

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет телекоммуникаций

Кафедра метрологии и стандартизации

А. Л. Гурский, В. Т. Ревин

ВИРТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

*Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения
в качестве учебно-методического пособия для специальности 1-38 80 01
«Приборостроение, метрология и информационно-измерительные
приборы и системы»*

Минск БГУИР 2016

УДК 621.317.7(076)
ББК 30.10я73
Г95

Р е ц е н з е н т ы:
кафедра радиотехники учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №03-1/2015 от 02.03.2015);

инженер первой категории республиканского унитарного предприятия
«Белорусский государственный институт метрологии»,
кандидат технических наук Т. К. Толочко

Гурский, А. Л.

Г95 Виртуальные средства измерений : учеб.-метод. пособие /
А. Л. Гурский, В. Т. Ревин. – Минск : БГУИР, 2016. – 67 с. : ил.
ISBN 978-985-543-195-5.

Рассматриваются основные принципы и способы построения виртуальных средств измерений (ВСИ), приводятся краткие сведения из теории построения виртуальных средств измерений, рассматриваются вопросы построения ВСИ на основе модульных средств измерений и ВСИ, построенных на основе платформы *PCI* и *PXI*, даются рекомендации по программированию при создании виртуальных средств измерений.

УДК 621.317.7(076)
ББК 30.10я73

ISBN 978-985-543-195-5

© Гурский А. Л., Ревин В. Т., 2016
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2016

Содержание

Введение	4
1 Виртуальные средства измерений и их классификация	6
2 Виртуальные измерительные приборы	14
2.1 Конструктивно законченные виртуальные измерительные приборы	15
2.2 Контроллер звука ПЭВМ в качестве платы ввода/вывода данных виртуального прибора	27
3 Виртуальные средства измерений на базе платформы <i>PCI</i>	29
3.1 Виртуальное средство измерений с функциями осциллографа	33
3.2 Программное обеспечение ВСИ с функциями осциллографа	37
3.3 Виртуальное средство измерения с функциями мультиметра	41
3.4 Программное обеспечение ВСИ с функциями мультиметра	43
3.5 Виртуальное средство измерения для исследования спектра сигналов	46
3.6 Технические характеристики ВСИ с функциями анализатора спектра	58
Заключение	62
Литература	65

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие компьютерной техники привело к такому состоянию, что персональные компьютеры сейчас имеются практически на каждом рабочем месте. При этом используются они для выполнения различных видов работ, в том числе и метрологических, для выполнения различных измерительных операций и обработки данных, полученных в результате измерений при помощи стационарных измерительных приборов. Но если использовать приборы, которые не имеют связи с компьютером, процесс переноса собранной информации в компьютер становится очень трудоемким и утомительным. Между тем можно избавиться не только от необходимости вручную заносить данные в компьютер, но и от внешних (по отношению к компьютеру) громоздких и дорогостоящих приборов вообще. Для этого необходимы одна или несколько плат сбора данных (ПСД), которые возьмут на себя всю заботу о вводе в компьютер аналоговой и цифровой информации. Подбор плат сбора данных зависит от решаемой задачи. Эти платы могут реализовывать функции обычных измерительных приборов или решать более конкретные задачи, включающие последующую обработку сигналов и формирование управляющих сигналов. Таким образом, подобное средство измерений, называемое виртуальным средством измерений (ВСИ), может реализовать функции осциллографов, анализаторов спектра, вольтметров, генераторов и других приборов непосредственно на персональном компьютере.

Компьютерная виртуальная техника в настоящее время стала привычной для пользователей персональных компьютеров (ПК). Широко она используется и в области измерительной техники, породив новый класс средств измерений – виртуальные средства измерений, основанные на использовании совокупности аппаратных и программных средств сбора и обработки измерительной информации. Это стало возможным благодаря интенсивному развитию измерительной и вычислительной техники и информационных компьютерных технологий.

Таким образом, в развитии ВСИ можно выделить два основных функциональных направления:

- измерительную технику, включающую современные измерительные преобразователи и их совокупности в виде измерительных приборов, а также совершенствование подходов, методов, структурных и схмотехнических решений для преобразования различных физических величин в электрическую форму, последующего их преобразования, регистрации и отображения результатов измерений как в аналоговом, так и цифровом виде;

- вычислительную технику, включающую аппаратные, а также программные средства ввода, вывода, обработки, накопления и отображения цифровых данных, включающих и измерительную информацию. При этом необходимо выделить программное обеспечение, которое, будучи первоначально областью программирования, в настоящее время выделилось в достаточно самостоятельную приоритетную область, во многом определяющую

развитие и вычислительной техники, и многих других направлений науки и техники.

Успехи в развитии измерительной и вычислительной техники и программирования явились предпосылками для разработки компьютерно-ориентированных (виртуальных) средств измерений (ВСИ), конкурентоспособных по своим метрологическим характеристикам, а по экономической эффективности заметно превосходящим традиционные средства измерений.

Наиболее известны в области ВСИ достижения американской компании «*National Instruments*». Ориентируясь на возможность свободного доступа любого потребителя к широкому спектру контрольно-измерительных приборов, оснащенных интерфейсом *GPIB (IEEE-488)*, эта компания предложила программные средства, эмулировавшие на экране ПК монитор измерительного прибора и позволявшие управлять процессом измерений с клавиатуры ПК. При этом сбор информации этим же ПК и возможность построения программной связи между процессами управления измерениями, сбора данных и их обработки позволили создать из них единый «технологический» цикл. Такая ситуация создала предпосылки для представления виртуального прибора/инструмента как программы, объединяющей в единое целое аппаратные средства (измерительный прибор, компьютер) и процесс сбора и обработки данных.

Любой компьютер, в том числе и персональный компьютер, может превратиться в мощный измерительный комплекс, если его снабдить одним или несколькими аналоговыми входами. Единственное, чего не может сделать компьютер – непосредственно измерить и обработать аналоговый сигнал. Для решения этой проблемы существуют аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Устройства, с помощью которых аналоговые и/или цифровые данные вводятся в компьютер или выводятся из него, называются устройствами ввода/вывода (УВВ) или платами сбора данных (ПСД).

1 ВИРТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Приведенное определение раскрывает суть средства измерений, заключающуюся, во-первых, в «умении» хранить (или воспроизводить) единицу физической величины; во-вторых, в неизменности размера хранимой единицы. Эти важнейшие факторы и обуславливают возможность выполнения измерения (сопоставление с единицей), т. е. «делают» техническое средство средством измерений (СИ). Если размер единицы в процессе измерения изменяется более чем установлено нормами, таким средством нельзя получить результат с требуемой точностью. Это означает, что измерять можно лишь тогда, когда техническое средство, предназначенное для этой цели, может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру (во времени).

По техническому назначению СИ подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и вспомогательные СИ. Кроме того, совокупность различных СИ может образовывать измерительные установки и измерительные системы.

В соответствии со стандартом [1] виртуальное средство измерений (*virtual measuring instrument*) определяется как средство измерений, реализованное на основе универсальной ЭВМ и дополнительных программных и технических средств, в котором состав и порядок работы программных и технических средств могут быть изменены пользователем, причем для управления процессом измерений и/или отображения их результатов применяют стандартные интерфейсы пользователя.

При этом указывается, что ВСИ работает с реальными объектами и сигналами.

Мера физической величины – СИ, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Различают следующие разновидности мер: *однозначная мера* – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера; *многозначная мера* – мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров; *набор мер* – комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях; *магазин мер* – набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях.

В качестве меры в радиоизмерениях, в частности, используются: частота колебаний кварцевого генератора – мера частоты электрических колебаний;

измерительный резистор – мера электрического сопротивления; измерительный конденсатор – мера электрической емкости.

Измерительный прибор – СИ, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Измерительные приборы – самый распространенный и можно даже сказать основной вид СИ, применяемых на практике для конкретных измерений различных величин.

Информация о свойствах и качествах объектов, полученная посредством измерений, называется измерительной информацией. Сигналом измерительной информации является, как правило, электрический сигнал, который функционально связан с измеряемой физической величиной.

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь может либо входить в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), либо применяется вместе с каким-либо средством измерений. По характеру преобразования различают *аналоговые, цифроаналоговые, аналого-цифровые преобразователи*. По месту в измерительной цепи различают *первичные и промежуточные преобразователи*. Выделяют также *масштабные и передающие преобразователи*.

Для категории СИ, охватывающей измерительные приборы и измерительные преобразователи, допускается применять термин «измерительные устройства».

Вспомогательное средство измерений – СИ величин, влияющих на метрологические свойства другого СИ при его применении или поверке. К ним относятся, например, СИ, применяемые для контроля внешних условий (температуры, давления и т. п.) при выполнении измерений другими СИ или при их поверке.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях. В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на *измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие системы* и др. Измерительную систему, перестраиваемую в зависимости от изменения измерительной задачи, называют *гибкой измерительной системой* (ГИС).

Виртуальная измерительная система (*virtual measuring system*) – измерительная система, реализованная на основе универсальной ЭВМ с дополнительными техническими средствами, в которой состав и порядок работы программного обеспечения и технических средств могут быть изменены пользователем, причем для управления процессом измерений и/или отображения их результатов применяют стандартные интерфейсы пользователя [1].

Дополнительные программные средства ВСИ или виртуальной измерительной системы могут включать в себя следующие компоненты:

- драйверы дополнительных технических средств;
- модули управления процессом измерений и/или отображения их результатов;
- модули процедур, обеспечивающих хранение, обработку, прием и передачу данных;
- модули процедур, обеспечивающих защиту результатов измерений, данных и программных средств и др.

При этом часть дополнительных программных средств целесообразно выделять в качестве метрологически значимого программного обеспечения в соответствии с рекомендациями [1].

Дополнительные технические средства ВСИ (виртуальной измерительной системы) могут быть встроены в корпус ЭВМ и/или размещены за его пределами. При этом они могут включать в себя первичные и вторичные измерительные преобразователи (фильтры, усилители, АЦП, ЦАП и т. п.), меры физических величин, контроллеры, модули для приема и передачи данных по каналам проводной и беспроводной связи и т. д.

В настоящее время обеспечивается возможность перестраивать ВСИ программным способом для измерения различных физических величин, а также изменять порядок выполнения измерений. Таким образом, компьютеры превращаются в ВСИ и могут с успехом выполнять функции стандартных средств измерений (измерительных приборов): вольтметров, амперметров, фазометров, частотомеров, измерителей интервалов времени, генераторов сигналов различной формы, цифровых осциллографов, цифровых анализаторов спектра и т. д.

Другими словами, компьютер делает измерительную систему исключительно гибкой, поскольку пользователь может легко изменить его программное обеспечение (ПО).

Конструктивно ВСИ могут представлять собой цифровые измерительные приборы, измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), информационно- и компьютерно-измерительные системы, а их разработка является одним из наиболее перспективных направлений в области развития СИ.

Основные достоинства ВСИ:

- объем измерительной информации практически неограничен;
- широкие возможности представления и обработки информации;
- настраиваемый интерфейс пользователя;
- расширяемость;

- запись времени и комментариев вместе с данными;
- автоматизация процесса измерений;
- встроенные в измерительные процедуры возможности мультимедийных средств;

- доступ в Интернет для распространения данных по всему миру;
- взаимодействие с базами данных и информационными системами, в том числе и измерительными.

Растущие требования к СИ, с одной стороны, и расширяющиеся возможности измерительной и вычислительной техники, с другой стороны, создают постоянно действующую тенденцию повышения уровня автоматизации средств измерения с целью придания им большей гибкости, расширения их функциональных возможностей, сопряжения их с другими средствами в автоматических системах самого различного назначения.

Первые шаги в направлении автоматизации измерений были сделаны физиками при экспериментальных исследованиях таких сложных объектов как ускорители, установки термоядерного синтеза, пузырьковые камеры и т. п. В 60-е годы XX века эти работы достигли высокого уровня развития и получили воплощение в системах КАМАК, предвосхитивших многие идеи будущих измерительно-вычислительных комплексов.

В 60-е годы XX века в СИ начали встраивать устройства переключения диапазонов, индикаторы полярности, цифровые индикаторы. Эти усовершенствования делали СИ более удобными в эксплуатации, но они оставались непрограммируемыми. Появление *микропроцессоров* сделало практически закономерным переход к машинным методам управления измерительными приборами и обработки измерительной информации. Микропроцессоры, обладая гибкими логическими возможностями, позволяют автоматизировать практически все сервисные операции при измерениях. Но функциональные возможности СИ (число решаемых измерительных задач) изменились незначительно.

Однако систематические работы по автоматизации массовых средств измерений начались в 70-е годы XX века. Основные результаты этих работ, приведшие в конечном счете к трем ветвям гибких измерительных систем, показаны на рисунке 1.1. Вертикальная ось характеризует относительную сложность СИ, отражающую одновременно и некоторую избыточность аппаратных средств СИ и их стоимость.

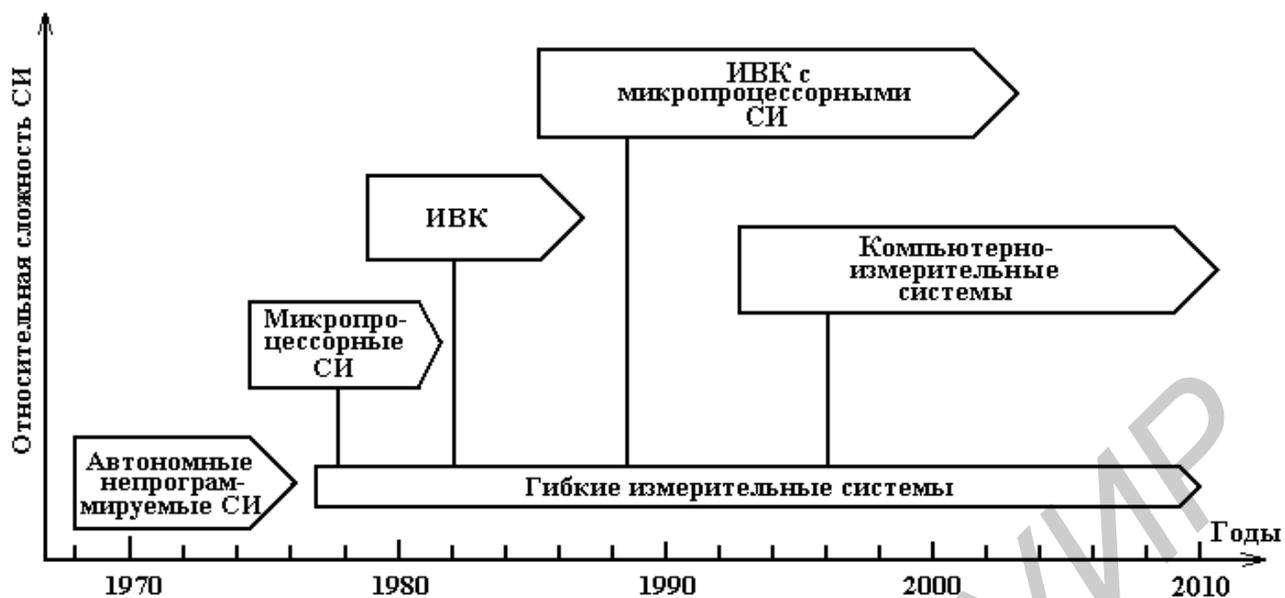


Рисунок 1.1 – Развитие работ по автоматизации массовых средств измерений

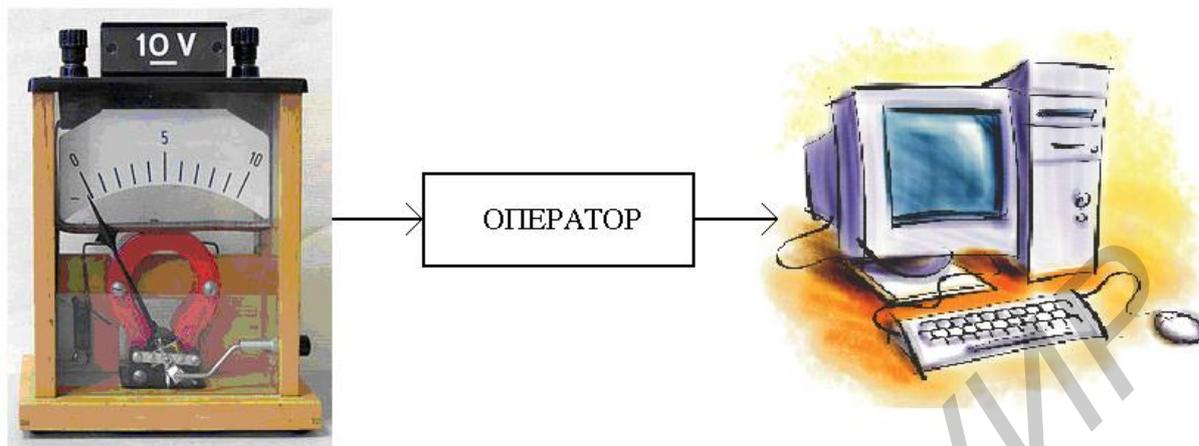
На рисунке 1.2 в упрощенной форме представлены общность и различие рассмотренных классов автоматизированных СИ.

В первом случае связующим звеном между измерительным прибором и компьютером является оператор, который считывает показания прибора и заносит результаты измерений в компьютер. Последний может обрабатывать введенные в него данные по заранее составленному алгоритму, реализованному с помощью программного обеспечения.

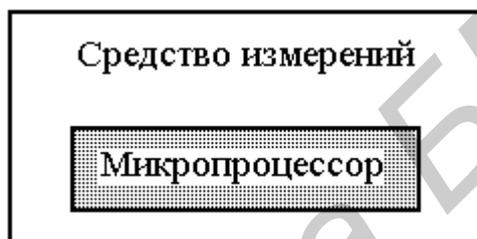
Во втором случае микропроцессор позволяет управлять процессом измерений и считывать, регистрировать и обрабатывать результаты измерений по заранее заложенной жесткой программе без участия оператора.

Функциональные ограничения на СИ были практически сняты стандартизацией приборного интерфейса – устройства сопряжения СИ с компьютером и между собой. Измерительно-вычислительный комплекс, схема которого представлена на рисунке 1.2, в, при соответствующей аппаратной и программной реализации способен выполнять практически неограниченное число измерительных и управляющих функций. Идея ИВК была доведена до совершенства включением в измерительно-вычислительный комплекс микропроцессорных средств измерений. Возможность управления на модульном и общесистемном уровнях делает ИВК исключительно гибким. Но достигаются такие возможности ростом сложности средств измерений, избыточности аппаратных средств и стоимости ИВК. Дело в том, что в ИВК в одну измерительную систему объединяются СИ, рассчитанные на самостоятельное, автономное применение (вольтметры, частотомеры, генераторы сигналов и т. д.) Многие функциональные узлы СИ (органы управления и индикации, устройства фильтрации, интегрирования, линеаризации) в ИВК не используются. Многие аппаратные средства заменяются программными, а роль органов управления и индикации в СИ

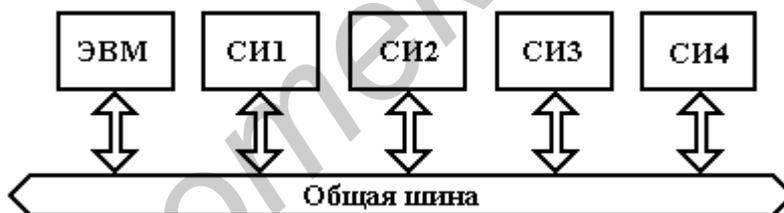
выполняет в ИВК соответственно клавиатура компьютера, манипулятор (например «мышь») и дисплей.



a



б



в



г

a – автономное неавтоматизированное СИ; *б* – микропроцессорное СИ;
в – измерительно-вычислительный комплекс (ИВК);
г – компьютерно-измерительная система (КИС)

Рисунок 1.2 – Различные классы автоматизированных средств измерений

Исключение избыточных узлов СИ, в том числе лишних блоков питания, дает возможность разместить оставшиеся измерительные и управляющие устройства на одной или нескольких печатных платах и конструктивно

объединить их с компьютером. Такая интеграция позволяет создать *компьютерно-измерительные системы* (см. рисунок 1.2, з), обладающие практически такими же возможностями, как и ИВК, но аппаратные затраты при этом значительно снижаются. Роль приборного интерфейса в КИС выполняет собственная общая шина компьютера.

Таким образом, автоматизация средств измерений идет по пути интеграции измерительных и вычислительных средств и функций. Следует отметить некоторую условность в классификации измерительных систем по трем направлениям. Например, микропроцессорные СИ с развитой вычислительной архитектурой и широкими измерительными возможностями трудно отличить от КИС с ограниченным программным обеспечением или от компактных микроИВК. Несмотря на эту условность, каждое из трех направлений автоматизации СИ характеризуется сравнительно устойчивой самостоятельной тенденцией развития.

Этап с конца 90-х годов прошлого столетия по настоящее время наряду с продолжающимся бурным улучшением показателей и характеристик ПК характеризуется распространением новых быстродействующих интерфейсов либо модернизацией традиционных (вытеснение *ISA*-шины стандартом *PCI*, замена интерфейса *SPP* протоколом *EPP/ECP*, появление интерфейса *USB* и др.), а также значительным ростом популярности портативных ПК типа ноутбук. Последнее обстоятельство, учитывая конструктивную сложность использования с такими ПК измерительных плат, выполненных в стандарте *IBM PC*, и проблемы их питания, является наиболее существенным из ряда посылок, приводящих к перемещению усилий разработчиков на создание ИС в виде компактных выносных блоков, работающих как с обычным, так и портативным ПК и обладающих индивидуальной системой питания. В то же время активно продолжают совершенствоваться и системы на основе компьютерных измерительных плат. При этом наблюдается тенденция поисков новых конструктивных решений для самих ПК.

Программное обеспечение измерительных средств трансформируется в сторону дальнейшей интеллектуализации, исключительно важное значение придается эргономическим аспектам. Наблюдается тенденция появления так называемых интеллектуальных датчиков.

Продолжают развиваться направления предыдущих этапов, но уже с более совершенными и производительными интерфейсами: *PCI express*, *SATA* – для встроенных настольных систем; *Ethernet*, *USB 2.0*, *USB 3* – для внешних приставок.

Начинается лавинообразное внедрение беспроводных интерфейсов. Трансформация ВСИ при этом пока что не существенная, поскольку беспроводность интерфейса присутствует в них, как правило, в виде опции, реализуемой с помощью дополнительных интерфейсных модулей.

Произошли существенные изменения в области компьютерных средств – ведущего базиса ВСИ. Ноутбуки опередили настольные системы по популярности (соответственно ВСИ-приставки начали опережать встроенные

системы). Кроме того, появилось несколько альтернативных классов компьютерных средств – нетбуки, смартфоны, а также *PDA* («наладонники»), появившиеся раньше, но только сейчас «за компанию» активно вовлекаемые в тандем с измерительной аппаратурой. Эти изменения повлекли за собой поиски новых компоновочных решений, однако очень удачных – пока что не найдено.

Но, пожалуй, основная из тенденций – стремление к автономизации. Круг замыкается, очередной виток диалектической спирали развития измерительной электроники подходит к своему логическому завершению. Вследствие дальнейшей миниатюризации средств вычислительной техники и повышения при этом их производительности, становится все более актуальным слияние вычислительной техники и ВСИ в едином конструктиве, т. е. как бы возврат к первоначальным, традиционным средствам измерений, однако уже на новом уровне: и функционально-параметрическом (это полноценная компьютеризированная измерительная система), и массогабаритном (это переносные и даже портативные приборы), и стоимостном (это вполне доступные по цене массовые приборы).

Программное обеспечение ВСИ становится еще более важной, как правило, ведущей составляющей. Более того, все чаще оно уже способно отделяться от «материнской» электроники, становясь самостоятельным рыночным продуктом.

Датчики (измерительные преобразователи) становятся все миниатюрнее и интеллектуальнее – со встроенным предусилителем, со встроенным *EEPROM*, хранящим серийный номер и калибровочные константы, с цифровым выходом, со встроенным микропроцессором и т. п.

2 ВИРТУАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В развитии виртуальных средств измерений просматриваются три основных направления.

Во-первых, это создание конструктивно законченных автономных измерительных приборов общего назначения, аналогичных приборам в традиционном исполнении.

Во-вторых, это разработка специализированных измерительных приборов на основе плат сбора и обработки аналоговой измерительной информации на основе компьютерного интерфейса *PCI*.

В-третьих, создание виртуальных измерительных приборов и систем на основе интерфейса *PXI (VXI)*, обладающего всеми видами системной совместимости.

Системная совместимость. Научно-технической основой создания любого комплекса является системная совместимость всех функциональных элементов, входящих в его состав. Основными категориями совместимости являются:

- *информационная*, обеспечиваемая путем унификации и нормирования видов и параметров сигналов с учетом их временных и логических соотношений, физической реализации и правил передачи;

- *метрологическая*, которая предусматривает однотипность метрологических характеристик всех средств измерений, используемых в комплексе и обеспечивающих получение количественной оценки достоверности выполняемых измерений;

- *программная*, достигаемая за счет согласованности используемых программ и подпрограмм, языков программирования, а также за счет нормирования правил обмена потоками информации между узлами комплекса;

- *конструктивная*, предусматривающая унификацию используемых модулей, выполненных на едином технологическом уровне; нормализацию их конструктивных параметров, а также условий их механического сопряжения;

- *эксплуатационная*, обеспечиваемая за счет унификации и нормирования источников питания, условий окружающей среды, надежности и т. п.

Информационная и конструктивная совместимость всех блоков комплекса достигается за счет использования стандартных интерфейсов.

Виртуальные приборы состоят из компьютера, наличие которого сегодня – необходимое условие высококачественных и быстрых измерений, и плат или внешних модулей (устройств) сбора данных, причем программная часть виртуального прибора может эмулировать панель и органы управления реального. Виртуальные измерительные приборы представляют собой компьютер, способный выполнять функции измерительного прибора. Панель, сформированная на экране дисплея, становится панелью управления виртуального прибора. В отличие от реальной панели управления такая виртуальная панель может быть многократно реконфигурирована в процессе работы. Пользователь виртуального прибора управляет им с помощью

графической панели, используя «мышь», клавиатуру и сенсорное управление, а также органы управления внешних устройств.

Виртуальные приборы всего за несколько лет стали популярными и даже модными среди современных потребителей измерительной техники. Используя виртуальные приборы, всего за несколько минут можно превратить свой компьютер в универсальный измерительный прибор с отличными параметрами. Достаточно вставить небольшую плату в свободный слот компьютера или подключить к ПК внешний модуль, установить соответствующее программное обеспечение – и в вашем распоряжении полноценный измерительный прибор с большим цветным экраном, наглядным пользовательским интерфейсом, широкими возможностями измерений, обработки и хранения полученной информации.

2.1 Конструктивно законченные виртуальные измерительные приборы

Широкий спектр измерительных задач и все возрастающие потребности в измерениях в самых разнообразных областях науки и техники определяют активные усилия по разработке традиционных приборов. Будучи серийно выпускаемыми, пройдя тщательную конструкторскую проработку и комплексные приемочные испытания, такие приборы обладают более низкой стоимостью по сравнению с, как правило, уникальными информационно-измерительными системами (ИИС), обладают большей надежностью, сертифицированными метрологическими характеристиками, удобством работы. В то же время обычные приборы традиционно отстают от ИИС по вычислительным возможностям, интерактивности пользовательского интерфейса, информативности системы отображения.

Существует ряд виртуальных приборов, которые воспроизводят с помощью ПО как внешний вид, органы управления и функции измерительных приборов, так и измеряемые физические процессы. Подобные приборы являются виртуальными имитаторами реальных приборов. Они могут использоваться как тренажеры в учебных целях, для массовой подготовки специалистов к работе на реальных измерительных приборах.

Рассмотрим аспекты использования виртуальных измерительных приборов вместо традиционных цифровых приборов, имеющих собственный экран и органы управления.

Во-первых, экономия средств, места и веса. Виртуальный прибор, использующий для отображения результатов измерения экран ПК, а клавиатуру и «мышь» – для задания режимов измерения, стоит, несомненно, дешевле, чем аналогичный «обычный» прибор в тандеме с ПК, и имеет меньшие габариты и массу.

Во-вторых, результаты измерений, как правило, необходимо обрабатывать и протоколировать, для этого данные должны быть переданы в ПК. Для виртуальных приборов эта задача не представляет проблемы, потому

что полученный сигнал уже находится в ПК и для пересылки данных не требуется дополнительный интерфейсный модуль.

В-третьих, настройки современных приборов являются все более сложными и разнообразными. Если же в состав измерительного комплекса входит несколько приборов, то его настройка для решения типичной измерительной задачи требует довольно значительного времени и предполагает возможность существования различных ее вариантов, которые в идеале должны сохраняться пользователем и по мере необходимости вызываться. Все это удобнее осуществлять с единого центра управления, которым является персональный компьютер.

В-четвертых, мобильность использования приборов. Условия работы современного сервис-инженера, вынужденного выезжать для обслуживания и ремонта оборудования на удаленные объекты, сформировали потребность в виртуальных измерительных приборах, выполненных в виде приставки-модуля к ПК, которую можно класть в сумку вместе с портативным ПК (типа ноутбук) и возить с собой.

Современные ноутбуки, постепенно становящиеся главным партнером по измерениям виртуального прибора, по мере своего развития начинают терять устаревшие *LPT*- и *COM*-порты, которые перестают удовлетворять потребностям пользователя и возможностям современного периферийного оборудования. Им на смену приходят современные и скоростные интерфейсы внешнего оборудования – *USB*, *IEEE* (КОП) и др., позволяющие оперативно, без перезагрузки системы, изменять состав измерительного комплекса, подключая необходимые элементы и отключая уже использованные. Они также позволяют без проблем подключить к ПК одновременно несколько виртуальных измерительных приборов (ПК, как правило, имеет несколько *USB*-разъемов, кроме того, для этого можно использовать и концентратор, или хаб). Таким образом, у потребителя появляется возможность проведения сложных измерений с использованием нескольких различных приборов, т. е. возможность реализации виртуальной измерительной лаборатории.

Рассмотрим концепцию виртуальной измерительной *USB*-лаборатории фирмы АКТАКОМ, которая основана на использовании измерительных модулей, подключаемых к ПК с помощью перспективного *USB*-интерфейса. Для нее характерен комплексный подход к разработке отдельных моделей виртуальных приборов, объединяющий их в единую измерительную систему по следующим признакам:

1 Внешнее исполнение. Виртуальный прибор конструктивно выполняется в виде отдельного модуля, подключаемого через внешний порт к ПК. В последние годы такой вариант стал намного популярнее встроенного (модуля или платы), поскольку обеспечивает большую гибкость, возможность работы с разными типами ПК (прежде всего с ноутбуком), как в лаборатории, так и на удаленном объекте.

2 *USB*-интерфейс. Использование этого интерфейса решает проблему подключения виртуальных приборов к любому современному ПК, в том числе

ноутбуку. Другая особенность *USB* – масштабируемость – позволяет без проблем подключить к ПК одновременно несколько виртуальных приборов. Вместе с тем, для совместимости с более старыми ПК сохранена возможность подключения приборов через *LPT*-порт.

3 «Горячее» подключение. Важная для мобильного пользователя особенность *USB*, позволяющая оперативно, без перезагрузки системы, менять состав измерительного комплекса.

4 Унифицированный корпус. Позволяет собирать приборы в вертикальную стойку. Все корпуса имеют современный дизайн и удобную ручку для переноски, которая пригодится при работе вне лаборатории.

5 Единый программный интерфейс. Общий стиль оформления «окон», общие для всех приборов обозначения и пиктограммы на элементах управления, единая логика управления. Это позволяет сократить время обучения работе на приборах всей серии и обеспечивает взаимную совместимость отдельных элементов *USB*-лаборатории.

6 Автоконфигурация типичных измерительных задач. Единая система конфигурационных файлов с помощью общей программной оболочки позволяет динамично перезагружать необходимые настройки приборов в ходе сложных измерений с участием нескольких виртуальных приборов. Это позволяет быстро решать типичные измерительные задачи (например, измерение АЧХ, ВАХ, *C-V*-метрия и др.), оперативно и синхронно устанавливая необходимые режимы и диапазоны. Пользователь может также самостоятельно настраивать и сохранять конфигурацию всей системы, планировать измерения по этапам и во времени.

7 Трансляция данных. Все приборы *USB*-лаборатории АКТАКОМ имеют возможность передачи результатов измерений в приложения *Windows* типа электронных таблиц или текстовых редакторов.

В настоящее время модельный ряд приборов, входящих в *USB*-лабораторию АКТАКОМ, представляет собой хорошо продуманный и сбалансированный набор устройств, позволяющий реализовать широкий спектр измерительных задач и включающий в себя несколько типов приборов.

Виртуальные осциллографы

Для измерения и анализа аналоговых сигналов предназначены следующие модели виртуальных цифровых запоминающих осциллографов: двухканальный осциллограф АСК-3106 и уникальный среди виртуальных широкополосных осциллографов четырехканальный АСК-3107, внешний вид которого представлен на рисунке 2.1.

Эти модели характеризуются следующими параметрами:

- широкой полосой пропускания (от 0 до 100 МГц);
- высокой чувствительностью (от 2 мВ/дел до 10 В/дел);
- высокой частотой дискретизации (до 100 МГц в режиме однократного и до 10 ГГц – для повторяющегося сигнала);

- большим объемом памяти (до 128 Кбайт на канал);
- эффективными программными средствами (лупа времени, курсорные измерения, режим самописца, автонастройка параметров отображения и синхронизации, цифровая фильтрация);
- цифровой персистенцией (инерцией), оптимизирующей отображение сложных модулированных сигналов, как в аналоговом осциллографе;
- мощным программным пакетом анализа полученных осциллограмм (автоматические измерения параметров сигнала, статистический анализ и построение гистограмм распределения выбранных параметров, спектральный анализ на базе быстрого преобразования Фурье (БПФ), эмуляция сигнала, измерение фазового сдвига тремя методами (суммы и разности напряжений, преобразования фазового сдвига во временной интервал и эллипса) и др.)



Рисунок 2.1 – Внешний вид осциллографа-приставки АСК-3107

Виртуальные генераторы

Генераторы сигналов в *USB*-лаборатории АКТАКОМ представлены тремя моделями: двухканальные функциональные генераторы АНР-3121 и АНР-3122 и генератор измерительных ТВ-сигналов АНР-3125.

Генераторы синтезируют сигналы произвольной формы с помощью 12-битного ЦАП и позволяют получать сигналы частотой до 5 МГц (АНР-3121) или 10 МГц (АНР-3122), внешний вид которого представлен на рисунке 2.2. Последняя модель имеет выходной усилитель, обеспечивающий амплитуду выходного сигнала ± 10 В на нагрузке 50 Ом. Приборы характеризуются большим объемом встроенной памяти (до 128 Кбайт на канал) и высокой частотой тактирования ЦАП (до 80 и 100 МГц соответственно). Удобный программный интерфейс дает возможность синтеза сигналов с помощью табличных файлов, частотного синтеза, встроенного графического редактора (рисунок 2.3).

Вновь созданные формы сигналов можно сохранять и использовать в дальнейшем. Кроме этого, имеются библиотека стандартных сигналов, а также

режим «лазерного шоу» – генерация произвольных фигур в режиме X-Y (фигуры Лиссажу).



Рисунок 2.2 – Виртуальный функциональный генератор АНР-3122

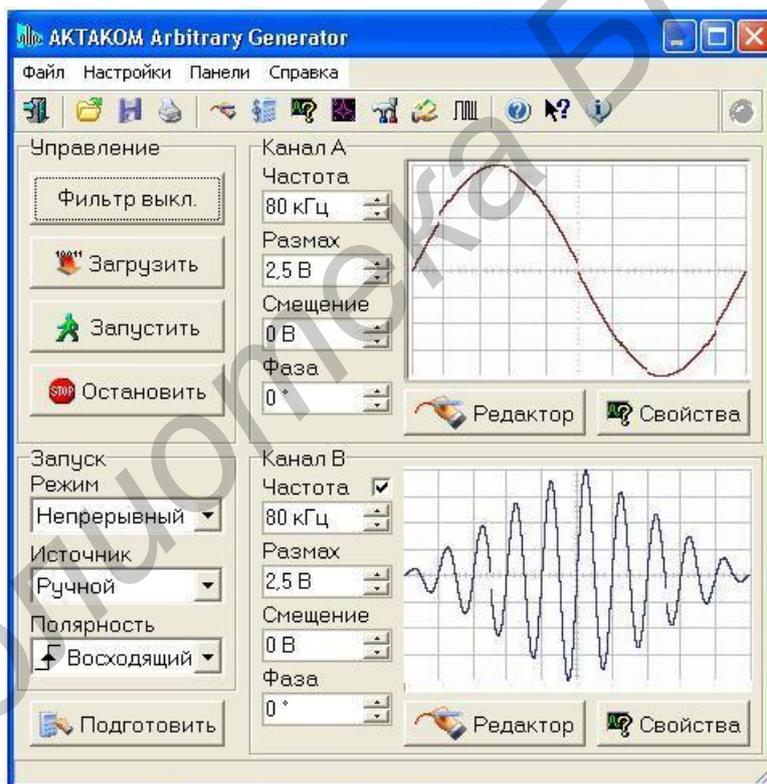


Рисунок 2.3 – Передняя панель виртуального генератора сигналов

Приборы прекрасно работают совместно с осциллографами, позволяя воспроизводить полученные на них осциллограммы генерируемых сигналов. Таким образом, пользователь имеет возможность оперативно создавать библиотеки образцовых сигналов для подачи на вход тестируемого устройства и осуществлять тестирование по входному воздействию.

Специализированный генератор АНР-3125 является генератором стандартных измерительных телевизионных сигналов по ГОСТ 7845–79 и ГОСТ 18471–73. Он представляет собой практически полный функциональный аналог генератора Г6-35 и предназначен для настройки и испытаний при разработке различных устройств и оперативного контроля оборудования телевизионных центров.

Виртуальный логический анализатор

Для анализа цифровых потоков *USB*-лаборатория АКТАКОМ имеет в своем арсенале логический анализатор АКС-3166 (рисунок 2.4) с максимальной частотой дискретизации до 200 МГц и временным разрешением 10 нс. Прибор имеет 16 каналов с регулируемым пороговым напряжением ($\pm 2,5$ В с дискретностью 20 мВ). Буфер длиной 256 тыс. выборок на канал с регулировкой размера предзаписи и послезаписи позволяет обеспечить высокую точность временных измерений длительных потоков данных. Гибкий набор вариантов синхронизации и шаблонов запуска (по наличию шаблона данных, по длительности шаблона данных, по фронту сигнала любого бита данных, по шаблону данных и/или по фронту сигнала любого бита данных в различных комбинациях) позволяет обнаружить различные сбои в потоке данных.



Рисунок 2.4 – Внешний вид логического анализатора АКС-3166

Логический анализатор имеет понятный и удобный интерфейс, который может настраиваться оператором. Например, оператор может выбрать внешний вид и цветовое оформление панелей прибора, цветовое оформление логических сигналов, язык панелей (русский или английский). К услугам оператора – всплывающие подсказки, «прилипающие» панели («прилипшие» панели

располагаются вплотную друг к другу и перемещаются совместно как одно окно).

Каждый режим работы логического анализатора выполнен в виде отдельного окна, которые пользователь может располагать в удобном для себя участке экрана монитора. Главное окно логического анализатора – масштабируемое и может работать в полноэкранном режиме.

На рисунке 2.5 приведено графическое изображение передней панели виртуального логического анализатора, на котором показаны временные диаграммы полученных сигналов.левой кнопкой мыши можно перемещать по графику курсоры А и В, правой – устанавливать пользовательские метки. Двойной щелчок левой кнопкой мыши помещает курсор А в начало и курсор В – в конец экрана.

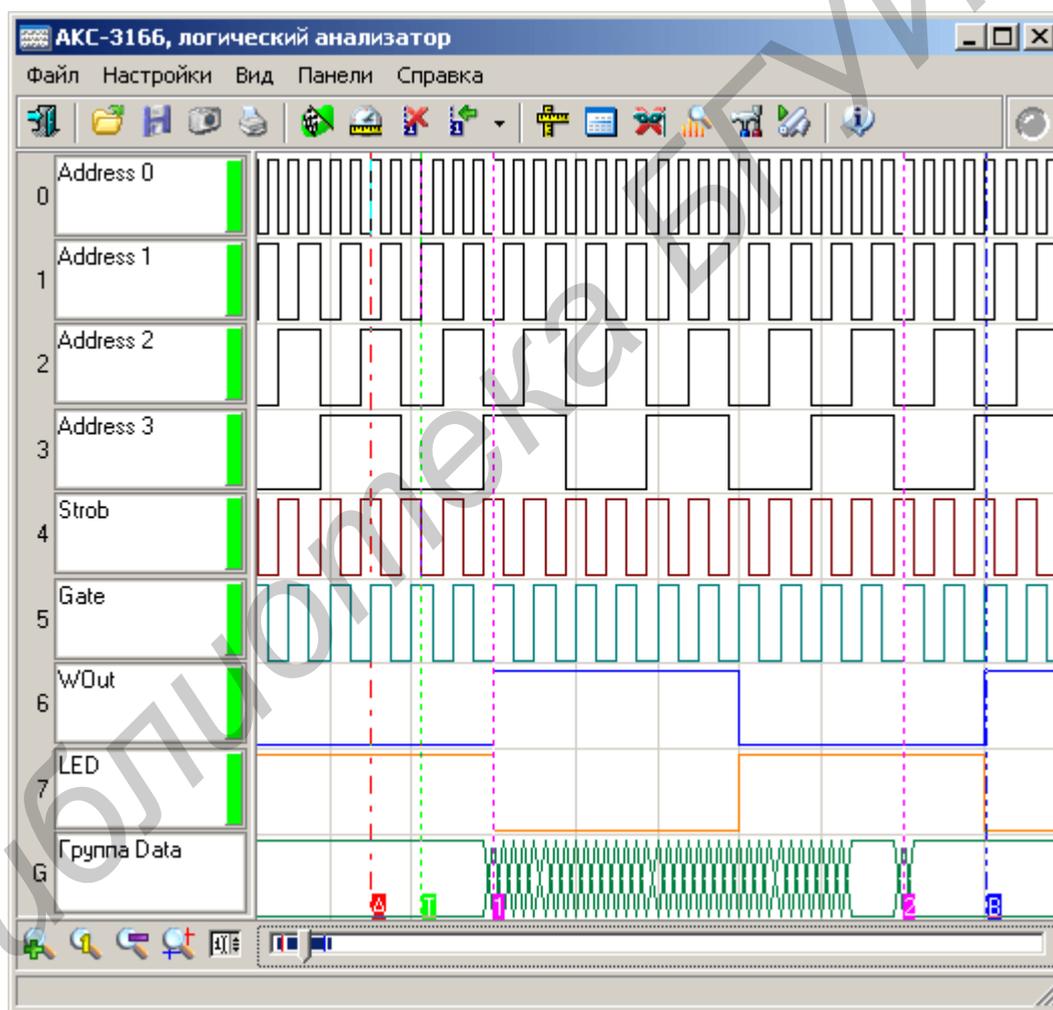


Рисунок 2.5 – Временные диаграммы полученных сигналов

Слева от графика расположена колонка пронумерованных имен каналов. Номера показывают номер бита в выборке, представляемый данным каналом, имена можно задать произвольными (в панели настроек). Справа от имени канала добавлено цветное поле, показывающее действие на канал логического фильтра (см. панель логического фильтра): зеленый цвет означает отсутствие

преобразований данного бита, красный – инверсию, цвет фона панелей с надписью «0» («1») – принудительную установку состояния бита в нулевое (единичное) состояние вне зависимости от результатов изменений.

Виртуальные источники питания

USB-лаборатория АКТАКОМ была бы неполной без источников питания, также управляемых с персонального компьютера через USB-интерфейс. Модели АТН-1533 и АТН-1535 генерируют стабилизированное напряжение в диапазоне от 0 до 30 В, автоматически переходя в режим генератора тока при достижении тока нагрузки установленного оператором значения в диапазоне от 0 до 3 А (АТН-1533) или от 0 до 5 А (АТН-1535). Приборы снабжены защитой от короткого замыкания с аварийной сигнализацией. Внешний вид виртуального источника питания АТН-1535 представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Виртуальный источник питания АТН-1535

Программный интерфейс АТН-1533 и АТН-1535 имеет встроенный графический или математический редактор, с помощью которого оператор имеет возможность задавать закон изменения напряжения во времени. Полученная зависимость, в свою очередь, может сохраняться в виде файла и вызываться в случае необходимости. Перед запуском пользователь может определить максимальное и минимальное значения напряжения выходного сигнала, а также посредством курсоров определить в нужной временной точке значения напряжения и скорости нарастания напряжения.

При этом ПО отслеживает полярность выходного напряжения относительно выбранного общего провода.

Источники питания АТН-1533/1535 позволяют быстро (по программе) изменять режимы электропитания тестируемых элементов (например, при проверке предельных режимов работы устройств), а также моделировать воздействие бросков (скачков) питания при включении/выключении. Приборы могут использоваться в качестве силового генератора низкочастотных сигналов.

Универсальность виртуальных источников питания обеспечивается возможностью работы в ручном режиме, когда оператор с помощью регуляторов на передней панели и встроенного трехразрядного индикатора может установить требуемое напряжение и предельно допустимое значение тока. Другое важное качество АТН-1533/1535 – высокое качество выходного

напряжения и отсутствие выходных импульсных помех, поскольку в приборах применена аналоговая линейная схема стабилизации.

Комбинированные виртуальные приборы

Комбинированные виртуальные измерительные приборы, входящие в состав *USB*-лаборатории АКТАКОМ, совмещают в одном корпусе два различных по функциональному назначению устройства.

Их появление обусловлено потребностями мобильного пользователя, поскольку такие приборы позволяют экономить рабочее пространство, уменьшить количество используемых соединительных проводов и сетевых шнуров.

Кроме того, комбинированные приборы представляют собой не просто арифметическую сумму двух приборов, а позволяют получить новое качество, новые функции и возможности, решать более сложные измерительные задачи, функционально дополняя друг друга и имея общий программный интерфейс.

Зачастую тестируемое электронное устройство имеет одновременно аналоговую и цифровую части. В подобных случаях при анализе неисправностей цифровых схем часто необходимо видеть аналоговую форму цифровых сигналов, поскольку искажение фронтов логических импульсов и посторонние импульсные помехи иногда ложно воспринимаются как логические перепады, сбивающие работу цифровых устройств.

В этом случае незаменимую помощь окажет комбинированный прибор для наблюдения смешанных сигналов АСК-4166 (рисунок 2.7), объединяющий в одном корпусе осциллограф типа АСК-3106 и логический анализатор типа АКС-3166. Он поможет детектировать такие ошибки и отладить сбойные элементы схемы.

Наблюдение на экране одновременно 16 цифровых и 2 аналоговых синхронизированных сигналов, использование сложных шаблонов и гибких схем запуска – все эти возможности АСК-4166 делают его очень привлекательным для ремонта и обслуживания сложных электронных систем.

Другой пример комбинированного прибора – АСК-4106, объединяющий в одном корпусе двухканальный цифровой запоминающий осциллограф с полосой пропускания 100 МГц (типа АСК-3106) и двухканальный цифровой функциональный генератор с диапазоном 5 МГц (типа АНР-3121).

Совмещение в одном приборе источника испытательных сигналов и прибора для наблюдения и измерения выходных параметров проверяемого электронного устройства превращает комбинированный прибор в мощную наладочную и измерительную станцию при экономии пространства на рабочем месте.

Синхронизация работы осциллографа, оснащенного режимом анализатора спектра на основе быстрого преобразования Фурье, и генератора позволяет реализовать проведение измерений, которые ранее были под силу только специализированным приборам. Так, АСК-4106 имеет специальные

программные окна, реализующие функцию построения амплитудно-частотных и вольтамперных характеристик тестируемых электронных компонентов.

К комбинированным приборам можно отнести и генератор АНР-3123, который совмещает генератор АНР-3121 со встроенным одноканальным источником питания 15 В, 1 А, значение выходного напряжения в котором программно задается с виртуальной передней панели на мониторе ПК. Такое сочетание приборов позволяет тестировать испытуемое устройство не только по реакции на входные сигналы, но одновременно и на изменение питающего напряжения проверяемого устройства. Такое тестирование позволяет более точно предсказать работу устройства в реальных условиях эксплуатации.



Рисунок 2.7 – Осциллограф смешанных сигналов – приставка к персональному компьютеру

Интерфейс комбинированного прибора АСК-3106 представлен на рисунке 2.8.

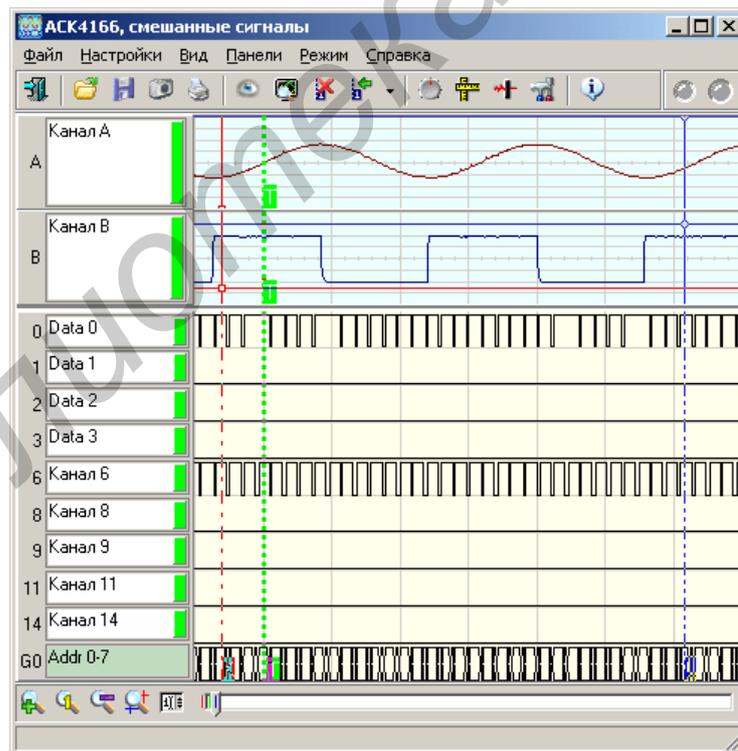


Рисунок 2.8 – Интерфейс АСК-4166 – понятный и удобный

Виртуальные приборы, выполняемые в виде плат расширения или внешних модулей, и использующие в качестве устройства управления и отображения обычный персональный компьютер (ПК), могут подключаться к

ПК через различные интерфейсы, из которых чаще всего используются *Centronics* (реализуемый *LPT*-портом), *RS-232C* (реализуемый *COM*-портом) и шина *USB*.

В настоящее время устаревшие *LPT*- и *COM*-порты перестают удовлетворять потребностям пользователя и возможностям современного периферийного оборудования, поэтому разработчики виртуальных приборов все чаще используют более современный и скоростной интерфейс внешнего оборудования – *USB*.

Последовательная шина *USB* (*Universal Serial Bus* – универсальная последовательная шина) является промышленным стандартом расширения архитектуры ПК. Версия *USB* 1.0 была опубликована в начале 1996 г. Большинство устройств поддерживает версию 1.1, которая вышла осенью 1998 г. и в которой были устранены обнаруженные проблемы первой редакции. В версиях 1.0 и 1.1 шина обеспечивала две скорости передачи информации: полная скорость *FS* (*Full Speed*) – 12 Мбит/с и низкая скорость *LS* (*Low Speed*) – 1,5 Мбит/с. Весной 2000 г. опубликована спецификация *USB* 2.0, в которой была определена еще и высокая скорость *HS* (*High Speed*) – 480 Мбит/с, т. е. 40-кратное повышение пропускной способности шины, что позволило существенно расширить круг устройств, подключаемых к шине. В ноябре 2008 г. появилась спецификация *USB* 3.0 (*Super Speed USB*), определившая повышение скорости обмена до 5 Гбит/с.

Технические характеристики *USB*

Возможности *USB* следуют из ее технических характеристик:

- полная скорость обмена (*full-speed signaling bit rate*) – 12 Мбайт/с;
- максимальная длина кабеля для полной скорости обмена – 5 м;
- низкая скорость обмена (*low-speed signaling bit rate*) – 1,5 Мбайт/с;
- максимальная длина кабеля для низкой скорости обмена – 3 м;
- высокая скорость обмена (*high-speed signaling bit rate, v. 2.0*) – 480 Мбайт/с;
- сверхвысокая скорость обмена (*superspeed, v. 3.0*) – до 5 Гбайт/с;
- максимальное количество подключенных устройств (включая разветвители, они же концентраторы, хабы) – 127 шт.;
- возможность подключения устройств с различными скоростями обмена;
- отсутствие необходимости в установке пользователем дополнительных элементов, таких как терминаторы для *SCSI*;
- напряжение питания для периферийных устройств – 5 В;
- максимальный ток потребления на одно устройство – 500 мА (это не означает, что через *USB* можно запитать устройства с общим током потребления $127 \times 500 \text{ мА} = 63,5 \text{ А}$, т. к. здесь указан ток потребления на один питающий порт).

Шина *USB* ориентирована на подключаемые к ПК периферийные устройства (ПУ) и обеспечивает подключение до 127 ПУ, допуская коммутации

и включение/выключение устройств при работающей системе. С использованием промежуточных хабов шина позволяет соединять ПУ, удаленные от компьютера на расстояние до 25 м. В ней нет отдельных линий для данных, адреса и управления – все протокольные функции выполняются в версиях 1.0 и 2.0 с использованием всего одной пары сигнальных проводов. Это накладывает отпечаток на построение шинного протокола, который строится на основе пересылок пакетов – определенным образом организованных цепочек битов. Все передачи управляются централизованно, поэтому ПК является необходимым управляющим узлом, находящимся в корне древовидной структуры шины.

Хабы *USB* входят в состав многих устройств и для пользователя их присутствие зачастую незаметно. Шина имеет линию питания устройств и поддерживает технологию *PnP* (автоматическое конфигурирование при включении/выключении).

Шина *USB* является хост-центрической: единственным ведущим устройством, которое управляет обменом, является хост-компьютер, а все присоединенные к ней ПУ – исключительно ведомые. Физическая топология шины *USB* – многоярусная звезда, вершиной которой является хост-контроллер, объединенный с корневым хабом. К каждому порту хаба может непосредственно подключаться периферийное устройство или промежуточный хаб. Шина допускает до 5 уровней каскадирования хабов. Логическая топология *USB* – просто звезда: для хост-контроллера хабы создают иллюзию непосредственного подключения каждого устройства.

Условно дерево подключения *USB*-устройств к компьютеру можно изобразить так (цифрами обозначены периферийные устройства с *USB*-интерфейсом): вместо любого из устройств может также стоять хаб. Основное отличие от топологии обычной локальной сети – компьютер (или хост-устройство) может быть только один. Хаб может быть как отдельным устройством с собственным блоком питания, так и встроенным в периферийное устройство.

Эта особенность *USB* позволяет оперативно, без перезагрузки системы, изменять состав измерительного комплекса, подключая необходимые элементы и отключая уже использованные.

Благодаря своей универсальности и способности эффективно передавать разнородный трафик, шина *USB* применяется для подключения к любому современному ПК, в том числе ноутбуку, самых разнообразных устройств. Она призвана заменить традиционные порты ПК – *COM* и *LPT*. Привлекательность *USB* связана с возможностью подключения/отключения устройств на ходу и их использования практически сразу, без перезагрузки операционной системы. Удобна и возможность подключения большого количества (до 127) устройств к одной шине (правда, при наличии хабов).

Несмотря на довольно сложный протокол обмена, интерфейсом *USB* можно снабдить и периферийные устройства собственной разработки. Для этого электронной промышленностью выпускается широкий ассортимент

микросхем *USB*, различающихся скоростями обмена (*LS*, *FS* или *HS*), числом и возможностями конечных точек и функциональным назначением. Выпускаются и микроконтроллеры с портом *USB*. Они различаются объемом памяти, производительностью, питанием, могут иметь встроенные устройства АЦП/ЦАП, линии ввода/вывода общего назначения и т. п.

Все это, конечно, не могло не привлечь внимания зарубежных и отечественных разработчиков различных периферийных устройств, в том числе и измерительного оборудования как автономных приборов, так и виртуальных. Так, интерфейсом *USB* оснащены все современные осциллографы компании *Tektronix* (серии *TDS 5000/TDS 6000/TDS 7000*), АКТАКОМ («*USB-лаборатория*») и других ведущих производителей. А по прогнозам специалистов в ближайшем будущем номенклатура измерительной техники, использующей для связи с ПК перспективную шину *USB*, будет только расширяться.

2.2 Контроллер звука ПЭВМ в качестве платы ввода/вывода данных виртуального прибора

Оказывается, простой ПК в своей конструкции уже содержит средства, которые с некоторыми ограничениями способны превратить его в тот же осциллограф, анализатор спектра, частотомер или генератор импульсов.

Наиболее простым решением создания виртуального измерительного прибора является использование в качестве устройства ввода/вывода данных платы звука или встроенного в системную плату контроллера звука.

Сегодня большинство интегрированных и автономных звуковых решений основано на концепции *AC'97*. Ее суть заключается в том, что звуковой контроллер физически разделяется на две части. Первая часть – цифровой контроллер (*Digital Controller, DC*), преобразующий звуковой сигнал в аналоговый электрический сигнал с последующей его обработкой в цифровом виде. Его задача – выполнить заданные преобразования звуковой информации. В качестве такого контроллера обычно выступает специализированный или универсальный процессор цифровых сигналов (*DSP*). Вторая часть звуковой подсистемы – аудиокодек (*Audio Codec, AC*). Как следует из названия, он должен выполнять кодирование и декодирование цифровых данных, поступающих в цифровой контроллер или из него. Эти два чипа связываются между собой с помощью стандартного интерфейса *AC-Link*, состоящего из пяти линий (две линии синхронизации, одна – сброса, две – передачи данных в обоих направлениях). Тем самым обеспечивается полная независимость двух частей (аналоговой и цифровой) звуковой подсистемы.

Аудиокодек стандарта *AC'97* должен выполнять следующие задачи:

- прием, передача, буферизация цифровых данных;
- преобразование данных из цифровой в аналоговую форму и обратно;
- микширование данных, поступающих от разных источников (аналоговых и цифровых);

- управление уровнем сигнала, поступающего от разных источников (т. е. управление усилением);

- усиление сигнала, поступающего на микрофонный вход.

На рисунке 2.9 показана обобщенная структурная схема аудиокодека. Конструктивно он представляет собой небольшой (7×7 мм) чип в корпусе *TQFP* с 48 контактами (по 12 с каждой стороны).

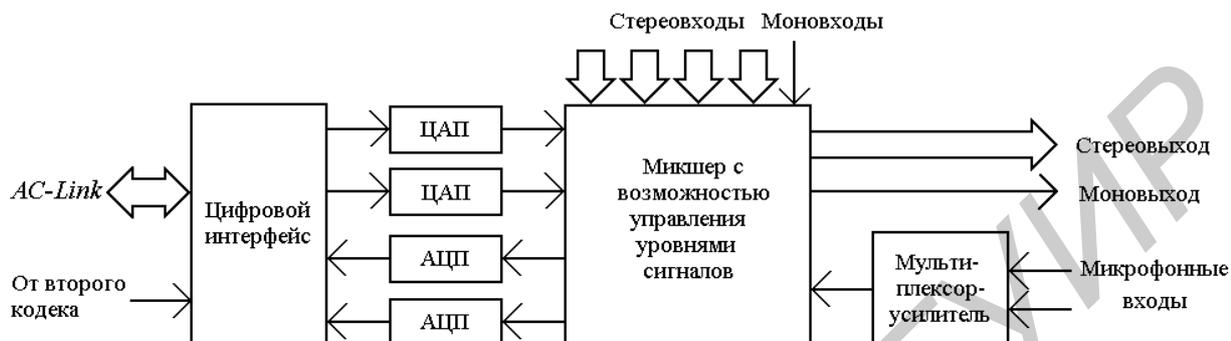


Рисунок 2.9 – Обобщенная структурная схема аудиокодека

Основные параметры аудиокодека *ALC200/P* стандарта *AC'97* приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры аудиокодека *AC'97*

Входные каналы (стерео + моно + микрофон)	4 + 2 + 2
Выходные каналы (стерео + моно)	1 + 1
Разрядность АЦП и ЦАП, бит	18
Частота дискретизации, кГц	до 48
Соотношение сигнал/шум, дБ	86

Из данных, приведенных в таблице 2.1, следует, что верхняя рабочая частота устройства ограничена 24 кГц, а возможных уровней квантования 2^{18} , т. е. 262 144.

Для работы со встроенным аудиоинтерфейсом компьютера в среде графического программирования *LabVIEW* сторонними разработчиками создана библиотека *WaveIO*.

3 ВИРТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ PCI

Виртуальные средства измерений на базе платформы *PCI* базируются на стандартной системе сбора данных, которая содержит три основных составляющих аппаратной части: устройство сбора данных, коннекторный блок и соединительный кабель. При этом печатная плата устройства сбора данных конструктивно располагается в процессорном блоке персонального компьютера, как это показано рисунке 3.1.

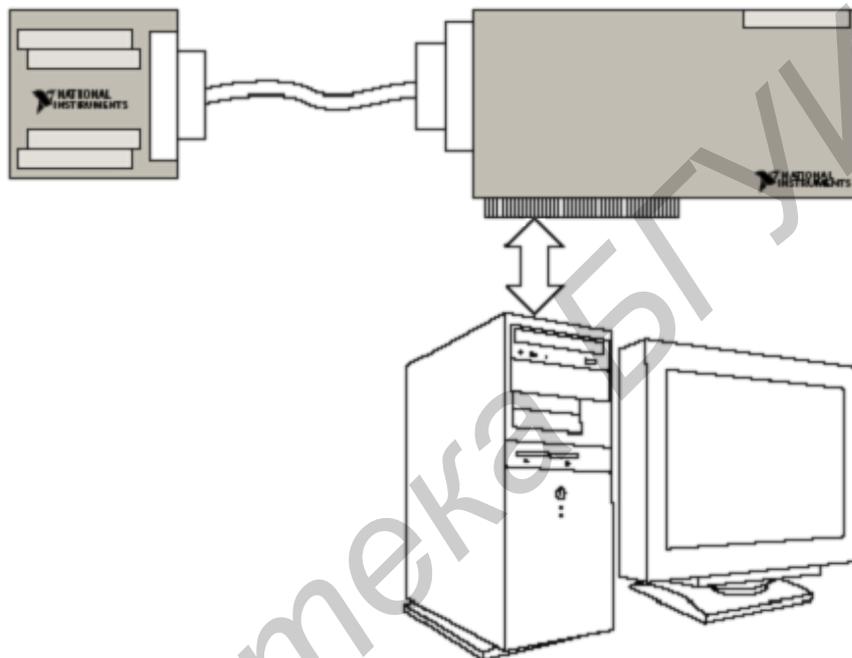


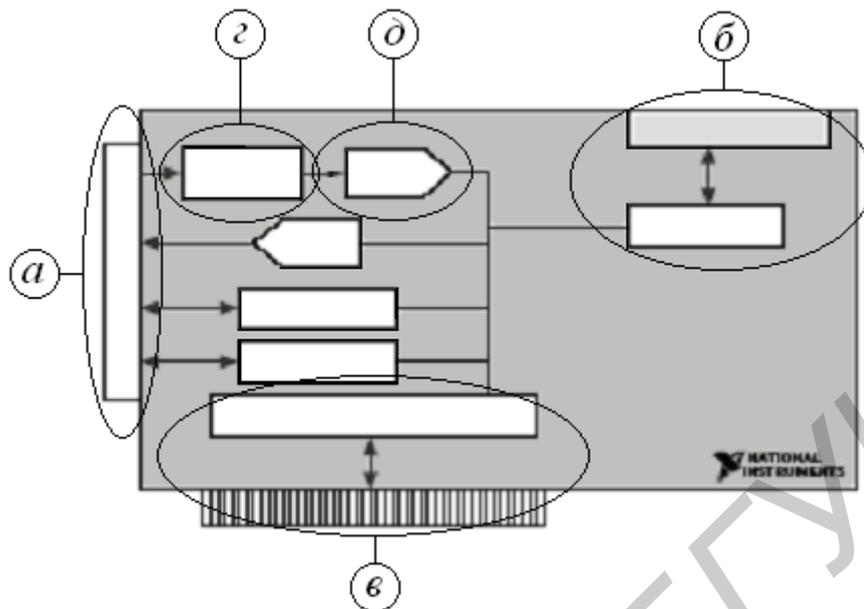
Рисунок 3.1 – Схема подключения устройства сбора данных к ПК

Печатная плата с собранным на ней устройством сбора данных представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Внешний вид платы сбора данных *NI PCI-6251*

Плата сбора данных NI PCI-6251 имеет три интерфейса для получения и отправки сигналов (рисунок 3.3, а, б, в).



а – разъем ввода/вывода; б – шина *RTSI*; в – интерфейс *PCI*;
г – схема аналогового ввода; д – АЦП

Рисунок 3.3 – Компоненты устройства сбора данных

Коннекторный блок, изображенный на рисунке 3.4, представляет собой устройство для подачи на вход устройства сбора данных входных аналоговых и цифровых сигналов и съема аналоговых и цифровых выходных сигналов.

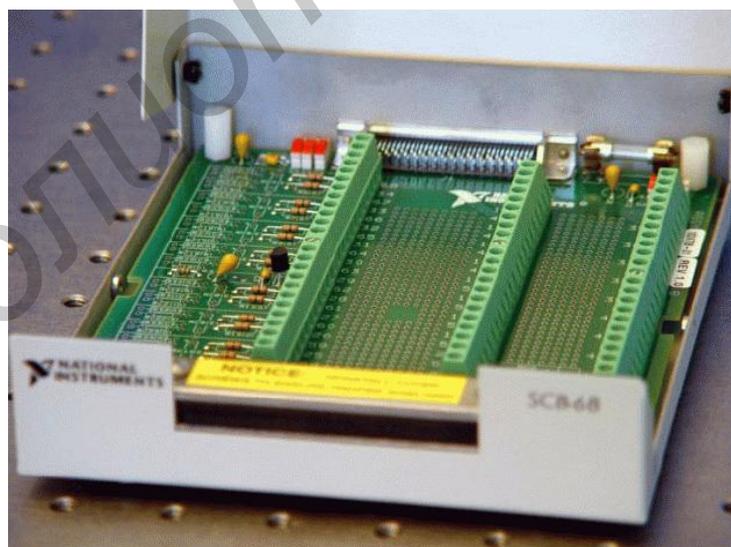


Рисунок 3.4 – Внешний вид коннекторного блока

Он состоит из винтовых зажимов для подсоединения проводников и разъема для подключения кабеля, соединяющего коннекторный блок и устройство сбора данных (*DAQ*-устройство). Коннекторный блок содержит 68

клемм. С помощью кабеля он соединяется с печатной платой устройства сбора данных.

Характеристики печатной платы устройства сбора данных *NI PCI-6251*, изображенной на рисунке 3.2, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики устройства сбора данных *NI PCI-6251*

Характеристики	Показатель
Количество каналов АЦП	8 дифференциальных либо 16 с общей землей
Разрешение	16 бит
Максимальная частота дискретизации АЦП	1,25 МГц
Погрешность установки частоты дискретизации	0,005 %
Диапазон входных сигналов	± 10 ; ± 5 ; ± 2 ; ± 1 ; $\pm 0,5$; $\pm 0,2$; $\pm 0,1$ В
Сопротивление	10 ГОм параллельно с емкостью 100 пФ

Шина *RTSI* распределяет и синхронизирует сигналы среди нескольких устройств сбора данных в одном компьютере.

Разъем ввода/вывода – интерфейс, посредством которого сигнал поступает или выводится с *DAQ*-устройства. Один конец кабеля присоединяется к этому разъему, а другой – к терминальному блоку.

Интерфейс ввода/вывода в компьютер передает информацию между *DAQ*-устройством и компьютером.

Входной сигнал после поступления на разъем ввода/вывода проходит через схему аналогового ввода и поступает затем на вход аналого-цифрового преобразователя. Мультиплексор обеспечивает подключение входных сигналов на вход инструментального усилителя, который может осуществлять усиление или ослабление сигнала, поступающего на его вход. Его задачей является максимальная подстройка сигнала к рабочему диапазону АЦП.

АЦП преобразует аналоговое напряжение в дискретное число, которое посредством компьютерного интерфейса ввода/вывода можно передать в компьютер для анализа. Разрядность АЦП платы сбора данных *NI PCI-6251* составляет 16 бит (65 536 делений на диапазон аналогового ввода), что позволяет достигнуть высокой точности представления аналогового сигнала.

Диапазон аналогового ввода представляет собой ряд входных напряжений, которые в канале аналогового ввода преобразуются в цифровую форму с заданной погрешностью. Инструментальный усилитель (*NI-PGIA*) усиливает или ослабляет аналоговый входной сигнал в зависимости от выбранного диапазона. Диапазон входных сигналов можно программировать индивидуально для каждого канала аналогового ввода.

Диапазон входного сигнала влияет на разрешающую способность канала аналогового ввода, которая представляет собой напряжение, соответствующее одному кванту АЦП. Следовательно, для диапазона входного сигнала от минус 10 до 10 В каждому кванту 16-разрядного АЦП соответствует напряжение $(10 \text{ В} - (-10 \text{ В}))/2^{16} = 305 \text{ мкВ}$, а для диапазона от минус 100 до 100 мВ – 3,2 мкВ.

В таблице 3.2 приведены поддерживаемые диапазоны входных сигналов и значения разрешающей способности платы *NI PCI-6251*.

Таблица 3.2 – Диапазон входных сигналов и номинальная разрешающая способность

Диапазон входных сигналов	Номинальная разрешающая способность при выходе за границы диапазона 5 % (мкВ)
от –10 до 10 В	320
от –5 до 5 В	160
от –2 до 2 В	64
от –1 до 1 В	32
от –500 до 500 мВ	16
от –200 до 200 мВ	6,4
от –100 до 100 мВ	3,2

Одним из наиболее важных параметров измерительной системы с аналоговым вводом является частота, с которой измерительное устройство производит дискретизацию во времени входного сигнала. При большей частоте дискретизации собирается больше точек за данное время, что позволяет построить лучшее представление исходного сигнала, чем при низкой частоте выборки. При частоте дискретизации 1,25 МГц интервал дискретизации для одного канала составит 0,8 мкс, а при дискретизации двух каналов – 1,6 мкс.

Теорема Котельникова является отправной точкой при выборе достаточной частоты выборки – она должна как минимум в два раза превышать максимальную частотную компоненту в сигнале (частоту Найквиста). К сожалению, этой частоты обычно не хватает для практических целей. Сигналы, встречающиеся в реальных приложениях, часто содержат составляющие, лежащие выше частоты Найквиста. Это приводит к добавлению ложных компонент в точно оцифрованный сигнал, что создает искаженные цифровые данные. Поэтому на практике выборку производят с частотой, многократно превышающей частоту входного сигнала. Для промышленных приложений является обычным превышение в 5–10 раз [8].

Следовательно, верхним пределом для одноканального сбора информации будет частота, равная $1,25 \text{ МГц} / 5 = 250 \text{ кГц}$, для двухканального сбора – $1,25 \text{ МГц} / (5 \cdot 2) = 125 \text{ кГц}$.

Плата сбора данных *PCI 6251* [8] обеспечивает ввод аналоговых сигналов с разрешением 16 разрядов. При проведении динамических измерений

устройство обеспечивает скорость оцифровки сигналов, равную 1,25 МГц с разрешением 16 разрядов (1 МГц в режиме сканирования нескольких каналов). Кроме того, данное устройство позволяет осуществлять аппаратно тактируемый ввод и вывод цифровых сигналов с частотами до 10 МГц, реализуя, таким образом, функции высокоскоростного цифрового ввода/вывода. Кроме этого, имеется возможность синхронизации аналоговых и цифровых операций с точностью, определяемой частотой следования тактовых импульсов платы. Использование 6 каналов прямого доступа в память (*DMA*) позволяет осуществлять параллельные сбор и генерацию аналоговых и цифровых сигналов без использования ресурсов центрального процессора ПК. Структурно плата сбора данных представлена схемой, приведенной на рисунке 3.5.

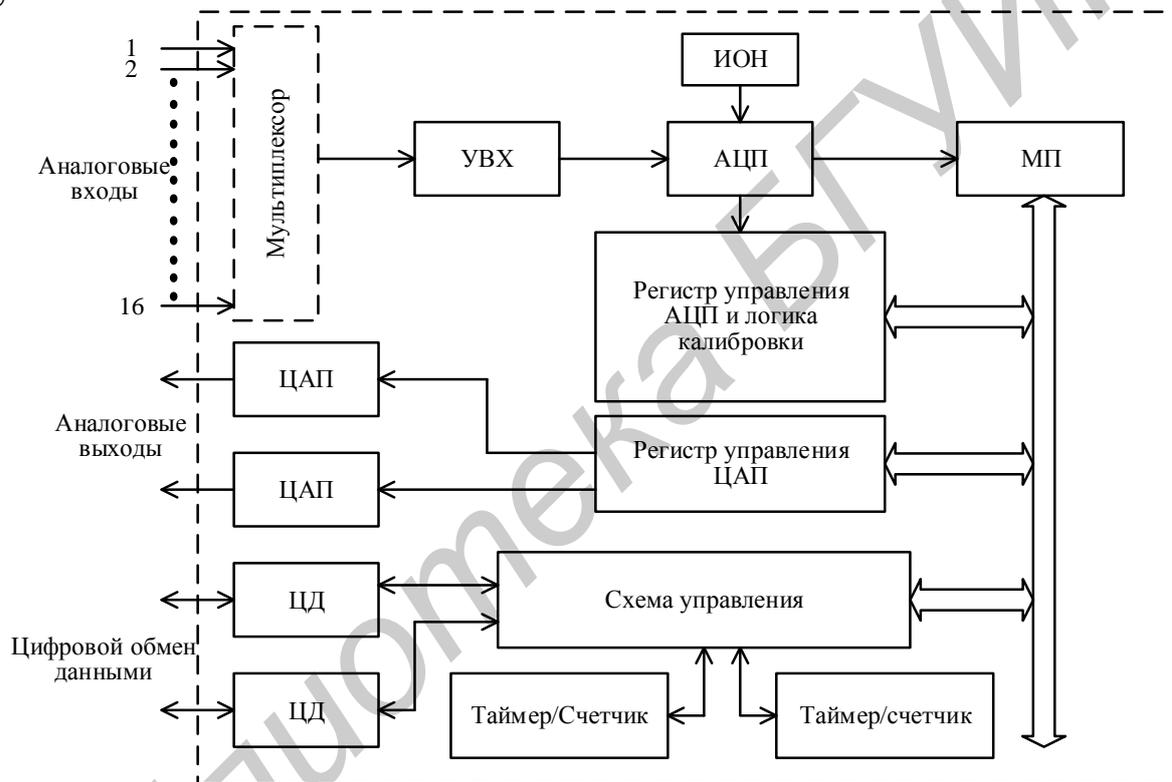


Рисунок 3.5 – Структурная схема платы сбора данных NI 6251

3.1 Виртуальное средство измерений с функциями осциллографа

Обобщенная структурная схема ВСИ с функциями различных цифровых средств измерений (осциллографа, вольтметра, анализатора спектра и др.) представлена на рисунке 3.6. Она состоит из компьютера, платы сбора данных, которая встраивается в компьютер, и коннекторного блока с соединительным кабелем.

С помощью коннекторного блока имеется возможность ввода сигналов с датчиков (преобразователей) и генераторов на плату сбора данных для последующих их преобразований и измерений. Экранированный кабель служит связующим звеном между коннекторным блоком и платой сбора данных. Такое

соединение очень удобно и облегчает работу разработчику и пользователю ВСИ.

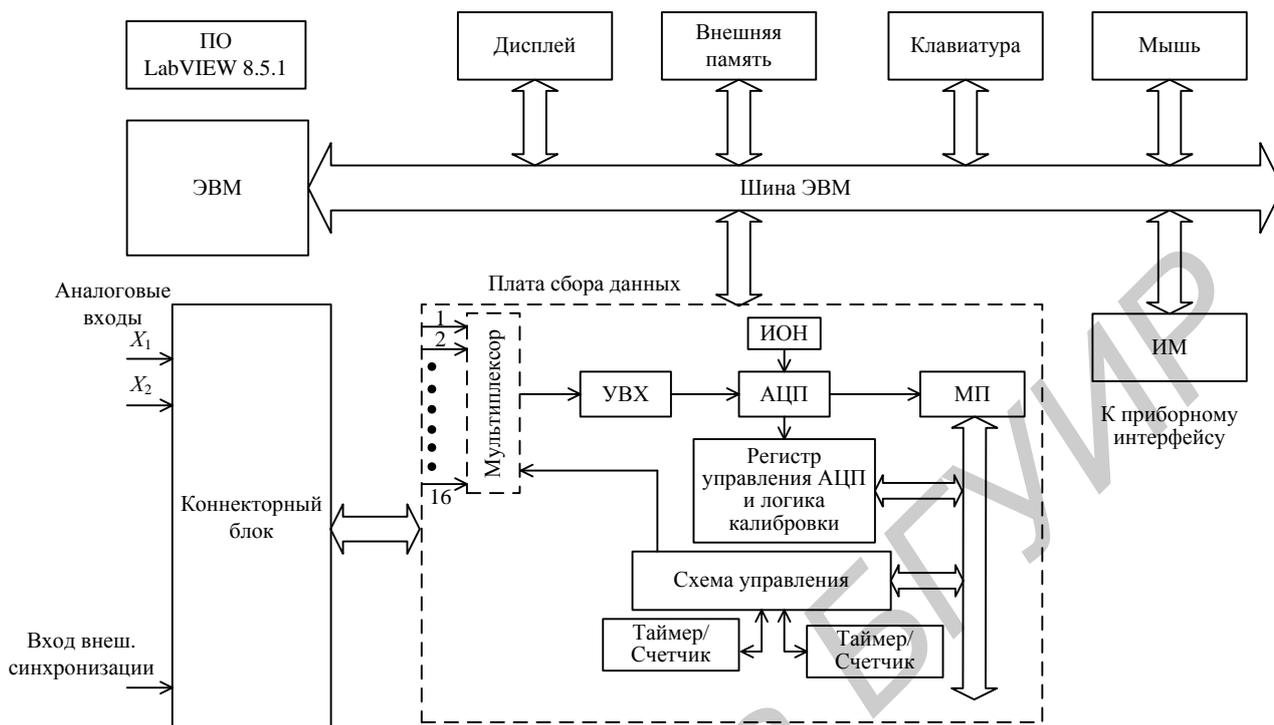


Рисунок 3.6 – Структурная схема ВСИ с функциями различных цифровых средств измерений

Принцип действия платы сбора данных можно описать следующим образом. Процесс сбора данных условно разделяется на два этапа: запись оцифрованных сигналов во внутреннюю буферную память ПСД (соответствует обратному ходу луча реального осциллографа) и передача данных в виртуальный осциллограф, их обработка и вывод на экран (соответствует прямому ходу луча реального осциллографа). Нетрудно понять, что режим «прямой ход луча» (интервал обновления изображения на экране) будет зависеть от объема памяти записывающего буфера ПСД, быстродействия процессора и ОЗУ компьютера и числа каналов осциллографа [11, 13].

Для проектирования виртуального осциллографа были задействованы следующие части ПСД:

- мультиплексор;
- устройство выборки и хранения данных (УВХ);
- АЦП;
- источник опорного напряжения (ИОН);
- схема управления мультиплексором;
- таймер/счетчик;
- устройство управления АЦП и логика калибровки;
- микропроцессор (МП).

Мультиплексор обеспечивает многоканальность системы, позволяя коммутировать шестнадцать аналоговых сигналов. При этом необходимо

задействовать три аналоговых входа (т. к. осциллограф двухканальный) и еще один вход – для подачи сигнала внешней синхронизации. Выбором и переключением каналов управляет схема управления мультиплексором, которая получает команды от МП. Таймер/счетчик задает временную задержку для правильной работы мультиплексора.

УВХ фиксирует входной аналоговый сигнал в определенный момент времени. В режиме выборки они повторяют на выходе входной сигнал, а в режиме хранения сохраняют уровень выходного напряжения.

Получение и обработка данных об амплитуде измеряемого сигнала обеспечивают алгоритмы сбора и обработки данных. Сначала определяется длительность периода выборки значения амплитуды (УВХ). При этом учитываются длительность периода выходного сигнала и необходимое время задержки. Затем аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый сигнал в цифровой и мы получаем данные об амплитуде. ИОН необходим для подачи опорного напряжения, чтобы обеспечить работу АЦП.

Регистр управления АЦП задает параметры преобразования аналогового сигнала, управляет передачей данных от АЦП в МП [2].

После преобразования сигналов в удобную цифровую форму наступает очередь анализа данных. Для обеспечения этой функции внутренняя архитектура ВСИ включает в себя компьютер и очень быструю шину, позволяющую эффективно передавать исходные двоичные данные внутри прибора. Передачей, форматированием и необходимым для получения на выходе требуемых результатов измерения анализом этих данных управляет микропроцессор ПСД. Для приема или передачи нескольких буферов данных в реальном времени используется внутренняя память, а прямой доступ к памяти (ПДП) и техника двойного буферирования позволяют готовить или анализировать один поток данных одновременно с вводом или выводом другого потока данных.

Компьютер является мощным вычислительным средством обработки поступившей цифровой информации с ПСД. Вставляемая плата непосредственно подключается к параллельной компьютерной шине, и ее внутренние регистры отображаются в адресном пространстве памяти машины. Поэтому ПК может управлять встроенной платой двоичными кодами с максимальной возможной скоростью, как это делается внутри обычного прибора. Прямые прерывания от аппаратуры информируют процессор о состоянии системы и необходимости немедленного ее обслуживания и сразу же переводят процессор на выполнение соответствующего машинного кода. Данные могут передаваться к плате и от нее в двоичной форме, параллельно, на высоких скоростях не только с помощью самого процессора, но и специализированной аппаратурой прямого доступа к памяти, также встроенной в ПК [15, 18].

Осциллограф имеет возможность подключения к каналу общего пользования (КОП) и позволяет работать в составе автоматизированной измерительной системы через интерфейсную магистраль (ИМ).

Информация о сигнале отображается на экране монитора компьютера, причем для большей наглядности на экране воспроизводится изображение передней панели универсального осциллографа (рисунок 3.7). На этом же экране отображается и форма измеряемого сигнала. Передняя панель является интерактивным интерфейсом пользователя. Именно с передней панелью будет работать пользователь программы, поэтому она должна быть удобной, информативной и эргономичной.

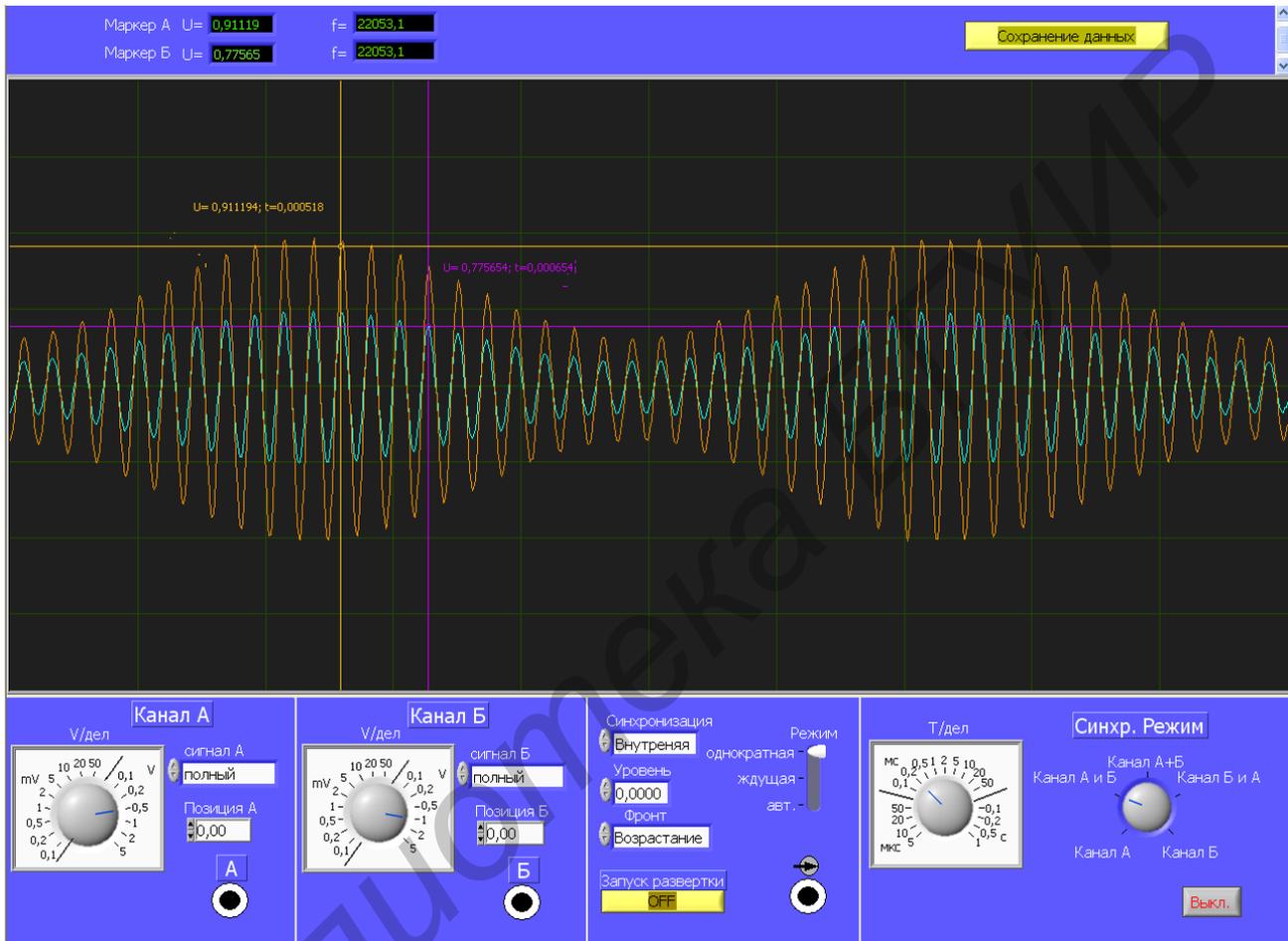


Рисунок 3.7 – Передняя панель ВСИ с функциями осциллографа

Управление прибором осуществляют с клавиатуры или манипулятором «мышь». Для этого изменяют положения органов регулировки виртуального осциллографа, отображенные на экране. Такая форма представления сигнала и методика регулировки подобны традиционным, что облегчает работу с прибором.

Несмотря на то что исследуемые сигналы являются аналоговыми, изображение на виртуальном экране (дисплее компьютера) осциллографа формируется после аналого-цифрового преобразования и поэтому является дискретным. Виртуальные кнопки, ручки, переключатели и другие элементы графического интерфейса практически не отличаются от реальных. Единственное и главное их отличие заключается в изменении положения ручек

и переключателей, которое осуществляется с помощью манипулятора «мышь» (или клавиатуры), а не рукой, как у реальных измерительных приборов.

Осциллограф имеет два канала – А и Б. Выбор канала производится переключателем каналов А и Б. Имеется возможность наблюдения обоих сигналов на экране при синхронизации или по каналу А, или по каналу Б.

В каждом канале предусмотрен диапазон регулировки коэффициента отклонения ручкой «V/дел.» от 0,1 мВ/дел. до 5 В/дел. Также можно изменять позицию сигнала по отношению к середине осциллограммы вверх и вниз переключателем «Позиция». Переключатель «Сигнал А» (или «Сигнал Б») позволяет наблюдать полный сигнал или его постоянную и переменную составляющие.

«Синхронизация» обеспечивается выборным меню, имеет место как внутренняя, так и внешняя синхронизация со входа внешней синхронизации (см. рисунок 3.7). Можно задавать значение уровня импульсов синхронизации регулятором «Уровень». Так как внутренняя синхронизация обеспечивается триггером, который вырабатывает импульсы синхронизации, то предусмотрена регулировка по возрастанию и убыванию импульса.

Регулятором «Режим» обеспечивается автоколебательный, ждущий и однократный режимы работы осциллографа. Кнопка запуска развертки в однократном режиме запускает развертку.

Коэффициент развертки регулируется ручкой «T/дел.» в диапазоне от 5 мкс/дел. до 1 с/дел.

Кнопка «Выкл.» останавливает работу осциллографа.

В верхней части осциллографа имеются цифровые индикаторы, которые отображают показания маркеров (курсоров) в каждой точке на осциллограмме по напряжению и показывают частоту сигналов, пришедших на каналы А и Б.

Кнопка «Сохранение данных» позволяет сохранять измеренные данные и осциллограмму сигнала в виде файла, место расположения которого укажет пользователь.

ВСИ легко перестраивать изменением программного обеспечения при неизменной структуре самого осциллографа для адаптации к конкретным условиям эксперимента.

3.2 Программное обеспечение ВСИ с функциями осциллографа

Работу всех органов управления на передней панели осциллографа задает программное обеспечение (ПО) *LabVIEW* [16].

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) позволяет разрабатывать прикладное программное обеспечение для организации взаимодействия с измерительной и управляющей аппаратурой, сбора, обработки и отображения информации и результатов расчетов, а также моделирования как отдельных объектов, так и автоматизированных систем в целом. Разработчиком *LabVIEW* является американская компания *National Instruments*.

В отличие от текстовых языков, таких как *C*, *Pascal* и др., где программы составляются в виде строк текста, в *LabVIEW* программы создаются в виде графических диаграмм, подобных обычным блок-схемам. Отсюда и соответствующий вид «программного кода» (рисунок 3.8). Иногда можно создать приложение, вообще не прикасаясь к клавиатуре компьютера.

LabVIEW является открытой системой программирования и имеет встроенную поддержку всех применяемых в настоящее время программных интерфейсов, таких как *Win32 DLL*, *COM*, *.NET*, *DDE*, сетевых протоколов на базе *IP*, *DataSocket* и др.

В состав *LabVIEW* входят библиотеки управления различными аппаратными средствами и интерфейсами, такими как *PCI*, *CompactPCI/PXI*, *VME*, *VXI*, *GPIB* (КОП), *PLC*, *VISA*, системами технического зрения и др.

Программные продукты, созданные с использованием *LabVIEW*, могут быть дополнены фрагментами, разработанными на традиционных языках программирования, например *C/C++*, *Pascal*, *Basic*, *FORTRAN*. И наоборот можно использовать модули, разработанные в *LabVIEW* в проектах, создаваемых в других системах программирования [19].

Таким образом, *LabVIEW* позволяет разрабатывать практически любые приложения, взаимодействующие с любыми видами аппаратных средств, поддерживаемых операционной системой компьютера.

Процесс программирования в *LabVIEW* похож на сборку какой-либо модели из конструктора. Программист формирует пользовательский интерфейс программы – манипулятором «мышь» выбирает из наглядных палитр-меню нужные элементы (кнопки, регуляторы, графики) и помещает их на рабочее поле программы. Аналогично «рисует» алгоритм – из палитр-меню выбираются нужные подпрограммы, функции, конструкции программирования (циклы, условные конструкции и проч.). Затем также мышью устанавливаются связи между элементами – создаются виртуальные провода, по которым данные будут следовать от источника к приемнику.

При программировании в этой среде не приходится думать о ячейках памяти, адресах, портах ввода/вывода, прерываниях и иных атрибутах системного программирования. Данные будут передаваться от блока к блоку по «проводам», обрабатываться, отображаться, сохраняться в соответствии с заданным алгоритмом. Мало того, сам поток данных будет управлять ходом выполнения программы. Ядро *LabVIEW* может автоматически использовать эффективные современные вычислительные возможности, такие как многозадачность, многопоточность и т. п. [17, 19].

Программное обеспечение ВСИ с функциями осциллографа показано на рисунке 3.8. Все регуляторы, кнопки, графики на внешней панели осциллографа имеют свое отображение в ПО.

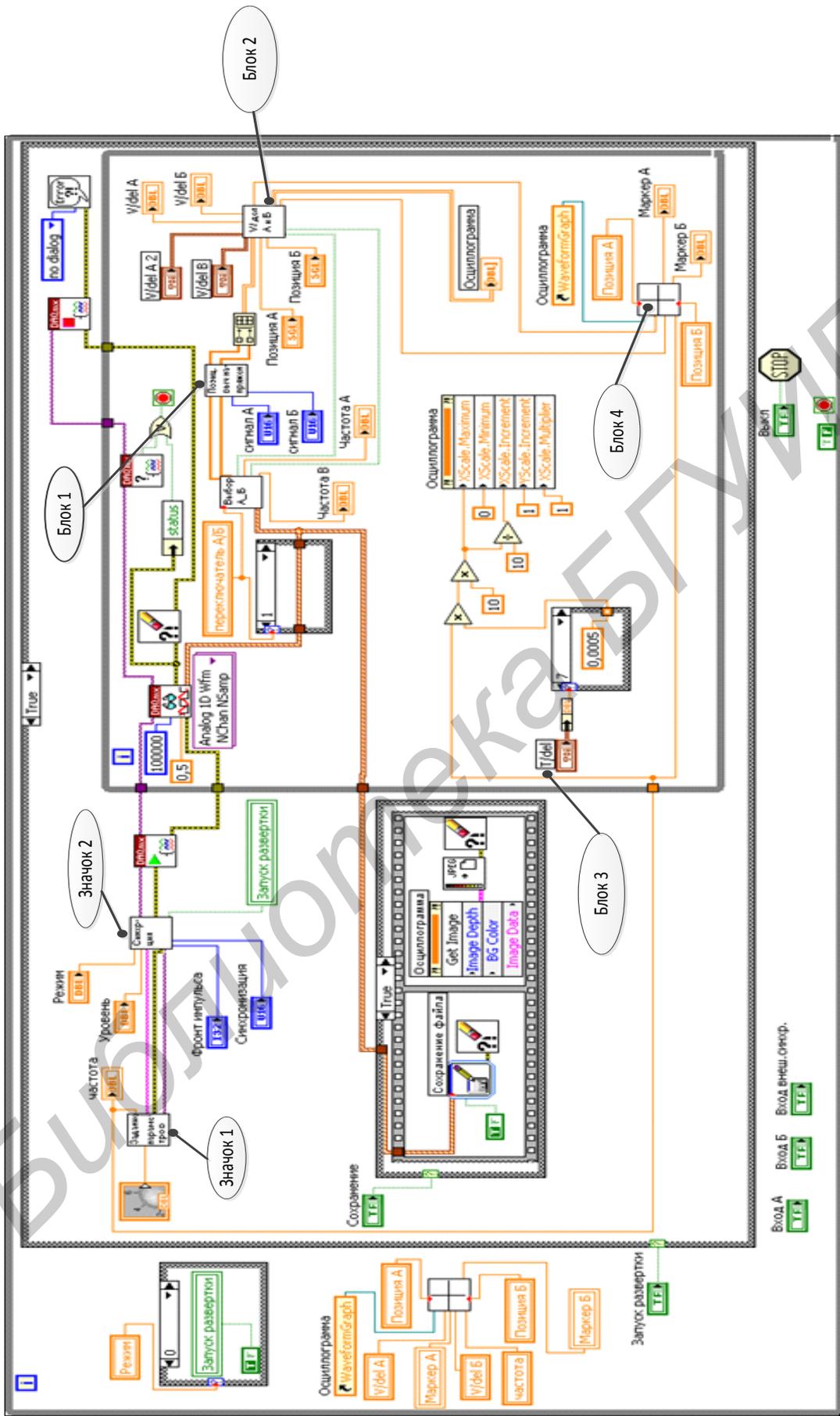


Рисунок 3.8 – Программное обеспечение ВСИ с функциями осциллографа

ПО представляет собой диаграмму, собранную из значков, параметры которых задают элементы управления, а отображают интересующую нас информацию индикаторы, графики и т. д.

Значок 1 «Задание параметров» задает номера аналоговых входов А и Б, к которым будет подключаться исследуемый объект, а также режим подключения исследуемого сигнала, максимальное и минимальное значения входного напряжения, частоту дискретизации аналогового сигнала АЦП, количество точек в выборке.

Значок 2 «Синхронизация» формирует третий аналоговый вход для внешней синхронизации сигнала от реального генератора, позволяет выбирать режимы развертки, а также задает параметры синхроимпульсов [18].

Блок 1 «Позиция Выч. напряжения» дает возможность перемещать изображение сигнала на осциллограмме по вертикали вверх и вниз относительно середины экрана, а также позволяет наблюдать все составляющие сигнала (постоянные и переменные) и полный сигнал.

Блок 2 «V/дел. А и Б» задает числовые значения коэффициентов отклонения в каналах А и Б, а также разбивает осциллограмму на восемь делений (клеток) по вертикали.

Блок 3 «T/дел. А и Б» задает значения коэффициентов развертки в обоих каналах, а также разбивает осциллограмму на десять делений (клеток) по горизонтали.

Блок 4 «Управление маркерами» позволяет перемещать маркеры по графику исследуемого сигнала, а также отображать значения курсоров прямо на осциллограмме до шести значащих знаков после запятой.

Дальнейшая обработка сигналов производится в виртуальном канале, который обеспечивает работоспособность переключателя каналов А и Б, обеспечивает синхронизацию сигналов по этим каналам, а также измеряет амплитудные и временные параметры исследуемых сигналов в обоих каналах, которую потом отображают цифровые индикаторы.

Сохранение измеренных значений и осциллограммы осуществляется с помощью кнопки «Сохранение данных» (см. рисунок 3.7).

Таким образом, можно создать виртуальное средство измерения с функциями осциллографа, которое обладает всеми функциональными возможностями и параметрами реального, но с расширенными возможностями обработки и хранения результатов измерений, возможностью добавления необходимых функций для проведения эксперимента, а также учета параметров в нестандартных условиях проведения эксперимента.

Параметры ВСИ с функциями осциллографа (см. рисунок 3.8):

- 1) два канала – А и Б;
- 2) диапазон измерения напряжения входных сигналов – от 0 до 10 В;
- 3) диапазон рабочих частот – от 0 до 200 кГц;
- 4) основная погрешность коэффициентов развертки – не более $\pm 4\%$;
- 5) предел погрешности измерения напряжения – не более $\pm 2\%$ от $U_{\text{изм.}}$.

3.3 Виртуальное средство измерения с функциями мультиметра

Структурная схема ВСИ с функциями мультиметра представлена на рисунке 3.6 и состоит из компьютера, платы сбора данных и коннекторного блока.

ЦАП, входящий в состав ПСД, необходим в режиме измерения сопротивления для формирования известного напряжения на аналоговом выходе $U_{\text{вых}}$, который подключается к схеме стабилизатора тока. ЦАП формирует и выдает известное значение напряжения, которое идет на стабилизатор тока. Стабилизатор тока вырабатывает постоянный по величине ток независимо от того, какую нагрузку к нему подключили. Зная значение постоянного тока и задаваемое ЦАП напряжение, можно определить по закону Ома сопротивление нагрузки по постоянному току:

$$R_{\text{H}} = \frac{U_{\text{ЦАП}}}{I_{\text{=}}}, \quad (3.1)$$

где R_{H} – значение сопротивления нагрузки;

$U_{\text{ЦАП}}$ – значение напряжения, создаваемое цифроаналоговым преобразователем;

$I_{\text{=}}$ – значение постоянного тока.

Регистр управления ЦАП осуществляет контроль и управление работой ЦАП [13, 19].

Передняя панель ВСИ с функциями мультиметра показана на рисунке 3.9. Информация о параметрах электрического сигнала отображается на экране монитора компьютера с помощью соответствующего индикатора.

Задание измеряемого параметра осуществляется с помощью кнопок на передней панели. Надпись на кнопке характеризует режим измерения того или иного параметра. Рядом с индикатором числового значения параметра находится индикатор размерности измеряемых величин.

Управление работой ВСИ осуществляется с клавиатуры персонального компьютера или с помощью манипулятора «мышь», как и в случае виртуального осциллографа. Для этого изменяют положения органов регулировки мультиметра, отображенные на экране. Такая форма проведения измерительных работ и методика регулировки подобны традиционным, что облегчает работу с прибором.

Спроектированный мультиметр дает возможность измерять следующие параметры:

- постоянное и переменное напряжения (кнопка «U»);
- среднеквадратичное, амплитудное и средневывпрямленное значения напряжения (в режиме измерения переменного напряжения, т. е. когда нажата кнопка «U», регулятор «Напряжение» устанавливается на необходимый параметр);

- постоянные и переменные токи (кнопка «I» и кнопка «= / ~» нажаты или отжаты);
- частоту исследуемого сигнала (кнопка «F»);
- период сигнала (кнопка «T»);
- сопротивление по постоянному току (кнопка «R»).

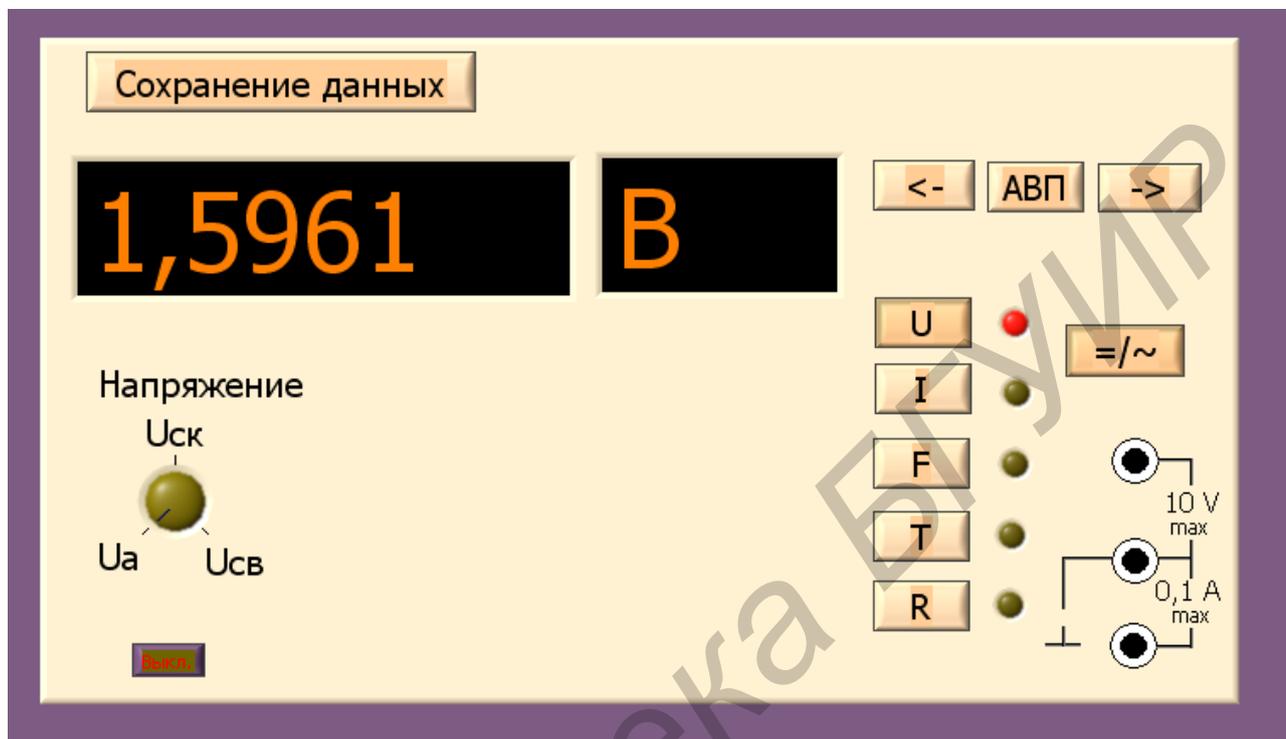


Рисунок 3.9 – Передняя панель ВСИ с функциями мультиметра

Выбор измеряемого параметра производится нажатием соответствующей кнопки на передней панели прибора. Задание режима индицируется включением соответствующего диода рядом с кнопкой выбранного режима.

Кнопка «АВП» устанавливает автоматический выбор предела измерения соответствующего параметра. Кнопками «<-» и «>-» можно вручную задать предел измерения и количество значащих знаков в значении на индикаторе [12, 13].

Кнопка «Сохранение данных» позволяет сохранять измеренные данные параметров сигнала в папку, которую укажет пользователь.

ВСИ с функциями мультиметра легко перестраивать, добавлять новые функции, которые необходимы для проведения нового экспериментального исследования, путем изменения программного обеспечения при неизменной структуре самого средства измерения.

3.4 Программное обеспечение ВСИ с функциями мультиметра

Работу всех органов управления на передней панели мультиметра, как и осциллографа, задает ПО *LabVIEW*.

Программное обеспечение КИС с функциями мультиметра показано на рисунке 3.10. Все регуляторы, кнопки и индикаторы на внешней панели мультиметра имеют свое отображение в ПО.

В блоке «Задание параметров» задается режим аналогового входа, на который будет поступать сигнал, максимальное и минимальное значения напряжения, определяем режим подключения входных контактов, а также задаем частоту дискретизации и количество точек в выборке.

Измеряемый параметр задается нажатием соответствующей кнопки.

Режим измерения напряжения обеспечивается блоком «Измерение напряжения», который вычисляет как постоянное значение напряжения, так и амплитудное и среднеквадратичное.

В режиме измерения тока используется преобразователь $I_{X=}/U_{X=}$, который представляет собой набор образцовых резисторов (шунтов), один из которых (в зависимости от установленного предела измерений) подключается ко входу мультиметра.

Измеряемый ток $I_{X=}$ создает падение напряжения на резисторе, которое прямо или после предварительного усиления в усилителе постоянного тока подается на вход АЦП.

Этот же набор резисторов используется и при преобразовании переменного тока, но напряжение с резистора подается на вход АЦП через преобразователь переменного напряжения в постоянное.

Режим измерения частоты исследуемого сигнала осуществляется с помощью блока «Измерение частоты». Период определяется как величина, обратная частоте сигнала, т. е. с помощью делителя вычисляется отношение единицы к значению частоты.

В мультиметре возможно сохранение результатов измерения в файл, нажав кнопку «Сохранение файла». Адрес файла задается пользователем. Файл может быть использован при дальнейшей работе и обработке результатов измерения [13, 19].

Параметры ВСИ с функциями мультиметра (см. рисунок 3.10):

- 1) диапазон измерения переменных и постоянных напряжений входных сигналов – от 0 до 10 В;
- 2) предел погрешности измерения напряжения – не более $\pm 0,02\%$ от $U_{\text{изм}}$;
- 3) диапазон измерения переменных и постоянных токов – от 2 мкА до 0,1 А;
- 4) предел погрешности измерения тока – не более $\pm 0,07\%$ от $U_{\text{изм}}$;
- 5) диапазон измерения частот – от 0 до 200 кГц;
- 6) диапазон измерения периода – от 0,2 мкс до 10 с;
- 7) предел погрешности измерения периода – не более $\pm 0,03\%$ от $T_{\text{изм}}$;
- 8) диапазон измерения сопротивления – от 1 Ом до 1 МОм;
- 9) предел погрешности измерения сопротивления – не более $\pm 0,06\%$ от $R_{\text{изм}}$.

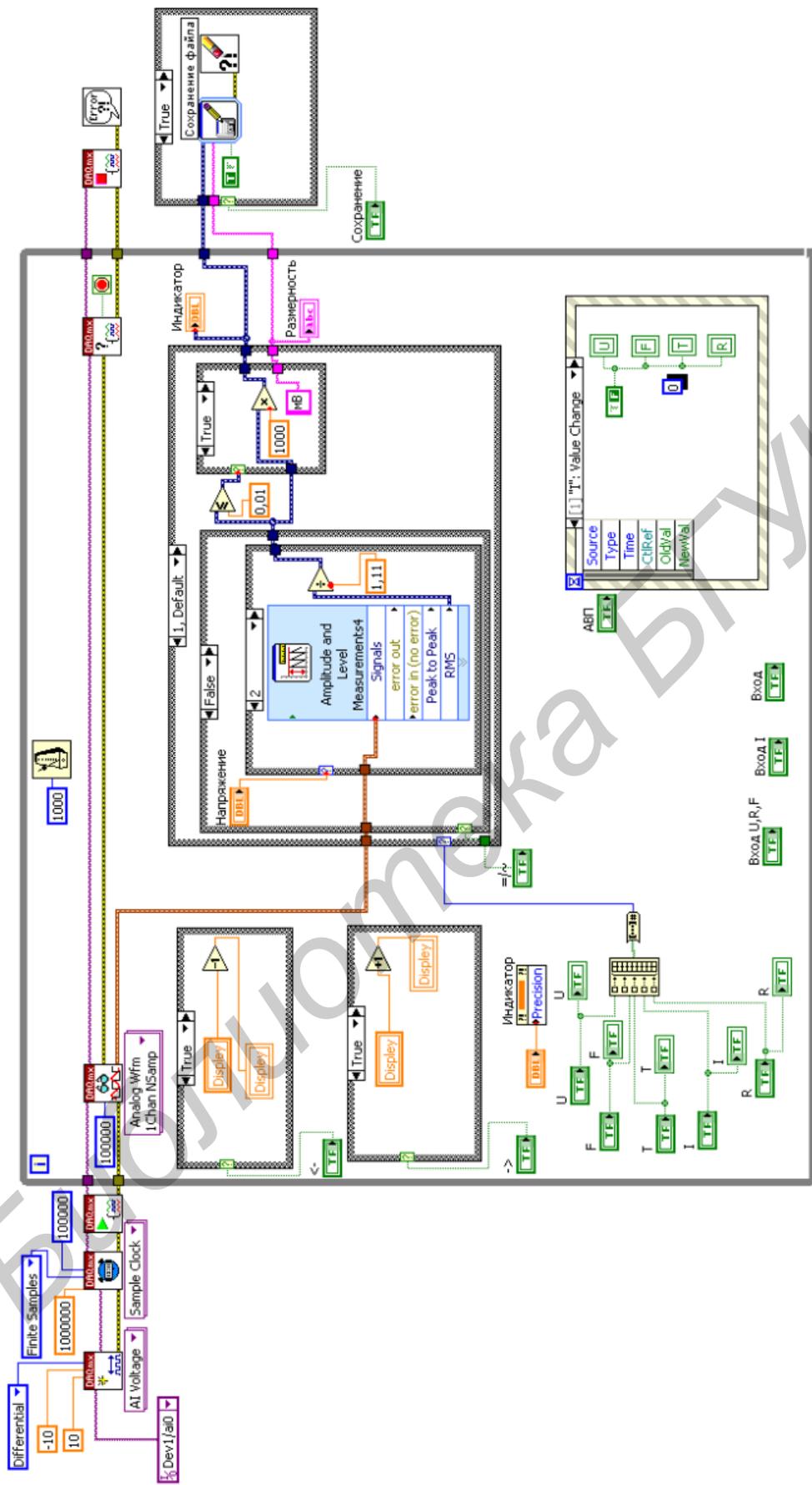


Рисунок 3.10 – Программное обеспечение ВСИ с функциями мультиметра

Алгоритм функционирования ВСИ с функциями мультиметра приведен на рисунке 3.11.

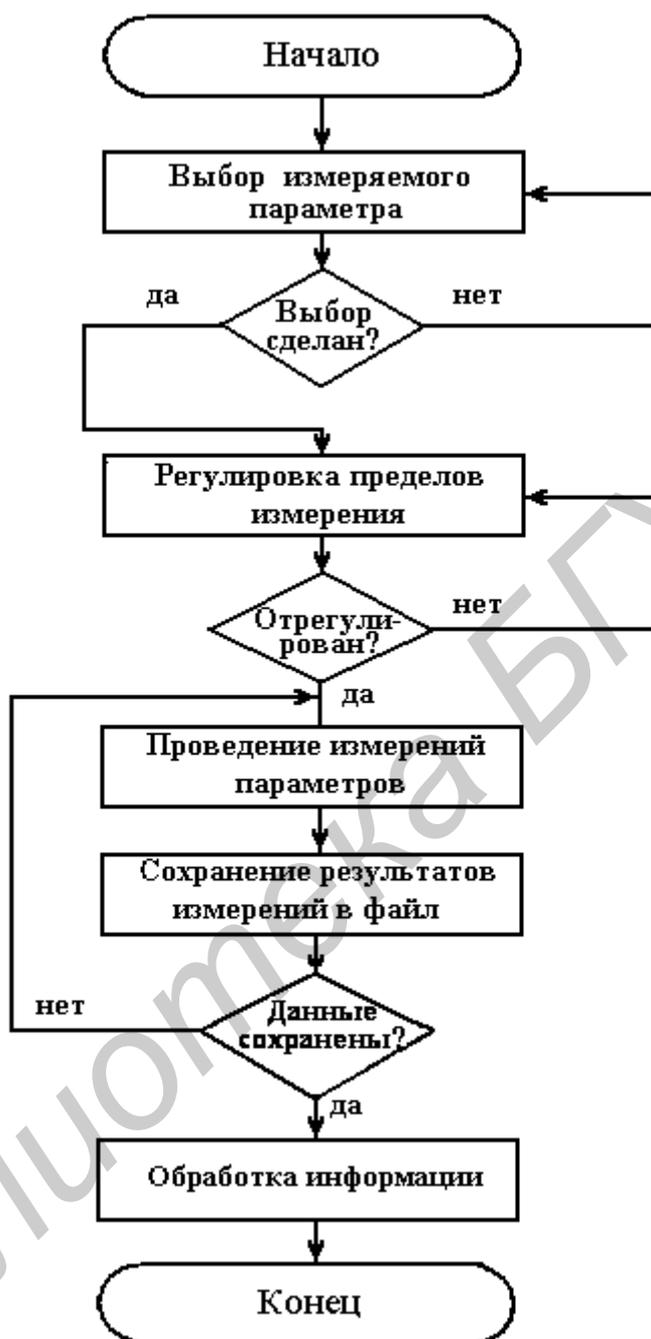


Рисунок 3.11 – Алгоритм работы КИС с функциями мультиметра

Подключив объект исследования, выбираем измеряемый параметр нажатием кнопки на передней панели мультиметра. Когда параметр выбран, регулируются пределы измерения. Если пределы отрегулированы, то проводятся измерения необходимого параметра. Сохраняем результаты измерений для последующей обработки [20].

Используя технологию виртуальных приборов, разработчик может превратить стандартный персональный компьютер и набор произвольного

контрольно-измерительного оборудования в многофункциональный измерительно-вычислительный комплекс. Несомненным достоинством *LabVIEW* является то, что разработчику и пользователю доступны функционально идентичные системы программирования для различных операционных систем.

3.5 Виртуальное средство измерения для исследования спектра сигналов

На рисунке 3.12 представлена подробная структурная схема ВСИ для исследования спектров сигналов. В данном ВСИ реализован метод вычисления спектра сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для этого предварительно необходимо получать информацию о сигнале во временной области. Так как вычисление спектра происходит с использованием цифровых вычислительных устройств, то и сама информация о сигнале должна быть представлена в цифровом виде. С помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) аналоговый сигнал преобразуется в последовательность цифровых выборок, в каждой из которых хранится амплитуда исходного сигнала и время получения выборки.

Сбор данных о сигнале и их передачу в персональный компьютер осуществляет плата ввода/вывода *NI PCI-6251*. Технические характеристики платы представлены в таблице 3.1. *NI PCI-6251* является высокоскоростной многофункциональной платой сбора данных серии *M* производства компании *National Instruments*. Плата способна оцифровывать сигналы с нескольких каналов и выполнять цифроаналоговое преобразование для генерации сигналов любой формы. Кроме того, плата воспринимает сигналы цифрового ввода и формирует сигналы цифрового вывода.

Для обмена информацией между платой и компьютером используется интерфейс ввода/вывода *PCI (Peripheral Component Interconnect)*. Шина *PCI* предназначена для подключения периферийных устройств к материнской плате персонального компьютера. На плате имеется контактная площадка, которая вставляется в разъем *PCI* материнской платы ПК.

Исследуемый сигнал поступает в цепь аналогового ввода платы через вышеописанный коннекторный блок. Источник исследуемого сигнала подключается к одному из аналоговых входов на коннекторном блоке. Сигнальный провод источника подключается к одному из разъемов *AI*, а земля – к одному из разъемов *AI GND*.

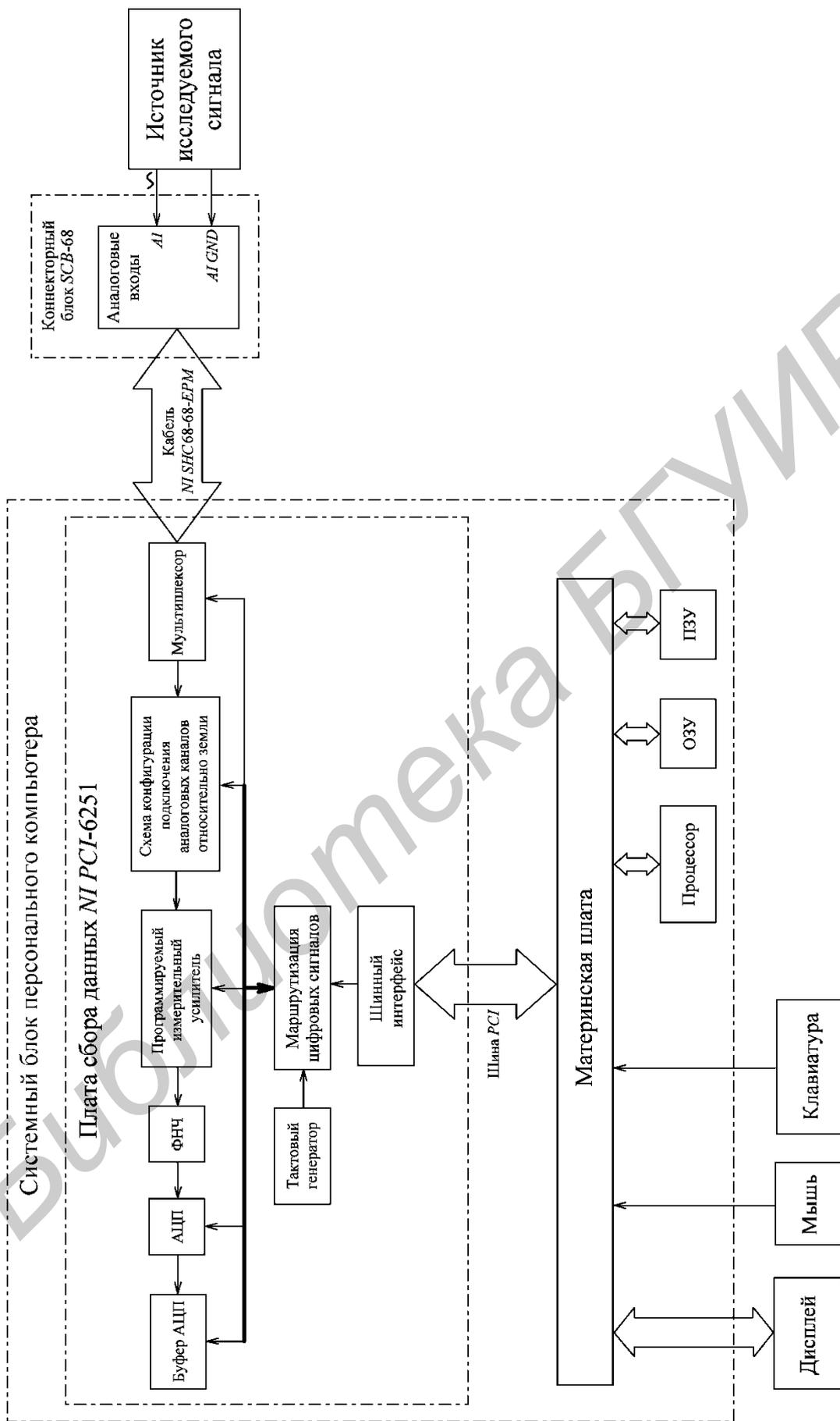


Рисунок 3.12 – Структурная схема ВСИ для исследования спектров сигналов

Подсистема аналогового ввода платы состоит из следующих блоков:

1 Мультиплексор. В плате NI PCI-6251 используется только один АЦП, поэтому для увеличения количества каналов ввода сигналов используется мультиплексор. Мультиплексор поочередно подает сигналы с каждого канала на АЦП через измерительный усилитель.

2 *Схема конфигурации подключения относительно земли.* В данной схеме задается конфигурация подключения входных сигналов: дифференциальная, несимметричная с «плавающей землей» (*AI SENSE*) и несимметричная заземленная. В нашем случае (см. рисунок 3.12) подключение относительно земли – несимметричное заземленное.

3 *Программируемый измерительный усилитель.* Данный усилитель имеет программируемый коэффициент усиления. По сигналам выбора диапазона он усиливает или ослабляет аналоговый входной сигнал настолько, чтобы обеспечить максимальное разрешение АЦП. Усилитель обеспечивает высокую точность измерения сигналов с нескольких каналов при высоких частотах дискретизации, даже если уровни сигналов малы. Имеется возможность настройки каждого аналогового канала под разный диапазон входных сигналов.

4 *Фильтр низких частот (ФНЧ).* ФНЧ используется для подавления высокочастотных помех. В плате NI PCI-6251 частота среза фильтра составляет 1,7 МГц.

5 *Аналого-цифровой преобразователь.* АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровую форму путем преобразования аналогового напряжения в цифровой код. При этом теряется часть информации о сигнале. Преобразование может происходить только в дискретные моменты времени, поскольку все, что происходит между этими моментами, теряется. Кроме того, происходит квантование сигнала по уровню, т. е. АЦП может представлять только конечное число уровней сигнала. Результат определения амплитуды сигнала всегда округляется до одного из ближайших уровней квантования АЦП. Количество уровней представления сигнала определяет разрядность АЦП. Интервал времени, между которым происходит аналого-цифровое преобразование, соответствует частоте дискретизации.

6 *Буфер АЦП.* Во избежание потерь данных буфер большого объема хранит данные в процессе измерений аналогового входного сигнала. Буфер работает по принципу *FIFO*: «первый вошел – первый вышел». Во время работы АЦП он непрерывно заполняется новыми поступившими отсчетами, в то время как старые отсчеты высвобождаются из буфера и отправляются на персональный компьютер. Таким образом, удастся согласовать различные скорости записи и считывания информации.

7 *Тактовый генератор.* Тактовый генератор задает частоту дискретизации сигнала. Процесс преобразования аналогового напряжения в цифровой код синхронизирован с импульсами генератора.

Все функциональные блоки платы управляются цепью маршрутизации цифровых сигналов, в которую через шину *PCI* поступают команды от персонального компьютера.

Массив отсчетов сигнала, полученный из буфера АЦП, передается в память компьютера. Вычисление быстрого преобразования Фурье по этому массиву происходит за счет ресурсов самого компьютера. Результат вычисления представляется графически на дисплее в виде кривой, построенной по точкам. Параметры представления результата и режим работы платы устанавливаются через управляющую программу, описание которой представлено в подразделе 3.3.

Основные технические характеристики подсистемы аналогового ввода приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Частота дискретизации АЦП позволяет исследовать сигналы в диапазоне частот до 600 кГц без нарушения условий теоремы Котельникова. На разрешающую способность АЦП влияет установленный диапазон входного сигнала. В свою очередь, разрешающая способность соответствует напряжению младшего разряда АЦП. Как уже указывалось, значение младшего разряда 16-битного АЦП при работе в диапазоне ± 10 В составляет 305 мкВ. При работе в диапазоне $\pm 0,1$ В значение младшего разряда будет равно 3,05 мкВ. Таким образом, АЦП платы NI PCI-6251 способен работать в требуемом диапазоне амплитуд сигналов (1 мВ–10 В), обеспечивая низкую погрешность определения амплитудных значений сигналов.

Программное обеспечение для управления ВСИ и обработки получаемой информации создано в графической среде программирования *LabVIEW*. Далее будут описаны ключевые части кода и графический интерфейс программы.

Исходный код программы в *LabVIEW* представляет собой блок-диаграмму (соединенные друг с другом пиктограммы элементов языка программирования), которая затем компилируется в машинный код. Узлы программы – функции, циклы и прочие конструкции языка – получают данные через входы, производят их обработку и выводят данные с помощью выходов. Как только значения параметров поступают на каждый из входных терминалов узла, происходит выполнение кода узла, после чего значения выходных параметров оказываются доступными на выходных терминалах для дальнейшей их передачи на другие узлы согласно логике потока данных. Соответственно, из двух последовательно связанных узлов второй сможет быть выполнен только после получения данных от предыдущего.

3.5.1 Управление аналоговым вводом

Подпрограмма для настройки аналогового ввода и сбора данных, получаемых от АЦП, представлена на рисунке 3.13. Подпрограмма выполняется следующим образом. Перед началом сбора данных создается виртуальный канал, который содержит в себе имя физического аналогового входа платы и настройки аналогового ввода. Для создания виртуального канала пользователь должен указать имя используемого аналогового входа (переменная «*physical channel*») и диапазон напряжения входного сигнала («*Range_Sel*»).

Конфигурация заземления автоматически устанавливается несимметричной заземленной («*RSE*»). После создания виртуального канала задаются параметры работы АЦП: количество выборок («*#s*») и частота

дискретизации (« F_s »). При отсутствии ошибок ввода будет запущена операция сбора данных. После ее выполнения программа считывает из буфера данные, которые представляют собой кластер, состоящий из массива значений амплитуды исследуемого сигнала, времени запуска сбора данных и временного интервала взятия выборок. Вся информация заносится в переменную «*data*». После считывания данных происходит очистка памяти, выделенной для выполнения задачи, и завершение самой задачи аналогового ввода.

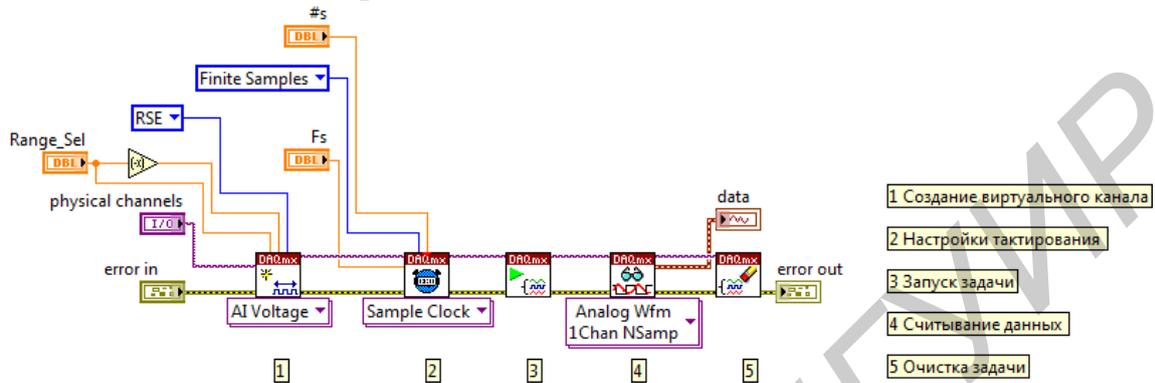


Рисунок 3.13 – Графический код подпрограммы для сбора данных

3.5.2 Вычисление БПФ, применение взвешивающих окон и усреднение результата

Алгоритм, который обеспечивает преобразование цифровых отсчетов сигнала из области времени в область частот, является дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Алгоритм БПФ является частным случаем вычисления ДПФ. Уравнение для получения ДПФ по N точкам выглядит следующим образом [4, 10]:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_d) e^{-j \pi k n / N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_d) \left[\cos\left(\frac{2\pi k n}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi k n}{N}\right) \right], \quad (3.2)$$

где T_d – интервал дискретизации сигнала;

$X(k)$ – значение спектра в точке k/NT_d ;

k – номер частотного отсчета ($k = 0, 1, 2, \dots$);

n – номер временного отсчета;

(nT_d) – значение амплитуды сигнала в момент времени nT_d ;

N – общее число отсчетов, используемое для расчета ДПФ.

Для того чтобы быть представленным в виде суммы гармонических составляющих, сигнал должен быть периодическим. Но в качестве набора входных данных для ДПФ доступно только конечное число отсчетов (N). Математически периодичность достигается бесконечным повторением группы отсчетов до и после интервала времени наблюдения за сигналом (рисунок 3.14).

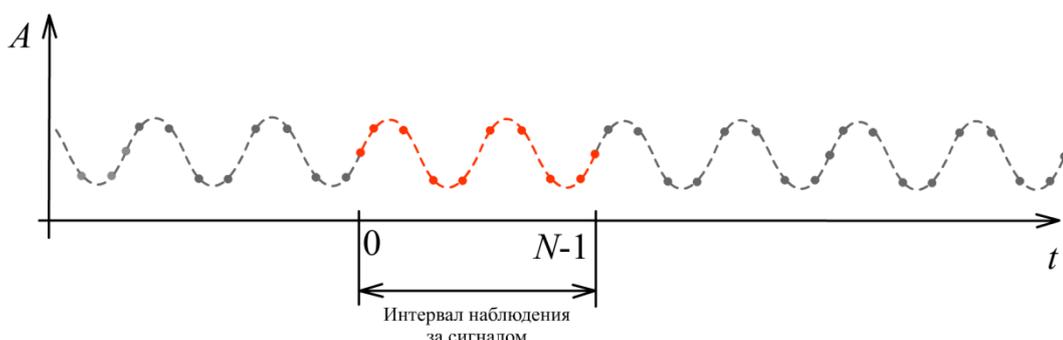


Рисунок 3.14 – Периодическое повторение исходной выборки сигнала

Периодическое продление сигнала приводит к тому, что результирующий спектр такого сигнала всегда является линейчатым [10]. Причем расстояние между спектральными составляющими будет определяться периодом повторения группы известных отсчетов сигнала. В случае, когда период повторения отсчетов равен интервалу наблюдения за сигналом, расстояние между спектральными составляющими Δf (Гц) будет равно

$$\Delta f = \frac{1}{NT_d}, \quad (3.3)$$

где T_d – интервал дискретизации сигнала;

N – количество отсчетов сигнала.

Таким образом, расстояние между спектральными составляющими определяет разрешающую способность ДПФ. Как видно из формулы (3.3), разрешающую способность можно повысить двумя способами:

- 1) увеличением количества получаемых от АЦП отсчетов N ;
- 2) увеличением интервала дискретизации T_d .

В обоих случаях увеличивается требуемое время наблюдения за сигналом. Причем при увеличении интервала дискретизации ухудшается разрешающая способность анализа во временной области, а при увеличении количества выборок увеличивается время, затрачиваемое на вычисление ДПФ.

Вычисление ДПФ по N отсчетам требует выполнение N^2 комплексных операций, поэтому данный процесс может занимать очень много времени. Для уменьшения количества вычислений применяются алгоритмы быстрого преобразования Фурье, позволяющие снизить количество комплексных операций до значения $(N/2) \cdot \log_2 N$. При работе с большими объемами информации БПФ оказывается в несколько сотен раз эффективнее стандартного ДПФ. Уменьшение количества операций достигается за счет того, что значения некоторых n -ых элементов суммы в выражении (3.2) для разных k периодически повторяются. Поэтому их не нужно вычислять каждый раз заново [10].

Существует множество различных алгоритмов БПФ. Один из самых эффективных алгоритмов требует, чтобы число N являлось степенью m двойки ($N = 2^m$). Однако на практике это может оказаться неудобным. В

рассматриваемом ВСИ для вычисления спектра сигнала используется готовый алгоритм из библиотек функций цифровой обработки сигналов *LabVIEW*, в котором не накладываются требования на количество отсчетов сигнала [9]. При этом эффективность этого алгоритма может быть сопоставима с классическим алгоритмом БПФ при $N = 2^m$.

На рисунке 3.15 представлена пиктограмма используемой функции *FFT Power Spectrum* для вычисления спектра мощности по одному из алгоритмов БПФ [11].

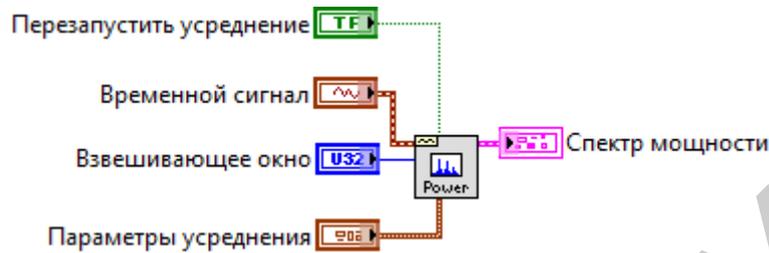


Рисунок 3.15 – Внешний вид пиктограммы функции *FFT Power Spectrum*

Функция рассчитывает спектр мощности по отсчетам напряжения сигнала во временной области. Спектр мощности представляется в виде зависимости от частоты уровня сигнала в децибелах относительно одного ватта:

$$P(f) = 10 \lg \left(\frac{U(f)^2}{2} \right), \quad (3.4)$$

где $P(f)$ – спектр мощности в относительных единицах, дБ;

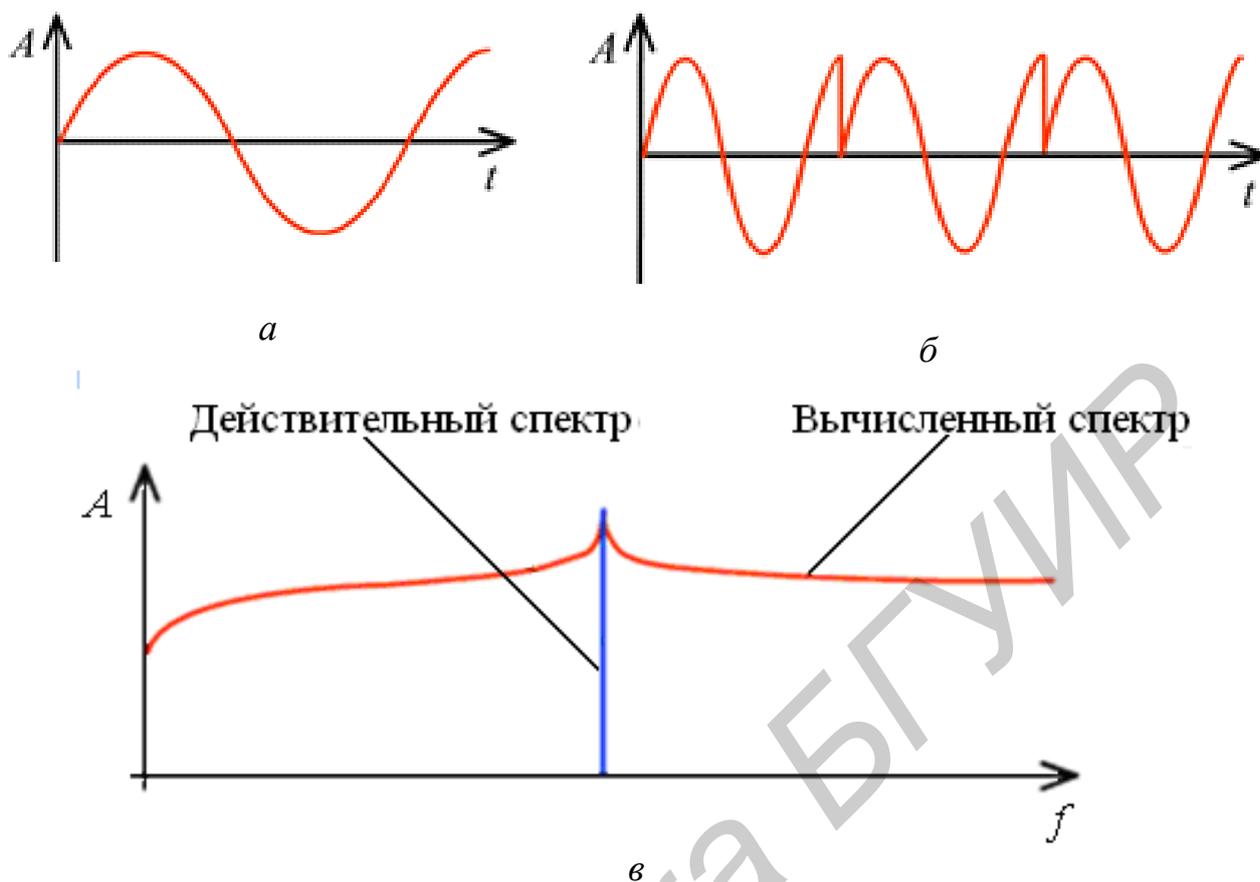
$U(f)$ – амплитудный спектр сигнала, где реальная составляющая $Re(f)$ и мнимая составляющая спектра $Im(f)$ вычисляются согласно формуле $U(f) = \sqrt{Re(f)^2 + Im(f)^2}$.

Результат вычисления БПФ является абсолютно точным при двух условиях:

- 1) сигнал должен быть периодическим;
- 2) время наблюдения за сигналом должно быть кратно периоду сигнала.

На практике оба этих условия выполняются редко. В результате возникает эффект «растекания спектра» [9], продемонстрированный на рисунке 3.16.

При периодическом продлении выборки сигнала, содержащей неполное число периодов, возникает ошибка в представлении сигнала, т. к. резкие скачки сигнала интерпретируются как шум. Часть энергии исходного спектра сигнала «растекается» по частотной области в виде шума, в результате чего возникает ошибка определения амплитуд спектральных составляющих. Кроме того, растекание спектра может скрыть близкие по частоте спектральные составляющие с малыми амплитудами на фоне составляющих с большими амплитудами.



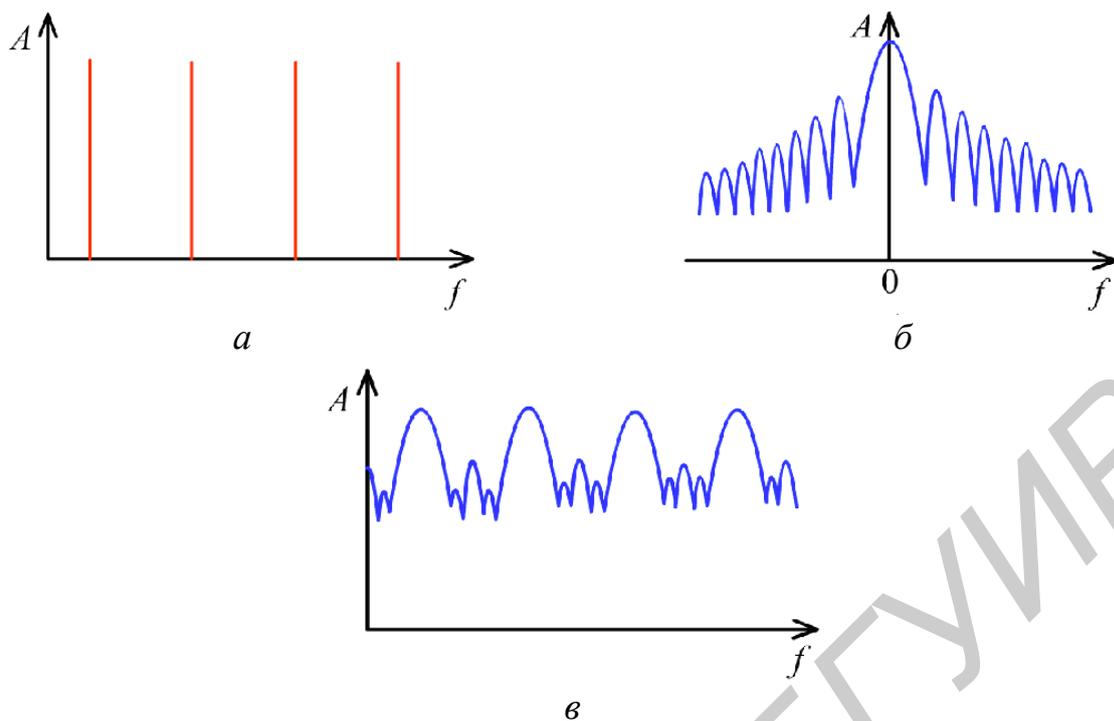
a – оцифрованный сигнал; *б* – периодическое продолжение сигнала;
в – результат вычисления спектра

Рисунок 3.16 – Пример возникновения эффекта «растекания спектра»

Для уменьшения резких скачков в местах разрыва сигнала применяют взвешивающие окна [12]. В процессе работы с окнами происходит перемножение отсчетов сигнала с отсчетами окна. Значения отсчетов окна плавно уменьшаются, стремясь к нулю на границах выборки сигнала.

В соответствии со свойствами преобразования Фурье умножение функций во временной области эквивалентно свертке функций в области частот. Поэтому спектр сигнала после оконного взвешивания является сверткой спектра исходного сигнала со спектром функции окна.

Вычисление БПФ без применения специальной оконной функции над сигналом можно интерпретировать как умножение исходного сигнала на функцию прямоугольной формы (прямоугольное окно). В этом случае результирующий спектр будет являться сверткой спектра исходной функции со спектром прямоугольного импульса (рисунок 3.17).



а – спектр исходного сигнала; *б* – спектр прямоугольного окна;
в – результат свертки сигнала с окном

Рисунок 3.17 – Искажение спектра сигнала, ограниченного прямоугольным окном

На рисунке 3.18 представлен пример применения специального взвешивающего окна и его влияние на результат. Во временной области не видно, что выборка сигнала состоит из двух гармоник, одна из которых имеет очень малую амплитуду. Вычисленный спектр по такой выборке имеет малозаметный пик, указывающий на присутствие второй гармоники.

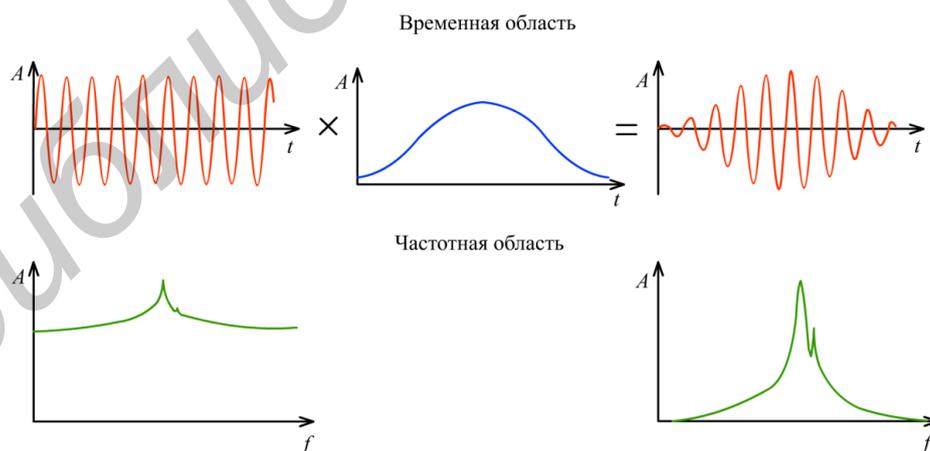


Рисунок 3.18 – Результат обработки исходной выборки сигнала с помощью взвешивающего окна

Умножение исходного сигнала на взвешивающее окно значительно улучшает результат. Как видно на рисунке 3.18, спектр предварительно обработанной выборки имеет два явно выраженных пика, означающих присутствие в исходном сигнале двух гармонических составляющих.

Использование функции *FFT Power Spectrum* позволяет использовать множество различных взвешивающих окон. Применение того или иного окна зависит от сложности спектра исходного сигнала и цели его измерения [12].

Например, прямоугольное окно обладает наилучшей разрешающей способностью по частоте и часто применяется при исследовании переходных процессов, когда не допускается искажение выборки сигнала. Однако при исследовании периодических сигналов прямоугольное окно создает сильный эффект «растекания спектра», поэтому погрешность определения амплитуд гармонических составляющих может достигать значения ± 4 дБ.

Наименьшую погрешность в результат измерения амплитуды вносит плосковершинное окно (*Flat top window*). Погрешность определения амплитуды гармоники при умножении выборок на такое окно не превышает $\pm 0,02$ дБ, однако применение плосковершинного окна сильно снижает разрешающую способность по частоте.

Кроме плосковершинного окна очень часто применяется окно Хэннинга (*Hanning window*) и Блэкмана – Харриса (*Blackman – Harris Window*). Они являются универсальными и создают малую погрешность определения амплитуды при сохранении хорошей разрешающей способности. Эти окна применяются в случае наличия в спектре сигнала гармоник, близких по частоте, но с сильно отличающимися амплитудами.

Функция *FFT Power Spectrum* имеет возможность проводить усреднение результата по нескольким наблюдениям. Усредненный результат вычисляется как взвешенное скользящее среднее P_{WMA} по формуле

$$P_{WMA} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (3.5)$$

где n – количество элементов, используемых для вычисления среднего;

P_i – i -й элемент для усреднения;

W_i – вес i -го элемента.

Взвешивание может выполняться двумя методами:

- 1) линейным взвешиванием;
- 2) экспоненциальным взвешиванием.

При линейном взвешивании для вычисления среднего используется конечное число n элементов. Вес элемента линейно уменьшается до нуля с ростом индекса i . При экспоненциальном взвешивании веса элементов бесконечно убывают, стремясь к нулю. Таким образом, для вычисления среднего используется бесконечное число элементов.

Результат вычисления среднего в обоих случаях обновляется каждый раз при получении нового результата измерений. Разница лишь в том, что линейное

взвешивание прекратится при достижении заданного пользователем количества элементов n . Экспоненциальное взвешивание будет продолжаться до тех пор, пока пользователь не сбросит операцию усреднения.

3.5.3 Графический интерфейс программы

На рисунке 3.19 представлен графический интерфейс программы. Основную часть лицевой панели программы занимает графическая область для воспроизведения спектра мощности сигнала. По оси абсцисс откладывается частота в герцах, по оси ординат – уровень мощности в децибелах. Для более детального рассмотрения отдельных частей спектра пользователь может изменять пределы воспроизведения на экране по уровню и по частоте.

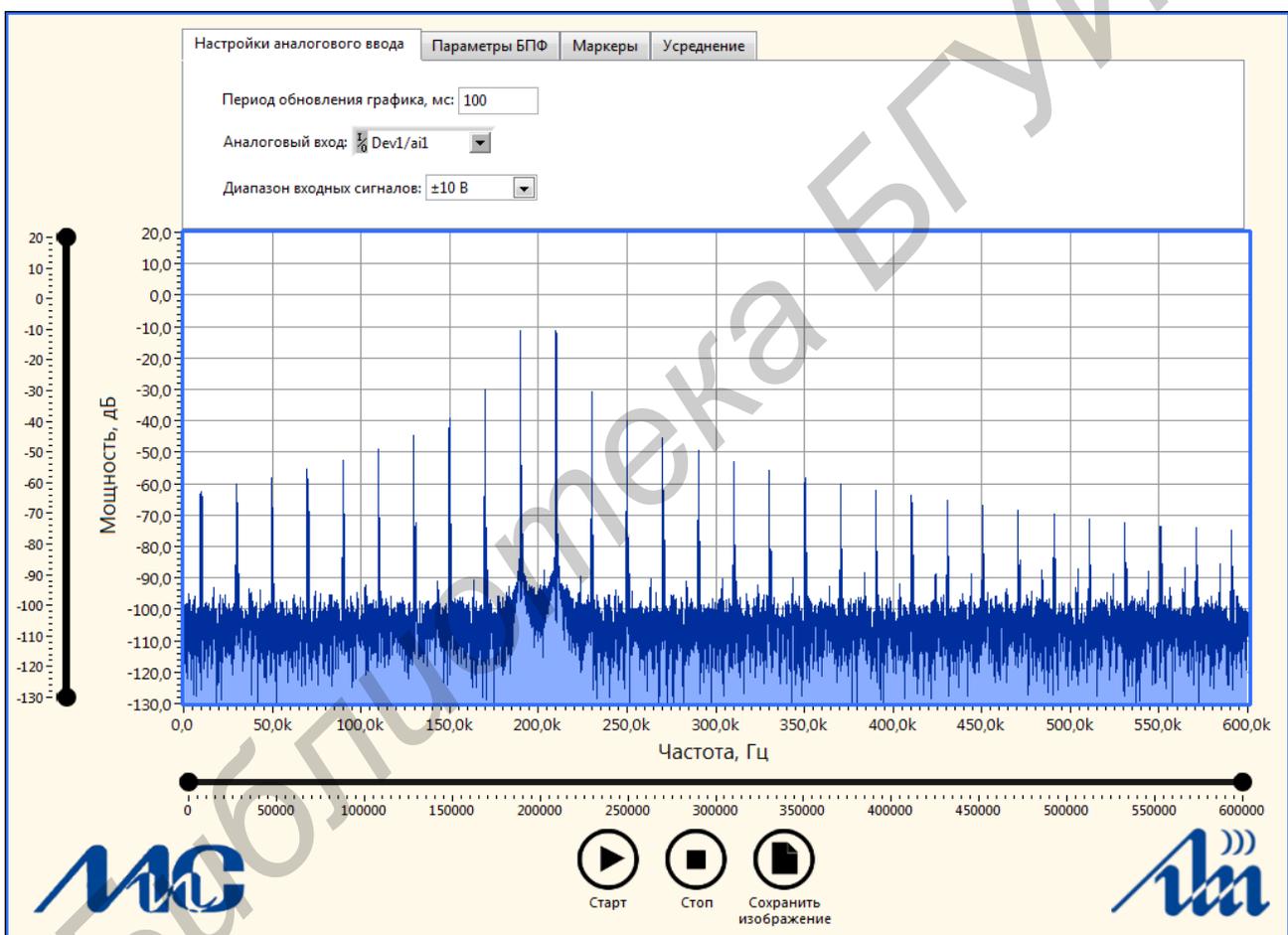


Рисунок 3.19 – Интерфейс программы для управления КИС

Запуск исследования начинается при нажатии кнопки «Старт». Остановка исследования выполняется после нажатия кнопки «Стоп». Имеется возможность сохранить полученный график спектра в виде изображения в формате *JPEG*. В верхней части программы располагаются четыре вкладки для осуществления настроек аналогового ввода, параметров дискретизации сигнала, проведения измерений с помощью маркеров и усреднения результата исследования.

Содержимое вкладки «Настройки аналогового ввода» показано на рисунке 3.20. В данной вкладке пользователь может указать имя физического канала, к которому подключен источник сигнала на коннекторном блоке, и установить диапазон входных сигналов.

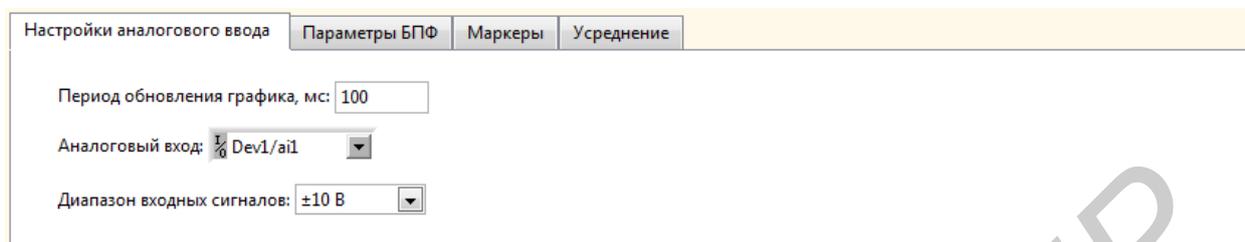


Рисунок 3.20 – Внешний вид вкладки «Настройки аналогового ввода»

Регулировка диапазона входных сигналов позволяет эффективно задействовать все разряды АЦП при исследовании сигналов с малой амплитудой. Максимальный устанавливаемый диапазон составляет ± 10 В, минимальный – ± 100 мВ. В этой же вкладке пользователь может установить период обновления графика спектра на экране в миллисекундах. Это удобно в тех случаях, когда нужно уменьшить скорость обновления во время проведения измерений уровня сигнала в отдельной частотной точке с помощью маркера.

На рисунке 3.21 показано содержимое вкладки «Параметры БПФ».

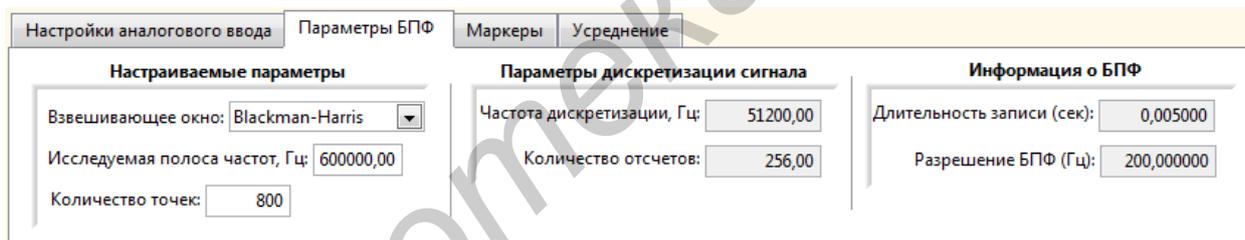


Рисунок 3.21 – Внешний вид вкладки «Параметры БПФ»

В этом случае оператор имеет возможность установить верхний предел исследуемой полосы частот и количество точек, по которым будет построен график в этой полосе. Также в этой вкладке устанавливается тип взвешивающего окна, применяемого перед вычислением БПФ. В области «Параметры дискретизации сигнала» отображается частота дискретизации сигнала и количество взятых отсчетов. Эти параметры вычисляются по введенным данным в области «Настраиваемые параметры». В области «Информация о БПФ» показана длительность оцифрованного сигнала и шаг, с которым откладываются точки на графике по частоте (разрешение БПФ).

На рисунке 3.22 показано содержимое вкладки «Маркеры».

Работая в этой вкладке, пользователь может включать маркеры для определения уровня мощности в децибелах, амплитуды в вольтах и частоты в герцах в каждой точке полученного графика. При использовании двух маркеров

во вкладке отображается разница между показаниями маркеров по уровню мощности и частоте.

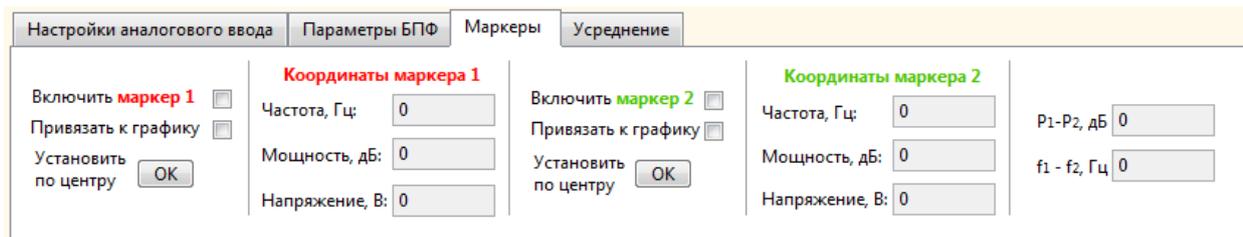


Рисунок 3.22 – Внешний вид вкладки «Маркеры»

На рисунке 3.23 показано содержимое вкладки «Усреднение». Здесь можно включить усреднение графика спектра по нескольким наблюдениям и установить параметры усреднения. Для линейного взвешивания можно указать количество наблюдений, по которым будет произведено усреднение. Усреднение может проводиться непосредственно по значению мощности в каждой точке (*RMS Averaging*) или может выполняться векторное усреднение (*Vector Averaging*).

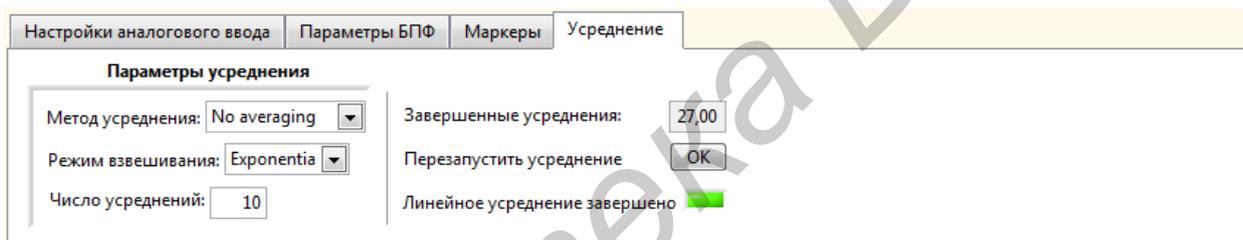


Рисунок 3.23 – Внешний вид вкладки «Усреднение»

При векторном усреднении отдельно определяется среднее значение реальной и мнимой составляющей и потом определяется мощность по формуле (3.4). Такой вид усреднения позволяет снизить шумовой порог анализа спектра, но требует внешней синхронизации запуска каждого наблюдения. Вместо усреднения можно использовать режим запоминания пика (*Peak Hold*), при котором в графической области программы будут воспроизводиться максимальные амплитуды в каждой точке, полученные с момента включения режима.

3.6 Технические характеристики ВСИ с функциями анализатора спектра

С учетом технических характеристик используемого оборудования можно определить технические характеристики самого ВСИ.

Поскольку в рассмотренном ВСИ не применяется гетеродинное преобразование частоты сигнала, диапазон исследуемых частот будет ограничен низкими частотами. Нижняя граница диапазона равна нулю. Верхняя

граница f_{\max} определяется из максимальной частоты дискретизации, которая для используемой платы сбора данных равна $f_d = 1,5$ МГц. Если верхнюю границу диапазона частот сделать равной $f_{\max} = 600$ кГц, то частота дискретизации в данном случае может браться с запасом по отношению к теореме Котельникова и определяется по формуле

$$f_d = 2,5 \cdot f_{\max}. \quad (3.6)$$

На аналоговых входах ВСИ не имеется ФНЧ для подавления частот, больших чем $f_d/2$. Поэтому данное ВСИ лучше всего подходит для исследования сигналов с ограниченным спектром, не выходящим за установленный частотный диапазон.

С помощью маркеров на лицевой панели интерфейса ВСИ можно проводить измерения частоты и амплитуды гармоники исследуемого сигнала. При этом на погрешность определения положения пикового значения гармоники по частоте оказывают влияние следующие факторы:

- нестабильность частоты дискретизации АЦП;
- дискретное представление спектра сигнала.

Спектр, воспроизводимый на экране ВСИ, является графиком, построенным по точкам. Каждой точке соответствует частота, которая определяется по следующей формуле:

$$f(k) = k \frac{f_d}{N} = k \frac{1}{NT_d}, \quad (3.7)$$

где $f(k)$ – отсчет частоты, Гц;

k – номер отсчета частоты ($k = 0, 1, 2, \dots$);

f_d – частота дискретизации сигнала, Гц;

T_d – интервал дискретизации сигнала, с;

N – количество отсчетов сигнала во временной области.

На погрешность определения частоты гармоники в основном будет влиять тот факт, что ее частота может находиться между одной из частотных точек $f(k)$. Тогда энергия гармоники распределится по соседним точкам. Для уменьшения неопределенности расположения гармоники следует уменьшать шаг между точками, равный $\frac{1}{NT_d}$. Таким образом, погрешность определения

частоты гармоники можно оценить как $\pm \frac{1}{NT_d}$. Согласно формуле (3.7) уменьшить эту погрешность можно следующими путями:

- увеличением времени наблюдения за счет увеличения количества отсчетов N ;

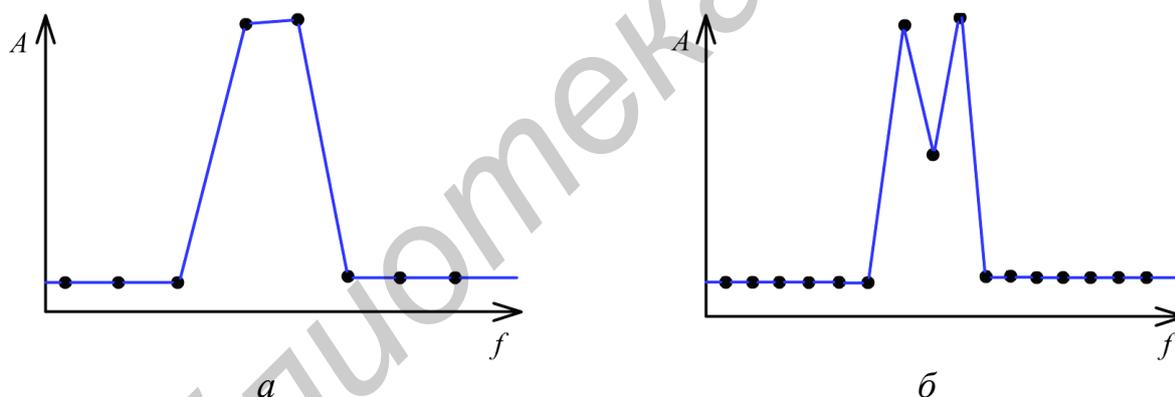
- увеличением времени наблюдения за счет увеличения интервала дискретизации T_d ;

- использованием метода дополнения нулями исходной выборки сигнала.

Третий способ подразумевает увеличение объема выборки сигнала за счет добавления нулевых отсчетов в конец записи. Таким образом, можно устранить неопределенность расположения спектральной составляющей, однако такой метод усиливает эффект «растекания спектра» [10].

Дискретность представления спектра влияет и на разрешающую способность по частоте. Под разрешающей способностью понимается минимальная разница частот гармоник, при которой на экране ВСИ можно точно установить наличие двух спектральных составляющих в сигнале. Как уже было сказано выше, спектр, воспроизводимый на экране ВСИ, является графиком, построенным по точкам. Поэтому для регистрации наличия двух гармоник требуется, чтобы между ними находилась хотя бы одна точка, как это показано на рисунке 3.24.

Таким образом, минимальное расстояние между пиками составит два шага по частотной сетке: $\frac{2}{NT_d}$. Это и будет являться разрешающей способностью анализа. Стоит отметить, что такая разрешающая способность достигается только при использовании прямоугольного окна (*rectangle window*). То есть выборка сигнала не должна умножаться на специальную оконную функцию перед вычислением БПФ.



а – два пика сливаются в один; б – оба пика наблюдаются по отдельности

Рисунок 3.24 – Пример слияния двух гармонических составляющих при недостаточной разрешающей способности

Таким образом, согласно формуле (3.7) при частоте дискретизации $f_d = 1,5$ МГц и количестве отсчетов $N = 150\,000$ погрешность определения частоты пика гармоники составляет ± 10 Гц. Дальнейшее увеличение числа отсчетов заметно влияет на скорость работы ВСИ. Разрешающая способность при тех же параметрах дискретизации сигнала будет равна 20 Гц.

В данном ВСИ имеется возможность уменьшения частоты дискретизации путем уменьшения диапазона исследуемых частот во вкладке «Параметры БПФ». Это улучшит разрешающую способность анализа, однако следует

помнить, что при нарушении требований теоремы Котельникова, спектр сигнала может быть сильно искажен ложными гармониками.

На погрешность определения амплитуды гармоники с помощью маркера влияют две основные составляющие:

- 1) погрешность квантования АЦП;
- 2) тип применяемого взвешивающего окна.

Как показали экспериментальные исследования, при применении плосковершинного окна погрешность определения относительного уровня гармоники с помощью маркера не превышает ± 1 дБ на всем указанном диапазоне входных сигналов.

Рабочее место пользователя вышеописанного виртуального средства измерения с функциями анализатора спектра показано на рисунке 3.25.

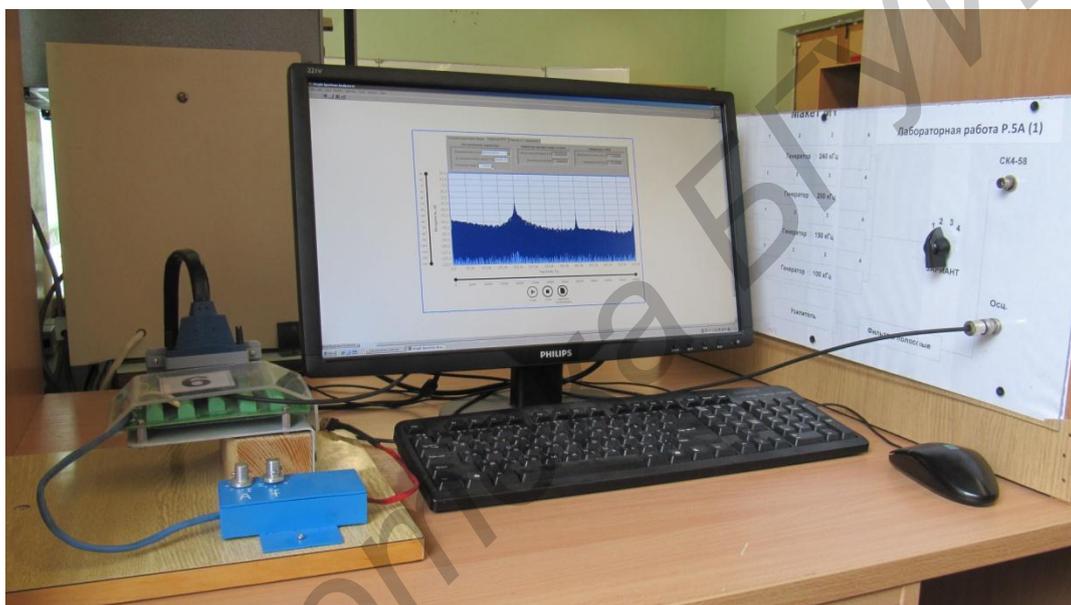


Рисунок 3.25 – Рабочее место пользователя ВСИ с функциями анализатора спектра

Обобщая вышесказанное, технические характеристики ВСИ для исследования спектров сигналов являются следующими:

- диапазон исследуемых частот: 0–600 кГц;
- погрешность определения частоты с помощью маркера: ± 10 Гц;
- разрешающая способность по частоте: 20 Гц;
- диапазон входных напряжений: 1 мВ–10 В;
- погрешность определения уровня с помощью маркера: ± 1 дБ;
- уровень собственного шума в диапазоне от 0 до 600 кГц: не более минус 80 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемые тенденции сближения измерительной техники (ИТ) и вычислительной техники (ВТ), традиционных приборов и информационно-измерительных систем (ИИС) при их сильном взаимовлиянии и взаимопроникновении нашли свое развитие в стремительно прогрессирующем в последние годы виртуальном приборостроении – перспективном направлении, во многом лишенном недостатков автономных приборов и ИИС и объединяющем их достоинства. Еще в конце 1990-х годов измерительное устройство в виде компьютерной платы выглядело на обширном рынке ИТ экзотикой. Вначале это были устройства с невысокими характеристиками и усеченными функциями, рассчитанными на простейшие задачи. Постепенно виртуальные средства измерений занимали все более существенный сектор рынка компьютерных систем сбора и обработки измерительной информации. Однако ВСИ еще не воспринимались как профессиональное средство измерений, проигрывая традиционным приборам и информационно-измерительным системам по ряду позиций, в первую очередь по метрологическим характеристикам. Это объяснялось, с одной стороны, тем, что ведущие приборостроительные фирмы, в соответствии с проверенной тактикой, не спешили вкладывать средства в специфическую область, предпочитая внимательно наблюдать за усилиями мелких разработчиков. Более того, развитие этого направления ими сознательно сдерживалось из-за нежелания допускать серьезную конкуренцию своей традиционной серийной продукции, ведущую к снижению цен. С другой стороны, разработка серьезного прибора требует больших затрат – финансовых и временных, высокой квалификации разработчиков, что снижает привлекательность такого рода проектов для мелких фирм и делает даже успешно завершённые разработки достаточно дорогостоящими.

Общие тенденции бурного развития электроники, в особенности вычислительной техники, объективно делали идею ВСИ все более привлекательной, и в последнее время наблюдается скачкообразное увеличение активности в этой области. Число предлагаемых ВСИ исчисляется уже сотнями, причем стоимость их значительно снизилась, сделав приборы этого класса конкурентоспособными и часто более привлекательными, чем обычные приборы. Виртуальные средства измерений получили общее признание и предлагаются на рынке измерительного оборудования наравне с традиционной ИТ.

Основу концепции создания виртуальных средств измерений составляет ориентация на создание средств измерений высокого класса, максимально приспособленных к современным компьютерным технологиям и использующих последние достижения мировой электроники. Они должны быть многофункциональными приборами широкого назначения, готовыми к серийному производству, конкурентоспособными как в стране, так и за рубежом. При этом исключительно быстрые темпы развития, наблюдаемые сегодня в ВТ, программировании и различных областях электроники, обуславливают перманентную трансформацию концепции.

В настоящее время можно выделить следующие основные, в значительной степени взаимосвязанные положения концепции создания ВСИ:

- создание измерительного инструмента профессионального уровня, конкурентоспособного и пригодного к серийному выпуску;
- максимальное использование аппаратных средств компьютера;
- поиск возможностей реализации новых либо модернизации известных методов измерений и подходов к структурной организации;
- оптимизация схемотехнических решений на основе использования новейшей элементной базы;
- применение средств программируемой логики для реализации цифровых схем;
- максимальная программируемость всех узлов аппаратной части;
- широкое использование средств автоматической регулировки и калибровки;
- сокращение аналоговых средств обработки, применение цифровых датчиков;
- энергосбережение, борьба с помехами;
- использование компьютерного моделирования на всех стадиях разработки;
- применение новейших средств и технологий программирования;
- приоритетность интеллектуального наполнения программы;
- тщательная эргономическая проработка программного обеспечения.

Практическим воплощением концепции виртуальных средств измерений стала среда разработки программ *LabVIEW*. Существенным отличием этой среды программирования от большинства существующих, где используется текстоориентированные языки, является использование в ней языка графического программирования. Кроме того, в *LabVIEW* имеется большая библиотека функций и процедур, универсальных для большинства прикладных задач управления средствами измерений, сбора и обработки данных. В целом *LabVIEW* вобрала в себя наиболее перспективные подходы и решения современной технологии автоматизации измерений. Программы, созданные в среде *LabVIEW*, имеют три основные составные части: переднюю панель, блок-диаграмму и пиктограмму. Передняя (лицевая) панель виртуального инструмента (ВИ) может содержать графическое изображение кнопок, клавиш, регуляторов и других органов управления и индикации. Конструирование лицевой панели в среде *LabVIEW* сводится к составлению картинка из различных индикаторов и управляющих элементов, находящихся в меню. Управление системой осуществляется путем изменения положений переключателей, поворота ручек управления и введения значений с клавиатуры компьютера.

Блок-диаграмма представляет собой графическое решение задачи и составляется на графическом языке программирования. Затем встроенный в *LabVIEW* компилятор транслирует программу в машинный код. Функциональными блоками, выбираемыми из меню, могут быть блоки

элементарных алгебраических операций, функции сбора и анализа данных, сетевые операции и т. п.

Аппаратная составляющая виртуальных средств измерений, обеспечивающая ввод и вывод реальных сигналов измерительной информации, может реализовываться в виде встраиваемых в компьютер сменных плат или в виде внешних по отношению к компьютеру устройств. В этом случае необходимо использовать интерфейсное устройство.

Библиотека БГУИР

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 8.818–2013 ГСИ. Средства измерений и системы измерительные виртуальные. Общие положения.
2. Атамалян, Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин : учеб. пособие / Э. Г. Атамалян. – М. : Дрофа, 2005. – 415 с.
3. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – М. : издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
4. Раннев, Г. Г. Информационно-измерительная техника и электроника : учебник для вузов / Г. Г. Раннев. – М. : издательский центр «Академия», 2006. – 512 с.
5. Ширяев, В. В. Компьютерные измерительные средства (КИС) : учеб. пособие / В. В. Ширяев. – Томск : ТПУ, 2008. – 190 с.
6. Тревис, Дж. LabVIEW для всех / Дж. Тревис. – М. : Прибор Комплект, 2008. – 400 с.
7. Суранов, А. Я. LabVIEW 8.2: справочник по функциям / А. Я. Суранов. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 156 с.
8. PXI. Высокопроизводительная модульная платформа, предназначенная для создания автоматизированных и испытательных комплексов / National Instruments Россия, СНГ, Балтия [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : ni.com/russia, labview.ru.
9. Технологии National Instruments в ВЧ-приложениях / National Instruments Россия, СНГ, Балтия [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : ni.com/russia, labview.ru.
10. Кулаичев, А. П. Компьютерный контроль процессов и анализ сигналов / А. П. Кулаичев. – М. : Информатика и компьютеры, 1999. – 330 с.
11. Томпкинс, У. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / У. Томпкинс, Дж. Уэбстер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1992. – 592 с.
12. Использование виртуальных инструментов LabVIEW / Ф. П. Жарков. – М. : Солон-Р, Радио и связь, Горячая линия-Телеком, 1999. – 268 с.
13. Гультияев, А. Визуальное моделирование в среде MATLAB : учебный курс / А. Гультияев. – СПб. : Питер, 2000. – 432 с.
14. Вострокнутов, Н. Н. Цифровые измерительные устройства. Теория погрешностей, испытания, поверка / Н. Н. Вострокнутов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
15. Куликовский, К. Л. Методы и средства измерений / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
16. Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда. – М. : Мир, 1990. – 535 с.
17. Гель, П. Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс / П. Гель. – М. : ДМК Пресс, 1999. – 144 с.

18. Новиков, Ю. В. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC. Практическое пособие / Ю. В. Новиков, О. А. Калашников, С. Э. Гуляев. – М. : ЭКОМ, 1997. – 224 с.
19. Алиев, Т. М. Измерительная техника / Т. М. Алиев, А. А. Тер-Хачатуров. – М. : Высш. шк. , 1991. – 384 с.
20. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – 2-е изд. – М. : Высш. шк. , 1984. – 208 с.
21. Шумский, И. А. Виртуальная USB-лаборатория АКТАКОМ – прорыв в будущее / И. А. Шумский // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2003. – №4.
22. Суханов, Е. В. Цифровой запоминающий осциллограф АСК-3106 / Е. В. Суханов // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2003. – №4.
23. Суханов, Е. В. АСК-3105 – новый цифровой запоминающий осциллограф на базе ПК / Е. В. Суханов // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2001. – №4.
24. Генератор измерительных телевизионных сигналов / А. А. Афонский, С. А. Харченко // Контрольно-измерительные приборы и системы. Измерительные приборы на базе компьютера. – 2004. – №2.
25. Создание собственного программного обеспечения для цифрового осциллографа. / Е. В. Суханов // Контрольно-измерительные приборы и системы. Новинки измерительной техники. – 2003. – №6.
26. Уткин, А. Ю. Последовательная шина USB: что это такое? / А. Ю. Уткин // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2001. – №6.
27. Афонский, А. А. Измерения по заданной траектории в USB-лаборатории (измерительный комплекс АСК-4106) / А. А. Афонский, Е. В. Суханов // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2004. – №2.
28. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебник для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2008. – 363 с.
29. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 (30 лекций) / П. А. Бутырин [и др.] ; под ред. П. А. Бутырина. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 264 с.
30. Universal Serial Bus 3.0 Specification. Revision 1.0. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://www.usb-30.ru/interface/specification>.

Учебное издание

Гурский Александр Леонидович
Ревин Валерий Тихонович

ВИРТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Чайковская*

Корректор *Е. И. Герман*

Компьютерная правка, оригинал-макет *Е. Д. Степуть*

Подписано в печать 06.06.2016. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 30 экз. Заказ 115.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6