

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

Факультет инфокоммуникаций

Кафедра защиты информации

В. Т. Ревин

КОМПЬЮТЕРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для специальности 1-98 80 01 «Информационная безопасность»*

Минск БГУИР 2022

УДК [004.382.7+621.317](076)

ББК 32.973я73

Р32

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра радиотехники и электроники №205 учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №2 от 25.02.2021);

начальник сектора научно-исследовательского отдела законодательной
и теоретической метрологии, научно-технических программ
республиканского унитарного предприятия
«Белорусский государственный институт метрологии»
кандидат технических наук Т. К. Толочко

Ревин, В. Т.

Р32 Компьютерно-измерительные системы : учеб.-метод. пособие /
В. Т. Ревин. – Минск : БГУИР, 2022. – 84 с. : ил.
ISBN 978-985-543-642-4.

Рассматриваются основные принципы и способы построения компьютерно-измерительных систем, приводятся теоретические сведения об основах функционирования данных систем, рассматриваются устройство и принцип действия основных функциональных элементов системы.

**УДК [004.382.7+621.317](076)
ББК 32.973я73**

ISBN 978-985-543-642-4

© Ревин В. Т., 2022
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Общие сведения об информационно-измерительных и компьютерно-измерительных системах	6
1.1 Информационно-измерительные системы: основные термины и определения	6
1.2 Компьютерно-измерительные системы: основные термины и определения	10
1.3 Обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы	14
1.4 Компьютерно-измерительная система с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра	21
2 Источники измерительных сигналов	32
2.1 Цифровые измерительные генераторы низких частот	32
2.2 Структурная схема и принцип действия одноканального измерительного генератора пилообразных импульсов	33
2.3 Структурная схема и описание принципа действия одноканального синусоидального генератора	40
2.4 Структурная схема и принцип действия двухканального измерительного генератора с регулируемым фазовым сдвигом	48
3 Сбор и обработка измерительной информации	51
3.1 Мультиплексор	51
3.2 Аналого-цифровой преобразователь	58
3.3 Погрешности аналого-цифрового преобразования	60
3.4 Сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи	62
3.5 Связь цифровых компонентов измерительных каналов с компьютером	64
3.6 Метрологические характеристики аналого-цифровых и цифроаналоговых измерительных преобразователей	65
3.7 Устройство выборки-хранения	67
3.8 Программно-управляемые меры напряжения и частоты	69
3.9 Органы управления объектом исследования	73
3.10 Статистическая обработка результатов измерений в реальном масштабе времени	77
Заключение	80
Перечень сокращений	82
Список использованных источников	83

ВВЕДЕНИЕ

При подготовке специалистов в области информационной безопасности представляется весьма важным изучение классификации и основных принципов построения информационно-измерительных систем, необходимых для получения сигналов измерительной информации, преобразования, хранения и использования ее для управления процессами воздействия на измеряемый объект независимо от его назначения.

Указанные вопросы являются предметом изучения дисциплины «Информационно-измерительные системы». Современное состояние аппаратных и программных средств измерений и систем позволило выделить среди них новое направление развития – компьютерно-измерительные системы (КИС). Изучение обобщенных структурных схем и их характеристик, основных функциональных элементов КИС и вопросов обработки и хранения измерительной информации является актуальной задачей в сфере развития современной измерительной техники.

За сравнительно небольшой промежуток времени номенклатура измеряемых величин, с помощью которых требуется определять параметры объектов измерения, возросла в несколько раз. Соответственно расширилась номенклатура средств измерений, их сложность, усложнились процессы получения измерительной информации, а также методики выполнения измерений. В связи с этим в настоящее время приходится иметь дело не с отдельными процессами или процедурами измерений, а с измерительными информационными технологиями.

Следует отметить, что реализация сложных современных измерительных информационных технологий может быть осуществлена не отдельными средствами измерений, а интеллектуальными информационно-измерительными системами (ИИС), которые обеспечивают комплексные одновременные измерения различных величин или параметров объектов измерений и осуществляют совместную математическую обработку полученных результатов измерений.

Разновидностью ИИС в настоящее время являются компьютерно-измерительные системы (КИС), которые являются следующим этапом развития информационно-измерительных систем и представляют собой совокупность различных виртуальных средств измерений и систем.

Метрологическое обеспечение КИС в этом случае должно гарантировать с определенной доверительной вероятностью достоверность результатов измерений как измерительных каналов систем, так и их измерительных компонентов, а также системы в целом.

В соответствии с тем что выделение и получение КИС первичной измерительной информации обеспечивается средствами измерений (датчиками, измерительными преобразователями), материал данного учебно-методического пособия ориентирован на ознакомление с фундаментальными основами

процессов получения и обработки измерительной информации, изучение цифровых средств измерений и на их метрологическое обеспечение.

В учебно-методическом пособии кратко рассматриваются отдельные измерительные компоненты КИС: датчики измеряемых величин, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, мультиплексоры. Также приводятся сведения о методах компоновки КИС, выборе предпочтительного вида аналогового сигнала, обеспечении помехоустойчивости, прогнозировании инструментальной погрешности, нормировании характеристик погрешности измерительных каналов и методах их экспериментальных испытаний.

Материал о компоновке КИС излагается в свете экономически обоснованного метода комплектования систем из унифицированных встраиваемых модулей, в том числе персонального компьютера, объединенных в специфические стандартизованные модули, оснащенные средствами обмена информацией – общей шиной или объединительной платой.

Программы и программные модули, входящие в состав программного обеспечения (ПО) КИС, выполняют функции сбора, обработки, хранения и представления измерительной информации в визуальной форме как метрологически значимое программное обеспечение.

Ввиду того, что программное обеспечение напрямую определяет алгоритм функционирования соответствующей КИС, он должен быть защищен от любых санкционированных и несанкционированных воздействий. Особую роль защита информации в КИС играет при расследовании причин сбоев и катастроф, возникающих на объектах, где такие системы применяются для мониторинга объекта или для управления технологическими процессами. Организация разработки и испытания разработанных средств такой защиты также описаны в данном учебно-методическом пособии.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И КОМПЬЮТЕРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

1.1 Информационно-измерительные системы: основные термины и определения

Измерительная система (ИС) – это совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов измерительной системы), функционирующих как единое целое [1], предназначенная для:

- получения измерительной информации о состоянии объекта измерения с помощью измерительных преобразований в зависимости от изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние;

- регистрации и индикации результатов измерений и результатов их компьютерной обработки;

- преобразования полученных значений физических величин в выходные сигналы системы для их последующей индикации, документирования и хранения.

Средства измерений, входящие в состав измерительной системы, предназначены для измерения физических величин, параметров и характеристик, которыми характеризуется исследуемый объект измерений.

При этом под средством измерений понимается 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.

Совокупность средств измерений, входящих в измерительную систему, в зависимости от назначения может быть разбита на три достаточно большие группы [4]:

- 1) средства измерений параметров и характеристик электрических сигналов (вольтметры, амперметры, осциллографы, анализаторы спектра, измерители частоты и временных интервалов и т. д.);

- 2) средства измерений параметров и характеристик цепей (измерители сопротивлений, емкостей, индуктивностей, ослаблений, фазовых сдвигов, характеристикиографы и т. д.);

- 3) средства измерений для генерации измерительных сигналов – источники измерительных сигналов или измерительные генераторы.

Разновидностью измерительной системы является измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), определяемый как функционально объединенная совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи. Измерительно-вычислительный комплекс

является как самостоятельным средством измерений, так и создает основу для построения более сложной системы – информационно-измерительной системы (ИИС), которая определяется как совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки в целях представления потребителю в требуемом виде либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации [2].

Известны два основных способа построения информационно-измерительной системы.

Первый способ основан на агрегатировании в одну систему персонального компьютера и специально для этой системы созданных измерительных и аппаратных средств, объединяемых выбранным стандартным интерфейсом.

Второй способ основан на агрегатировании в одну систему автономных средств измерений и персонального компьютера на основе стандартизации требований к системной совместимости средств измерений и применения стандартных интерфейсов.

Обобщенная структурная схема информационно-измерительной системы приведена на рисунке 1.1.

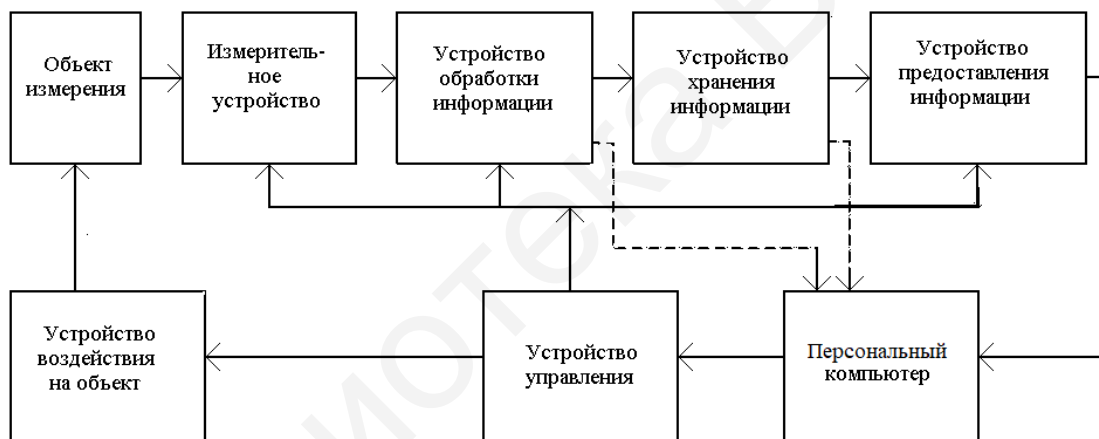


Рисунок 1.1 – Обобщенная структурная схема информационно-измерительной системы

Элементы ИИС:

- измерительное устройство – это первичные измерительные преобразователи, которые воспринимают различные физические величины в зависимости от эффекта, положенного в основу их работы, и преобразуют их в электрические сигналы. По существу измерительное устройство выполняет измерительные операции, позволяющие получить необходимую измерительную информацию. Измерительные операции – реализация одного из методов сравнения, дискретизация сигнала во времени, квантование по уровню и цифровое кодирование. В состав измерительного устройства может входить и коммутатор аналоговых сигналов, обеспечивающий поочередное подключение измерительных преобразователей к системе;

- устройство обработки измерительной информации предназначено для выполнения математической обработки измерительной информации по заданной программе;

- устройство хранения информации – это электронное постоянное или оперативное запоминающие устройства;

- устройство предоставления информации состоит из декодирующих, регистрирующих или индикаторных устройств;

- устройство управления обеспечивает выполнение заданного алгоритма функционирования системы, воздействия на объект измерения.

В реальных информационно-измерительных системах некоторые устройства могут отсутствовать или добавляться новые при расширении функциональных возможностей системы.

Внешний вид достаточно сложной информационно-измерительной системы (ИИС) приведен на рисунке 1.2.

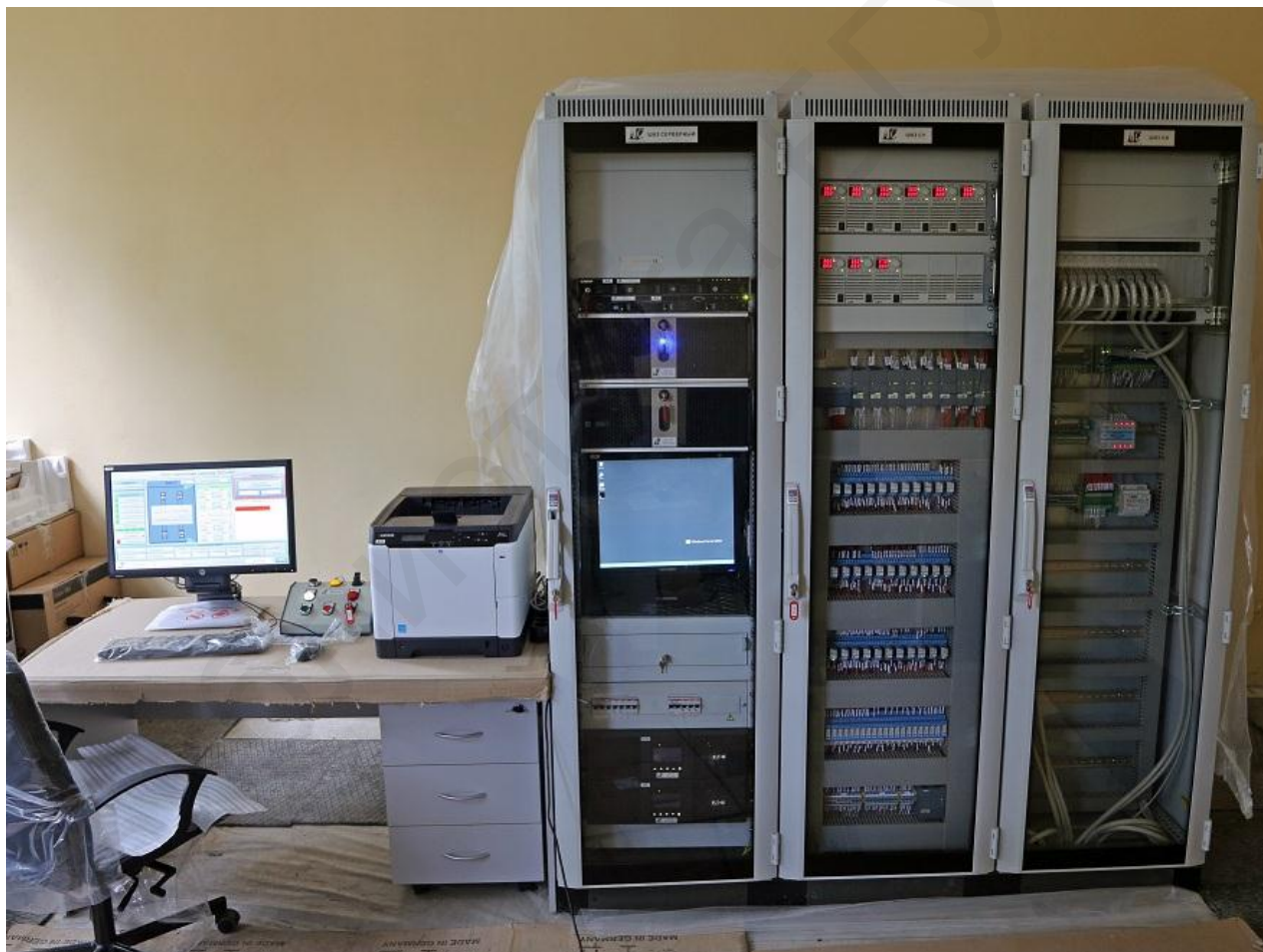


Рисунок 1.2 – Внешний вид оборудования, включенного в сложную информационно-измерительную систему

Из определения ИИС следует, что в ней объединяются технические средства, начиная от измерительных преобразователей (датчиков), АЦП, каналов передачи и заканчивая устройствами визуализации и документирования

информации. В состав ИИС включаются также средства вычислительной техники с алгоритмическим и программным обеспечением, которые обеспечивают управление работой системы, управление измерительным экспериментом, решение измерительных и вычислительных задач.

Первый шаг к объединению средств измерений с персональным компьютером был сделан, когда специалисты в области разработки и изготовления измерительной техники стали создавать функциональные платы, встраиваемые в персональный компьютер, с соответствующим программным обеспечением. В этом случае персональный компьютер, помимо выполнения своих основных функций, начал выполнять функции цифровых измерительных приборов: вольтметра, частотомера, генератора измерительных сигналов, осциллографа, анализатора спектра и других измерительных приборов. При этом для проведения измерений привлекались ресурсы вычислительной техники при минимальных схемотехнических затратах.

Идея использовать персональный компьютер как устройство управления средством измерения позволило разработчикам создавать сложные приборы и системы, требующие для получения результата измерения обработки больших массивов измерительной информации, например, цифровые осциллографы, измерители коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН), анализаторы спектра сигналов, управляющие системы.

Средства измерений, функционирующие только при наличии персонального компьютера, стали называть «виртуальные приборы», как например, «виртуальная реальность», а средства измерения получили название виртуальных средств измерения (ВСИ).

Создание информационно-измерительных систем исторически предопределило появление виртуальных средств измерений (ВСИ) (*virtual measuring instrument*) и виртуальных измерительных систем (ВИС) (*virtual measuring system*).

ВСИ – 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 [1].

ВИС – 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].

В настоящее время подавляющее большинство современных средств измерений построено по принципу открытого интерфейса и позволяет использовать в своем составе все элементы стандартного персонального компьютера (материнскую плату, жесткий диск, клавиатуры, мышь и пр.) и операционную среду *Windows* (или любую другую). По сути эти системы также

являются виртуальными системами, но представляют собой измерительную систему, объединенную с персональным компьютером.

1.2 Компьютерно-измерительные системы: основные термины и определения

В отличие от ИИС, в основу создания которых положен метод «восходящего» проектирования (новые функции обеспечиваются новыми аппаратными и программными модулями), архитектура КИС является результатом «нисходящего» проектирования – изменяется алгоритм функционирования системы и загружается соответствующее программное обеспечение. Аппаратная часть системы остается практически неизменной.

В последнее время происходит стирание различий между «реальными» и «виртуальными» приборами. Практически любое средство измерения (преобразователь, прибор, система) может быть подключено к персональному компьютеру с помощью соответствующего интерфейса и имеет свое собственное программное обеспечение (ПО), загружаемое в персональный компьютер. В этом случае оператор имеет возможность управлять средством измерения с помощью персонального компьютера, получать, хранить и обрабатывать результаты измерений, что превращает реальный прибор в виртуальную часть «виртуального» прибора. При использовании программного обеспечения соответствующего интерфейса (протокола обмена информацией) в средствах измерения появляется возможность не устанавливать данное ПО в компьютер, поскольку ПО для связи уже установлено в самом средстве измерений. При подключении такого прибора к компьютеру по локальной сети полноценное управление прибором происходит через соответствующий браузер, который использует ваш компьютер.

Например, стандарт *LXI* (*LAN eXtensions for Instrumentation* – расширение *LAN* для проведения измерений) выбран разработчиками в качестве основы для разработки стандартов *VXI* и *PXI* для информационно-измерительных систем. Применение стандарта *LXI* позволяет увеличить скорость обмена информацией данных систем, уменьшить их стоимость, геометрические размеры, а также повысить эффективность проведения работ по разработке и настройке компьютерно-измерительных систем.

По истечении определенного промежутка времени выражение «компьютерно-измерительная система» приобрело новый смысл и в данный момент более корректное наименование таких систем – «совокупность функционально объединенных виртуальных средств измерений на базе персональных компьютеров».

На наш взгляд, это обстоятельство позволило выделить в отдельный вид средств измерений компьютерно-измерительную систему, под которой будем понимать совокупность функционально объединенных виртуальных средств измерений, реализованных на основе персонального компьютера с применением

программных и технических средств с целью автоматизации процесса измерений нескольких физических величин при различных воздействиях на объект измерения.

Архитектура построения КИС, как и любой другой системы, может быть параллельной и последовательной.

Параллельная архитектура построения КИС предполагает наличие параллельных каналов измерения и управления, каждый из которых имеет аналоговые элементы преобразования анализируемых сигналов с последующим преобразованием их в цифровые коды. Алгоритм работы системы предполагает режим коммутации цифровых измерительных сигналов. Подобный принцип построения КИС позволяет проводить отладку измерительных каналов независимо друг от друга.

КИС с *последовательной архитектурой* построения измерительных и информационных каналов системы преобразует аналоговые сигналы от измерительных преобразователей, обрабатывает их в последовательном режиме, т. е. путем передачи измерительной информации от преобразователя к преобразователю. Поэтому вся аппаратная часть системы может быть подключена к соответствующим слотам системной платы компьютера. Достоинства такой архитектуры построения КИС заключаются в том, что благодаря использованию принципа разделения обработки по времени стоимость системы невелика.

Реализация КИС:

1. «От средства измерения» (рисунок 1.3) – фактически конструктивно обособленное СИ, включающее в себя персональный компьютер, конструктивно и программно встроенный в состав СИ, и связанный с ним простыми стандартными средствами передачи информации.



Рисунок 1.3 – КИС как СИ со встроенным ПК

Могут также использоваться персональные компьютеры в промышленном исполнении, имеющие в своем составе встроенные измерительные устройства и блоки.

Компьютерно-измерительные системы в этом случае создаются на основе стандартного интерфейса, с помощью которого виртуальные средства измерений различного назначения объединяются в систему. Другими словами, реализация обмена цифровыми кодированными данными с компьютером – очевидный путь объединения измерительных блоков и вычислительных средств и создания системы.



Рисунок 1.4 – КИС как ПК со встроенным СИ

2. «От персонального компьютера» (рисунок 1.4) – основой системы является персональный компьютер, в состав которого конструктивно и программно встраиваются виртуальные средства измерений, выполненные в виде многослойных печатных плат, связанных с персональным компьютером с помощью системной шины, или внешние

виртуальные средства измерений и управления, связанные с компьютером с помощью соответствующих интерфейсов. Другими словами, персональный компьютер используется с различными измерительными преобразователями, выполненными в виде плат ввода/вывода информации, включаемыми в системную шину компьютера или соединенными с ним простыми средствами связи.

Реализация компьютерно-измерительных систем осуществляется при значительно меньших аппаратных затратах и затратах на программирование, поскольку в этом случае реализуются возможности:

- использования стандартных программ, позволяющих решать прикладные задачи измерений, исследования и обработки сигналов, опрос измерительных преобразователей, управление различными средствами воздействия на объект измерения;
- использования графического интерфейса, обеспечивающего диалоговый режим работы оператора и системы (система спрашивает – оператор отвечает), направленный на более быстрое освоение оператора взаимодействия с системой;
- использования внутренней и внешней памяти большой емкости, на которые можно записать системное меню, включающее подробное руководство по эксплуатации;
- написания и компилирования стандартных и пользовательских блоков компьютерных программ для решения конкретных измерительных и математических задач;
- использования различных устройств для записи информации в базы данных и документирования результатов измерений;
- обмена измерительной и вычислительной информацией, передачи данных измерений по компьютерным сетям (например, по сети *Internet*).

В перечень основных конструктивных и электронных элементов компьютерно-измерительной системы, реализованной с применением технологии многослойных печатных плат, входят:

- стандартный интерфейс *PCI*;
- разъемы для ввода аналоговых измерительных сигналов. Подключение источника сигнала к КИС может быть изолированным от корпуса, дифференциальным или специализированным для определенного типа преобразователей (например, термоэлектрических преобразователей (термопар));

- измерительные операционные усилители аналоговых сигналов;
- полосовые или специальные фильтры, способствующие ослаблению влияния шумовых сигналов, наводок и помех;
- измерительные преобразователи для преобразования аналоговых сигналов в цифровые коды и наоборот;
- преобразователи значений переменных напряжений, например, пиковые, среднеквадратичные детекторы ВЧ сигналов;
- функциональные корректоры характеристик измерительных преобразователей;
- коммутаторы аналоговых (мультиплексоры) и цифровых (логические интегральные схемы) сигналов;
- коаксиальные разъемы для питания измерительных преобразователей;
- программно-управляемые меры напряжений и частоты;
- цифроаналоговые преобразователи для генерации управляющих и тестовых сигналов;
- цифровые разъемы ввода/вывода для вывода цифровых сигналов и ввода цифровой измерительной информации;
- генераторы тактовых импульсов, обеспечивающие выработку сигналов для измерения временных интервалов и синхронизации работы блоков;
- микропроцессоры или микропроцессорные системы для алгоритмической и математической обработки преобразованных сигналов прямо на плате. Их использование позволяет повысить быстродействие КИС за счет разгрузки основного процессора компьютера и применяется для работы с сигналами в реальном масштабе времени.

В процессе эксплуатации как объект измерения, так и сами средства измерений подвергаются воздействию влияющих величин, таких как температура, давление, влажность, наличие вибраций и т. д. Поэтому актуальной задачей является оценка степени влияния данных величин на характеристики объекта измерения. При этом конечный результат измерения может носить случайный характер, характеризующийся большой неопределенностью. Следовательно, можно говорить о том, что результаты последовательных измерений, изменяющихся во времени и несущих информацию о реальном объекте, являются случайным процессом, для обработки которого должны быть применены методы теории вероятностей и математической статистики, позволяющие получить интегральную оценку характеристик исследуемого объекта с любой заданной степенью достоверности.

1.3 Обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы

Обобщенная структурная схема КИС, объединяющая как последовательную, так и параллельную архитектуру построения систем, представлена на рисунке 1.5. Взаимодействие между отдельными элементами КИС осуществляется с помощью шинных формирователей внутренней шины персонального компьютера, к которой наряду с его внешними устройствами (дисплей, внешняя память, принтер) подключены и измерительные элементы, и отдельные функциональные схемы, в состав которых входят коммутатор аналоговых сигналов, АЦП, ЦАП и блок программно-управляемых мер напряжения и частоты.

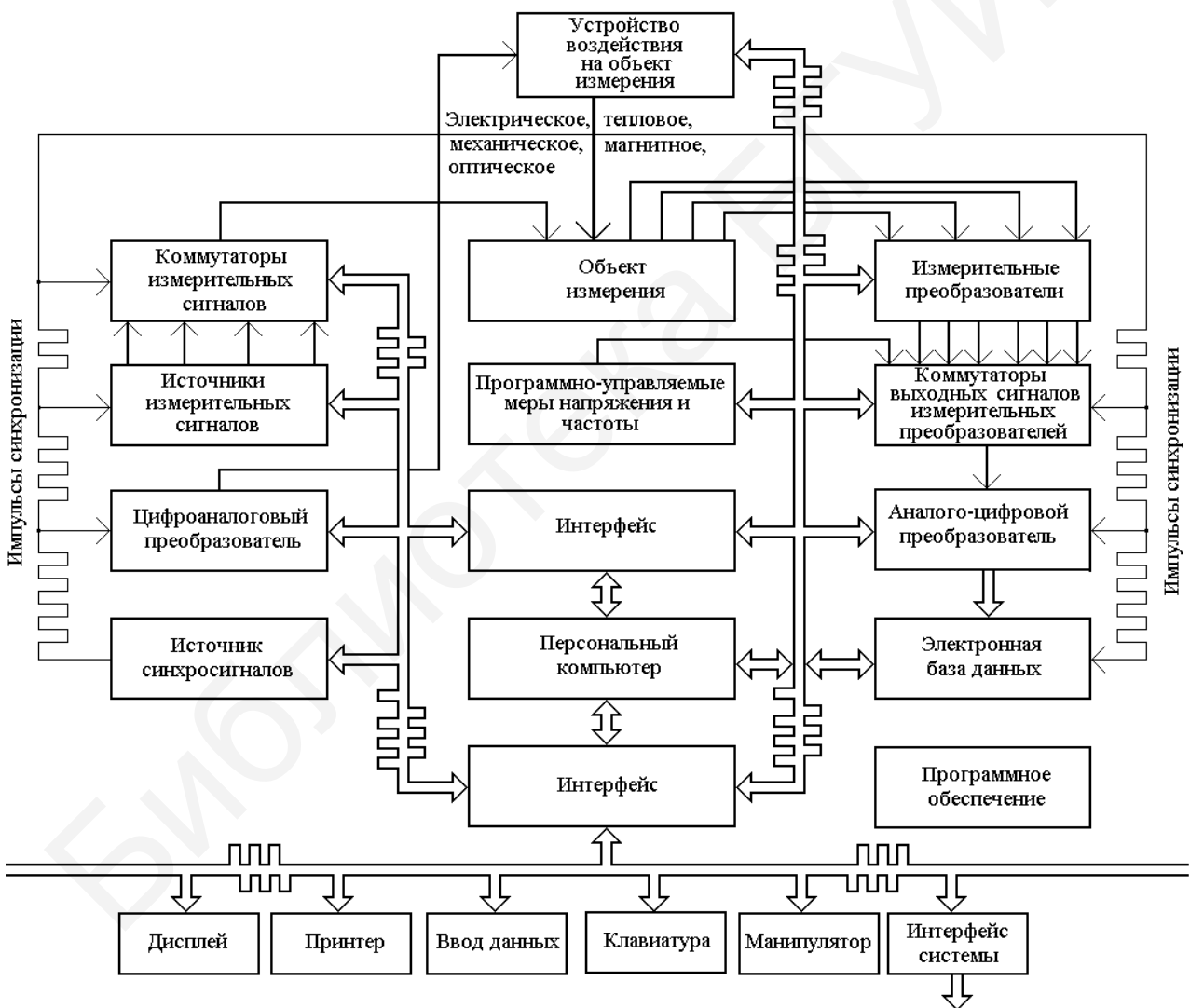


Рисунок 1.5 – Обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы

Основным функциональным элементом обобщенной структурной схемы является объект измерения, на который может оказываться воздействие как с

помощью влияющих величин (электрических, тепловых, механических, магнитных, оптических и т. п.), так и с помощью источников измерительных сигналов (измерительных генераторов).

Объектом измерений может быть любой физический элемент (например, манометр, двигатель внутреннего сгорания), явление (например, фазовый переход в веществе) или устройство (например, средство измерений физической величины). Свойства объекта измерений описываются количественно с помощью физических величин. К ним, в частности, относятся давление, температура и состав выхлопных газов, температура фазового перехода, метрологические характеристики средства измерений.

Измеряемые величины воспринимаются измерительными преобразователями (датчиками), с выходов которых электрические сигналы поступают на коммутатор. Строго говоря, коммутатор не является обязательным в обобщенной структурной схеме измерения, однако он позволяет повысить коэффициент использования измерительной системы при многоканальных измерениях. Опрос выходных сигналов преобразователей может быть циклическим (измеряемые параметры однородны и стационарны), программным (сигналы стационарны, но неоднородны по спектру) или адаптивным (сигналы нестационарны). Это обеспечивается соответствующим алгоритмом функционирования системы и реализуется с помощью блока управления программного обеспечения.

Электрический сигнал с выбранного коммутатором преобразователя преобразуется в цифровой код в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), который реализует один из известных методов аналого-цифрового преобразования – времяимпульсный, частотно-импульсный либо кодоимпульсный, реализующий способы следящего или поразрядного уравнивания.

АЦП стал практически постоянным элементом в компьютерно-измерительных системах различного назначения, поскольку упрощает реализацию последующих алгоритмов обработки, хранения и визуализации информации.

Сопряжение АЦП с персональным компьютером обеспечивается с помощью интерфейса *PCI* или *PXI*. В современных КИС данное сопряжение может обеспечиваться с помощью специального микропроцессорного устройства, что значительно повышает алгоритмические возможности систем.

Далее измерительная информация при необходимости может подвергаться математической или информационной обработке по заданному алгоритму в центральном процессоре персонального компьютера и представляться оператору в графической, цифровой или текстовой форме на экране дисплея или отпечатанной на бумаге с помощью принтера.

Следующим важным элементом системы является электронная база данных, представляющая собой поименованную совокупность данных, отражающую состояние объекта измерения и его основных характеристик в

рассматриваемой области измерений. При реализации процесса измерений различных параметров или характеристик объекта измерений в зависимости от влияющей физической величины получается большой массив информации.

Предположим, что одновременно снимаются амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики полосового фильтра. Для этого необходимо обеспечить перестройку частоты источника измерительного сигнала, подаваемого на вход фильтра, при одновременной стабилизации выходного напряжения или мощности на заданном уровне. Перестройка частоты измерительного сигнала производится ступенчато. При установлении каждой частотной точки производится измерение значения частоты, а также значений выходного напряжения и фазового сдвига сигналов между выходным и входным сигналами полосового фильтра. Таким образом, в одной частотной точке имеется три значения измеренных параметров, которые обязательно нужно сохранить для того, чтобы функцию преобразования полосового фильтра в виде панорамного изображения можно было представить, как на рисунке 1.6.

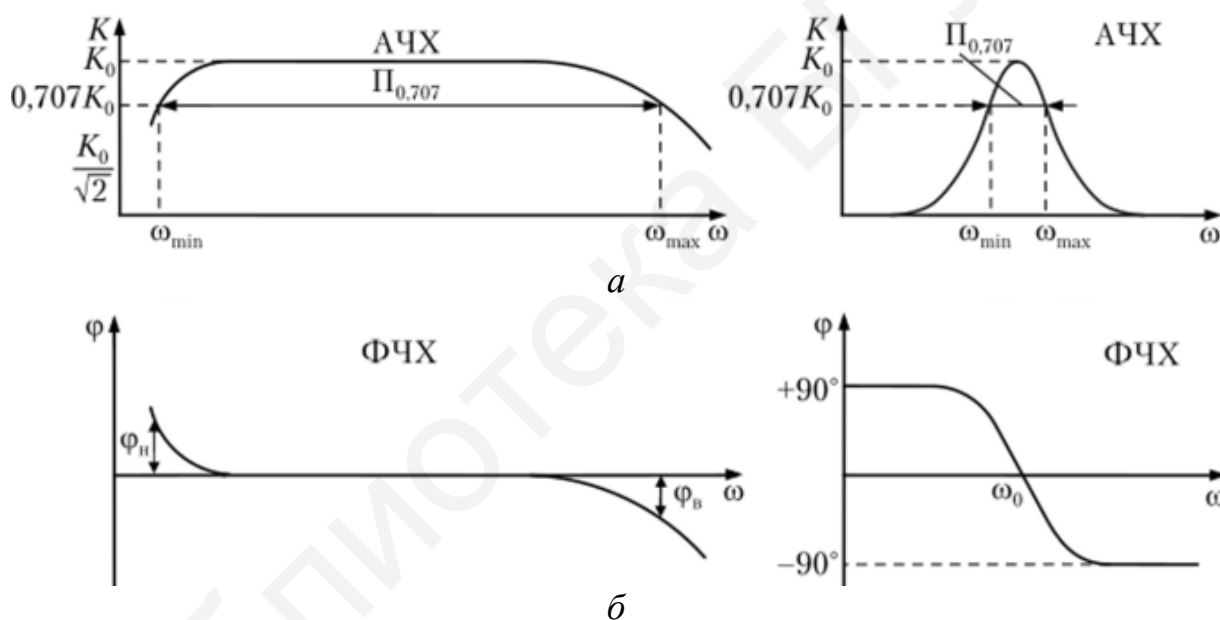


Рисунок 1.6 – Амплитудно-частотная (а) и фазово-частотная (б) характеристики полосовых фильтров

Для формирования данного панорамного изображения необходимо записать значения измеренных параметров в электронную базу данных в соответствии с определенным алгоритмом, который в последующем обеспечит извлечение требуемых данных из предметной области (таблица 1.1).

Таким образом, электронная база данных предназначена для хранения массивов результатов измерений, функциональных зависимостей или необходимой измерительной и справочной информации. Но база данных выполняет и еще одну важную функцию – защищает хранящуюся в ней информацию от несанкционированного воздействия.

Таблица 1.1 – Значения частот, напряжений и фазовых сдвигов

Наименование объекта измерения	Дата измерения	Время измерения	Значения частоты, кГц	Значения напряжения, В	Значения фазового сдвига, град
Полосовой фильтр №1	08.02.2022	15.20	0,3	0	Плюс 90
			0,7	0,2	Плюс 90
			1,0	0,4	Плюс 90
			1,3	0,707	Плюс 45
			1,7	1,0	0
			2,0	0,707	Минус 45
			2,3	0,4	Минус 90
			2,7	0,2	Минус 90
			3,0	0	Минус 90

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) используются для двух целей: представления результатов измерений в аналоговой форме с дальнейшим их преобразованием в графическую форму и преобразование команд персонального компьютера в аналоговые сигналы с целью управления объектом измерений. Канал управления позволяет активно воздействовать на объект (нагревать или охлаждать его, облучать, деформировать, перестраивать). Реакция объекта измерений на эти воздействия контролируется с помощью измерительных преобразователей.

Значения величин, воздействующих на объект измерения, и результаты этих воздействий записываются в многомерную базу данных. Такая возможность значительно обогащает измерительный эксперимент, создает условия для диалога: измерительная система спрашивает – объект измерения отвечает.

При ручных измерениях последовательность действий задается оператором. При автоматизированных измерениях последовательность действий и в целом логика эксперимента формализуется в виде программы. Программное обеспечение измерений – это машинный эквивалент «бумажных» методик ручных измерений.

Наличие персонального компьютера в эксперименте при соответствующем математическом обеспечении (дополнительно к программному обеспечению измерений) позволяет проводить еще и вычислительный эксперимент. Подробное экспериментальное обследование объекта измерений позволяет построить его модель, исследовать ее свойства численными методами (что обычно намного экономнее натурального эксперимента) и распространить выводы вычислительного эксперимента на объект измерения. Такой подход – это отражение на новой технической основе вековых отношений между теорией и экспериментом, составляющих основу научного метода познания.

При автоматическом исследовании, включающем в себя при необходимости и измерительный, и вычислительный эксперименты, все стадии

исследования выполняются в автоматическом режиме. На долю оператора в данном случае остается самая интеллектуальная часть – разработка теоретической модели, абстрагирование и обобщение.

Преимуществами компьютерно-измерительных систем являются:

- доступность персонального компьютера и простота его использования при проведении измерений различных физических величин;

- быстродействие персонального компьютера, т. к. он имеет большую емкость постоянной памяти, разрядность и объем памяти, при этом объем памяти может быть увеличен без существенных затрат;

- большой объем стандартного программного обеспечения, имеющего в своем составе операционные системы, программы управления компьютерно-измерительной системой, математические и измерительные блоки, вычислительные модули обработки цифровых данных;

- использование стандартных языков программирования высокого уровня, в том числе графического языка *LabVIEW*;

- замена одного средства измерения на другое, которое осуществляется путем изменения одного алгоритмического и программного обеспечения на другое. Например, для того чтобы перейти от измерения параметров электрических цепей с помощью векторного анализатора цепей к измерению векторных параметров электрических сигналов, необходимо всего лишь заменить одно программное обеспечение на другое;

- простота обеспечения работы компьютерно-измерительных систем в компьютерных сетях и сети Интернет. Очевидно, что все подсистемы должны быть определенным образом соединены между собой и согласованно работать по заданной логике.

КИС при этом обеспечивают:

- первичную обработку результатов измерения;

- получение результатов косвенных, совокупных и совместных измерений, в том числе в темпе поступления данных;

- управление функционированием отдельных узлов в ходе эксперимента, включая организацию запросов, очередей, установление приоритетов, диалоговый режим с оператором;

- контроль работоспособности трактов комплексов, включая контроль метрологических характеристик;

- сервисную обработку получаемой информации (представление результатов в виде таблиц, графиков и т. п.);

- хранение получаемой информации;

- выработку управляющих воздействий на исследуемый объект в виде аналоговых и дискретных кодированных сигналов.

В КИС измерительные и вычислительные средства взаимодействуют на основе единого алгоритма, обеспечивающего получение, обработку и использование измерительной информации. КИС строятся на основе

технических средств, имеющих магистрально-модульный принцип построения, что обеспечивает возможность создания КИС с перестраиваемой структурой.

Программное управление КИС осуществляется программируемым процессором, который обеспечивает реализацию алгоритма функционирования системы в соответствии с требуемой обработкой измерительной информации.

Работоспособность КИС определяет техническое, математическое и метрологическое обеспечение.

В состав **технического обеспечения** входят измерительные, вычислительные средства и вспомогательные устройства.

К *измерительным средствам* относят: аналого-цифровые и цифроаналоговые измерительные преобразователи; нормирующие, линейные, функциональные измерительные преобразователи; коммутаторы аналоговых измерительных цепей (мультиплексоры) и коммутаторы цифровых измерительных цепей, калибраторы, измерительные источники питания и т. п.

В качестве *вычислительных средств* в КИС в основном используются цифровые вычислительные устройства персональных компьютеров.

К *вспомогательным устройствам* можно отнести совокупность различных преобразователей, помогающих объединить измерительные и вычислительные средства в единое целое.

Основным содержанием **математического обеспечения** КИС являются алгоритмы функционирования системы в различных режимах работы и программное обеспечение. Алгоритмы предусматривают выполнение процедур, связанных с измерением физических величин, обработкой результатов измерения, выполнением плана эксперимента и т. п. Программное обеспечение реализуется на основе измерительных и управляющих алгоритмов, управляет файловой системой и работой вычислительных устройств, реализует инструкции методик измерений, осуществляет периодический контроль работоспособности основных элементов системы и обеспечивает взаимодействие пользователя с системой.

Метрологическое обеспечение КИС предусматривает законодательно закрепленные процедуры нахождения оценок метрологических характеристик отдельных измерительных каналов и всей системы, элементов и узлов, их самопроверки на основе соответствующих алгоритмов и программ.

В метрологическое обеспечение входят:

- теория метрологии, связанная с расчетом, контролем метрологических характеристик и проведением испытаний средств измерений (СИ);
- образцовые СИ, предназначенные для проведения поверки, контроля метрологических характеристик и испытания СИ;
- нормативные документы: государственные и отраслевые стандарты, руководящие технические материалы и методические указания, определяющие законодательные процедуры расчета, поверки и контроля метрологических характеристик и испытаний СИ, обеспечивающие единство измерений.

Системная совместимость. Основой создания любого радиотехнического устройства (в том числе и системы) является системная совместимость всех функциональных элементов, входящих в его состав. Основными категориями совместимости являются:

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

- *метрологическая*, которая предусматривает унификацию метрологических характеристик всех средств измерений, которые используются в системе и обеспечивающие получение количественной оценки достоверности выполняемых измерений;

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

- *конструктивная*, предусматривающая унификацию используемых измерительных средств, систем и модулей, выполненных по стандартизированным параметрам, стандартизацию их конструктивных параметров, а также условий их механического сопряжения;

- *эксплуатационная*, обеспечиваемая за счет унификации и нормирования типов соединительных разъемов, используемых коаксиальных кабелей, источников основных и вторичных питающих напряжений и токов, условий окружающей среды, надежности и т. п.

Информационная и конструктивная совместимость всех блоков комплекса достигается за счет использования стандартных интерфейсов. Существуют два способа реализации названной совместимости в КИС. При первом способе для всего комплекса используется единый интерфейс компьютера, входящий в состав ИВК, а при втором – для согласования измерительной и вычислительной аппаратуры комплекса используется специальный интерфейс, имеющий свой блок управления (контроллер).

Преимущественное распространение получил *магистрально-модульный принцип* организации измерительных, вычислительных и управляющих узлов автоматической системы. Архитектура «системной шины» лежит в основе системного формирования персональных компьютеров, измерительно-вычислительных комплексов и информационно-измерительных систем. Какие использовать входные и выходные разъемы, виды и алгоритмы связи процессора с периферийными устройствами, уровни аналоговых и логических сигналов, способы их синхронизации – все это вопрос соглашения. Поэтому при разработке компьютерно-измерительной системы важно определить уровень стандартизации, потому что излишняя конкретизация будет создавать препятствия для ее дальнейшего развития, а излишняя общность усложнит ее.

Основными общесистемными требованиями к КИС являются:

- способность к развитию;
- «открытость».

Способность КИС к развитию – это возможность наращивания комплекса новыми модулями или замена одних модулей на другие для расширения функций ИВК или их изменения.

«Открытость» – свободное взаимодействие КИС с другими системами аналогичного назначения, а также совместимость «снизу вверх» при использовании КИС в качестве автоматических рабочих мест (АРМ) в многоуровневых измерительных и информационных системах. Магистрально-модульный принцип построения КИС (магистраль – шина, модули – узлы системы) в наилучшей степени отвечает этим двум требованиям, удачно сочетая возможность абстрактного описания на системном уровне с более конкретным описанием на уровне подсистем, поддающимся стандартизации по конструктивным элементам, связям, логике. Архитектура и программное обеспечение КИС определяются в основном архитектурой и программным обеспечением входящего в состав КИС персонального компьютера.

1.4 Компьютерно-измерительная система с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра

На рисунке 1.7 представлена подробная структурная схема КИС для исследования осциллограмм и спектров сигналов. В данной КИС 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 на персональный компьютер осуществляет плата ввода-вывода *National Instruments PCI-6251*, которая является высокоскоростной многофункциональной платой сбора данных серии *M* производства компании *National Instruments*. Плата способна осуществлять аналого-цифровое преобразование сигналов, поступающих с 16-ти входных каналов, выполнять цифроаналоговое преобразование для генерации сигналов любой формы, воспринимать сигналы цифрового ввода и формировать сигналы цифрового вывода.

Обмен информацией между платой и компьютером осуществляется с помощью интерфейса 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 персонального компьютера.

Исследуемый сигнал поступает на один из 16-ти аналоговых вводов платы через соединительный блок, при этом сигнальный проводник источника подключается к одному из разъемов *AI*, а корпусный проводник – к одному из разъемов *AI GND*.

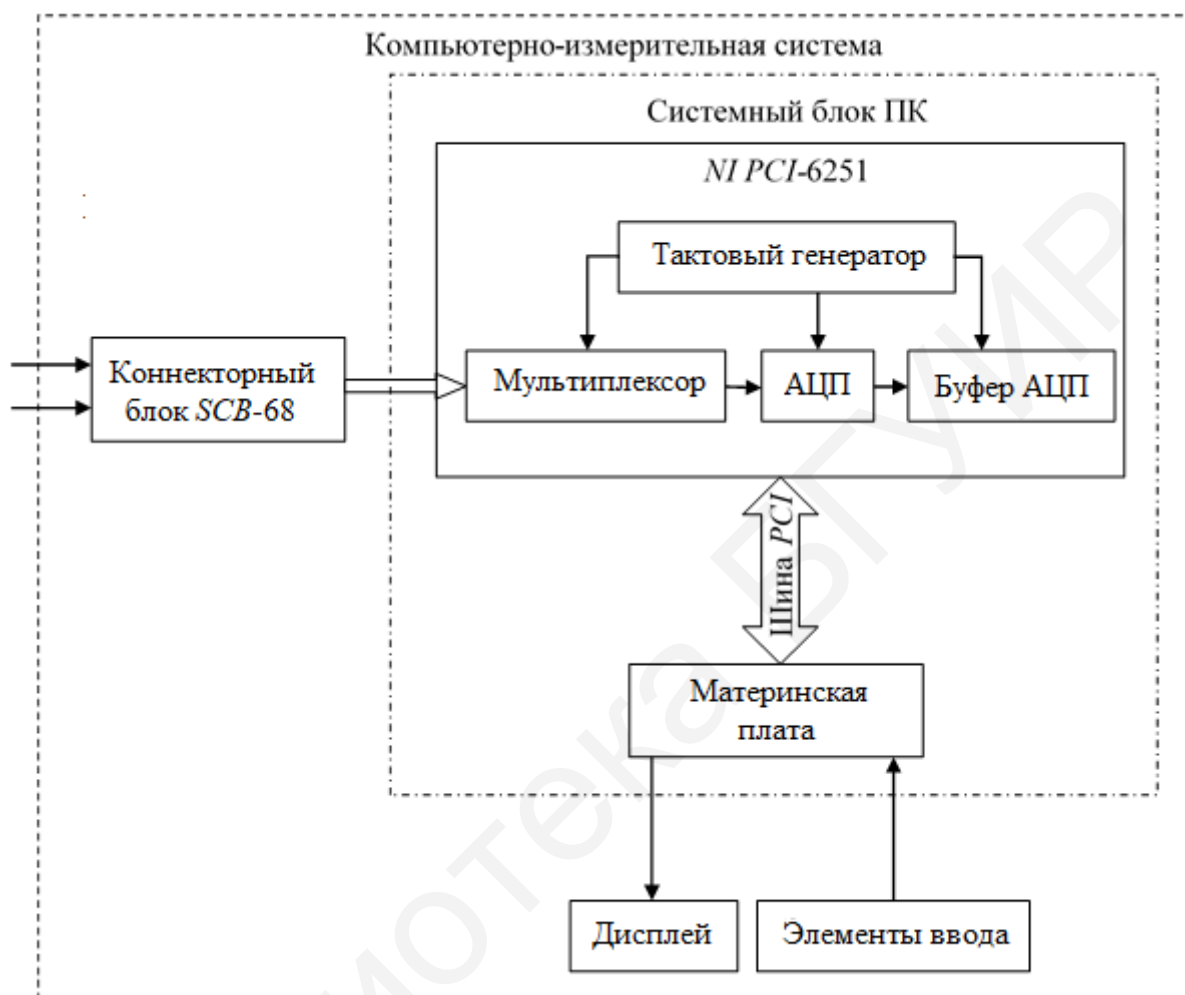


Рисунок 1.7 – Структурная схема КИС с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра

Таким образом, происходит передача исследуемых сигналов на плату сбора данных. Плата содержит один АЦП, поэтому для увеличения количества каналов аналогового ввода сигналов используется мультиплексор. Мультиплексор поочередно подает сигналы с каждого канала на АЦП через измерительный усилитель. Данный усилитель имеет программируемый коэффициент усиления. В зависимости от выбранного диапазона измерений он производит усиление или ослабление аналогового входного сигнала для обеспечения максимального разрешения АЦП. Усилитель обеспечивает также высокую точность измерения сигналов с нескольких каналов при высоких частотах дискретизации, даже если уровни сигналов малы.

АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровую форму путем преобразования аналогового напряжения в цифровой код. При этом сигнал

претерпевает квантование по уровню и дискретизацию по времени, что приводит к потере части информации. Количество уровней представления сигнала определяет разрядность АЦП. Интервал времени, между которым происходит аналого-цифровое преобразование, соответствует частоте дискретизации. 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 выборками, в то время как старые выборки высвобождаются из буфера и отправляются на ПК.

Тактовый генератор задает частоту дискретизации сигнала. Процесс преобразования аналогового напряжения в цифровой код синхронизирован с периодом повторения импульсов генератора.

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

Частота дискретизации АЦП удовлетворяет требованию технического задания и 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 (от 1 мВ до 10 В), обеспечивая низкую погрешность определения амплитуды.

Программное обеспечение для управления КИС 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.

Разработанная компьютерно-измерительная система по существу является комплексным виртуальным прибором (ВП), созданным с помощью среды графического программирования *LabVIEW*. 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. В *LabVIEW* имеется большая библиотека функций и процедур, универсальных для большинства прикладных задач управления средствами измерения, сбора и обработки данных.

Программа, разработанная в *LabVIEW*, называется и является виртуальным прибором (*Virtual Instrument*) и состоит из двух частей:

- блок-диаграммы, описывающей логику работы ВП;
- лицевой панели, описывающей внешний интерфейс ВП.

1.4.1 Графический интерфейс КИС с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра

На рисунке 1.8 представлен графический интерфейс компьютерно-измерительной системы, которая обеспечивает получение осциллограмм, измерения амплитудных и временных параметров и анализ спектра сигналов. Основную часть передней панели занимает графическая область для воспроизведения осциллограмм и органов управления осциллографом. Здесь расположены переключатели коэффициентов отклонения двух каналов, переключатель коэффициента развертки и органы управления синхронизацией каналов и спектральных составляющих напряжения сигнала.

По горизонтальной оси откладываются временные параметры в секундах, по вертикальной оси – напряжение в вольтах. Для более детального рассмотрения отдельных частей осциллограммы пользователь может изменять масштаб осциллограммы на экране по напряжению и времени выбором соответствующих коэффициентов отклонения и развертки.

Преобразование начинается при нажатии кнопки «Старт», остановка – кнопки «Стоп». Имеется возможность сохранения информации о полученной осциллограмме в форме двумерной таблицы (двумерного отношения) базы данных и в виде графического 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.

Рабочая область лицевой панели (см. рисунок 1.8) логически разделена на несколько частей.

Слева расположен графический индикатор с нанесенной на него координатной сеткой, где происходит формирование осциллографических изображений (осциллограмм) подаваемых на вход осциллографа аналоговых сигналов.

В верхней части графического индикатора находятся выпадающие меню выбора каналов ввода аналоговых сигналов. С их помощью осуществляется выбор входных сигналов, подключенных к каналам «А» или «В» виртуального

осциллографа (согласно подключенным источникам исследуемых сигналов к коннекторному блоку).

Возможны три варианта выбора:

- наблюдение осциллограммы сигнала, подключенного к каналу «А»;
- наблюдение осциллограммы сигнала, подключенного к каналу «В»;
- одновременное наблюдение осциллограмм сигналов, подключенных к каналам «А» и «В».

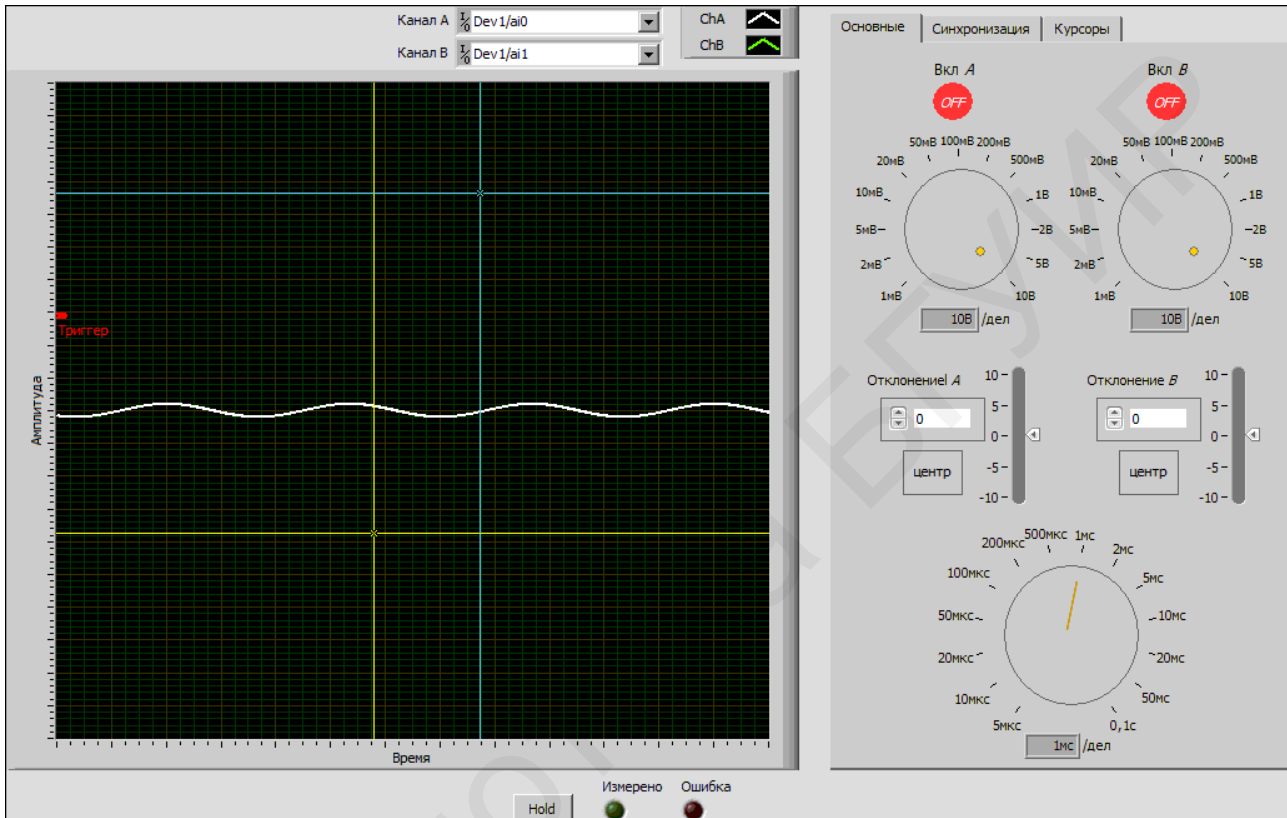


Рисунок 1.8 – Передняя панель компьютерно-измерительной системы с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра

В правой части находятся элементы управления КИС.

На вкладке «Основные» производится настройка выбранных каналов:

- 1) включение или выключение сбора данных каналов «А» или «В» осуществляется кнопками *ON/OFF*;
- 2) изменение пределов измерения и масштаба отображения сигналов на экране осуществляется с помощью элементов управления «Вольт/деление», представляющих собой ступенчатые переключатели коэффициентов отклонения каналов «А» или «В»;
- 3) изменение положения графического изображения входного сигнала по вертикали осуществляется регулятором «Отклонение» для соответствующего канала. В качестве сервисной функции используется кнопка «Центр», при

нажатию которой изображение сигнала соответствующего канала возвращается в исходное положение;

4) изменение масштаба отображения исследуемых сигналов по горизонтали (оси времени) для каналов «А» или «В» осуществляется с помощью переключателя «Сек/дел», представляющего собой ступенчатый переключатель коэффициента отклонения.

После масштабирования полученного изображения сигналов по напряжению и времени в требуемых пределах необходимо перейти на вкладку «Синхронизация» (рисунок 1.9). С помощью кнопки «Синхронизация OFF/ON» происходит включение либо выключение программной синхронизации сигнала по выбранному каналу кнопкой «Канал А/В».

Программная синхронизация в КИС устроена следующим образом: после инициализации сбора данных запись выборок в буфер АЦП не будет происходить до тех пор, пока значение сигнала не превысит определенного заданного пользователем значения сигнала. При включении функции синхронизации на графике появляется специальный маркер «Триггер», показывающий, по какому уровню происходит синхронизация.

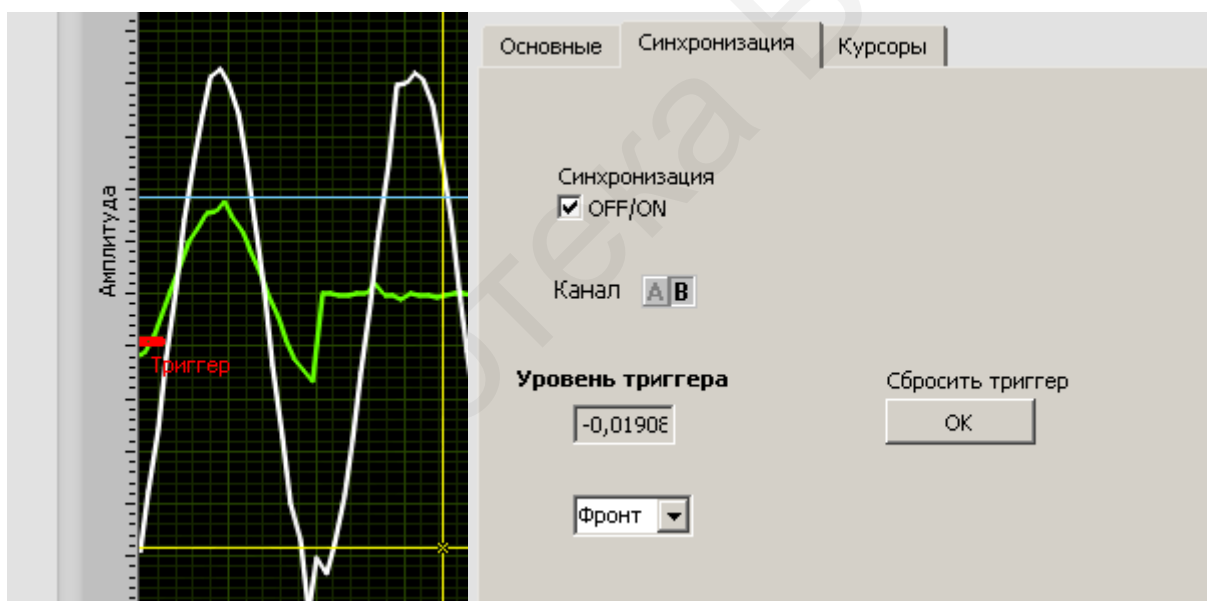


Рисунок 1.9 – Элементы управления функцией синхронизации

При переходе значений сигнала через уровень триггера начинается период измерения и последующая передача данных для обработки и отображения. Если в течение трех секунд значение сигнала не совпадет со значением триггера, то на экран будет выведено сообщение об ошибке. В этом случае необходимо переместить триггер в другое положение либо отключить функцию синхронизации, чтобы посмотреть, где находится сигнал. С помощью меню «Фронт/спад» происходит выбор режима синхронизации по фронту либо по спаду.

Вкладка «Курсоры» (рисунок 1.10) содержит ползунок, включающий определенные курсоры в области построения сигналов.

В положении «Выкл.» курсоры не отображаются. Положение «Пики» включает функцию обнаружения экстремумов на графике сигнала выше либо ниже уровня курсора.

В положении «Измерение» на экране появляется два курсора, с помощью которых осуществляется цифровой отсчет измеряемых величин. При этом оператор с помощью манипулятора «мышь» последовательно помещает перекрестия курсоров в интересующие его точки осциллограмм. Результатом измерения является разница значений двух курсоров. Измеренные значения находятся в соответствующих полях на вкладке «Измерение».

В положении ползунка «Все» на осциллограмме отображаются как курсор «Пики», так и курсоры «Измерение». В случае если курсоров не видно при соответствующем положении ползунка, необходимо нажать кнопку «Установить курсоры по центру», что переместит их в центр области графического интерфейса.

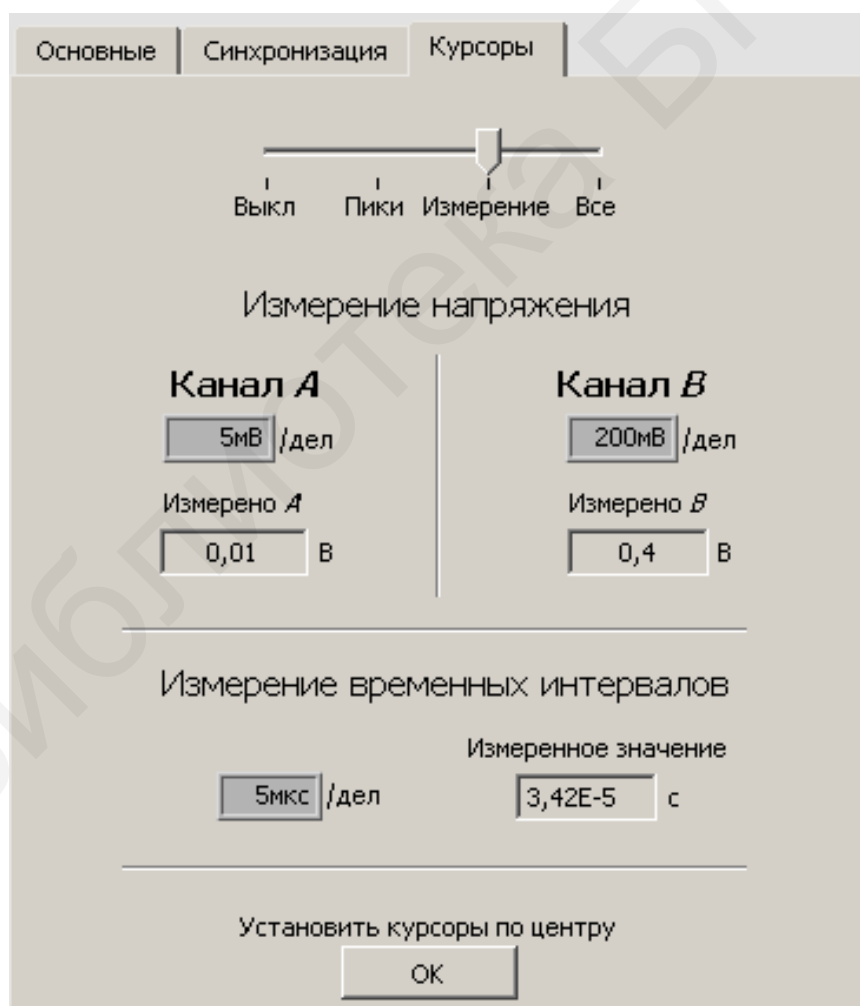


Рисунок 1.10 – Вкладка «Курсоры» программного обеспечения осциллографа и анализатора спектра

В любой момент можно вернуться на любую из вкладок и воспользоваться интересующим органом управления КИС.

Алгоритм работы КИС с функциями осциллографа представлен на рисунке 1.11.

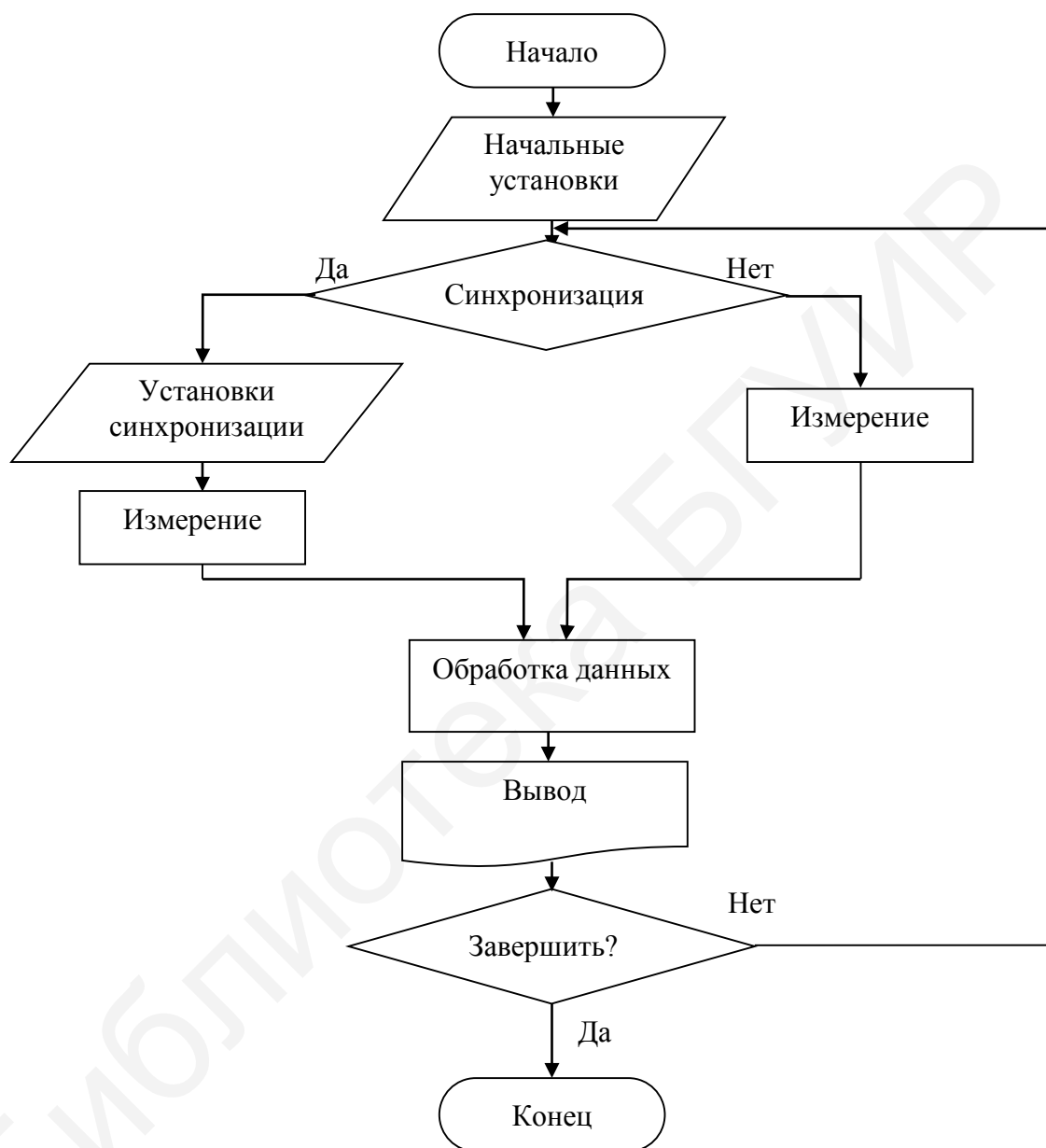


Рисунок 1.11 – Алгоритм работы КИС с функциями осциллографа

1.4.2 Программный интерфейс КИС с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра

Внешний вид программного обеспечения компьютерно-измерительной системы с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра представлен на рисунке 1.12.

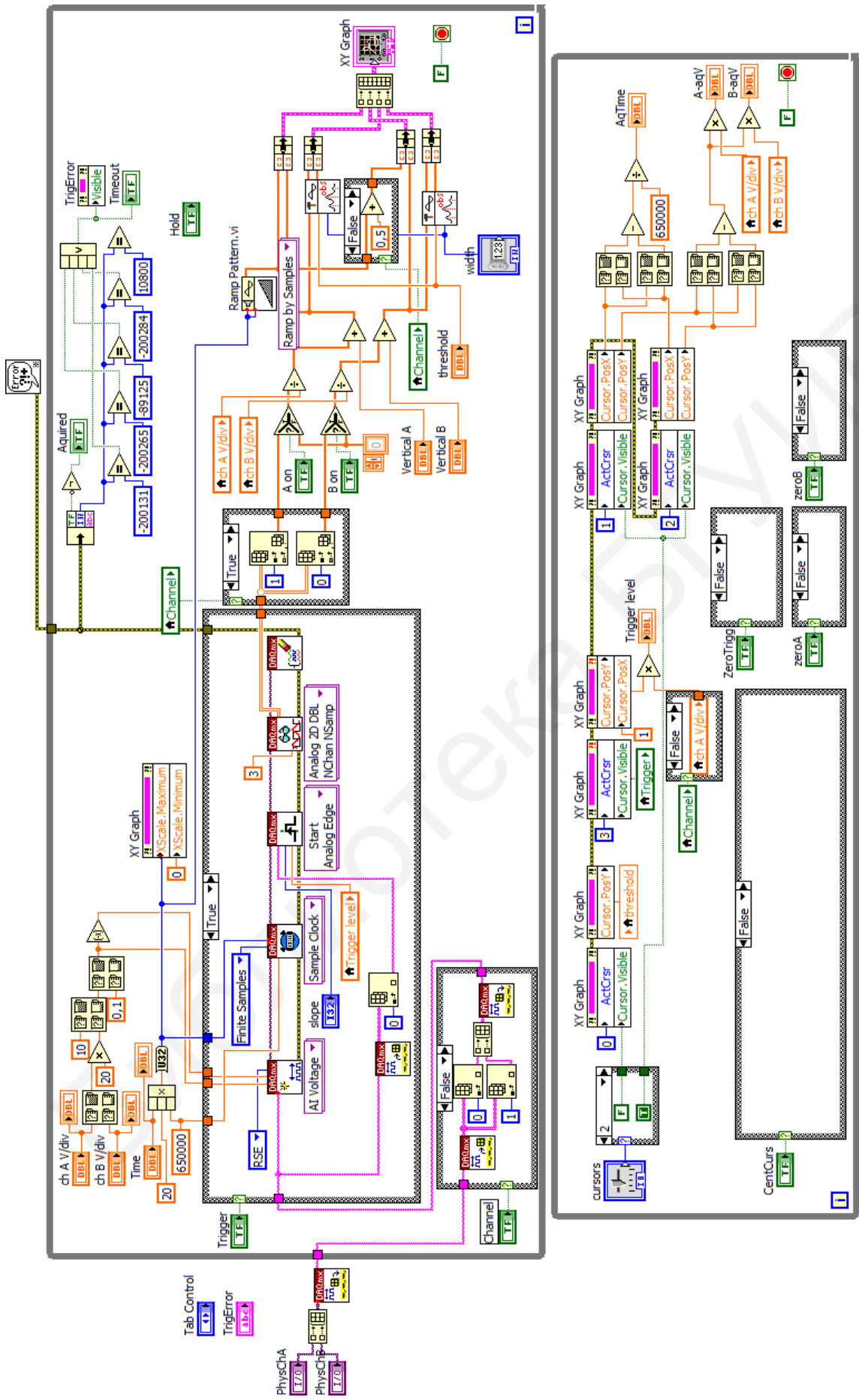


Рисунок 1.12 – Внешний вид программного обеспечения компьютерно-измерительной системы с функциями цифрового осциллографа и анализатора спектра

Исходный код программы в *LabVIEW* представляет собой блок-диаграмму (соединенные друг с другом пиктограммы элементов языка программирования – узлы, функции, циклы), которая затем компилируется в машинный код.

На рисунке 1.13 цифрами в кружочках выделены три основных элемента программного кода, выполняющие первоначальную настройку и сбор данных.

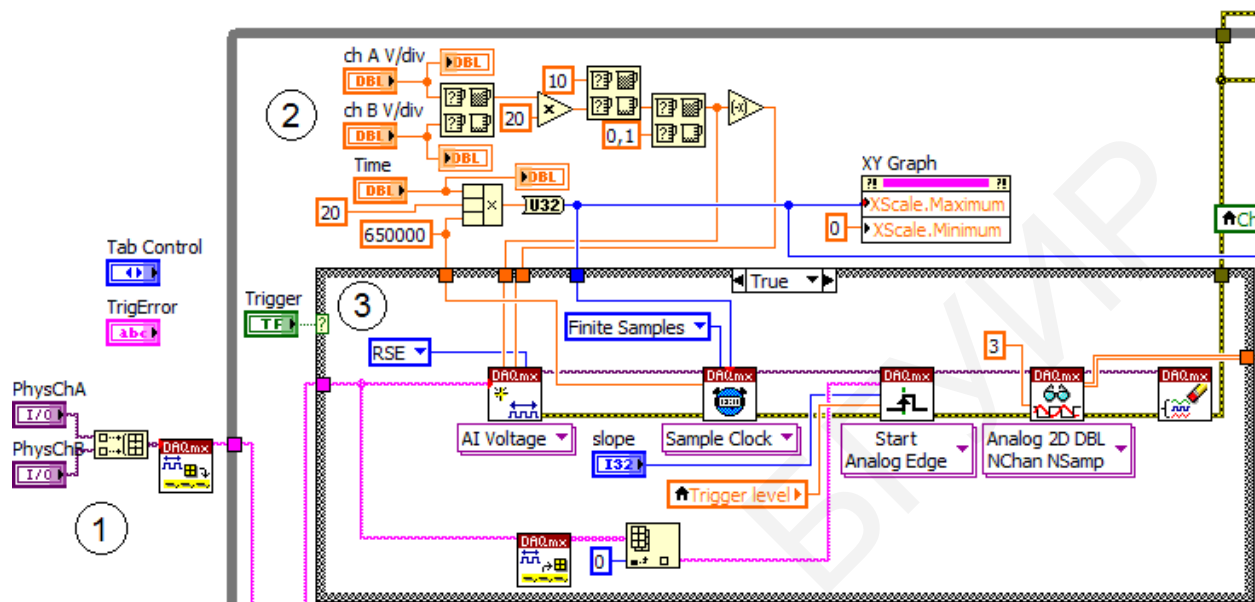


Рисунок 1.13 – Фрагмент кода программы, начальные установки и сбор данных

Во фрагменте кода, обозначенном символом ①, выполняется создание виртуальных каналов *PhysChA* и *PhysChB*, которые содержат в себе адреса физических аналоговых входов *DAQ*-устройства. Здесь же происходит компоновка виртуальных каналов в определенном порядке для последующей передачи этой информации функциям сбора данных.

Во фрагменте кода, обозначенном символом ②, производится определение диапазона напряжений входных сигналов и количества выборок на период сбора данных. Исходные значения устанавливаются пользователем КИС с помощью органов управления на вкладке «Основные». Информация о выбранных диапазонах передается далее для определения масштаба отображения полученных сигналов.

Во фрагменте кода, обозначенном символом ③, показан цикл сбора данных с программной синхронизацией по одному из каналов. Переменная «*slope*» определяет режим синхронизации изображения по фронту или по спаду синхронизирующего импульса. Переменная «*Trigger level*» связана с маркером «Триггер» на лицевой панели виртуального прибора и устанавливает уровень срабатывания триггера.

Выходными данными этого цикла является информация о возникших ошибках во время сбора данных и непосредственно массив, представляющий собой измерительные сигналы, описанные цифровыми кодами.

На рисунке 1.14 изображен программный код, позволяющий производить обработку ошибок и предотвратить незапланированное завершение программы. Его основной задачей является предоставление пользователю возможности внесения изменений в первоначальные настройки при возникновении ошибки при сборе данных или программной синхронизации.

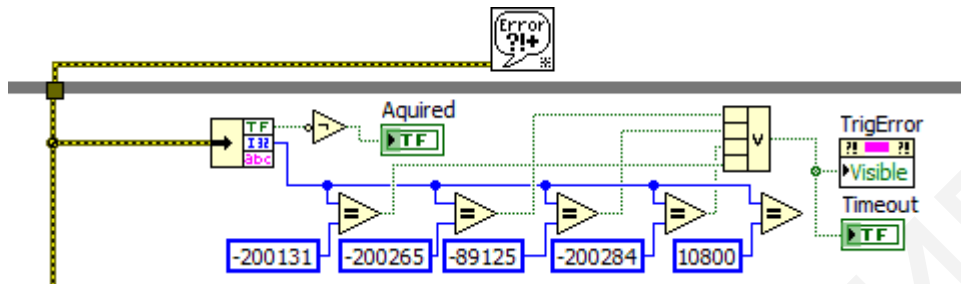


Рисунок 1.14 – Фрагмент кода программы, обработчик программных ошибок сбора данных

Параллельно основному циклу программы, в котором происходит сбор данных, обработка программных ошибок и математическая обработка оцифрованных сигналов, выполняется цикл управления курсорами.

С учетом технических характеристик используемого оборудования можно определить технические характеристики КИС.

2 ИСТОЧНИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Измерительный генератор – это источник измерительных сигналов с заранее известными параметрами, предназначенный для исследования, настройки и проверки функционирования различных радиотехнических цепей и устройств.

Измерительные генераторы отличаются от обычных и других источников сигналов возможностью нормированной установки и регулировки в широких пределах выходных параметров генерируемых сигналов (частоты, мощности или напряжения, формы и т. д.), их высокой стабильностью и наличием в их составе средств измерений для контроля этих параметров. При этом параметры выходных сигналов могут быть как фиксированными по частоте и амплитуде или мощности, так и регулируемые в определенных пределах. В необходимых случаях может быть предусмотрена перестройка выходного сигнала по частоте или напряжению в определенных временных или амплитудных диапазонах. Практически все современные источники измерительных сигналов имеют в своем составе устройства, обеспечивающие программное управление различными функциями генераторов и возможность их совместной работы с другими средствами измерений при объединении их в более сложные измерительные комплексы или системы.

2.1 Цифровые измерительные генераторы низких частот

Большинство современных измерительных генераторов базируется на цифровых технологиях и отличаются от аналоговых более высокими метрологическими характеристиками: высокими точностью установки значений частоты и напряжения (мощности) и их стабильностью, малым коэффициентом нелинейных искажений (строго синусоидальной формы), постоянством уровня установленного выходного сигнала. Цифровые генераторы удобнее аналоговых в эксплуатации: выше быстродействие, существенно проще установка требуемого значения частоты и напряжения выходного сигнала, более наглядная индикация выходных параметров генерируемых сигналов, возможность автоматической перестройки частоты по заранее разработанной или заданной программе. Действие цифровых генераторов основано на принципе формирования числового кода с последующим преобразованием его в аналоговый сигнал любой требуемой формы (в том числе и гармонический сигнал). При этом используют метод аппроксимации формы выходного колебания.

Простым примером может служить виртуальный генератор сигналов, имеющий реальные электрический выход и входы, обеспечивающие внутреннюю и внешнюю синхронизацию, а также органы управления, которые по своему функциональному назначению аналогичны элементам управления на передней панели обычного генератора. Выходные электрические сигналы

(гармонический, пилообразный, прямоугольный, случайный и т. д.) формируются цифроаналоговым преобразователем (ЦАП). Генерация сигналов различной формы осуществляется программно-математическими методами.

Важными параметрами сигналов, генерируемых цифровыми измерительными генераторами, являются частоты дискретизации и уровни квантования.

Частота дискретизации определяет частоту и достоверность выходного сигнала. В соответствии с теоремой Котельникова частота дискретизации должна не менее чем в два раза превышать частоту самой высокой спектральной составляющей генерируемого сигнала для точной передачи формы сигнала.

Например, для генерации синусоидального сигнала частотой 1 МГц нужно обеспечить дискретизацию с частотой более 2 мегавыборок в секунду, т. е. частота тактового генератора должна быть 2 МГц. Хотя на эту теорему чаще ссылаются при выработке рекомендаций по захвату сигналов, например, для осциллографов ее применимость к генераторам сигналов совершенно очевидна: для точного воспроизведения мелких деталей генерируемого сигнала сохраненные сигналы должны состоять из достаточного числа дискретных точек.

Уровни квантования определяют амплитудные значения генерируемых колебаний, выраженных в цифровых кодах, т. е. разрешение сигнала по вертикальной оси. При этом большее число битов соответствует большему разрешению по амплитуде. Измерительный генератор с разрешением 10 битов разбивает весь диапазон выходного напряжения на 1024 ступени. Если, например, такой генератор имеет полный размах выходного напряжения, равного 5 В, то интервал квантования будет соответствовать шагу примерно в 4,9 мВ – минимальное приращение, обеспечиваемое измерительным генератором без дополнительных аттенуаторов и при отсутствии других ограничивающих факторов архитектуры, таких как коэффициент усиления и смещение выходного усилителя.

2.2 Структурная схема и принцип действия одноканального измерительного генератора пилообразных импульсов

Обобщенная структурная схема простейшего цифрового генератора пилообразных импульсов приведена на рисунке 2.1. В его состав входит кварцевый генератор, служащий для формирования высокостабильного синусоидального сигнала, и является по существу задающим генератором, определяющим частоту генерирования импульсов выходного сигнала цифрового генератора. Формирующее устройство обеспечивает преобразование синусоидального сигнала кварцевого генератора в последовательность коротких тактовых импульсов, период повторения которых T_0 равен периоду сигнала кварцевого генератора.

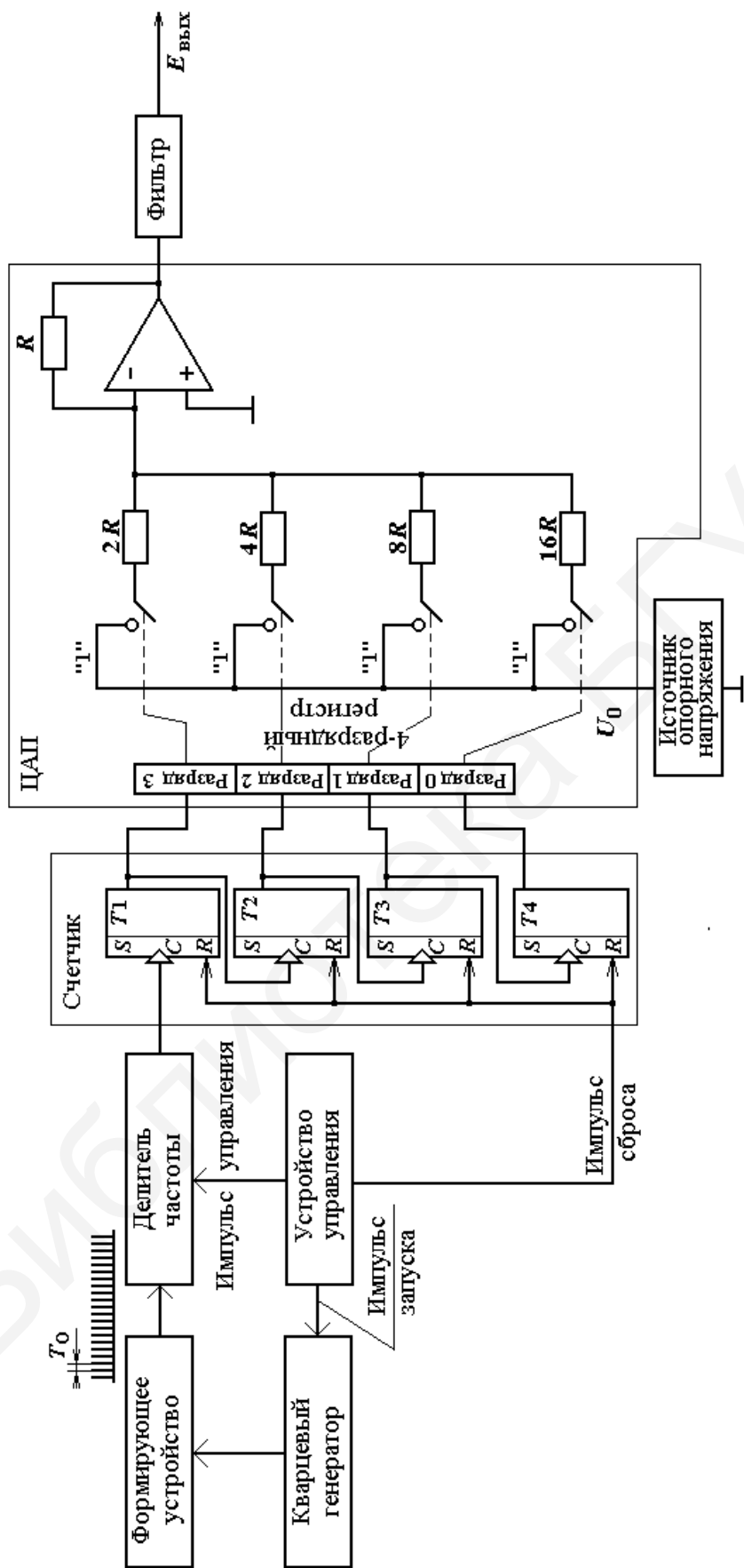


Рисунок 2.1 – Структурная схема цифрового генератора псевдообразных импульсов на основе ЦАП с последовательной резисторной матрицей

Например, если кварцевый генератор генерирует синусоидальный сигнал частотой f_0 , равной 16 МГц, то с помощью формирующего устройства синусоидальный сигнал преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов с периодом следования T_0 , равным $1/f_0 = 62,5$ мкс. Совокупность кварцевого генератора и формирующего устройства является, по существу, традиционным генератором тактовых импульсов (ГТИ).

Для перестройки выходного сигнала по частоте необходимо регулировать частоту генератора тактовых импульсов. Этого можно достичь использованием в самом простом случае делителя частоты, который обеспечивает перестройку частоты в определенных пределах путем изменения своего коэффициента передачи (коэффициента деления частоты). При подаче управляющего сигнала от устройства управления на делитель частоты коэффициент деления частоты будет изменяться, в результате чего будет изменяться частота выходного сигнала. В этом случае перестройка частоты будет осуществляться только в сторону понижения частоты на значения, кратные 2 (2, 4, 8, 16 ...).

Дальнейшее преобразование частоты прямоугольных импульсов с помощью делителя частоты позволяет получить сетку частот 8 МГц, 4 МГц, 2 МГц, 1 МГц, 500 кГц, 250 кГц, 125 кГц и т. д. (при соответствующих коэффициентах деления частоты, кратных 2).

После прохождения регулируемого делителя частоты тактовые импульсы поступают на счетный вход 4-разрядного двоичного счетчика импульсов, служащего для преобразования количества аналоговых прямоугольных импульсов в 4-разрядный цифровой код.

Двоичный счетчик в данном случае представляет собой последовательное соединение четырех RS-триггеров (см. рисунок 2.1). Так, если на вход счетчика поступило пять аналоговых прямоугольных импульсов, то на выходе счетчика будет получен 4-разрядный двоичный код 0101.

Полученный код поступает на вход 4-разрядного цифроаналогового преобразователя, на выходе которого, если не рассматривать дробные числа и числа со знаком, формируется аналоговый сигнал, значение напряжения которого будет равно 5 В.

При поступлении на вход счетчика шестого импульса ГТИ его выходной код изменится и станет равным 0110. Соответственно и выходное напряжение на выходе ЦАП станет равным 6 В. В общем случае значение выходного напряжения будет определяться простым выражением

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{мзр}} N = U_{\text{мзр}} \sum_{i=0}^n a_i 2^i, \quad (2.1)$$

где $U_{\text{мзр}}$ – малое фиксированное приращение напряжения, определяемое единицей младшего разряда счета; $U_{\text{вых}}$ – аналоговое напряжение на выходе ЦАП; N – количество сосчитанных счетчиком импульсов.

Поскольку количество импульсов N может принимать только конечное число дискретных значений, то минимальный шаг, с которым может увеличиваться выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, равен $U_{\text{мзр}}$.

Для преобразования цифрового кода, получаемого на выходе счетчика в аналоговый дискретный сигнал, используется простая реализация ЦАП, представленная на рисунке 2.1. На вход ЦАП поступает цифровой код, состоящий из битов a_i ($i = 0, 1, \dots, n$), определяемых количеством разрядов ЦАП. При равенстве коэффициента a единице, соответствующий ключевой элемент подключается к выходу источника опорного напряжения. При равенстве коэффициента a нулю, соответствующий ключевой элемент отключается от источника опорного напряжения – цепь размыкается. При заданном коэффициенте усиления операционного усилителя на неинвертирующем входе усилителя реализуется состояние виртуального замыкания. Значение тока во входной цепи усилителя, преобразующего ток в напряжение, равно сумме токов, протекающих по всем резисторам R_i , для которых $a_i = 1$.

Значение тока, протекающего во входной цепи операционного усилителя, определяется выражением

$$I = - \sum_i^n \frac{a_i U_R}{R_i}. \quad (2.2)$$

В этом случае выходное дискретное значение напряжения будет равно произведению тока (2.2) на сопротивление обратной связи R . Для выполнения условия $U_{\text{вых}} = U_0 \cdot N$ сопротивление каждого последующего резистора R_i в цепи резисторной матрицы выбирается вдвое больше предыдущего сопротивления. Итак, если $R_0 = 2R$, то $R_1 = 4R$, $R_2 = 8R$, ..., $R_i = 2^i R$. Тогда выходное напряжение ЦАП будет определяться формулой

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0 R}{R_i} \sum_{i=0}^n a_i 2^i, \quad (2.3)$$

где U_0 – выходное напряжение источника опорного напряжения; R – сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя; R_i – сопротивление резисторной матрицы.

При использовании 12-разрядного цифроаналогового преобразователя i будет равно 12. При сопротивлении обратной связи операционного усилителя R , равном 1 кОм, наибольшее сопротивление будет иметь резистор, определяющий значение младшего разряда счета $4096R$. Следовательно, основным недостатком такого ЦАП является тот факт, что соотношение между наибольшим сопротивлением (R_{12}) и наименьшим (R_1) становится слишком большим с практической точки зрения. В данном примере значение сопротивления младшего разряда счета будет достигать 4,096 МОм.

Очевидно, что разрешающая способность ЦАП должна быть достаточно высокой, что требуется для обеспечения высокой точности преобразования сигналов компьютерно-измерительной системы. Выполнение данного требования обеспечивается только при выполнении двух условий: во-первых, соотношение значений резисторов резисторной матрицы должно быть выдержано с высокой точностью, во-вторых, цифроаналоговый преобразователь должен иметь достаточно большое количество двоичных разрядов. Это требование приводит к необходимости дальнейшего увеличения значений сопротивлений резисторной матрицы.

На рисунке 2.2 приведена структурная схема генератора пилообразных импульсов на основе ЦАП, в котором используется резисторная матрица, в состав которой входят резисторы только двух номиналов – R и $2R$. Для коммутации резистивных элементов с номиналом $2R$ используются последовательно-параллельные ключи напряжения. При подаче на управляющий вход такого ключа логического нуля он замыкает вход резистора на корпус, а при подаче логической единицы подключает его к источнику опорного напряжения.

Ток от выхода источника опорного напряжения протекает через замкнутый ключ, резистор с сопротивлением $2R$ и на его выходе делится поровну между сопротивлениями R . Повторение данного процесса в остальных узловых точках резисторов с номиналом $2R$ определит значения остальных токов резисторной матрицы. Значения этих токов суммируются на виртуально заземленном входе операционного усилителя. Следовательно, функция преобразования ЦАП может быть определена следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = 2R \sum_{i=0}^n \frac{a_i U_0}{2R 2^{n-1}} = U_{\text{мзр}} \sum_{i=0}^n a_i 2^i. \quad (2.4)$$

Основное требование для обеспечения точности преобразования заключается в том, чтобы отношение значений сопротивлений резисторов R и $2R$ резисторной матрицы к сопротивлению резистора обратной связи операционного усилителя выдерживалось точно. Поскольку в резисторной матрице используются резисторы только двух номиналов, то у ЦАП с матрицей R и $2R$ точность может обеспечиваться на гораздо более высоком уровне. Погрешность преобразования цифрового кода в аналоговое напряжение может быть снижена до 10^{-4} . Но в данном случае нужно обеспечить 12-разрядное преобразование, поскольку $2^{12} = 4096$.

В результате цифроаналогового преобразования на выходе ЦАП сформируется пилообразный сигнал с частотой дискретизации f_0/n , где n – количество сосчитанных счетчиком выходных импульсов делителя частоты. Например, если частота выходного сигнала делителя частоты будет равна 8 МГц, то частота пилообразного сигнала на выходе ЦАП будет равна $8 \text{ МГц}/16 = 500 \text{ кГц}$. Соответственно период повторения пилообразного сигнала будет равен 2 мкс.

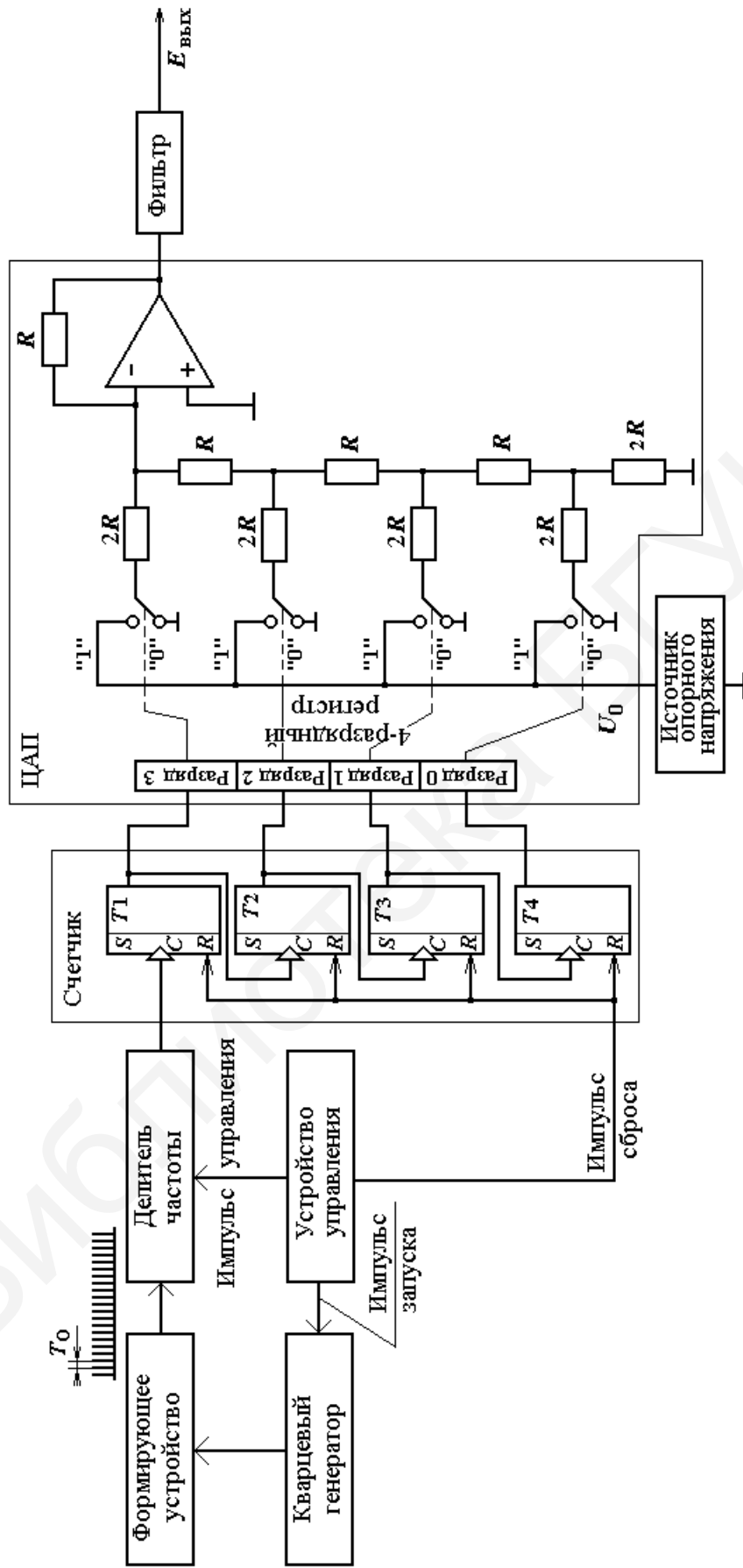


Рисунок 2.2 – Структурная схема цифрового генератора псевдообразных импульсов с использованием резисторной матрицы $R - 2R$

Функция преобразования цифроаналогового преобразователя, определяющая зависимость выходного значения напряжения от входного кодового сигнала, которая характеризует передаточную характеристику ЦАП, приведена на рисунке 2.3. Цифровой сигнал N может принимать только конечное число дискретных значений. Минимальный шаг, с которым может увеличиваться выходное напряжение цифроаналогового преобразователя $U_{\text{вых}}$, равен U_0 и соответствует младшему разряду счета.

Пиковое значение напряжения выходного сигнала генератора будет определяться значением источника опорного напряжения за вычетом значения напряжения, соответствующего младшему разряду счета цифроаналогового преобразователя.

Предположим, что значение источника опорного напряжения будет равно 16 В. Для 4-разрядного ЦАП значение младшего разряда счета будет соответствовать $16 \text{ В}/16 = 1 \text{ В}$.

Следовательно, пиковое значение выходного напряжения генератора будет равно 15 В.

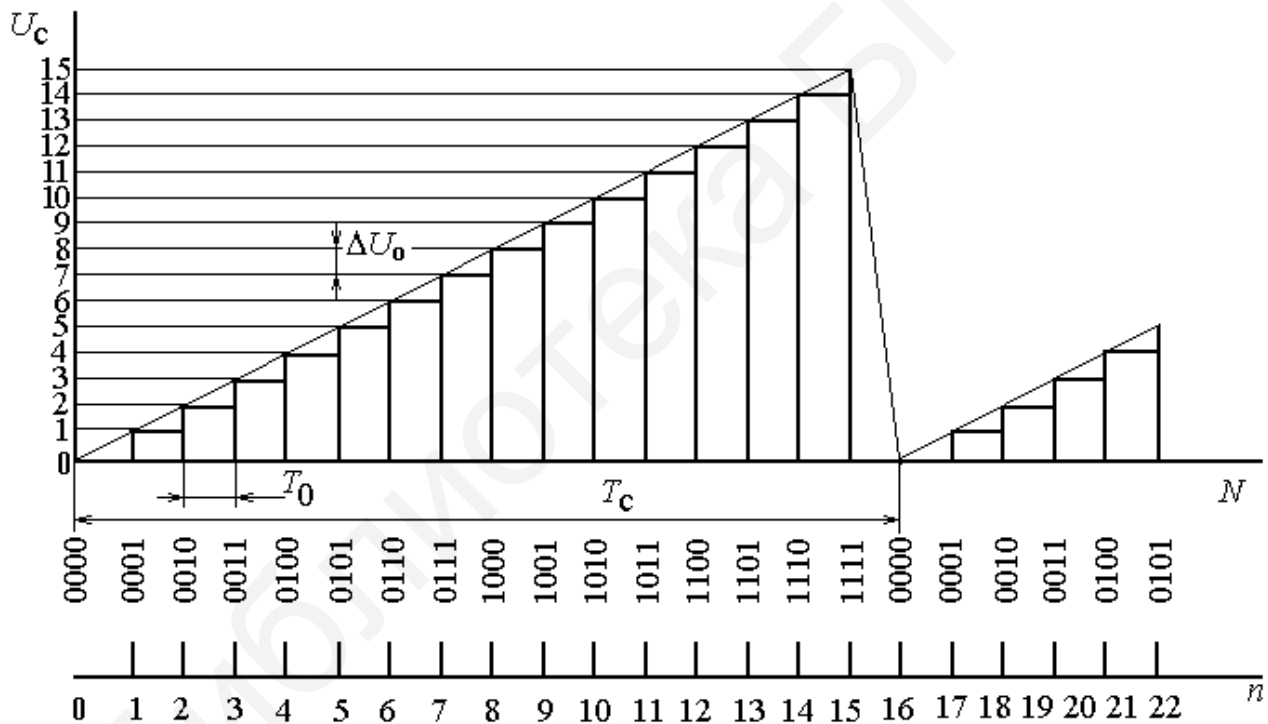


Рисунок 2.3 – Временная диаграмма сигнала на выходе генератора пилообразных сигналов на основе ЦАП

Импульсный кварцевый генератор вырабатывает периодическую последовательность коротких импульсов с периодом следования T . На выходе делителя частоты с регулируемым коэффициентом деления реализуется периодическая последовательность импульсов с периодом следования, соответствующим шагу дискретизации. Импульсы поступают на 4-разрядный двоичный счетчик, в котором происходит их подсчет и в соответствии с

разрядностью счетчика на его выходе формируется цифровой код. Полученная на выходе счетчика кодовая комбинация, определяемая числом импульсов, накопленных в счетчике, подается на схему ЦАП, который вырабатывает напряжение, соответствующее количеству импульсов кварцевого генератора.

Таким образом, формируются n ступенек аппроксимируемой кривой. После накопления количества импульсов, соответствующего его разрядности, счетчик переполняется и сбрасывается в нуль. С приходом следующего за переполнением счетчика импульса начинается формирование нового периода ступенчатой кривой.

Частота формируемого колебания при фиксированном числе ступенек n регулируется путем изменения шага дискретизации Δt , что достигается изменением коэффициента деления делителя частоты.

Следует иметь в виду, что при больших значениях шагов дискретизации и квантования функция преобразования будет иметь ярко выраженный ступенчатый характер и характеризоваться значительной погрешностью преобразования. Для уменьшения погрешностей, вносимых моментами дискретизации и уровнями квантования сигналов, необходимо увеличивать частоту дискретизации и повышать разрядность счетчика и ЦАП. Например, увеличение разрядности счетчика и ЦАП с четырех до восьми позволит снизить погрешность преобразования на порядок.

2.3 Структурная схема и описание принципа действия одноканального синусоидального генератора

Виртуальные цифровые генераторы синусоидальных сигналов получили в настоящее время широкое распространение и являются более удобными по сравнению с аналоговыми в эксплуатации: у них выше быстродействие, существенно проще установка требуемой частоты, более наглядная индикация. Кроме того, виртуальные цифровые измерительные генераторы имеют возможность автоматически перестраивать частоту выходного сигнала по заданной программе и обеспечивают простое сопряжение с цифровыми средствами обработки информации.

Как показал пример цифрового генератора пилообразного напряжения, приведенного на рисунках 2.1 и 2.2, принцип действия цифровых генераторов основан на преобразовании цифрового кода в аналоговый сигнал, т. е. последний аппроксимируется функцией, моделируемой с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП). С преобразованием цифрового кода в пилообразное напряжение, которое описано и проиллюстрировано в подразделе 2.2, не возникает никаких вопросов.

Для преобразования цифрового кода в синусоидальное напряжение необходимо применить аппроксимацию.

Самый простой вид аппроксимации – ступенчатая. Она заключается в представлении (замене) синусоидального колебания напряжением ступенчатой

формы, достаточно мало отличающейся от синусоиды. Если для генерации синусоидального сигнала в обычном аналоговом генераторе используется колебательный контур, включенный в цепь обратной связи усилителя, то в виртуальном генераторе гармонический сигнал получается математически непосредственно по соответствующей тригонометрической формуле для синусоиды. Ясно, что в этом случае генерируется почти идеальный синусоидальный сигнал без нелинейных искажений, с очень стабильной частотой и амплитудой, а также с известной начальной фазой. В реальном генераторе такие метрологические параметры практически недостижимы.

В результате такой замены вместо кривой синусоидальной формы получается ступенчатая линия, изображенная на рисунке 2.4. Аппроксимируемое гармоническое напряжение $U(t) = U_m \sin \omega t$ подвергается дискретизации во времени путем равномерной выборки мгновенных значений аналогового сигнала с шагом Δt в интервале, разделенном на два соседних момента времени t_i и t_{i+1} .

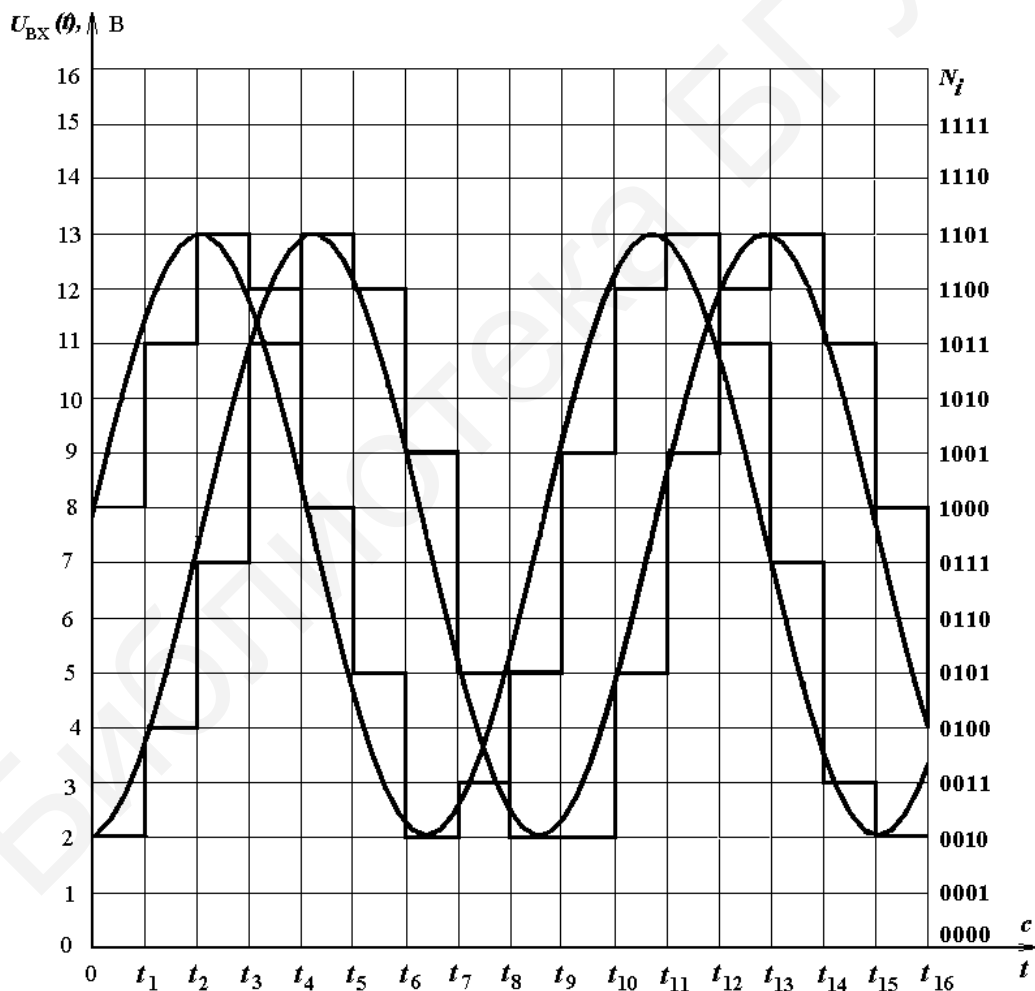


Рисунок 2.4 – Временная диаграмма выходного сигнала 4-битового двухканального цифрового генератора

Синусоидальное колебание в этом случае заменяется напряжением постоянного тока – ступенькой, высота которой равна значению аппроксимируемого напряжения в момент t_i , т. е. $u_i(t) = U_m \sin \omega t$.

При имеющемся периоде T гармонического колебания число ступенек n , приходящихся на один период, определяется шагом дискретизации: $n = T/\Delta t$. Если же из технических соображений число ступенек задано, то изменение шага дискретизации приводит к изменению периода формируемого напряжения, поскольку $T = n\Delta t$.

Учитывая, что $t_i = i\Delta t$, уравнение ступенчатой кривой можно представить в виде $u(i\Delta t) = U_m \sin(i\omega\Delta t)$ или с учетом значения n и соотношения $\omega = 2\pi/T$ записать в следующем виде:

$$u(i\Delta t) = U_m \sin(i2\pi/T). \quad (2.5)$$

Кроме того, ступенчатая кривая тем точнее приближается по форме к синусоиде (уменьшается погрешность аппроксимации), чем больше выбрано число ступеней n . Когда это число достаточно велико, сформированное ступенчатое напряжение можно рассматривать как низкочастотное синусоидальное напряжение, искаженное в небольшой степени высокочастотной аддитивной помехой.

Спектральный анализ напряжения, полученного путем ступенчатой аппроксимации, показывает, что его спектр содержит гармонику основной частоты и ряд высших гармоник. При этом оказывается, что ближайшей к основной высшей гармоникой будет составляющая с номером $q - 1$, следующей – гармоника с номером $q + 1$, затем гармоники номеров $2q - 1$ и $2q + 1$ и т. д. Например, при $q = 25$ и частоте основной гармоники ближайшими высшими гармониками будут 24-я, 26-я, 49-я, 51-я гармоники, т. е. напряжения частот $24f$, $26f$, $49f$, $51f$. Такие соотношения между основной и высшими гармониками позволяют просто осуществить высококачественную фильтрацию, резко ослабляющую уровни высших гармоник, т. е. получить синусоидальное напряжение, характеризуемое достаточно малым коэффициентом нелинейных искажений.

Схема такого генератора представлена на рисунке 2.5. Представленный одноканальный генератор позволяет генерировать синусоидальные дискретные сигналы, цифровой код которых предварительно запрограммирован и записан в запоминающее устройство. Как видно из приведенного рисунка, в состав генератора входит устройство запуска генератора, генератор тактовых импульсов, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и цифроаналоговый преобразователь с фильтром.

Генератор тактовых импульсов формирует последовательность коротких прямоугольных импульсов с периодом повторения T_0 .

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) содержит заранее сформированную и записанную информацию о двоичных кодах синусоидального сигнала.

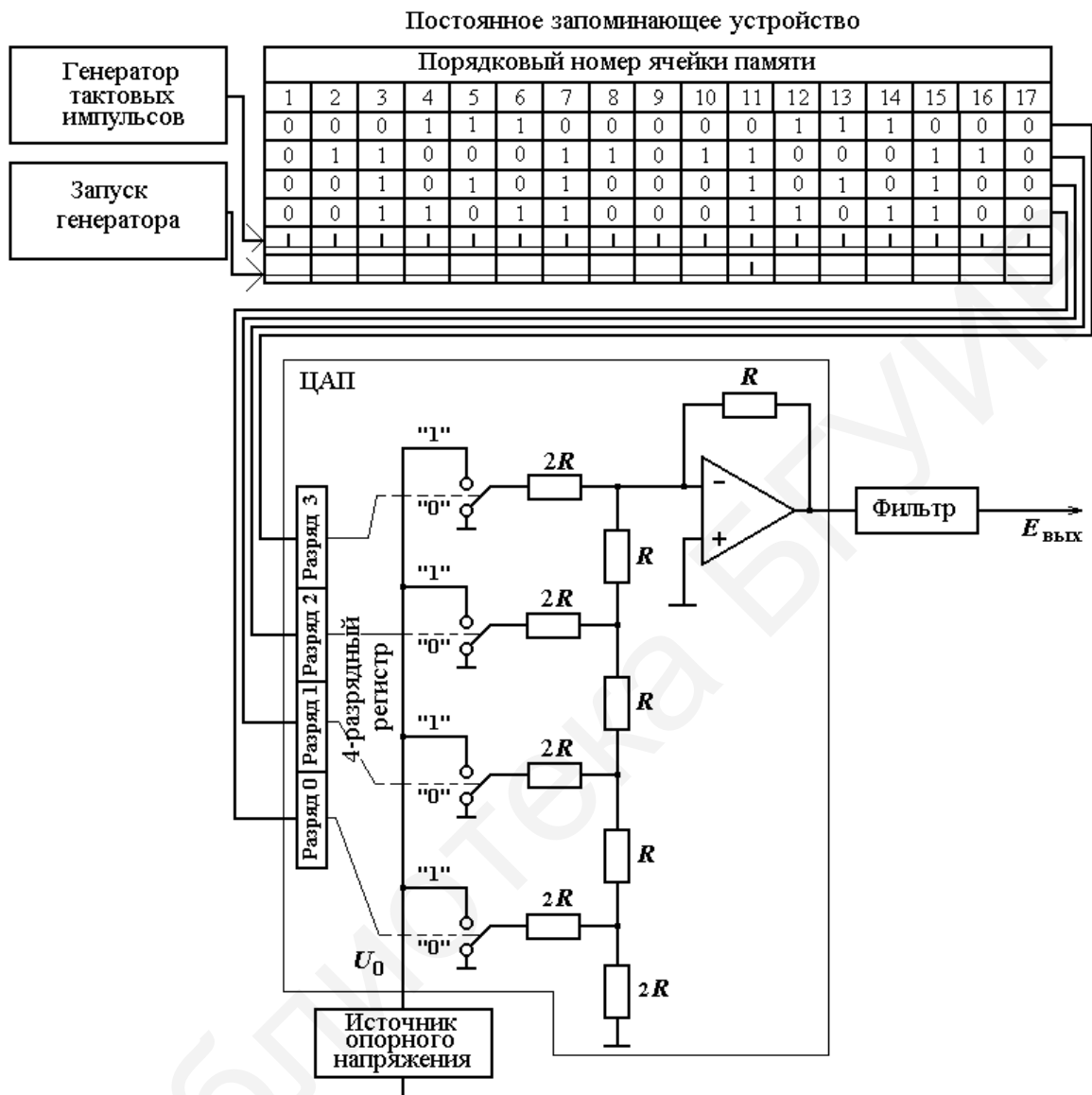


Рисунок 2.5 – Одноканальный генератор синусоидальных сигналов

Генератор сигналов может считывать точки из ПЗУ с любой частотой в пределах своих технических характеристик. Расчет частоты сигнала, которую способен воспроизвести генератор, требует решения нескольких простых уравнений.

Рассмотрим случай, когда в памяти генератора сохранен один период сигнала: при частоте дискретизации 10^6 выборок в секунду и объеме памяти (или длине записи) 4000 выборок получаем

$$F_{\text{вых}} = \frac{\text{Тактовая частота}}{\text{Объем памяти}} \text{ или } F_{\text{вых}} = \frac{1\,000\,000}{4000} = 250 \text{ Гц.}$$

Данная концепция формирования синусоидального сигнала показана на рисунке 2.6. При заданной тактовой частоте 1 МГц выборки разнесены относительно друг друга примерно на 10 мс. Данное значение временного интервала представляет собой шаг дискретизации или разрешающую способность по времени (по горизонтали).

На следующем примере предположим, что в ПЗУ в том же самом объеме памяти записан не один, а четыре периода сигнала:

$$F_{\text{вых}} = \frac{\text{Тактовая частота}}{\text{Объем памяти}} \cdot \text{Количество периодов в памяти}$$

или

$$F_{\text{вых}} = \frac{1\,000\,000}{4000} \cdot 4 = 250 \cdot 4 = 1000 \text{ Гц.}$$

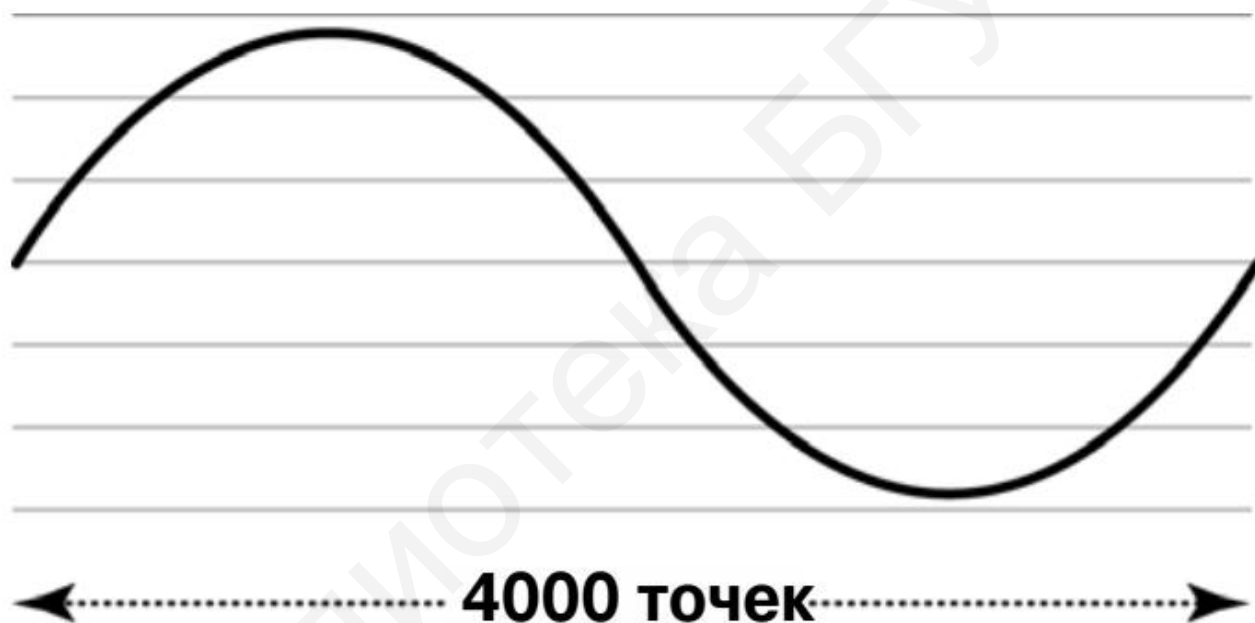


Рисунок 2.6 – Изображение синусоидального сигнала, сформированного генератором при частоте дискретизации 4000 выборок в секунду

Новая частота равна 1000 Гц. Данная концепция формирования синусоидального сигнала показана на рисунке 2.7. В этом примере разрешающая способность во времени каждого периода сигнала оказывается меньше, чем в примере с одним периодом, а именно, ровно в четыре раза. При заданной тактовой частоте 1 МГц выборки разнесены относительно друг друга примерно на 4 мс, т. е. увеличение частоты выходного сигнала достигается ценой потери горизонтального разрешения при неизменной частоте дискретизации.



Рисунок 2.7 – Изображение синусоидального сигнала, сформированного генератором при частоте дискретизации 4000 выборок в секунду и четырех периодах сигнала

Рассмотрим процесс формирования синусоидального гармонического сигнала. Известно, что гармонические сигналы (или синусоидальные), описываются следующим выражением:

$$U(t) = U_M \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi) = U_M \cdot \sin(2\pi f_0 t + \varphi), \quad (2.6)$$

где U_M – пиковое значение амплитуды сигнала; f_0 – частота; ω_0 – угловая частота ($\omega_0 = 2\pi f_0$); φ – начальный фазовый сдвиг.

С учетом того, что период синусоидального колебания $T = 1/f_0 = 2\pi/\omega_0$ и $T = nt$, а $t = T/n$, формула (2.6) преобразовывается в выражение

$$U(t) = U_m \cdot \sin(2\pi t/T) = U_m \cdot \sin(2\pi/n). \quad (2.7)$$

Здесь мы имеем дело с дискретным сигналом, поэтому каждая i -я кодовая последовательность после ПЗУ будет иметь свою амплитуду, которая определяется в соответствии с формулой (2.7) следующим образом:

$$U(t)_i = U_m \cdot \sin(2\pi i/n). \quad (2.8)$$

Предполагая, что фазовый сдвиг $\varphi = 0$, а пиковое значение напряжения $U_M = 1$ В, период следования синусоидального сигнала $T = 2\pi$ разбивается на 32 различных дискретных уровня q выходного сигнала (импульса). Полученные значения математических выражений, значений аналогового напряжения в вольтах, а также двоичные значения 16-разрядного цифрового кода приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Математические выражения и цифровые коды синусоидального цифрового сигнала

Уравнение	Аналоговое значение	Цифровой код			Уравнение	Аналоговое значение	стар-ший разряд	Цифровой код	
		стар-ший разряд	средние разряды	млад-ший разряд				стар-ший разряд	средние разряды
$U_0 = \sin(\pi/16) \times 0$	= 0,000	0000	0000	0000					
$U_1 = \sin(\pi/16) \times 1$	= 0,195	0000	0001	0101	$U_{17} = \sin((\pi/16) \times 17) = -0,195$	0000	0001	1001	0101
$U_2 = \sin(\pi/16) \times 2$	= 0,383	0000	0011	1000	$U_{18} = \sin((\pi/16) \times 18) = -0,383$	0000	0011	1000	0011
$U_3 = \sin(\pi/16) \times 3$	= 0,556	0000	0101	0110	$U_{19} = \sin((\pi/16) \times 19) = -0,556$	0000	0101	0101	0110
$U_4 = \sin((\pi/16) \times 4)$	= 0,707	0000	0111	0000	$U_{20} = \sin((\pi/16) \times 20) = -0,707$	0000	0111	0000	0111
$U_5 = \sin((\pi/16) \times 5)$	= 0,831	0000	1000	0011	$U_{21} = \sin((\pi/16) \times 21) = -0,831$	0000	1000	0011	0001
$U_6 = \sin((\pi/16) \times 6)$	= 0,924	0000	1001	0010	$U_{22} = \sin((\pi/16) \times 22) = -0,924$	0000	1001	0010	0100
$U_7 = \sin((\pi/16) \times 7)$	= 0,981	0000	1001	1000	$U_{23} = \sin((\pi/16) \times 23) = -0,981$	0000	1001	1000	0001
$U_8 = \sin((\pi/16) \times 8)$	= 1,000	0001	0000	0000	$U_{24} = \sin((\pi/16) \times 24) = -1,000$	0001	0000	0000	0000
$U_9 = \sin((\pi/16) \times 9)$	= 0,981	0000	1001	1000	$U_{25} = \sin((\pi/16) \times 25) = -0,981$	0000	1001	1000	0001
$U_{10} = \sin((\pi/16) \times 10)$	= 0,924	0000	1001	0010	$U_{26} = \sin((\pi/16) \times 26) = -0,924$	0000	1001	0010	0100
$U_{11} = \sin((\pi/16) \times 11)$	= 0,831	0000	1000	0011	$U_{27} = \sin((\pi/16) \times 27) = -0,831$	0000	1000	0011	0001
$U_{12} = \sin((\pi/16) \times 12)$	= 0,707	0000	0111	0000	$U_{28} = \sin((\pi/16) \times 28) = -0,707$	0000	0111	0000	0111
$U_{13} = \sin((\pi/16) \times 13)$	= 0,556	0000	0101	0110	$U_{29} = \sin((\pi/16) \times 29) = -0,556$	0000	0101	0101	0110
$U_{14} = \sin((\pi/16) \times 14)$	= 0,383	0000	0011	1000	$U_{30} = \sin((\pi/16) \times 30) = -0,383$	0000	0011	1000	0011
$U_{15} = \sin((\pi/16) \times 15)$	= 0,195	0000	0001	1001	$U_{31} = \sin((\pi/16) \times 31) = -0,195$	0000	0001	1001	0101
$U_{16} = \sin((\pi/16) \times 16)$	= 0,000	0000	0000	0000	$U_{32} = \sin((\pi/16) \times 32) = 0,000$	0000	0000	0000	0000

Содержащиеся в данной таблице двоичные коды отсчетов синусоидального сигнала записаны в ПЗУ в соответствии с аналоговыми значениями, соответствующими двоичным кодам. Данная информация позволяет с помощью выходных импульсов генератора тактовых импульсов формировать на выходе цифроаналогового преобразователя синусоидальный сигнал с заданными параметрами.

Принцип работы одноканального генератора синусоидальных сигналов поясняется временными диаграммами сигналов, приведенными на рисунке 2.8.

В генераторе тактовых импульсов формируются короткие прямоугольные импульсы, которые при наличии импульса запуска последовательно «выбивают» записанные в ПЗУ цифровые коды и с соответствующим периодом повторения подают их на знаковые регистры ЦАП.

При необходимости выходной сигнал ЦАП может быть отфильтрован с помощью соответствующего фильтра.

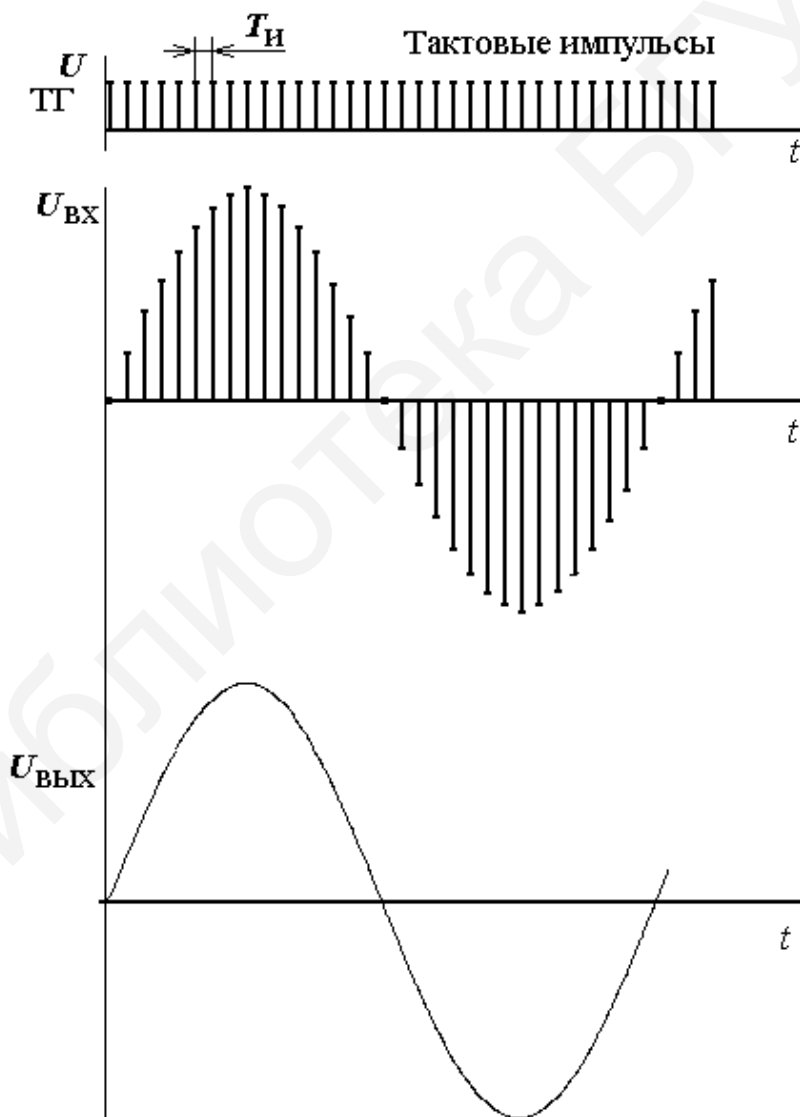


Рисунок 2.8 – Временные диаграммы сигналов, поясняющие принцип работы одноканального генератора синусоидальных сигналов

2.4 Структурная схема и принцип действия двухканального измерительного генератора с регулируемым фазовым сдвигом

Представляемый двухканальный измерительный генератор с регулируемым фазовым сдвигом позволяет генерировать гармонические (синусоидальные) сигналы, фиксируя фазовый сдвиг между ними.

На рисунке 2.9 представлена структурная схема этого генератора.



Рисунок 2.9 – Структурная схема двухканального измерительного генератора с регулируемым фазовым сдвигом

Принцип работы двухканального измерительного генератора поясняется временными диаграммами, приведенными на рисунке 2.10.

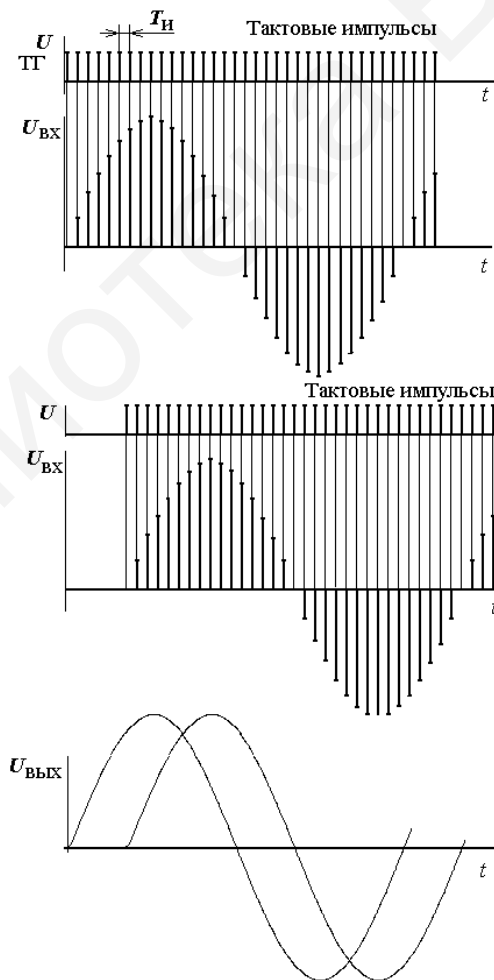


Рисунок 2.10 – Принцип работы двухканального измерительного генератора с регулируемым фазовым сдвигом

Данный генератор в своем составе имеет тактовый генератор, в котором формируются импульсы с периодом следования Δt_x , регистр сдвига (РС), предназначенный для задержки последовательности импульсов, постоянные запоминающие устройства ПЗУ1 и ПЗУ2, в которых содержится заранее записанная информация о двоичных кодах отсчета синусоиды, цифроаналоговые преобразователи ЦАП1 и ЦАП2 и операционные усилители ОУ1 и ОУ2, усиливающие сигнал на выходе ЦАП.

В генераторе тактовых импульсов формируются управляющие импульсы, которые на его выходе разделяются на два канала. В первом канале формируется опорная последовательность импульсов, которые поступают на вход оперативного запоминающего устройства 2. Во втором канале сформированная последовательность импульсов задерживается, проходя регистр сдвига, на определенный промежуток времени и подается на вход оперативного запоминающего устройства 1. Регулировка времени задержки одной последовательности по отношению к другой позволяет не только формировать фазовый сдвиг между двумя сигналами, но и регулировать его в заданных пределах с заданной погрешностью.

Принцип преобразования цифровой кодовой последовательности в дискретный сигнал с последующим преобразованием в аналоговый представлен на рисунке 2.11.

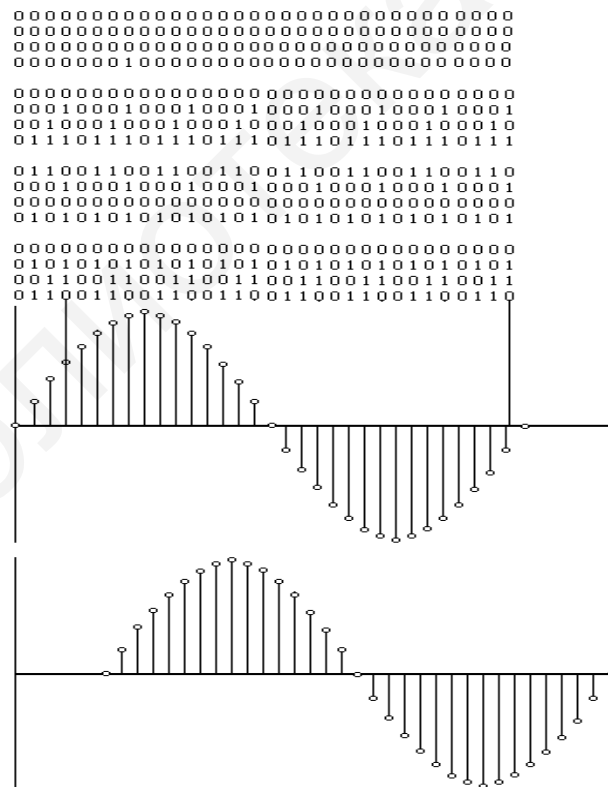


Рисунок 2.11 – Принцип преобразования цифровых кодовых последовательностей в дискретный аналоговый сигнал

Как говорилось ранее, в ячейках памяти постоянных запоминающих устройств ПЗУ1 и ПЗУ2 записана информация о значениях цифровых кодов синусоидальных сигналов (см. таблицу 2.1). С приходом на вход ПЗУ2 первого импульса, формируемого генератором тактовых импульсов, на его выходе формируется цифровой код, значение которого соответствует цифровому коду, записанному в первую ячейку памяти. Образно говоря, первый импульс последовательности как бы выбивает значение цифрового кода из соответствующей ячейки памяти.

С приходом каждого последующего импульса на выходе ПЗУ2 формируется последовательность цифровых кодов, записанных во второй, третьей и т. д. ячейках памяти.

Аналогичный процесс происходит и на выходе ПЗУ1, но первый импульс на вход данного ПЗУ поступает с задержкой во времени, формируемой регистром сдвига. Как показано на рисунке 2.11, эта задержка составляет шесть периодов повторения тактовых импульсов.

После этого сигналы с выходов ПЗУ1 и ПЗУ2 в цифровом виде поступают на входы цифроаналоговых преобразователей, где преобразуются в аналоговые сигналы синусоидальной формы. При необходимости с помощью операционных усилителей ОУ1 и ОУ2 на выходах ЦАП сигналы могут усиливаться до заданных значений.

Более наглядно принцип формирования двух синусоидальных сигналов с регулируемым фазовым сдвигом между ними поясняется с помощью виртуальных ленточных диаграмм, представленных на рисунке 2.12.

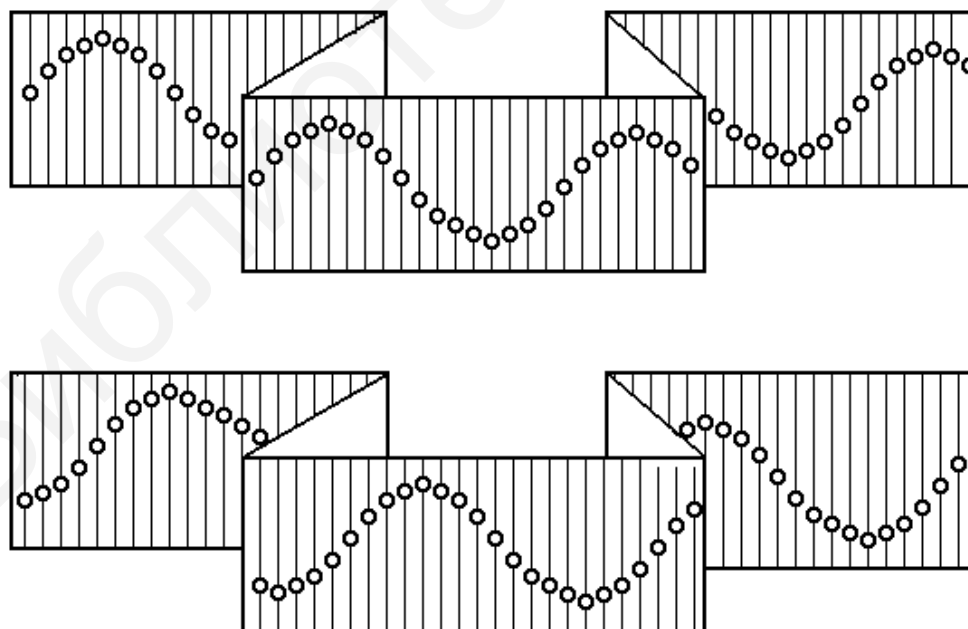


Рисунок 2.12 – Наглядный пример формирования двух синусоидальных сигналов из кодовых последовательностей импульсов

3 СБОР И ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обобщенная структурная схема устройств сбора и обработки измерительной информации в компьютерно-измерительной системе представлена на рисунке 3.1.

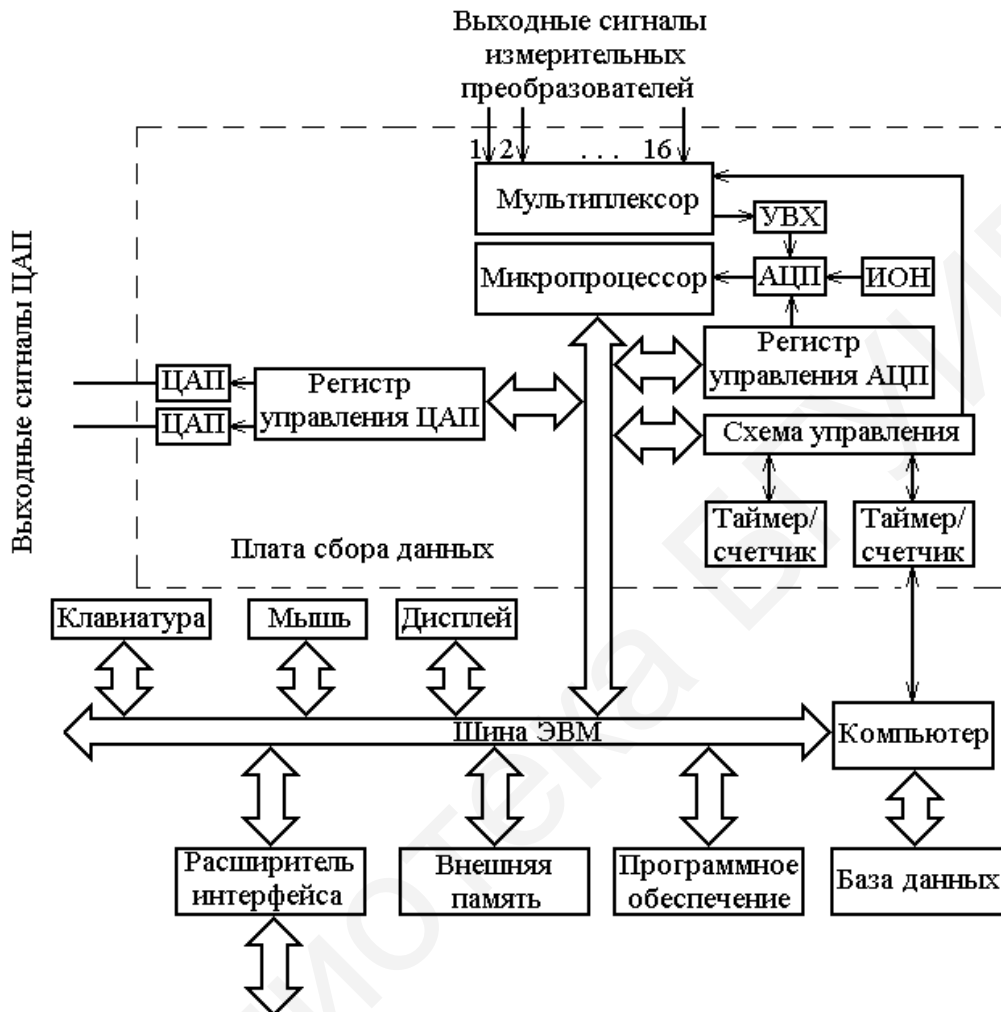


Рисунок 3.1 – Устройство сбора и обработки измерительной информации компьютерно-измерительной системы

Как следует из рисунка 3.1, в состав данного устройства входит несколько типовых компонентов средств измерений, которые необходимо рассмотреть более детально. К данным средствам относятся мультиплексор – управляемый коммутатор аналоговых сигналов (мультиплексор), аналого-цифровой преобразователь и микропроцессор, обеспечивающий работоспособность данной схемы в соответствии с заданным алгоритмом работы.

3.1 Мультиплексор

Мультиплексор – это элемент многоканальных компьютерно-измерительных систем, предназначенный для последовательного переключения

входных сигналов, поступающих с измерительных каналов, на один выход. Выбор коммутируемого входа осуществляется подачей соответствующей комбинации управляющих сигналов. Как правило, выход мультиплексора подключается к входу АЦП, который преобразует мгновенные значения коммутируемых сигналов в двоичный код с целью последующего ввода полученных значений в цифровой компьютер или процессор. В результате каждого переключения мультиплексора его выходной сигнал должен повторять аналоговый входной сигнал в течение того времени, которое необходимо АЦП для преобразования этого сигнала в код. Поскольку различные сигналы измерительных систем могут использоваться для измерения различных физических величин, то в компьютер должны передаваться сведения о номере включенного в данный момент канала, с тем чтобы обеспечить выполнение преобразований

$$z = \frac{y_1}{K} \text{ или } z = f^{-1}(y_1) \quad (3.1)$$

с функцией преобразования, соответствующей измеряемой величине, сопоставить результат с соответствующей шкалой и представить результат в единицах измеряемой величины.

Для этого между мультиплексором и компьютером должна действовать двусторонняя связь, которая обеспечивается программными и аппаратными средствами интерфейсного сопряжения. Параметры сигналов связи, их длительность и временные характеристики регламентируются для каждого интерфейса протоколом обмена, который устанавливается стандартом на интерфейс.

Основным элементом мультиплексора являются управляемые ключевые элементы, или ключи. Различают аналоговые (измерительные) и цифровые (логические) ключи. Аналоговые ключи предназначены для коммутации цепей прохождения сигналов, уровень которых может изменяться непрерывно или принимать дискретные значения, а цифровые – для коммутации цепей прохождения логических сигналов (в дискретной части АЦП).

Любой аналоговый ключ состоит из коммутирующего элемента и схемы управления. По способу соединения источника коммутируемых сигналов и нагрузки можно выделить четыре базовые схемы аналоговых ключей: последовательный ключ, параллельный ключ, последовательно-параллельный ключ напряжения и последовательно-параллельный ключ тока.

Аналоговые ключи должны иметь малое сопротивление в замкнутом и большое сопротивление в разомкнутом состояниях, высокое быстродействие и хорошую развязку между цепями управляющего и коммутируемого сигналов.

Цифровые ключи выполняются на *логических элементах*, реализующих различные логические функции. Типичными примерами их являются двоичные элементы И, ИЛИ и НЕ.

Однотипность сигналов на входах и выходах позволяет подключать выходы одних схем ко входам других, причем к одному выходу, если это необходимо, могут быть присоединены входы нескольких схем.

Аналоговые коммутаторы являются элементами физического уровня, выполняющими функции соединения и рассоединения аналоговых линий под управлением элементов канального уровня. В строгой постановке аналоговые коммутаторы не являются обязательным элементом в составе КИС. Даже при многоканальных измерениях в качестве входных элементов физического уровня могут быть применены АЦП с дальнейшей коммутацией цифровых измерительных сигналов логическими схемами.

АЦП намного сложнее аналогового коммутатора и вносит больший вклад в результирующую погрешность преобразования и, в конечном счете, измерения. Поэтому в тех случаях, когда алгоритм функционирования системы допускает последовательные многоканальные измерения, каналы подключаются к одному АЦП с помощью многоканального аналогового коммутатора – мультиплексора.

Аналоговый коммутатор своими входами подключен через измерительные преобразователи к объекту измерения, а выходом – к входу АЦП. Алгоритм коммутации сигналов определяется персональным компьютером, который через интерфейс и шину управления передает на многоканальный коммутатор сигналы управления.

Внутри КИС также имеются аналоговые коммутаторы для переключения масштабирующих устройств, управления режимом работы усилителей и преобразователей, объединения различных аналоговых блоков с целью выполнения общих функций. Программная реконфигурация аналоговой части КИС позволяет оптимизировать использование ресурсов аппаратуры, выбирая конкретную архитектуру для решения данной измерительной задачи.

При наличии в составе измерительной системы автономного мультиплексора протокол обмена с мультиплексором и АЦП выполняется в два этапа: сначала реализуется протокол обмена с мультиплексором, затем – протокол обмена с АЦП.

Если мультиплексор и АЦП сосредоточены в одном изделии, достаточно исполнения одного протокола обмена, что приводит к почти двукратному выигрышу в скорости опроса многочисленных измерительных каналов.

По сути дела, автономный мультиплексор представляет собой измерительный преобразователь, идеальная функция преобразования которого за время включения на каждый коммутируемый канал есть тождественная функция, т. е. на выходе мультиплексора должно быть то же самое значение сигнала, что и на его входе. Поэтому мультиплексор считается аналоговым средством измерения, а коммутации, которые выполняет мультиплексор, делают его средством измерений дискретного действия.

Погрешность, которую вносит мультиплексор в результат измерения, определяется не столько собственными метрологическими свойствами, сколько

характеристиками средств измерений, стоящими на его входе (например, выходы формирующих устройств измерительных преобразователей) и выходе (например, АЦП).

Метрологическая структурная схема коммутации сигналов измерительной информации представлена на рисунке 3.2. Будем считать, что мультиплексор переключает оба проводника – высокопотенциальный и низкопотенциальный, при неизменных входных напряжениях.

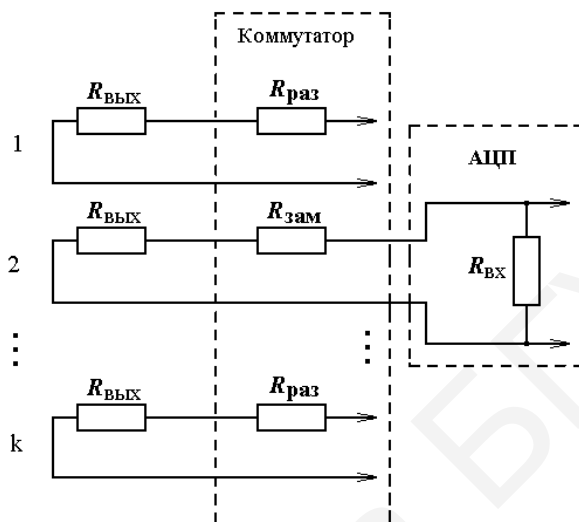


Рисунок 3.2 – Эквивалентная схема переключения сигналов измерительной информации на выходе измерительных каналов

Как видно из рисунка 3.2, АЦП подключен к выходу второго измерительного канала с помощью мультиплексора при общем количестве каналов переключения k . Будем полагать, что выходные сопротивления $R_{\text{ВЫХ}}$ аналоговых выходных преобразователей одинаковы. Сопротивления двух разомкнутых ключей мультиплексора обозначены $R_{\text{раз}}$, сопротивление двух замкнутых ключей – $R_{\text{зам}}$, входное сопротивление АЦП – $R_{\text{ВХ}}$.

Видно, что при одном включенном канале остальные каналы с разомкнутыми ключами оказываются подключенными к включенному каналу параллельно. Поэтому при передаче информации от второго измерительного канала на вход АЦП образуется делитель напряжения с коэффициентом деления, равным

$$K_{\text{дел}} = \frac{R_{\text{пар}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{зам}} + R_{\text{пар}}}, \quad (3.2)$$

где $R_{\text{пар}}$ – сопротивление параллельно включенных ключей, определяемое сопротивлениями $(k-1)R_{\text{ВХ}}$ и сопротивлениями разомкнутых каналов ($R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{раз}}$):

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_{\text{ВХ}}(R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{раз}})}{(k-1)R_{\text{ВХ}} + R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{раз}}}. \quad (3.3)$$

Номинальный коэффициент деления равен единице. Систематическая погрешность реального коэффициента деления, вызванная соотношением между выходными сопротивлениями $R_{\text{вых}}$ и входным сопротивлением $R_{\text{вх}}$, а также влиянием сопротивлений замкнутых и разомкнутых ключей, равна

$$\Delta K_{\text{дел}} = \frac{R_{\text{пар}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{зам}} + R_{\text{пар}}} - 1 = \frac{R_{\text{вых}} + R_{\text{зам}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{зам}} + R_{\text{пар}}}. \quad (3.4)$$

Вычислим относительную погрешность делением $\Delta K_{\text{дел}}$ на реальный коэффициент $K_{\text{дел}}$:

$$\gamma_{\text{дел}} = -\frac{R_{\text{вых}} + R_{\text{зам}}}{R_{\text{пар}}} = -\frac{R_{\text{вых}} + R_{\text{зам}}}{R_{\text{вх}}} \left[\frac{(k-1)R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}} + R_{\text{раз}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{раз}}} \right]. \quad (3.5)$$

Приведем это выражение к более удобной форме:

$$\gamma_{\text{дел}} = -\frac{R_{\text{вых}} + R_{\text{зам}}}{R_{\text{вх}}} - \frac{R_{\text{вых}} + R_{\text{зам}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{раз}}} (k - 1). \quad (3.6)$$

Из выражения (3.6) видно, что с увеличением числа каналов, приходящих на вход одного автономного мультиплексора, и при определенных соотношениях между сопротивлениями $R_{\text{вых}}$, $R_{\text{вх}}$, $R_{\text{раз}}$, $R_{\text{зам}}$ систематическая погрешность коммутации может возрасти по модулю до существенного значения. Кроме того, из этой формулы следует, что погрешность, вносимая подобным мультиплексором, не может быть сведена к инструментальной, поскольку она определяется не только техническими характеристиками самого мультиплексора $R_{\text{раз}}$, $R_{\text{зам}}$, но и свойствами внешних средств измерений, а именно, входными и выходными сопротивлениями $R_{\text{вых}}$, $R_{\text{вх}}$.

Измерительный преобразователь характеризуется выходной ЭДС $E(X)$, являющейся функцией входной величины X , и внутренним сопротивлением R_i . Эти две величины определяют мощность $P_{\text{кз}} = \frac{E^2}{R_i}$, развиваемую преобразователем в режиме короткого замыкания, т. е. мощность, рассеиваемую на внутреннем сопротивлении. Мощность $P_{\text{н}}$, отдаваемая генераторным преобразователем вторичному преобразователю, имеющему сопротивление $R_{\text{н}}$, определяется мощностью короткого замыкания $P_{\text{кз}}$ и некоторым безразмерным коэффициентом K_p , характеризующим эффективность использования возможностей генераторного преобразователя. Эффективность преобразования зависит только от соотношения сопротивлений R_i и $R_{\text{н}}$.

Включение генераторного ИП Π_i в цепь можно представить эквивалентной схемой (рисунок 3.3).

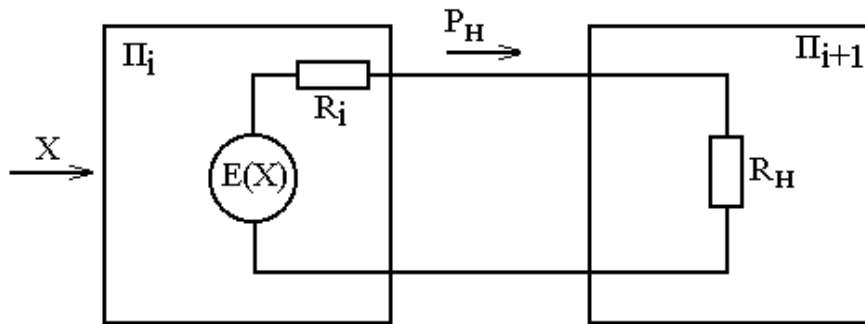


Рисунок 3.3 – Эквивалентная схема включения генераторного измерительного преобразователя

Преобразователь Π_i представлен собственной ЭДС – $E(X)$ с внутренним сопротивлением R_i , а ИЦ – преобразователем Π_{i+1} , имеющим входное сопротивление R_n и выполняющим функции нагрузки генераторного измерительного преобразователя (ИП).

Мощность P_n , передаваемая в нагрузку, может быть определена как

$$P_n = \frac{E^2 R_n}{(R_i + R_n)^2} = \frac{E^2}{R_i} \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2} = K_p P_{кз}, \quad (3.7)$$

где

$$K_p = \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)^2} \quad (3.8)$$

является функцией отношения $\alpha = \frac{R_n}{R_i}$ и не зависит от абсолютных значений R_i и R_n .

Изменение K_p в виде функции α при изменении α от 10^{-3} до 10^3 представлено в логарифмическом масштабе на рисунке 3.4 (кривая 1) и имеет максимум $K_p = 1/4$ при $\alpha = 1$, т. е. при $R_n = R_i$.

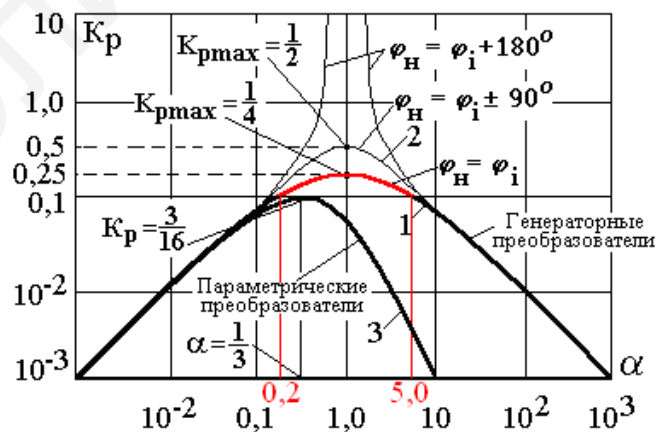


Рисунок 3.4 – Графики зависимостей эффективности преобразования K_p от отношения мощностей $P_{кз}$ и P_n

В том случае, когда согласуемые сопротивления являются комплексными величинами Z_i и Z_n , под $\alpha = \frac{P_n}{P_{кз}}$ следует понимать отношение полных мощностей. При этом для значений $\alpha = |Z_n|/|Z_i|$, далеких от единицы, кривая 2 практически не отличается от кривой 1, но значение максимума зависит от соотношения аргументов φ_i и φ_n комплексов Z_i и Z_n . При одинаковом характере сопротивлений (оба индуктивные или оба емкостные) и $\varphi_i = \varphi_n$ кривые полностью совпадают. При $\varphi_i = (\varphi_n \pm 90^\circ)$ максимум K_p составляет $1/2$ вместо $1/4$ (для R_n и R_i). При $\varphi_i = -\varphi_n$, т. е. при одном – емкостном, а другом – индуктивном сопротивлениях кривая имеет вид резонансной кривой.

Поэтому при проектировании схем включения измерительных преобразователей можно ориентироваться на общее правило, гласящее, что максимальная мощность в нагрузке P_n генераторного преобразователя, а следовательно, и максимум эффективности преобразования K_p достигается при согласовании модулей сопротивлений нагрузки и внутреннего сопротивления преобразователя, т. е. при $\alpha = 1$ или $Z_n = Z_i$.

Следует иметь в виду, что правило согласования отнюдь не требует равенства R_i и R_n с какой-либо высокой степенью точности. Максимум кривой 1 на рисунке 3.3 весьма пологий, поэтому практически согласование обеспечивается при $\alpha = 0,2 \dots 5$ и лишь при $\alpha > 10$ или $\alpha < 0,1$ мощность в нагрузке P_n уменьшается соответственно в α или $1/\alpha$ раз.

В ряде случаев приходится сознательно отступать от условий согласования по мощности. Чаще всего это делается ради уменьшения тех или иных погрешностей измерительной аппаратуры. Для термоэлектрического преобразователя, например, условием согласования является равенство сопротивлений $R_{тп} + R_{л} = R_n$, где $R_{тп}$ – сопротивление термопары; $R_{л}$ – сопротивление удлинительных проводов (линии) и R_n – сопротивление нагрузки, в качестве которой может быть использован милливольтметр или цифровой мультиметр. Однако при соблюдении этого условия погрешность преобразования будет определяться изменением сопротивления линии $R_{л}$ и термопары $R_{тп}$. Однако при соблюдении условия $R_n \gg R_{тп} + R_{л}$ данная погрешность может быть сведена к пренебрежимо малому значению.

В подобном же положении оказываются схемы, работающие с гальваническими преобразователями. Прохождение относительно больших токов (больше 1 мкА) через электролит гальванического преобразователя или нормального элемента вызывает явление поляризации на их электродах и тем самым изменяет результирующую ЭДС. Поэтому входные сопротивления цепей, работающих с такими преобразователями, выбирают исходя из неравенства $R_n > 1000 R_i$.

Таким образом, условие, при котором сопротивление вторичного преобразователя во много раз превосходит внутреннее сопротивление преобразователя, называется согласованием по напряжению.

Включение вторичного измерительного преобразователя в разрыв электрической цепи первичного преобразователя приводит к необходимости

соблюдения неравенства $R_n \ll R_i$. В противном случае включение вторичного измерительного преобразователя может оказать сильное влияние на режим согласования и, как следствие, приведет к значительному уменьшению значения выходного сигнала. **Описанный режим согласования называется режимом согласования по току.**

Случайные погрешности коммутации могут быть вызваны прохождением на вход АЦП через разомкнутые ключи сигналов от выключенных каналов. Поскольку при создании измерительных систем обеспечивается одинаковый диапазон изменения сигналов на выходе всех измерительных каналов, примем в качестве верхнего значения этого диапазона напряжение U_{\max} . Тогда от выключенных каналов на вход АЦП может поступать максимальное напряжение помехи, которая будет носить случайный характер:

$$U_{\text{пом}} = (k - 1)U_{\max} \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{раз}} + R_{\text{вх}}} \approx (k - 1)U_{\max} \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{раз}} + R_{\text{вх}}}. \quad (3.9)$$

Данное соотношение показывает, что случайная погрешность коммутации определяется не только собственными свойствами мультиплексора, но и входным сопротивлением АЦП. Изложенное свидетельствует о том, что для автономного мультиплексора нецелесообразно нормировать метрологические характеристики. Достаточно указывать только пределы возможных значений сопротивлений замкнутых и разомкнутых ключей. Для потребителя могут быть полезными сведения об остаточных токах разомкнутых ключей и остаточных напряжениях замкнутых ключей, которые участвуют в появлении случайной погрешности коммутации.

3.2 Аналого-цифровой преобразователь

Аналого-цифровой преобразователь предназначен для преобразования аналогового сигнала, поступающего с масштабирующего устройства, в дискретную последовательность кодовых (цифровых) слов. Процесс преобразования представляет собой дискретизацию сигнала по времени с одновременным квантованием по уровню.

Дискретизацией называется процесс замены мгновенных значений непрерывного сигнала совокупностью его дискретных значений (выборок), полученных в последовательные моменты времени $t_i + \Delta t$. Интервал времени $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ называется шагом или интервалом дискретизации. Дискретизация бывает равномерной с шагом $\Delta t = \text{const}$ и неравномерной с шагом, значение которого меняется либо по определенному закону, либо случайно.

Минимально возможное значение Δt равно времени преобразования АЦП. Частоту дискретизации $f_s = 1/\Delta t$ (*sample rate*) иногда называют *частотой выборки* или *частотой сэмплирования*. При определении частоты дискретизации необходимо пользоваться теоремой Котельникова, которая

гласит, что произвольный аналоговый сигнал $x(t)$ с ограниченным спектром может быть однозначно восстановлен по его отсчетам, взятым с частотой $f_s \geq 2f_{\max}$, где f_{\max} – граничная частота спектра сигнала.

При этом сигнал $x(t)$ можно представить в виде ряда

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m\Delta) \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{\Delta} (t - m\Delta) \right], \quad (3.10)$$

где $\operatorname{sinc}(x) = \sin x/x$ и интервал дискретизации удовлетворяет условию $0 < \Delta \leq 1/2f_{\max}$.

Верхняя граничная частота спектра сигнала f_{\max} может превышать полосу пропускания АЦП $f_{\text{АЦП}}$. Поэтому, как показывает практика, максимальная частота дискретизации f_s должна быть больше $f_{\text{АЦП}}$ как минимум в пять раз. В этом случае восстанавливающий фильтр $\sin x/x$ может точно воспроизводить форму высокоскоростных сигналов с разрешением в диапазоне десятков пикосекунд. Частота дискретизации задается генератором тактовых импульсов (ГТИ), который иногда называют генератором развертки. Обычно ГТИ входит в состав микроконтроллера, который является управляющим центром АЦП.

Под *квантованием* по уровню понимают операцию замены ее истинных мгновенных значений ближайшими фиксированными величинами из некоторой совокупности дискретных значений, называемых *уровнями квантования*.

Уровни квантования представляются соответствующими числами, поэтому операция квантования аналогична с математической точки зрения операции округлению чисел. Разность ΔX между двумя соседними уровнями квантования называют *шагом квантования*. Как и Δt , ΔX может быть постоянным (равномерное квантование) и переменным (неравномерное квантование). Обязательность квантования по уровню вытекает из самой природы цифрового представления величин. Действительно, какое бы большое число градаций ни было принято для отображения всех возможных значений $X(t)$, неизбежно округление результатов, т. к. аналоговая величина может принимать бесконечное число значений.

Цифровое кодирование квантованных уровней заключается в формировании дискретных сигналов, несущих информацию о значениях этих уровней. Например, первичный цифровой код на выходе АЦП может представлять собой последовательность прямоугольных импульсов, комбинация которых определяет значение квантованного уровня.

В отсчетном устройстве цифрового прибора результат измерения должен быть представлен в виде десятичного числа, удобного для восприятия оператором. Поскольку непосредственное преобразование первичного кода в десятичное число затруднительно, в таких случаях предусматривают, как правило, промежуточное кодирование на основе одной из позиционных систем счисления.

Для непосредственного кодирования одного двоичного разряда достаточно условиться, что нулевому (низкому) уровню сигнала соответствует символ «0», а единичному (высокому) уровню – символ «1». Такой сигнал называется логическим. Аппаратурная реализация логических сигналов базируется на элементах, имеющих два устойчивых состояния (например, включено – выключено, открыт – закрыт и т. д.). Это так называемые двоичные элементы. Анализ и синтез таких устройств осуществляется с помощью алгебры логики.

Однако двоичный код неудобен для управления отсчетным устройством, отображающим информацию в десятичной системе счисления. Поэтому в аналого-цифровых измерительных приборах используются двоично-десятичные (тетрадно-десятичные) коды. Каждая десятичная цифра (0..9) кодируется четырьмя двоичными цифрами 0 и 1 (тетрада). Наибольшее распространение получил код с весовыми коэффициентами 8421, например, десятичное число 7 в двоичной системе будет кодироваться 0111.

3.3 Погрешности аналого-цифрового преобразования

Процесс преобразования аналоговой величины в цифровой код сопровождается появлением погрешностей, специфичных для цифровых преобразователей. Это обусловлено тем, что операции дискретизации и квантования всегда связаны с потерей части исходной измерительной информации и поэтому являются источником погрешности, характерной только для АЦП. Основная погрешность цифровых преобразователей складывается обычно из четырех составляющих:

- погрешности дискретности;
- погрешности реализации уровней квантования;
- погрешности от наличия порога чувствительности сравнивающего устройства;
- погрешности от действия помех на входной сигнал.

Погрешность дискретности. Операция дискретизации аналогового сигнала при чрезмерно большом шаге Δt влечет за собой потерю части исходной информации об исследуемом сигнале. Максимально допустимое значение Δt_{\max} определяется шириной частотного спектра преобразуемой величины $X(t)$ по известной теореме Котельникова. При правильном выборе шага дискретизации погрешность дискретности может быть сведена к минимуму и не будет являться каким-то принципиальным ограничением для аналого-цифровых измерительных преобразователей по сравнению с аналоговыми преобразователями.

В этом плане характерен следующий пример. Если поставить задачу измерения напряжения аналоговым вольтметром с приведенной погрешностью 0,01 %, то длина его шкалы при разрешающей способности глаза оператора 0,5 мм должна быть равна $\frac{0,5}{0,01} 100 = 5 \cdot 10^3$ мм, т. е. практически 5 м, что для

аналогового измерительного прибора является нереальной величиной. В то же время цифровой вольтметр с такой погрешностью должен иметь 5-разрядный десятичный знаковый индикатор, что вполне реализуемо на практике.

Погрешности реализации уровней квантования. Для осуществления операции квантования необходимо создать определенное количество ступенек напряжения, которые будут соответствовать уровням квантования. Количество уровней квантования зависит от разрядности преобразователя. Для 4-разрядного АЦП количество уровней будет равно 16 (2^4), 8-разрядного – 256 (2^8), 12-разрядного – 4096 (2^{12}) и т. д. Наиболее просто сформировать данные уровни из высокостабильного постоянного напряжения путем деления его с помощью прецизионного делителя напряжения.

Например, для 4-разрядного преобразователя при выходном напряжении ИОН, равном 16 В, получим 16 уровней квантования в диапазоне от 0 до 15 В с шагом квантования ΔX , равным 1 В. Поэтому формирование уровней квантования сопровождается появлением случайных погрешностей округления. Если полагать, что случайные погрешности округления распределены равномерно в пределах от $-\Delta X/2$ до $+\Delta X/2$ (от $-0,5$ до $+0,5$ В), то среднеквадратичное значение погрешности квантования составит $\Delta X^2/12$ ($\pm 0,02$ В).

Кроме того, преобразуемая аналоговая величина квантуется в соответствии с реальными значениями уровней, а отсчет значений уровней квантования производится в соответствии с принятыми значениями. В этом случае необходимо учитывать нестабильность выходного напряжения ИОН и реальные значения матрицы сопротивлений. Это обстоятельство приводит к тому, что формирование уровней квантования будет производиться с инструментальной погрешностью.

Погрешности от наличия порога чувствительности сравнивающего устройства. В качестве сравнивающего устройства обычно используется компаратор аналоговых сигналов, на неинвертирующий и инвертирующий входы которого подаются аналоговые сигналы, значения которых необходимо сравнить. Обычно на неинвертирующий вход подается опорное напряжение.

Выходной сигнал компаратора будет иметь высокий уровень (логическая единица), если сигнал на неинвертирующем входе будет больше, чем сигнал на инвертирующем, и низкий уровень (логический ноль), если сигнал на неинвертирующем входе будет меньше, чем сигнал на инвертирующем.

Компаратор имеет определенные уровни срабатывания, которые определяют зону неопределенности компаратора и обуславливают возникновение погрешности компарирования, т. е. погрешности сравнения неизвестной и известной величин. Это явление называется порогом срабатывания сравнивающего устройства.

Для уменьшения погрешности компаратора необходимо уменьшить интервал неопределенности входных напряжений, что можно обеспечить использованием операционных усилителей с большим коэффициентом усиления и введением в схему положительной обратной связи.

Погрешности от действия помех на входной сигнал. При воздействии помехи на входной измерительный сигнал аналого-цифрового преобразователя происходит изменение амплитуды сигнала (его увеличение на величину помехи или его уменьшение). При воздействии такого искаженного сигнала на вход компаратора уровни его выходных значений будут изменяться, что приведет к изменению выходного цифрового кода.

3.4 Сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи

Упрощенная эквивалентная структурная схема АЦП, построенного по принципу сигма-дельта преобразования, представлена на рисунке 3.5. Генератор тактовой частоты f_0 , которая выбирается в диапазоне частот от 4,0 до 100,0 МГц, инициирует работу $\Sigma\Delta$ – преобразователя, преобразующего входное постоянное напряжение в нерегулярный поток импульсов, средняя интенсивность которого с высокой степенью линейности пропорциональна входному напряжению $f_{cp} = KU_x$. Эти импульсы поступают на вход многокаскадного цифрового фильтра, который считает поступившие импульсы за время, равное n периодам частоты f_0 , благодаря чему в АЦП реализуется операция интегрирования в течение времени n/f_0 . Количество периодов усреднения n может быть равно 256.

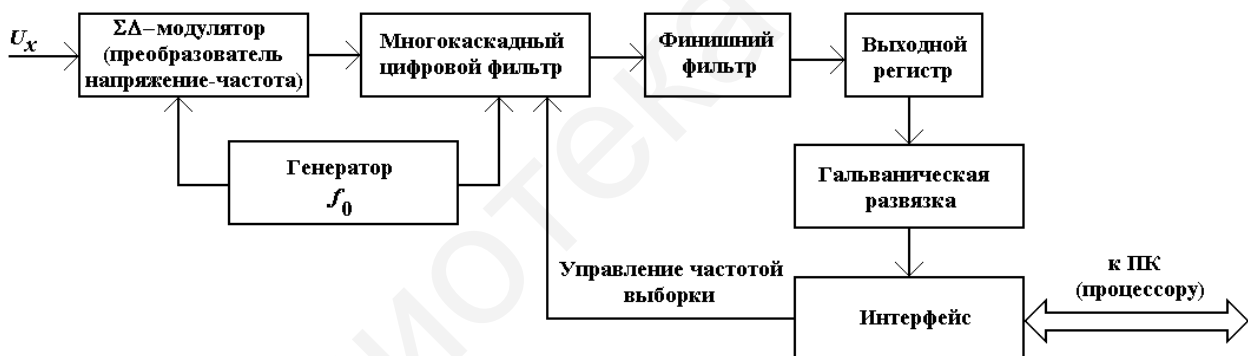


Рисунок 3.5 – Типовая структурная схема $\Sigma\Delta$ АЦП

Сигма-дельта преобразователь может состоять из нескольких звеньев, число которых k обуславливает обозначение порядка $\Sigma\Delta$ АЦП. Вследствие высокой частоты f_0 и относительно длительного времени интегрирования, выражающегося числом n/f_0 , амплитудно-частотная характеристика $\Sigma\Delta$ АЦП может быть представлена в виде

$$A\left(\frac{f}{f_0}\right) = \left|K\left(j\frac{f}{f_0}\right)\right| = \left|\frac{\sin\left(\frac{\pi n f}{f_0}\right)}{n \sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right)}\right|^k, \quad (3.11)$$

где k – порядок АЦП (например, 4-разрядный).

Количество каскадов цифрового фильтра обычно не меньше k . Выходной фильтр включается для выполнения функции выравнивания амплитудно-частотной характеристики АЦП. Длительность времени интегрирования меняется по командам от компьютера, и тем самым регулируется быстродействие АЦП в зависимости от предполагаемой скорости изменения входного сигнала. Это регулирование осуществляется изменением параметров цифрового фильтра.

Квантованием называется процесс замены непрерывного множества значений сигнала от U_{\min} до U_{\max} дискретным множеством значений U_k – уровней квантования. Шаг (ступень, интервал) квантования ΔU есть разность соседних уровней квантования $\Delta U = U_k - U_{k-1}$. Квантование может быть равномерным и неравномерным.

При равномерном квантовании шаг квантования $\Delta U = (U_{\max} - U_{\min})/m$, где m – количество уровней квантования. При аналого-цифровом преобразовании амплитуда выборки преобразуется в m -разрядное двоичное число, поэтому число уровней квантования $m = 2M$. Число ступеней квантования $S = 2M - 1$.

На рисунке 3.6 показан пример преобразования синусоидального сигнала $\sin \omega t$ при помощи 3-битового ($M = 3$) АЦП с равномерной дискретизацией.

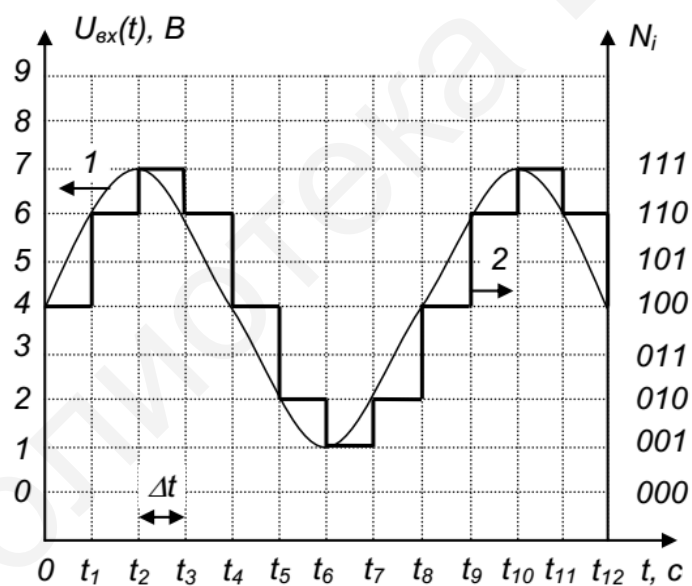


Рисунок 3.6 – Преобразование аналогового сигнала 1 в «цифровую» форму 2

Кривая 1 показывает график сигнала, мгновенные значения которого отсчитываются по левой шкале в вольтах. Ломаная линия 2 показывает двоичное число, соответствующее амплитуде выборки, которое отсчитывается по правой шкале. В данном примере ступень квантования равна 1 В, что соответствует единице младшего разряда, т. е. единице дискретности. Это идеализированный случай, поскольку предполагается, что длительность выборки в момент времени t_i равна нулю, поэтому значение амплитуды выборки сохраняется неизменным до следующей выборки в момент времени $t_i + 1$.

Как видно из рисунка 3.6, 3-битовый АЦП очень грубо осуществляет преобразование сигнала, поскольку имеет всего восемь уровней квантования. В компьютерно-измерительных системах применяются как минимум 8-разрядные АЦП, имеющие 256 уровней квантования. Это обусловлено следующими соображениями. Как показывают исследования, для хорошего отображения сигнала на экране необходимо иметь как минимум две точки на 1 мм. Экран средних размеров имеет высоту 120 мм и ширину 160 мм. Следовательно, на экране должны располагаться $240 \times 320 = 76\,800$ точек или более. Таким образом, для формирования хорошего изображения АЦП должен иметь не менее восьми двоичных разрядов (256 точек по вертикали), а запоминающее устройство (ЗУ) должно содержать как минимум 256 ячеек.

Современные $\Sigma\Delta$ АЦП позволяют выполнять до 60 000 преобразований в секунду. Основная инструментальная погрешность таких АЦП находится в пределах от 0,01 до 0,001 %. Незначительное неудобство $\Sigma\Delta$ АЦП заключается в том, что при ступенчатом изменении входного сигнала (обычно напряжения), происходящем в многоканальных измерительных системах при переключении каналов, в АЦП возникает переходный процесс, порожденный цепочкой фильтров. В результате первые несколько измерений после переключения выполняются со значительной погрешностью. Количество таких измерений в зависимости от режима работы АЦП может составлять от 3 до 8. Это следует иметь в виду при использовании $\Sigma\Delta$ АЦП после мультиплексора в многоканальных измерительных системах.

3.5 Связь цифровых компонентов измерительных каналов с компьютером

Для связи автономных АЦП и ЦАП, которые выпускаются как изделия, с компьютером применяется один из стандартных интерфейсов. Любой из них представляет собой совокупность:

- правил обмена информацией (протокол обмена);
- стандартов на параметры информационных и служебных сигналов;
- стандартов на конструкции соединительных устройств.

Наиболее популярными интерфейсами, обеспечивающими взаимную связь между компьютером и автономными АЦП и ЦАП, а также другими периферийными устройствами (например, устройствами выборки-хранения, автономными мультиплексорами) являются *RS232 (COM-порт)*, *RS485*, *USB*, *IEEE1394*, *PXI*. АЦП и ЦАП, входящие в состав измерительных компонентов, могут обмениваться информацией по иным интерфейсам, соответствующим стандартам на крейты, в которые должны встраиваться измерительные преобразователи и специальные компьютеры.

Для АЦП, встраиваемых в компьютеры, интерфейсом является интерфейс компьютера, а именно, интерфейс *PCI* или интерфейс портативных компьютеров (ноутбуков) *PCMCIA*.

Внутренние интерфейсы компьютера имеют следующие характеристики:

- *PCI* – от 4 до 20 входов в промышленных компьютерах, скорость обмена – 132 Мбайт/с;
- *PCMCIA* – до 3 входов в портативных компьютерах, скорость обмена – до 1 Мбайт/с.

Сравнительные характеристики интерфейсов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнительные характеристики интерфейсов

Характеристика интерфейса	Тип интерфейса		
	<i>RS232</i>	<i>RS485</i>	<i>USB</i>
Скорость обмена	до 115 Кбит/с	до 10 Мбит/с	до 12 Мбит/с
Количество устройств	1	31	127
Количество проводов	9	9	4
Расстояние	17 м	1200 м	5 м

В последнее время широкое распространение получили беспроводные интерфейсы, такие, как *Bluetooth*, *Wi-Fi*, *ZigBee* и др. При работе с такими интерфейсами гальваническая развязка между выходным регистром и устройством интерфейсного сопряжения не требуется.

3.6 Метрологические характеристики аналого-цифровых и цифроаналоговых измерительных преобразователей

Одна из метрологических характеристик АЦП и ЦАП, а именно статическая характеристика преобразования, имеет особенность, порожденную дискретностью преобразования и ограниченностью количества разрядов выходного кода АЦП и входного кода ЦАП. Характерные примеры статических характеристик преобразования АЦП и ЦАП приведены на рисунке 3.7, *а* и *б* соответственно.

Поскольку характеристика преобразования АЦП при дискретизации (см. рисунок 3.7, *а*) ступенчатая, ΔN – младший разряд выходного кода АЦП, ΔX – цена единицы младшего разряда этого кода. Цена единицы младшего разряда представляется в единицах входной аналоговой величины.

Что касается ЦАП (см. рисунок 3.7, *б*), то его входные кодовые сигналы могут отличаться друг от друга на единицу младшего разряда. Поэтому функция преобразования ЦАП, т. е. зависимость выходного аналогового напряжения от значения входного кодированного сигнала может быть представлена в виде отдельных точек.

Несмотря на явную нелинейность представленных функций преобразования АЦП и ЦАП, данные преобразователи являются линейными, поскольку все искажения номинальной функции преобразования расположены на прямой линии. Для получения логарифмической или экспоненциальной

зависимости выходного напряжения от входного кода используются нелинейные АЦП и ЦАП.

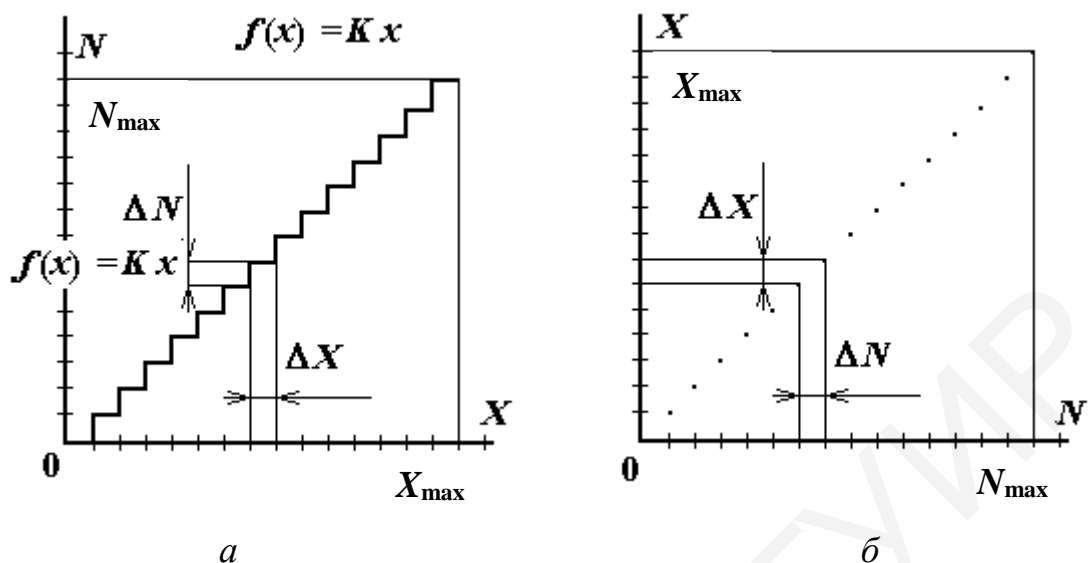


Рисунок 3.7 – Функции преобразования аналого-цифровых (а) и цифроаналоговых (б) преобразователей

Для аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в соответствии с ГОСТ 8.009–84 нормируются следующие метрологические характеристики:

- диапазон изменения напряжения входного сигнала – основного информативного параметра;
- диапазон изменения неинформативного параметра, но оказывающего влияние на основной параметр;
- диапазон изменения влияющих величин, таких как температура, давление, влажность и т. п.;
- пределы допускаемой основной погрешности преобразования – для линейных АЦП либо предел допускаемой основной *приведенной* погрешности – для АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного напряжения;
- входное сопротивление (импеданс);
- вид выходного кода и количество разрядов;
- значение единицы младшего разряда счета.

Если АЦП выпускается в виде микросхемы широкого применения, для него могут нормироваться такие характеристики, как дифференциальная нелинейность, вызванная непостоянством цены младшего разряда выходного кода в диапазоне преобразования, и интегральная нелинейность, вызванная отличием реальной функции преобразования от номинальной линейной функции. Дифференциальная нелинейность нормируется относительной характеристикой погрешности цены деления младшего разряда по отношению к номинальной цене единицы младшего разряда кода. Интегральная нелинейность нормируется, как отношение наибольшего отклонения реальной функции

преобразования от номинальной к ширине диапазона преобразования. Эти характеристики выражаются в процентах.

Для цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) нормируются следующие метрологические характеристики:

- количество разрядов;
- описание входного кодированного сигнала, диапазон входных информационных значений, номинальная единица младшего разряда счета;
- значение напряжения источника опорного напряжения и его стабильность;
- диапазон изменения величины на выходе ЦАП, соответствующий диапазону значений входного кода;
- выходное сопротивление или выходной импеданс (указывается номинальное значение и допускаемые пределы отклонения от него);
- пределы допускаемой основной относительной погрешности;
- пределы допускаемых дополнительных погрешностей (для каждой влияющей величины нормируются отдельно);
- время реакции выходного сигнала на изменение входного кода на величину, равную 80 % от диапазона значений этого кода.

Кроме перечисленных метрологических характеристик АЦП и ЦАП в некоторых случаях нормируются следующие характеристики:

- интегральная нелинейность – максимальное отклонение значений функции преобразования ЦАП от номинальной;
- дифференциальная нелинейность, т. е. различие единицы младшего разряда входного кода ЦАП во всем диапазоне преобразования ЦАП.

3.7 Устройство выборки-хранения

При высокой скорости изменения измерительного сигнала, подаваемого на вход АЦП, для исключения значительной аддитивной погрешности преобразования необходимо использовать устройство выборки-хранения (УВХ). Возникновение погрешности обусловлено тем, что входной сигнал АЦП может существенно измениться от момента запуска до завершения процесса преобразования в цифровой код. В этом случае результат преобразования, полученный после момента запуска АЦП с задержкой на время преобразования, будет отличаться от того значения сигнала, которое он имел в момент запуска. Это отличие будет являться погрешностью, называемой *апертурной погрешностью*, поскольку она возникает вследствие неопределенности датирования, т. е. фиксации момента времени, к которому относится полученный результат измерения (преобразования). Эта погрешность играет существенную роль при одноканальных измерениях мгновенных значений одного сигнала, когда получаемые результаты предназначаются, например, для спектральных исследований, для выполнения которых требуются результаты, полученные с постоянным интервалом дискретизации. При многоканальных измерениях и

циклическом опросе каналов результаты прямых измерений изменяющихся сигналов в различных каналах будут получены в разное время, и их совместное использование для получения результатов косвенных измерений может привести к значительным погрешностям.

Устройство выборки-хранения предназначено для значительного уменьшения погрешностей, вызванных неопределенностью датирования получаемых результатов. Это устройство выполняет следующую функцию. При поступлении импульса запуска УВХ переходит из режима *слежения* в режим *хранения*. В режиме слежения УВХ передает на выход входной сигнал с коэффициентом 1. При переходе в режим хранения на выходе УВХ фиксируется и сохраняется постоянный сигнал, равный тому значению входного сигнала, которым он обладал в момент прихода импульса запуска. Простейшая схема, поясняющая работу УВХ, представлена на рисунке 3.8.

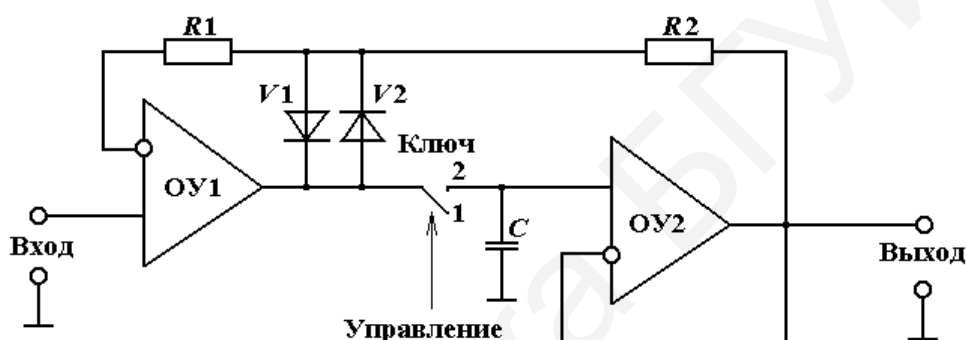


Рисунок 3.8 – Схема устройства выборки-хранения (УВХ)

На рисунке 3.8 операционный усилитель ОУ1 используется в качестве усилителя сигнала с единичным коэффициентом усиления, который достигается за счет отрицательной обратной связи, образованной сопротивлениями $R1$ и $R2$. Второй операционный усилитель ОУ2 включен по схеме повторителя напряжения и используется для согласования низкого сопротивления на его входе с высоким выходным сопротивлением.

Режим слежения за изменением входного напряжения осуществляется при замкнутом состоянии ключа SA1 (положение 2). При этом конденсатор C1 быстро заряжается через небольшое выходное сопротивление операционного усилителя ОУ1 и как бы следит за изменением напряжения входного сигнала. При подаче импульса управления ключ SA1 *размыкается* (положение 1) и конденсатор C1 запоминает значение напряжения на входе УВХ в момент размыкания ключа SA1. Разряд конденсатора C1 происходит медленно через входное сопротивление повторителя напряжения ОУ2. Время разряда конденсатора выбирается таким, чтобы АЦП «успел» произвести преобразование аналогового напряжения в цифровой код до момента изменения входного сигнала.

Диоды V_2 , V_1 предохраняют операционный усилитель ОУ1 от насыщения, которое может возникнуть при разомкнутом ключе K . Достигнутое к данному моменту время перехода от режима слежения к режиму хранения составляет десятки наносекунд. Типичное применение УВХ – перед АЦП поразрядного уравнивания.

Импульс, запускающий АЦП, – это импульс, запускающий УВХ, задержанный на время перехода от режима слежения к режиму хранения. В современных КИС перед мультиплексором устанавливаются многоканальные УВХ, все каналы которых переходят в режим слежения одним импульсом запуска, после которого выполняется периодический запуск АЦП. В последнее время все чаще изготавливаются многоканальные АЦП, в составе которых находится не только мультиплексор, но и встроенное УВХ с тем же числом каналов.

3.8 Программно-управляемые меры напряжения и частоты

Для компьютерно-измерительных систем, содержащих большое количество измерительных, преобразовательных и вычислительных модулей, практически невозможно обеспечить стабильность свойств всех узлов в течение длительного периода времени – межповерочного интервала. Поэтому в пределах межповерочного интервала необходимо обеспечить контроль работоспособности основных элементов КИС, так или иначе обуславливающих ее метрологические характеристики. Поэтому такие системы нуждаются в контроле метрологических характеристик значительно чаще, чем обычные средства измерений. Поэтому программно-управляемые *меры напряжения и частоты* представляют собой тот необходимый минимум средств, которые позволяют осуществлять самопроверку компьютерно-измерительной системы в пределах межповерочного интервала. Самопроверке может подвергаться не вся система, а только ее электронная часть, которая наиболее сильно подвержена внешним воздействиям влияющих величин.

В составе КИС имеется целый набор различных задающих кварцевых генераторов и источников опорных напряжений. Казалось бы, что это обеспечивает возможность использовать их для осуществления самопроверки КИС. Однако зависимость значений частоты и напряжения этих устройств от режима работы других модулей КИС, обусловленная связью модулей между собой, не позволяет получить высокую стабильность частоты и напряжения и использовать соответствующие устройства в качестве встроенных мер.

Для исключения влияния элементов системы на меры напряжения и частоты блок встроенных мер должен представлять собой аппаратно- и программно-независимую систему, связанную с КИС только через аналоговые входы физического уровня – мультиплексор.

Один из возможных вариантов программно-управляемой меры напряжения представлен на рисунке 3.9. В качестве источников опорного

напряжения в данном устройстве применены термокомпенсированные полупроводниковые стабилизаторы напряжения, которые имеют температурный коэффициент $5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, небольшое дифференциальное сопротивление. Стабилизаторы также нечувствительны к механическим перегрузкам. Стабилитроны уступают нормальным элементам по временной стабильности (соответственно). Предварительная термотренировка стабилизаторов напряжения и их отбор по уровню электрических шумов позволяют повысить их долговременную стабильность до уровня 0,01 и 0,002 %. Тенденция к постоянному улучшению характеристик стабилизаторов напряжения по мере совершенствования технологии их изготовления позволяет надеяться на достижение в будущем для них параметров лучших нормальных элементов.

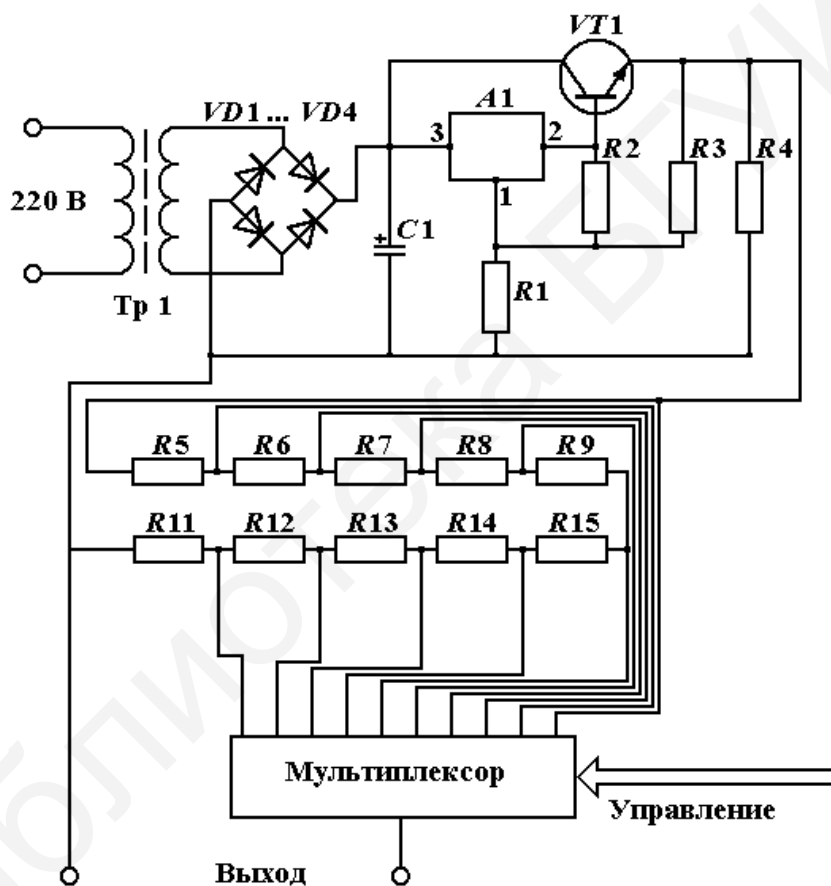


Рисунок 3.9 – Схема программно-управляемой меры напряжения

Для большей гарантии прецизионных КИС рекомендуется использовать групповую меру напряжения, состоящую из трех и более стабилизаторов напряжения, включенных параллельно. Периодические сличения всех мер группы не только повышают точность групповой меры и КИС в целом, но и служат средством диагностики состояния входящих в группу отдельных мер напряжения.

Элементы групповой меры имеют обычно достаточно близкие параметры. Не представляет проблемы автоматическая разбраковка партий стабилизаторов

на тройки с разностью напряжений стабилизации не более 10 мВ. Например, в партии из 100 шт. однотипных стабилизаторов в такие тройки удастся скомпоновать практически все. Подгонкой тока стабилизации в допустимых пределах напряжения стабилизации отобранных элементов могут быть приведены к одному значению, а автоматическая выбраковка и замена их в составе группы решается аппаратными средствами. Но такой подход не является оптимальным для КИС, поскольку целиком базируется на аппаратных средствах и не использует программные возможности.

Более эффективным в КИС является метод контроля разностей напряжений между элементами группы с помощью АЦП и программный выбор наиболее достоверного элемента как опорного. Разница значений напряжений не является препятствием, если она не превышает диапазона измерения напряжений АЦП. При самопроверке КИС АЦП выступает в этом случае в качестве сравнивающего устройства – компаратора, а групповая мера является по существу многозначной мерой, дефектные значения которой автоматически исключаются.

Для поверки КИС во всем динамическом диапазоне необходимо иметь ряд значений напряжений. Эти напряжения задаются с помощью резистивных делителей, подключаемых к выходу стабилизатора напряжения. Коммутация выходных сигналов такого делителя (резисторы R_5 – R_{15} на рисунке 3.9) осуществляется с помощью мультиплексора. Управление коммутацией осуществляется программно с помощью кодовых комбинаций, поступающих от персонального компьютера.

Наибольшее распространение в качестве таких делителей получили резисторные матрицы, выполненные в виде микросхем с токовой подгонкой значений сопротивлений. Такие резисторные матрицы имеют температурный коэффициент порядка $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и долговременную стабильность не хуже 10^{-5} . Таким образом, погрешность всех значений опорных напряжений определяется в основном погрешностью напряжений на стабилизаторах.

Для уменьшения влияния колебаний окружающей температуры на меры напряжения блок опорных напряжений обычно помещают в термостат, в котором поддерживают температуру 310 К со стабильностью 0,1 К. Для обеспечения еще лучших показателей стабильности за короткий промежуток времени сочетают активное термостатирование с пассивным за счет увеличения массы термостата. Недостатком такого подхода к повышению точности измерений является большое время выхода КИС на рабочий режим – до одного часа.

Большой резерв вычислительной и измерительной мощности КИС позволяет решить задачу уменьшения температурной погрешности измерений программным способом. В состав блока встроенных мер напряжения вводится преобразователь температуры, например, терморезистивный преобразователь с соответствующей схемой включения в электрическую цепь. Система периодически контролирует температуру внутри блока и корректирует значения

опорных напряжений по хранящимся в памяти температурным зависимостям. Значения для корректировки температурных погрешностей измеряются и записываются в память системы при снятии функции преобразования мер напряжения либо калибровке КИС по внешней мере напряжения. Выход термостата на заданный температурный режим способствует большей временной стабильности мер напряжения. Таким образом, замена на физическом уровне термостата с блоком авторегулирования на преобразователь температуры позволила сместить задачи на более высокие уровни, т. е. обеспечить температурную компенсацию преимущественно программным способом.

Аналогичные приемы применяются для уменьшения температурной погрешности стандарта частоты, функции которого в средствах измерений обычно выполняет кварцевый генератор с делителем частоты и программным управлением выходными частотами. Один из возможных вариантов программно-управляемой меры частоты представлен на рисунке 3.10.

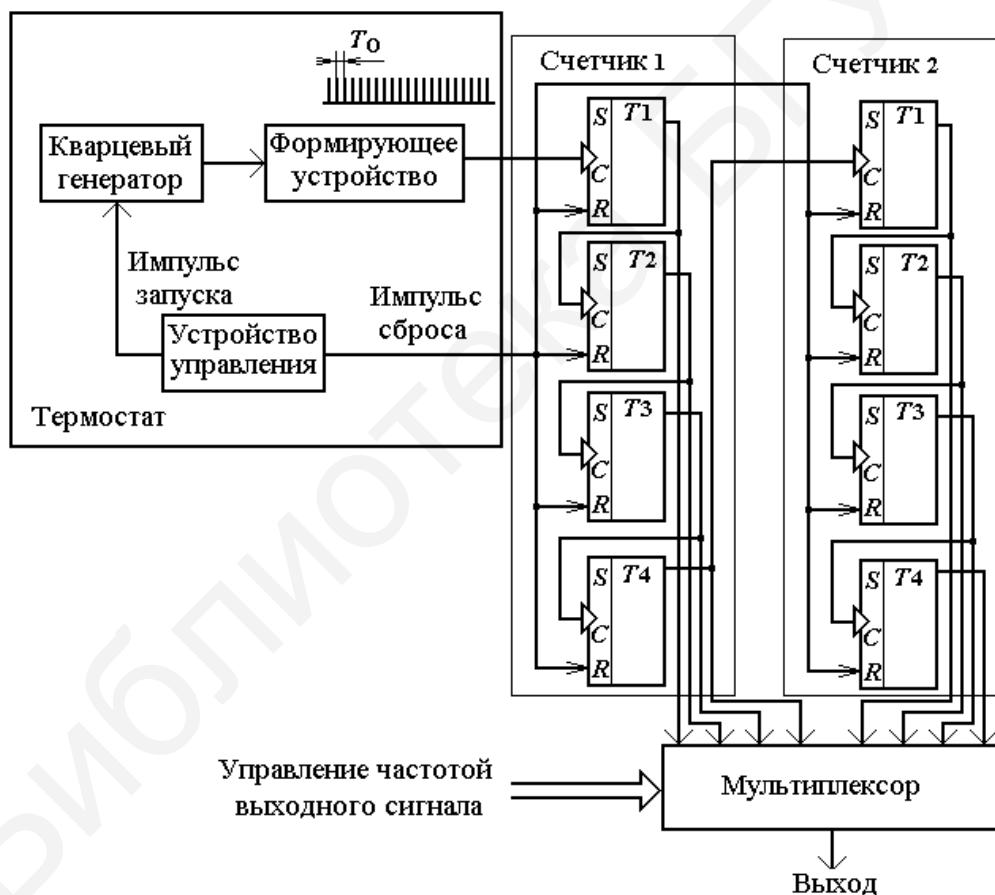


Рисунок 3.10 – Структурная схема программно-управляемой меры частоты

Основой данной меры является кварцевый генератор с встроенным в термостат преобразователем температуры, неисключенный остаток температурной погрешности задания частоты которого не превышает 10^{-8} . Выходной сигнал генератора с помощью формирующего устройства преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов. Для

формирования сетки выходных частот используются делители частоты кварцевого генератора, выполненные на основе счетчиков импульсов. В зависимости от назначения таких счетчиков может быть два (как показано на рисунке 3.10) или больше при их последовательном включении.

Первичная поверка КИС заключается в определении индивидуальных температурных характеристик программно-управляемых мер напряжения и частоты по внешним стандартам более высокого разряда. Эта процедура производится автоматически по программе при трех температурах окружающей среды – нормальной, нижней и верхней. По результатам измерений вычисляется набор констант, описывающих все индивидуальные характеристики мер напряжения и частоты.

Табличные значения определенных в процессе поверки калибровочных значений записываются в базу данных компьютерно-измерительной системы (в ПЗУ персонального компьютера). Дальнейший контроль модулей КИС осуществляет периодически с помощью программно-управляемых мер напряжения и частоты при их подключении к входу аналого-цифрового преобразователя с помощью коммутатора выходных сигналов преобразователей (см. рисунок 3.2).

Повторение процедуры первичной поверки (по внешним мерам) необходимо после проведения ремонта КИС или в случае значительных расхождений между собой встроенных мер в группе.

3.9 Органы управления объектом исследования

В измерительных экспериментах, когда требуется измерять не одиночные параметры объекта исследования, а зависимости одной или нескольких физических величин от совокупности других, должны быть предусмотрены устройства, вырабатывающие соответствующие управляющие воздействия. Эти же устройства выполняют функции аппаратной части средств адаптации в АСУ ТП, ССДУ.

В зависимости от конкретного объекта исследования исполнительными органами, осуществляющими заданное изменение его состояния, могут быть нагреватели, механические манипуляторы, электродвигатели, сельсины, реле и т. п. Если преобразователи конструируют преимущественно таким способом, чтобы преобразовать физическую величину в электрический сигнал, то исполнительные органы должны быть электрически или программно-управляемыми. Но в большинстве случаев сигналы управления являются аналоговыми. Поэтому в компьютерно-измерительных системах, формирующих сигналы управления с помощью персонального компьютера, для управления объектом предусматривают специальные устройства – цифроаналоговые преобразователи (ЦАП).

В модели взаимодействия открытых систем (ВОС) ЦАП, как и АЦП, являются компонентами физического уровня, но в отличие от АЦП выполняют обратную операцию – преобразование цифрового кодированного сигнала в аналоговый. В этом случае ЦАП служат не только для управления объектом

исследования, но и для сопряжения измерительной системы с аналоговыми периферийными устройствами, например, с цифropечатающими и др. Кроме того, ЦАП придает измерительной системе дополнительную метрологическую гибкость, наделяя эту систему способностью переналаживаться с режима измерения на режим воспроизведения физической величины. Например, КИС, содержащая в своем составе прецизионный ЦАП, может работать в режиме программно-управляемой меры напряжения или сопротивления.

В тех случаях, когда выходные сигналы измерительной системы соответствуют требованиям управляющих сигналов исполнительных органов, последние могут быть непосредственно подключены к измерительной системе. В простейшем случае такое соединение осуществляется по одной – двум линиям, а управляющие сигналы (цифровые или аналоговые) формируются непосредственно модулями измерительной системы. Если связь системы с объектом требует сложной совокупности сигналов, передаваемых по нескольким линиям, целесообразно использовать стандартные интерфейсы.

Итак, исполнительные органы (устройства управления) представляют собой преобразователи электрических сигналов в другие физические величины – механические, тепловые, оптические. Не исключается и преобразование электрического сигнала в электрический сигнал, но другого уровня. Важно классифицировать эти устройства по типам входных электрических сигналов (они же выходные сигналы управления измерительной системы), чтобы определить основные требования к соответствующим модулям КИС.

В общем случае сигналы управления могут быть дискретными и аналоговыми. Дискретное управление требует сравнительно простых преобразований логических сигналов стандартного уровня в сигналы других уровней. Как правило, требуется усиление сигнала по напряжению, току или мощности. Например, для задания перемещений с помощью различных электромагнитных приводов (шаговых двигателей, электромагнитов) необходимы напряжения в десятки вольт, для управления пьезоэлектрическими преобразователями – сотни вольт, для нагревания мощных высокотемпературных термостатов – десятки вольт при токах в сотни ампер.

Сигналы мощностью до 30–40 Вт могут быть сформированы непосредственно в модулях КИС коммутацией напряжения от внутреннего или внешнего источника питания электронными и релейными коммутаторами. Выходные цепи мощных устройств управления обычно находятся под большим потенциалом относительно земли. Для защиты схем управления от этих потенциалов выходные коммутаторы модулей вывода дискретных сигналов КИС управляются через гальванические развязки – обычно трансформаторные или оптоэлектронные.

Модуль дискретного вывода представляет собой контроллер программируемого интерфейса, выходные линии которого соответствуют битам одного или нескольких регистров контроллера. Некоторые операции управления

требуют формирования связанных последовательностей сигналов на нескольких линиях. Например, для управления шаговым двигателем каждому шагу перемещения соответствует последовательность импульсов определенной продолжительности на трех выходных линиях. Если для программной реализации таких последовательностей импульсов управления недостаточно ресурсов центрального микропроцессора КИС, то соответствующие функции выполняет микроконтроллер при помощи собственных аппаратных и микропрограммных средств.

Для микропрограммной реализации однобитовых последовательностей использование универсального многоразрядного микропроцессора было бы избыточным. Поэтому такая задача часто решается простейшим однобитовым логическим микропроцессором, в ПЗУ которого записаны микропрограммы типовых импульсных последовательностей. Для управления сложными механическими перемещениями, характерными для робототехнических устройств, соответствующие микроконтроллеры, заимствованные из аппаратных средств гибких производственных систем, подключаются к КИС через стандартные интерфейсы.

Для непрерывного регулирования параметра объекта исследования обычно применяют аналоговые устройства управления. Классическим примером такого устройства является следящая система, которая сводит к минимуму сигнал ошибки – разницы между уровнем регулируемого параметра и опорным уровнем (уставкой). Для точного регулирования требуется высокая точность задания напряжения уставки, не всегда достижимая при применении выходных ЦАП измерительной системы, но достижимая для АЦП.

Рассматриваемые примеры применения КИС в метрологических работах содержат некоторые общие черты, являющиеся не следствием специального отбора, а свойственные большинству методов экспериментальных исследований вообще и применению КИС в частности. Наиболее часто применяется регулирование по отклонению цифровым методом. КИС измеряет разницу между входным сигналом и заданной величиной и с помощью исполнительного устройства, управляемого ЦАП, стремится поддерживать эту разницу на минимальном уровне. Процесс регулирования повторяется с заданной периодичностью либо специальной программой, работающей в режиме разделения времени с основным программным обеспечением, либо основной программой. Реализуемый таким образом цифровой регулятор в отличие от аналогового регулятора, обладает более широкими возможностями адаптации к объекту регулирования, т. к. его параметры доступны основной программе и могут изменяться.

Обычно в регулирующих программах используются те же алгоритмы, что и в аналоговых. Чаще всего применяется пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД) закон регулирования:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K \left(\Delta + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int \Delta dt + T_{\text{д}} \frac{d\Delta}{dt} \right),$$

где Δ – регулируемая разность; t – время; $U_{\text{вых}}$ – выходное воздействие; K – коэффициент передачи; $T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования; $T_{\text{д}}$ – постоянная времени дифференцирования.

В регулирующих программах выходное воздействие вычисляется в конечных приращениях за время, соответствующее одному циклу регулирования. Программная реализация алгоритма может предусматривать преобразование выходной величины с учетом конкретных свойств исполнительного устройства. Так, например, для устройств, имеющих ограниченный диапазон управляющих воздействий, соответственно вводятся ограничения на значение выходной величины. Для нелинейных устройств выходная величина подвергается соответствующему обратному преобразованию. Все эти модификации направлены на повышение устойчивости алгоритма. Кроме того, в программу вводятся контроль входной разности на отсутствие выбросов, ограничения на допустимые выходные воздействия, средства ускоренного выхода на рабочий режим при начальном запуске или сбое. Эти дополнения необходимы для обеспечения надежной работы регулирующей программы в условиях возможных ошибок оператора и внешних помех.

Параметры K , $T_{\text{и}}$, $T_{\text{д}}$ ПИД закона из соображения устойчивости выбираются полуэмпирическими методами, т. к. точное их вычисление без знаний параметров объекта регулирования невозможно. Можно лишь ориентировочно определить диапазоны изменения параметров. Однако для экспериментальной установки с неизменными параметрами объекта однажды найденные параметры регулирования или их функциональные зависимости от измеряемых параметров объекта могут быть заложены в программу и подставляться в закон регулирования автоматически. Используются и адаптивные алгоритмы регулирования, но они сложны, имеют значительное время адаптации и малонадежны. Опыт применения их в практике исследований показал, что чрезмерно «умные» адаптивные программы способны запутаться в процессе адаптации при импульсных помехах или во время быстрых переходных процессов.

В этом случае в контур регулирования включаются цифровые модули КИС: аналоговый измерительный сигнал преобразователя поступает на АЦП, преобразуется в цифровой код, обрабатывается микропроцессором, где вычисляется управляющее воздействие, необходимое для запуска ЦАП и выработки аналогового сигнала управления. Для процессов с инерционной связью между управляющим воздействием и регулируемым параметром (например, для тепловых процессов) достаточно иметь ЦАП невысокой разрядности, инерционное звено в следящей системе сглаживает колебания сигнала управления.

Как уже отмечалось, дискретный аналоговый сигнал практически с произвольной временной зависимостью может генерироваться микропрограммным автоматом, выдающим последовательность кодов на ЦАП.

3.10 Статистическая обработка результатов измерений в реальном масштабе времени

Способ уменьшения случайных погрешностей путем статистической обработки выборки, полученной в результате многократных измерений одной и той же величины, часто применяется и в ручных методиках измерений. Использование микропроцессора ЭВМ, производящего усреднение по выборке в реальном времени, позволило повысить точность прецизионных измерительных приборов. Значительно большая мощность ЭВМ позволяет производить в реальном времени более сложную обработку результатов и не только повышать точность измерений, но и получать из тех же результатов дополнительную информацию.

Распределение случайных погрешностей измерений, в идеальном случае имеющее нормальный вид, в реальных условиях бывает сильно искажено различными причинами. Проверка гипотезы о нормальности распределения позволяет сделать вывод о наличии или отсутствии дрейфа измеряемой величины или случайных выбросов, не «вписывающихся» в нормальное распределение. Простейшим методом является визуальный анализ оператором вида распределения, построенного КИС по результатам текущей выборки.

На рисунке 3.11 изображено распределение погрешностей АЦП КИС, построенное по результатам выборки из 100 точек. Из приведенной гистограммы видно, что причиной завышенного значения среднеквадратичного отклонения (СКО) является присутствие нескольких выбросов в области, значительно удаленной от центра распределения. Также заметно, что гистограмма имеет не колоколообразную, а трапециевидную форму, что обычно имеет место при дрейфе измеряемой величины. Убедившись в наличии выбросов, искажающих не только распределение погрешностей, но и влияющих на среднее значение, пользователь может добавить к прикладной программе, производящей множественные измерения с усреднением, программу устранения выбросов.

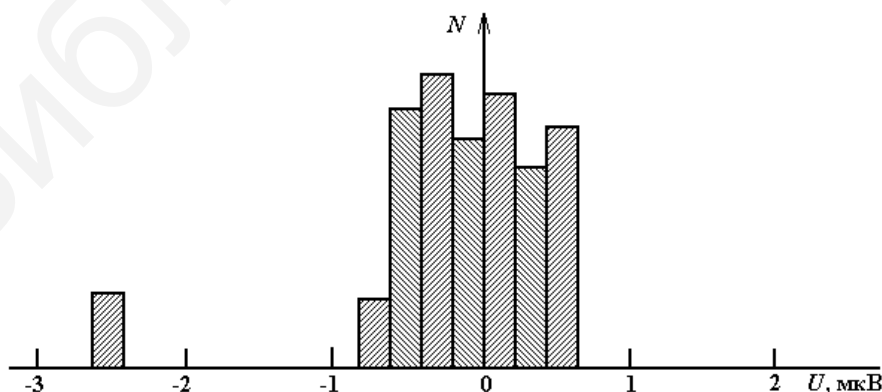


Рисунок 3.11 – Распределение погрешностей АЦП КИС

Простейшим приемом может служить усечение распределения путем исключения из него минимального и максимального значений. Примем, что с

помощью соответствующих статистических критериев было доказано наличие постоянного дрейфа. Предполагая линейную зависимость измеряемой величины от времени t

$$Y_i^* = At + B,$$

находим константы A и B методом наименьших квадратов, минимизируя функционал:

$$\Phi = \sum_{i=0} [Y_i - (At + B)]^2,$$

и вычисляем оценку Y^* в каждой точке. Значение константы A определяет скорость дрейфа, по которой можно контролировать процесс установления измеряемой величины.

Обычно процессы установления в объектах измерения идут по экспоненциальным зависимостям. В этом случае предполагаемая модель, описывающая дрейф измеряемой величины, может быть описана следующим математическим выражением:

$$Y_i = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B.$$

Коэффициенты A , B , τ определяют также методом наименьших квадратов, с той лишь разницей, что используют пакет для решения систем нелинейных уравнений, т. к. коэффициент τ входит в показатель экспоненты.

Решая эту задачу в процессе измерений, КИС может получить установившееся значение измеряемой величины (коэффициент B), не дожидаясь окончания процесса установления. Кроме того, попутно вычисляется время установления – важный параметр, определяемый свойствами объекта измерений или измерительного канала. В некоторых случаях время установления является основной измеряемой величиной (релаксационные измерения).

Обработка в реальном времени большого массива измеряемых величин по методу наименьших квадратов с целью определения параметров, описывающих их модели, является одним из самых распространенных применений КИС в системах автоматизации научного эксперимента.

Сочетание измерительных и вычислительных возможностей в КИС позволяет использовать методы оптимальной фильтрации в процессе измерений. Наиболее распространенной их реализацией является метод синхронного детектирования в сочетании с методом накопления. Так, например, при исследовании динамических характеристик первичных преобразователей быстродействие КИС может быть недостаточным для получения на участке переходной характеристики выборки необходимого объема. В таком случае КИС, периодически подавая входное возмущение на преобразователь, повторяет эксперимент, многократно накапливая достаточный для анализа объем данных.

Дальнейшая обработка производится методом наименьших квадратов, как было показано выше. Если быстродействия КИС недостаточно, чтобы произвести измерения с нужным разрешением по времени, но синхронизация измерений осуществляется со значительно меньшим шагом, выборки могут производиться с временным сдвигом. Таким образом, можно обеспечить полное заполнение выборкой всего исследуемого временного интервала с нужной степенью разрешения.

Библиотека БГУИР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемые тенденции сближения измерительной и вычислительной техники, традиционных приборов и 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 соединившем их достоинства. 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 ИИС 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, сделали идею создания КИС более привлекательной, и в последнее время наблюдается бурное развитие данного направления в области автоматизации измерений. Количество создаваемых КИС постоянно растет, стоимость их значительно снижается, поскольку на основе одной КИС появляется возможность создания новой на той же самой элементной базе, повышается их конкурентоспособность и привлекательность в отличие от обычных виртуальных средств измерений. Компьютерно-измерительные системы на основе виртуальных средств измерений получили общее признание и предлагаются на рынке измерительного оборудования наравне с традиционной измерительной техникой.

Основу концепции построения КИС составляет ориентация на создание средств измерений высокого класса, максимально приспособленных к современным компьютерным технологиям и использующих последние достижения электроники. Это могут быть multifunctional средства измерений широкого назначения, готовые к серийному производству.

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

- 1 Создание высокоточных автоматических виртуальных средств измерений, конкурентоспособных и пригодных к серийному выпуску.

2 Максимальное использование аппаратных средств персонального компьютера.

3 Реализация новых принципов измерений или модернизации известных методов измерений и способов к структурной реорганизации средств измерений.

4 Оптимизация схемотехнических решений на основе использования современных комплектующих элементов.

5 Применение современного программного обеспечения и средств цифровой логики для реализации новых схемотехнических решений.

6 Максимальная программируемость всех элементов аппаратной части.

7 Широкое использование средств автоматической регулировки входных и выходных параметров и калибровки КИС перед началом и в процессе выполнения измерений.

8 Разумное сокращение аналоговых средств преобразования и обработки, применение цифровых датчиков.

9 Энергосбережение, борьба с помехами.

10 Использование компьютерного моделирования на всех стадиях разработки.

11 Применение новейших средств и технологий программирования.

12 Приоритетность интеллектуального наполнения программы.

13 Тщательная эргономическая проработка программного обеспечения.

Практическим воплощением концепции виртуального инструмента стала среда разработки программ *LabVIEW*. Существенным отличием этой среды разработки 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.

Аппаратная составляющая виртуальных измерительных приборов, 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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АСУ ТП – автоматическая система управления технологическим процессом

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ВИС – виртуальная измерительная система

ВСИ – виртуальное средство измерения

ИВК – измерительно-вычислительный комплекс

ИИС – измерительная информационная система

ИИТ – измерительные информационные технологии

ИП – измерительный преобразователь

ИС – измерительная система

КИС – компьютерно-измерительная система

УВХ – устройство выборки-хранения

КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

ИСО – международная организация по стандартизации

МБМВ – международное бюро мер и весов

МОЗМ – международная организация законодательной метрологии

МЭК – международная электротехническая комиссия

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

ПО – программное обеспечение

ФЧХ – фазово-частотная характеристика

ЦАП – цифроаналоговый преобразователь

Список использованных источников

1 ГОСТ Р 8.818–2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Средства измерений и системы измерительные виртуальные. Общие положения. – Введ. 2014–09–01. – М. : Стандартинформ, 2014.

2 ГОСТ 8.437–81. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – Введ. 1982–07–01. – М. : Издательство стандартов, 1987.

3 ГОСТ Р 8.654–2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения. – Введ. 2016–03–01. М. : Стандартинформ, 2015.

4 Хромой, Б. П. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник / Б. П. Хромой. – М. : Горячая линия-Телеком, 2018. – 432 с.

5 Васильев, А. Е. Встраиваемые системы автоматики и вычислительной техники. Микроконтроллеры / А. Е. Васильев. – М. : Горячая линия-Телеком, 2019. – 590 с.

6 Компьютерные измерительные устройства [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа : <http://kepstr.eltech.ru>.

7 Тюрин, В. А. Цифровой запоминающий осциллограф. Устройство и принцип действия : учеб.-метод. пособие / В. А. Тюрин. – Казань : Казанский федеральный университет, 2016. – 101 с.

8 Хромоин, П. К. Электротехнические измерения : учеб. пособие / П. К. Хромоин. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Форум, 2016. – 287 с.

9 Ширяев, В. В. Компьютерные измерительные средства (КИС) : учеб. пособие / В. В. Ширяев. – Томск : ТПУ, 2008. – 190 с.

10 Баран, Е. Д. LabView FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы / Е. Д. Баран. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 448 с.

11 Клаассен, К. Б. Основы измерений. Датчики и электронные приборы / К. Б. Клаассен ; пер. с англ. У. В. Воронова, А. Л. Ларина. – 4-е изд. – Долгопрудный : Интеллект, 2012. – 352 с.

12 Бурак, А. А. Компьютерно-измерительная система для анализа цифровых сигналов : дисс. на соиск. степени магистра техн. наук : 1-38 80 01 / А. А. Бурак ; науч. рук. В. Т. Ревин. – Минск : БГУИР, 2012. – 71 с.

13 Раннев, Г. Г. Измерительные информационные системы : учебник / Г. Г. Раннев. – М. : Академия, 2010. – 336 с.

14 Федосов, В. П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 472 с.

Учебное издание

Ревин Валерий Тихонович

КОМПЬЮТЕРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Юрец*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал макет *О. И. Толкач*

Подписано в печать 10.06.2022. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 5,2. Тираж 30 экз. Заказ 92.

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.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск