.51.



Рис. 4.51

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, %:

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

Гармонические и полигармонические сигналы характеризуют следующие параметры:

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

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

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

4. Размах – сумма пиковых значений.

5. Среднеквадратическое за период напряжение

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

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

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

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

$$K_a = U_m / U_{\text{СК}}$$

Для гармонического – $K_{ac} = 1,41$.

Для пилообразного – $K_{an} = 1,73$.

Для меандра – $K_{am} = 1,00$.

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

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

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

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 4 одноканальных прибора:

1. Синтезатор сигнала (СС).
2. Осциллограф (О).
3. Анализатор спектра (АС).
4. 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. 4.52.

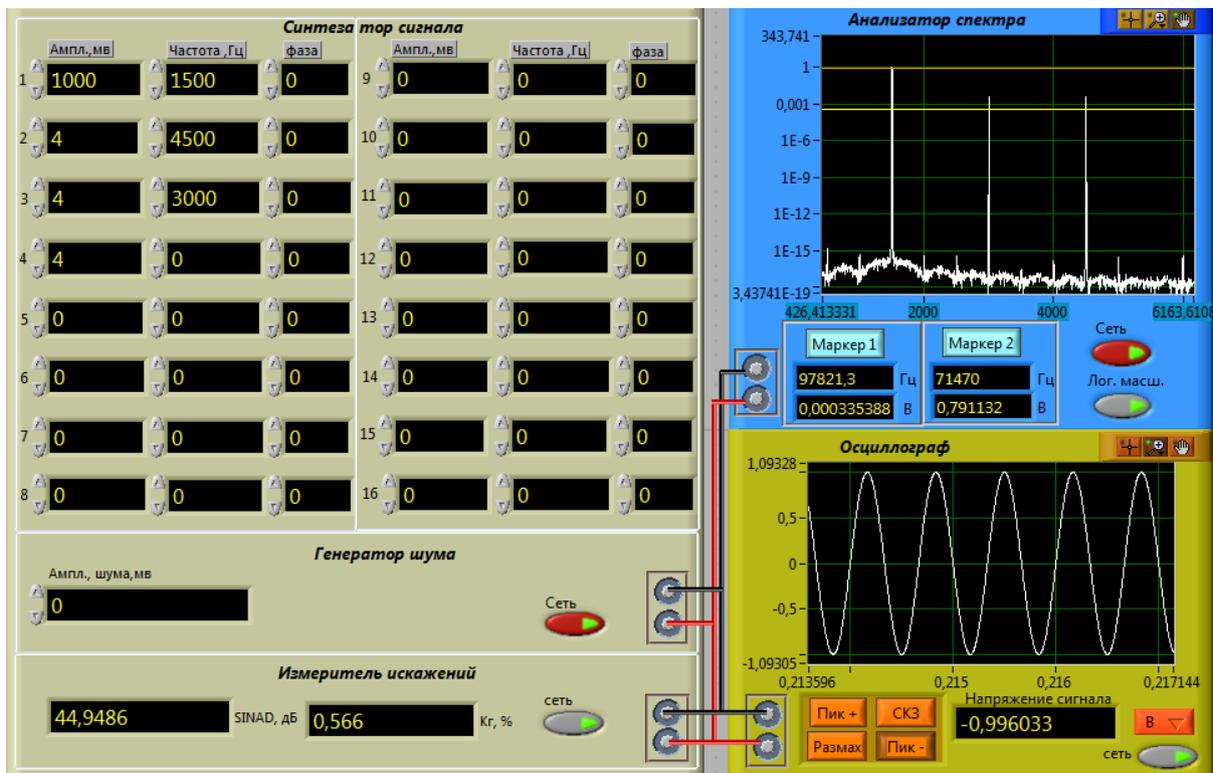


Рис. 4.52

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.

Все измерительные приборы осуществляют расчет искомых 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).

Передние панели виртуальных приборов

Синтезатор сигнала (СС)

Интерфейс СС представлен на рис. 4.53.

На панели прибора расположены:

- индикатор и поле для установки амплитуды для всех 16 генераторов гармонического сигнала (мВ);
- индикатор и поле для установки частоты для всех 16 генераторов гармонического сигнала (Гц);
- индикатор и поле для установки начальной фазы для всех 16 генераторов гармонического сигнала (град.);
- индикатор и поле для установки амплитуды шума сигнала (мВ);
- выключатель питания;
- 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 слож-

ного генерируемого сигнала. Установка осуществляется аналогично установке амплитуды шума.

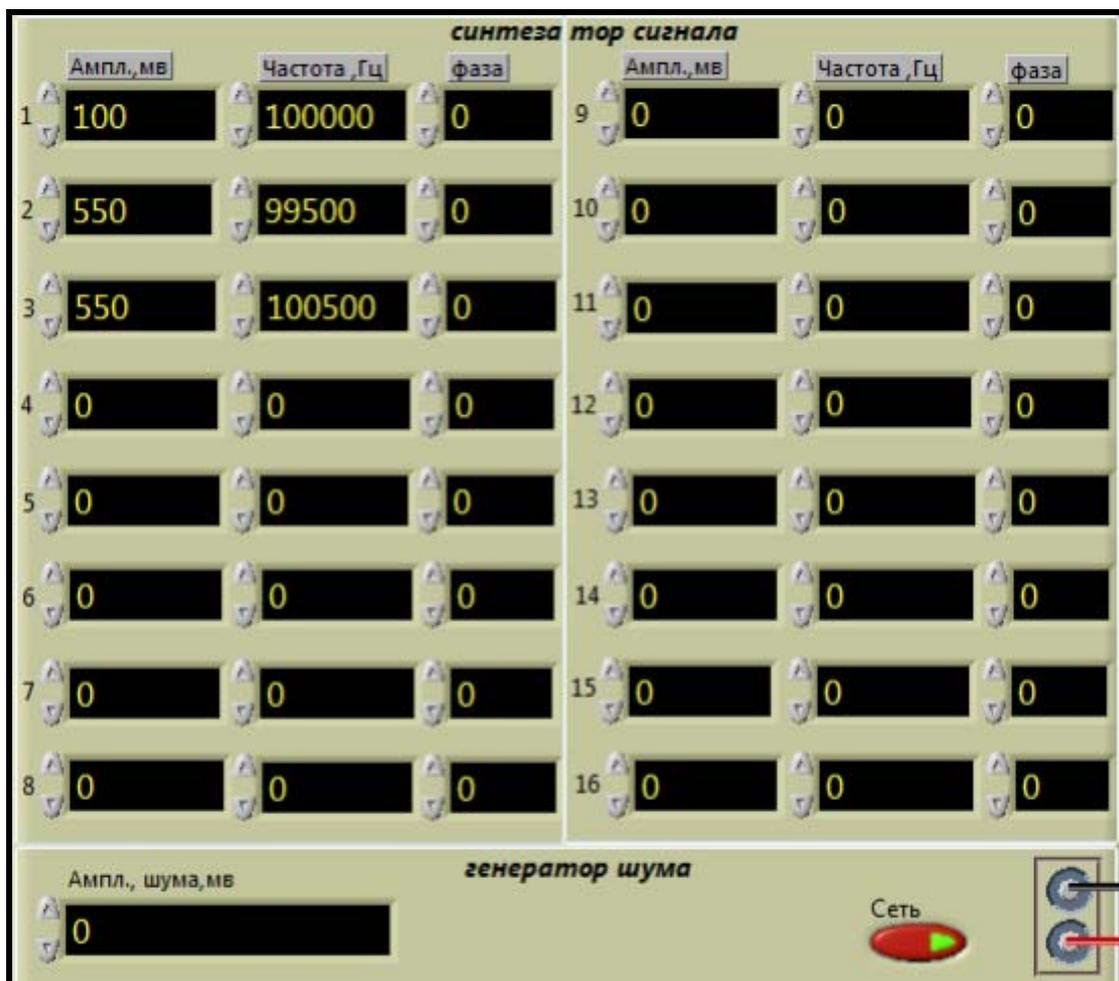


Рис. 4.53

Анализатор спектра (АС)

Интерфейс АС представлен на рис. 4.54. На панели прибора расположены:

- панорамный индикатор (экран) для воспроизведения спектра суммарного сигнала в координатах «уровень – частота»;
- вход прибора;
- кнопка включения «Маркер 1»;
- индикатор положения «Маркер 1» на оси частот;
- индикатор положения «Маркер 1» на оси уровней;
- кнопка включения «Маркер 2»;
- индикатор положения «Маркер 2» на оси частот;
- индикатор положения «Маркер 2» на оси уровней;

- кнопка включения логарифмического масштаба по оси уровней;
- включение прибора;
- иконки: «Крестик», «Лупа» и «Рука».

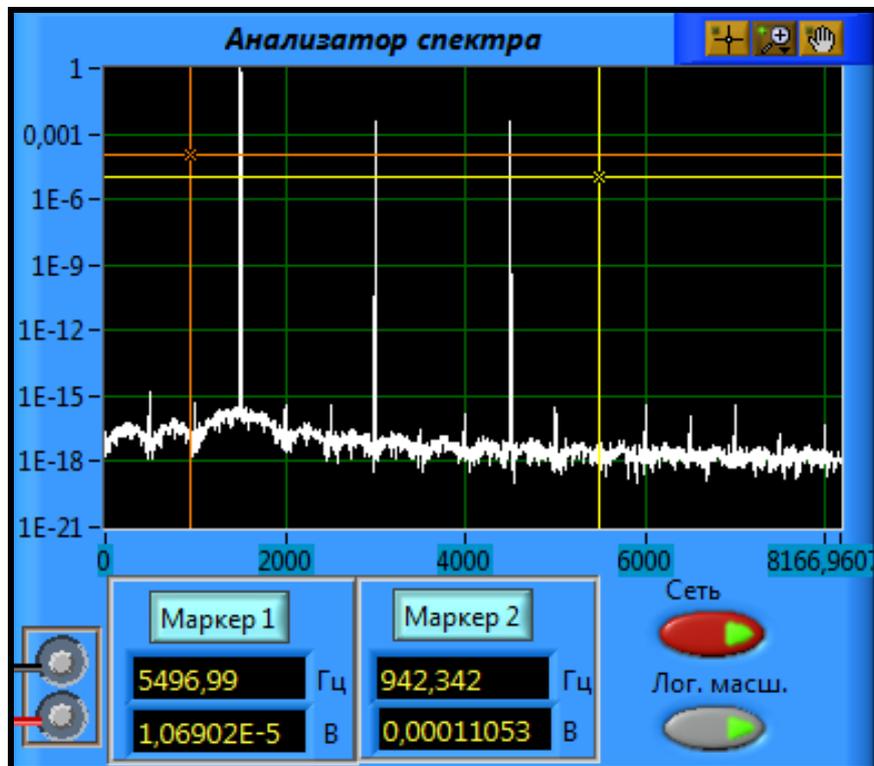


Рис. 4.54

«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;
-  – полное отображение графика;
-  – приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;
-  – отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Осциллограф (O)

Интерфейс осциллографа представлен на рис. 4.55.

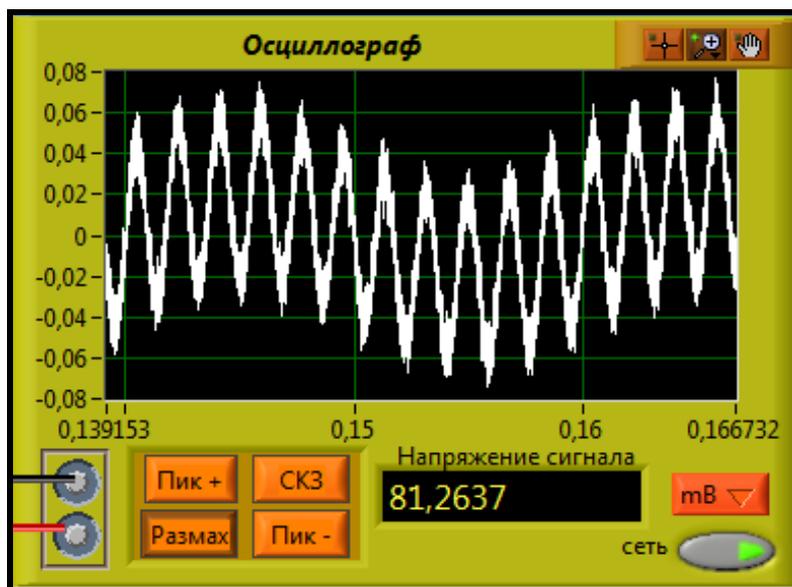


Рис. 4.55

На панели прибора расположены:

- осциллографический индикатор (экран) для воспроизведения суммарного сигнала в координатах мгновенный уровень – время (временное представление сигнала с шумами);
- вход прибора;
- поле выбора измеряемого параметра встроенного вольтметра;
- индикатор измеренного параметра;
- выключатель;
- выплывающее меню для выбора единицы измерения;
- 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.

На передней панели в верхнем правом углу имеются три иконки: «Крестик», «Лупа» и «Рука». Первая иконка при работе с прибором не используется. Назначение остальных кнопок, как у АС.

Измеритель искажений (ИИ) Интерфейс ИИ представлен на рис. 4.56. На панели прибора расположены:

- вход прибора, на который поступает сигнал с шумами;
- выключатель;
- индикатор измеренного коэффициента гармоник сигнала;
- 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):

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

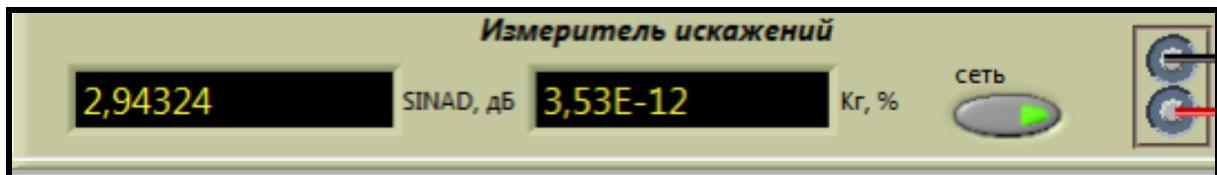


Рис. 4.56

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

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

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.

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 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° . 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, пиковые значения, 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 (рис. 4.57 и 4.58) и без шумов, а также амплитудно-модулированный сигнал (АМ).



Рис. 4.57

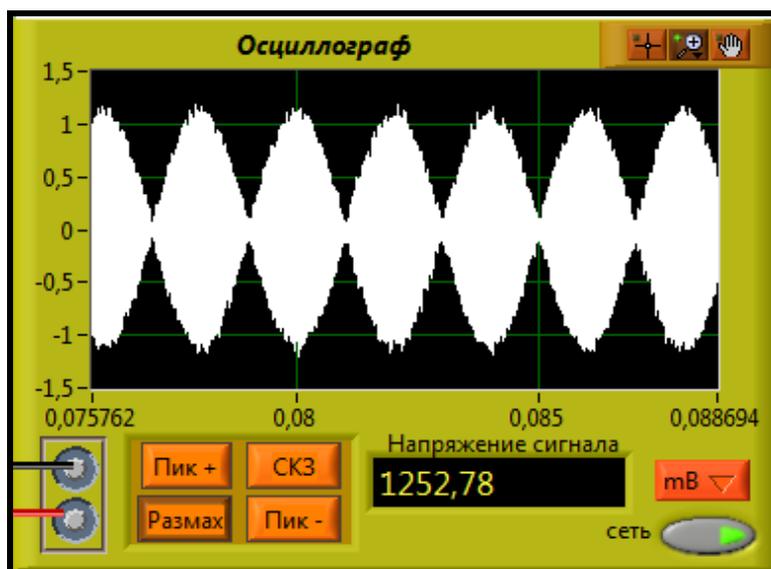


Рис. 4.58

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 форм.

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 форм 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 сигналов.*
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.

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.

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.

4.9. Анализаторы спектра

Цели и задачи исследований

Уровень 1. *Изучить виртуальный анализатор спектра* – принцип его 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 сигналов.

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

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, 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, 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 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 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, а именно его способность различать гармонические составляющие спектра с близкими частотами. Чем уже полоса пропускания фильтра, тем выше разрешающая способность. Сигналы с выхода фильтров детектируются, последовательно коммутируются, анализируются и подаются на индикатор.

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.

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 вто-

ром 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 спектр, но и фазовый, а также одновременно представлять сигналы во временной и частотной областях, совмещая дополнительные 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. 4.59. Она содержит АЦП и вычислитель. Примером является прибор СК4-71.

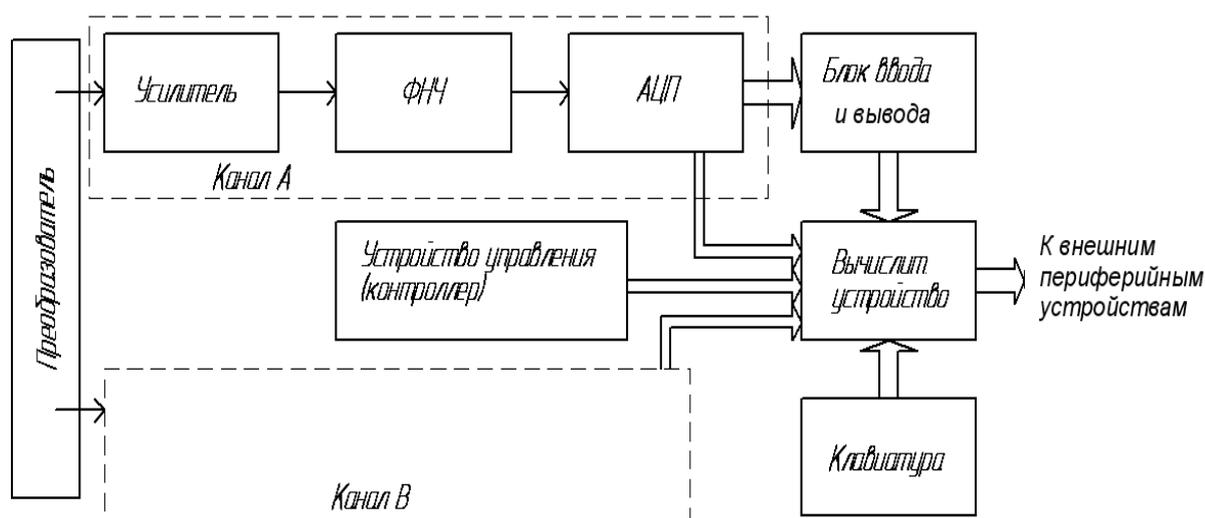


Рис. 4.59

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.

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 – 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.

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 6 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. 4.60.

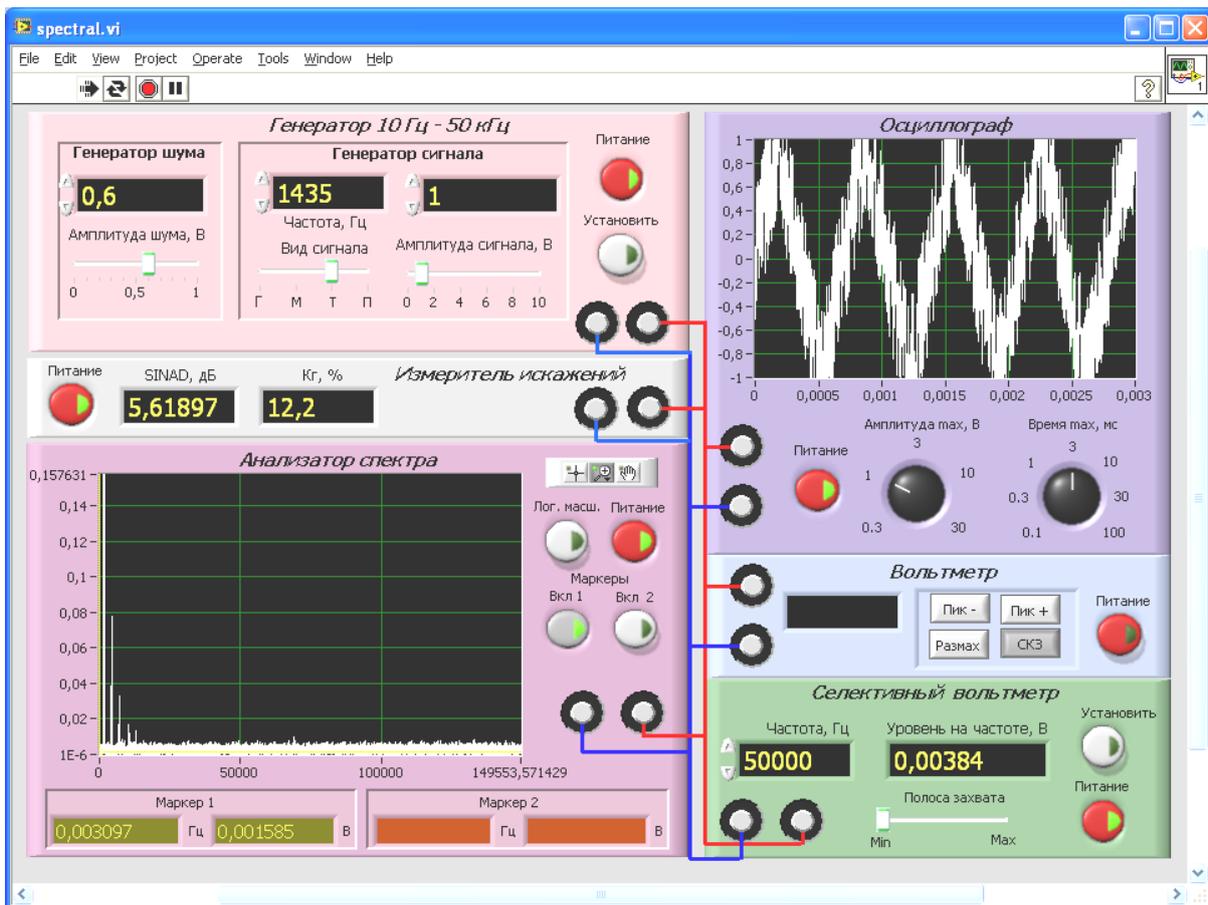


Рис. 4.60

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).

Передние панели виртуальных приборов

Генератор сигналов (ГС)

ГС состоит из двух модулей: «Генератор шума» и «Генератор сигнала» (рис. 4.61). 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. 4.61

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 до 50 000 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 СИ.

Вольтметр имеет четыре режима измерения (рис. 4.62):

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

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

«**Размах**» – размаха сигнала;

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



Рис. 4.62

Осциллограф

Прибор применяется для контроля формы сигнала. На передней панели (см. рис. 4.63) 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).

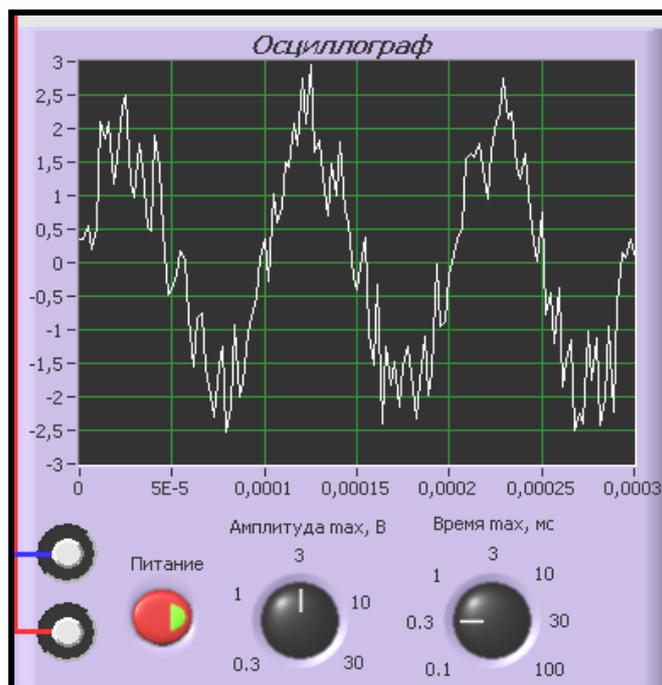


Рис. 4.63

Селективный вольтметр

Прибор (рис. 4.64) 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.

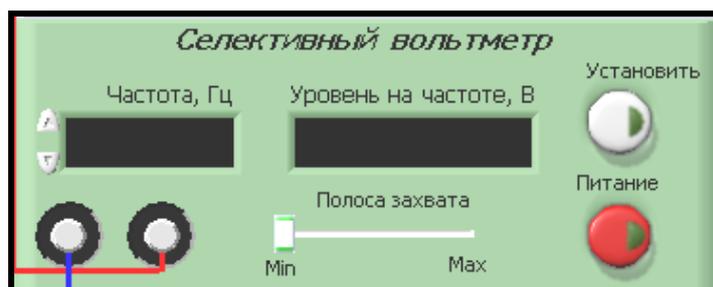


Рис. 4.64

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.

Анализатор спектра

Прибор (рис. 4.65) имеет кнопку «Лог. масш.» для переключения отображения вертикальной оси в линейном масштабе или в логарифмическом.

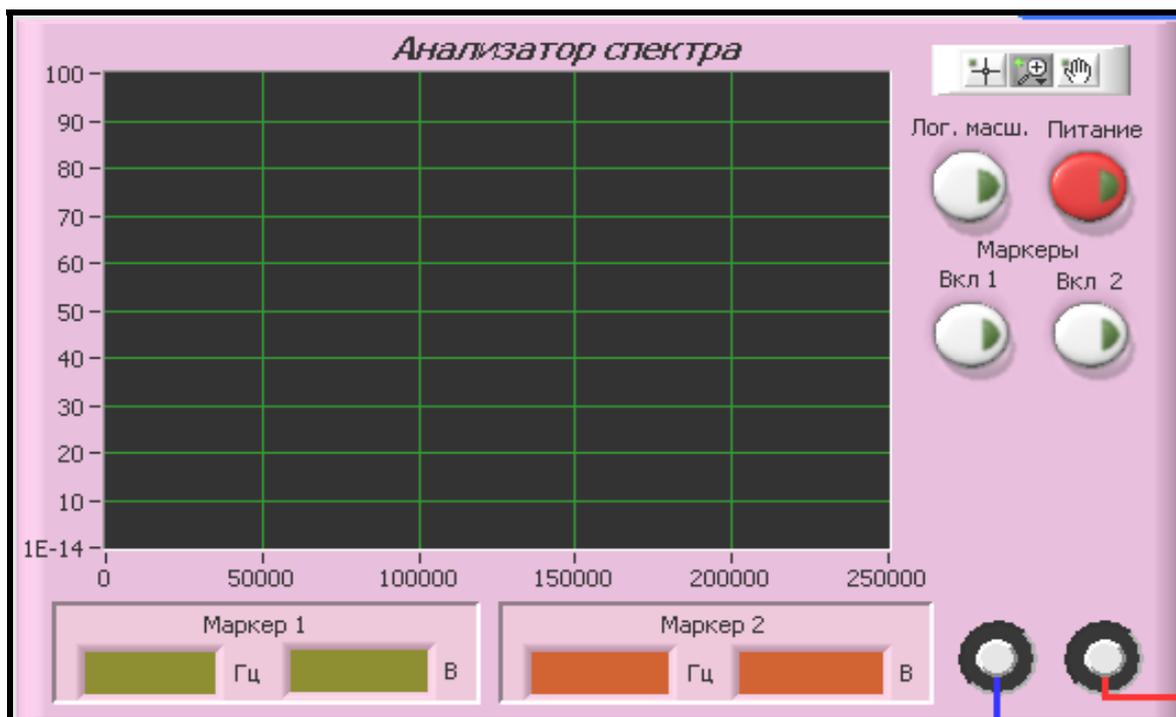


Рис. 4.65

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;

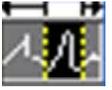


– режим управления положением маркеров путем совмещения крестообразного курсора с выбранным маркером при удерживании левой кнопки мыши и перемещении маркера в нужном направлении.

Режимы «Лупы»:



– увеличение выбранной области;



– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение графика;



– приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;



– отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

Измеритель искажений

Прибор (рис. 4.66) измеряет «SINAD, дБ» сигнала (Signal In Noise And Distortion) – выраженное в децибелах отношение уровня полного сигнала к суммарному уровню шума и искажений:

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

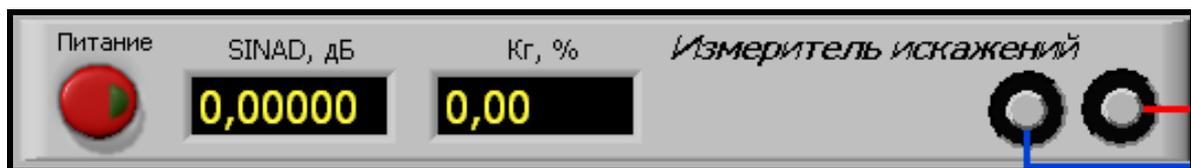


Рис. 4.66

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

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

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 – 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

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

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, фиксируют уровень АС и образцового прибора. Тогда относительная погрешность

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

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

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 разных уровней и частот без шумов. Оценить правильность представления спектра в линейном и логарифмическом масштабах. Сравнить полученные результаты с установленным уровнем ГС и 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 масштабах

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

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.

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?

4.10. Цифровые и вычислительные вольтметры

Цели и задачи исследований

Уровень 1. Изучить цифровые и виртуальные вычислительные вольтметры, принцип их 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.

Основные сведения

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.

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 – алгоритмы БПФ.

Современные ВВ микропроцессорные, многофункциональные, с автокалибровкой, автоматическим выбором полярности и предела, самопроверкой, возможностями математической обработки и усреднения результатов многократных измерений.

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.

Комплекс виртуальных приборов (КВП)

Общие сведения

КВП содержит 4 двухканальных виртуальных прибора:

- Двухканальный генератор сигналов (ГС).
- Двухканальный вычислительный вольтметр (ВВ).
- Однолучевой двухканальный осциллограф (О).
- Однолучевой двухканальный анализатор спектра (АС).

Интерфейс КВП показан на рис. 4.67.

После запуска КВП на экран монитора выводится окно передних панелей соединенных между собой приборов. Выходной сигнал ГС подан одновременно на входы всех приборов.

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.

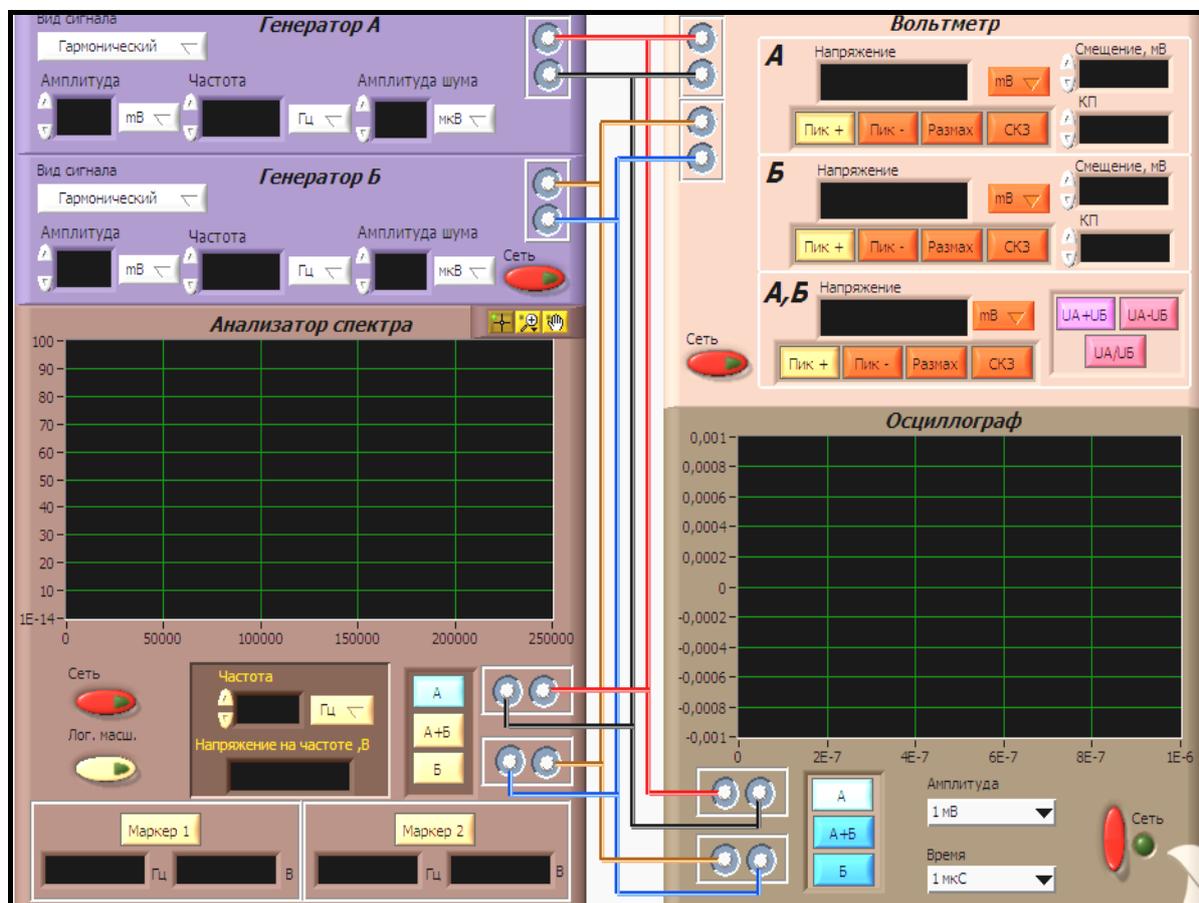


Рис. 4.67

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 выбранными пользователем формой, частотой и уровнем (рис. 4.68).

При выполнении лабораторной работы ГС используется в качестве объекта исследования, а также как калибратор уровня сигнала, с помощью которого определяются погрешности испытуемого ВВ.

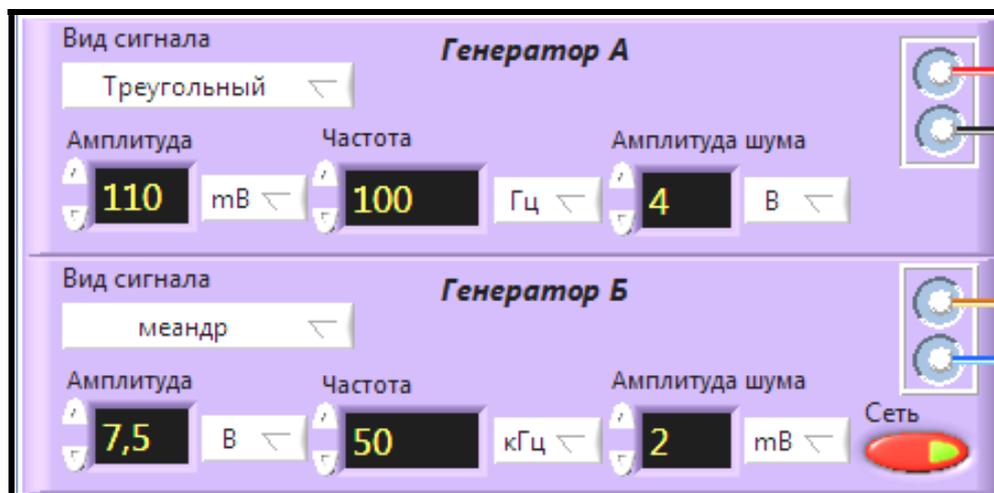


Рис. 4.68

На панели прибора расположены:

- индикаторы амплитуды сигнала в каналах А и Б;
- выплывающие меню вида сигнала (гармонический, треугольный, меандр, пилообразный) в каналах А и Б;
- выплывающие меню единиц амплитуды сигнала (мВ, В);
- индикаторы частоты сигнала в каналах А и Б;
- выплывающие меню единиц частоты сигнала (Гц, кГц);
- индикаторы амплитуды шума сигнала в каналах А и Б;
- выплывающие меню единиц амплитуды шума (мВ, В);
- выключатель питания;
- выходы генераторов А и Б.

ГС состоит из двух модулей: А и Б. В каждом модуле выбираются 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 генериру-

емого 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 канала, а также канал комплексной обработки информации в обоих рабочих каналах. В каждом канале реализовано четыре режима измерения (рис. 4.69) с индикацией:

«Пик –» – пикового уровня отрицательной полуволны сигнала;

«Пик +» – пикового уровня положительной полуволны сигнала;

«Размах» – размаха сигнала;

«СКЗ» – среднеквадратического значения сигнала.

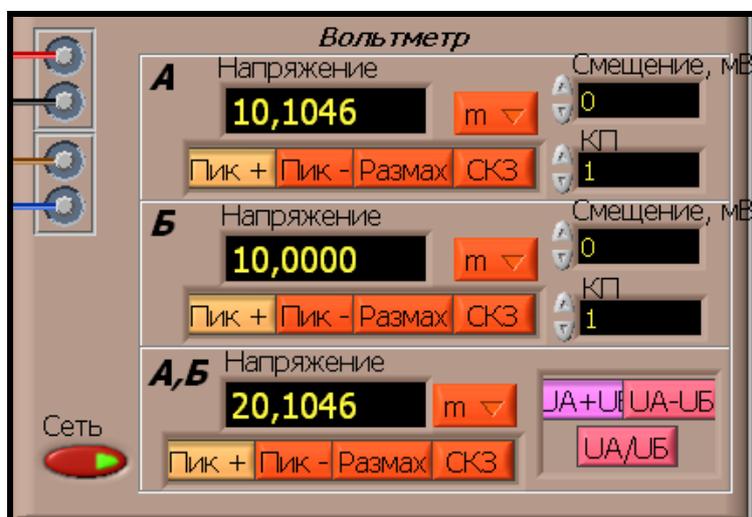


Рис. 4.69

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 панели прибора расположены:

- индикаторы измеряемого напряжения в каналах А, Б и АБ;
- выплывающие меню единиц напряжения (В, мВ);
- индикаторы для установления смещения в каналах А и Б;
- индикаторы для установления коэффициента передачи в каналах;

- выключатель режима измерения СКЗ сигнала;
- выключатель режима измерения размаха напряжения;
- выключатель режима измерения минимального напряжения;
- выключатель режима измерения максимального напряжения;
- панель выбора режима обработки информации в каналах (разность, сумма или отношение напряжений каналов А и Б);
- выключатель питания;
- входы каналов А и Б.

Однолучевой двухканальный осциллограф

Прибор применяется для визуального контроля формы сигналов, подаваемых с выхода ГС.

На передней панели (рис. 4.70) 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).

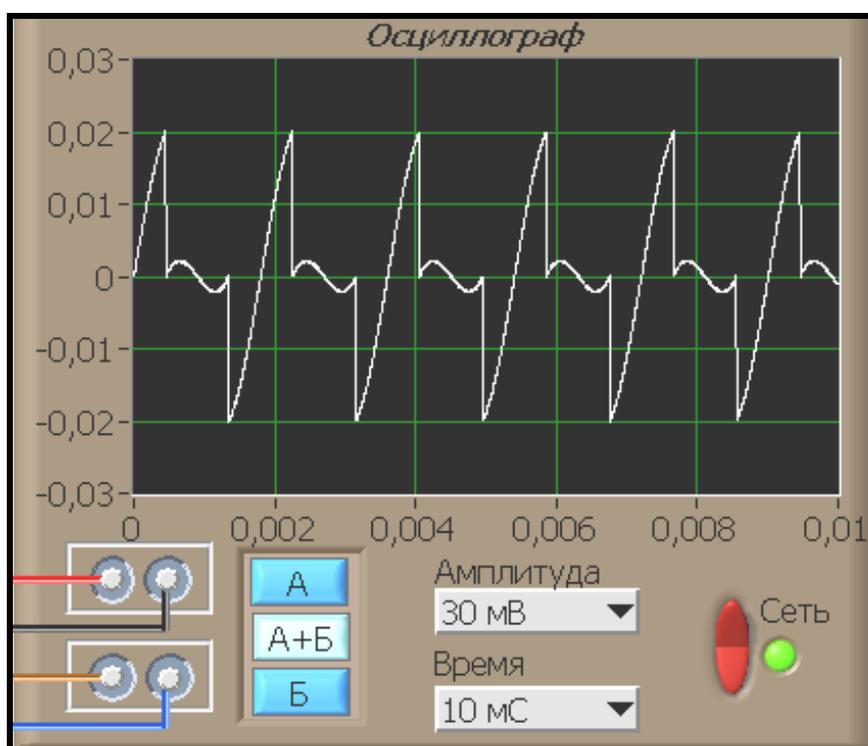


Рис. 4.70

Кнопки «А», «Б» и «А+Б» позволяют выбрать рабочий канал сигнала, представляемого на индикаторе осциллографа.

На панели прибора расположены:

- входы А и Б;
- панель выбора вида сигнала, выводимого на экран (А, Б или А+Б);
- выплывающие меню времени развертки (ось абсцисс);
- выплывающие меню амплитуды развертки (ось ординат);
- выключатель питания;
- панорамный индикатор (экран).

Однолучевой двухканальный анализатор спектра (АС)

АС применяется для оценки соотношений гармонических и шумовых составляющих спектра сигнала, подаваемых на входы ВВ.

Прибор (рис. 4.71) 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.

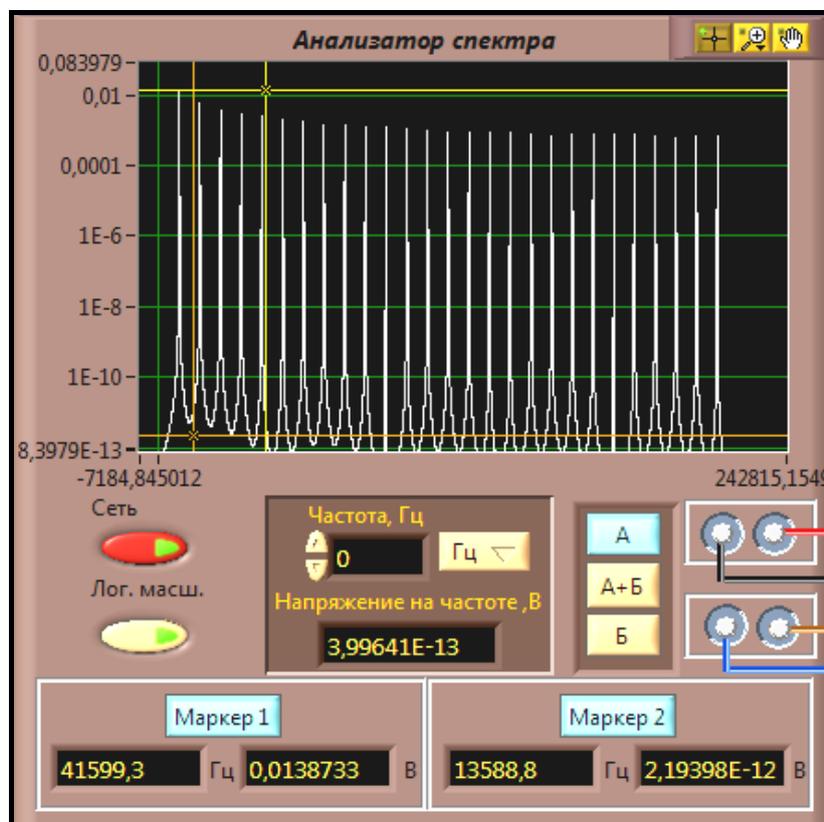


Рис. 4.71

На панели прибора расположены:

- панорамный индикатор (экран);
- выключатель питания;
- переключатель масштаба оси амплитуд (логарифмический/линейный);
- кнопки включения маркеров 1 и 2;
- индикаторы частоты в точках расположения маркеров 1 и 2;
- индикаторы уровня в точках расположения маркеров 1 и 2;
- индикатор выбранной частоты измерения уровня сигнала;
- индикатор напряжения на выбранной частоте измерения;
- выплывающее меню для выбора единицы частоты сигнала (Гц, кГц);
- входы А и Б;
- панель выбора вида спектра, выводимого на экран (А, Б или А+Б);
- панель управления положением маркеров и диапазоном представления данных по осям частот и амплитуд.

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».

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

Режимы «Лупы»:



– увеличение выбранной области;



– увеличение участка горизонтальной оси;



– увеличение участка вертикальной оси;



– полное отображение графика;



– приближение при нажатии и удержании левой кнопки мыши;



– отдаление при нажатии и удержании левой кнопки мыши.

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.

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 – образцовым и может применяться для исследования характеристик 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 сигналов.

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) оцените неравномерность уровня сигнала ГС по частоте для всех уровней сигнала и шумов в абсолютном и относительном масштабах:

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

- ж) постройте 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) установите на выходах ГС синфазные гармонические сигналы 1 мВ, 100 Гц без шумов и оцените суммарный уровень сигнала на О и ВВ;

б) установите на выходах ГС противофазные гармонические сигналы (1 мВ и –1 мВ), 100 Гц без шумов и оцените суммарный уровень сигнала на О и ВВ;

в) повторите измерения по пп. «а» и «б» на других частотах и уровнях сигнала без шумов и с шумами;

г) повторите измерения по пп. «а» – «в» для сигналов других форм;

д) проверьте 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 границах. Предел допустимых значений относительной основной погрешности измерения переменного напряжения примем $\delta_{\text{доп}} = \pm 0,1 \%$.

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 ...), 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 мВ;

д) выберите максимальное и минимальное значения (U_{\max} и U_{\min}) для каждого уровня в диапазоне рабочих частот и оцените неравномерность АЧХ ВВ в абсолютном и относительном масштабах:

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

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

ж) повторите пп. «а» – «е», выбрав другой вид сигнала;

з) проверьте правильность работы ВВ в режимах «Размах», «Пик–» и «Пик+».

и) проверьте правильность работы канала А, Б в режиме вычислителя, подавая на входы А и Б известные сигналы;

к) проверьте правильность ввода аддитивного и мультипликативного поправочного числа.

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 схема измерений.
6. 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 поразрядного кодирования.
4. Нарисуйте временную диаграмму процесса уравнивания для произвольного измеряемого напряжения и помехи.
5. Чем определяется погрешность при поразрядном 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 времени импульсного преобразования.
10. Нарисуйте временные диаграммы времени импульсного преобразования при различных измеряемых напряжениях и наличии помехи.
11. Чем определяется погрешность измерения при времени импульсном 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 различных видов?
25. Для чего предусмотрено введение поправочных чисел?
26. Как оценить уровень сигнала при наличии шума?
27. Как измерить амплитуду сигнала или шума?
28. Как компенсировать 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?

5. РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

5.1. Комплекс виртуальных приборов широкого применения

Комплекс виртуальных приборов (КВП) предназначен для промышленного применения, а также для решения широкого круга задач образовательного характера. В КВП прямое преобразование Фурье (ППФ) компьютер осуществляет в соответствии с выражением

$$S_n = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_i \cdot e^{-j \frac{2 \cdot \pi \cdot i \cdot n}{N}},$$

где S_n – спектральная составляющая сигнала на частоте nf_δ/N ; n – номер спектральной составляющей ($n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$); f_δ – частота дискретизации; N – общее число отсчетов; A_i – мгновенное значение сигнала; i – текущий номер отсчета, полученного с помощью АЦП ($i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$).

Дискретное обратное преобразование Фурье (ДОПФ), применяемое для восстановления сигнала во временной области из спектра $S(\omega)$, выполняется в ПК в соответствии с выражением

$$A_i = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} S_n \cdot e^{j \frac{2 \cdot \pi \cdot i \cdot n}{N}},$$

где A_i – мгновенное значение сигнала в момент времени i/f_δ ($i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$); S_n – амплитуда n -й гармоники спектра ($n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$).

Расчетное выражение для работы компьютерного измерителя автокорреляционной функции может быть записано в следующем виде:

$$\psi(n \cdot \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} [S(i \cdot \Delta f)]^2 \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot i / N),$$

где $\tau = 1/f_\delta$ – период дискретизации; $\Delta f = nf_\delta/N$.

Выражение для функции взаимной корреляции имеет вид

$$\psi(n \cdot \tau) = \operatorname{Re} \left(\sum_{i=0}^{N-1} S_{1i} \cdot S_{2i}^* \cdot e^{j \frac{2 \cdot \pi \cdot i \cdot n}{N}} \right),$$

где $\psi(n\tau)$ – значение функции взаимной корреляции между сигналами A_1 и A_2 , имеющими спектры S_1 и S_2 соответственно.

В общем случае, когда T_C не равно $N\tau$, вычисления в ПК осуществляются с дополнительной процедурой наложения спадающего к краям временного окна (Хэмминга, Кайзера и др.).

Измерение коэффициента гармоник в КВП реализовано спектральным методом.

Аппаратной основой КВП является АЦП-ЦАП или плата аналогового ввода-вывода, вставляемая в ПК (рис. 5.1). Программные средства комплекса предназначены для реализации на алгоритмическом уровне одновременной работы нескольких виртуальных приборов широкого применения, а именно:

- двухканального осциллографа;
- двухканального анализатора спектра;
- измерителя автокорреляционной функции;
- двухканального измерителя частоты;
- измерителя фазовых сдвигов;
- измерителя временных интервалов;
- двухканального вычислительного вольтметра;
- двухканального измерителя нелинейных искажений;
- генератора гармонических и импульсных сигналов.

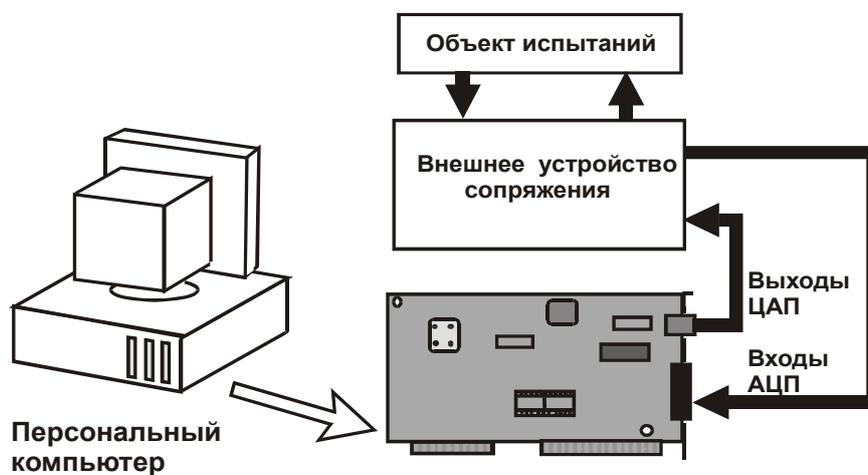


Рис. 5.1

Главное меню выбора приборов и режима работы представлено на рис. 5.2. Программа позволяет выбрать тип прибора и режим работы: реального времени или анализа записанных файлов. Примеры передних панелей управления конкретными приборами приведены на рис. 5.3 – 5.6: вычислительный вольтметр – на рис. 5.3; частотомер на рис. 5.4; генератор сигналов – 5.5; анализатор спектра – на рис. 5.6.

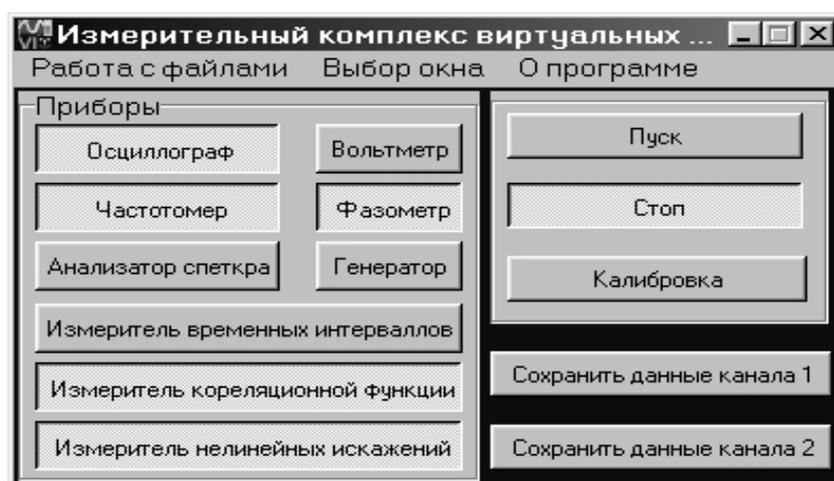


Рис. 5.2



Рис. 5.3



Рис. 5.4

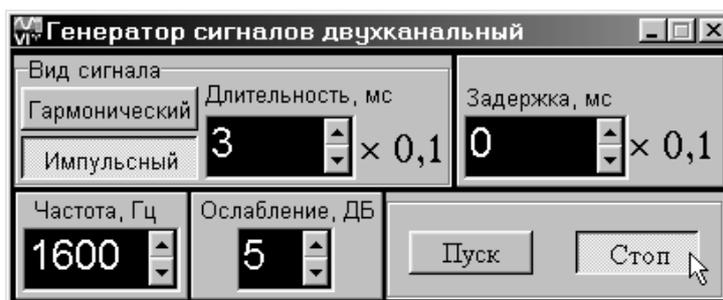


Рис. 5.5

В структуре КВП каждый прибор может программироваться как автономный прибор из общей оболочки программных средств. В окне любого панорамного прибора можно пользоваться лупой, приближая и удаляя участки графика, измерять по осям «X и Y».

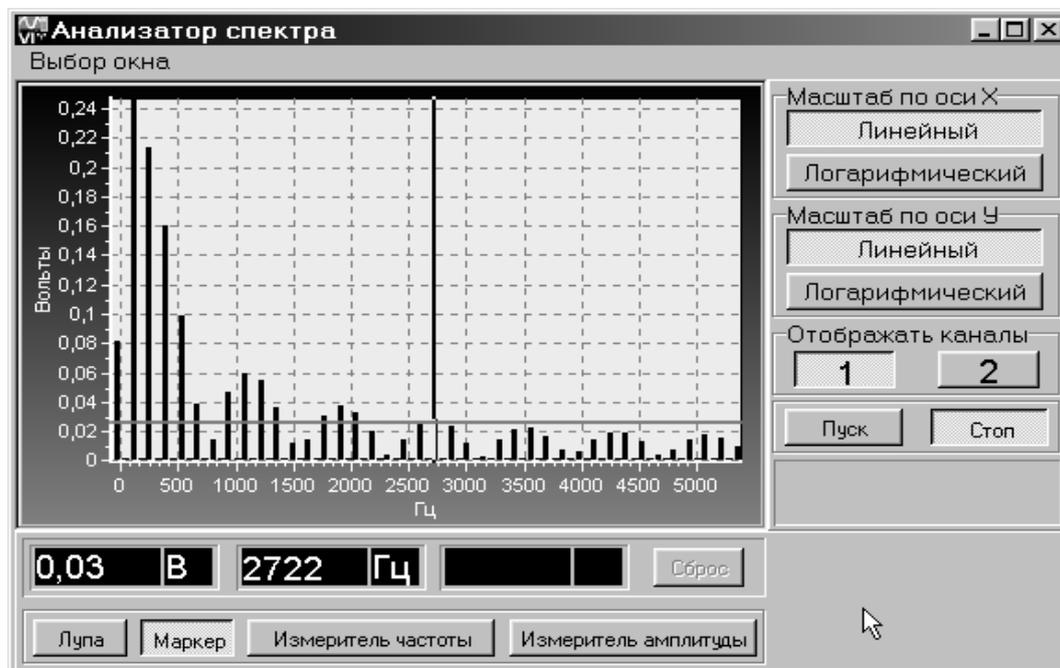


Рис. 5.6

Программные средства КВП могут работать с любыми АЦП и ЦАП, имеющими драйверы под Windows. Параметры быстродействия, динамического диапазона, точности зависят от используемой платы.

Комплекс представляет интерес для учебного процесса, позволяя решать проблемы оснащения учебных лабораторий современными компьютерными средствами измерений без существенных дополнительных затрат. Использование КВП в учебном процессе целесообразно не только с точки зрения минимизации затрат. Управление КВП с помощью универсальной клавиатуры ПК освобождает студентов от рутинных манипуляций с органами передней панели обычных приборов, позволяя усложнять задачи лабораторных исследований собственно объекта, а не измерительного оборудования.

5.2. Система мониторинга радиоканала

КВП для статистических измерений предназначен для исследования параметров закона распределения замираний радиосигнала. В

соответствии с задачами в алгоритмах обработки дискретизированных данных использованы следующие понятия и их математические представления:

1. Глубина замираний $R=20\lg(U_{0.9}/U_{0.1})$,

где $U_{0.9}$ – уровень сигнала для доверительной вероятности 0.9;

$U_{0.1}$ – уровень сигнала для доверительной вероятности 0.1.

2. Дисперсия $D_x=M\{[x-m_x]^2\}$,

где x – случайная величина; m_x – среднее значение случайного процесса.

3. Среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma = \sqrt{D_x}$.

4. Релеевский закон распределения для амплитуды A :

$$p(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right).$$

5. Критерий согласия Пирсона $\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(E_i - M_i)^2}{M_i}$,

где m – число столбцов гистограммы; E_i – экспериментальные значения частот; M_i – значения частот, соответствующие выбранной модели распределения.

Количество столбцов гистограммы для выборки размера n может быть определено по формуле Брукса и Каррузера

$$m=5\lg(n).$$

Для поставленной задачи испытаний имитатора тропосферного канала распространения радиоволн было разработано компьютерное устройство оценки статистических параметров (УОСП), основой которого стал специализированный комплекс виртуальных приборов.

Характеристики УОСП

Исследование огибающих амплитуд сигналов проводится в двух каналах в объеме выборки 1024 отсчета. Исследование законов распределения замираний включает:

- непрерывный мониторинг с построением графиков огибающей, среднего и среднеквадратического отклонения в двух каналах;
- построение в двух каналах гистограмм распределения и оценка по критерию χ -квадрат принадлежности законов распределения замираний к распределению Релея;

- измерение медианы, среднего значения, среднеквадратического отклонения и суммарной глубины замираний;
- построение графиков автокорреляционной функции в двух каналах;
- построение графика функции взаимной корреляции амплитуд выходных сигналов на одной частоте в двух ветвях разнесения.

Режимы работы УОСП

1. Режим отображения параметров реального времени «Real Time».
2. Режим апостериорной оценки характеристик «Post».

Данные для апостериорного анализа выбираются с привязкой по времени к началу записи. Предусмотрена возможность сжатия данных путем процедуры усреднения по любому целому числу отсчетов или путем выбора данных из любого целого числа отсчетов. Осуществляется запись в память компьютера массива сжатых данных для дальнейшего анализа параметров закона распределения и корреляционных связей по низкочастотным компонентам. Процесс сжатия может быть многократным, что дает возможность оценивать низкочастотные процессы замираний путем анализа создаваемых при сжатии блоков данных с построением графиков математического ожидания и среднеквадратического отклонения замираний. Функциональная схема УОСП приведена на рис. 5.7.

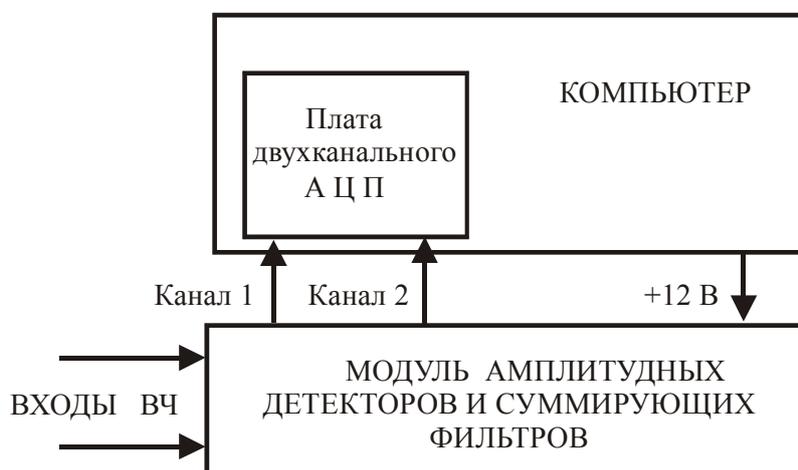


Рис. 5.7

Основой УОСП является ПК, оснащенный платой двухканального АЦП, на входы которой подаются выходные сигналы детекторов. АЦП обеспечивает дискретизацию огибающих амплитуд высо-

кочастотных сигналов в заданном диапазоне временных интервалов от 20 до 2048 с. Внешний модуль двухканальных амплитудных детекторов обеспечивает формирование огибающих сигналов, их предварительное усиление и согласование платы аналогового ввода с входами АЦП.

Исследование параметров закона распределения затухания

В режиме последовательного непрерывного анализа каждого блока данных компьютер строит гистограмму распределения и определяет основные характеристики распределения: математическое ожидание (M), медиану (Me), среднеквадратическое отклонение, глубину замираний ($Range$). По критерию хи-квадрат оценивается соответствие полученного распределения обобщенному закону Релея.

С применением процедуры БПФ рассчитывается и выводится на экран монитора автокорреляционная функция. Измерение функции взаимной корреляции сигналов в двух выбранных каналах осуществляется одновременно с другими характеристиками. Из главного окна (рис. 5.8) оператор может активизировать следующие рабочие окна измерений в двух выбранных каналах:

- **Signal** – график амплитуды входного сигнала (рис. 5.9);
- **Histogram** – гистограмма распределения амплитуды (рис. 5.10);
- **Average value** – график математического ожидания (рис. 5.11);
- **Average square deflection** – график СКО (рис. 5.12);
- **AutoCorrelation** – автокорреляционная функция.

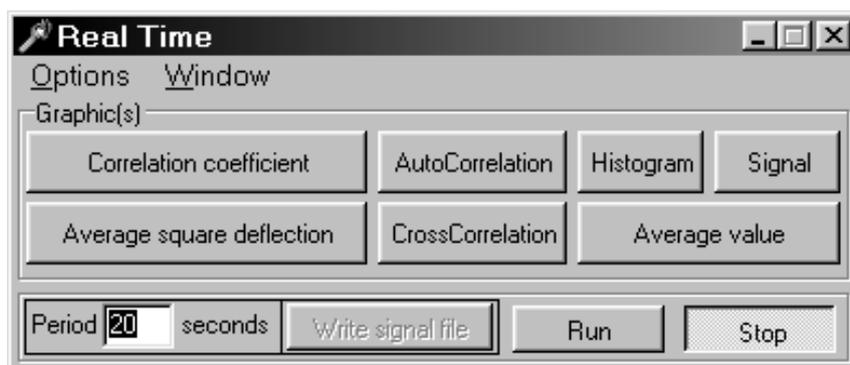


Рис. 5.8

Переход из одного рабочего окна в другое может осуществляться активизацией меню **Window**, которое имеется в левом верхнем углу.

лу каждого окна. Главное меню содержит кнопки выбора периода (Period) дискретизации от 20 до 2048 с (seconds), включения режима записи (Write signal file), запуска (Run) и остановки (Stop) работы.

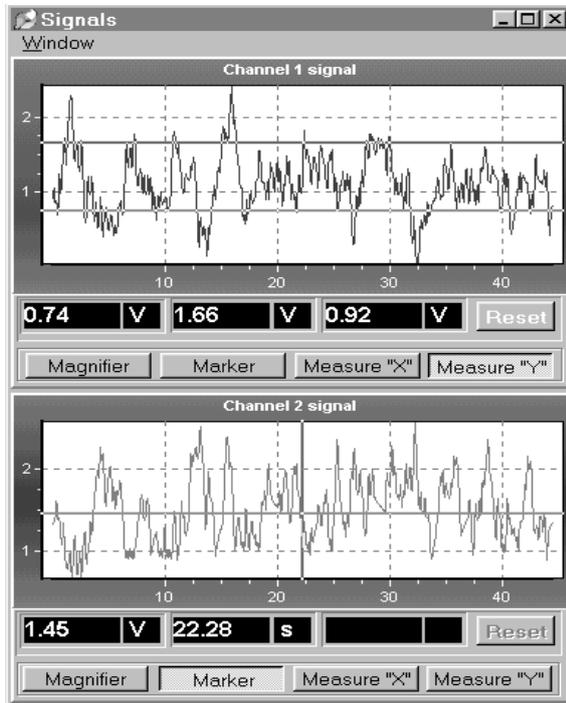


Рис. 5.9

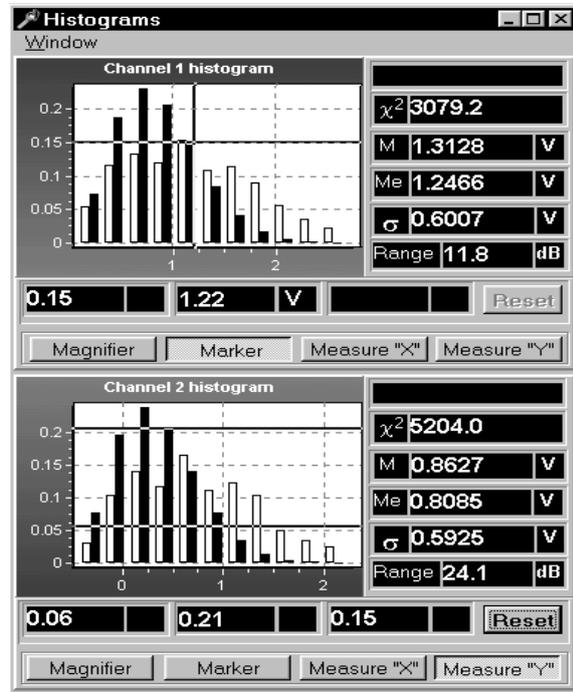


Рис. 5.10

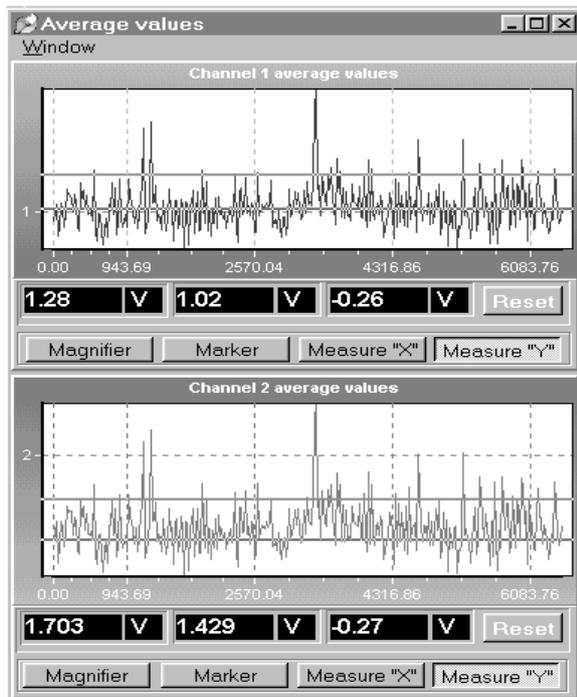


Рис. 5.11

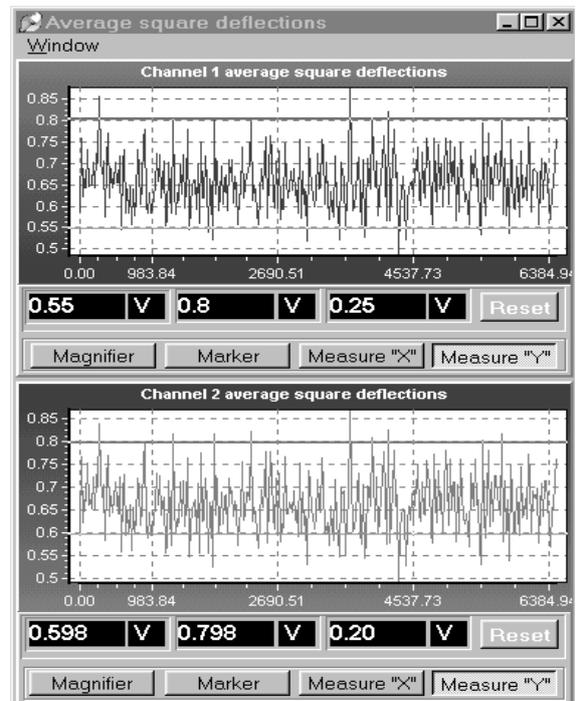


Рис. 5.12

В каждом рабочем окне вывода информации имеются следующие кнопки, облегчающие работу оператора:

1. **Magnifier** – кнопка лупы, позволяющая путем использования мышки увеличить любой участок графика.
2. **Marker** – кнопка маркера, включающая измерение положения по осям “X” и “Y” точки на графике, помечаемой с помощью мышки.
3. **Measure “X”** – кнопка включения режима измерения по оси “X” с представлением в окне цифрового индикатора положения и расстояния между двумя вертикальными линиями на графике.
4. **Measure “Y”** – кнопка включения режима измерения по оси “Y” с представлением в окне цифрового индикатора положения и расстояния между двумя горизонтальными линиями на графике.
5. **Reset** – кнопка обнуления измерителей по обеим осям.

После выбора периода дискретизации и имени файла записи данных может быть включен режим записи. Оператор может работать в одном окне или выводить на экран монитора несколько необходимых ему рабочих окон в любом сочетании по своему усмотрению, как показано на рис. 5.13 и 5.14.

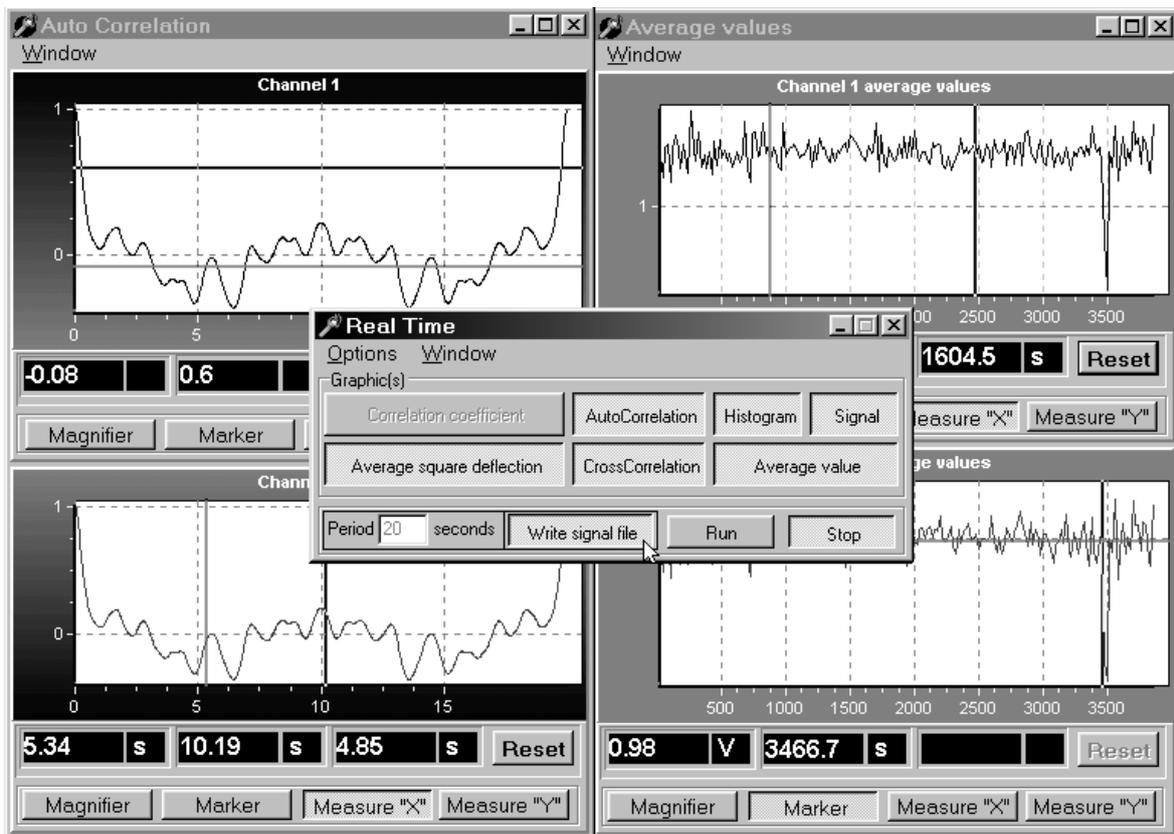


Рис. 5.13

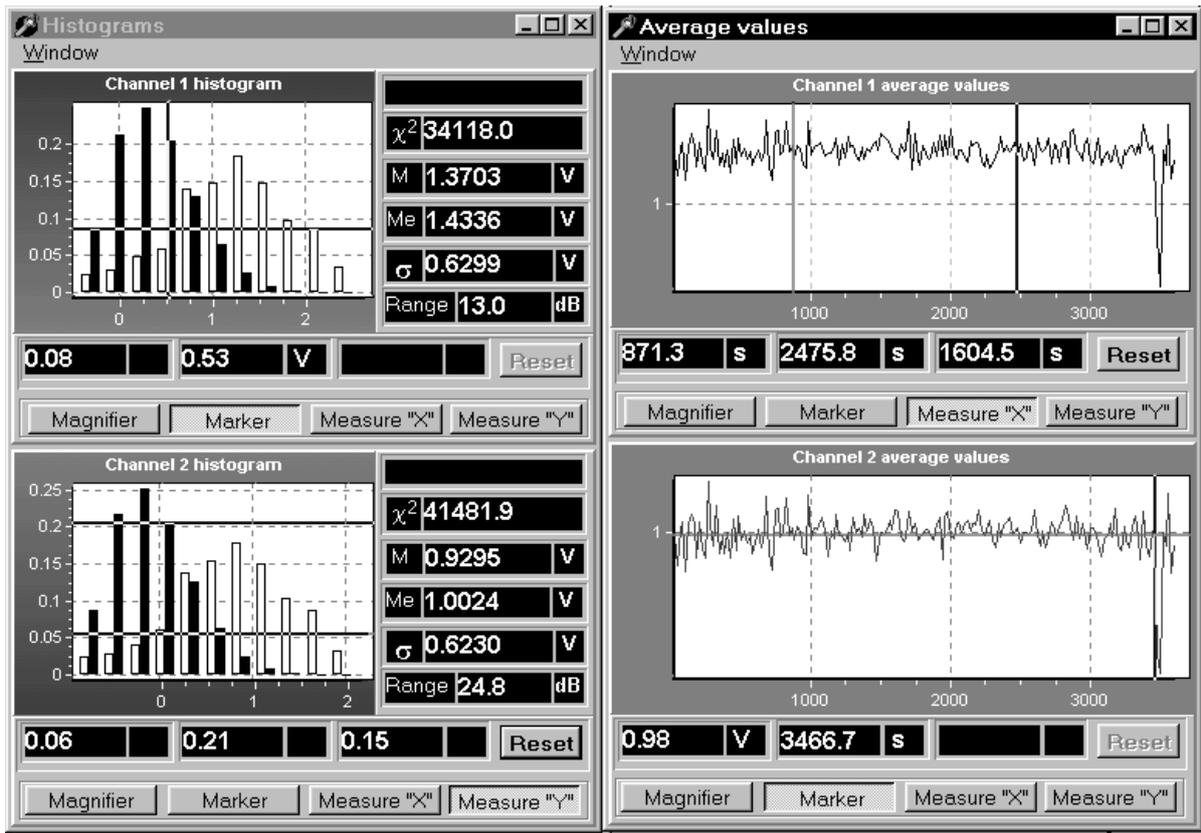


Рис. 5.14

Оценка коэффициента и радиуса корреляции сигналов

Значение коэффициента взаимной корреляции амплитуды (огибающих) выходных сигналов на одной частоте в двух ветвях разнесения должно лежать в диапазоне $0,2 < \rho_{XY} < 0,6$. Выражение для расчета ρ_{XY} имеет вид

$$\rho_{XY} = \{\sum_N (U_X - U_{XCP})(U_Y - U_{YCP})\} / \{\sum_N (U_X - U_{XCP})^2 \sum_N (U_Y - U_{YCP})^2\}^{1/2},$$

где \sum_N – сумма по выборке из $N = 1024$; U_X и U_Y – мгновенные значения сигналов в ветвях разнесения; U_{XCP} и U_{YCP} – средние значения сигналов огибающих по выборке из N значений.

Оценка радиуса частотной корреляции осуществляется путем нахождения коэффициента взаимной корреляции ρ_F сигналов фиксированных частот $F_{Г2}$ и $F_{Г1}$ по формуле

$$\rho_F = \{\sum_N (U_1 - U_{1CP})(U_2 - U_{2CP})\} / \{\sum_N (U_1 - U_{1CP})^2 \sum_N (U_2 - U_{2CP})^2\}^{1/2},$$

где \sum_N – сумма по выборке из $N = 1024$; U_1 и U_2 – мгновенные значения сигналов огибающих на выходе имитатора, оцениваемые на ча-

стотах $F_{Г2}$ и $F_{Г1}$; U_{2CP} и U_{1CP} – средние значения сигналов огибающих по выборке N .

Измерения пар U_1 и U_2 может осуществляться поочередно за время до 10 мс (интервал временной корреляции) путем изменения частоты одного генератора или коммутации выходов двух генераторов, имеющих частоты $F_{Г2}$ и $F_{Г1}$. Интервал между измерениями пар должен превышать временную корреляцию и составлять от 20 до 2048 с в зависимости от спектра замираний. При установке разностной частоты $F = F_{Г2} - F_{Г1}$ на границу допуска измеряется ρ_F и полученное значение сравнивается с величиной $1/e$.

Программа анализа повторяемости сигнала

В процессе статистических испытаний возникает задача оценки повторяемости огибающей сигнала, для решения которой была создана специальная программа анализа записанного сигнала. Оценка повторяемости осуществляется путем нахождения коэффициента взаимной корреляции двух отрезков сигналов: исходного и любого другого отрезка аналогичной длины, вырезаемого из выбранного интервала времени со сдвигом, программируемым пользователем на стадии анализа файла данных, длительность записи которого может составлять несколько часов. Расчет коэффициента взаимной корреляции ρ_{XY} на выбранном интервале времени может проводиться в двух режимах:

- при использовании всей базы записанных данных;
- со сжатием данных в N раз.

Окно настройки режима анализа повторяемости путем измерения коэффициента взаимной корреляции приведено на рис. 5.15.

Обозначения:

- **File** – меню выбора файла;
- **Open signal base** – открыть базу записанных ранее сигналов;
- **Create new signal base** – создать новую базу сигналов со сжатием;
- **Size in seconds** – размер файла в секундах;
- **Window** – меню, позволяющее выйти в окно «Signal» для детальной визуальной проверки повторяемости огибающей сигнала;
- **File information** – информационное поле, заполняющееся данными после выбора конкретного файла;
- **Date of creation** – дата создания файла;
- **Sampling frequency** – частота дискретизации, с которой записан файл;
- **Parameters of analysis** – поле задания параметров анализа;

- **Block size** – размер начального блока данных, который проверяется на повторяемость;
- **Ratio** – требуемый коэффициент сжатия;
- **Block shift** – выбранный шаг сдвига блока при анализе повторяемости;
- **Analyse file from**– начало интервала, в котором ищется повторяемость огибающей;
- **Analyse file to** – конец интервала, в котором ищется повторяемость огибающей;
- **Correlation level** – выбираемый граничный уровень корреляции;
- **Signal graphic** – кнопка выхода в окно сигнала и представления графика;
- **Analyse** – кнопка запуска процедуры анализа.

После выполнения расчетов в нижнем окне появится график результатов (рис. 5.16). При этом индицируются только данные, превышающие установленный порог корреляции. Используя стандартные функции увеличения сектора данных с помощью мышки, можно более детально рассмотреть любой участок, который представляет интерес для пользователя.

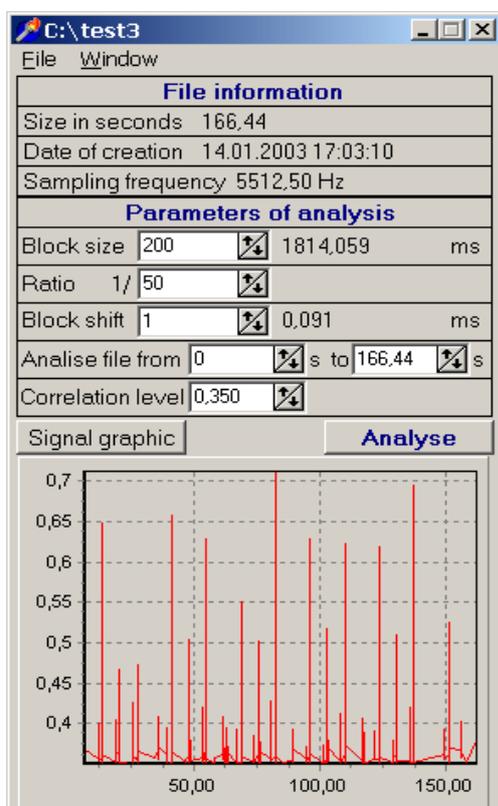


Рис. 5.15

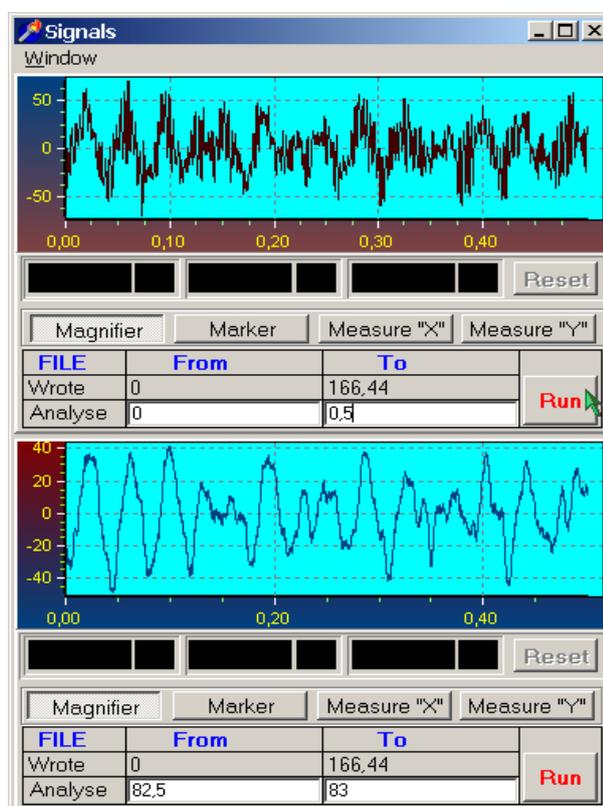


Рис. 5.16

Нажатием кнопки «Signal graphic» можно выйти в окно сигнала и представления графика для более детального визуального анализа повторения части огибающей в выбранном и начальном участках.

Программой предусмотрена возможность сжатия записанных данных путем процедуры их усреднения по совокупности отсчетов (из 2, 3, 4 и так далее по любому целому числу отсчетов) или выбора данных из совокупности отсчетов (из 2, 3, 4 и так далее из любого целого числа отсчетов).

Заключение

Как показала практика, снижение стоимости испытаний и уменьшение времени разработки специализированных систем контроля, испытаний и мониторинга (СКИМ) – это ключевые задачи, которые решаются при использовании технологий виртуальных приборов (ВП). Суть такого подхода заключается в алгоритмизации измерений, при которых результат получается путем вычислений, т.е. на программном уровне при минимуме аппаратных средств. Основой СКИМ становится ПК, который дополняется аналоговыми и цифровыми адаптерами ввода-вывода и обеспечивает измерение, управление экспериментом, цифровую обработку данных, передачу и хранение информации.

СКИМ на базе ВП становится:

- универсальной, позволяющей проводить испытания на разных стадиях жизненного цикла радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в том числе приемо-сдаточные и климатические испытания, а также мониторинг и проверку функционирования;

- гибкой, позволяющей вносить изменения границ, допусков, диапазонов, кодов управления объектом и т.д.;

- достаточной, обеспечивающей контроль и измерение основной структуры параметров РЭА, а также параметров внешних условий, включая контроль параметров питания;

- модульной, позволяющей выбирать модули алгоритмов измерения и приборов в оптимальном сочетании;

- развиваемой, позволяющей вводить в систему испытаний новые алгоритмы и аппаратно-программные модули виртуальных приборов;

- простой, позволяющей модернизировать программу испытаний в диалоговом режиме работы с внешним персональным компьютером, используя удобный интерфейс пользователя;

- открытой, позволяющей передавать информацию внешним пользователям по стандартным шинам ПК (USB, RS-485, RS-232 и др.);

- управляющей, позволяющей передавать команды управления в объект испытаний и вспомогательные модули, в том числе в термошкафы, холодильные камеры, источники питания, генераторы помех и др.

Компьютерные технологии позволяют с наименьшими затратами обеспечить высокое качество, точность и достоверность результатов испытаний. Вычислительная мощь ПК позволяет подвергать собранные с его помощью данные практически любой, даже очень сложной обработке.

Список рекомендуемой литературы

1. Гелль, П. Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс : пер. с фр. / П. Гелль. – 2-е изд., испр. – М. : ДМК, 1999. – 144 с. – 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 / А. Д. Поздняков. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2004. – 128 с. – ISBN 5-89368-474-5.
4. Он же. Автоматизация радиоизмерений : учеб. пособие / А. Д. Поздняков. – Владимир, 1995. – 184 с. – ISBN 5-230-04783-6.
5. Он же. Курс лекций по дисциплине «Метрология и радиоизмерения». В 2 ч. Ч. 1 / А. Д. Поздняков. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2008. – 164 с. – ISBN 978-5-89368-863-4.
6. Он же. Курс лекций по дисциплине «Метрология и радиоизмерения». В 2 ч. Ч. 2 / А. Д. Поздняков. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2009. – 124 с. – ISBN 978-5-89368-976-1.
7. Он же. Алгоритмические методы определения параметров радиотехнических сигналов и цепей / А. Д. Поздняков. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2007. – 116 с. – ISBN 5-89368-736-1.
8. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – 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.

Учебное издание

ПОЗДНЯКОВ Александр Дмитриевич
ПОЗДНЯКОВ Владислав Александрович

ВИРТУАЛЬНЫЕ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

Учебное пособие

Редактор Р. С. Кузина
Технический редактор Н. В. Тупицына
Корректор Е. П. Викулова
Компьютерная верстка Е. А. Кузьминой

Подписано в печать 29.05.15.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 13,48. Тираж 80 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.