

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»  
Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полнос»

*На правах рукописи*



Асадчий Артём Владимирович

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ  
ОБЪЕМА СОХРАНЯЕМЫХ ДАННЫХ

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор А. И. Солдатов

Томск – 2021

## Оглавление

Введение.....	5
1 Современное состояние устройств контроля технических объектов.....	13
1.1 Анализ требований к разработке устройств контроля.....	13
1.1.1 Классификационные признаки устройств контроля.....	13
1.1.2 Классификация метрологической информации в измерительных системах.....	16
1.1.3 Структуры устройств контроля, принципы их функционирования.....	17
1.2 Особенности построения устройств контроля и измерительных систем.....	25
1.2.1 Алгоритмический способ минимизации сохраняемых данных.....	26
1.2.2 Схемотехнические способы минимизации сохраняемых данных.....	28
1.3 Выбор оптимальной структуры устройства контроля.....	30
1.4 Обзор устройств контроля.....	33
1.5 Выводы.....	38
2 Теоретические исследования устройств контроля технических объектов.....	40
2.1 Структура модели устройства непрерывного контроля электрических параметров.....	40
2.2 Исследование работы модели устройства контроля при изменении контролируемого параметра.....	42
2.3 Результаты исследования непрерывного контроля электрических параметров.....	54
2.4 Исследование способа и устройства контроля электрических параметров, основанных на вычислении производной.....	55
2.5 Описание модели устройства контроля.....	58
2.6 Оценка качества восстановления сигнала при изменении параметров дифференцирующего устройства.....	62
2.7 Оценка качества восстановления сигнала при изменении параметров генератора, управляемого напряжением.....	66

2.8	Определение требуемого соотношения верхней граничной частоты спектра сигнала и диапазона частот генератора, управляемого напряжением .....	71
2.9	Оценка требуемого объема памяти оперативного запоминающего устройства .....	79
2.10	Выводы .....	81
3	Экспериментальное исследование устройства контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных.....	83
3.1	Описание структуры устройства контроля .....	83
3.2	Характеристики основных узлов устройства контроля .....	85
3.3	Описание экспериментальной схемы, методика эксперимента .....	88
3.4	Определение оптимального значения постоянной времени и оценка необходимого объема памяти для сохранения данных.....	90
3.5	Оценка восстановления контролируемого сигнала и определение оптимального диапазона рабочих частот генератора, управляемого напряжением.....	98
3.6	Устройство контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных.....	112
3.7	Сравнительный анализ физического износа элементов памяти .....	118
3.8	Рекомендации по проектированию узлов устройства контроля .....	121
3.9	Описание графического интерфейса пользователя .....	125
3.10	Выводы .....	127
	Заключение .....	129
	Список литературы .....	131
	Приложение А. Патенты на изобретения .....	142
	Приложение Б. Акты внедрения.....	145
	Приложение В. Дипломы .....	147
	Приложение Г. Схемы функциональных узлов имитационной модели устройства контроля .....	149

Приложение Д. Исходный код программы для реализации генератора, управляемого напряжением, на микроконтроллере .....	150
Приложение Е. Исходный код программы для реализации генератора, управляемого напряжением, на программируемой логической интегральной схеме .....	151

## Введение

На данный момент в радиоэлектронной промышленности большое внимание уделяется устройствам контроля технических объектов, в частности устройствам для мониторинга электрических параметров преобразователя напряжения, и записи информации о них в течение всего цикла производства или эксплуатации. Стоит отметить, что такие устройства могут фиксировать электрические параметры в момент аварии, тем самым выполняя функцию «черного ящика» [1...4]. Благодаря этому возможен анализ аварии и определение вероятной причины ее возникновения. Дополнительной функцией данных устройств является выдача диагностической информации потребителю или оператору [5...9].

Устройства контроля давно и успешно применяются для длительных испытаний и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, а также постоянного мониторинга электрических параметров различных комплексов электропитания и релейной защиты.

Значительный вклад в исследования систем контроля и диагностики внесли ученые: Н. А. Ратникова, А. А. Зайцев, К. Ж. Саханов, В. Н. Писаренко, Н. Н. Портнягин, Г. А. Пюкке. Они предложили новые способы контроля объектов, основанные на алгоритмах оценки как общих вероятностных критериев состояний технических объектов, так и тестовых диагностических команд, передающихся по бортовым вычислительным сетям, а также на тензорной методике анализа объектов контроля [9...13].

В устройствах контроля применяются элементы памяти, которые широко распространены в технике, доступны, имеют невысокую стоимость и допускают многократную перезапись информации. При этом элементы памяти физически изнашиваются, что приводит к их отказам и потере информации [14...16].

Минимизация износа памяти и исключение потерь информации может достигаться за счет применения различных алгоритмов ее сжатия и архивации [17...19]. Подобные алгоритмы представлялись К. Шенноном, Д. Хаффманом, А. Лемпелем, П. Каммиски, Н. С. Джаянтом, Дж. Л. Фланаганом и другими

учеными. Большой вклад в исследования сжатия и кодирования информации внесли сотрудники компании Bell Labs. В настоящее время способы сжатия широко используются для передачи данных в высокоскоростных информационных сетях, телевизионных [20] и информационно-измерительных системах [19, 21...24].

Применение подобных способов для контроля большого числа параметров может вызвать сложности в программных реализациях и увеличить использование цифровых ресурсов устройства.

В приведенном исследовании предложены новая структура устройства контроля и способ минимизации объема сохраняемых данных, которые могут лечь в основу альтернативного устройства с минимальным использованием цифровых ресурсов и относительно гибким алгоритмом работы при контроле достаточно большого количества параметров.

**Цель работы** – создание устройства контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных, а также исследование данного устройства при контроле электрических параметров.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Обзор, анализ и исследование современных устройств контроля и информационно-измерительных систем.
2. Анализ способов сжатия метрологической информации.
3. Разработка структуры и схемы устройства контроля.
4. Моделирование способов контроля, сохранения и восстановления контролируемого параметра объекта.
5. Проверка адекватности модели, экспериментальное исследование.
6. Обобщение результатов реализации устройства контроля.

Методы исследования основаны на положениях теории электрических цепей, аналоговой и цифровой схемотехнике, теории рядов Фурье, на алгебраических уравнениях, вычислительных методах с использованием современных систем имитационного и математического моделирования.

Адекватность полученной модели и ее работоспособность проверена экспериментально на физических моделях и макетных образцах.

**Объектом исследования** является устройство контроля выходных электрических параметров преобразователя напряжения.

**Предмет исследования:** способ минимизации объема сохраняемых данных, позволяющий сократить физический износ памяти, и устройство, его реализующее.

### **Научная новизна**

1. Предложен способ минимизации информации, основанный на вычислении производной контролируемого параметра, которая служит информативным параметром для определения частоты дискретизации. Предложена структурная схема блока сжатия и устройства контроля (патент РФ № 2687302).

2. Разработана имитационная модель устройства контроля, отличающаяся тем, что позволяет анализировать работу объекта и определять постоянную времени дифференцирования для восстановления контролируемого сигнала с заданной точностью и минимизацией объема сохраняемых данных, а также требуемую частоту работы генератора, управляемого напряжением (ГУН), и соотношение частот спектра сигнала с диапазоном частот ГУН.

3. Разработана структура устройства контроля технических объектов, позволяющая существенно уменьшить объем сохраняемых данных при подборе оптимальных параметров (патенты РФ № 2682802, 2689323) и отличающаяся от аналогов применением операции дифференцирования и формированием тактовых импульсов для записи информации о параметре с различной частотой в режиме реального времени.

### **Теоретическая значимость**

1. Получено соотношение между постоянной времени дифференцирующей цепи и длительностью фронта (или спада)  $t$  контролируемого сигнала для его сохранения и последующего восстановления с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

2. Определено соотношение между рабочей частотой ГУН и верхней граничной частотой контролируемого сигнала для получения минимально необходимого объема памяти запоминающего устройства.

3. Изложен способ минимизации объема сохраняемых данных, представлена имитационная модель, реализующая его.

### **Практическая значимость**

1. Использование устройства контроля с минимизацией объема сохраняемых данных позволяет проводить контроль большого количества параметров с минимальным износом элементов памяти.

2. Применение способа сжатия, основанного на вычислении производной от контролируемого параметра, позволяет увеличить скорость обработки метрологической информации.

3. Для контроля большого количества параметров с вычислением производной возможно обойтись без сложных алгоритмов сжатия, при этом вся обработка сигнала происходит в режиме реального времени.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Способ изменения количества отсчетов данных, основанный на изменении частоты тактового генератора аналого-цифрового преобразователя (АЦП), позволяет минимизировать объем получаемых данных (информации).

2. Имитационная модель устройства контроля позволяет определить при восстановлении степень уменьшения объема сохраняемых данных и величину искажений в зависимости от постоянной времени дифференцирования, диапазона рабочих частот ГУН, его свободной частоты, а также провести оценку необходимых параметров и отношения частот ГУН к верхней граничной частоте спектра сигнала.

3. Объем сохраняемых данных может уменьшаться в шесть и более раз при условии, что свободная частота ГУН в два раза выше верхней граничной частоты спектра контролируемого сигнала, а постоянная времени дифференцирующего устройства (ДУ) составляет около 10 % от длительности фронта переходного процесса. Погрешность восстановленного сигнала не хуже  $\pm 3,1$  %.



### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа «Устройство контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных» соответствует паспорту специальности 05.13.05 – Элементы вычислительной техники и систем управления. В ней рассмотрены вопросы технического исследования в области первичных и вторичных преобразователей информации, аналоговых, импульсных, цифровых и других элементов и устройств, что соответствует п. 1 «Разработка научных основ создания и исследование общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления» и п. 2 «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик».

### **Реализация результатов работы**

В период с 2015 по 2021 год при непосредственном участии автора получено 3 патента (приложение А).

Отработан макетный образец устройства контроля технических объектов, сняты его электрические параметры, получены характеристики. Даны технические рекомендации при проектировании устройств контроля. Получены акты внедрения (приложение Б).

### **Личный вклад**

1. Разработана структурная и принципиальная схема устройства контроля технических объектов.
2. Смоделирована работа устройства.
3. Создана имитационная модель устройства контроля, обеспечивающего минимизацию объема сохраняемых данных.
4. Исследовано устройство контроля с минимизацией объема сохраняемых данных, даны практические рекомендации при проектировании подобных устройств.

### **Апробация работы**

Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях (приложение В):

1. Всероссийская научно-техническая конференция «Научная сессия ТУСУР 2016», г. Томск, 2016 г.

2. Всероссийская научно-практическая конференция «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», г. Томск, 2016 г.

3. Всероссийская научно-техническая конференция «Научная сессия ТУСУР 2017», г. Томск, 2017 г.

4. Всероссийская научно-техническая конференция «Электронные средства и системы управления», ТУСУР, г. Томск, 2017 г.

5. VIII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Системы управления и радиоэлектронная аппаратура», АО «НПО автоматики», г. Екатеринбург, 2017 г.

6. Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», АО «НПЦ «Полюс», г. Томск, 2018 г.

7. Конкурс научно-технических работ. Научная конференция «Орбита молодежи 2018», СибГАУ, г. Красноярск, 2018 г.

8. XXIV научно-техническая конференция «Макеевские чтения», посвященная 100-летию академика Н. А. Семихатова, АО «НПО автоматики», г. Екатеринбург, 2018 г.

9. XX научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства», АО «НПЦ «Полюс», г. Томск, 2020 г.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 14 научных работах: 2 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК; 2 – в журналах,

индексируемых в базах Scopus и Web of science; 7 – в материалах конференций; 3 – патенты на изобретения.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объем работы составляет 164 страницы, включая 6 приложений, 78 рисунков и 10 таблиц. Список литературы изложен на 11 страницах и содержит 110 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана теоретическая и практическая ценность работы, изложена научная новизна.

В первой главе приведены сведения об основных типах информационно-измерительных систем, показаны структурные схемы и принципы работы устройств контроля. Дан обзор устройств контроля. Представлены имеющиеся на сегодняшний день способы минимизации объема сохраняемых данных при контроле электрических параметров технических объектов.

Во второй главе представлена математическая модель контролируемого сигнала, позволяющая проводить анализ с применением теории рядов Фурье и восстанавливать сигнал с различной точностью. Продемонстрирована оценка затрачиваемого объема памяти при непрерывном контроле параметров. Разработан способ контроля и имитационная модель устройства с минимизацией объема сохраняемых данных. Проведена оценка затрачиваемого объема памяти при контроле с использованием разработанного способа. Проведено сравнение результатов при непрерывном контроле параметров и с помощью предложенного способа.

В третьей главе проведено экспериментальное исследование теоретических положений, описанных во второй главе. Проанализированы результаты экспериментальных исследований при различных параметрах устройства контроля. Показана взаимосвязь погрешности восстановления контролируемого параметра и объема сохраняемых данных. Приведены описание и характеристики

устройства контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных.

В заключении сделаны выводы и приведены основные научные результаты выполненных исследований.

В приложениях представлены программные коды для реализации ГУН на микроконтроллере и программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), копии патентов на изобретения, дипломы конференций, схемы функциональных узлов имитационной модели устройства контроля и акты внедрения.

## **1 Современное состояние устройств контроля технических объектов**

В настоящей главе показываются области применения устройств контроля и выполняемые ими функции. Анализируются различные структуры устройств контроля как информационно-измерительных систем, описываются принципы их функционирования. Представляются их достоинства и недостатки. Излагаются особенности построения устройств контроля. Предлагаются схмотехнические и алгоритмические способы минимизации объема сохраняемых данных.

### **1.1 Анализ требований к разработке устройств контроля**

#### **1.1.1 Классификационные признаки устройств контроля**

При эксплуатации технических объектов электротехнического или электромеханического оборудования главной задачей является оперативная обработка информации, ее оценка и принятие решения. При эксплуатации технического объекта диагностическая информация позволяет определить его работоспособность и выходные характеристики [1, 3, 24...35]. Особое значение в таких оценках при мониторинге объектов имеет их информативность и временная дискретность, при которой формируются данные для оператора.

Устройства контроля, формирующие диагностическую и метрологическую информацию, используются во многих областях техники [1, 2, 26, 36] и позволяют решать разного рода задачи: проводить анализ информации по полученным данным во время эксплуатации и при аварийных режимах работы, оценивать работоспособность технических объектов.

Такие устройства распространены в системах электропитания различных комплексов, горнодобывающей промышленности, железнодорожной автоматике, релейной защите, авиационной технике и т. д. [37...50].

Особое значение они имеют в производстве и эксплуатации электрооборудования и различных преобразователей напряжения. Функции этих

устройств заключаются в возможности контролировать электрические параметры (входное и выходное напряжение, ток нагрузки, потребляемый ток), сохранять метрологическую информацию в память, выдавать ее по запросу оператора, формировать циклограммы электрических параметров в процессе тренировок и испытаний изделий, а также формировать диагностические сигналы при неисправностях во время эксплуатации [51...53].

На сегодняшний день имеется целый ряд технических решений [1, 3, 4, 25, 27...30], позволяющих проводить контроль объектов. Однако все подобные устройства имеют свои особенности и недостатки: пошаговый контроль измеряемых величин, при котором возможен пропуск кратковременного переходного процесса или сбоя, износ элементов запоминающих устройств, невозможность проводить оценку параметров в режиме реального времени, отсутствие подробной информации об аварии или неисправности, выдача диагностической информации только в виде дискретного кода.

Как правило, при работе преобразователя напряжения контролируется его входное и выходное напряжения, токи нагрузки и потребления. На основании данных параметров осуществляется управление режимами работы преобразователя, формируются диагностические сигналы и метрологическая информация по определенному алгоритму [54, 55].

Общие принципы построения устройств контроля как информационно-измерительных систем представлены в таблице 1.1.

Специальные каналы связи, как правило, для телеметрических или телеизмерительных систем, позволяют транслировать информацию приемнику на удаленное расстояние.

По порядку выполнения операций контроля устройства могут быть последовательного или параллельного принципа действия. Выбор структуры зависит от скорости обработки всей измерительной информации, скорости контроля метрологических величин, а также надежности самой структуры.

Таблица 1.1 – Основные принципы создания устройств контроля

Классификационный признак	Класс систем (устройств) по принципу построения	
Порядок выполнения операций получения информации	Последовательные	Параллельные
Наличие контуров информационной обратной связи	Разомкнутые	Компенсационные (одно- и многоконтурные)
Используемые сигналы	Аналоговые	Цифровые
Изменение скоростей получения и выдачи информации	Без изменения (в реальном времени)	С изменением
Структурная и информационная избыточность	Безызбыточные	Избыточные
Адаптация к исследуемым величинам	Неадаптивные	Адаптивные

Контур обратной связи устанавливает скорость реакции на контролируемый параметр. Поступающие от них данные могут как замедлять скорость контроля, так и форсировать реакцию на изменение контролируемой величины.

По принципу контролируемых сигналов устройства делятся на аналоговые и цифровые.

Под адаптивностью понимается возможность устройства перестраивать уставки в зависимости от контролируемых величин. Данное свойство сохраняет точность измерения и повышает помехоустойчивость.

### 1.1.2 Классификация метрологической информации в измерительных системах

Метрологическая информация – количественная оценка, полученная экспериментальным образом путем сопоставления контролируемого параметра технического объекта с заранее известной мерой. В количественном аспекте измерительная информация – это сообщения о значениях измеряемых физических величин, которые выражаются и передаются между устройствами в виде сигналов. Сигналы, являющиеся физическими носителями измерительной информации, называются измерительными. К ним относятся:

- полезные сигналы, несущие основную информацию о техническом объекте;
- шумовые сигналы и помехи, поступающие вместе с полезными сигналами в измерительный тракт системы;
- специально генерируемые сигналы в измерительной системе или вне ее, улучшающие работу системы (модуляция, дискретизация, синхронизация и др.).

Одна из классификаций измерительных сигналов приведена на рисунке 1.1.

Контролируемые сигналы от источника информации формируются при изменении его выходных параметров. Носителями информации, как правило, являются электрические сигналы, такие как электрический ток или напряжение.



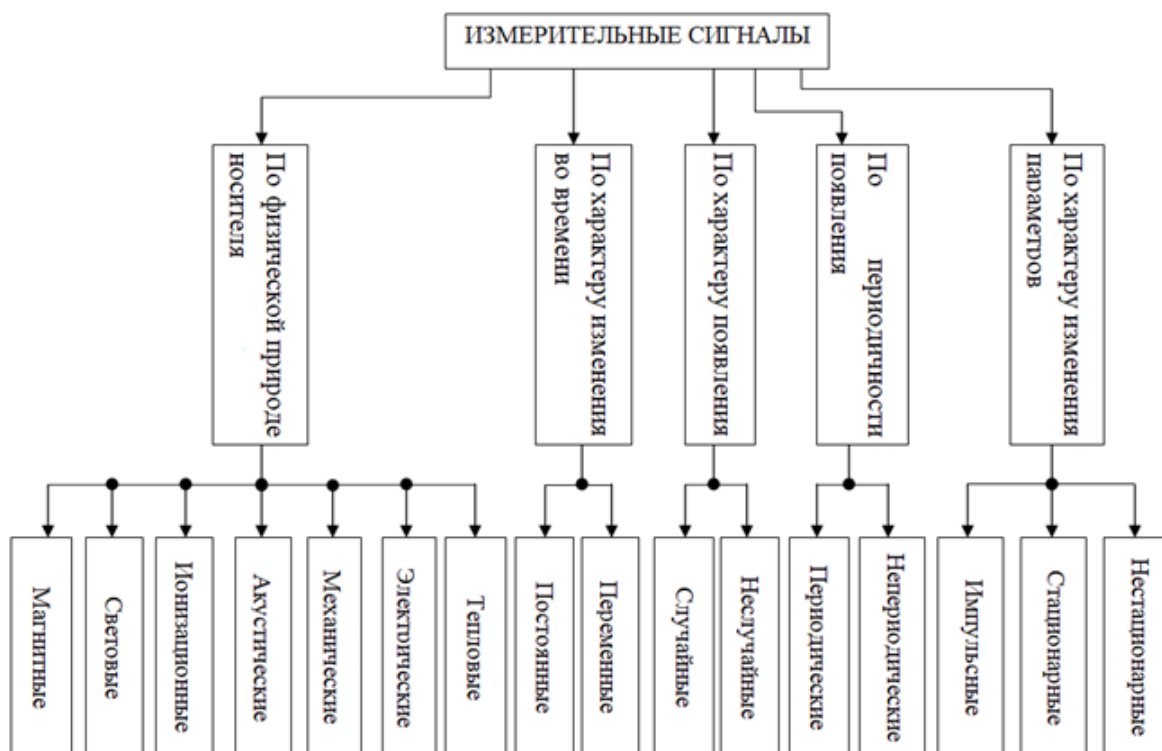


Рисунок 1.1 – Виды измерительных сигналов

### 1.1.3 Структуры устройств контроля, принципы их функционирования

Устройства контроля бывают последовательного, параллельного и комбинированного действия и различаются контролируемыми параметрами и их количеством. Для преобразовательных устройств в качестве контролируемого параметра используется напряжение нагрузки или напряжение шунта (датчик тока) [56...58].

В структурах последовательного действия получение информации выполняется последовательно во времени с помощью одного канала обработки и сравнения информации [52]. Главной особенностью таких устройств контроля является последовательное измерение выходных параметров объекта. При возможном отклонении измеряемой величины от установленных допусков они фиксируют канал или место неисправности и формируют информацию о ней.

Алгоритм работы устройства контроля со структурой последовательного действия (рис. 1.2, а) можно разбить на два цикла [54, 56].

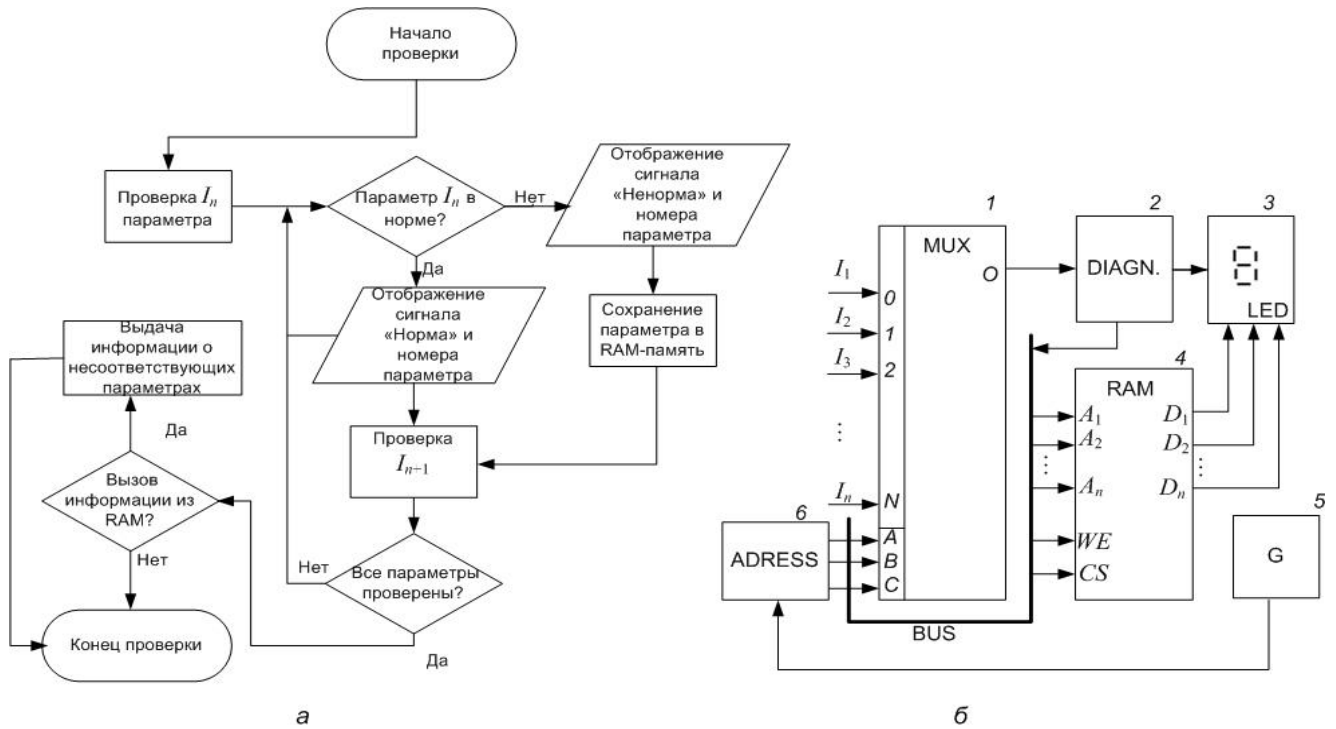


Рисунок 1.2 – Алгоритм работы (а), структурная схема (б) устройства контроля последовательного действия

В начале работы осуществляется последовательная проверка параметров  $I_1, I_2 \dots I_n$  и передача в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) адреса, где значение измеряемого параметра вышло за установленные допуски. Далее формируется и выдается на устройство индикации номер адреса, где возникло отклонение.

Входные воздействия можно представить в виде системы функций:

$$\begin{cases} I_1 = F(t_1, t_2, t_3 \dots t_n); \\ I_2 = F(t_1, t_2, t_3 \dots t_n); \\ \dots \\ I_n = F(t_1, t_2, t_3 \dots t_n), \end{cases}$$

где  $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$  – значения времени.

Устройство контроля (рис. 1.2, б) состоит из мультиплексора 1, устройства формирования сигналов 2, устройства индикации 3, ОЗУ 4, задающего генератора 5 и формирователя адресов 6.

Принцип работы следующий: при включении устройства контроля с выхода задающего генератора поступает последовательность импульсов на формирователь адресов. Мультиплексор последовательно переключает адреса со своих входов в зависимости от поступающих сигналов, и его функция имеет вид [52, 59, 60]

$$F = (\bar{A}\bar{B}\bar{C}I_0 + \bar{A}\bar{B}\bar{C}I_1 + \bar{A}B\bar{C}I_2 + AB\bar{C}I_3 + \\ + \bar{A}\bar{B}CI_4 + \bar{A}BCI_5 + \bar{A}BCI_7 + ABCI_8),$$

где  $A, B, C$  – логические уровни на соответствующих входах мультиплексора.

Устройство формирования сигналов обрабатывает информацию от мультиплексора и выдает диагностический сигнал на устройство индикации. Если имеются параметры, не соответствующие заданным требованиям, то диагностическая информация дублируется в ОЗУ.

Из диаграмм напряжений адресных входов мультиплексора (рис. 1.3) видно, что устройство контроля способно формировать сигнал неисправности при отклонении проверяемого параметра за допустимые пределы и определять место неисправности (в рассматриваемом случае место неисправности – адрес «5»). Сигнал неисправности одновременно является и сигналом для записи информации в ОЗУ.

Преимущества устройства контроля со структурой последовательного действия – простота и универсальность: можно проверять различные аналоговые параметры, предварительно преобразуя их в цифровую форму с помощью АЦП, подключенного к данному устройству. Недостаток заключается в последовательной проверке электрических параметров, что увеличивает вероятность пропуска кратковременной неисправности или исчезающего дефекта, а также в выдаче информации в дискретном виде, что снижает точность ее оценки.

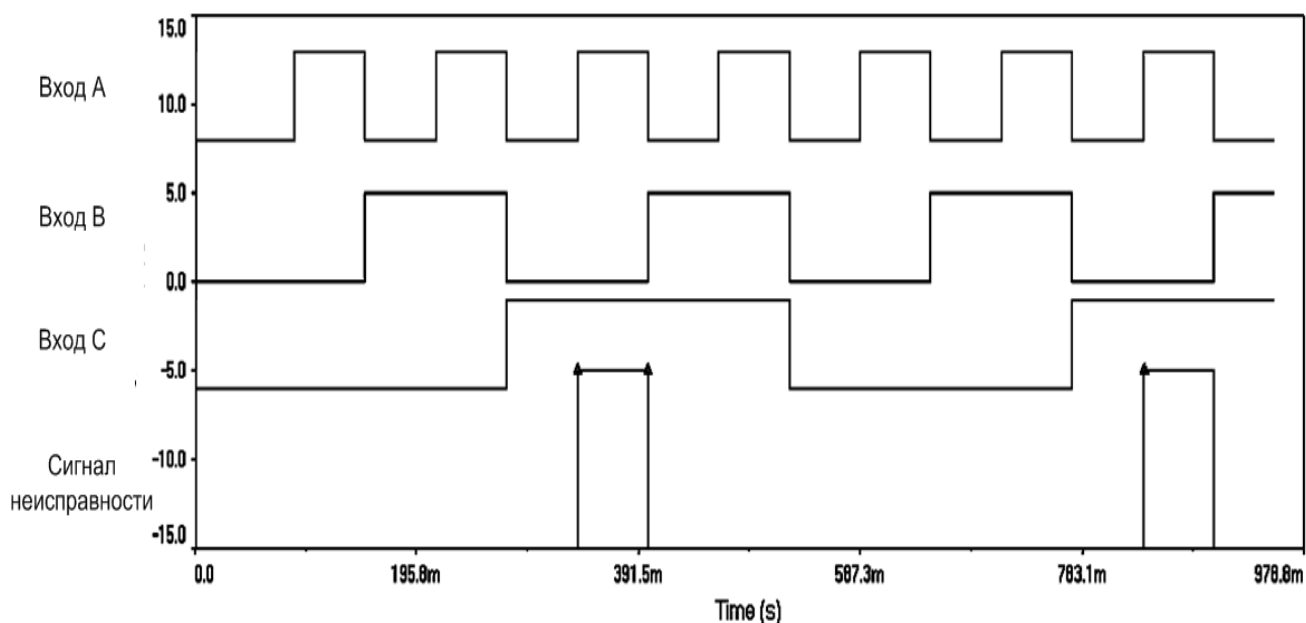
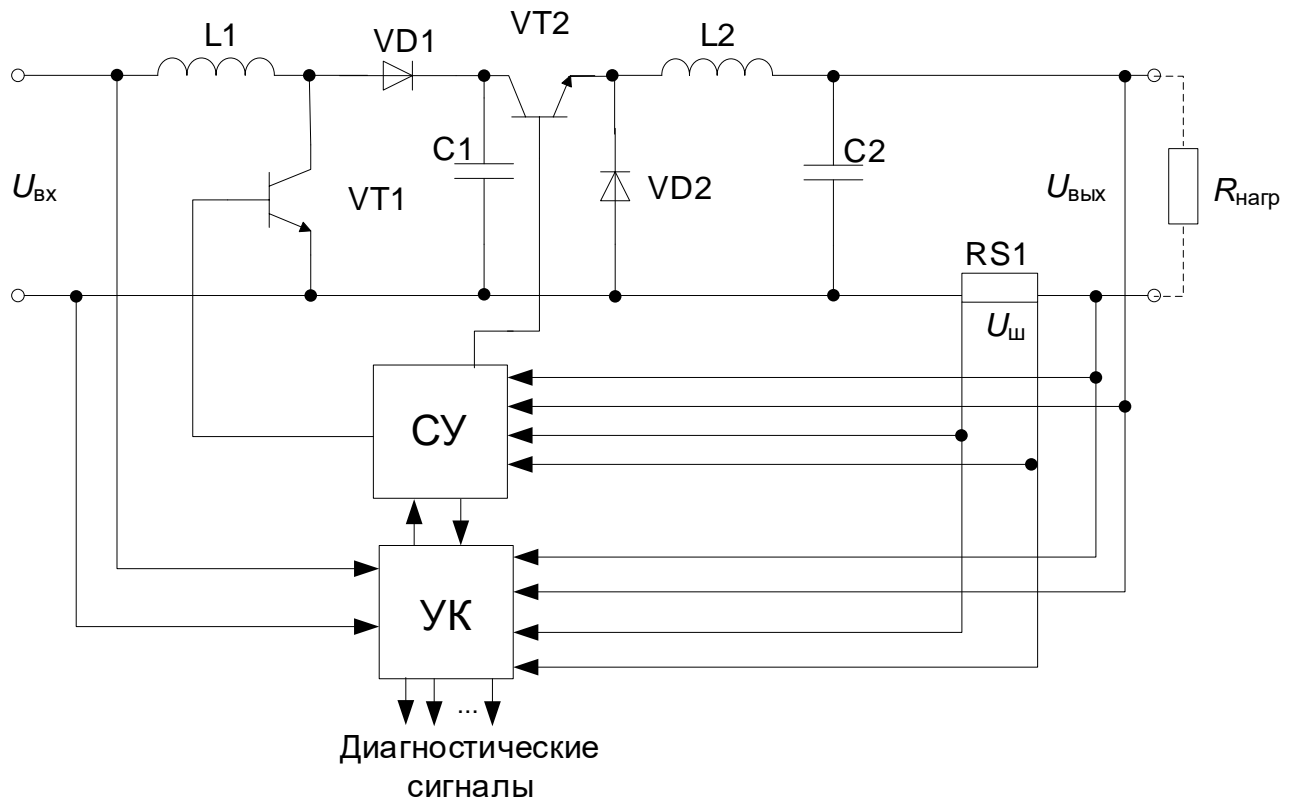


Рисунок 1.3 – Эпюры сигналов на входе устройства контроля и сигнала неисправности

Структуры параллельного действия являются многоканальными. Каждый канал обеспечивает контроль определенного параметра на протяжении всего непрерывного цикла работы устройства и выдачу диагностической информации.

Основные достоинства многоканальных структур связаны с возможностью измерения разнородных физических величин, использования одноканальных измерительных устройств, достижения максимального быстродействия и высокой схемной надежности.

Рассмотрим принцип работы структуры параллельного действия. Из функциональной схемы преобразователя (рис. 1.4) видно, что управление им и формирование диагностических сигналов осуществляют схема управления и устройство контроля соответственно.



СУ – схема управления; УК – устройство контроля.

Рисунок 1.4 – Преобразователь напряжения

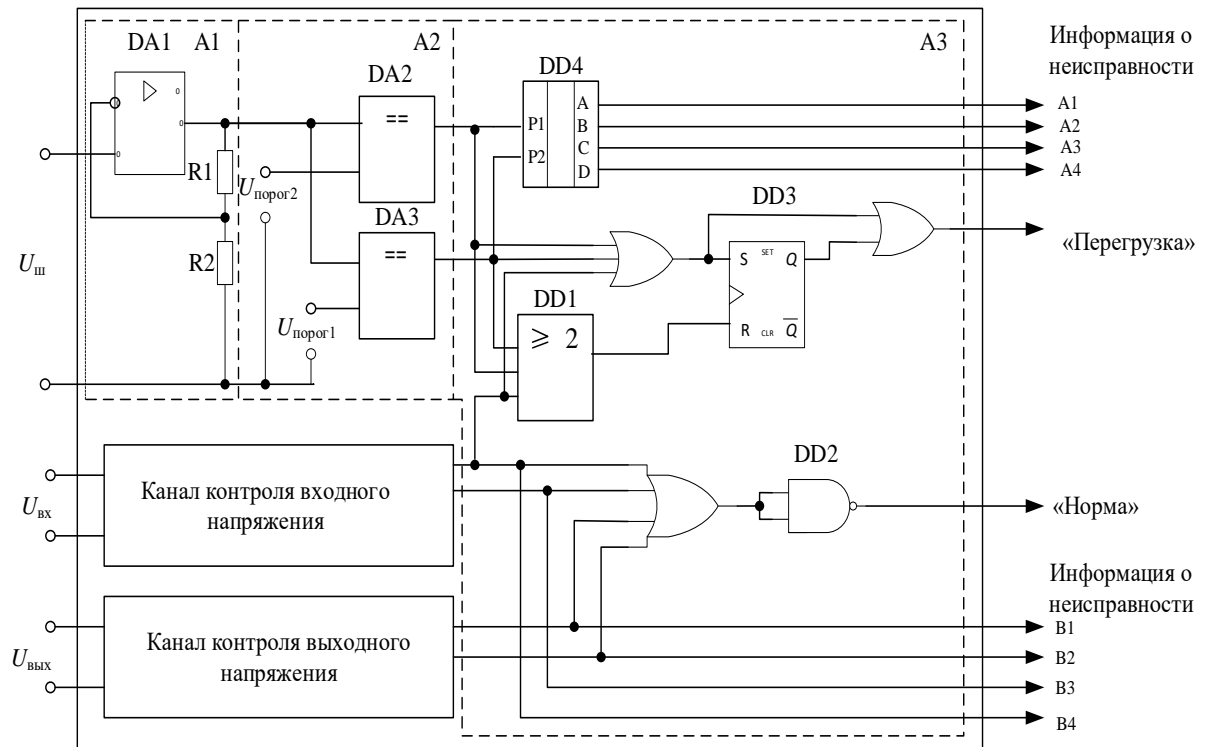
Преобразователь напряжения должен сохранять работоспособность при следующих условиях:

$$\begin{cases} U_{\text{пит.н}} < U_{\text{вх}} < U_{\text{пит.в}} ; \\ 0 < I_{\text{нагр}} \leq I_{\text{перег}} ; \\ U_{\text{вых.н}} < U_{\text{вых}} < U_{\text{вых.в}} , \end{cases}$$

где  $U_{\text{пит.н}}$ ,  $U_{\text{пит.в}}$  – нижний и верхний пороги срабатывания защиты по входному напряжению;  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$  – входное и выходное напряжения соответственно;  $I_{\text{нагр}}$  – ток нагрузки;  $I_{\text{перег}}$  – ток перегрузки;  $U_{\text{вых.н}}$ ,  $U_{\text{вых.в}}$  – нижний и верхний пороги срабатывания защиты по выходному напряжению соответственно.

Контроль  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{нагр}}$  и выдачу диагностической информации обеспечивает устройство контроля (рис. 1.5), имеющее для этого три независимых

параллельных канала. Рассмотрим принцип его работы при функционировании канала контроля тока нагрузки.



A1 – узел масштабирования; A2 – узел сравнения электрических параметров;  
A3 – узел формирования диагностических сигналов.

Рисунок 1.5 – Структурная схема устройства контроля параллельного действия

Данный канал следит за значением тока и в случае отклонения его от допустимых пределов формирует команду на выдачу диагностической информации. При контроле тока нагрузки на шунте RS1 (см. рис. 1.4) напряжение  $U_{ш}$  поступает на вход узла масштабирования.

Узел масштабирования представляет собой усилитель с нормированным коэффициентом усиления, обеспечивающий нормирование измеряемого напряжения. В канале контроля тока нагрузки масштабирование происходит на операционном усилителе DA1, входное и выходное напряжения которого связаны соотношением

$$U_{Oy} = U_{ш} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right),$$

где  $U_{Oy}$  – выходное напряжение операционного усилителя;  $U_{ш}$  – напряжение, контролируемое на шунте RS1;  $R_1$ ,  $R_2$  – сопротивления соответствующих резисторов.

Усиленный сигнал поступает на входы компараторов DA2, DA3, где сравнивается с опорными напряжениями  $U_{\text{порог. 2}}$ ,  $U_{\text{порог. 1}}$ .

В результате сравнения с выходов компараторов поступает сигнал подтверждения на логические элементы DD1, DD3 для формирования диагностического сигнала «Перегрузка». Этот сигнал удерживается до полного снятия напряжения питания с устройства контроля. Одновременно на выходах шифратора DD4 формируется информация о неисправности в виде параллельного четырехразрядного кода.

Из диаграмм напряжений устройства контроля (рис. 1.6) видно, что при увеличении напряжения  $U_{ш}$  до уровня  $U_{\text{порог. 1}}$  (состояние неглубокой перегрузки) компаратор DA3 формирует сигнал «Перегрузка» одновременно с сигналом о неисправности в виде параллельного двоичного кода.

Информацию о перегрузках по току с различными значениями кратности можно представить в виде четырехразрядного двоичного кода (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Диагностические сигналы при неисправностях по току

Возможная причина неисправности	Код диагностики по $I_{\text{нагр}}$			
	A1	A2	A3	A4
Перегрузка с кратностью $(1,0 - 1,3)I_{\text{перег}}$	0	0	0	1
Перегрузка с кратностью $(1,3 - 1,45)I_{\text{перег}}$	0	0	1	0
Перегрузка с кратностью свыше $1,45I_{\text{перег}}$	0	1	1	0

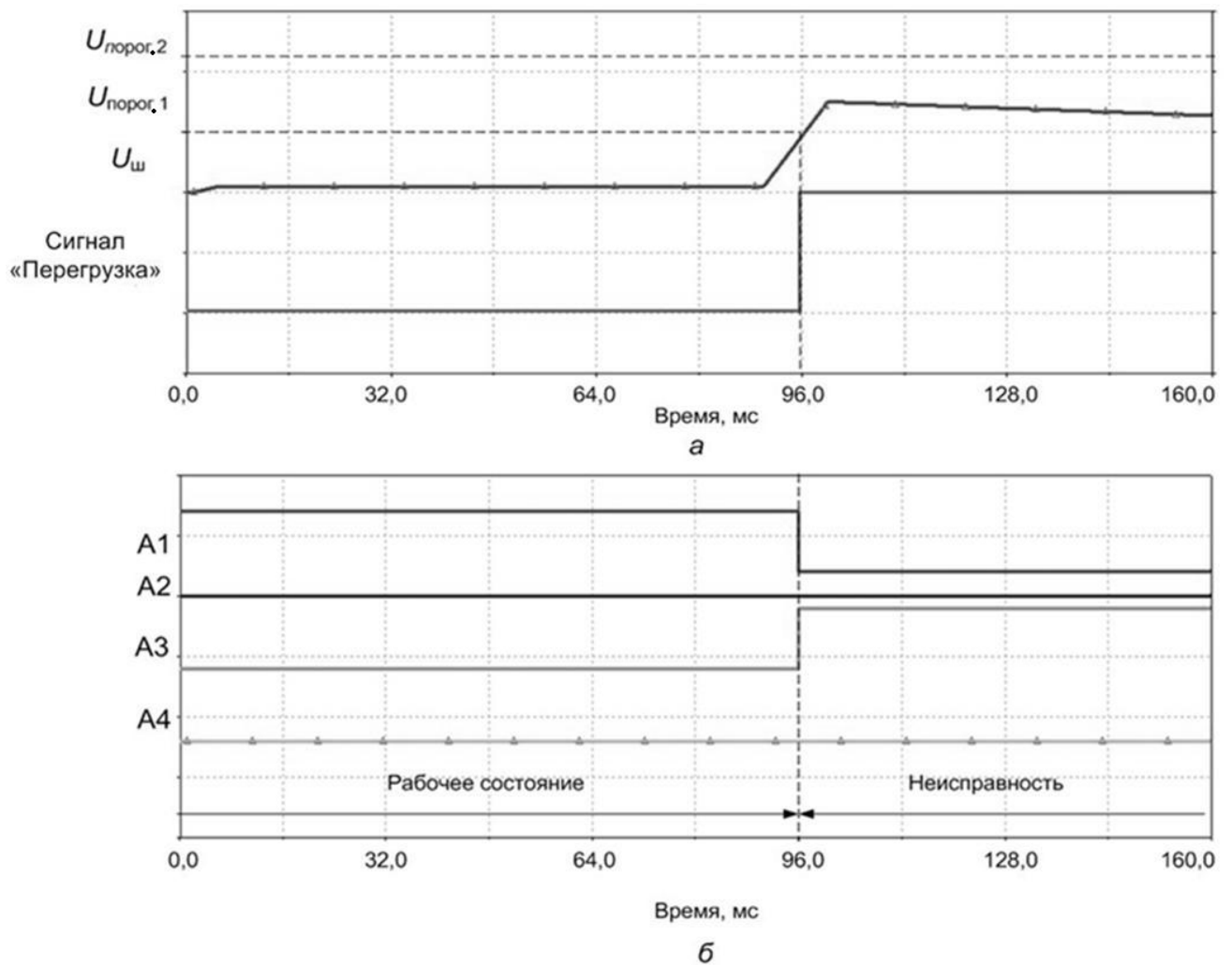


Рисунок 1.6 – Диаграммы напряжений при формировании:  
*а* – сигнала «Перегрузка»; *б* – сигнала о неисправности параллельным цифровым кодом

Аналогично работают каналы контроля входного и выходного напряжений, формируя диагностические сигналы параллельным двоичным кодом и отключая сигнал «Норма» (табл. 1.3).



Таблица 1.3 – Диагностические сигналы при неисправностях по напряжению

Возможная причина неисправности	Код диагностики по $U_{вх}$ и $U_{вых}$			
	В1	В2	В3	В4
Увеличение напряжения до порога $U_{пит.в}$	1	0	0	0
Снижение напряжения до порога $U_{пит.н}$	0	1	0	0
Увеличение напряжения до порога $U_{вых.в}$	0	0	1	0
Снижение напряжения до порога $U_{вых.н}$	0	0	0	1

Как видно из таблиц, каждой причине неисправности соответствует свой цифровой код диагностики. На основании полученных данных можно оценить работоспособность преобразователя: например, узнать рабочий режим преобразователя или установить причину его выхода из строя при аварийной ситуации.

Особенностью устройства контроля с параллельной структурой действия (см. рис. 1.5) является выдача диагностической информации параллельным цифровым кодом в виде массива данных, что позволяет проводить быструю и детализированную оценку работоспособности преобразователя по каждому отдельному контролируемому параметру. Также при параллельном контроле электрических параметров ниже вероятность пропустить неисправность.

Устройства контроля с комбинированной структурой действия объединяют в себе последовательные и параллельные структуры и применяются для решения специализированных, узких задач в области контроля и измерения.

## 1.2 Особенности построения устройств контроля и измерительных систем

Основные особенности построения устройств контроля и измерительных систем заключаются в выборе структуры и класса устройства, определении числа контролируемых параметров, а также формы представления диагностической и измерительной информации потребителю [49].

Сегодня наиболее перспективные устройства контроля строятся на цифровой элементной базе, что позволяет быстро и точно обрабатывать контролируемые параметры, сохранять их в память и выдавать потребителю [25, 27, 61, 62], при этом существенно сокращая массогабаритные параметры самого устройства.

Контролируемые параметры могут быть преобразованы методами аналоговой или цифровой обработки сигналов, а также их комбинацией [63...69]. Особенность цифровой обработки сигналов заключается в высокой скорости и эффективности выполнения таких сложных функций, как фильтрация, анализ с использованием быстрого преобразования Фурье и сжатие данных в реальном времени [63].

Для сбора и хранения данных требуется применение элементов памяти, подвергающихся физическому износу при многократных перезаписях информации в процессе эксплуатации. С целью уменьшения износа элементов памяти используются разные способы: наращивание памяти с помощью схемотехнических решений, применение современной элементной базы или алгоритмов сжатия информации [15...19, 70, 71].

Таким образом, важным является решение проблемы минимизации сохраняемых данных с целью уменьшения их износа.

### **1.2.1 Алгоритмический способ минимизации сохраняемых данных**

Одним из возможных способов минимизации объема сохраняемых данных является алгоритмический способ, а именно – сжатие информации. Уменьшение объема обрабатываемой информации позволяет оперировать гораздо меньшим объемом данных [17, 19, 20].

Сжатие получаемых данных является важной и значимой операцией, так как позволяет экономить объем памяти в задействованных запоминающих устройствах и минимизировать пропускную способность каналов контроля. Коэффициент сжатия  $C_{сж}$  вычисляется по формуле [20]

$$C_{\text{сж}} = \frac{V_0}{V} = \frac{n_0}{n},$$

где:  $V_0$  – объем несжатых данных;  $V$  – объем сжатых данных;  $n_0$  – средняя длина кода для несжатых данных;  $n$  – средняя длина кода для сжатых данных.

Средняя длина кода выражается числом битов цифрового кода, приходящихся на 1 символ (бит/символ).

Существует также обратная коэффициенту сжатия величина

$$R_D = 1 - \frac{1}{C_{\text{сж}}} = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

показывающая объем несжатых данных относительно сжатых.

Данная величина называется избыточностью кода со средней длиной  $n_0$ , используемого для представления несжатых данных по отношению к коду со средней длиной  $n < n_0$ , с помощью которого производится сжатие.

На сегодняшний день различные виды и алгоритмы сжатия информации (рис. 1.7) [18...20] используются во многих научно-технических сферах, таких как телевизионные, компьютерные, измерительные системы и т. д.

Сжатие с потерями вносит некоторую погрешность при восстановлении информации и используется в системах передачи и хранения, где допускаются незначительные искажения данных – например, если эти искажения не заметны для человеческого восприятия или не требуется детальный анализ информации.

Сжатие без потерь позволяет восстанавливать высокочастотные изменения контролируемого параметра в хорошем качестве, но при этом резко уменьшается степень сжатия информации и, как следствие, увеличивается объем сохраняемых данных в памяти, что является недостатком.

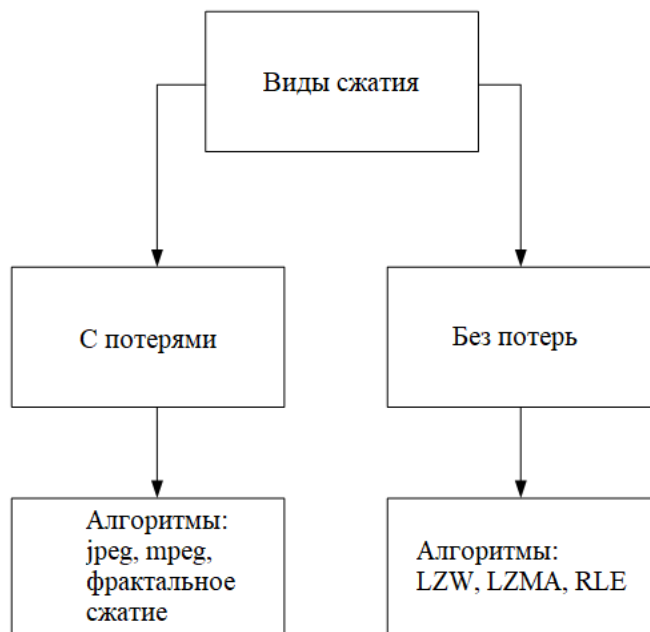


Рисунок 1.7 – Виды и алгоритмы сжатия информации

### 1.2.2 Схемотехнические способы минимизации сохраняемых данных

Среди схемотехнических способов минимизации объема сохраняемых данных можно выделить следующие:

а) уменьшение частоты циклов сохранения данных.

Данный способ известен давно и прост в реализации [16, 17]. Но из-за отсутствия синхронизации процесса сохранения данных и момента изменения контролируемого параметра он не пригоден для устройств, требующих высокой точности контроля.

Преобразование и запись в память контролируемого параметра  $U(t)$  происходит при подаче тактового импульса  $f(t)$ . При рассинхронизации по времени (рис. 1.8) процесс функции  $U(t)$  происходит в момент отсутствия тактовых импульсов, что характеризует неполную обработку контролируемой функции. Из этого можно сделать вывод, что рассинхронизация увеличивает вероятность потери информации;

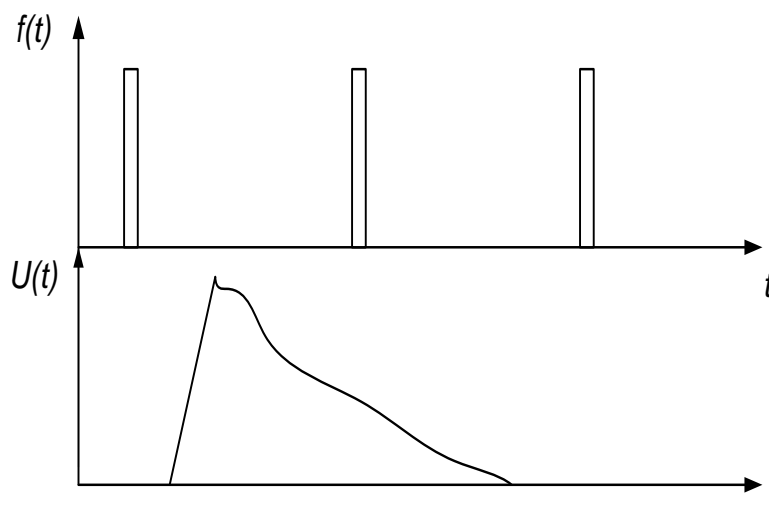


Рисунок 1.8 – Рассинхронизация при контроле параметра  $U(t)$

б) прерывание по уровню питания.

Суть способа заключается в хранении данных в ОЗУ и их записи в память в случае потери питания или отклонения его от допустимых пределов.

Микроконтроллеры позволяют осуществлять техническую возможность прерывания по низкому уровню питающего напряжения для сохранения последнего значения параметра в память. При этом система контроля отключается из-за потери питающего напряжения [17]. Для сохранения данных необходимы дополнительный элемент питания и схема контроля.

Преимущество способа – минимизация объема сохраняемых данных за счет записи информации в последний момент времени (аварии).

Недостаток заключается в отсутствии сохраненной информации о контролируемом параметре до снижения уровня питания. Стоит отметить, что использование дополнительных схемотехнических решений для питания устройства ухудшает его габаритные характеристики и надежность;

в) применение кольцевой записи.

При данном способе запись производится с применением буфера FIFO [17], что позволяет минимизировать износ памяти пропорционально числу копий в этом буфере.

Если через буфер проходит 10 разных адресов для сохранения одного значения, то каждая ячейка модифицируется в 10 раз реже, а ресурс записи возрастает в 10 раз. При этом понадобится два элемента памяти: один – для хранения значения контролируемого параметра, второй – для хранения адресов [16, 17].

Недостатком данного способа является использование дополнительных ресурсов памяти для хранения адресов и данных о контролируемых параметрах технических объектов. Подобное увеличение количества запоминающих устройств уменьшает надежность и увеличивает массогабаритные показатели, особенно резервированных устройств контроля.

### **1.3 Выбор оптимальной структуры устройства контроля**

Для выбора оптимальной структуры устройства контроля технических объектов необходимо определить его основные функции:

- слежение за электрическими параметрами (ток, напряжение);
- сохранение информации в энергонезависимую память;
- выдача информации об электрических параметрах;
- формирование циклограмм работы по данным от преобразователя напряжения (технический объект);
- сохранение измерительной информации при переходных процессах, в том числе в момент возникновения аварии.

Также необходимо знать информацию о взаимосвязи устройства контроля с техническим объектом и о контролируемых параметрах.

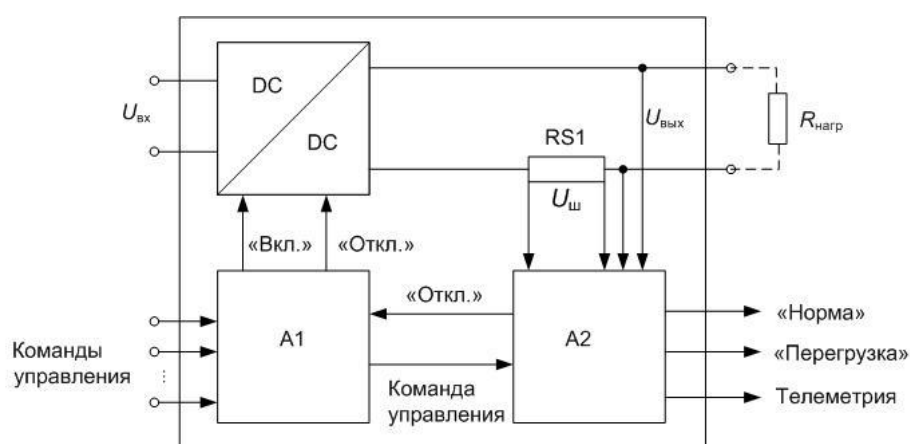
В качестве технического объекта контроля выберем DC/DC-преобразователь (рис. 1.9).

Блок А1 принимает и обрабатывает команды управления, включающие или отключающие преобразователь напряжения.

Блок А2 следит за выходными параметрами преобразователя (током нагрузки и выходным напряжением), выдавая при этом потребителю

диагностические сигналы «Норма» и «Перегрузка». Дополнительно он формирует внутренние команды на отключение преобразователя в случаях появления неисправности.

Шунт RS1 выполняет функцию датчика тока нагрузки. Напряжение на нагрузке  $U_{\text{вых}}$  и напряжение, контролируемое на шунте  $U_{\text{ш}}$ , являются контролируемыми параметрами.



A1 – устройство приема команд управления;

A2 – устройство контроля и регистрации электрических параметров.

Рисунок 1.9 – Взаимосвязь объекта с устройством контроля

По результатам работы блока A2 с техническим объектом оптимальным является выбор структуры параллельного контроля. Это дает возможность, в отличие от структуры последовательного контроля, одновременного слежения за выходными параметрами, исключения потери данных (см. рис. 1.2) [72, 73], ускорения процесса обработки информации.

Как правило, при эксплуатации подобных объектов или при их техническом контроле в производстве часто возникают аварийные ситуации с потерей телеметрических данных, что сильно усложняет анализ причины аварии.

Применение в устройствах контроля дополнительных схемных решений (узлов обработки и преобразования информации, микроконтроллеров, ОЗУ,

постоянных запоминающих устройств) позволяет сохранять телеметрическую информацию в момент наступления аварийной ситуации [73].

Рассмотрим пример аварийной ситуации, вызванной увеличением тока нагрузки. Метрологические данные об этом поступают на блок А2 в виде напряжения  $U_{ш}$ .

По эяграмм напряжений (рис. 1.10) видно, что при достижении порогового значения контролируемого напряжения  $U_{порог}$  происходит выдача потребителю диагностического сигнала «Перегрузка». При этом происходит синхронное сохранение в память телеметрических данных за период записи  $t_{зап}$ . Телеметрическим сигналом является напряжение  $U_{ш}$ .

Таким образом, блок А2 позволяет сохранять в память контролируемые сигналы с возможностью считывания информации по каналу телеметрии для дальнейшего анализа.

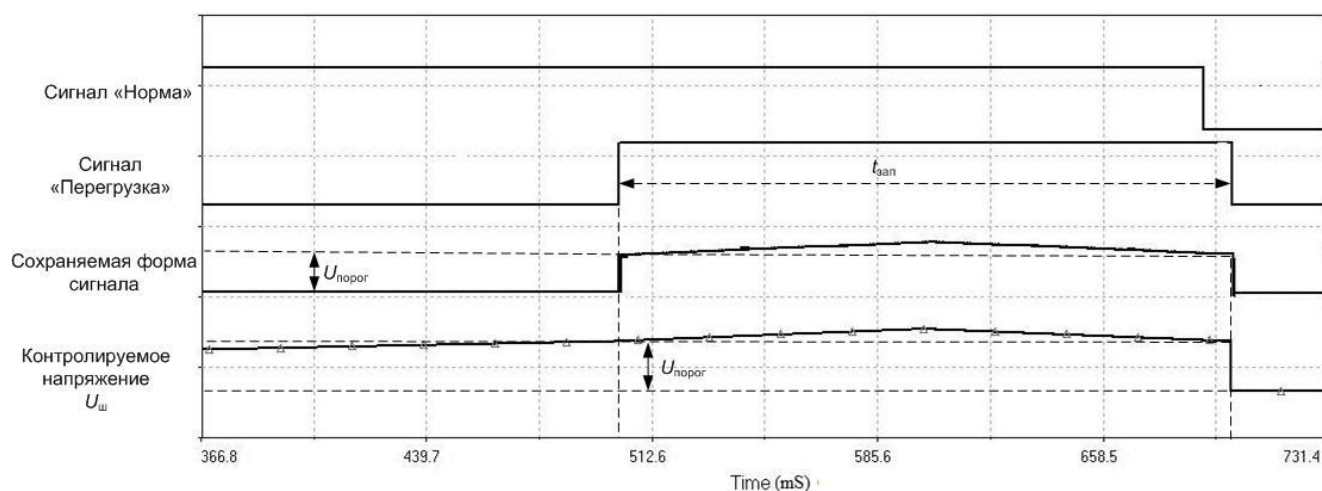


Рисунок 1.10 – Эяграмм напряжений блока А2

Дополнительно стоит отметить, что в процессе контроля на выходной сигнал телеметрии из блока А2 может быть наложена случайная помеха в виде функции времени  $y(t)$ . Воздействие помехи может привести к искажению данных. Чтобы уменьшить ее влияние, необходимо использовать фильтры на входе и выходе устройства контроля. Сглаживание следует выполнять так, чтобы



результат достаточно точно повторял контролируемый сигнал  $U_{\text{ш}}(t)$ . Частичное и неравномерное наложение частотных спектров сигнала и фильтра ослабляет только часть помехи.

Использование катушек индуктивности или конденсаторов при построении фильтров может быть проблемным. Фильтр можно не применять, если воспользоваться математической обработкой сигнала. При этом функция времени выражается входным суммарным сигналом

$$U_{\Sigma}(t) = U_{\text{ш}}(t) + y(t),$$

где  $U_{\text{ш}}(t)$  – полезный сигнал,  $y(t)$  – сигнал шума.

Один из видов такой обработки – это вычисление текущего среднего значения по формуле

$$U_{\text{cp}}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t U_{\Sigma}(\tau) d\tau,$$

где  $T$  – ширина интервала контролируемого сигнала.

Если период нижней частотной составляющей спектра помехи в несколько раз меньше периода полезного сигнала, то результат интегрирования достаточно точно повторяет форму контролируемого параметра  $U_{\text{ш}}(t)$ .

#### 1.4 Обзор устройств контроля

В связи с особенностями контролируемого объекта или спецификой его применения иногда устройства контроля изготавливаются в единичных экземплярах или малыми сериями. Такие изделия имеют большое значение в авиационном оборудовании. Бортовое устройство сбора и регистрации полетных данных (рис. 1.11) используется для сбора, преобразования, регистрации

информации с контролируемого объекта в цифровом двоичном коде на накопителе и ее сохранения в экстремальных условиях, в том числе при аварийных ситуациях [44].

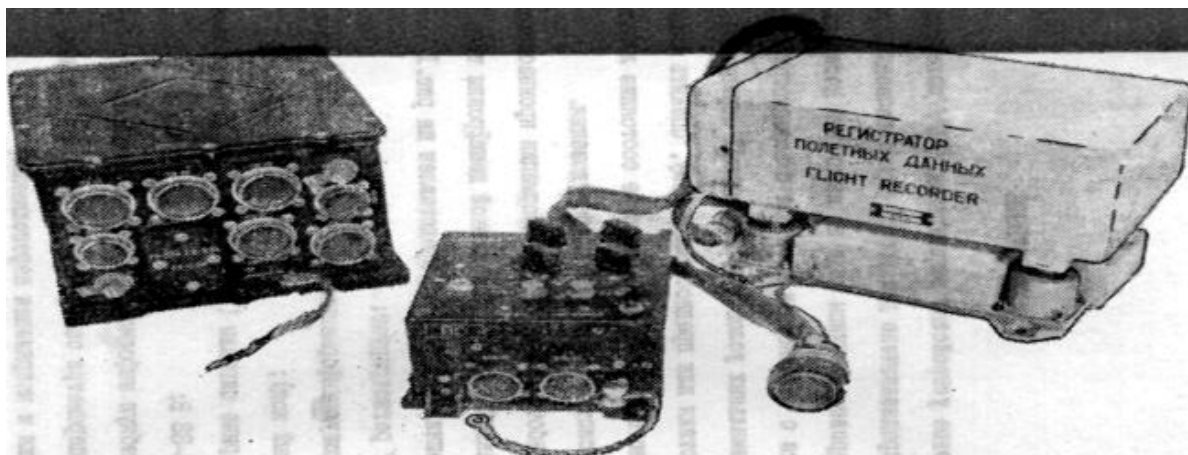


Рисунок 1.11 – Внешний вид бортового устройства сбора и регистрации данных

Данное устройство дает возможность определять причину летного происшествия или предпосылки к нему, оценивать техническое состояние летательного аппарата, его систем, агрегатов и оборудования. В его состав входит узел сбора полетной информации с двумя бортовыми накопителями.

Принцип работы бортового устройства основан на последовательной коммутации измерительных датчиков с помощью мультиплексоров. При этом алгоритм коммутации задается исходя из приоритета контролируемых датчиков.

Параметры, снимаемые с датчиков, преобразуются в двоичный параллельный код и записываются в накопитель для дальнейшего сохранения. Погрешность преобразования и регистрации параметров не превышает  $\pm 2\%$ , а за одну секунду происходит 256 измерений.

Недостатком такого устройства является малое время непрерывной записи (три часа) и поочередный контроль параметров.

Для широкого круга изделий в радиоэлектронной промышленности применяются унифицированные модульные устройства. Так, компания LCard

производит модульные системы сбора данных (рис. 1.12). Они используются для проведения исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию информационно-управляющих систем, автоматизированных систем управления технологическими процессами, а также для автоматизации испытательных стендов [27].

Такие устройства сбора данных конструктивно выполнены по модульному принципу, позволяющему гибко менять конфигурацию и выбирать оптимальный набор модулей при решении конкретной задачи. Они содержат одно-, двух-, восьми- и шестнадцатиместные крейты для соответствующего количества модулей.

Достоинствами подобных устройств являются параллельный контроль параметров, модульность и единый формат данных, а недостатками – необходимость применения сложных алгоритмов сжатия и непрерывный опрос данных, снижающий ресурсы элементов памяти и увеличивающий их физический износ.

Похожие устройства разрабатываются и в единичных экземплярах для специализированных изделий. К ним можно отнести контрольно-проверочную аппаратуру для испытания систем преобразования и управления плазменными двигателями [26], некоторые из них используют уже готовые системы обработки и сбора данных от различных производителей [25].



Рисунок 1.12 – Внешний вид модульного устройства сбора данных

Контрольно-проверочная аппаратура выполняет большой ряд задач, связанных с регистрацией данных. Она может формировать архивы полученных значений контролируемых параметров в виде табличных массивов или визуализированных эпюр токов и напряжений, что является ее преимуществом.

При этом архивация данных происходит от начала испытаний до окончания, без синхронизации с переходными процессами (аварийными ситуациями), которые могут возникнуть при испытаниях. Это и отсутствие минимизации объема сохраняемых данных, увеличивающее физический износ элементов памяти, можно отнести к недостаткам аппаратуры.

Стоит отметить, что существуют также устройства оперативной выдачи диагностической информации от контролируемых объектов – например, системы технической диагностики параметров электрических цепей [28], используемые в транспортной технике.

Подобные устройства формируют визуальную диагностическую информацию в виде дискретных данных (рис. 1.13), что является довольно простым и эргономичным техническим решением. Также они регистрируют информацию о неисправном параметре в момент наступления аварийной ситуации и выдают ее в режиме реального времени.

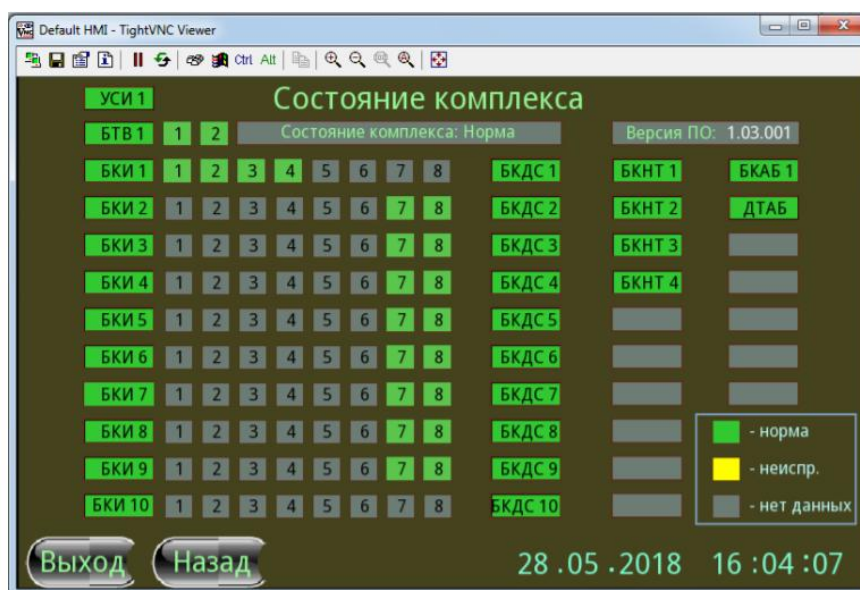


Рисунок 1.13 – Окно выдачи дискретной диагностической информации

Недостаток заключается в отсутствии промежуточного контроля переходных процессов при малых изменениях и детализированной выдачи информации в виде массива данных, по которым можно произвести количественную оценку и определить причину аварийной ситуации.

Также на сегодняшний день очень популярны в промышленности системы диспетчерского управления и сбора данных, а именно SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition). Как правило, SCADA-системы применяются в автоматизированных системах управления технологическими процессами, системах экологического мониторинга, научного эксперимента и многих других отраслях, где требуется операторский контроль.

SCADA-системы позволяют решать ряд следующих задач:

- обмен данными с устройствами связи и объектом;
- сохранение телеметрической информации;
- логическое управление и отображение на экране монитора информации;
- подготовка и формирование отчетов о ходе технологического процесса.

Недостатки SCADA-систем заключаются в следующем:

– информационная уязвимость. Так как обмен и обработка информации происходят по сети, то появляется возможность умышленно вносить конфигурационные изменения и управлять процессами. Данный фактор требует соблюдения информационной безопасности;

– сложность применения системы на автономных объектах, а именно в космических аппаратах или необитаемых подводных аппаратах, сопряженная с большими техническими и экономическими затратами, которые могут привести к снижению общей надежности и увеличению массовых и габаритных характеристик;

– низкая экономическая эффективность при решении простых задач и дорогостоящая техническая поддержка.

Из таблицы 1.4 следует, что рассмотренные выше устройства не обеспечивают уменьшения физического износа памяти и минимизации объема

сохраняемых данных. Также не все из них выдают полноценную метрологическую информацию для анализа.

Таблица 1.4 – Устройства контроля технических объектов

Наименование устройства	Функция	Число измерительных каналов	Информация о сохраняемых данных	Недостатки
Бортовое устройство регистрации полетных данных	Контроль изделий летательных аппаратов	132	Запись в течение трех часов	Малое время записи информации, последовательный контроль параметров
Модульная система сбора данных	Контроль изделий в процессе испытаний	100	Архивирование данных в процессе испытаний	Отсутствие минимизации объема сохраняемых данных, быстрый физический износ памяти
Система технической диагностики параметров электрических цепей	Контроль изделий в процессе эксплуатации и испытаний	82	Запись дискретной информации только при возникновении аварийных режимов	Отсутствие выдачи полноценной информации о переходных процессах
Контрольно-проверочная аппаратура для испытания системы преобразования и электропитания	Контроль изделий в процессе испытаний	11	Архивирование данных в процессе испытаний	Отсутствие минимизации объема сохраняемых данных, быстрый физический износ памяти
Система SCADA	Экологический мониторинг	–	Контроль и сохранение данных в ходе технологического процесса	Информационная уязвимость, низкая экономическая эффективность, сложность применения на автономных объектах

## 1.5 Выводы

Представлен обзор структур устройств контроля информационно-измерительных систем, показаны принципы их работы, особенности контроля параметров технических объектов и структурные схемы. Проведено сравнение

структурных схем, описаны их достоинства и недостатки. Представлена классификация измерительных сигналов.

Рассмотрены различные способы минимизации объема сохраняемых данных. Имеющиеся способы основываются на алгоритмических методах, которые делятся на сжатие без потерь и с потерями [17...19]. Недостаток их применения заключается в том, что с увеличением числа каналов контроля возрастает сложность создания оптимального алгоритма работы, не снижающего скорости обработки контролируемой информации.

Показаны схемотехнические способы минимизации сохраняемых данных, которые не подходят для широкого ряда устройств, так как их использование усложняет схему устройства, снижает надежность и увеличивает массогабаритные показатели.

Поставлена задача выбора эффективной структуры устройства контроля на примере физического взаимодействия с техническим объектом, в качестве которого выбран DC/DC-преобразователь напряжения. Показан способ устранения помех на выходе устройства.

## 2 Теоретические исследования устройств контроля технических объектов

Функционирование устройства контроля можно продемонстрировать с помощью различных математических и имитационных моделей.

В данной главе рассмотрена математическая модель, позволяющая восстанавливать сигнал с различной точностью при постоянном контроле.

Представлен способ контроля электрических параметров, основанный на вычислении производной, продемонстрирована его имитационная модель. Согласно результатам моделирования определено соотношение параметров устройства, влияющих на качество восстановления контролируемого параметра.

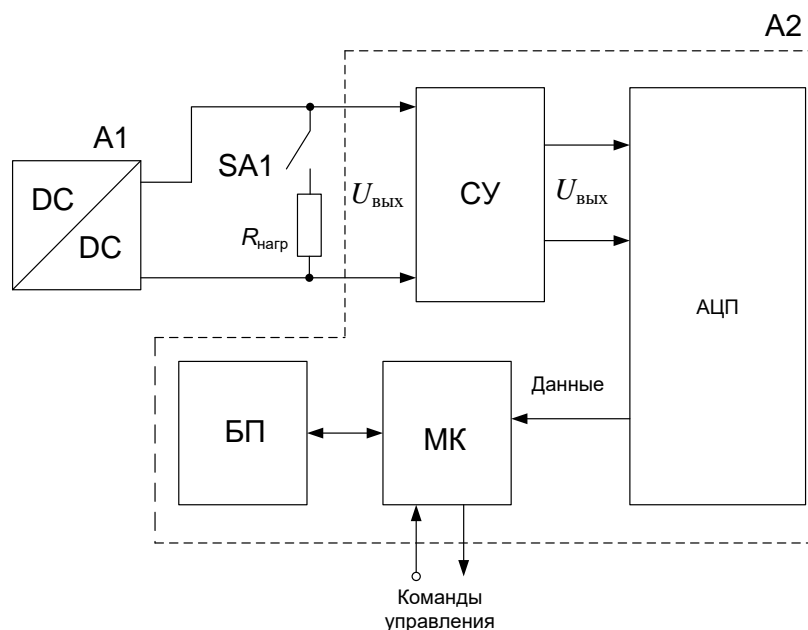
Проведено сравнение двух способов контроля электрических параметров с точки зрения минимизации объема сохраняемых данных.

### 2.1 Структура модели устройства непрерывного контроля электрических параметров

Типовая структура устройства непрерывного контроля электрических параметров может содержать датчики тока и напряжения, согласующее устройство и узлы обработки данных. Один из возможных вариантов построения такого устройства (рис. 2.1) в качестве контролируемого параметра использует переходный процесс выходного напряжения DC/DC-преобразователя при увеличении нагрузки.

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , снимаемое с нагрузки  $R_{\text{нагр}}$ , поступает на вход СУ, где преобразуется до требуемого значения для АЦП [74, 75]. АЦП преобразовывает напряжение в цифровую форму, после чего оно поступает на МК. МК осуществляет запись информации в БП, а также вызов ее при получении команды управления.





A1 – DC/DC-преобразователь напряжения;  
 A2 – устройство контроля электрических параметров;  
 СУ – согласующее устройство; БП – блок памяти; МК – микроконтроллер.

Рисунок 2.1 – Структурная схема устройства контроля электрических параметров преобразователя напряжения

При изменении нагрузки преобразователя (замыкании ключа SA1) происходит кратковременный переходный процесс на его выходе. Так, с увеличением нагрузки напряжение  $U_{\text{вых}}$  снижается на величину  $\Delta U_{\text{вых}} \approx 500$  мВ (рис. 2.2). Примерно через 200 мкс оно вновь стабилизируется до требуемого уровня.

Устройство контроля электрических параметров должно зафиксировать этот переходный процесс, сохранить информацию о нем в БП и провести восстановление при необходимости.

При проектировании подобных устройств возникает ряд важных задач, формирующих набор основных технических требований [76]:

- выбор минимальной частоты дискретизации измеряемых параметров, необходимой для точной обработки информации и восстановления ее после записи в БП;
- определение точности восстановления формы переходного процесса;

– определение объема памяти запоминающего устройства для сохранения контролируемой информации (переходного процесса).

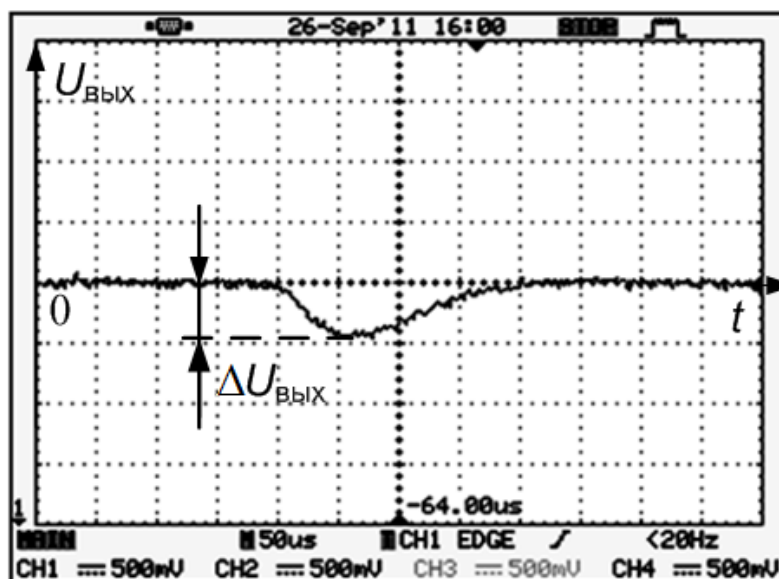


Рисунок 2.2 – Осциллограмма переходного процесса при изменении нагрузки на выходе преобразователя напряжения

## 2.2 Исследование работы модели устройства контроля при изменении контролируемого параметра

Для полноты исследования представим переходный процесс изменения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  (см. рис. 2.2) в виде аппроксимированной функции  $S(t)$ . Данную функцию можно аппроксимировать (рис. 2.3), разделив на несколько интервалов [76].

Аналитическое поинтервальное описание функции  $S(t)$  имеет вид:

$$S(t) = \begin{cases} -\frac{2Et}{T} & \text{при } t \in (0; 0,5T); \\ -E & \text{при } t \in (0,5T; T); \\ \frac{Et}{T} - 2E & \text{при } t \in (T; 2T); \\ 0 & \text{при } t \in (2T; 3T), \end{cases}$$

где  $E$  – амплитуда сигнала;  $t$  – время;  $T$  – длительность аппроксимированного интервала.

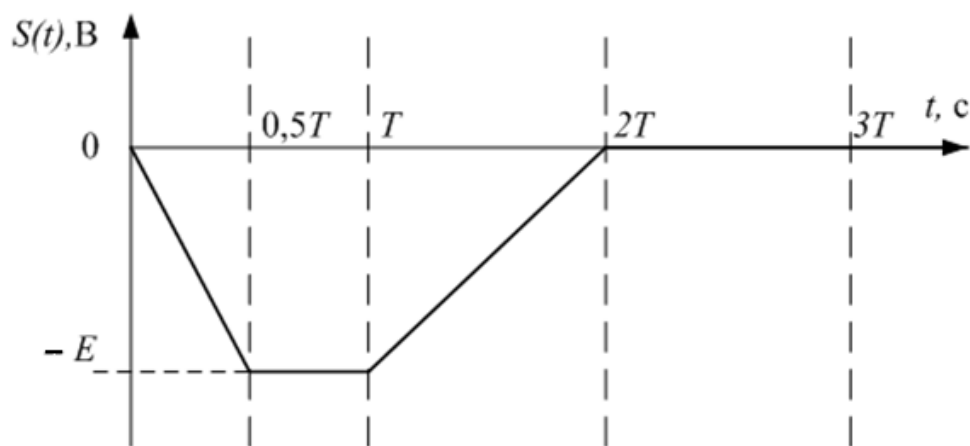


Рисунок 2.3 – Переходный процесс в виде функции  $S(t)$

Для составления математической модели переходного процесса опишем функцию  $S(t)$  с помощью простейших функций (рис. 2.4).

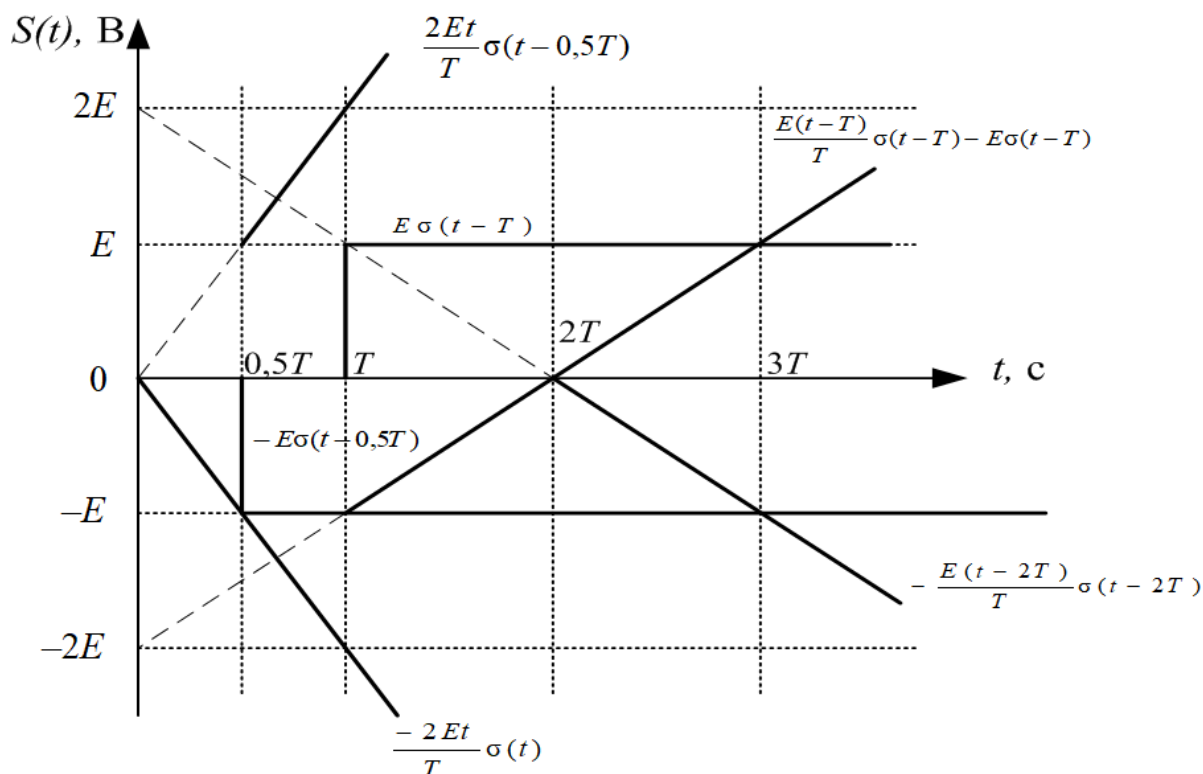


Рисунок 2.4 – Представление функции  $S(t)$  суммой простейших функций

При построения функции  $S(t)$  использованы:

а) единичная ступенчатая функция

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \in (-\infty; 0); \\ 1 & \text{при } t \in (0; +\infty); \end{cases}$$

б) линейная функция, проходящая через начало координат,

$$y(t) = \frac{Et}{T}.$$

В результате при алгебраической сумме представленных функций получим исходную аппроксимированную функцию (см. рис. 2.3).

Таким образом, математическая модель переходного процесса примет вид

$$\begin{aligned} S(t) = & \frac{-2Et}{T} \sigma(t) + \frac{2Et}{T} \sigma(t - 0,5T) - E\sigma(t - 0,5T) + E\sigma(t - T) + \\ & + \left( \frac{E(t-T)}{T} \sigma(t - T) - E\sigma(t - T) \right) - \frac{E(t-2T)}{T} \sigma(t - 2T). \end{aligned}$$

Получив математическую модель функции  $S(t)$ , перейдем к ее дальнейшему исследованию. Определим частоту дискретизации для данной функции.

Согласно теореме Котельникова, частоту дискретизации  $\omega_d$  выбирают так, чтобы  $\omega_d = 2\omega_b$ , где  $\omega_b$  – верхняя граничная частота [68].

Верхнюю граничную частоту  $\omega_b$  определяют, исходя из построения функции спектральной плотности по пороговому критерию.

Выражение для спектральной плотности функции имеет вид

$$\dot{S}(\omega) = \int_0^{T_c} S(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (2.1)$$

где  $\omega$  – частота;  $T_c$  – полная длительность сигнала;  $j = \sqrt{-1}$ .

Для определения верхней граничной частоты спектра сигнала используем пороговый критерий: на частотах выше  $\omega_v$  модуль спектральной плотности не должен превышать уровня 0,1 от максимального значения.

Построим график модуля спектральной плотности контролируемого сигнала (рис. 2.5), предварительно подставив значения параметров  $E$  и  $T_c$  в формулу (2.1).

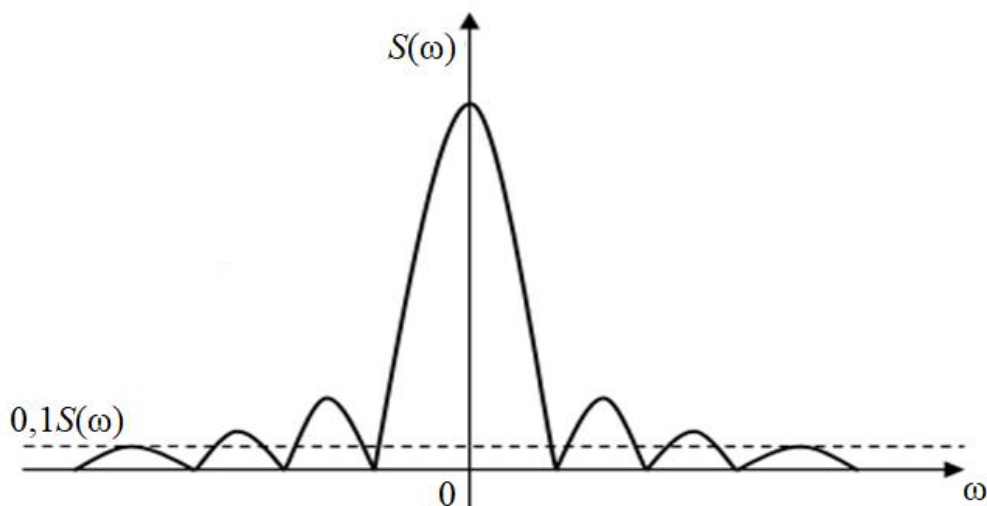


Рисунок 2.5 – График модуля спектральной плотности контролируемого параметра в общем виде

Графически определив  $\omega_v$ , вычислим значение частоты дискретизации. При этом период дискретизации сигнала будет равен

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d}. \quad (2.2)$$

Функция может быть приближенно описана конечным числом выборочных значений, которые являются степенями свободы сигнала.

Число отсчетов (степеней свободы) определяется из выражения

$$N = \frac{T_c}{T_d} = \frac{3T}{T_d}. \quad (2.3)$$

Тогда дискретизированная функция  $S(nT_d)$  будет представлена набором отсчетов (рис. 2.6).

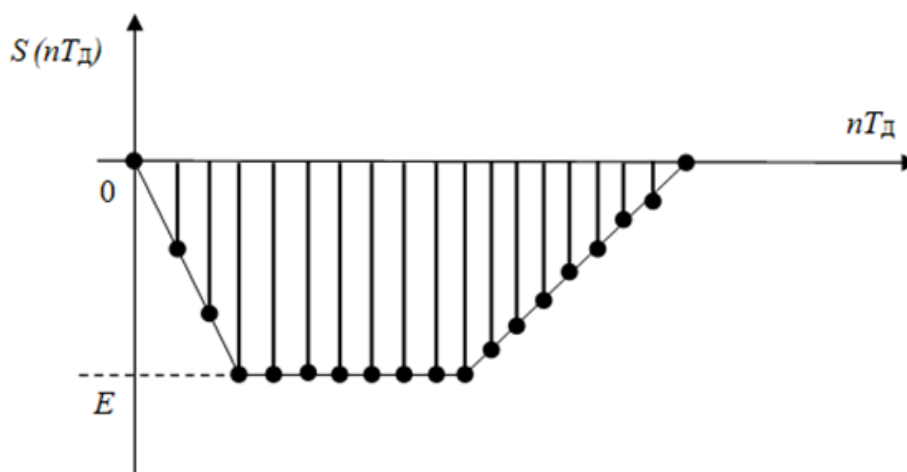


Рисунок 2.6 – Дискретизированная функция в общем виде

С помощью прямого дискретного преобразования Фурье установим связь между временными отсчетами функции и отсчетами спектральной плотности сигнала через коэффициенты преобразования [67, 68]:

$$\dot{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(nT_d) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, \quad (2.4)$$

где  $\dot{C}_k$  – комплексный коэффициент ряда Фурье;  $k = 0, 1, 2 \dots N$  – порядковый номер коэффициента ряда Фурье;  $n = k = 0, 1, 2 \dots N$ .

Используя частотные отсчеты, можно восстановить исходную аналоговую функцию, применяя ряд Фурье:

$$S_{\text{вос}}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{C}_k e^{jnk \frac{2\pi}{N}}. \quad (2.5)$$

Как видно из формулы (2.5), качество восстановления контролируемого сигнала зависит от количества суммируемых отсчетов  $N$ .

Восстановление исходной функции с различным числом суммируемых гармоник осуществляется по следующей формуле:

$$S_{\text{вос}}(t) = C_0 + \left( \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} 2|C_k| \cos(k\omega t + \arg(C_k)) \right). \quad (2.6)$$

По характеру восстановления функции (рис. 2.7) с различным количеством суммируемых гармоник  $N1$ ,  $N2$  и  $N3$  ( $N3 > N2 > N1$ ) можно сделать вывод, что качество восстановления сигнала увеличивается пропорционально количеству суммированных гармоник. Наибольшее качество восстановления достигается при количестве гармоник  $N3$ .

В качестве примера проанализируем имеющийся контролируемый сигнал, предварительно задав ему следующие параметры:  $E = -0,5$  В,  $T_c = 300$  мкс.

Определим верхнюю граничную частоту и частоту дискретизации для данной функции, построив график модуля спектральной плотности (рис. 2.8).

Из графика следует, что верхняя частота  $\omega_{\text{в}} = 1,89 \cdot 10^5$  рад/с, а частота дискретизации  $\omega_{\text{д}} = 3,78 \cdot 10^5$  рад/с.

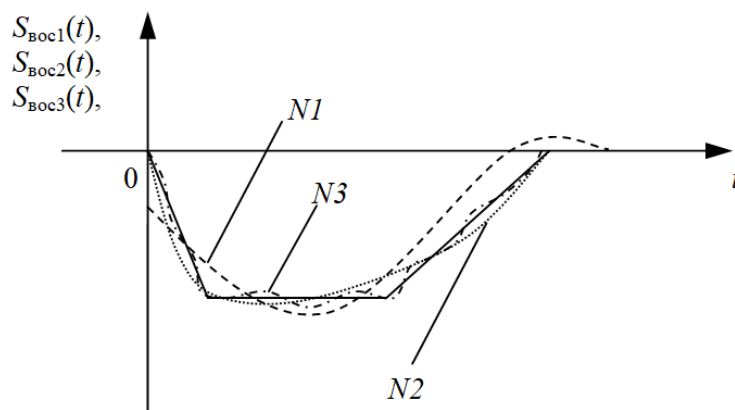


Рисунок 2.7 – Восстановление исходной функции с различным количеством суммируемых гармоник,  $N3 > N2 > N1$

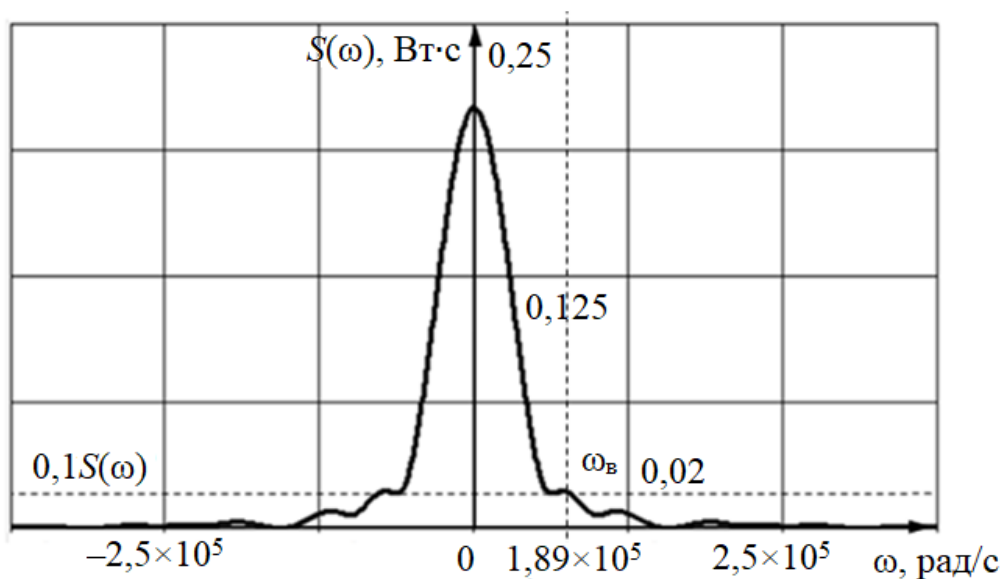


Рисунок 2.8 – График модуля спектральной плотности контролируемого параметра ( $E = -0,5 \text{ В}$ ,  $T_c = 300 \text{ мкс}$ )

Используем полученное значение для определения периода дискретизации сигнала

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{6,28}{3,78 \cdot 10^5} = 1,661 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Число отсчетов (степеней свободы) будет равно



$$N = \frac{T_c}{T_d} = \frac{3T}{T_d} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{1,661 \cdot 10^{-5}} = 18,061.$$

С учетом того, что число отсчетов должно быть целым, принимаем  $N = 18$ .

Тогда дискретизированная функция  $S(nT_d)$  будет иметь набор из 18 отсчетов (рис. 2.9) с шагом  $n = 0, 1, 2 \dots 17$ .

По формуле (2.5) вычислим значения комплексных коэффициентов ряда Фурье (таблица 2.1).

Учитывая их четное количество и комплексную сопряженность, получаем функцию:

$$S_{\text{вос}}(t) = C_0 + 2|C_1| \cos\left(\frac{2\pi}{T_c} t + \varphi_1\right) + 2|C_2| \cos\left(\frac{4\pi}{T_c} t + \varphi_2\right) + \dots + \left|C_{\frac{N}{2}}\right| \cos\left(\frac{N\pi}{T_c} t + \varphi_{\frac{N}{2}}\right),$$

где  $\varphi_i = \arg C_i$  – фазовый угол коэффициента дискретного преобразования Фурье.

Восстановим исходную функцию с различным числом суммируемых гармоник (рис. 2.10), используя формулу (2.6), и условно разделим ее на интервалы для оценки отклонений (таблица 2.2).

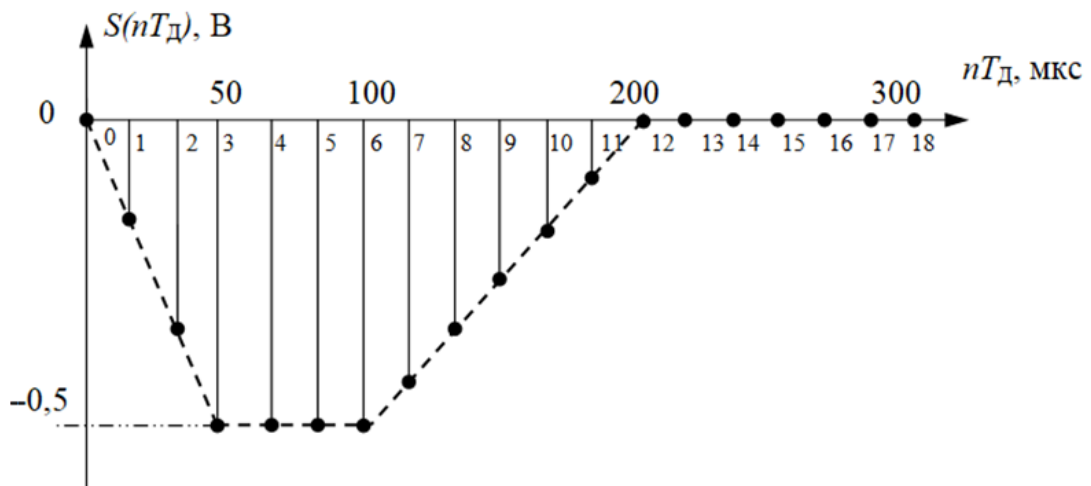


Рисунок 2.9 – Дискретизированная функция контролируемого параметра ( $E = -0,5$  В,  $T_c = 300$  мкс)

Таблица 2.1 – Комплексные коэффициенты ряда Фурье  $\dot{C}_k$ 

Коэф- фициент	Значение	Коэф- фициент	Значение
$C_0$	$-0,206E$	$C_9$	$5,167 \cdot 10^{-3}E$
$C_1$	$(0,038+j0,133)E$	$C_{10}$	$(3,215 \cdot 10^{-3}-j4,931 \cdot 10^{-4})E$
$C_2$	$(0,031-j1,144 \cdot 10^{-3})E$	$C_{11}$	$(1,278 \cdot 10^{-3}-j4,360 \cdot 10^{-4})E$
$C_3$	$(0,018-j3,368 \cdot 10^{-4})E$	$C_{12}$	$(-3,056 \cdot 10^{-4}+j5,292)E$
$C_4$	$(8,717 \cdot 10^{-3}-j6513 \cdot 10^{-4})E$	$C_{13}$	$(5,58 \cdot 10^{-3}+j0,043)E$
$C_5$	$(1,059 \cdot 10^{-3}-j7,2470 \cdot 10^{-3})E$	$C_{14}$	$(1,059 \cdot 10^{-4}-j7,240 \cdot 10^{-4})E$
$C_6$	$(3,056 \cdot 10^{-4}+j5,292 \cdot 10^{-4})E$	$C_{15}$	$(0,018+j3,368 \cdot 10^{-4})E$
$C_7$	$(1,278 \cdot 10^{-3}+j4,260 \cdot 10^{-4})E$	$C_{16}$	$(0,031+j1,144 \cdot 10^{-3})E$
$C_8$	$(3,215 \cdot 10^{-3}-j4,931 \cdot 10^{-4})E$	$C_{17}$	$(0,038-j0,133)E$

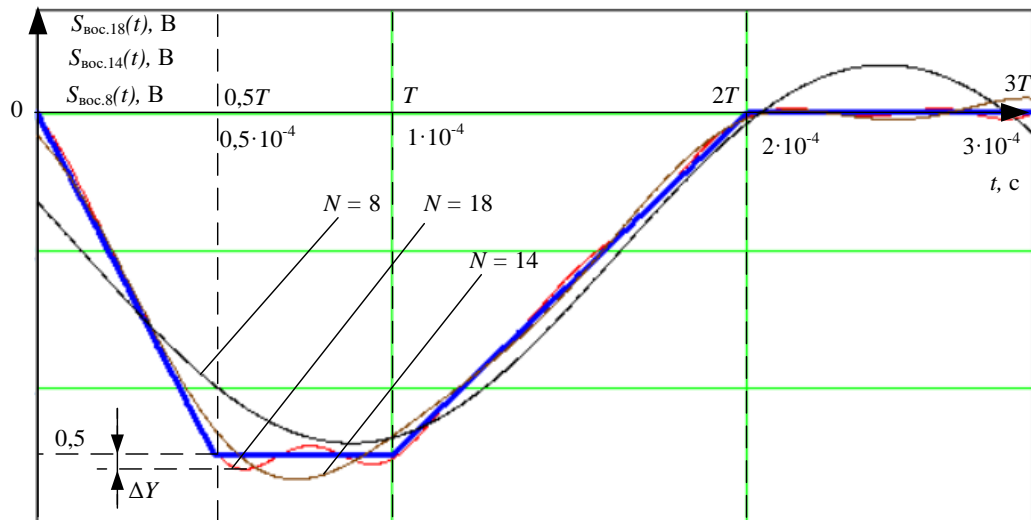


Рисунок 2.10 – Восстановленные формы контролируемого сигнала при различном количестве суммируемых гармоник

Таблица 2.2 – Зависимость отклонений  $\Delta Y$  восстановленного сигнала от количества суммируемых гармоник

Интервал	$\Delta Y, В$		
	при $N=8$	при $N=14$	при $N=18$
$0 \leq t \leq 0,5T$	0,12	0,02	0,001
$0,5T < t \leq T$	0,1	0,031	0,02
$T < t \leq 2T$	0,02	0,02	0,001
$2T < t \leq 3T$	0,88	0,011	0,012

Максимальное отклонение восстановленного сигнала от исходного происходит при  $N = 18$  на интервале  $0,5 \leq t \leq T$  и равно 0,02 В. Полный размах аппроксимированного сигнала составляет 0,5 В.

Значение допустимой погрешности восстановления контролируемого сигнала составит:

$$\delta = \frac{\Delta Y \cdot 100 \%}{0,5} = \frac{0,02 \cdot 100 \%}{0,5} = 4 \%$$

С учетом этого можно определить объем памяти, необходимый для записи измеряемого параметра, по следующей формуле:

$$V = NM, \quad (2.7)$$

где  $M$  – разрядность АЦП.

Так, для записи переходного процесса длительностью 300 мкс при числе отсчетов сигнала  $N = 18$  и обработке шестнадцатиразрядным АЦП объем требуемой памяти составит:

$$V = NM = 18 \cdot 16 = 288 \text{ бит.}$$

Проведем оценку требуемых ресурсов памяти для сигнала  $S(t)$  с параметрами  $E = -2$  В,  $T_c = 3$  мс.

Из графика модуля спектральной плотности (рис. 2.11) следует, что верхняя частота  $\omega_b = 0,8 \cdot 10^4$  рад/с, а частота дискретизации  $\omega_d = 1,6 \cdot 10^4$  рад/с.

Тогда период дискретизации сигнала составит

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{6,28}{1,6 \cdot 10^4} = 392 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Число отсчетов составит

$$N = \frac{T_c}{T_d} = \frac{3T}{T_d} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{392 \cdot 10^{-6}} = 8.$$

Так, дискретизированная функция  $S(nT_d)$  будет представлена набором из 8 отсчетов (рис. 2.12) с шагом  $n = 0, 1, 2 \dots 7$ .

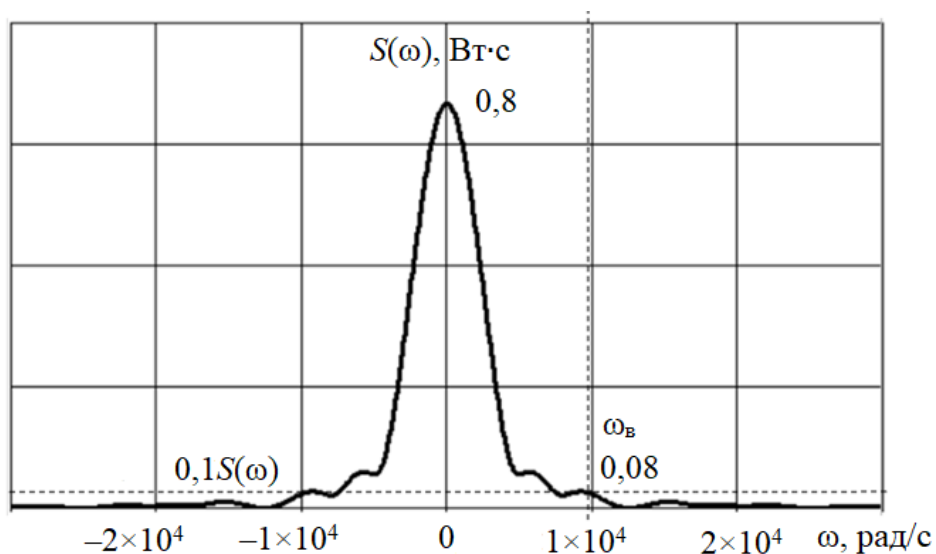


Рисунок 2.11 – График модуля спектральной плотности контролируемого параметра ( $E = -2$  В,  $T_c = 300$  мкс)

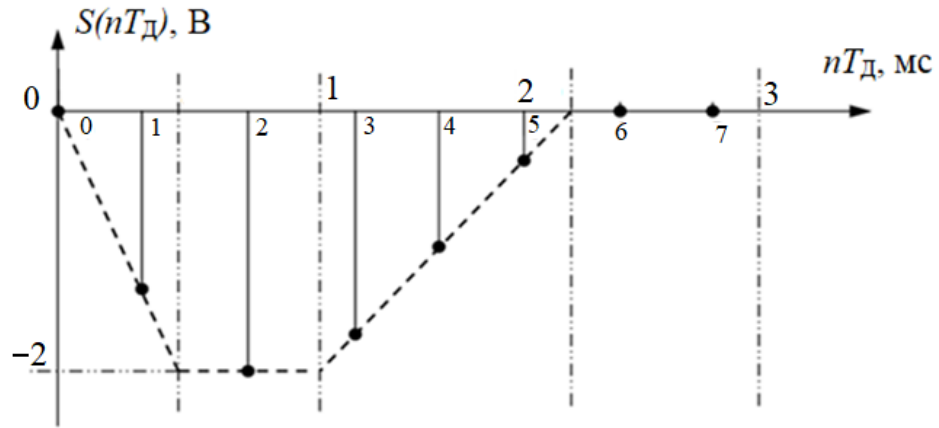


Рисунок 2.12 – Дискретизированная функция контролируемого параметра  
( $E = -2$  В,  $T_c = 3$  мс)

Аналогичным образом восстановим исходную функцию с различным числом суммируемых гармоник (рис. 2.13), используя формулу (2.10).

Наиболее точное восстановление контролируемого сигнала происходит, когда число отсчетов  $N = 8$ . При этом максимальное отклонение восстановленного сигнала от исходного составляет  $\Delta Y = 0,25$  В, а полный размах сигнала – 2 В.

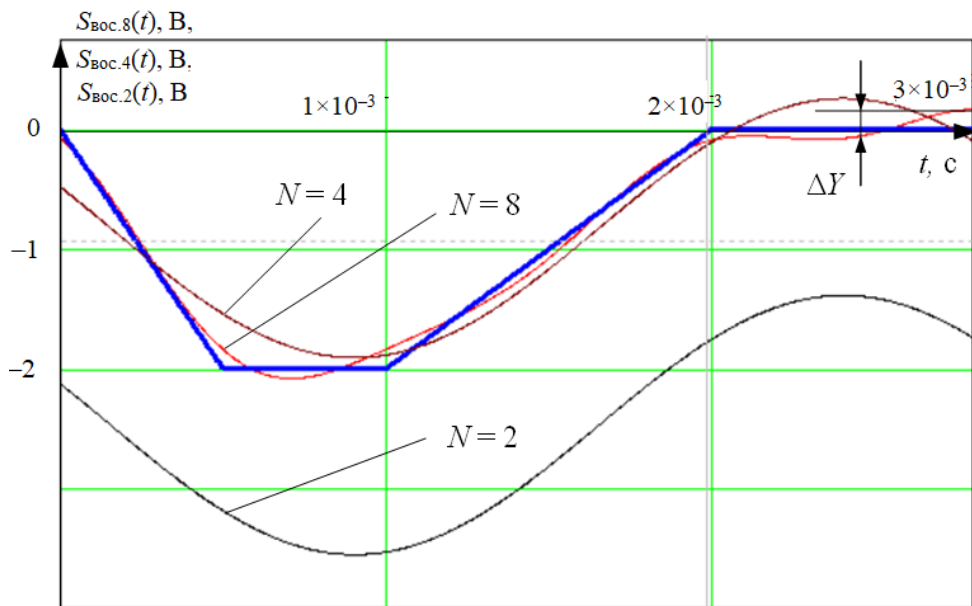


Рисунок 2.13 – Восстановленные формы контролируемого сигнала при различных количествах суммируемых гармоник

Значение погрешности составит

$$\delta = \frac{\Delta Y \cdot 100\%}{0,5} = \frac{0,25 \cdot 100\%}{2} = 12,5 \%$$

Определим объем памяти, необходимый для записи контролируемого сигнала длительностью 3 мс, при числе отсчетов  $N = 8$  и обработке шестнадцатиразрядным АЦП:

$$V = NM = 8 \cdot 16 = 128 \text{ бит.}$$

### **2.3 Результаты исследования непрерывного контроля электрических параметров**

Представленная методика с используемым математическим аппаратом позволяют проводить преобразование и оценку восстановления контролируемого параметра в виде сигнала с различной точностью.

Определено необходимое число отсчетов для записи и восстановления формы контролируемого переходного процесса длительностью 300 мкс с погрешностью  $\pm 4 \%$ . Построены графики сигнала, восстановленного с помощью ряда Фурье, при различном количестве суммируемых гармоник. Разработанная методика восстановления позволяет получить исходную форму напряжения с необходимой точностью для дальнейшей оценки.

Продемонстрирован пример расчета объема памяти для записи сигнала (переходного процесса) одного электрического параметра длительностью 300 мкс. Применяя методику расчета памяти, можно определить необходимый объем для автоматического сохранения данных при различной длительности изменения контролируемых сигналов.

Аналитическое определение точности восстановления сигнала и объема памяти для его хранения позволяет оценить требуемые ресурсы вычислительных средств для построения устройств контроля электрических параметров.

Недостатком такого контроля является повышенный износ энергонезависимой памяти, выход из строя которой приведет к потере всех информационных данных.

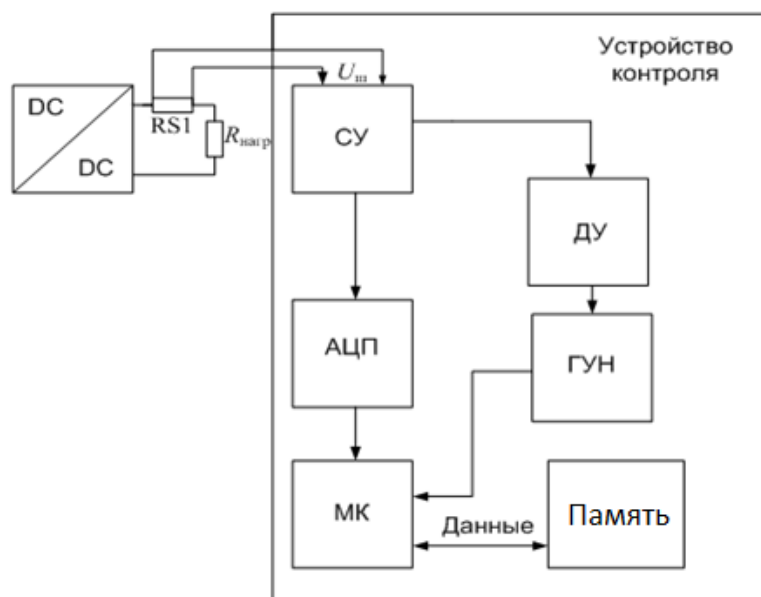
#### **2.4 Исследование способа и устройства контроля электрических параметров, основанных на вычислении производной**

Для минимизации объема сохраняемых данных проанализируем новый подход, суть которого заключается в синхронизации изменения контролируемого параметра и времени: обработка и запись информации производятся с переменным значением частоты циклов записи, частота отсчетов пропорциональна скорости изменения контролируемого параметра [70, 71].

Рассмотрим подробно реализацию данного способа на примере контроля одного электрического параметра с помощью устройства, производящего запись информации с переменным значением частоты циклов (рис. 2.14) [70, 78].

Принцип работы устройства контроля состоит в слежении за напряжением шунта  $U_{ш}$  DC/DC-преобразователя, поступающим на СУ с целью нормирования по уровню для согласованной работы с АЦП и ДУ.

АЦП преобразовывает напряжение  $U_{ш}$  в цифровой код для передачи на МК. В это время ДУ вычисляет значение производной от  $U_{ш}$  для ГУН, который пропорционально изменению амплитуды выходного напряжения ДУ формирует тактовые импульсы с переменным значением частоты. При поступлении этих импульсов МК записывает значение  $U_{ш}$  в память.



СУ – согласующее устройство; МК – микроконтроллер.

Рисунок 2.14 – Взаимосвязь преобразователя напряжения и устройства контроля

Вследствие изменения контролируемого параметра (тока нагрузки) на временном промежутке от  $t_0$  до  $t_1$  изменяются и эпюры напряжений устройства контроля (рис. 2.15).

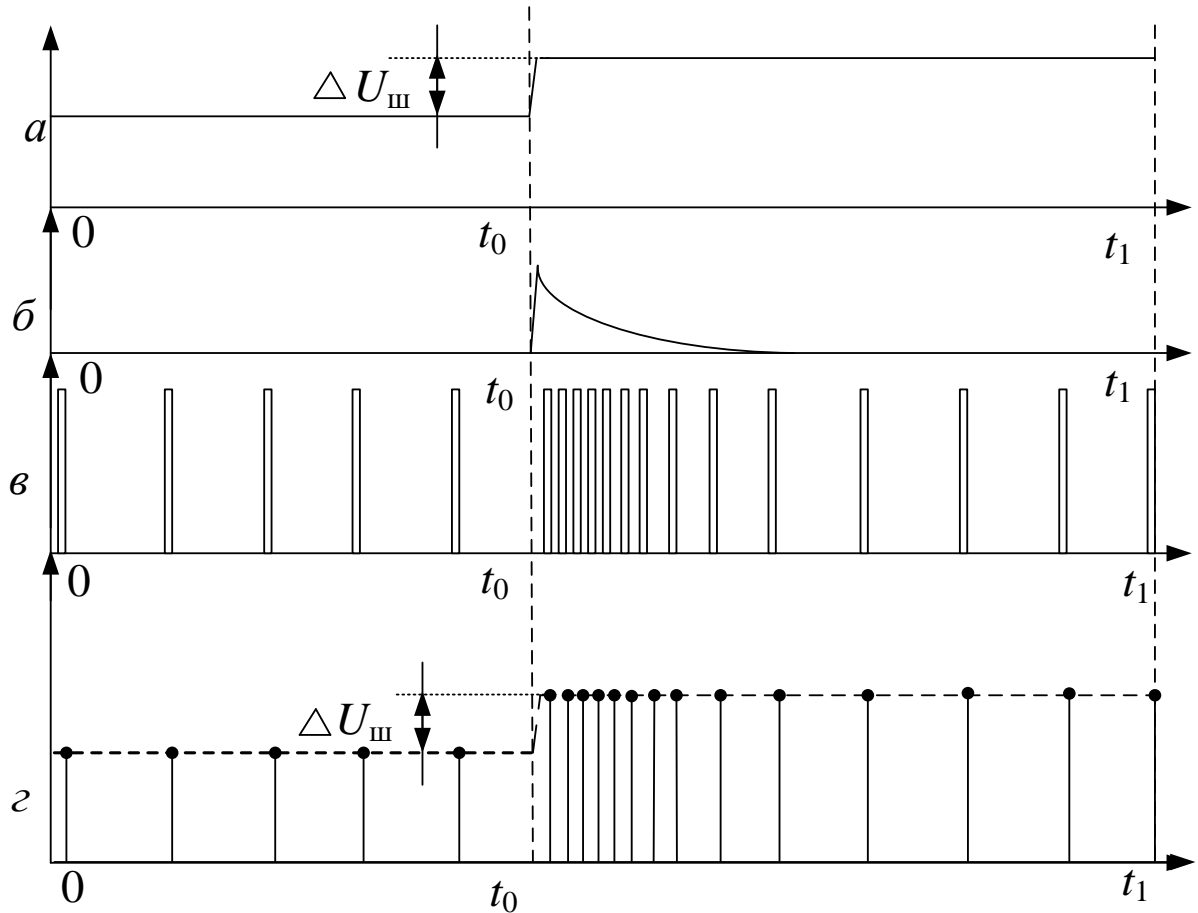
На интервале от  $t_0$  до  $t_1$  при отклонении тока нагрузки (рис. 2.15, а) напряжение шунта пропорционально увеличивается на величину  $\Delta U_{ш}$ .

ДУ обрабатывает переходный процесс параметра  $\Delta U_{ш}$ , формируя на своем выходе отклик напряжения. Значение этого отклика пропорционально амплитуде и скорости изменения параметра  $\Delta U_{ш}$  (рис. 2.15, б) [79].

Одновременно с изменением выходного напряжения ДУ ГУН увеличивает частоту формирования тактовых импульсов (рис. 2.15, в).

В соответствии с этими импульсами производится выборка отсчетов значений контролируемого параметра (рис. 2.15, г) и их оперативное сохранение в запоминающее устройство.





$a$  – напряжение  $U_{III}$ ;  $б$  – выходное напряжение ДУ;  $в$  – импульсы на выходе ГУН;  $г$  – временные отчеты сохраняемых в память значений напряжения  $U_{III}$ .

Рисунок 2.15 – Эпюры напряжений устройства контроля

После изменения контролируемого параметра частота тактовых импульсов, формируемых на выходе ГУН, снижается до свободной частоты (минимальной).

ДУ и ГУН являются важными узлами в представленном устройстве контроля. Они дают возможность изменять выборку тактовых импульсов и производить запись в память при изменении контролируемого параметра. Тем самым формируются привязка к переходному процессу, синхронизация записи информации и тактовых импульсов. Информация о времени и текущем значении выхода АЦП также фиксируется при каждом такте.

За счет сохранения данных с переменной частотой возможна минимизация их объема и уменьшение физического износа памяти.

## 2.5 Описание модели устройства контроля

Одно из оптимальных решений при контроле электрических параметров для минимизации объема сохраняемой информации – это синхронизация с переходным процессом или событием. При этом запись информации осуществляется только при изменении электрического параметра, что дает возможность рационально использовать объем имеющейся памяти без применения сложных алгоритмов сжатия [80].

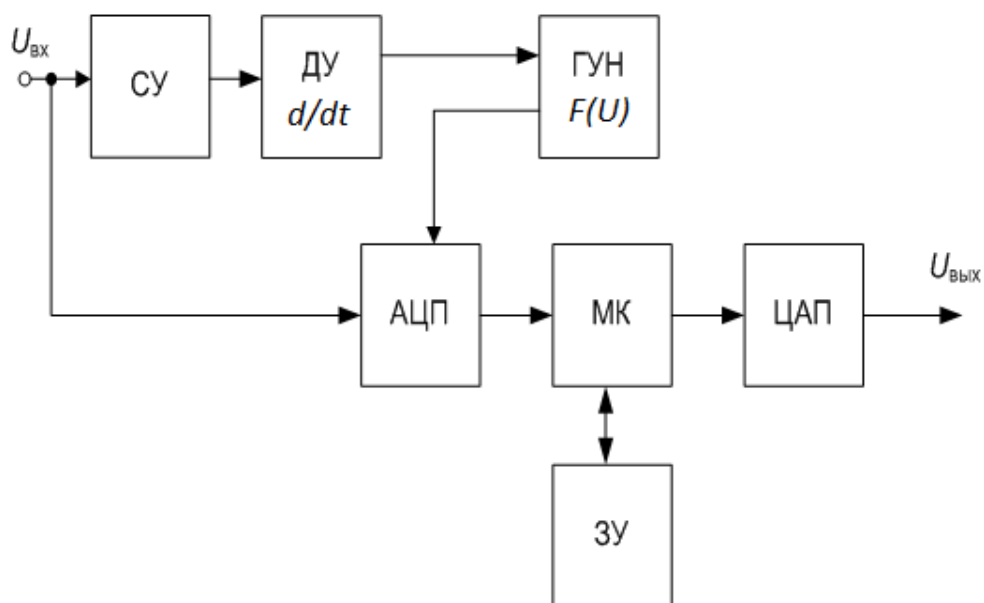
Для построения такого устройства необходимо знать его граничные параметры работы, при которых оно может адекватно оценить событие и записать его в память. При этом необходимо исследовать, как влияют параметры основных узлов на точность восстановления контролируемого параметра и на объем сохраняемой информации.

Принцип работы устройства (рис. 2.16) следующий.

Контролируемое входное напряжение  $U_{вх}$  одновременно поступает на СУ и АЦП. СУ преобразовывает его до уровня, необходимого для работы с ДУ. ДУ вычисляет производную от поступающего сигнала и формирует на своем выходе отклик напряжения [76] для ГУН [79, 80].

ГУН в зависимости от значения выходного напряжения ДУ (фактически от скорости изменения входного сигнала) формирует тактовые импульсы, необходимые для работы АЦП. АЦП преобразует аналоговый входной сигнал в цифровой код и транслирует данные на вход МК, связанного с ЗУ и ЦАП.

МК по команде записывает в ЗУ информацию об изменении входного сигнала  $S(t)$  при возникновении неисправностей или различных переходных процессов. По внешней команде управления МК получает данные из ЗУ и подает их на ЦАП, который восстанавливает исходный сигнал  $U_{вых}$  для дальнейшего анализа.



СУ – согласующее устройство; МК – микроконтроллер; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЗУ – запоминающее устройство.

Рисунок 2.16 – Устройство контроля электрических параметров

На основании полученной информации в виде формы входного контролируемого сигнала можно провести качественную и количественную оценку переходного процесса при неисправности: например, определить форму переходного процесса, вычислить его скорость изменения, зафиксировать максимальные и минимальные отклонения напряжения.

Исходя из принципа работы устройства контроля следует, что ключевыми узлами являются ДУ и ГУН. Именно они влияют на точность восстановления контролируемого сигнала и содержат параметрические элементы, обеспечивающие их требуемые характеристики. Для ДУ это – постоянная времени [79], для ГУН – диапазон перестройки частот, линейность характеристики и т. д. [79...86].

В соответствии с алгоритмом работы представим имитационную модель устройства контроля в программе моделирования электронных устройств NI Multisim с целью исследования ее во временной области (рис. 2.17) [87, 88].

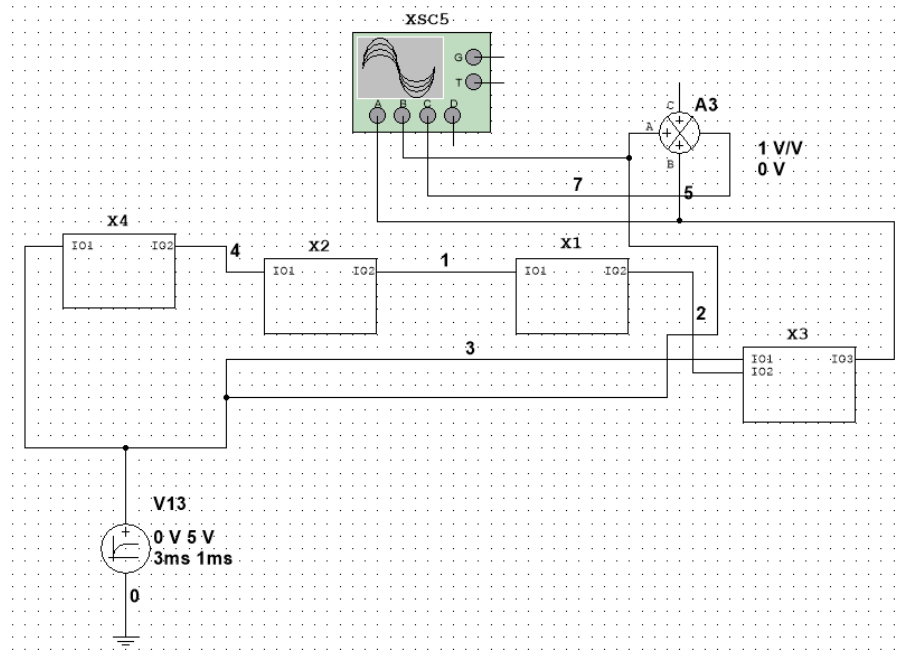


Рисунок 2.17 – Имитационная модель устройства контроля

Для упрощения имитационная модель составлена в виде иерархических блоков (подсхем), каждый из которых показан в виде модели «черного ящика». При разработке функциональных узлов в таких блоках использовались радиоэлектронные компоненты из стандартных библиотек.

Устройство контроля состоит из узла вычисления разности сигналов (A1), согласующего устройства (X4), дифференциатора (X2), ГУН (X1) и блока микроконтроллера (X3). Блок микроконтроллера состоит из восьмиразрядного параллельного АЦП, цифро-аналогового преобразователя, запоминающего устройства и микроконтроллера, взятых из стандартных библиотек.

Электрические принципиальные схемы ГУН и ДУ представлены в приложении Г.

Воздействующие параметры задаются на генераторе сигналов V13, где можно установить амплитуду, длительность плоской вершины, частоту, длительность фронта, спада и т. д. (рис. 2.18). Результаты моделирования фиксируются осциллографом XSC5.

Испытательный сигнал (воздействие) поступает одновременно на дифференциатор, ГУН и блок микроконтроллера. Воздействие контролируется каналом «А» осциллографа XSC5.

Восстановленный сигнал поступает с выхода «ЮЗ» блока микроконтроллера на вход канала «В» осциллографа XSC5, а разность восстановленного и испытательного сигнала – на вход «С» с устройства вычисления разности сигналов.

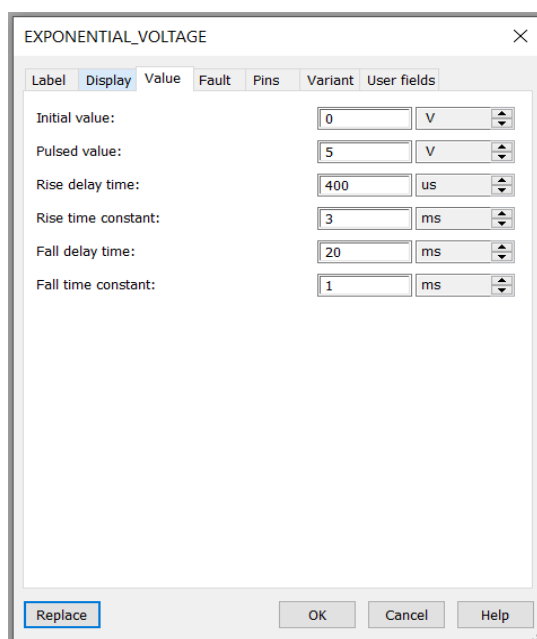


Рисунок 2.18 – Меню задания параметров воздействий

После запуска моделирования с формирователя сигнала поступает напряжение заданной формы на вход устройства контроля. После выполнения всех этапов аналоговой и цифровой обработки на выходе блока микроконтроллера происходит восстановление сигнала и его дальнейшая оценка.

## 2.6 Оценка качества восстановления сигнала при изменении параметров дифференцирующего устройства

ДУ вычисляет значение первой производной от поступающего электрического сигнала на вход устройства контроля. Напряжение на его выходе  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  связано с входным воздействием  $U_{\text{ВХ}}(t)$  следующим соотношением:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \tau \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt},$$

где  $\tau$  – постоянная времени ДУ.

Постоянная времени  $\tau$  определяется номинальными значениями емкости конденсатора  $C$  и сопротивления резистора  $R$ :  $\tau = RC$ .

Функция амплитудно-частотной характеристики дифференцирующей цепи выглядит следующим образом:

$$|K(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2 + 1}}.$$

Амплитудно-частотная и переходная характеристики связаны между собой через предельные соотношения [68]

$$\begin{cases} \lim_{\omega \rightarrow 0} K(\omega) = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t); \\ \lim_{\omega \rightarrow \infty} K(\omega) = \lim_{t \rightarrow 0} h(t). \end{cases}$$

Амплитудно-частотная и переходная характеристики для дифференцирующей цепи зависят от значения постоянной времени (рис. 2.19).

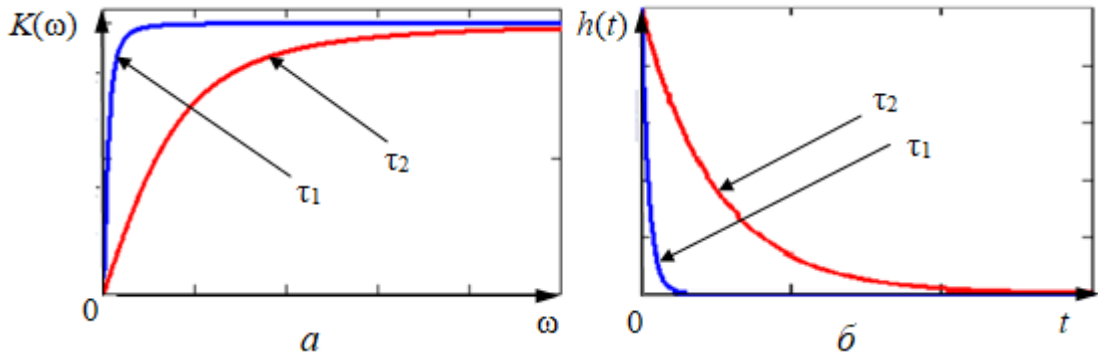


Рисунок 2.19 – Зависимость амплитудно-частотной (а) и переходной (б) характеристик от постоянной времени

Переходная характеристика описывает выходную реакцию цепи на единичную ступенчатую функцию. Проведя анализ переходных характеристик, можно сделать вывод, что скорость изменения производной будет всегда отличаться в зависимости от значения постоянной времени. Чем меньше значение постоянной времени цепи, тем медленнее изменяется сигнал на выходе ДУ. Имея графическое представление о переходной характеристике, можно оценить скорость изменения производной от воздействия контролируемого параметра.

Проанализируем функционирование ДУ и оценим качество восстановления контролируемого сигнала при двух значениях постоянной времени дифференцирующей цепи.

Оценка качества восстановления сигнала проводилась в среде имитационного моделирования электронных устройств NI Multisim 12 [86, 87] при следующих значениях постоянной времени:  $\tau_1 = 30$  мкс,  $\tau_2 = 600$  мкс.

В качестве испытательного сигнала на вход устройства контроля подавался импульс экспоненциальной формы со следующими параметрами: амплитуда напряжения  $U = 4,3$  В, длительность экспоненциального фронта  $t_\phi = 21,6$  мс, длительность экспоненциального среза  $t_{cp} = 2,0$  мс.

По результатам моделирования устройства контроля получены эпюры напряжений при изменении постоянной времени цепи  $\tau$  (рис. 2.20).

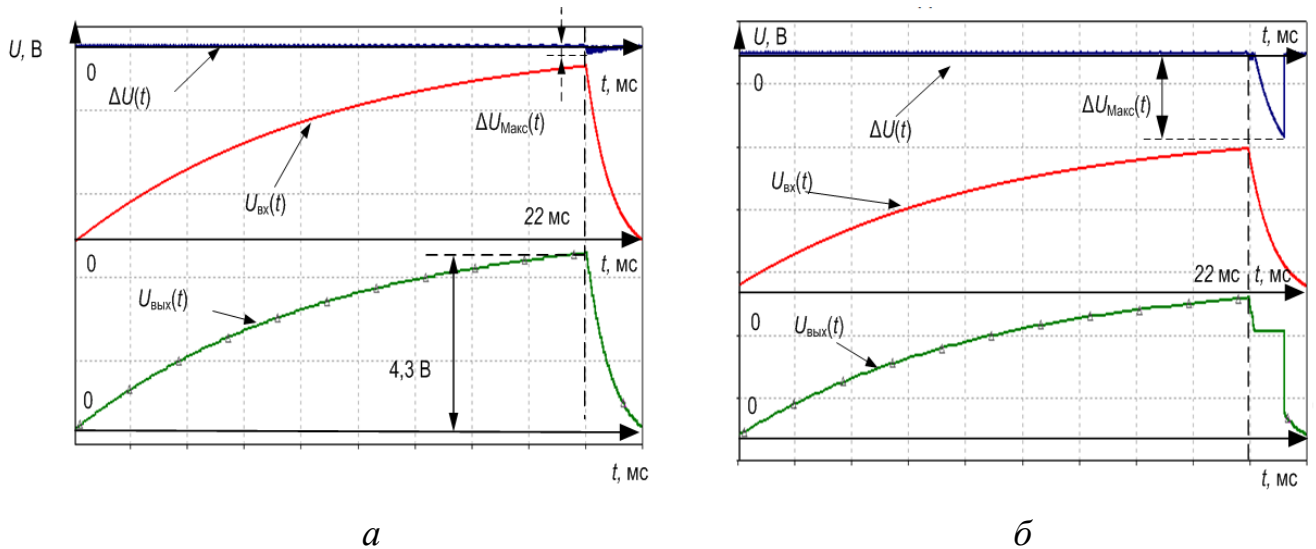


Рисунок 2.20 – Эпюры сигналов  $U_{\text{вх}}(t)$ ,  $U_{\text{вых}}(t)$  и сигнала их разности  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  при постоянной времени ДУ: *a* – при  $\tau_1 = 600$  мкс; *б* – при  $\tau_2 = 30$  мкс

Представлен в увеличенном масштабе сигнал ошибки (рис. 2.21), рассчитанный в соответствии с выражением:

$$\Delta U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вх}}(t) - U_{\text{вых}}(t).$$

В процессе дифференцирования максимальная погрешность приходится на моменты фронта или среза импульса.

Это связано с тем, что при переходных процессах производная, показывающая скорость изменения крутизны фронта или спада импульса, имеет наибольшие значения.

По результатам моделирования видно, что наименьшее отклонение восстановленного сигнала от исходного происходит при  $\tau_1 = 600$  мкс и равно  $\Delta U_{\text{вых}}(t) = 0,2$  В. Погрешность восстановления составила  $\pm 4,6$  %.

Это связано с тем, что при данном значении постоянной времени цепи реакция дифференциатора на входное воздействие происходит гораздо быстрее, чем при значении  $\tau_2 = 30$  мкс.



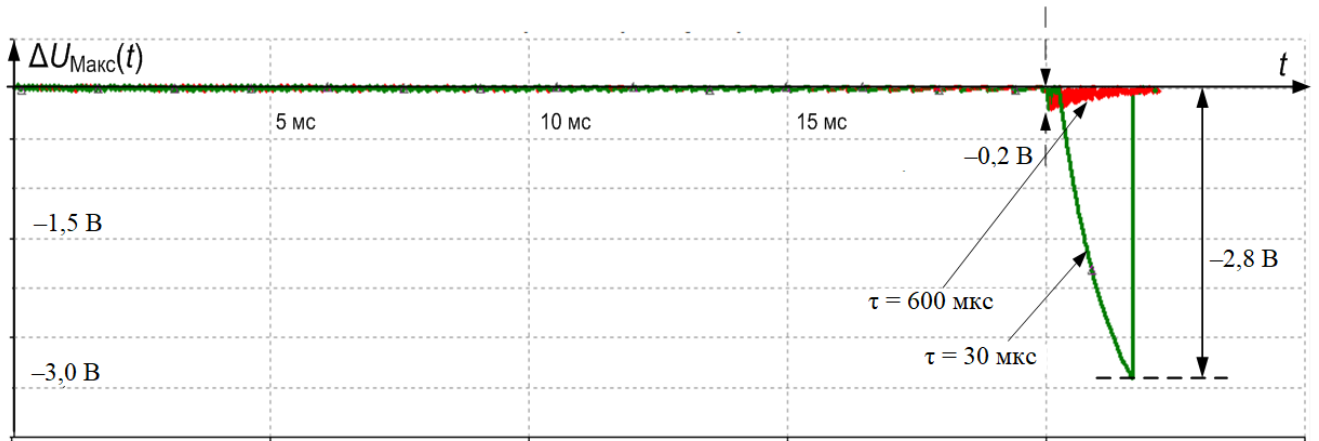


Рисунок 2.21 – Функция  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  при разных значениях постоянной времени дифференцирующей цепи

Таким образом, при большой скорости изменения выходного напряжения ДУ ГУН повышает частоту формируемых импульсов, тем самым увеличивая количество отсчетов контролируемого сигнала. Это способствует более точной и детальной записи сигнала в запоминающее устройство и, соответственно, повышению качества его восстановления.

Ошибка восстановления сигнала растет с уменьшением постоянной времени дифференцирующей цепи. При  $\tau_2 = 30$  мкс максимальное отклонение сигнала  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  достигло порядка 2,8 В. Погрешность восстановления составила  $\pm 65\%$ .

Оценим соотношение постоянной времени дифференцирующей цепи и длительности изменения сигнала.

За длительность изменения сигнала примем его экспоненциальный срез, так как при этом наблюдается максимальная погрешность восстановления (см. рис. 2.20, б).

Длительность среза составляет  $t_{\text{ср}} = 2$  мс. Постоянные времени обозначены  $\tau_1 = 600$  мкс и  $\tau_2 = 30$  мкс соответственно.

Тогда соотношение при минимальном значении погрешности составит

$$\frac{\tau_1}{t_{\text{ср}}} = \frac{600 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,3.$$

Соотношение при максимальном значении погрешности составит

$$\frac{\tau_2}{t_{\text{ср}}} = \frac{30 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,015.$$

Полученные данные показывают, что для восстановления сигнала с погрешностью порядка  $\pm 4,6$  % отношение постоянной времени дифференцирующей цепи к длительности изменения сигнала должно быть не менее 0,3.

## **2.7 Оценка качества восстановления сигнала при изменении параметров генератора, управляемого напряжением**

Не менее важное значение при записи сигнала в запоминающее устройство и его дальнейшем восстановлении имеет ГУН. Рассмотрим его структурную схему и принцип работы [89, 90].

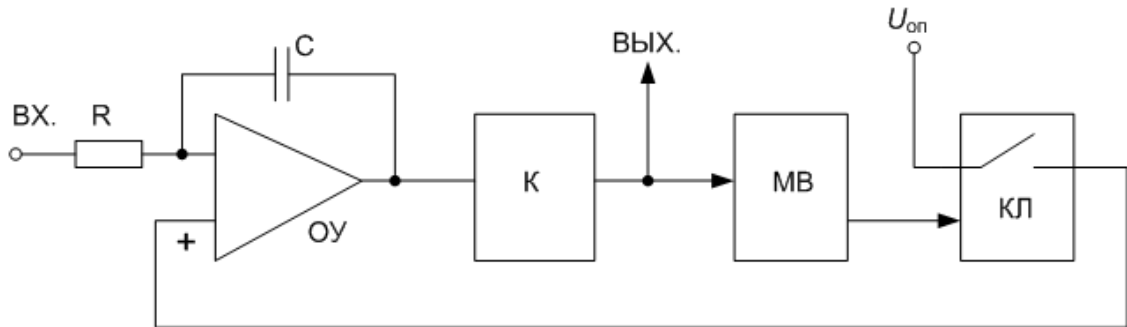
ГУН представляет собой генератор колебаний, частота которого изменяется под воздействием внешнего управляющего сигнала тока или напряжения.

Такие генераторы нашли широкое применение в аппаратуре радиосвязи, устройствах фазовой автоматической подстройки частоты, различных изделиях и устройствах промышленной автоматики [81, 84, 85].

Основу схемы (рис. 2.22) составляет интегрирующий каскад на операционном усилителе, частота переключения которого зависит от емкости  $C$ .

Ждущий мультивибратор генерирует импульс по сигналу переключения компаратора с нормированной вольт-секундной площадью [81, 82]. Для этого следует установить на его выходе ключ и ввести опорное напряжение переключения  $U_{\text{оп}}$ .

Основным исследуемым параметром для структурной схемы ГУН является диапазон перестройки частот.



ОУ – операционный усилитель; К – компаратор;  
МВ – мультивибратор; КЛ – ключ.

Рисунок 2.22 – Структурная схема ГУН

Диапазон перестройки частот определяет область изменения выходной частоты от минимального ( $f_{\min}$ ) до максимального ( $f_{\max}$ ) значений.

Уравнение выходной характеристики ГУН выглядит следующим образом:

$$f_{\text{ВЫХ}} = f_0 + S U_{\text{ВХ}}(t),$$

где  $f_0$  – свободная частота колебаний;  $S$  – крутизна характеристики ГУН;  $U_{\text{ВХ.Г}}(t)$  – входное напряжение ГУН.

Крутизна характеристики ГУН определяет зависимость частоты от изменения управляющего напряжения на единицу:

$$S = \Delta f_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}},$$

где  $\Delta f_{\text{ВЫХ}}$  – приращение выходной частоты ГУН;  $\Delta U_{\text{ВХ}}$  – приращение входного напряжения.

Представлена теоретическая выходная характеристика ГУН (рис. 2.23).

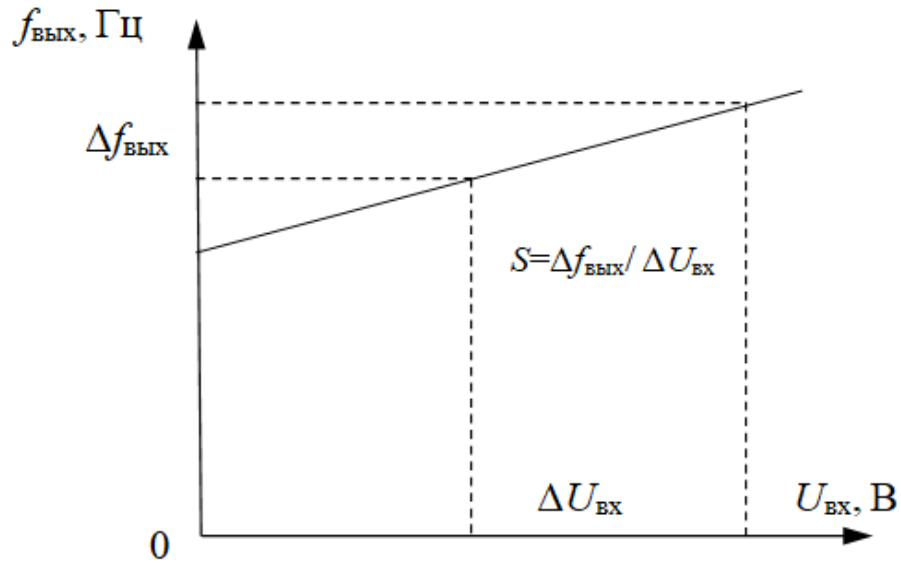


Рисунок 2.23 – Выходная характеристика ГУН

Результаты моделирования работы ГУН при изменении зарядной емкости  $C$  и входного напряжения  $U_{вх.г}(t)$  представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристика ГУН при разных значениях зарядной емкости и входного напряжения

$U_{вх.г}(t)$ , В	$f$ , кГц			
	при $C=470$ пФ	при $C=3,3$ нФ	при $C=50$ нФ	при $C=70$ нФ
0	133	37,2	3,62	2,61
0,223	125	34,3	3,11	2,55
0,446	117,3	31,19	2,7	1,94
0,669	109,8	28,4	2,32	1,67
0,892	101,7	24,4	1,95	1,4
1,16	90,62	20,33	1,57	1,12
1,34	76,7	15,96	1,11	0,852
1,56	59,9	11,56	0,833	0,596
1,78	41,5	7,37	0,515	0,368
2	23,01	3,77	0,256	0,183
2,2	7,64	1,15	0,156	0,054

Для удобства характеристики ГУН при разных значениях зарядной емкости представлены в логарифмическом масштабе (рис. 2.24).

Из графиков (рис. 2.24) следует, что при уменьшении емкости зарядного конденсатора диапазон перестройки частот ГУН увеличивается.

Проведем анализ работы устройства контроля электрических параметров при изменении характеристики ГУН [86, 87], а точнее, изменении диапазона его выходной частоты.

В качестве примера проведено моделирование для диапазонов частот 20 – 104 кГц и 0,17 – 2,8 кГц.

На вход устройства контроля подавался экспоненциальный импульс амплитудой 4,3 В, длительностью 24 мс, а на выходе контролировался восстановленный сигнал.

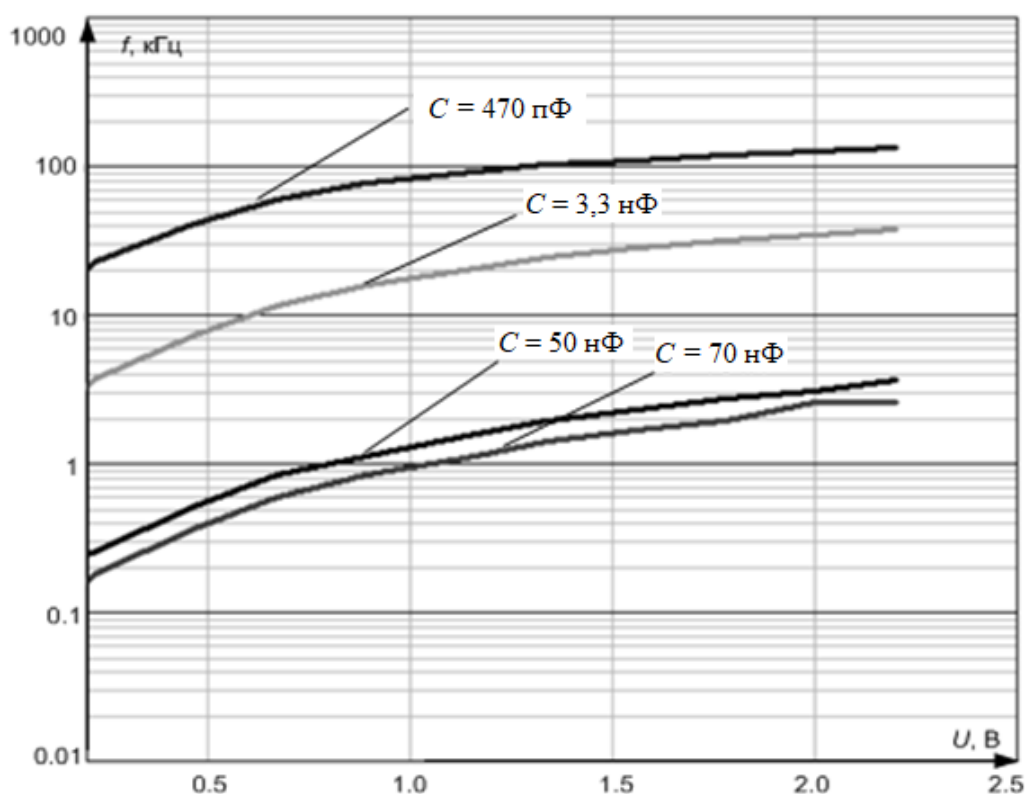


Рисунок 2.24 – Диапазоны выходных частот ГУН при различных значениях зарядной емкости  $C$

Согласно результатам моделирования (рис. 2.25) минимальное искажение сигнала происходит при работе ГУН на частотах 20 – 104 кГц.

При этом максимальное отклонение сигнала ошибки  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  (рис. 2.26) составило порядка 0,1 В.

Наиболее сильное искажение контролируемого сигнала происходит при частотах от 0,17 кГц и ниже (рис. 2.26), где наибольшее отклонение сигнала разности  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$  составило порядка 4,2 В.

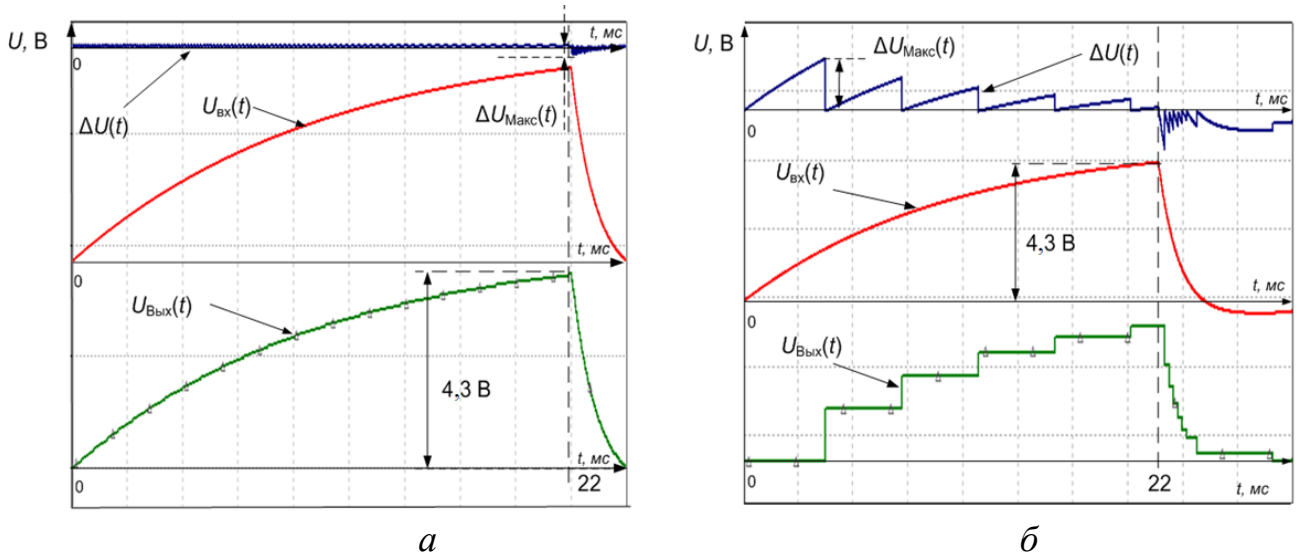


Рисунок 2.25 – Эпюры сигналов  $U_{\text{ВХ}}(t)$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  и сигнал их разности  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$  при различных диапазонах выходной частоты ГУН:  
 а – при диапазоне частот 20 – 104 кГц; б – при диапазоне частот 0,17 – 2,8 кГц

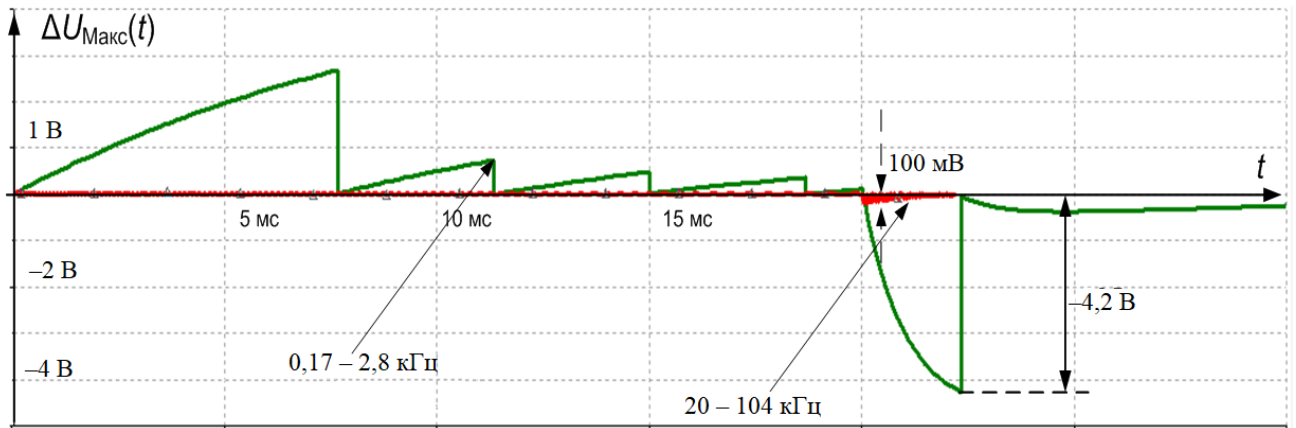


Рисунок 2.26 – Сигналы разности  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$  при различных диапазонах выходной частоты ГУН

Влияние частотного диапазона ГУН на восстановление контролируемого сигнала связано с зависимостью числа тактовых импульсов от частоты (выше частота – больше тактовых импульсов). В результате этого пропорционально возрастает число отсчетов записываемых данных в запоминающее устройство [91].

## 2.8 Определение требуемого соотношения верхней граничной частоты спектра сигнала и диапазона частот генератора, управляемого напряжением

Рассмотрим случайный сигнал в виде аperiodического переходного процесса (рис. 2.27). При этом длительность спада импульса равна 25 мс, амплитуда сигнала – 5 В.

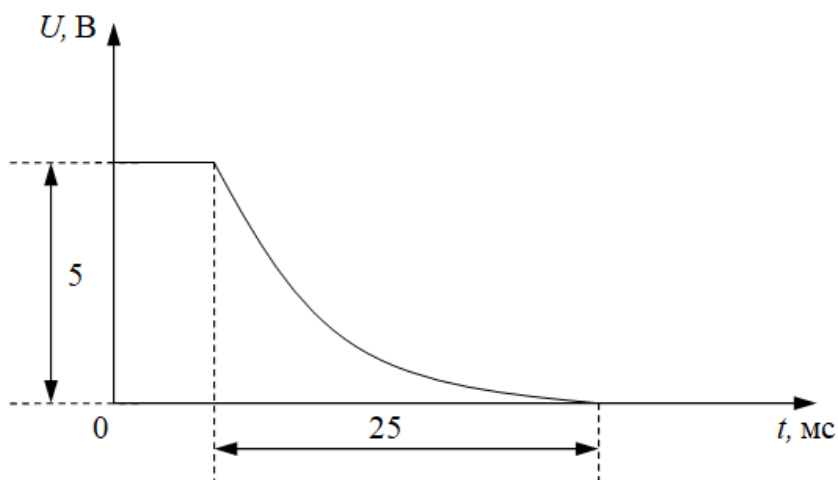


Рисунок 2.27 – Случайный сигнал

Для определения верхней граничной частоты спектра представим сигнал в виде аппроксимированной функции (рис. 2.28), выраженной через поинтервальное описание:

$$S(t) = \begin{cases} S(t_0) - \frac{S(t_0)}{t_c} t, & t \in [0; t_c], \\ 0, & t \in (-\infty; 0) \cup (t_c; +\infty). \end{cases}$$

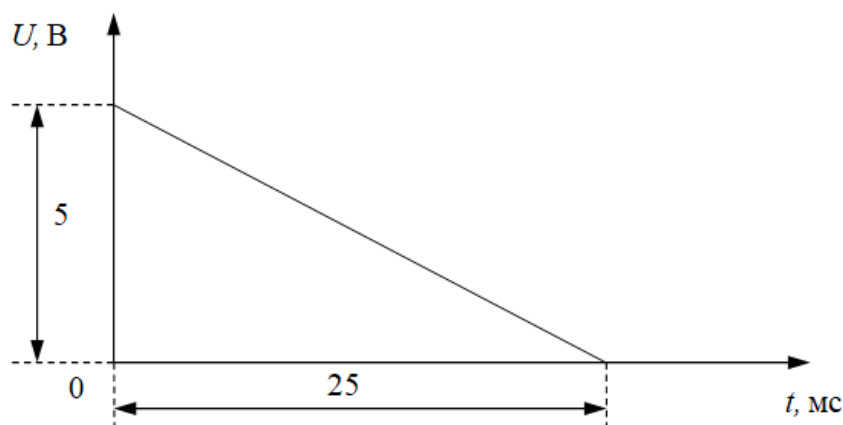


Рисунок 2.28 – Аппроксимированная функция случайного сигнала

Верхнюю граничную частоту  $\omega_B$  и частоту дискретизации  $\omega_D$  определим по приведенной методике, исходя из построения функции спектральной плотности по пороговому критерию.

Учитывая параметры сигнала  $S(t_0) = 5$  В,  $t_c = 25$  мс, построим график спектральной плотности сигнала  $S(t)$  (рис. 2.29). Верхняя частота  $\omega_B = 18 \cdot 10^3$  рад/с, а круговая частота дискретизации  $\omega_D = 36 \cdot 10^3$  рад/с.

Пересчитаем частоту дискретизации

$$f_D = \frac{\omega_D}{2\pi} = \frac{36 \cdot 10^3}{2\pi} = 5,7 \text{ кГц.}$$

Восстановление контролируемого сигнала проведем на трех диапазонах частот ГУН:

$$\begin{aligned} f_1 &= (f_{\text{нижн1}} \dots f_{\text{верх1}}), \\ f_2 &= (f_{\text{нижн2}} \dots f_{\text{верх2}}); \\ f_3 &= (f_D \dots f_{\text{верх3}}), \end{aligned}$$

где  $f_{\text{нижн1}} = 125$  Гц;  $f_{\text{верх1}} = 1,5$  кГц;  $f_{\text{нижн2}} = 300$  Гц;  $f_{\text{верх2}} = 5$  кГц;  $f_D = 5,7$  кГц;  $f_{\text{верх3}} = 133$  кГц.



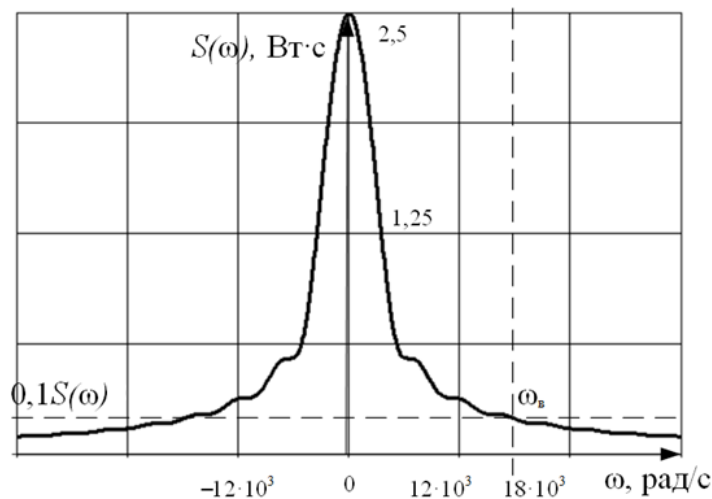


Рисунок 2.29 – Спектральная плотность сигнала  $S(t)$

Диапазоны выбраны в соответствии со значением рассчитанной частоты дискретизации  $f_d$  и находятся как выше, так и ниже нее, что позволяет провести их полную оценку и выбрать оптимальный диапазон ГУН по отношению к верхней граничной частоте спектра сигнала.

Контролируемый сигнал  $U_{\text{вх}}(t)$ , восстановленный сигнал  $U_{\text{вых}}(t)$  и сигнал их разности  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  при диапазоне частот ГУН 0,125 – 1,5 кГц представлены в нормальном (рис. 2.30) и в увеличенном (рис. 2.31) масштабе.

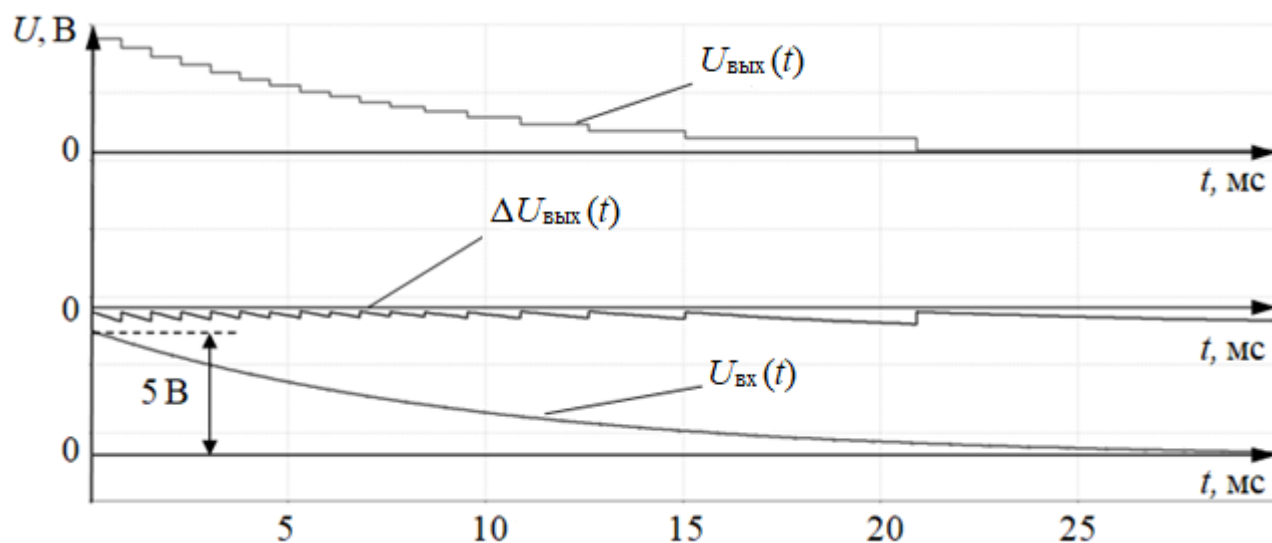


Рисунок 2.30 – Форма  $U_{\text{вх}}(t)$ ,  $U_{\text{вых}}(t)$  и сигнала их разности  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  в диапазоне частот 0,125 – 1,5 кГц

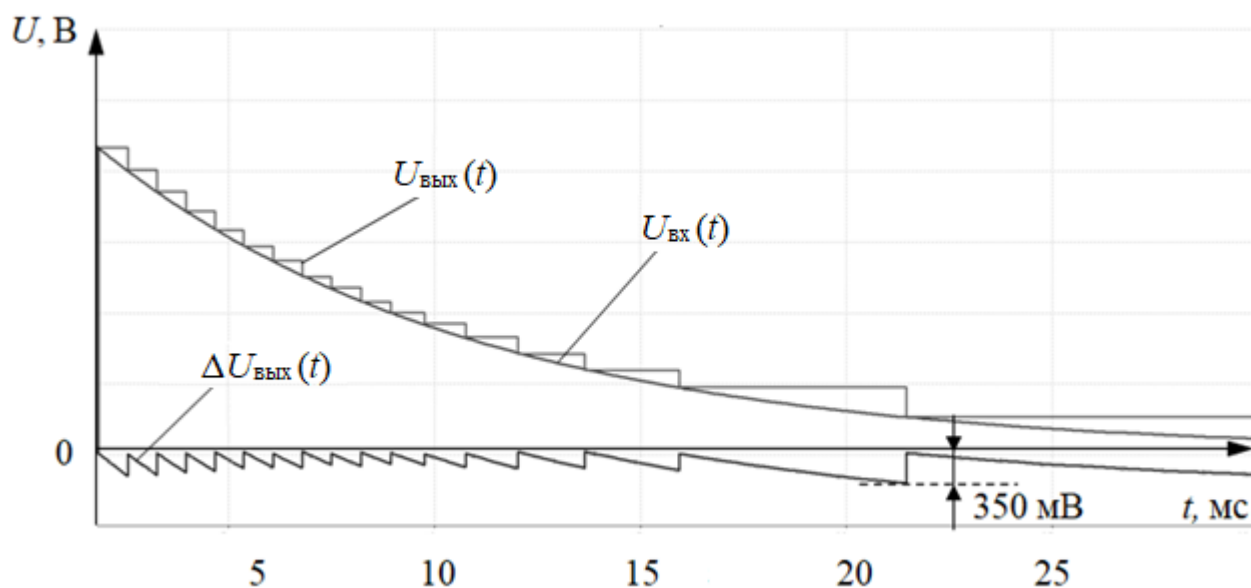


Рисунок 2.31 – Форма  $U_{\text{ВХ}}(t)$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  и сигнала их разности  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$  в диапазоне частот 0,125 – 1,5 кГц (увеличенный масштаб)

Определим максимальную погрешность восстановления сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ .

Из рисунка 2.31 видно, что максимальное отклонение восстановленного сигнала равно 0,35 В. Полный размах сигнала – 5 В.

Тогда значение погрешности составит

$$\delta = \frac{\Delta Y \cdot 100 \%}{Y} = \frac{0,35 \cdot 100 \%}{5} = 7 \%.$$

Определим объем необходимой памяти ОЗУ для сохранения информации о сигнале.

Исходя из функции  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  (см. рис. 2.31) количество отсчетов, затраченных для сохранения данных о переходном процессе длительностью 25 мс, составит  $N_1 = 17$ .

При условии обработки сигнала шестандцатирядным АЦП требуемый объем памяти ОЗУ составит

$$V = N_1 M = 17 \cdot 16 = 272 \text{ бит.}$$

Для диапазона частот ГУН 0,3 – 5 кГц контролируемый сигнал  $U_{\text{вх}}(t)$ , восстановленный сигнал  $U_{\text{вых}}(t)$  и сигнал их разности  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  представлены в нормальном (рис. 2.32) и увеличенном (рис. 2.33) масштабе.

Определим максимальную погрешность восстановления сигнала  $U_{\text{вых}}(t)$ .

Из рисунка 2.33 видно, что максимальное отклонение восстановленного сигнала равно 0,19 В, а полный размах сигнала – 5 В.

Значение погрешности составит

$$\delta = \frac{\Delta Y \cdot 100 \%}{5} = \frac{0,19 \cdot 100 \%}{5} = 3,8 \%$$

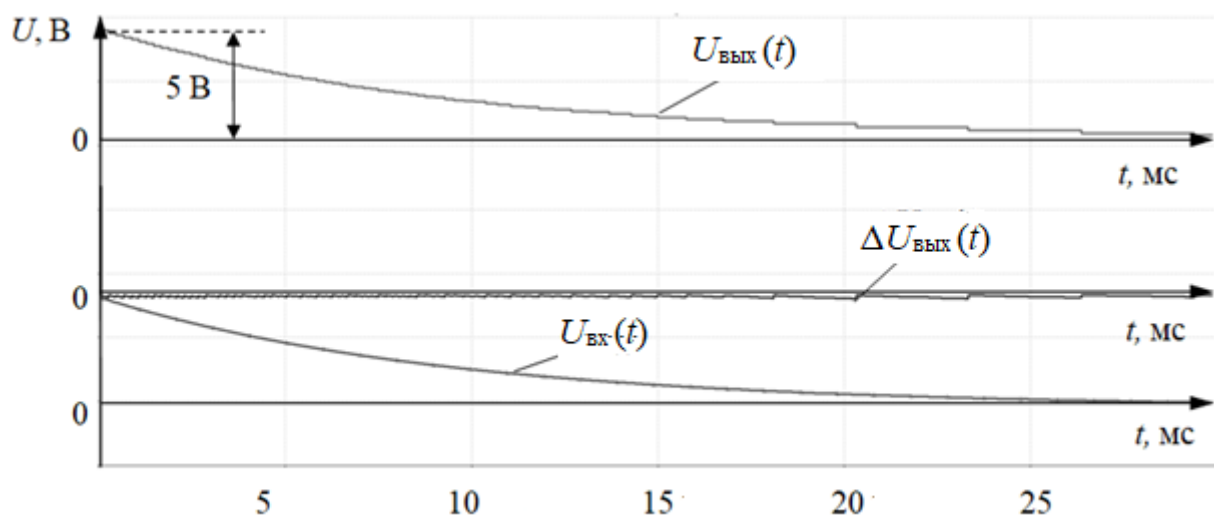


Рисунок 2.32 – Форма  $U_{\text{вх}}(t)$ ,  $U_{\text{вых}}(t)$  и сигнала их разности  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  в диапазоне частот 0,3 – 5 кГц

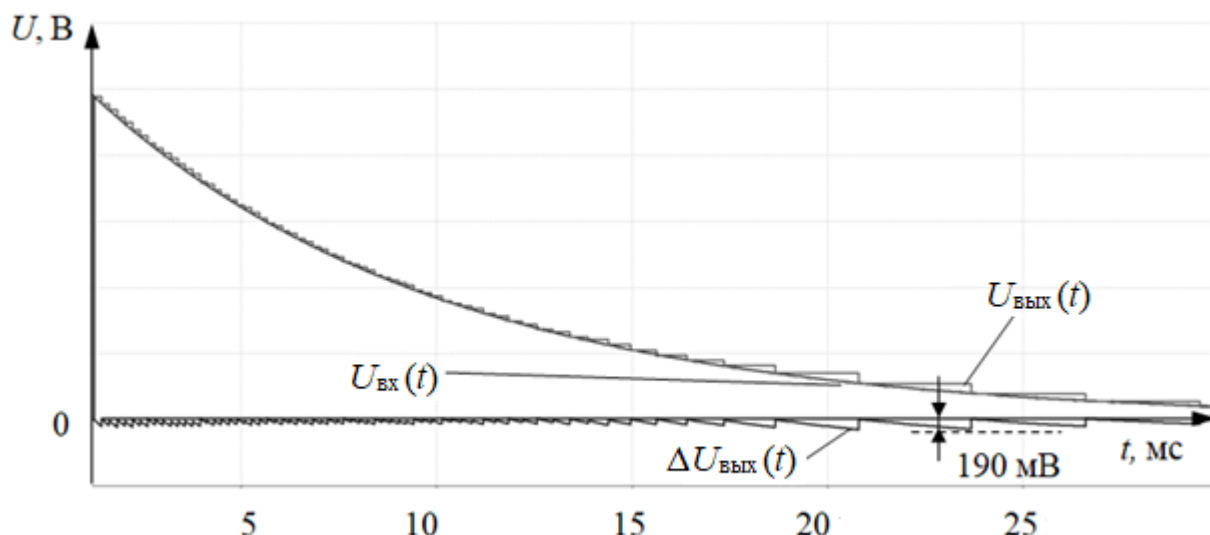


Рисунок 2.33 – Форма  $U_{\text{вх}}(t)$ ,  $U_{\text{вых}}(t)$  и сигнала их разности  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  в диапазоне частот 0,3 – 5 кГц (увеличенный масштаб)

Вычислим количество отсчетов для сохранения данных о переходном процессе за время работы  $t_{\text{ГУН}} = 25$  мс.

Максимальная частота работы ГУН составляет 5 кГц, максимальный период дискретизации  $T_{\text{д}} = 20$  мкс. Количество отсчетов составит

$$N_2 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_{\text{д}}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 125.$$

Объем требуемой памяти ОЗУ:

$$V = N_2 M = 125 \cdot 16 = 2000 \text{ бит.}$$

Для диапазона частот ГУН 5,7 – 133 кГц контролируемый сигнал  $U_{\text{вх}}(t)$ , восстановленный сигнал  $U_{\text{вых}}(t)$  и сигнал их разности  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  представлены в нормальном (рис. 2.34) и в увеличенном (рис. 2.35) масштабе.

Определим максимальную погрешность восстановления сигнала  $U_{\text{вых}}(t)$ .

Максимальное отклонение восстановленного сигнала равно 0,11 В (рис. 2.35), а полный размах сигнала – 5 В.

Значение погрешности составит

$$\delta = \frac{\Delta Y \cdot 100 \%}{5} = \frac{0,11 \cdot 100 \%}{5} = 2,75 \% .$$

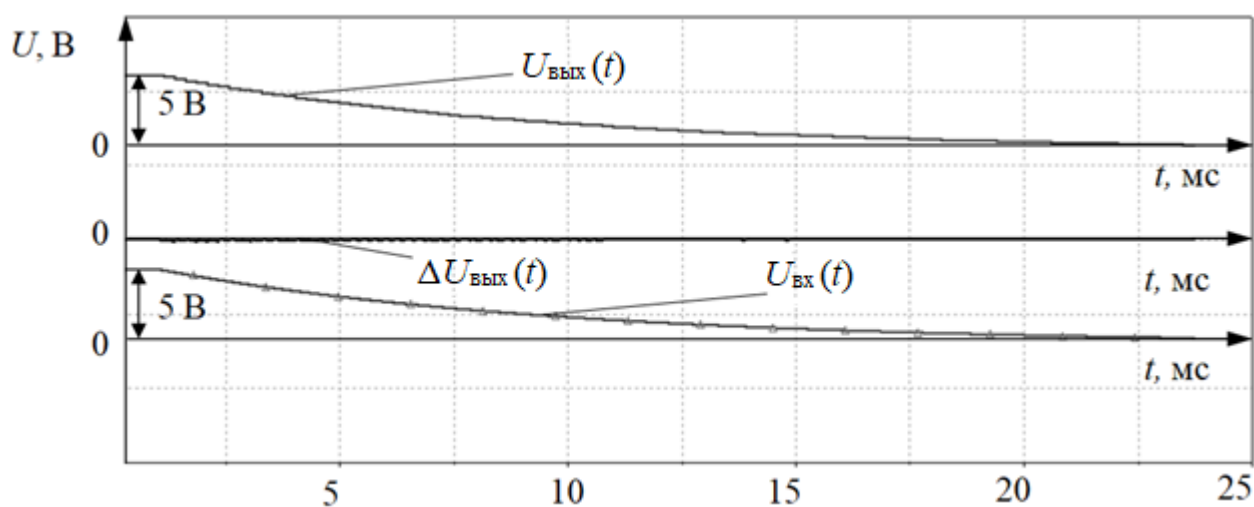


Рисунок 2.34 – Форма  $U_{\text{ВХ}}(t)$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  и сигнала их разности  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$  в диапазоне частот 5,7 – 133 кГц

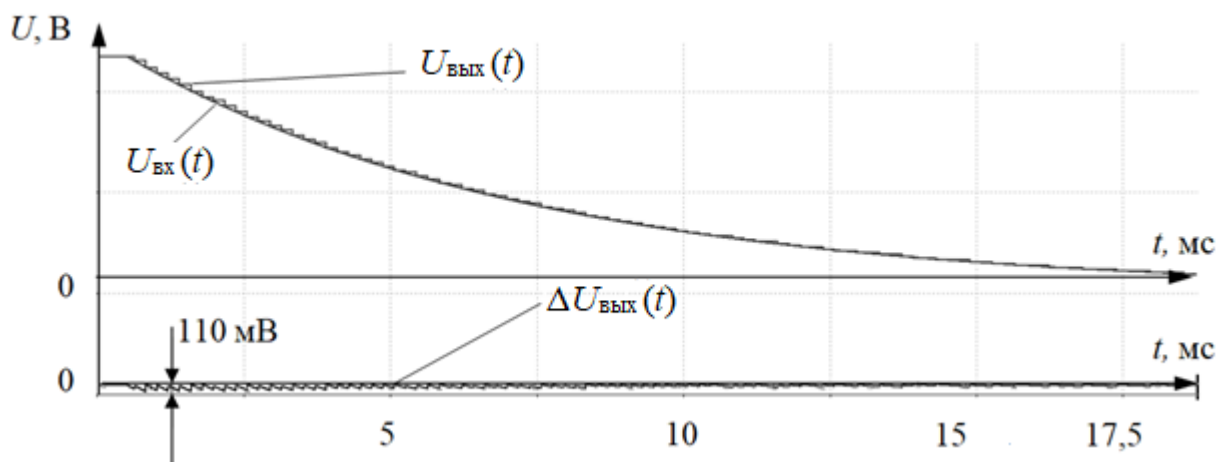


Рисунок 2.35 – Форма  $U_{\text{ВХ}}(t)$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  и сигнала их разности  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$  в диапазоне частот 5,7 – 133 кГц (увеличенный масштаб)

Вычислим количество отсчетов для сохранения данных о переходном процессе за время работы  $t_{\text{ГУН}} = 25$  мс.

Максимальная частота работы ГУН составляет 133 кГц, а максимальный период дискретизации  $T_{\text{д}} = 7,5$  мкс.

Определим количество отсчетов:

$$N_3 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_{\text{д}}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{7,5 \cdot 10^{-6}} = 3333.$$

Объем требуемой памяти ОЗУ:

$$V = N_3 M = 3333 \cdot 16 \approx 53 \text{ Кбит.}$$

Из полученных результатов видно, что погрешность восстановленного сигнала уменьшается с увеличением диапазона частот ГУН.

Так, минимальная погрешность 2,75 % определена при диапазоне частот 5,7 – 133 кГц, а максимальная (7 %) – при диапазоне частот 0,3 – 5 кГц.

Найдем соотношение свободной частоты ГУН  $f_0$  и верхней граничной частоты спектра сигнала, при котором происходит восстановление с минимальной погрешностью.

Свободная частота ГУН при восстановлении сигнала с минимальным отклонением составляет 6 кГц. Верхняя граничная частота спектра сигнала  $\omega_{\text{в}}$ , исходя из рисунка 2.29, составляет  $19 \cdot 10^3$  рад/с.

Отсюда следует, что

$$f_{\text{в}} = \frac{\omega_{\text{в}}}{2\pi} = \frac{19 \cdot 10^3}{2\pi} = 3 \text{ кГц.}$$

Тогда соотношение частот составит

$$\frac{f_0}{f_{\text{в}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^3} = 2.$$

Итак, для восстановления контролируемого сигнала с погрешностью не хуже  $\pm 3,8\%$  необходимо, чтобы свободная рабочая частота ГУН  $f_0$  была минимум в два раза выше верхней граничной частоты спектра контролируемого сигнала.

## 2.9 Оценка требуемого объема памяти оперативного запоминающего устройства

Сравним способы сохранения ресурса энергонезависимой памяти для двух случаев:

- при работе АЦП на фиксированной частоте 100 кГц;
- при контроле сигнала с помощью устройства, включающего в себя дифференциатор и ГУН для изменения тактовой частоты АЦП.

Зададим параметры: разрядность АЦП  $M = 16$  бит, частота дискретизации  $F_{\text{д}} = 100$  кГц, длительность сигнала  $T_{\text{с}} = 24$  мс.

Определим период дискретизации:

$$T_{\text{д}} = \frac{1}{F_{\text{д}}} = \frac{1}{100 \cdot 10^3} = 10 \text{ мкс.}$$

Количество отсчетов составит

$$N = \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{д}}} = \frac{24 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 2400.$$

Объем требуемой памяти ОЗУ:

$$V = NM = 2400 \cdot 16 = 38,4 \text{ Кбит.}$$

Оценим объем памяти, требуемой для сохранения этого же сигнала устройством, содержащим дифференциатор с постоянной времени  $\tau = 30$  мкс и ГУН с диапазоном выходной частоты 20 – 104 кГц.

Для упрощения расчетов представим контролируемый сигнал в виде трех участков, аппроксимируемых прямыми линиями (рис. 2.36).

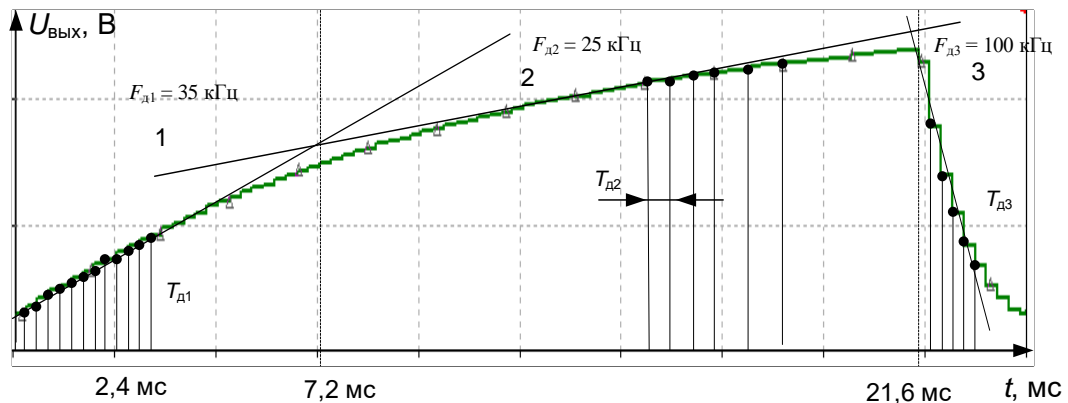


Рисунок 2.36 – Изменение периода дискретизации при различной скорости изменения контролируемого сигнала

Частота дискретизации имеет разные значения (см. рис. 2.36):  $F_{д1} = 35$  кГц,  $F_{д2} = 25$  кГц и  $F_{д3} = 100$  кГц.

Соответствующие им периоды дискретизации:  $T_{д1} = 28,6$  мкс,  $T_{д2} = 40$  мкс,  $T_{д3} = 10$  мкс.

Вычислим необходимое количество отсчетов для каждого из трех участков:

$$N_1 = \frac{T_{c1}}{T_{д1}} = \frac{7,2 \cdot 10^{-3}}{28,6 \cdot 10^{-6}} = 252;$$

$$N_2 = \frac{T_{c2}}{T_{д2}} = \frac{14,4 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-6}} = 360;$$



$$N_3 = \frac{T_{с3}}{T_{д3}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 240.$$

Требуемый объем памяти составит

$$V = (N_1 + N_2 + N_3)M = (252 + 360 + 240) \cdot 16 \approx 13,6 \text{ Кбит.}$$

Необходимый объем памяти ОЗУ для сохранения данного сигнала с последующим восстановлением приблизительно в 2,8 раз меньше, чем при контроле его с непрерывной частотой дискретизации  $F_d = 100$  кГц. При этом отклонение восстановленного сигнала от исходного не превысило  $\pm 6$  %.

В соответствии с вышеизложенным данное устройство вполне обеспечивает контроль сигналов со сжатием информации [91].

## 2.10 Выводы

В результате моделирования были получены эпюры восстановленных сигналов и сигнала их разности, по которому рассчитана погрешность их восстановления, проведена оценка отклонения контролируемого параметра и объема сохраняемых данных. Оценка проводилась для разных параметров ДУ и ГУН.

Модель устройства контроля, представленная на рисунке 2.14, позволяет проводить восстановление сигналов с различной точностью. На точность восстановления существенное влияние оказывают параметры ДУ и ГУН.

При имитационном моделировании наилучшее восстановление сигнала достигается при большем значении постоянной времени дифференцирующей цепи, а именно при  $\tau_1 = 600$  мкс. Отличие восстановленного сигнала от контролируемого при этом составило  $\pm 4,6$  %. Наихудший результат наблюдался при  $\tau_2 = 30$  мкс, погрешность восстановления при котором составила  $\pm 65$  %.

Для восстановления с погрешностью не хуже  $\pm 4,6$  % соотношение между постоянной времени дифференцирующей цепи  $\tau$  устройства и длительностью фронта (или спада)  $t$  контролируемого сигнала должно быть порядка  $0,1 \dots 0,3$ .

Погрешность восстановления  $\pm 4,3$  % достигнута в диапазоне рабочих частот ГУН 20 – 104 кГц. Наихудшее восстановление контролируемого сигнала наблюдалось в диапазоне 0,17 – 2,8 кГц. При этом погрешность восстановления составила порядка  $\pm 97$  %, что не приемлемо для количественной оценки информации.

При проектировании устройств контроля с целью увеличения точности восстановления сигнала рекомендуется увеличивать рабочий диапазон выходных частот ГУН. При этом свободная частота генератора должна быть в два раза выше верхней граничной частоты спектра контролируемого сигнала.

Предложенное устройство контроля обеспечивает сохранение ресурсов энергонезависимой памяти ввиду зависимости периода дискретизации  $T_d$  контролируемого параметра от скорости изменения входного сигнала.

### 3 Экспериментальное исследование устройства контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных

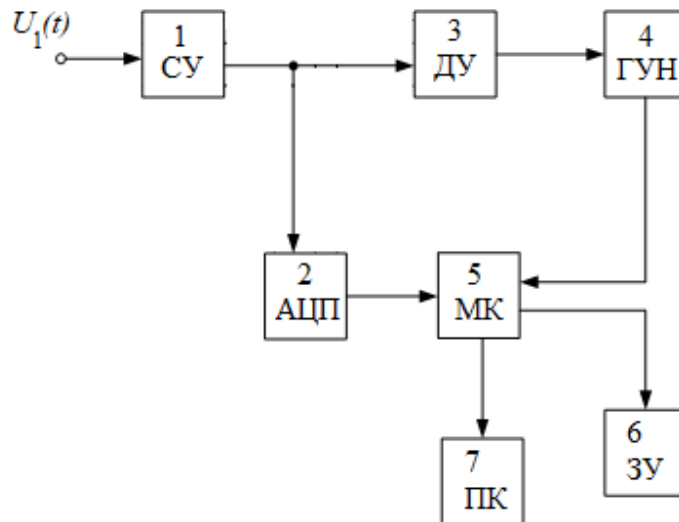
Ранее были подробно рассмотрены виды структур и модель устройства контроля, модель измеряемого сигнала и способ контроля электрических параметров.

При помощи компьютерного моделирования проведена проверка адекватности модели.

В данной главе описано устройство контроля преобразователя напряжения, рассмотрены результаты экспериментальной проверки адекватности модели, описаны схема и методика эксперимента.

#### 3.1 Описание структуры устройства контроля

Конструктивно устройство контроля (рис. 3.1) представлено в виде нескольких блоков, принцип работы которых следующий [92, 93].



СУ – согласующее устройство;  
 МК – микроконтроллер; ЗУ – запоминающее устройство;  
 ПК – персональный компьютер.

Рисунок 3.1 – Структурная схема устройства контроля

Контролируемый параметр  $U_1(t)$ , поступивший на вход СУ, преобразовывается до необходимого уровня для работы с АЦП. АЦП оцифровывает контролируемый сигнал и передает на МК [94...99]. Параллельно ДУ формирует на своем выходе напряжение, пропорциональное скорости изменения контролируемого параметра. Это напряжение поступает на ГУН, который формирует импульсы синхронизации. Данные импульсы необходимы для работы МК. МК сохраняет информацию о контролируемых параметрах в ЗУ, а также по команде с ПК запрашивает данную информацию обратно. ПК через свой интерфейс связи обеспечивает взаимодействие между пользователем (оператором) и МК, а также отображает информацию о контролируемых параметрах.

Конструктивно ДУ (рис. 3.2) состоит из дифференциатора и усилителя.

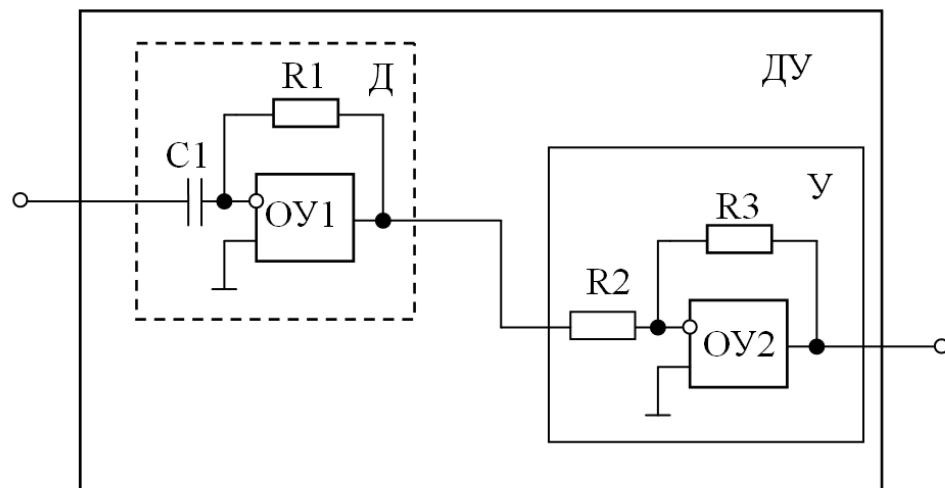
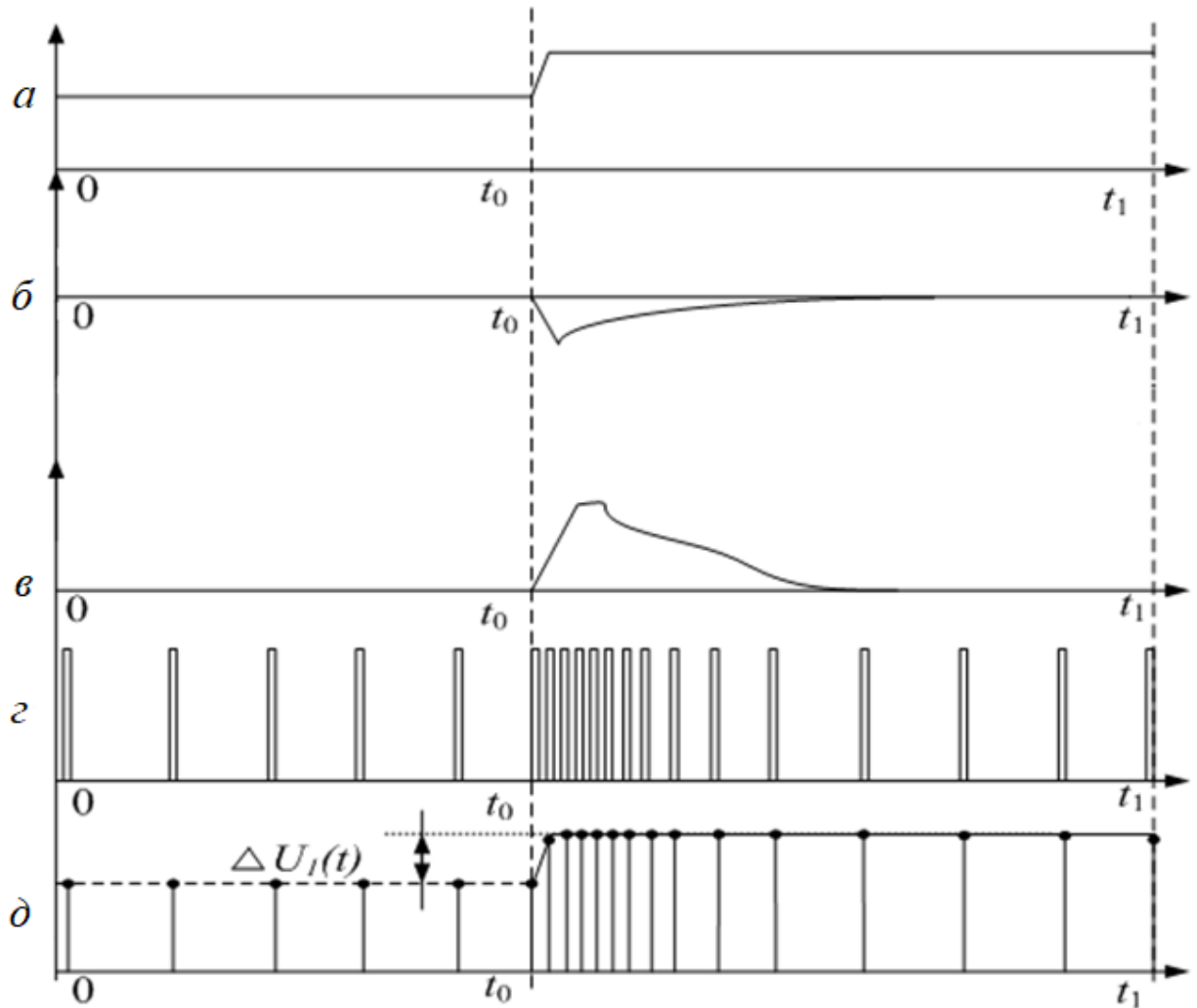


Рисунок 3.2 – Структурная схема ДУ

Вычисление первой производной контролируемого параметра начинается сразу после поступления напряжения на входы ДУ.

Выходное напряжение ДУ поступает на усилитель, где происходит его инверсия.

Приведем эпюры напряжений устройства при контроле параметра  $U_1(t)$  (рис. 3.3), поясняющие принцип работы.



$a$  – напряжение  $U_1(t)$ ;  $б$  – выходное напряжение дифференциатора;  $в$  – выходное напряжение ДУ;  $г$  – выходные импульсы ГУН;  $д$  – отсчеты восстановленного сигнала  $U_1(t)$  из ЗУ.

Рисунок 3.3 – Эпюры напряжений устройства контроля

### 3.2 Характеристики основных узлов устройства контроля

Устройство контроля состоит из ДУ и ГУН, от значений параметров которых будет зависеть точность восстановления сигнала и объем сохраняемых данных в блок памяти.

Точность восстановления контролируемого сигнала пропорциональна диапазону рабочих частот ГУН: чем выше скорость изменения частоты выходных импульсов, тем точнее восстановление контролируемого сигнала.

В ГУН, собранном на интегральной микросхеме 564ГГ1, допускается перестраивать диапазон выходных частот. Этот диапазон зависит от номиналов радиоэлементов и напряжения питания.

В данном случае верхняя рабочая частота ГУН будет дополнительно ограничиваться напряжением питания, которое составляет 5 В, при этом максимальная рабочая частота составит около 1,2 МГц [101...103].

Второй важный узел – ДУ – формирует на своем выходе напряжение, пропорциональное скорости изменения контролируемого параметра, и производит вычисление производной, изменяющей выходную частоту ГУН.

В качестве примера (табл. 3.1) представлены зависимости рабочих частот ГУН от входного напряжения  $U_{вх}$  и условно разбиты на диапазоны  $f_{ГУН1}$ ,  $f_{ГУН2}$ ...  $f_{ГУН4}$ .

Характеристики ГУН (рис. 3.4) меняются путем подбора номиналов подстроечных элементов устройства, а именно емкости конденсатора  $C$ . При этом в ходе дальнейших экспериментальных исследований допускается менять наклон характеристик и перестраивать диапазоны рабочих частот.

Из графиков видно, что точность восстановления контролируемого сигнала зависит от начальной рабочей частоты и крутизны наклона характеристики. Эта крутизна показывает, на сколько изменится выходная частота при изменении управляющего напряжения на единицу.

Наибольшую крутизну имеет характеристика  $f_{ГУН4}$ , угол наклона которой имеет максимальное значение. Из этого следует, что максимальная точность восстановления достигается при работе ГУН по характеристике  $f_{ГУН4}$ . При этом высока вероятность использования чрезмерного количества памяти.

Таблица 3.1 – Диапазоны рабочих частот ГУН

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{ГУН1}}, \text{кГц}$	$f_{\text{ГУН2}}, \text{кГц}$	$f_{\text{ГУН3}}, \text{кГц}$	$f_{\text{ГУН4}}, \text{кГц}$
0	0,05	0,33	6,3	20
0,4	0,061	0,723	12	109,7
0,8	0,064	1,22	18,4	199,2
1,2	0,083	1,54	24,7	291,1
1,6	0,167	2,07	33,1	380
2	0,218	2,89	40,5	469,2
2,4	0,236	3,62	46,2	556,3
2,8	0,262	4,42	56,5	646
3,2	0,293	5,12	69,1	753,1
3,6	0,31	5,6	77,4	923,7
4	0,33	6,1	81	1200

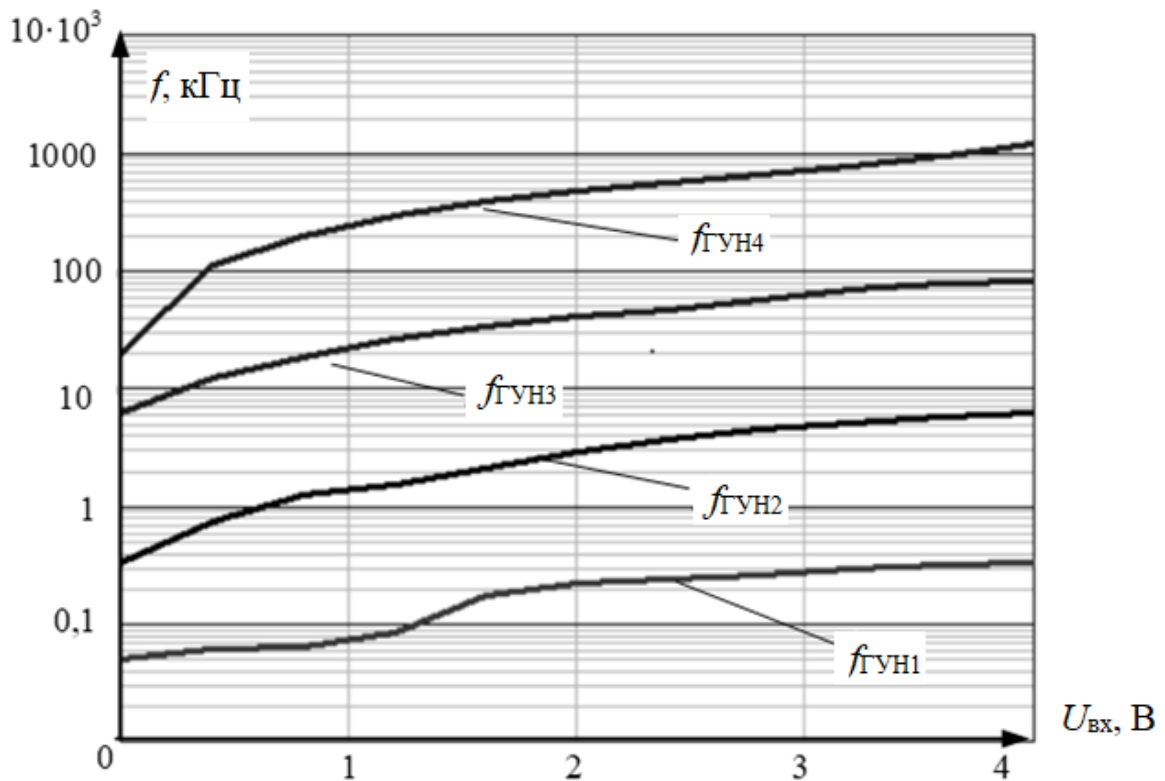


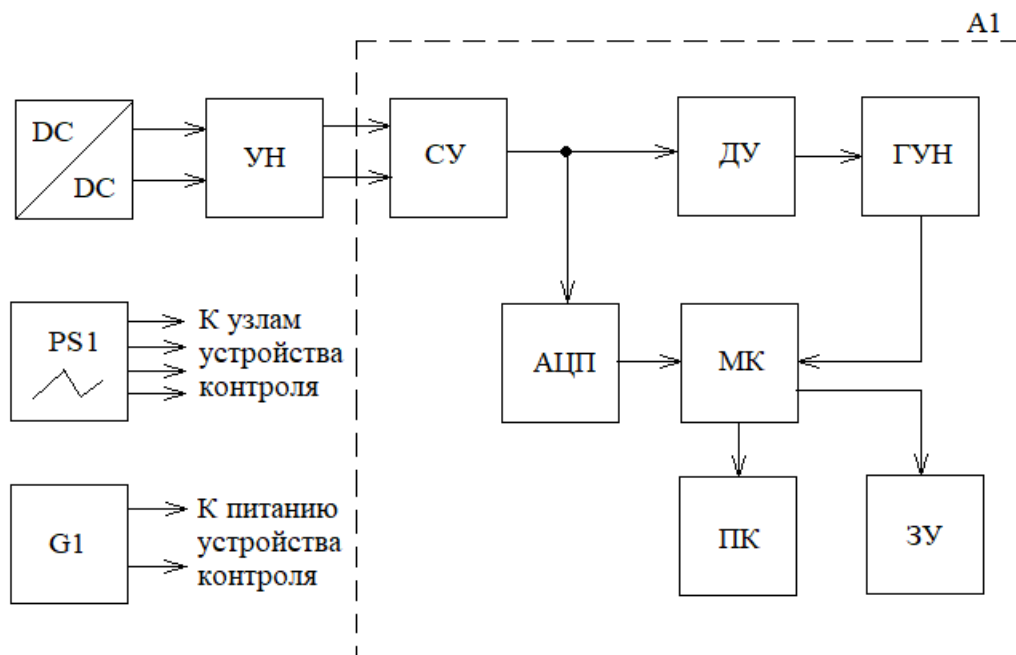
Рисунок 3.4 – Характеристики ГУН при его перестройке по частоте

Таким образом, работа ГУН по характеристике  $f_{\text{ГУН}}$  не рациональна с точки зрения затрат ресурсов памяти и потому не оптимальна.

Далее проведем экспериментальное исследование с целью определения оптимальной характеристики.

### 3.3 Описание экспериментальной схемы, методика эксперимента

Для подтверждения адекватности модели устройства контроля проведены экспериментальные исследования с использованием схемы измерения (рис. 3.5) [90], включающей в себя устройство контроля А1, источник питания устройства контроля G1, устройство нагрузок УН, DC/DC-преобразователь и четырехканальный осциллограф PS1.



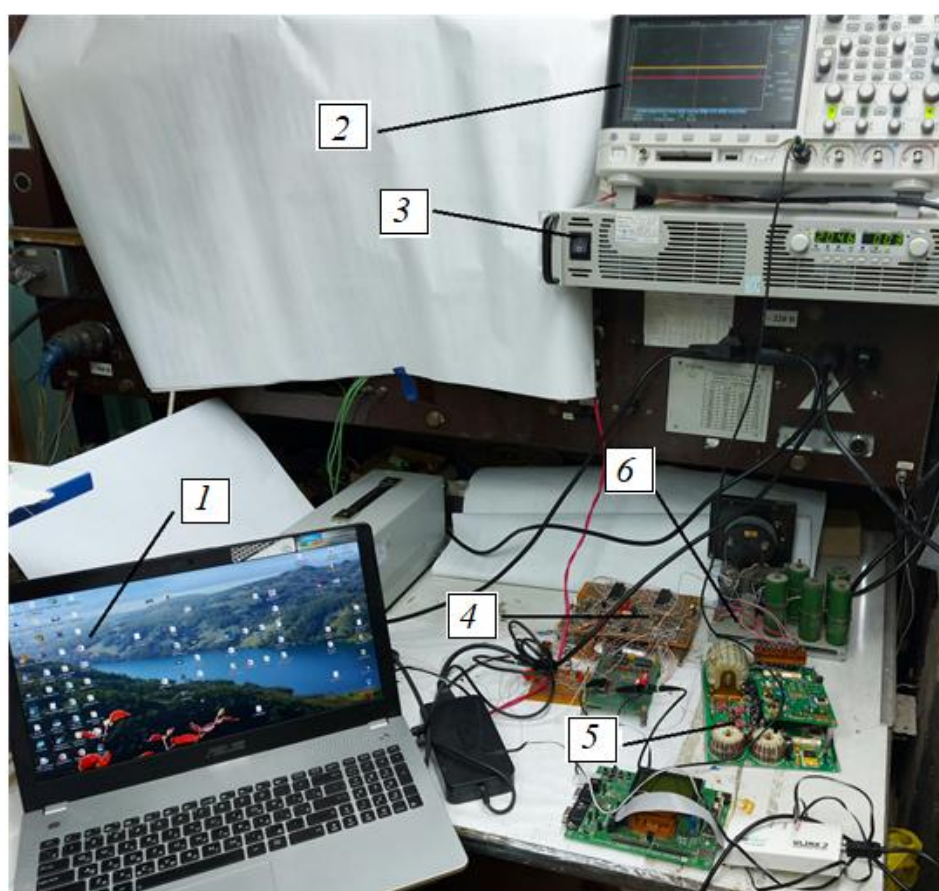
СУ – согласующее устройство; УН – устройство нагрузок;  
ПК – персональный компьютер; ЗУ – запоминающее устройство.

Рисунок 3.5 – Схема экспериментальной установки

Осциллограф PS1 обеспечивает визуализацию контролируемых параметров, в том числе и переходных процессов, возникающих в устройстве контроля [104].



УН коммутирует выход DC/DC-преобразователя. Контролируемые параметры с его выхода подаются на вход СУ для дальнейшей обработки на АЦП и ГУН, после чего происходит запись информации с помощью МК в ЗУ с последующим восстановлением сигнала. При этом контролируются переходные процессы включения и отключения DC/DC-преобразователя. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 3.6.



1 – персональный компьютер; 2 – осциллограф; 3 – источник питания;  
4 – устройство контроля; 5 – DC/DC-преобразователь; 6 – устройство нагрузки.

Рисунок. 3.6 – Внешний вид экспериментальной установки

Эксперимент строится по принципу последовательного планирования, заключающегося в постепенном усложнении или изменении модели устройства. Предполагается, что если результаты эксперимента не удовлетворяют заданным требованиям, то необходимо внести корректировки в макет или схему

эксперимента, что подразумевает усложнение, корректировку модели, изменение параметров устройства.

В данном случае изменялся диапазон перестройки ГУН с целью определения диапазона частот для максимальной, оптимальной и минимальной точности восстановления сигнала.

После определения оптимального диапазона частот ГУН исследовалось влияние постоянной времени дифференцирующей цепи на качество восстановленного сигнала и на минимальное количество требуемых ресурсов памяти для фиксирования информации.

Результатами эксперимента являются эпюры напряжений переходных процессов, по которым проведена оценка погрешности восстановленного сигнала и объем сохранения данных.

### **3.4 Определение оптимального значения постоянной времени и оценка необходимого объема памяти для сохранения данных**

Важным фактором, влияющим на объем сохраняемых данных, является постоянная времени дифференцирования. Она характеризует длительность реакции ДУ на воздействие.

Как известно [105, 106], при дифференцировании активная ширина спектра импульса ограничена граничной частотой  $f_{гр}$ .

Если неравенство  $\omega RC \leq 0,25$  выполняется при  $\omega = 2\pi f_{гр}$ , то оно будет выполняться и при  $f < f_{гр}$  [105]. Это позволяет из активной ширины спектра  $f_{гр}$  определить требования к постоянной времени дифференцирующей цепи:

$$\omega RC = 2\pi f_{гр} RC = 0,25. \quad (3.1)$$

Для приблизительной оценки активной ширины спектра при  $t_{\phi} = t_c$  можно использовать выражение

$$f_{\text{гр}} \approx K_c / t_{\phi},$$

где  $K_c = 0,2 \dots 0,4$  для импульсов, у которых  $t_{\phi(c)}/t_{\text{и}} < 0,2$  ( $t_{\phi(c)}$  – длительность фронта (спада) импульса,  $t_{\text{и}}$  – длительность плоской вершины импульса).

Подставив в формулу (3.1) значение  $f_{\text{гр}}$ , получим

$$RC \cong 0,25 \frac{t_{\phi}}{(2\pi K_c)} = 0,25 \frac{t_{\phi}}{(2\pi \cdot 0,4)} \approx 0,1 t_{\phi}.$$

Таким образом, постоянная времени дифференцирующей RC-цепи общего применения должна быть примерно в 10 раз меньше активной длительности фронта (спада) дифференцируемого импульса.

Из описания работы устройства и его структурной схемы очевидно, что чем длительнее переходный процесс на выходе ДУ, тем продолжительней работа ГУН на повышенной частоте, что, в свою очередь, приведет к чрезмерному заполнению объема памяти.

Оценим ресурсы памяти, необходимые для сохранения данных при трех значениях постоянной времени RC-цепи ДУ:  $\tau_1 = 0,01 t_c$ ,  $\tau_2 = 0,1 t_c$ , и  $\tau_3 = t_c$ .

Дифференцируемый сигнал представлен в виде экспоненциально спадающего импульса с длительностью спада  $t_c = 25$  мс и длительностью плоской вершины 30 мс. Диапазон рабочих частот ГУН выберем 0,05 – 3 кГц.

Экспериментальная оценка проводится по схеме (см. рис. 3.5) с фиксацией эпюр напряжений.

Полученные результаты эксперимента (рис. 3.7...3.9) условно разбиты на участки А, Б и В, характеризующие следующие режимы работы:

1) А – штатная работа устройства контроля при неизменном значении выходного напряжения DC/DC-преобразователя;

2) Б – переходный процесс на выходе DC/DC-преобразователя длительностью 25 мс;

3) В – установившийся режим на выходе DC/DC-преобразователя.

Также на эпюрах напряжения показано время работы ГУН на повышенной частоте  $t_{\text{ГУН}}$  и время задержки  $t_3$ .

Параметр  $t_3$  характеризует время перехода ГУН в режим работы на повышенных частотах.

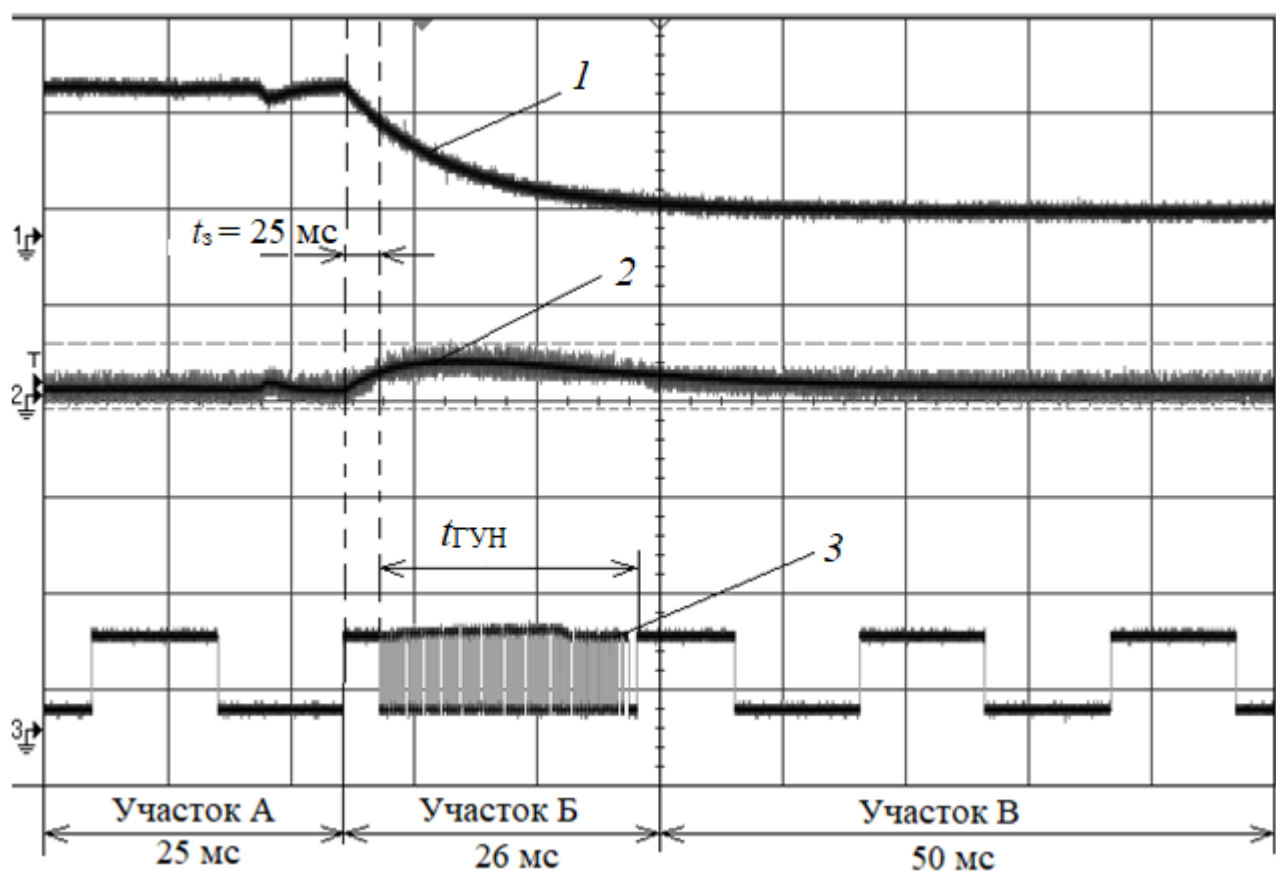


Рисунок. 3.7 – Дифференцирование переходного процесса при  $\tau_3 = 0,01t_c$ : 1 – переходный процесс; 2 – выход ДУ; 3 – выходные импульсы ГУН

На участке Б (рис. 3.7, 3.8) ДУ обрабатывает переходный процесс и ГУН работает на повышенной частоте, что характеризует увеличение числа отсчетов, поступающих на АЦП за единицу времени.

По результатам эксперимента видно, что ДУ обрабатывает входное воздействие и формирует на своем выходе импульс экспоненциальной формы,

различной длительности и амплитуды. Причем его значения зависят от постоянной времени цепи и амплитуды входного сигнала.

Проведем количественную оценку объема сохраняемых данных при значениях постоянной времени  $\tau_1 = 0,01t_c = 0,25$  мс (см. рис. 3.7).

При  $\tau_1 = 0,25$  мс время работы ГУН на повышенной частоте  $t_{\text{ГУН}}$  составило порядка 20 мс, максимальная частота – 3 кГц, период дискретизации  $T_d = 333$  мкс. АЦП, на котором происходит преобразование, имеет разрядность  $M = 16$  бит.

Определим количество отсчетов, затраченных на сохранение данных о переходном процессе за время  $t_{\text{ГУН}}$ :

$$N_1 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_d} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{333 \cdot 10^{-6}} = 60.$$

Требуемый объем памяти ОЗУ:

$$V = N_1 M = 60 \cdot 16 = 960 \text{ бит.}$$

Дополнительно стоит отметить, что на рисунке 3.7 имеется время задержки  $t_3 = 2,5$  мс, обусловленное инертностью ГУН и плавным нарастанием фронта выходного импульса ДУ. Очевидно, что данный фактор приведет к значительной погрешности восстановленного сигнала, так как количество отсчетов на данном участке минимально.

Проведем количественную оценку объема сохраняемых данных при постоянной времени  $\tau_2 = 0,1t_c = 2,5$  мс (см. рис. 3.8).

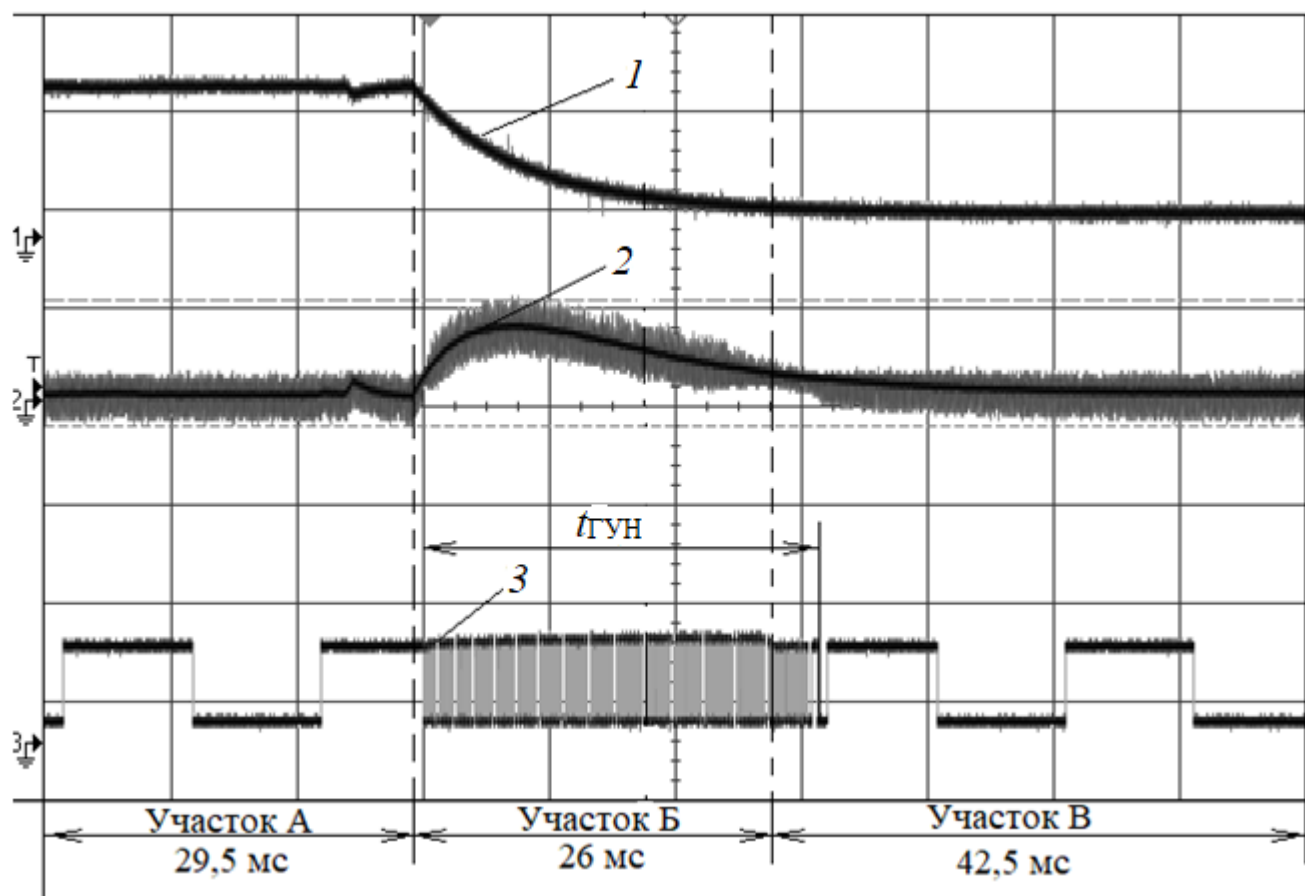


Рисунок 3.8 – Дифференцирование переходного процесса при  $\tau_3 = 0,1t_c$ : 1 – переходный процесс; 2 – выход ДУ; 3 – выходные импульсы ГУН

При  $\tau_2 = 2,5$  мс время работы ГУН на повышенной частоте  $t_{\text{ГУН}}$  составило порядка 30 мс, максимальная частота работы ГУН – 3 кГц, период дискретизации  $T_d = 333$  мкс.

Определим количество отсчетов, затраченных на сохранение данных о переходном процессе за время  $t_{\text{ГУН}}$ :

$$N_2 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_d} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{333 \cdot 10^{-6}} = 90.$$

При этом длительность переходного процесса составила 26 мс. Определим количество отсчетов, необходимое для записи переходного процесса:

$$N_n = \frac{t_c}{T_d} = \frac{26 \cdot 10^{-3}}{333 \cdot 10^{-6}} = 78.$$

Требуемый объем памяти ОЗУ:

$$V = N_n M = 78 \cdot 16 = 1248 \text{ бит.}$$

Определим избыточный объем памяти, обусловленный длительностью работы ГУН  $t_{\text{ГУН}} = 30$  мс:

$$V_{\text{изл}} = N_2 M - N_n M = 90 \cdot 16 - 78 \cdot 16 = 192 \text{ бит.}$$

По результатам эксперимента видно, что при  $\tau_3 = 0,1t_c$  для записи контролируемого сигнала объем памяти составит порядка 192 бит.

Дифференцирование переходного процесса при  $\tau_3 = t_c$  представлено на рисунке 3.9.

При  $\tau_2 = 25$  мс время работы ГУН на повышенной частоте  $t_{\text{ГУН}}$  составило порядка 52,5 мс, максимальная частота работы ГУН – 3 кГц, период дискретизации  $T_d = 333$  мкс.

Определим количество отсчетов, затраченных на сохранение данных о переходном процессе за время  $t_{\text{ГУН}}$ :

$$N_2 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_d} = \frac{52,5 \cdot 10^{-3}}{333 \cdot 10^{-6}} = 157.$$

При этом длительность переходного процесса составила 26 мс.

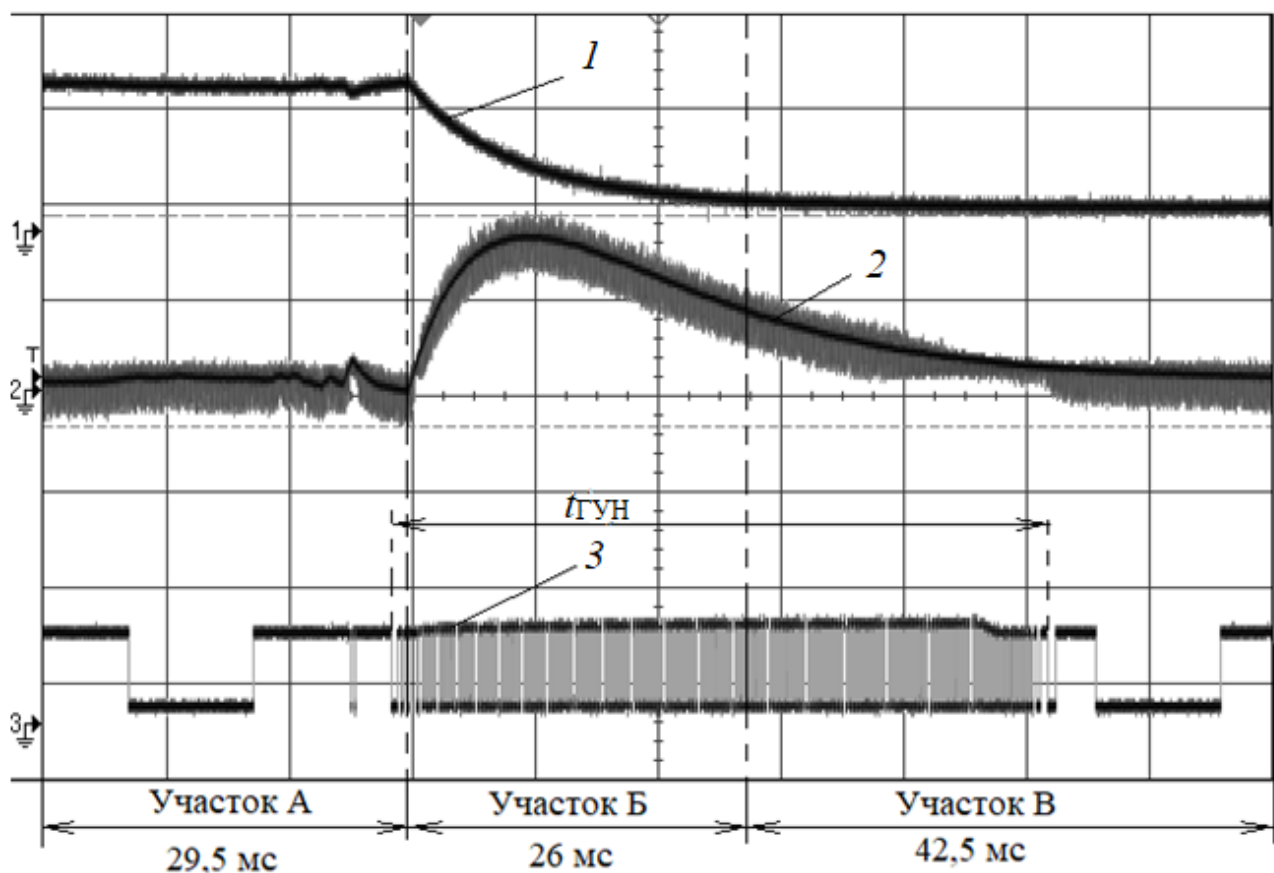


Рисунок 3.9 – Дифференцирование переходного процесса при  $\tau_3 = t_c$ :  
 1 – переходный процесс; 2 – выход ДУ; 3 – выходные импульсы ГУН

Определим количество отсчетов, необходимое для записи переходного процесса:

$$N_n = \frac{t_c}{T_d} = \frac{26 \cdot 10^{-3}}{333 \cdot 10^{-6}} = 78.$$

Требуемый объем памяти составит:

$$V = N_n M = 78 \cdot 16 = 1248 \text{ бит.}$$

Определим объем памяти, обусловленный длительностью работы ГУН  
 $t_{\text{ГУН}} = 30 \text{ мс}$ :



$$V_{\text{из2}} = N_2 M - N_n M = 157 \cdot 16 - 78 \cdot 16 = 1264 \text{ бит.}$$

Таким образом, при  $\tau_3 = t_c$  для записи контролируемого сигнала избыточный объем памяти составит порядка 1264 бит, и он пропорционально увеличивается с ростом значения постоянной времени.

Оптимальный объем памяти для сохранения данных достигается при постоянной времени  $0,1t_c$ . При этом длительность переходного процесса равна 26 мс и близка к времени дифференцирования, которая составляет 30 мс (см. рис. 3.8).

При постоянной времени, равной  $0,01t_c$ , время дифференцирования составило 20 мс, что меньше времени переходного процесса (см. рис. 3.7). При этом количество отсчетов для АЦП минимально. Это позволяет уменьшить объем необходимой памяти для сохранения контролируемого параметра, но ухудшает точность восстановления сигнала.

При значении постоянной времени, равной  $t_c$ , время дифференцирования составило порядка 52,5 мс, что почти в два раза больше времени переходного процесса (см. рис. 3.9). При этом количество отсчетов для АЦП максимально. Это увеличивает объем необходимой памяти для сохранения контролируемого параметра, но при этом в память производится запись избыточной информации.

Оценим разницу в объемах требуемой памяти при двух значениях постоянной времени RC-цепи ( $0,1t_c$  и  $t_c$ ):

$$\frac{V_{\text{из2}}(t_c)}{V_{\text{из1}}(0,1t_c)} = \frac{1264}{192} = 6,58.$$

Разница в объемах требуемой памяти для сохранения одного и того же контролируемого сигнала при двух значениях постоянной времени отличается в 6,58 раз. Отсюда следует, что для уменьшения ресурсов задействованной памяти оптимальное значение постоянной времени цепи должно составлять порядка  $0,1t_c$ .

### 3.5 Оценка восстановления контролируемого сигнала и определение оптимального диапазона рабочих частот генератора, управляемого напряжением

Воспользуемся теоремой Котельникова для определения диапазона рабочих частот ГУН, при котором происходит оптимальное восстановление контролируемого сигнала. Выходные частоты ГУН определяют частоту дискретизации.

Рассмотрим контролируемый случайный переходный процесс  $U(t)$  и его аппроксимированную функцию  $S(t)$  (рис. 3.10).

Как известно, любой контролируемый сигнал имеет свою форму спектральной плотности, по которой можно определить требуемую частоту дискретизации, необходимую для восстановления с заданной точностью.

Рассмотрим сигнал в виде случайного переходного процесса и проведем анализ его спектральной плотности по аппроксимированной функции. Длительность спада импульса  $t_c$  составляет 25 мс.

Для упрощения анализа аппроксимированная функция построена только для участка, изменяющегося во времени экспоненциально, остальные участки исключены.

Аппроксимированная функция выражена через поинтервальное описание и имеет вид

$$S(t) = \begin{cases} S(t_0) - \frac{S(t_0)}{t_c} \cdot t, & t \in [0; t_c.]; \\ 0; & t \in (-\infty; 0) \cup (t_c; +\infty). \end{cases}$$

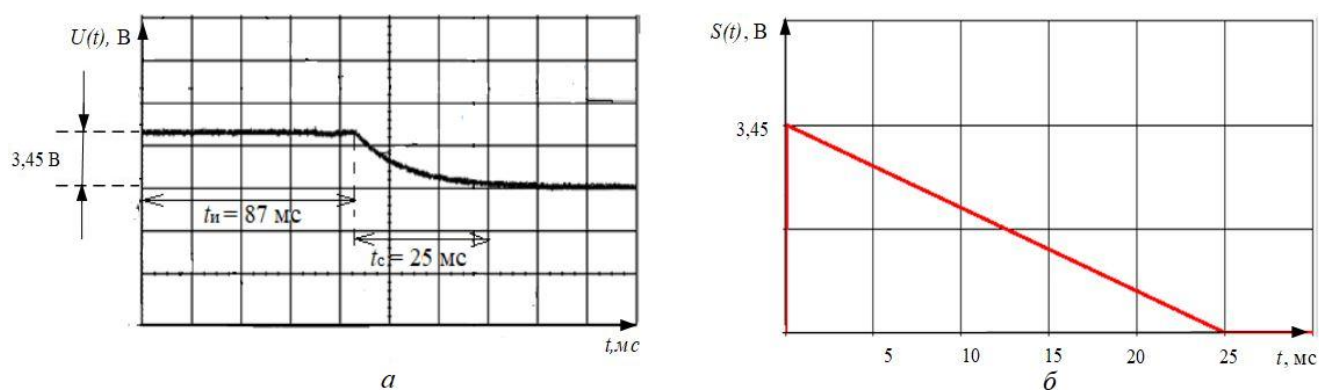


Рисунок 3.10 – Случайный переходный процесс (а) и его аппроксимированная функция (б)

Верхнюю граничную частоту  $\omega_B$  и частоту дискретизации  $\omega_D$  определим, исходя из построения функции спектральной плотности по пороговому критерию (рис. 3.11).

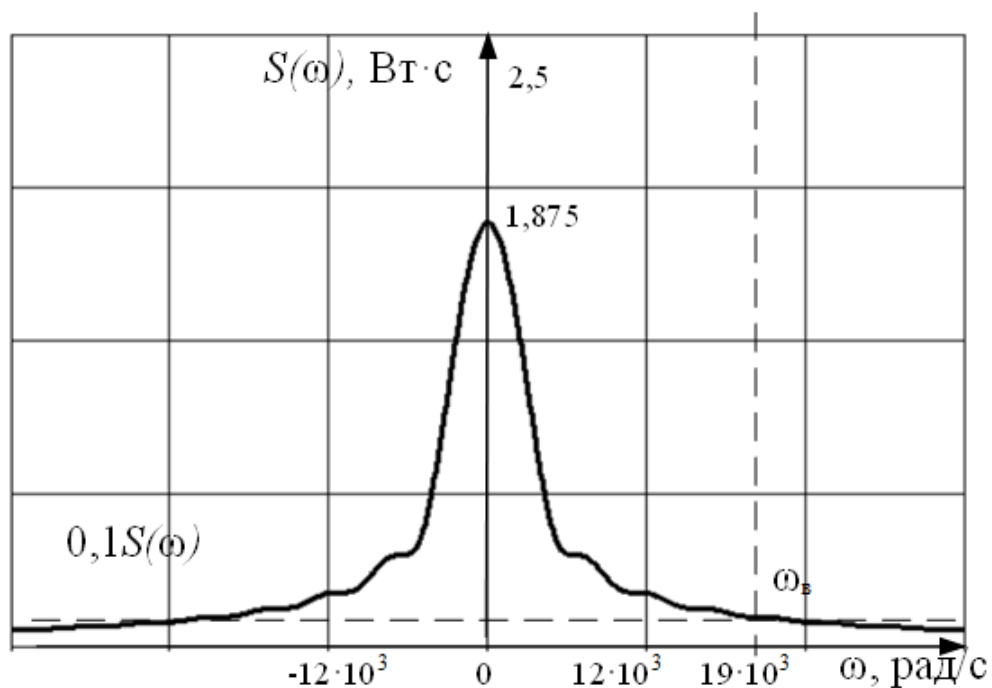


Рисунок 3.11 – Спектральная плотность контролируемого сигнала  $S(t)$

Графически определив и пересчитав частоты (см. рис. 3.11), получаем  $f_B = 3$  кГц и частоту дискретизации  $f_D = 6$  кГц.

Для определения отношения рабочих частот ГУН, при которых происходит восстановление с наименьшим искажением, к верхней частоте спектра контролируемого сигнала проведем экспериментальную оценку.

Постоянную времени ДУ определим, исходя из условия

$$RC \approx 0,1t_c.$$

Длительность спада импульса  $t_c = 25$  мс, тогда постоянная времени RC-цепи составит

$$RC \approx 0,1t_c \approx 0,1 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Восстановление контролируемого сигнала проводилось при следующих диапазонах частот ГУН:

$$\begin{aligned} f_1 &= (f_{\text{нижн1}} \dots f_{\text{нижн2}}); \\ f_2 &= (f_{\text{нижн2}} \dots f_{\text{д}}); \\ f_3 &= (f_{\text{д}} \dots f_{\text{верх1}}); \\ f_4 &= (f_{\text{верх1}} \dots f_{\text{верх2}}), \end{aligned}$$

где  $f_{\text{нижн1}} = 50$  Гц – нижняя рабочая частота ГУН (свободная частота);  $f_{\text{нижн2}}$  – верхняя граничная частота первого поддиапазона;  $f_{\text{д}} = 6$  кГц – верхняя граничная частота второго поддиапазона (частота дискретизации);  $f_{\text{верх1}}$  – верхняя граничная частота третьего поддиапазона;  $f_{\text{верх2}}$  – верхняя граничная частота четвертого поддиапазона.

Частотные диапазоны выбраны выше и ниже значения частоты дискретизации  $f_{\text{д}}$ , что позволяет объективно оценить и выбрать оптимальный диапазон рабочих частот ГУН.

Получены осциллограммы контролируемого и восстановленного сигнала для разных рабочих диапазонов частот ГУН (рис. 3.12...3.15).

Для более наглядной оценки качества восстановления сигналы представлены отдельно и при наложении друг на друга.

Определим объем памяти ОЗУ  $V_1$  для записи сигнала при диапазоне частот ГУН 50 – 330 Гц (см. рис. 3.12).

Максимальное отклонение восстановленного сигнала от исходного  $\Delta U = 1,9$  В, полный размах исходного сигнала – 3,45 В.

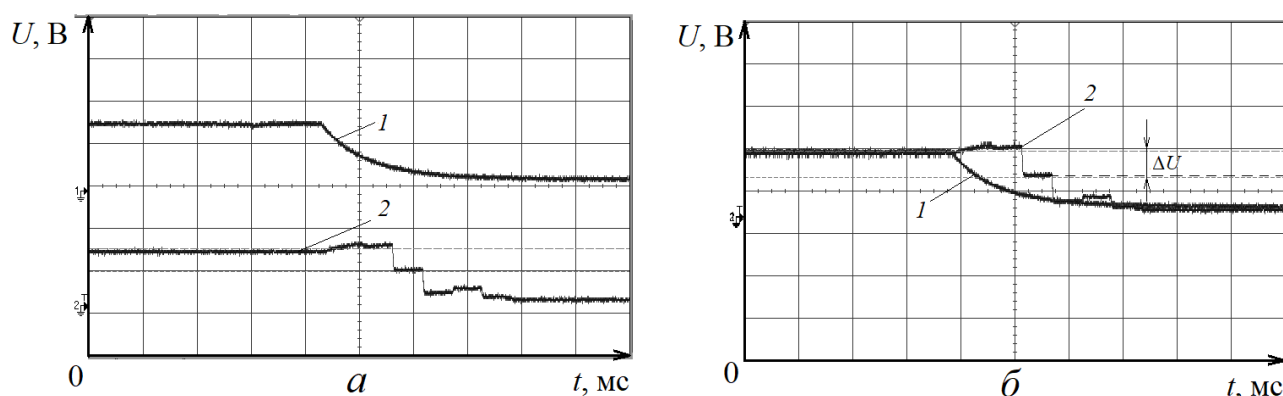


Рисунок 3.12 – Контролируемый (1) и восстановленный (2) сигналы при диапазоне частот ГУН 50 – 330 Гц: *а* – раздельное представление сигналов; *б* – наложение сигналов (вертикальная развертка – 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)

Погрешность составит

$$\delta = \frac{\Delta U \cdot 100 \%}{3,45} = \frac{1,9 \cdot 100 \%}{3,45} = 55 \% .$$

Максимальная частота работы ГУН составит 330 Гц, период дискретизации  $T_d = 3$  мс, длительность переходного процесса – 25 мс.

Вычислим количество отсчетов, затраченных для сохранения данных за время переходного процесса:

$$N_1 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_{\text{д}}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} \approx 8.$$

Объем требуемой памяти ОЗУ составит:

$$V_1 = N_1 M = 8 \cdot 16 = 128 \text{ бит.}$$

Определим объем памяти ОЗУ  $V_2$  для записи сигнала при диапазоне частот ГУН 0,33 – 6 кГц (рис. 3.13).

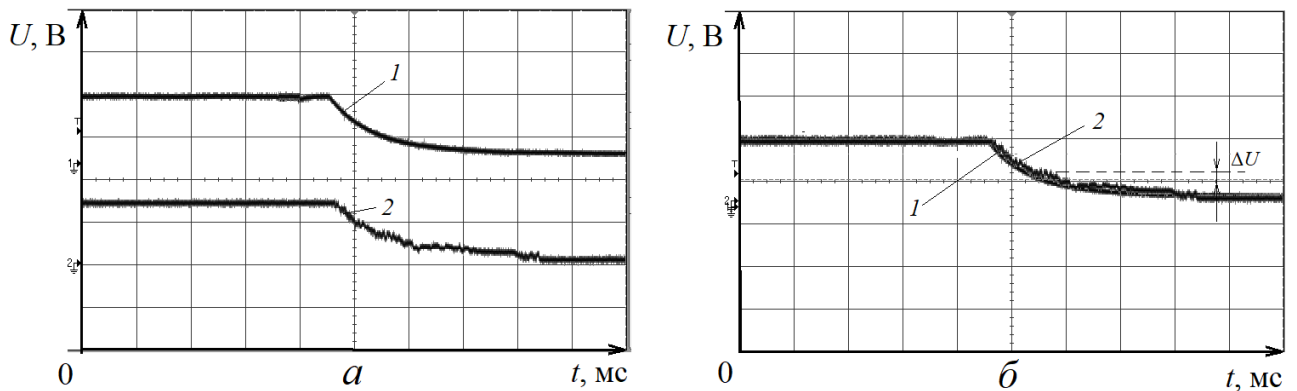


Рисунок 3.13 – Контролируемый (1) и восстановленный (2) сигналы при диапазоне частот ГУН 0,33 – 6 кГц: *а* – раздельное представление сигналов; *б* – наложение сигналов (вертикальная развертка – 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)

Максимальное отклонение восстановленного сигнала от исходного  $\Delta U = 0,4$  В. Погрешность составит

$$\delta = \frac{\Delta U \cdot 100\%}{3,45} = \frac{0,4 \cdot 100\%}{3,45} = 11,6\%.$$

Максимальная частота работы ГУН составит 6 кГц, период дискретизации  $T_{\text{д}} = 166$  мкс, длительность переходного процесса – 25 мс.

Вычислим количество отсчетов, затраченных для сохранения данных за время переходного процесса:

$$N_2 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_{\text{д}}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{166 \cdot 10^{-6}} = 150.$$

Требуемый объем памяти ОЗУ составит

$$V_2 = N_2 M = 150 \cdot 16 = 2400 \text{ бит.}$$

Определим объем памяти ОЗУ  $V_3$  для записи сигнала при диапазоне частот ГУН 6 – 80 кГц (рис. 3.14).

Максимальное отклонение восстановленного сигнала от исходного  $\Delta U = 0,11$  В. Погрешность составит

$$\delta = \frac{\Delta U \cdot 100 \%}{3,45} = \frac{0,11 \cdot 100 \%}{3,45} = 3,1 \% .$$

Максимальная частота работы ГУН составит 80 кГц, период дискретизации  $T_{\text{д}} = 12,5$  мкс, длительность переходного процесса – 25 мс.

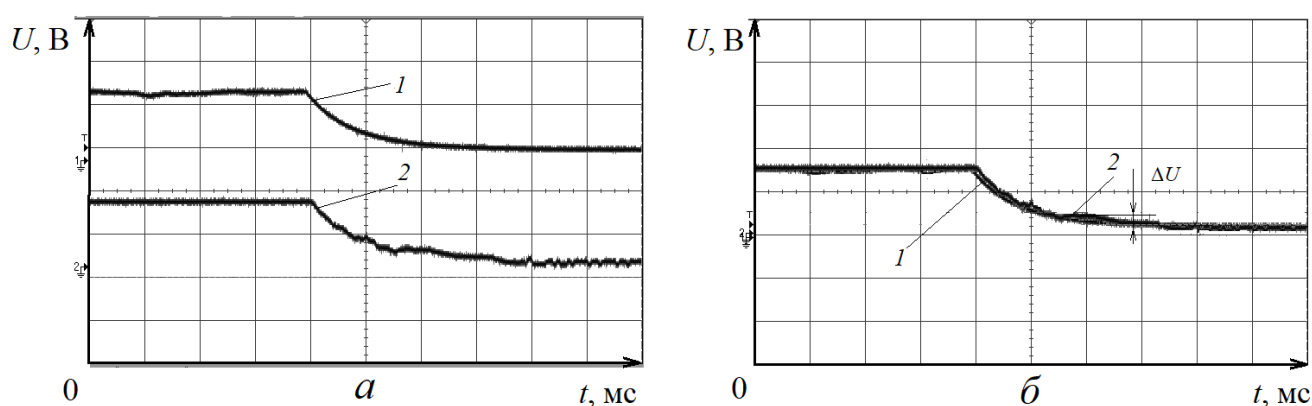


Рисунок 3.14 – Контролируемый (1) и восстановленный (2) сигналы при диапазоне частот ГУН 6 – 80 кГц: а – раздельное представление сигналов; б – наложение сигналов (вертикальная развертка – 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)

Вычислим количество отсчетов, затраченных для сохранения данных за время переходного процесса:

$$N_3 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_{\text{д}}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{12,5 \cdot 10^{-6}} = 2000.$$

Требуемый объем памяти ОЗУ составит

$$V_3 = N_3 M = 2000 \cdot 16 = 32 \text{ Кбит.}$$

Определим объем памяти ОЗУ  $V_4$  для записи сигнала при диапазоне частот ГУН 20 – 1 000 кГц (рис. 3.15).

Максимальное отклонение восстановленного сигнала от исходного  $\Delta U = 0,07$  В. Погрешность составит

$$\delta = \frac{\Delta U \cdot 100 \%}{3,45} = \frac{0,07 \cdot 100 \%}{3,45} = 2,02 \% .$$

Максимальная частота работы ГУН составит 1 МГц, период дискретизации  $T_{\text{д}} = 1$  мкс, длительность переходного процесса – 25 мс.

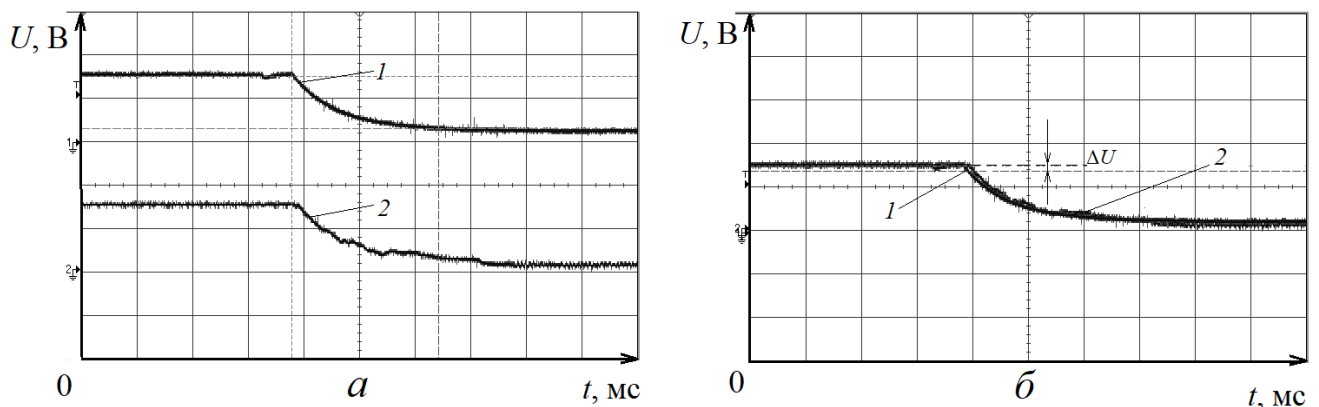


Рисунок 3.15 – Контролируемый (1) и восстановленный (2) сигналы при диапазоне частот ГУН 20 – 1000 кГц: а – отдельное представление сигналов; б – наложение сигналов (вертикальная развертка – 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)



Вычислим количество отсчетов, затраченных для сохранения данных за время переходного процесса:

$$N_4 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_d} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 25\,000.$$

Требуемый объем памяти ОЗУ составит:

$$V_4 = N_4 M = 25\,000 \cdot 16 = 400 \text{ Кбит.}$$

Сравнив вычисленные объемы памяти, можно сделать вывод, что с увеличением диапазона рабочих частот ГУН уменьшается погрешность восстановления контролируемого сигнала (рис. 3.16).

Наихудший результат восстановления сигнала составил  $\pm 55\%$  при работе ГУН в диапазоне частот 50 – 330 Гц, наилучший результат  $\pm 3,1\%$  – в диапазоне 6 – 80 кГц.

При дальнейшем увеличении диапазона рабочих частот ГУН до 20 – 1 000 кГц погрешность уменьшилась до  $\pm 2,02\%$ , но это привело к чрезмерному расходу ресурсов памяти для сохранения данных (рис. 3.17) [107, 108].

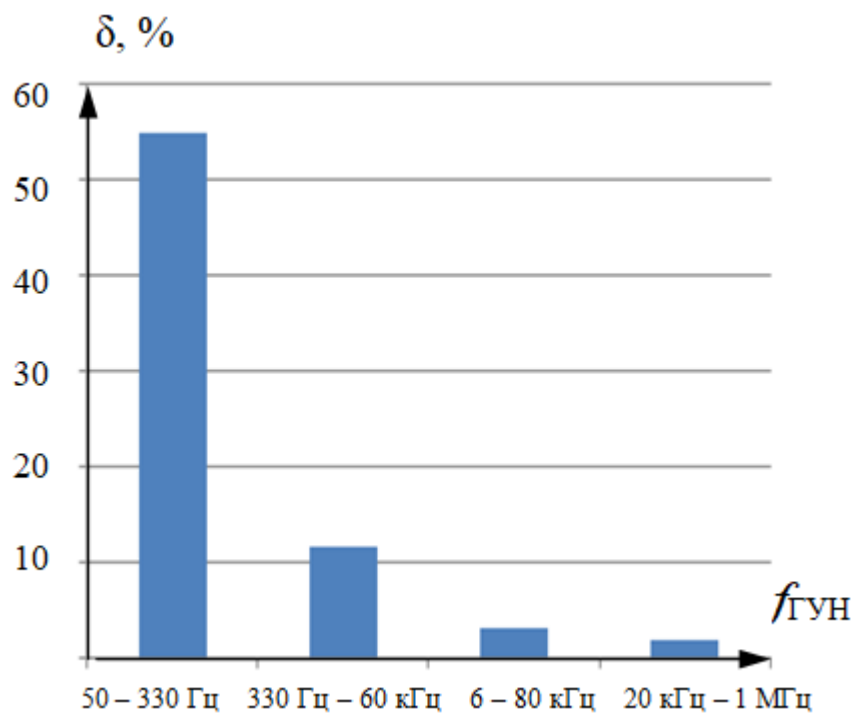


Рисунок 3.16 – Зависимость погрешности восстановленного сигнала от диапазона рабочих частот ГУН

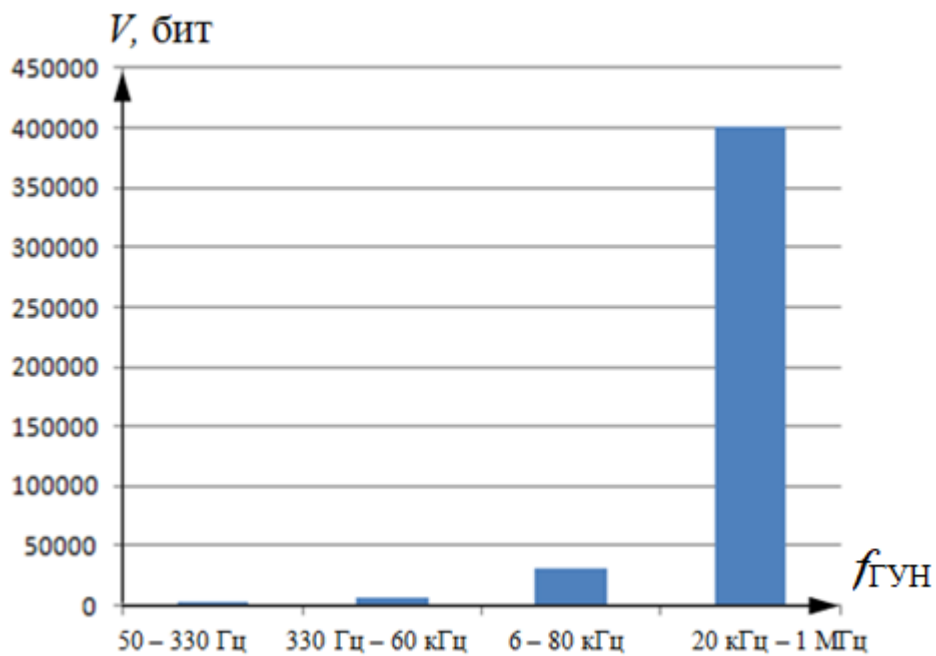


Рисунок 3.17 – Зависимость требуемого объема памяти от диапазона рабочих частот ГУН

Определим разницу объемов сохраняемых данных при диапазонах рабочих частот ГУН 20 – 1 000 кГц и 6 – 80 кГц для контроля сигнала с диапазоном спектра от 0 до 3 кГц:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{400\,000}{32\,000} = 12,5.$$

Отсюда следует, что с учетом необходимости сохранения текущего времени каждого отсчета общий объем сохраняемых данных уменьшится в 6 раз.

Таким образом, погрешность  $\pm 3,1\%$  является оптимальной. Дальнейшее увеличение частотного диапазона ГУН нецелесообразно с точки зрения экономии ресурсов ОЗУ.

Проанализируем соотношение верхней граничной частоты  $f_b$  спектра контролируемого сигнала и свободной частоты ГУН  $f_0$ , с которой начинается увеличение рабочей частоты по установленному диапазону.

Верхняя граничная частота спектра контролируемого сигнала  $f_b = 3$  кГц (см. рис. 3.11). Диапазон рабочих частот ГУН, при котором получен оптимальный результат, составляет 6 – 80 кГц, свободная частота  $f_0 = 6$  кГц.

Тогда соотношение частот составит

$$\frac{f_0}{f_b} = \frac{6 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^3} = 2.$$

По полученным результатам можно сделать вывод, что для достижения оптимального восстановления контролируемого сигнала, с учетом того, что погрешность восстановления не превышает 10 %, свободная рабочая частота ГУН  $f_0$  должна быть выше верхней граничной частоты спектра контролируемого сигнала не менее чем в 2 раза.

Рассмотрим восстановление сигнала при разных значениях постоянной времени дифференцирующей цепи  $RC = t_c = 25$  мс и  $RC = 0,1t_c = 2,5$  мс.

Выберем диапазон рабочих частот ГУН 6 – 80 кГц с оптимальным значением погрешности  $\pm 3,1$  %.

При восстановлении сигнала с  $RC = t_c$  (рис. 3.18) видно, что контролируемый сигнал имеет два характерных участка:  $t_1$  и  $t_2$ .

На участке  $t_1$  показан кратковременный спад контролируемого сигнала на значение порядка 0,3 В с последующим восстановлением. Участок  $t_2$  показывает аperiodическое снижение от 3,45 до 0,4 В.

При этом на обоих участках восстановленного сигнала отображается переходный процесс.

Оценим объем памяти, необходимый для записи такого сигнала.

Полная длительность сигнала составляет 100 мс, из них примерно 40 мс обрабатывается на частоте 6 кГц, 60 мс – на частоте 80 кГц. Преобразование происходит на шестнадцатиразрядном АЦП.

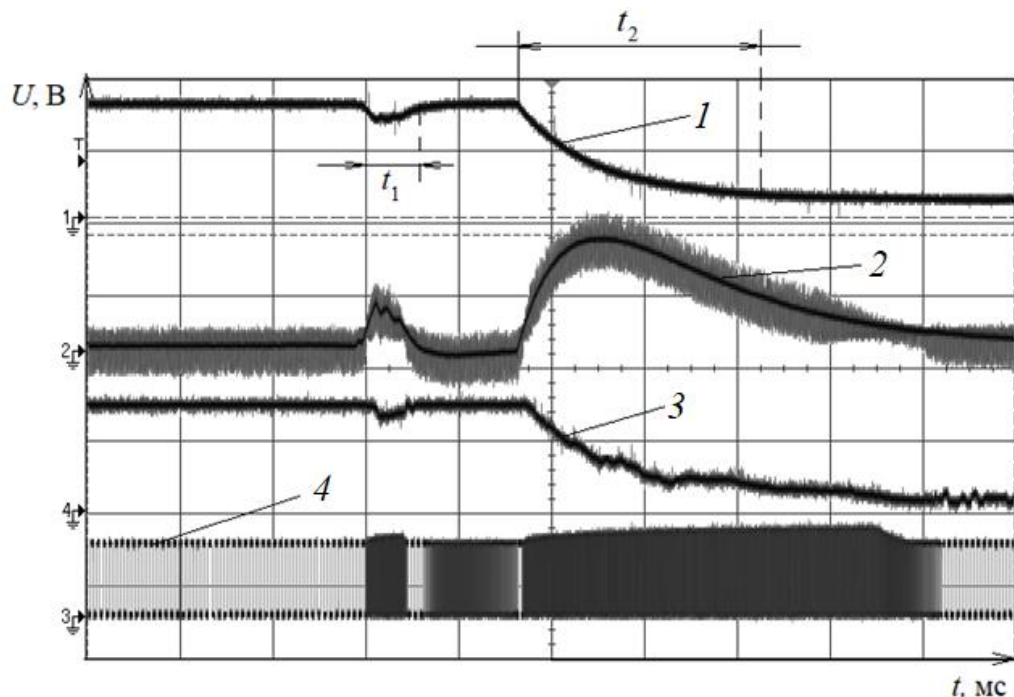


Рисунок 3.18 – Процесс восстановления сигнала при постоянной времени 25 мс и диапазоне рабочих частот ГУН 6 – 80 кГц: 1 – контролируемый сигнал; 2 – выход ДУ; 3 – восстановленный сигнал; 4 – выходные импульсы ГУН (вертикальная развертка – 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)

Период дискретизации при работе ГУН на частоте 6 кГц составит

$$T_{д1} = \frac{1}{f_{д1}} = \frac{1}{6 \cdot 10^3} = 0,16 \text{ мс.}$$

Зная время работы ГУН на частоте 6 кГц, которое составляет 40 мс, определим необходимое количество отсчетов:

$$N_1 = \frac{40 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{0,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}} \approx 250.$$

Объем необходимой памяти при обработке шестнадцатиразрядным АЦП и количестве отсчетов 250 составит

$$V_1 = MN_1 = 16 \cdot 250 = 4 \text{ Кбит.}$$

Период дискретизации при работе ГУН на частоте 80 кГц составит

$$T_{д2} = \frac{1}{f_{д2}} = \frac{1}{80 \cdot 10^3} = 0,0125 \text{ мс.}$$

Время работы ГУН на частоте 80 кГц составляет 60 мс, требуемое количество отсчетов при этом составит

$$N_1 = \frac{60 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{0,0125 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 4800.$$

Объем памяти составит

$$V_2 = MN_2 = 16 \cdot 4800 = 76,8 \text{ Кбит.}$$

Суммарный объем памяти составит

$$V_{\text{общ}} = V_1 + V_2 = 4 \text{ Кбит} + 76,8 \text{ Кбит} = 80,8 \text{ Кбит}.$$

Рассмотрим процесс восстановления сигнала при  $RC = 0,1t_c$  (рис. 3.19), также имеющий два характерных участка:  $t_1$  и  $t_2$ . При этом переходный процесс отображается только на участке  $t_2$ .

Определим объем памяти, необходимой для записи такого сигнала.

Полная длительность сигнала составляет 100 мс, из них около 45 мс обрабатываются на частоте 80 кГц, остальные 55 мс – на частоте 6 кГц.

Период дискретизации при работе ГУН на частоте 6 кГц известен и составляет  $T_{\text{дл}} = 0,16$  мс.

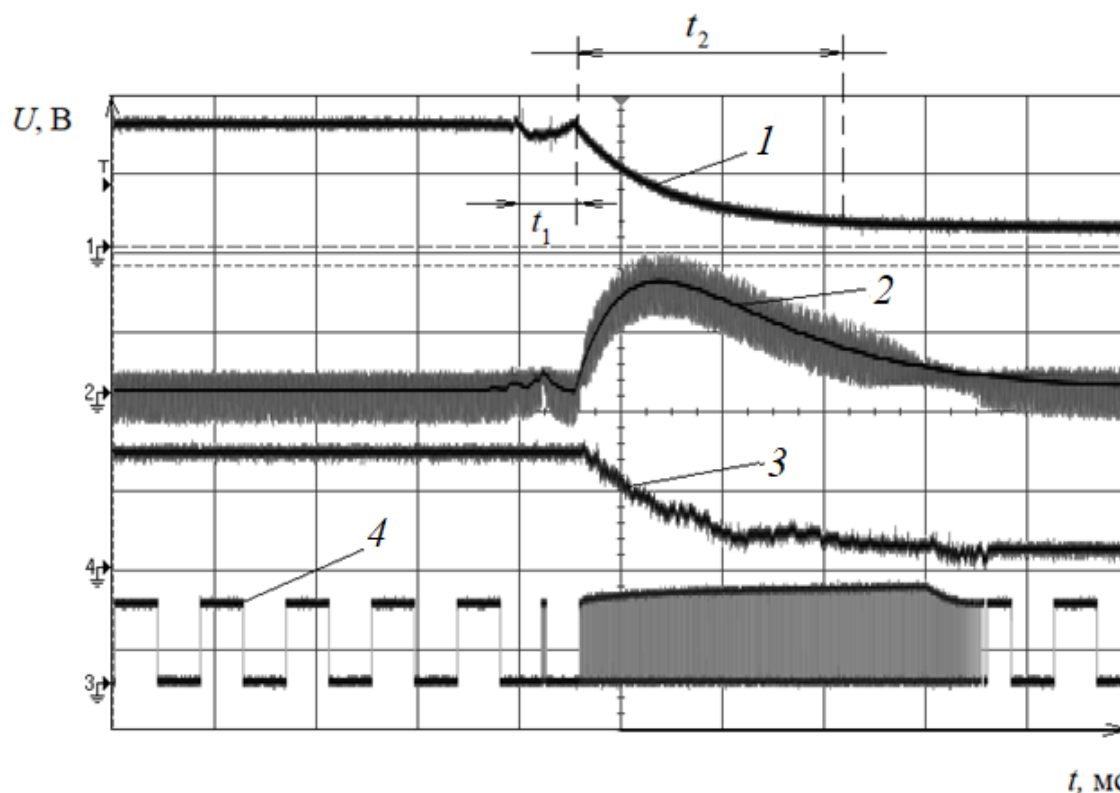


Рисунок 3.19 – Процесс восстановления сигнала при постоянной времени 2,5 мс и диапазоне рабочих частот ГУН 6 – 80 кГц: 1 – контролируемый сигнал; 2 – выход ДУ; 3 – восстановленный сигнал; 4 – выходные импульсы ГУН (вертикальная развертка – 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)

Зная время работы ГУН, которое составляет 55 мс, определим необходимое количество отсчетов:

$$N_1 = \frac{55 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{0,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}} \approx 343.$$

Объем необходимой памяти при обработке шестандцатиразрядным АЦП и количестве отсчетов 343 составит

$$V_1 = MN_1 = 16 \cdot 343 = 5488 \text{ бит.}$$

Период дискретизации при работе ГУН на частоте 80 кГц известен и составляет  $T_{д2} = 0,0125$  мс. Время работы ГУН на частоте 80 кГц составляет 45 мс.

Определим требуемое количество отсчетов:

$$N_1 = \frac{45 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{0,0125 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 3600.$$

Объем памяти составит

$$V_2 = MN_2 = 16 \cdot 3600 = 57,6 \text{ Кбит.}$$

Суммарный объем памяти составит

$$V_{\text{общ}} = V_1 + V_2 = 5488 \text{ бит} + 57\,600 \text{ бит} = 63\,088 \text{ бит.}$$

Для сравнения определим необходимый объем памяти ОЗУ, исходя из следующих условий: длительность сигнала составляет 100 мс, а ГУН работает на постоянной частоте 80 кГц.

Количество отсчетов составит

$$N = \frac{100 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{0,0125 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 8000.$$

Объем необходимой памяти

$$V = MN = 16 \cdot 8000 = 128 \text{ Кбит.}$$

По результатам расчетов видно, что объем памяти ОЗУ, необходимый при работе на постоянной частоте ГУН 80 кГц, в 1,5 – 2 раза превышает объем памяти для записи информации с переменной частотой. Это означает, что при записи информации с переменной частотой достигается минимизация объема сохраняемых данных.

Подведем итог: точность восстановления контролируемого сигнала зависит от значения постоянной времени цепи. При значении постоянной времени  $t_c$  ДУ имеет большую чувствительность к входному сигналу, чем при  $0,1t_c$ . Это позволяет записывать и восстанавливать даже незначительные изменения переходных процессов (см. рис. 3.18).

### **3.6 Устройство контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных**

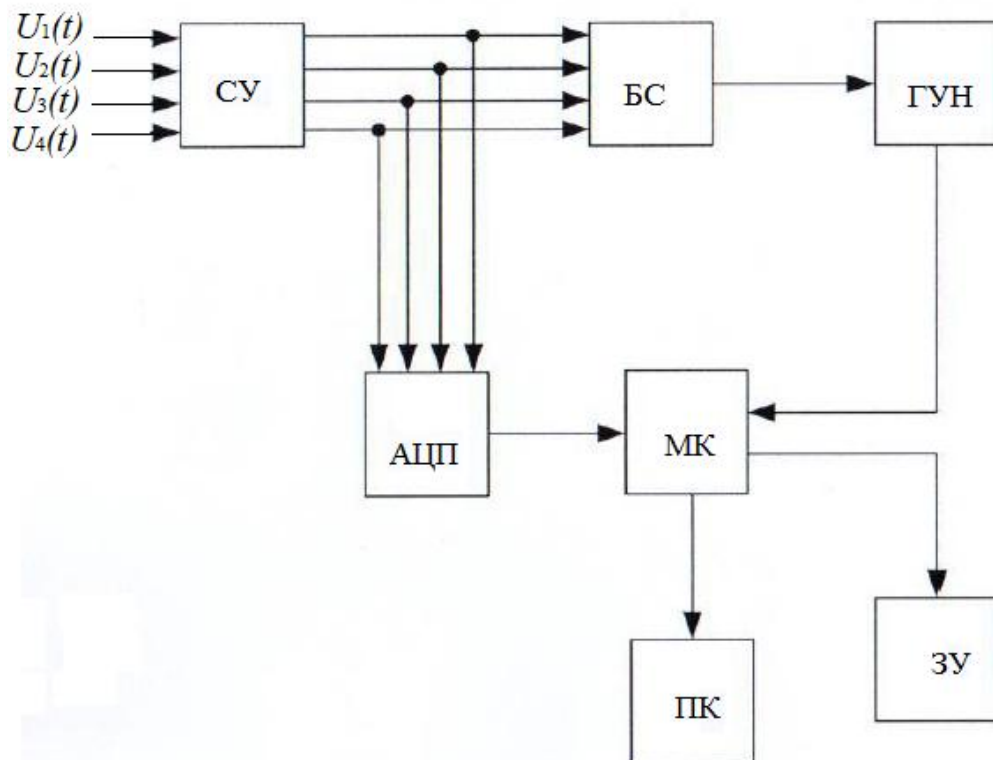
Устройство контроля предназначено для слежения за электрическими параметрами DC/DC-преобразователя.

К электрическим параметрам относятся входное напряжение, потребляемый ток, выходное напряжение и ток нагрузки. При этом информация о значениях тока преобразователя снимается с шунтов и поступает на согласующее устройство.



Благодаря преобразованию в цифровой вид, сжатию и сохранению входных и выходных параметров источника питания в запоминающее устройство с последующим считыванием этих данных и восстановлением на персональном компьютере появляется возможность анализировать параметры источника питания.

Рассмотрим принцип работы такого устройства контроля (рис. 3.20) [78, 92].



СУ – согласующее устройство, БС – блок сжатия, МК – микроконтроллер, ЗУ – запоминающее устройство, ПК – персональный компьютер.

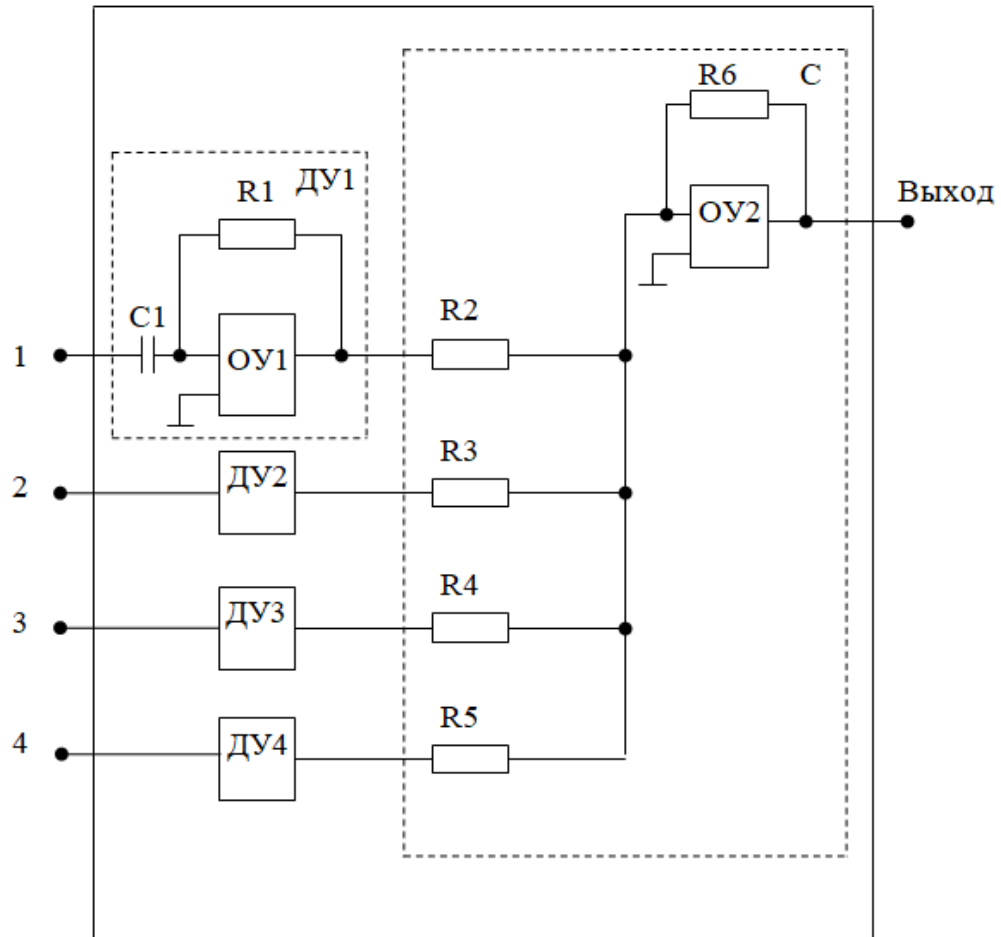
Рисунок 3.20 – Структурная схема устройства контроля

Контроль параметров проводится по четырем каналам. Информация о параметрах поступает на СУ в виде напряжений  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ ,  $U_3(t)$ ,  $U_4(t)$ .

СУ преобразовывает уровень контролируемых напряжений для согласования их с остальными рабочими узлами устройства контроля, такими как АЦП и БС. Допускается увеличивать число контролируемых каналов за счет

введения дополнительных преобразующих цепей в СУ и их подключения ко входам многоканального АЦП и БС.

БС (рис. 3.21) содержит ДУ1...ДУ4 и сумматор [78, 92].



С – сумматор.

Рисунок 3.21 – Структурная схема блока сжатия

ДУ1...ДУ4 выполнены на операционных усилителях ОУ1...ОУ4 и формируют на своих выходах сигнал, пропорциональный скорости изменения контролируемого параметра:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -R_1 C_1 \frac{dU_{\text{ВХ}}(t)}{dt},$$

где  $U_{\text{ВХ}}(t)$  – входное напряжение операционного усилителя ОУ1.

Номиналы резистора  $R1$  и конденсатора  $C1$  задают постоянную времени индивидуально для каждого ДУ. Тем самым можно регулировать чувствительность ДУ к контролируемому параметру, что позволяет выполнять функцию селективности при контроле электрических параметров.

Сумматор производит сумму выходных напряжений ДУ и выдает итоговое напряжение на вход ГУН.

ГУН формирует тактовые импульсы, которые синхронизируют работу МК.

МК связан с ПК через интерфейс связи и ЗУ. В свою очередь, ПК отображает визуальную информацию о контролируемых электрических параметрах.

Опишем принцип работы устройства контроля (рис. 3.22).

При подключении устройства к источнику питания его входное и выходное напряжение, а также информация о входном и выходном токе поступает через СУ на вход БС.

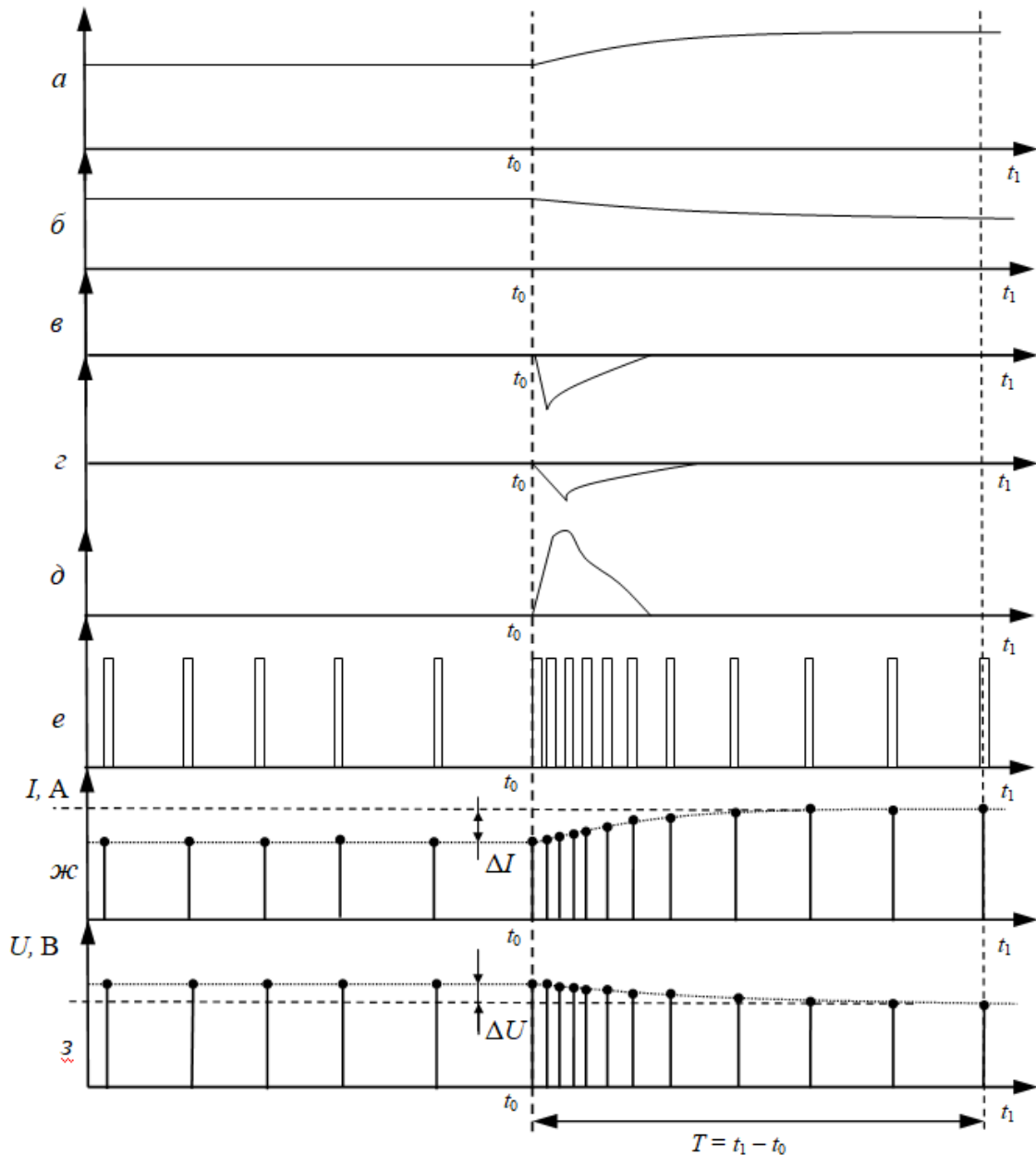
БС формирует для ГУН напряжение, пропорциональное значению первой производной.

В зависимости от уровня поступающего напряжения ГУН изменяет частоту генерируемых импульсов.

Если напряжения и токи на входах СУ не изменялись, то выходные напряжения каждого ДУ и, соответственно, сумматора равны нулю. Выходная частота ГУН минимальна.

При изменении значений тока и напряжения на входе СУ в момент времени  $t_0$  (рис. 3.22, *a*, *б*) на выходе ДУ1 и ДУ2 появляются напряжения, пропорциональные производной от этих изменений в отрицательной полярности (рис. 3.22, *в*, *г*).

Пройдя через сумматор (рис. 3.22, *д*), эти напряжения поступают на ГУН. Частота генерируемых импульсов растет (рис. 3.22, *е*).



$a$  – форма выходного тока, поступающая на СУ;  
 $б$  – выходное напряжение, поступающее на СУ;  $в$  – выходное напряжение ДУ1;  
 $г$  – выходное напряжение ДУ2;  $д$  – напряжение на выходе сумматора;  
 $е$  – напряжение на выходе ГУН;  $ж$  – выходной ток вторичного источника бесперебойного питания, отображаемый на ПК;  $з$  – выходное напряжение вторичного источника бесперебойного питания, отображаемое на ПК.

Рисунок 3.22 – Эпюры напряжений и токов

В соответствии с выходной частотой ГУН МК считывает данные с АЦП и записывает их в ЗУ, фиксируя время считывания.

По сигналу запроса с ПК МК считывает данные из ЗУ и передает их на ПК для восстановления и анализа данных о работе источника питания.

На ПК отображаются следующие параметры: восстановленная форма выходного тока вторичного источника бесперебойного питания, мгновенный уровень тока в амперах, уровень отклонения выходного тока  $\Delta I$  (рис. 3.22, ж), восстановленная форма выходного напряжения, уровень отклонения выходного напряжения  $\Delta U$ , значение напряжения в вольтах, длительность  $T$  переходного процесса (рис. 3.22, з).

Контроль входного напряжения и тока вторичного источника бесперебойного питания проводится аналогичным образом.

Основные технические характеристики устройства контроля представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики устройства контроля

Параметр	Значение	Примечание
Напряжение питания, В	12	
Погрешность восстановления сигнала, %	$\leq 7$	
Разрядность АЦП, бит	16	
Контролируемое напряжение, В	0 – 400	
Ток потребления, А	$\leq 0,5$	
Диапазон частот работы ГУН, кГц	1 – 200	Регулируется при настройке
Объем памяти, Гб	2	Внешний накопитель
Количество каналов контроля	4	Допускается увеличивать

### 3.7 Сравнительный анализ физического износа элементов памяти

При периодическом обновлении информации в ячейках памяти каждые несколько минут или секунд можно столкнуться с проблемой физического износа ячеек памяти [15].

Различные виды элементов памяти имеют разное количество циклов записи и считывания информации, которое указывается в технической документации на них. Микросхемы EEPROM-памяти имеют ограниченный ресурс записи информации. В зависимости от микросхемы после 100 000 или 1 000 000 записей элемент памяти испытывает проблемы с работоспособностью, а его отказ приведет к потере информации и неработоспособности изделия [16].

Предположим, например, что требуется записывать информацию в одну ячейку каждые 10 секунд, при этом элемент памяти имеет ресурс записи и считывания 1 000 000:

$$\frac{1\,000\,000}{6 \cdot 60 \frac{\text{мин}}{\text{ч}} \cdot 24 \frac{\text{ч}}{\text{день}}} = 116 \text{ дней}$$

Отсюда следует, что элемент памяти исчерпает свой резерв 1 000 000 записей менее чем через четыре месяца.

На графике зависимости износа памяти (рис. 3.23) видно, что для микросхемы EEPROM с ресурсом 100 000 возможно обновление ячейки не чаще одного раза в час, тогда срок службы памяти составит порядка десяти лет.

При этом стоит отметить, что при записи информации один раз в час можно пропустить контролируемые изменения в виде случайных переходных процессов на момент аварии.

Преимущество по количеству объема сохраняемых данных имеют элементы Flash-памяти, так как они позволяют сохранять информацию о параметре на протяжении длительных режимов работы.

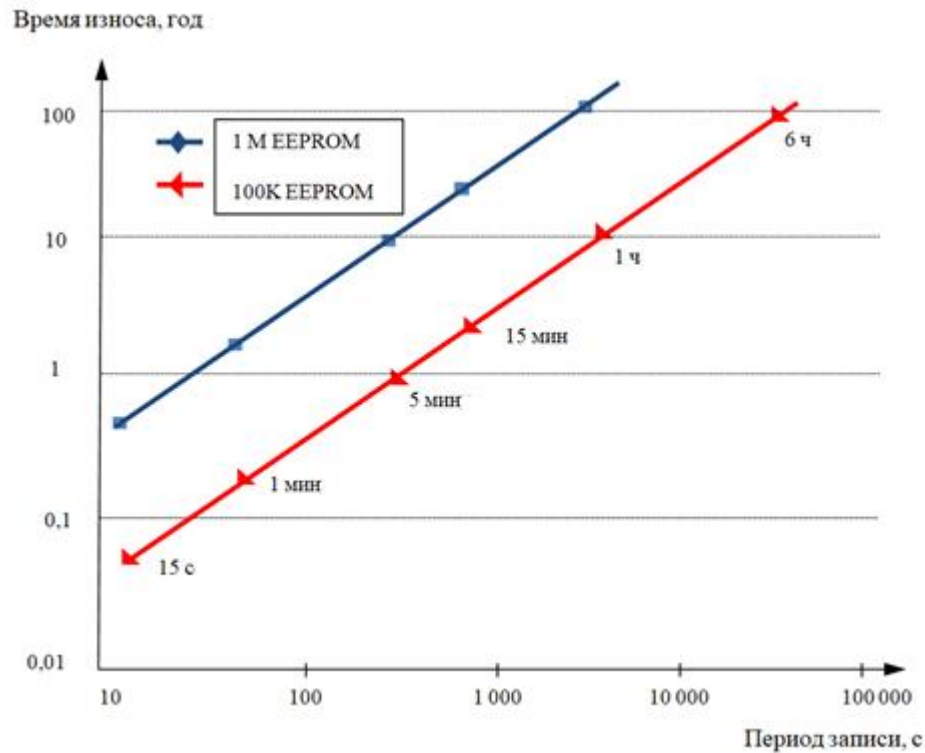


Рисунок 3.23 – Зависимости физического износа памяти при различных периодах записи информации

Отечественные микросхемы Flash типов 1636PP51У, 1636PP52У имеют ресурс по количеству записи и считыванию информации 15 000 [109]. У микросхем 1636PP3У ресурс по количеству записи и считыванию информации достигает 10 000 [110].

Оценим разницу объемов памяти при записи одного и того же электрического параметра предложенным способом и с постоянной частотой.

Контроль электрического параметра осуществляется в течение часа. Согласно циклограмме (рис. 3.24) имеются два переходных процесса, при которых осуществляется запись информации на повышенной частоте. ГУН работает в диапазоне частот 6 – 80 кГц, информация обрабатывается на 16-разрядном АЦП.

Исходя из циклограммы зададим максимальные частоты дискретизации:  $F_{д1} = 80$  кГц,  $F_{д2} = 6$  кГц и  $F_{д3} = 80$  кГц. Время спада и подъема напряжения составляет 0,2 с, общая длительность – 3600 с.

Соответствующие им периоды дискретизации:  $T_{д1} = 28,6$  мкс,  $T_{д2} = 166$  мкс,  $T_{д3} = 28,6$  мкс.

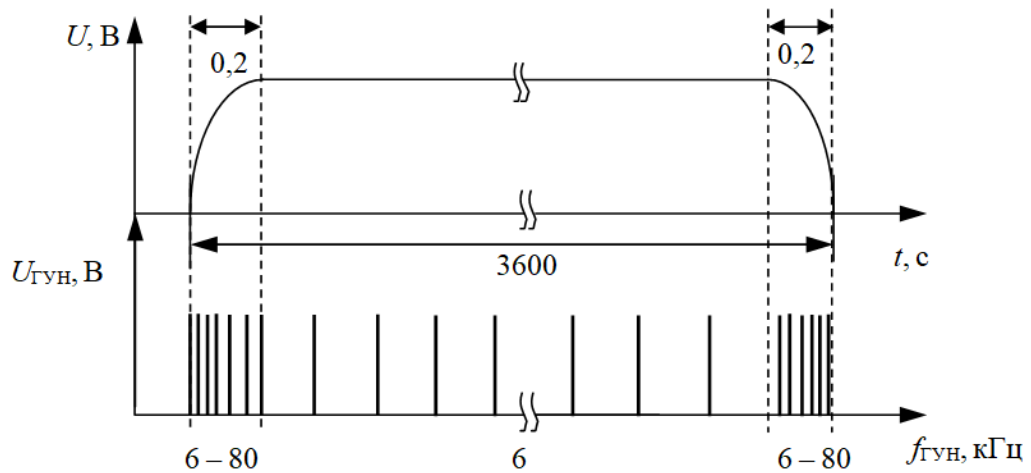


Рисунок 3.24 – Циклограммы переходных процессов

Вычислим необходимое количество отсчетов для каждого из трех участков:

$$N_1 = \frac{T_{c1}}{T_{д1}} = \frac{0,2}{28,6 \cdot 10^{-6}} = 6993;$$

$$N_2 = \frac{T_{c2}}{T_{д2}} = \frac{3599,6}{166 \cdot 10^{-6}} = 21 \cdot 10^6;$$

$$N_3 = \frac{T_{c3}}{T_{д3}} = \frac{0,2}{28,6 \cdot 10^{-6}} = 6993.$$

Объем заполненной памяти составит

$$V = (N_1 + N_2 + N_3)M = (6993 + 21 \cdot 10^6 + 6993) \cdot 16 \approx 336 \text{ Мбит.}$$



Проведем расчет заполняемой памяти при постоянной частоте дискретизации 80 кГц.

Тогда количество отсчетов составит

$$N_1 = \frac{T_{c1}}{T_{д1}} = \frac{3600}{28,6 \cdot 10^{-6}} = 126 \cdot 10^6.$$

Объем заполненной памяти составит

$$V = N_1 M = 126 \cdot 10^6 \cdot 16 \approx 2016 \text{ Мбит.}$$

Из полученных результатов видно, что предложенный способ позволяет уменьшить объем сохраняемых данных в шесть раз и равнозначно увеличить ресурс элемента памяти.

### **3.8 Рекомендации по проектированию узлов устройства контроля**

Устройство контроля технических объектов состоит из элементов аналоговой и цифровой электроники. Аналоговые элементы выполняют обработку и преобразование входных сигналов (согласование по уровню, вычисление производной), а также формирование импульсов с выхода ГУН.

Достоинство схемы ДУ, выполненной на основе операционного усилителя, заключается в ее быстродействии. Недостатком является большее количество элементов, которое требуется для построения данного узла.

Узлы ДУ и ГУН можно реализовать практически любыми современными средствами цифровой обработки сигналов – как на микроконтроллере, так и на ПЛИС.

ДУ является фильтром верхних частот, и на основе имеющегося аналогового прототипа можно реализовать его в цифровом виде. В отличие от аналоговых фильтров, у которых сигнал изменяется непрерывно, в цифровых

фильтрах (ЦФ) входной сигнал представляется в дискретной форме, т. е. принимает через каждый интервал дискретизации новое значение.

ЦФ включают в свой состав, как правило, устройства преобразования из аналоговой формы в дискретную (АЦП) и обратно (цифро-аналоговый преобразователь), устройства задержки дискретных сигналов и арифметические устройства. Устройства задержки реализуются на регистрах сдвига или на ОЗУ, арифметические устройства – аппаратно (сумматоры, умножители) или в виде программы вычислений.

Способы реализации ЦФ делятся на временные и частотные.

Рассмотрим реализацию ДУ временным способом на фильтре с конечной импульсной характеристикой.

Для реализации ЦФ следует преобразовать в дискретную форму его импульсную характеристику.

Импульсная характеристика описывается выражением:

$$g(t) = \delta(t) - \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.2)$$

Продискретизируем импульсную характеристику. Для этого необходимо заменить в выражении (3.2) непрерывный аргумент  $t$  на дискретный  $nT_d$ :

$$g_n = g(nT_d)T_d.$$

Принимая значение постоянной времени  $\tau = 30$  мкс, построим график дискретизированной импульсной характеристики ДУ (рис. 3.25).

При реализации ДУ необходимо знать значения отсчетов импульсной характеристики.

Системная функция ЦФ представляет собой следующую сумму:

$$K(z) = 1 + \sum_{n=0}^M a_n z^{-n},$$

где  $a_n = g(nT_d)T_d$ ;  $M$  – количество коэффициентов ЦФ.

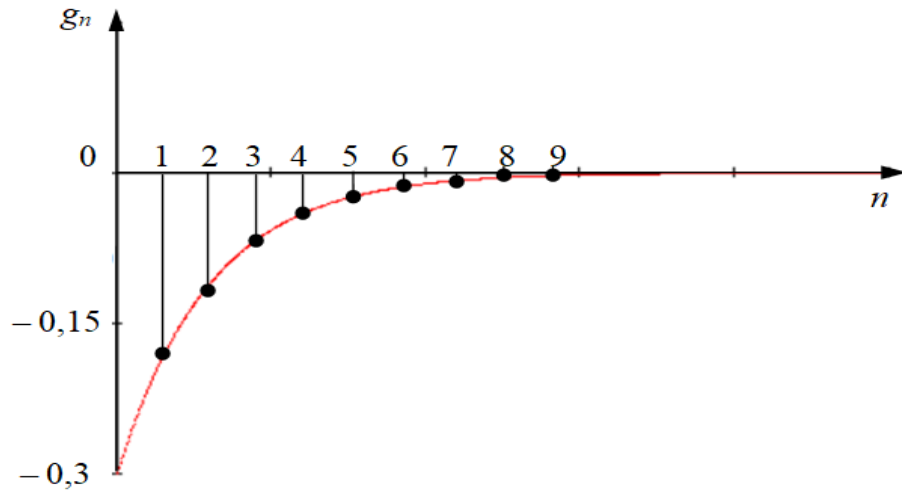


Рисунок 3.25 – Дискретизированная импульсная характеристика ДУ

Для реализации ДУ в виде ЦФ необходимо взять конечное число нормированных отсчетов импульсной характеристики, а для нахождения системной функции – ограничить импульсную характеристику по пороговому критерию, определенному как десятая часть первого отсчета дискретной импульсной характеристики. Коэффициенты  $a_n$  (табл. 3.3) соответствуют значениям отсчетов импульсной характеристики, т. е.  $a_n = g_n$ .

Таблица 3.3 – Коэффициенты ЦФ

Наименование коэффициента	Значение
$a_1$	-0,169
$a_2$	-0,131
$a_3$	-0,072
$a_4$	-0,038
$a_5$	-0,029
$a_6$	-0,016

Начиная с  $n = 7$ , модули коэффициентов не превышают уровня 0,1 от максимального значения, поэтому порядок ЦФ (рис. 3.26) равен 6.

Работа ЦФ описывается следующим алгоритмом:

$$y_n = 1 - 0,169 x_{n-1} - 0,131 x_{n-2} - 0,072 x_{n-3} - 0,038 x_{n-4} - 0,029 x_{n-5} - 0,016 x_{n-6}.$$

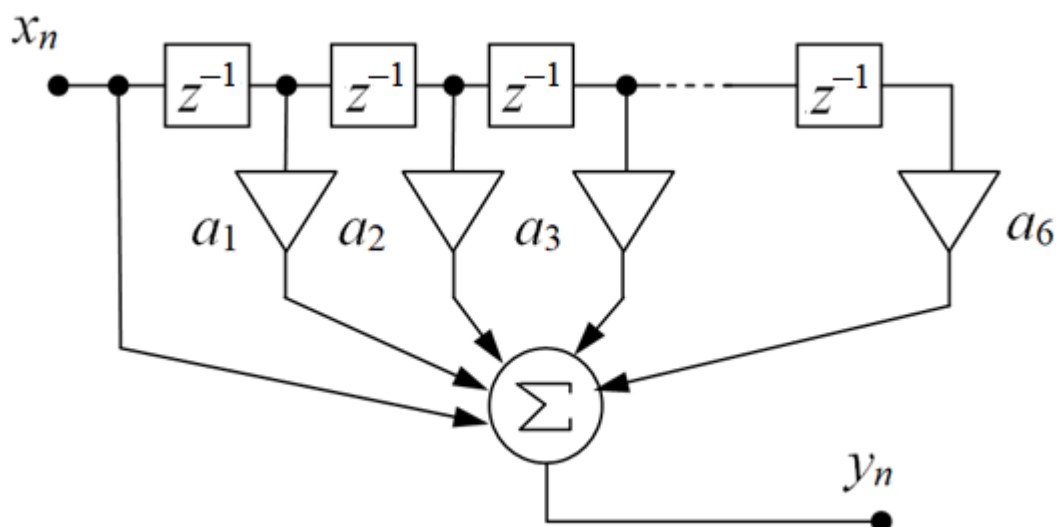


Рисунок 3.26 – Структурная схема ЦФ

С целью дополнительного увеличения надежности ГУН может быть реализован аналогичным образом на микроконтроллерах серии STM32F2xx или на ПЛИС Altera Cyclone 3.

Реализация ГУН на основе цифровых вычислительных средств делает настройку устройства удобной, с возможностью простого изменения диапазона выходных частот, наклона характеристики и чувствительности к входному воздействию (рис. 3.27).

В качестве основных рекомендаций приведен исходный код программы для реализации ГУН на микроконтроллере (приложение Д) и на ПЛИС (приложение Е).

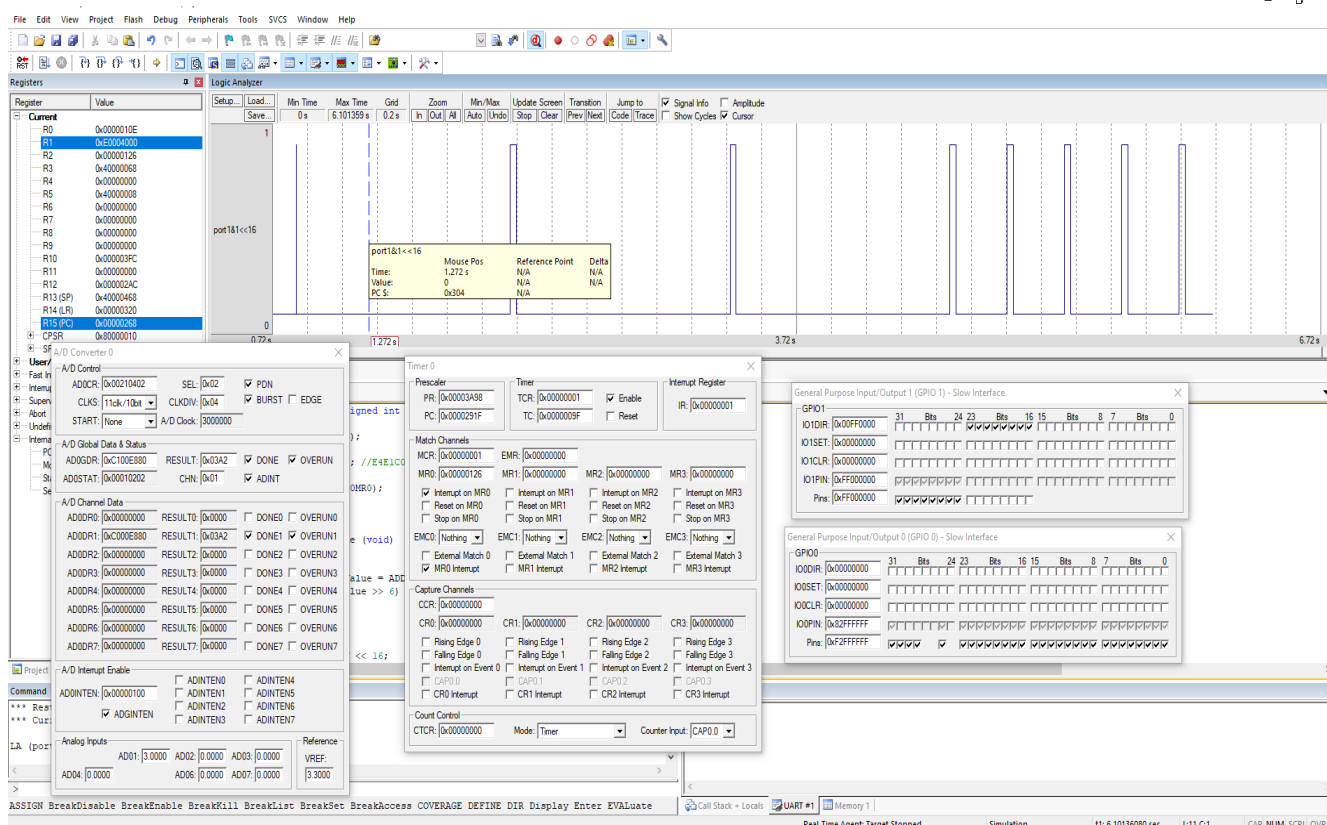


Рисунок 3.27 – Визуализация работы ГУН, реализованной программными средствами

### 3.9 Описание графического интерфейса пользователя

Для обработки данных с помощью ПК предусмотрено специальное программное обеспечение, позволяющее выводить результаты измерений оператору (рис. 3.28, 3.29).

В окне «График» отображаются контролируемые сигналы в графической форме. Построение графиков можно осуществлять по 16 каналам контроля. Для этого необходимо поставить флажки в поля «Гр1», «Гр2», «Гр.3»...«Гр.16» и запустить процесс нажатием кнопки «ADC». Данное количество каналов предусмотрено с целью увеличения числа контролируемых параметров объекта.

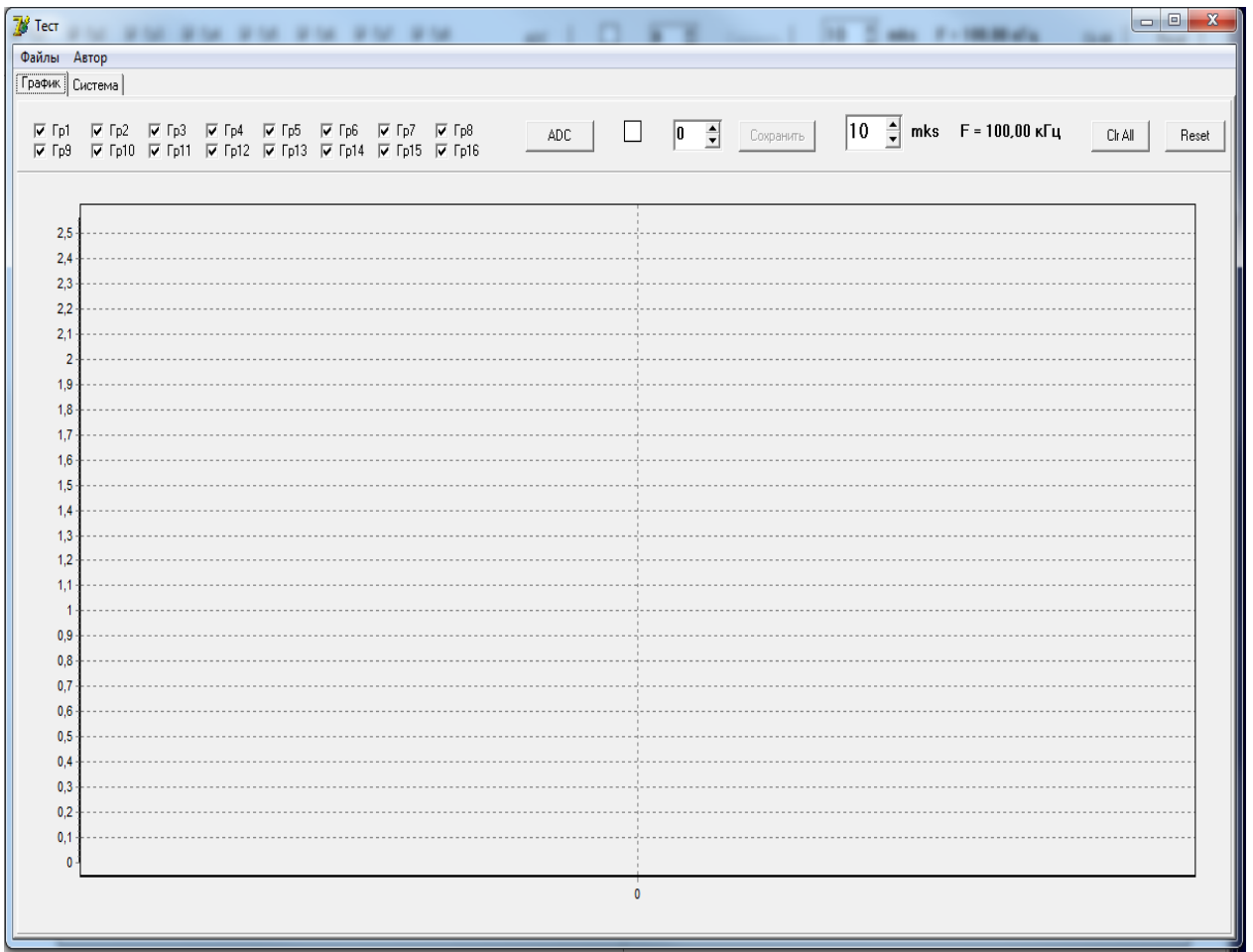


Рисунок 3.28 – Графический интерфейс программы. Окно «График»

Также данное окно позволяет сохранять информацию о построенных графиках в формате TXT – в основном для дальнейшего построения графиков и их исследования. Чтобы сохранить информацию, необходимо нажать кнопку «Сохранить», затем указать путь сохранения файла.

В данном окне можно менять диапазон перестройки частоты дискретизации ГУН. По умолчанию верхняя граница частоты дискретизации равна 100 кГц.

Кнопка «Reset» сбрасывает построенные графики контролируемых сигналов и обнуляет результаты.

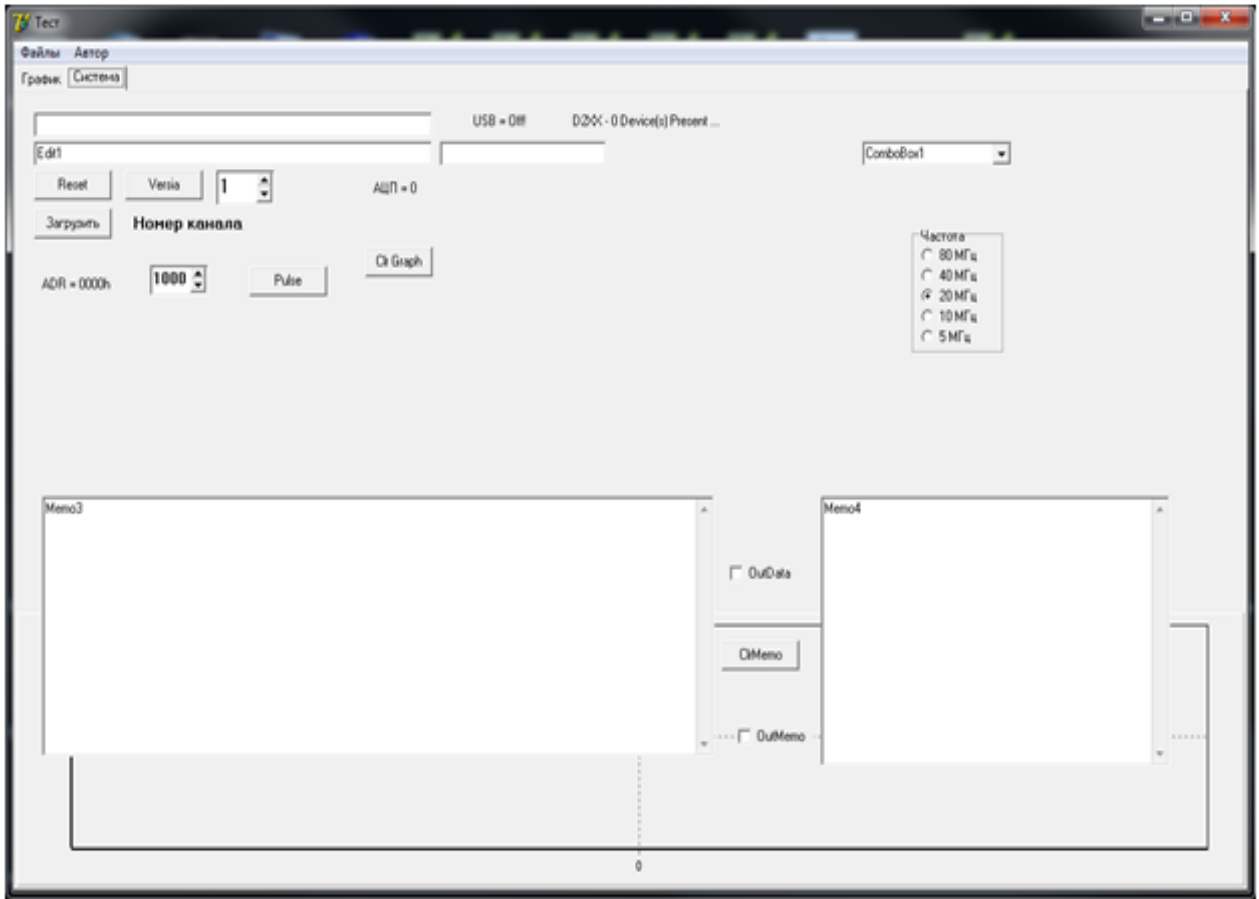


Рисунок 3.29 – Графический интерфейс программы. Окно «Система»

Окно «Система» позволяет проводить настройки для каждого канала контроля, подключать/отключать канал и выбирать максимальную частоту преобразования 5 – 80 МГц.

Графический интерфейс программного обеспечения довольно прост, эргономичен и интуитивно понятен пользователю.

### 3.10 Выводы

Продемонстрирована экспериментальная проверка устройства контроля и способа минимизации сохраняемых данных. Все эксперименты прошли с положительным результатами, способ показал свою работоспособность.

Результаты работы в виде эпюр напряжений подтверждают работоспособность устройства контроля. Минимизация сохраняемых данных достигается совместным использованием блока сжатия и ГУН. При этом рабочая

частота ГУН и постоянная времени ДУ должны быть оптимально подобраны и не должны приводить к переизбытку требуемого количества памяти.

Оптимально подобранное отношение постоянной ДУ к длительности фронта и диапазона рабочих частот ГУН к спектру сигнала будет достигнуто в том случае, если погрешность восстановленного сигнала не будет превышать 10 %, так как данное значение погрешности приемлемо для анализа и инженерных расчетов.

При работе ГУН в диапазоне частот 50 – 330 Гц наблюдается наихудший результат восстановления сигнала  $\pm 55$  %, а объем сохраняемых данных составляет 128 бит.

При работе ГУН в диапазоне частот 6 – 80 кГц, что выше спектра сигнала в два раза, погрешность восстановления сигнала составила  $\pm 3,1$  %, что вполне достаточно для практического применения.

При увеличении рабочих частот ГУН до диапазона 20 – 1 000 кГц погрешность уменьшается до  $\pm 2,02$  %. Но это приводит к чрезмерному расходу ресурсов памяти для сохранения данных (до 400 Кбит).



## Заключение

По результатам исследования разработано устройство контроля электрических параметров технических объектов, предложен способ сжатия информации, проведено их экспериментальное исследование.

В процессе исследования разработана имитационная модель устройства контроля. При восстановлении сигнала данная модель позволяет определить степень уменьшения объема сохраняемых данных, величину искажений, а также оценить необходимые параметры и соотношения частот ГУН и верхней граничной частоты спектра сигнала.

Проанализирована зависимость параметров восстановленного сигнала от постоянной времени дифференцирования, диапазона рабочих частот ГУН, его свободной частоты.

Экспериментальная проверка показала, что объем сохраняемых данных может уменьшаться в шесть и более раз при следующих условиях:

- свободная частота ГУН в два раза выше верхней граничной частоты спектра контролируемого сигнала;

- постоянная времени ДУ составляет около 10 % от длительности фронта переходного процесса.

При этом погрешность восстановленного сигнала составляет  $\pm 3,1$  %.

ДУ в составе устройства контроля увеличивает его быстродействие, а сумматор в блоке сжатия увеличивает число параллельно работающих каналов.

Таким образом, предложенное устройство контроля можно использовать для слежения за электрическими параметрами технических объектов.

Дополнительно стоит отметить, что объем памяти при работе ГУН на постоянной частоте в 1,5 – 2 раза превышает объем памяти, необходимый для записи информации с переменной частотой. В результате использования переменной частоты для записи информации может минимизироваться объем сохраняемых данных.

**Рекомендации.** Устройство контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных может использоваться для контроля электрических параметров преобразователей напряжения без участия оператора. Полученные результаты в виде имитационной модели и устройства могут использоваться в учебном процессе вузов.

**Перспективы дальнейшей разработки темы:** исследование работы устройства контроля с использованием нейросетей, оптимизация объема сохраняемых данных в автоматическом режиме, исследование обучаемости устройства.

## Список литературы

1. Голованов Д. А. Цифровое устройство диагностики для многоканальных вторичных источников питания // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. С. 104 – 109.
2. Ильинский В. М. Системы контроля авиационных силовых установок. М. : Транспорт, 1980. С. 78 – 79.
3. Пат. 2103717 Российская Федерация, МПК G 05 В 21/00, G 05 В 21/02. Автоматизированное контрольное устройство : № 96102252/09. Заявл. 06.02.1996 : опубл. 27.01.1998 / Федосов А. А.
4. Пат. 2106679 Российская Федерация, МПК G 05 В 23/02. Устройство контроля параметров : № 96112303/09. Заявл. 21.06.1996 ; опубл. 10.03.1998 / Корчагин В. Г., Кравцов Л. Я., Мазаев В. Г, Степанцов О. Е.
5. Смирнов В. А. Поиск неисправностей в бортовых системах управления в процессе приемочного контроля // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 24 – 28.
6. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики. М. : Энергия, 1981. 320 с.
7. Кузнецов П. И., Пчелинцев Л. А., Гайденок В. С. Контроль и поиск неисправностей в сложных системах. М. : Сов. радио, 1969. 240 с.
8. Тулупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В. Байесовские сети: Логико-вероятностный подход. СПб. : Наука, 2006. 607 с.
9. Портнягин Н. Н., Пюкке Г. А. Теория и методы диагностики судовых электрических средств автоматизации / Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2003. 112 с.
10. Писаренко В. Н. Разработка методов и средств контроля технического состояния автоматических бортовых систем управления самолетом : диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Самара, 2009. 187 с.

11. Саханов К. Ж. Разработка методов и средств контроля для обеспечения оценки технического состояния систем электроснабжения летательных аппаратов : диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Самара, 2010. 148 с.

12. Зайцев А. А. Разработка гибкой автоматизированной системы контроля технического состояния токораспределительных комплексов воздушных судов при обслуживании и ремонте : диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Самара, 2006. 151 с.

13. Ратникова Н. А. Теоретические основы, аппаратные средства и программно-математическое обеспечение информационной системы мониторинга и контроля по состоянию воздушных судов : диссертация на соискание степени доктора технических наук. Москва, 2005. 401 с.

14. Асадчий А. В. Сохранение диагностических сигналов при срабатывании автоматической защиты по току и напряжению // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016». Томск, 2016. Ч. 2. С. 188 – 191.

15. Как избежать износа EEPROM. URL: <http://m.habr.com/385213> (дата обращения: 30.11.2018).

16. Avoiding EEPROM Wearout. URL: [http://betterembsw.blogspot.com/2015/07/avoiding\\_eeprom\\_wearout.html?m=1](http://betterembsw.blogspot.com/2015/07/avoiding_eeprom_wearout.html?m=1) (дата обращения: 30.11.2018).

17. Обзор методов сжатия данных. URL: <http://www.compression.ru/arctest/descript/methods.htm> (дата обращения: 29.01.2020).

18. Алгоритмы сжатия – классификация методов сжатия. URL: [http://mf.grsu.by/UchProc/livak/po/comprsite/theory\\_classification\\_01.html](http://mf.grsu.by/UchProc/livak/po/comprsite/theory_classification_01.html) (дата обращения: 29.01.2020).

19. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М. : Техносфера, 2004. 368 с.

20. Казанцев Г. Д. Телевидение и телевизионные устройства: учебное пособие. Томск : Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2005. 194 с.
21. Андрейко Д. Н., Комаров П. Ю., Игнатов Ф. М. Основные методы сжатия в передаче цифровых видеоизображений // Технологии информационного общества. 2013. № 9. С. 10 – 14.
22. Федулеева М. В. Разработка многоканального блока сжатия в составе измерительной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. С. 190–194.
23. Маркарян Л. В. Мониторинг и моделирование процесса сжатия геофизических данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. С. 218–225.
24. Чубов С. В., Михайлов М. В., Солдатов А. И. Аппаратно-программный комплекс для испытания системы питания и управления электроракетными плазменными двигателями // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та (ЮУрГУ). 2017. Т. 17, № 4. С. 134 – 141.
25. Контрольно-проверочная аппаратура системы преобразования и управления / П. Е. Гавриш [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов / АО «НПЦ «Полюс». Томск, 2018. С. 36 – 37.
26. Контрольно-проверочная аппаратура для испытаний системы преобразования и управления стационарными плазменными двигателями / Д. Л. Дьяченко [и др.] // Тез. докл. XVII науч.-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства». Томск : ФГУП «НПЦ «Полюс», 2006. С. 50 – 51.
27. Модульная система сбора данных LTR. URL: <https://www.lcard.ru/products/ltr/about> (дата обращения: 16.10.2020).
28. Бальзамов А. Ю., Коротков М. В., Клементьев В. Ю. Автоматизированная система технической диагностики электрических параметров цепей оперативного постоянного тока // ОГАРЁВ-ONLINE. Саранск :

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2018.

29. Пугачев Е. В., Кипервассер М. В., Аниканов Д. С. Контроль работоспособности конвейерного транспорта посредством регистрации параметров электропривода // Вестник КузГТУ. 2013. С. 101 – 105.

30. Кипервассер М. В. Методика автоматического распознавания аварийных ситуаций механического оборудования, сопряженного с электрической машиной // Сборник трудов IV Всерос. науч. практ. конф. СибГИУ. Новокузнецк, 2010. С. 245 – 247.

31. Гармс П. Г. Бортовой комплекс регистрации критических параметров локомотива // Омский научный вестник. Омск, 2016. С. 139 – 142.

32. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Новые приборы регистрации параметров устройств железнодорожной автоматики в системе АПК-ДМ (СТДМ) // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1, № 3. С. 282 – 297.

33. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Техническое диагностирование устройств автоматики и телемеханики в метрополитенах // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 3. С. 391 – 412.

34. Лыков А. А., Ефанов Д. В., Власенко С. В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике и экономике. 2012. № 5. С. 67 – 72.

35. Аминев Д. А., Лисицын И. Ю., Увайсов С. У. Система регистрации параметров бортовой спутниковой навигационной системы при испытаниях на виброклиматические воздействия // Надежность и качество: тр. междунар. симп. : в 2 т. Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. Т. 2. С. 377 – 379.

36. Сас А. В., Островский М. А. Регистрация характеристик инверторных источников питания // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 2 (19). С. 29 – 32.

37. Чубов С. В., Гавриш П. Е. Тенденции развития аппаратуры диагностики систем питания и управления стационарными плазменными двигателями //

Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов / АО «НПЦ «Полнос». Томск, 2018. С. 38 – 39.

38. Мелентьев В. С., Муратова В. В., Иванов Ю. М. Метод автоматического контроля параметров радиоэлектронной аппаратуры в процессе производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. С. 822 – 826.

39. Лукин Н. А. Функционально-ориентированные процессоры для бортовых систем управления ракетно-космических комплексов // Ракетно-космическая техника. Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова», 2019. С. 85 – 113.

40. Петров А. В. Развитие цифровых вычислительных машин // Ракетно-космическая техника. Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова», 2019. С. 128 – 133.

41. Барч Д. В. Совершенствование системы обслуживания устройств электроснабжения на основе мониторинга и диагностики // Техника и технологии. 2012. № 3. С. 103 – 110.

42. Шатохин В. А., Порошин А. А. Комплексный подход к контролю устройств электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2017. Вып. 3, № 2. С. 192 – 201.

43. Богданов П. А. Внедрение автоматизированной технологии контроля параметров устройств сигнализации, централизации и блокировки с применением систем технического диагностирования и мониторинга // Бюллетень результатов научных исследований. 2014. № 2 (11). С. 20 – 29.

44. Ефимов В. Г., Карпачев Ю. Н. Нейросетевое устройство контроля бортовых систем беспилотного летательного аппарата // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 185. С. 27 – 32.

45. Дроздов А. Д. Автоматизация энергетических систем. М. : Энергия, 1977. 440 с.

46. Михайлов О. И., Козлов И. М., Гергель Ф. С. Авиационные приборы. М. : Машиностроение, 1977. 416 с.

47. Бортовые средства регистрации полетных данных.  
URL: <https://studfile.net/preview/7368291/page:4/> (дата обращения: 16.10.2020).
48. Шмурьев В. Я. Цифровые реле защиты // Библиотека электротехника. М. : НТФ-Энергопрогресс, 1999. Вып. 1(4). 56 с.
49. Tselishev D. V., Tselisheva V. A., Konstantinov S. Y. Automated RIG for diagnostics and testing of hydraulic equipment // Automation and remote control. 2019. Vol. 80. P. 385 – 391.
50. Aksenova G. P. Localization of multiple faults with group on a discrete device // Automation and remote control. 2017. Vol. 78. P. 2193 – 2202.
51. Agamalov Yu. R. Automation of verification and calibration of digital electric measuring device: New capabilities // Automation and remote control. 2015. Vol. 76. P. 133 – 138.
52. Богданов П. А. Развитие информационных измерительных систем и обработка измерительной информации в телекоммуникационных системах // Технологии информационного общества. 2013. С. 34 – 36.
53. Регистратор параметров электрореактивной двигательной установки / В. Б. Извеков [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XVII науч.-техн. конф. Томск : ФГУП «НПЦ «Полюс», 2006. С. 48 – 49.
54. Асадчий А. В. Устройство диагностирования электрических параметров с оперативным запоминающим устройством // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2017». Томск, 2017. Ч. 2. С. 49 – 52.
55. Асадчий А. В., Солдатов А. И. Моделирование алгоритма формирования диагностических сигналов в преобразовательном устройстве при неисправностях // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». Томск, 2016. Т. 2. С. 8 – 12.
56. Стивенс Р. Алгоритмы. Теория и практическое применение алгоритмов. М. : Эксмо – Москва, 2016. 544 с.



57. Асадчий А. В. Способ повышения надежности формирования диагностических сигналов для устройства контроля тока и напряжения // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов / АО «НПЦ «Полус». Томск, 2018. С. 55 – 57.

58. Электрические измерения : учебник для вузов / под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душева. Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. 392 с.

59. Ревин В. Т., Касперович М. М. Преобразователи измерительной информации : пособие. Минск : БГУИР, 2013. 70 с.

60. Топильский В. Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи. М. : Бинум. Лаборатория знаний, 2012. 496 с.

61. Овчаренко Н. И. Аналоговые и цифровые элементы автоматических устройств энергосистем. М. : Энергоатомиздат, 1989. 320 с.

62. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника. СПб. : БХВ-Петербург, 2007. 782 с.

63. Носов В. И., Шкелев В. Н. Система сбора и обработки данных для спектро радиометра миллиметрового диапазона длин волн // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Радиофизика. 2007 . № 3. С. 71 – 78.

64. Гатчина Ю. Ю., Немолочнов О. Ф. Имитационная модель информационно-измерительной и управляющей системы // Изв. Вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 11. С. 895 – 900.

65. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. М. : «Вильямс», 2004. 992 с.

66. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1988. 448 с.

67. Сиберт У. М. Цепи. Сигналы. Системы : в 2-х ч. М. : Мир, 1988. Ч 2. 360 с.

68. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов. М. : Радио и связь, 1986. 512 с.

69. Волович Г. Аналого-цифровое измерение переменного напряжения и теорема Котельникова // Компоненты и технологии. 2010. № 7. С. 144 – 149.
70. Асадчий А. В. Способ минимизации физического износа EEPROM-памяти для устройств контроля преобразователей напряжения // Тезисы научно-технической конференции «XXIV Макеевские чтения». Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. акад. Н. А. Семихатова», 2017. С. 1 – 2.
71. Асадчий А. В. Способ минимизации физического износа EEPROM-памяти для устройств контроля преобразователей напряжения // Ракетно-космическая техника. Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова», 2019. С. 5 – 10.
72. Прогнозирование времени хранения информации после отключения питания для интегральных микросхем энергонезависимой памяти / В. И. Плебанович [и др.] // Доклады БГУИР. 2012. № 8. С. 10 – 15.
73. Асадчий А. В. Устройство контроля и регистрации электрических параметров // Системы управления и радиоэлектронная аппаратура : материалы VIII Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 10 – 13 апреля 2017 г.) Ч. 3. Сер. XI. Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. академика Н. А. Семихатова», 2017. С. 4 – 8.
74. Русакова Е. А. Системы сбора информации : учебное пособие. Екатеринбург : УрГУПС, 2016. 259 с.
75. Схемотехника электронных систем. Цифровые устройства / В. Бойко [и др.]. СПб. : БХВ-Петербург, 2004. 506 с.
76. Асадчий А. В., Солдатов А. И. Методика определения требований к устройству контроля электрических параметров преобразователя напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 7. С. 18 – 24.
77. Калабеков Б. А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы : учебник для техникумов связи. М. : Горячая линия – Телеком, 2000. 336 с.
78. Пат. 2687302 Российская Федерация, СПК G01R 19/165 (2019.02), G01R 19/257 (2019.02). Способ контроля параметров вторичного источника

бесперебойного питания : № 2018133184: заявл. 18.09.2018 : опубл. 13.05.2019 / Асадчий А. В., Солдатов А. И., Солдатов А. А., Сорокин П. В., Шульгина Ю. В., Костина М. А., Чубов С. В.

79. Герасимов В. М., Скворцов В. А. Электронные цепи и микросхемотехника : учеб. пособие : в 2-х ч. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2004. Ч. 2. Схемотехника ключевых устройств формирования и преобразования сигналов. С. 15 – 20.

80. Асадчий А. В., Солдатов А. И. Способ минимизации объема сохраняемых данных для устройства контроля напряжения // Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. тр. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2021. С. 156 – 161.

81. Гальперин М. В. Введение в схемотехнику М. : Энергоатомиздат, 1982. 120 с.

82. Гальперин М. В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. М. : Энергоатомиздат, 1987. 320 с.

83. Тиличенко М. П. Генератор линейно-изменяющегося напряжения – преобразователь напряжения в частоту импульсов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2012. № 3.

84. Xing X., Zhu P., Gielen G. Design of power-efficient highly digital analog-to-digital converters for next generation wireless communication systems. Springer, 2018. 181 p.

85. Luong H. C., Yin J. Transformer-based design techniques for oscillators and frequency dividers. Springer, 2016. 205 p.

86. Макаренко В. Моделирование радиоэлектронных устройств с помощью программы NI MULTISIM // ЭКиС. Киев : VD MAIS, 2008. № 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9.

87. Хернитер М. Е. Multisim 7. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / пер. с англ. А. И. Осипова. М. : ДМК-Пресс, 2006. 488 с.

88. Шахтарин Б. И., Вельтищев В. В., Асланов Т. Г. Имитационное моделирование систем фазовой автоподстройки // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 198. С. 136 – 140.
89. Мишагин К. Г. Исследование динамики системы фазовой автоподстройки частоты с помощью среды схемотехнического моделирования ADS: Практикум. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. 19 с.
90. Дерябин В. Преобразователи напряжение-частота // Компоненты и технологии. 2000. № 7. С. 38 – 41.
91. Оптимизация частоты дискретизации диагностической информации при диагностике технических объектов / А. В. Асадчий [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 11. С. 42 – 50.
92. Пат. 2689323 Российская Федерация, СПК G01R 19/165 (2019.02), G01R 19/257 (2019.02). Устройство для контроля параметров вторичного источника бесперебойного питания : № 2018133185 : заявл. 18.09.2018 : опубл. 27.05.2019 / Асадчий А. В., Солдатов А. И., Солдатов А. А., Сорокин П. В., Шульгина Ю. В., Костина М. А., Чубов С. В.
93. Пат. 2682802 Российская Федерация, МПК G05B 23/02, G05B 21/02, G05R 19/255. Контрольное устройство : № 2017137456: заявл. 25.10.2017 : опубл. 21.03.2019 / Асадчий А. В., Солдатов А. И., Солдатов А. А., Сорокин П. В.
94. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства / В. И. Бойко [и др.]. СПб. : БХВ-Петербург, 2004. 496 с.
95. Медведев Б. Л., Пирогов Л. Г. Практическое пособие по цифровой схемотехнике. М. : Мир, 2004. 408 с.
96. Першин В. Т. Основы радиоэлектроники и схемотехники. Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. 544 с.
97. Топильский В. Б. Схемотехника измерительных устройств. М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2006. 232 с.
98. Бабич Н. П., Жуков И. А. Основы цифровой схемотехники. М. : Додэка XXI ; МК-Пресс, 2007. 480 с.

99. Горбачев Г. Н. Промышленная электроника : учеб. для вузов. М. : Энергоатомиздат, 1988. 320 с.
100. Шило В. Л. Популярныe микросхемы КМОП. Справочник. М. : Издательство «Ягуар», 1993. 64 с.
101. Микросхема 564ГГ1 : технические условия. АЕЯР.431200.610 ТУ.
102. Зельдин Е. А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. 280 с.
103. Микросхемы и их применение : справ. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1989. 240 с.
104. Дедюхин А. Цифровые осциллографы LeCroy серии WaveSurfer с полосой пропускания 200 – 500 МГц // Компоненты и технологии. 2004. № 4. С. 226 – 231.
105. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника : учеб. пособие для вузов. М. : Высш. школа, 1982. С. 336 – 341.
106. Dobkin В., Williams J. Analog circuit design. A tutorial guide to applications and solutions. Elsevier Inc. 2011. 960 p.
107. Оценка ресурсов ОЗУ при контроле технических объектов / А. В. Асадчий [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 52. С. 104 – 113.
108. Optimization of frequency discretization for diagnostic information at diagnostics of technical objects / A. V. Asadchiy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Ser. 1499.
109. Микросхемы интегральные 1636PP51У, 1636PP52У : технические условия. АЕНВ.431210.158 ТУ.
110. Микросхемы интегральные 1636PP3У, 1636PP4У : технические условия. АЕНВ.431210.157 ТУ.

## Приложение А. Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2682802

**КОНТРОЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Авторы: *Асадчий Артём Владимирович (RU), Солдатов Алексей Иванович (RU), Солдатов Андрей Алексеевич (RU), Сорокин Павел Владимирович (RU)*

Заявка № 2017137456

Приоритет изобретения 25 октября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 марта 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 25 октября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2687302

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНОГО  
ИСТОЧНИКА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Авторы: *Солдатов Алексей Иванович (RU), Солдатов Андрей Алексеевич (RU), Асадчий Артем Владимирович (RU), Шульгина Юлия Викторовна (RU), Костина Мария Алексеевна (RU), Сорокин Павел Владимирович (RU), Чубов Сергей Вячеславович (RU)*

Заявка № 2018133184

Приоритет изобретения 18 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 13 мая 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 18 сентября 2038 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2689323

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ  
ВТОРИЧНОГО ИСТОЧНИКА БЕСПЕРЕБОЙНОГО  
ПИТАНИЯ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Авторы: *Солдатов Алексей Иванович (RU), Солдатов Андрей Алексеевич (RU), Асадчий Артем Владимирович (RU), Шульгина Юлия Викторовна (RU), Костина Мария Алексеевна (RU), Сорокин Павел Владимирович (RU), Чубов Сергей Вячеславович (RU)*

Заявка № 2018133185

Приоритет изобретения 18 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 27 мая 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 18 сентября 2038 г.

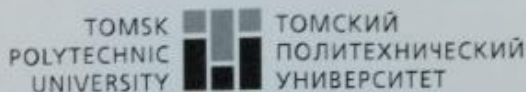


Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ислюев



## Приложение Б. Акты внедрения



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКРО (National Classification of Enterprises and Organizations):  
02069303,  
Company Number 027000890168,  
VAT/KPP (Code of Reason for Registration):  
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел. +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКРО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИИИМКБ НИ ТПУ,  
ИИИМКБ Д.А. Седнев  
2020 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Асадчего Артема Владимировича

Комиссия в составе:

председатель: исполняющий обязанности заведующего кафедрой – руководитель отделения электронной инженерии, к.т.н., Баранов П.Ф., члены комиссии: доцент отделения электронной инженерии, Сорокин П.В., доцент отделения электронной инженерии, к.т.н. Костина М.А.. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Асадчего А.В. «УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ОБЪЕМА СОХРАНЯЕМЫХ ДАННЫХ», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, используются в учебном процессе отделения электронной инженерии инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности национального исследовательского Томского политехнического университета в методических материалах дисциплин: «Микропроцессорные системы управления и контроля» и «Технические средства автоматизации и управления», а также при подготовке магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами ТПУ.

Председатель комиссии

П.Ф.Баранов

Члены комиссии

П.В.Сорокин

М.А.Костина



Государственная корпорация по космической деятельности  
«РОСКОСМОС»

Акционерное общество

«Научно-производственный центр «Полюс»  
(АО «НПЦ «Полюс»)

Кирова пр., 56 «в», г. Томск, Российская Федерация, 634050  
тел: (382-2) 55-46-94, факс: (382-2) 55-77-66.  
E-mail: info@polus-tomsk.ru, http://POLUS.TOMSKNET.RU  
ОГРН 1077017004063, ИНН 7017171342



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по научной работе,  
главный конструктор, к. т. н.  
*И. В. Балус* И. В. Балус  
« 01 » 03 2021



Акт

**об использовании результатов диссертационной работы Асадчего  
Артёма Владимировича.**

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы Асадчего Артёма Владимировича «Устройство контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных» на соискание ученой степени кандидата технических наук, полученные на предприятии АО «НПЦ «Полюс», а именно:

- имитационная модель устройства контроля электрических параметров;
- способ контроля электрических параметров, позволяющий минимизировать объем сохраняемых данных;

планируется использовать в рамках ОКР «Сияние», выполняемой по техническому заданию АО «ГРЦ Макеева».

Разработанная имитационная модель устройства контроля, позволяет определить степень уменьшения объема данных, величину их искажений при восстановлении в зависимости от постоянной времени дифференцирования, диапазона рабочих частот генератора, управляемого напряжением, и верхней граничной частоты спектра сигнала.

Предложенный способ и устройство дают возможность уменьшить объем сохраняемых данных, минимизировать физический износ элементов памяти, улучшить массогабаритные характеристики и увеличить надежность изделия.

Главный конструктор АО «НПЦ «Полюс» по автономной энергетике и преобразовательной технике – начальник отделения, к. т. н.

К. Г. Гордеев

Начальник отдела статических преобразователей

В. С. Гладышев





**TUSUR** | TUSUR UNIVERSITY  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники



Международная  
научно-практическая  
конференция  
**«ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА  
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»**

## Диплом III степени

награждается

*Асадчий А.В.*

*инженер конструктор  
АО «НПЦ „Полюс“»*

за лучший доклад на  
Международной научно-практической  
конференции «Электронные средства  
и системы управления»

секция 8 «Интеллектуальная силовая электроника и  
преобразовательная техника»

**Председатель конференции**

Ректор ТУСУРа



А.А. Шелупанов

29 ноября – 1 декабря 2017 г.

г. Томск

Приложение Г. Схемы функциональных узлов имитационной модели  
устройства контроля

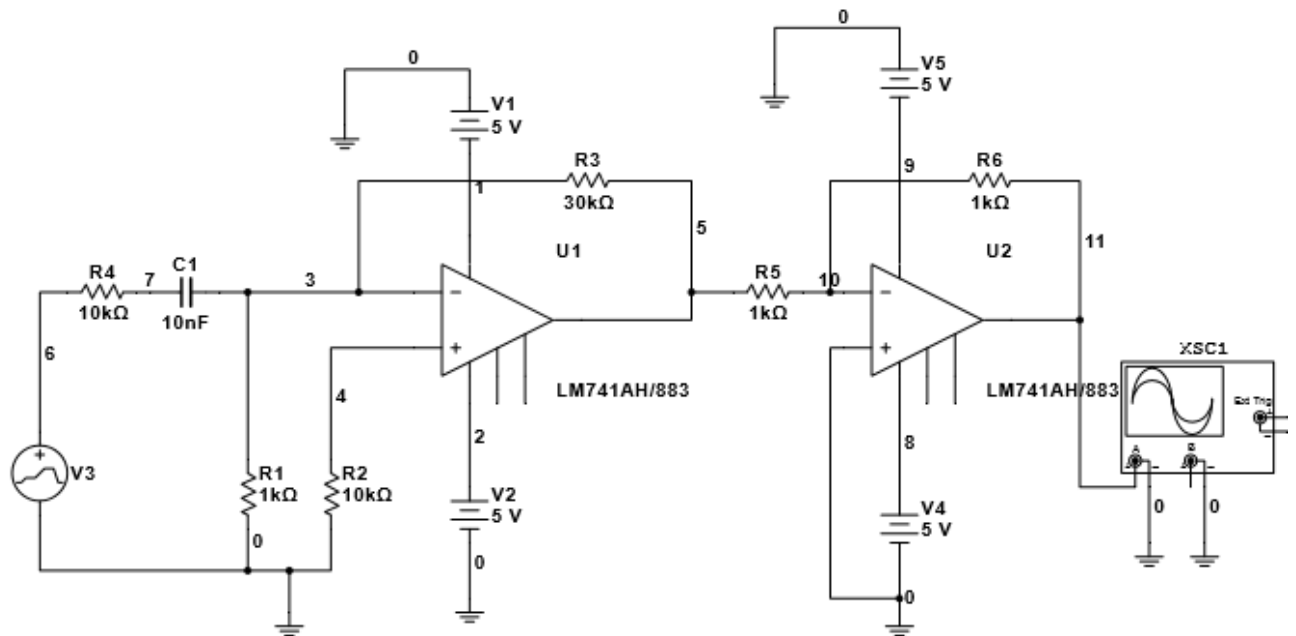


Рисунок Г.1 – Дифференцирующее устройство

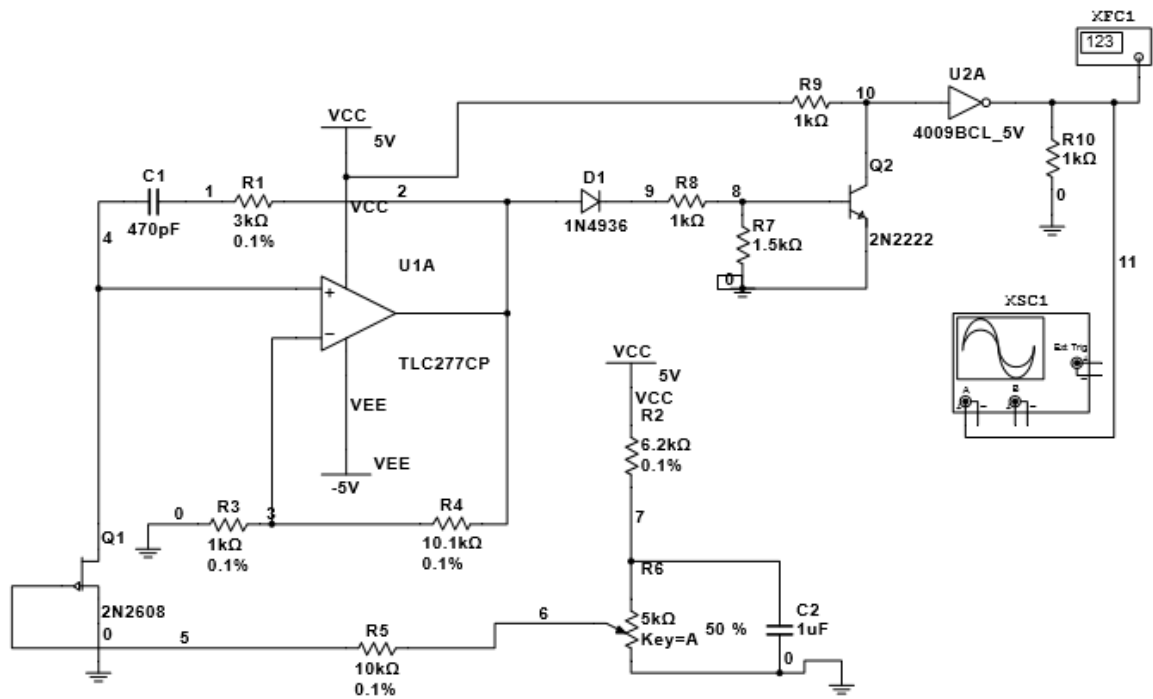


Рисунок Г.2 – Генератор, управляемый напряжением

**Приложение Д. Исходный код программы для реализации генератора, управляемого напряжением, на микроконтроллере**

```

#include "lpc21xx.h"
int ADC;
int freq=1200;
void delay (unsigned int x) // Подпрограмма задержки
{
    T0MR0=(x+0x18);
    T0MCR=0x1;
    T0PR=0x003A98; // 3A98 – задержка в 1 ms
    T0TCR=0x1;
    while (T0TC<T0MR0);
    T0TC=0x0;
}
int ADCReadValue (void) // Подпрограмма обработки результатов преобразования АЦП
{
    int ADCValue;
    while (((ADCValue = ADDR) & 0x80000000) == 0);
    return (ADCValue >> 6) & (0x3FF);
}
int main (void)
{
    IODIR1 = 0x01 << 16; // Настройка 1 пина 1 порта на вывод информации
    PINSEL1 |= (1 << 24); // Настройка альтернативной функции пина для АЦП
    ADCR = (1 << 1) | // Выбор канала АЦП ADC0.1
            (4 << 8) | // Настройка предделителя
            (1 << 16) | // Настройка единичного преобразования
            (0 << 17) | // Настройка разрядности преобразования –
10 бит
            (1 << 21) | // Разрешение преобразования
            (1 << 24); // Запуск преобразования
    while (1)
    {
        ADC=ADCReadValue(); // Установка в переменную значения АЦП
        IOSET1=0x01<<16; // Установка высокого уровня в P1.1
        delay(10); // Задержка
        IOCLR1=0x01<<16; // Установка низкого уровня в P1.1
        delay(freq-ADC); // Задержка, задающая частоту
    }
}

```

**Приложение Е. Исходный код программы для реализации  
генератора, управляемого напряжением, на программируемой  
логической интегральной схеме**

```
LIBRARY ieee;

USE ieee.std_logic_1164.ALL;

USE ieee.numeric_std.ALL;

USE ieee.math_real.ALL;

ENTITY CORDIC_v0_1 IS

    GENERIC

    (

        Width_In_data          : natural := 18;

        -- определяет разрядность входных данных

        Type_angle              : string := "normalize_angle";--"radian";--
"normalize_angle";

        Type_operation          : string := "Rotation" --"Phase"--"Phase"
"Rotation", "Hybrid" );

    PORT

    (

        clk                    : IN std_logic;

        reset                  : IN std_logic;
```

```
in_operation          : IN std_logic;
```

```
-- используется, если стоит Type_operation="Hybrid", тогда 1 - "Phase", 0 -
"Rotation"
```

```
in_data_Re           : IN signed (Width_In_data-1 downto 0);
```

```
in_data_Im           : IN signed (Width_In_data-1 downto 0);
```

```
in_angle             : IN signed (Width_In_data+1 downto 0);
```

```
out_data_Re          : OUT signed (Width_In_data+1 downto
0);
```

```
out_data_Im          : OUT signed (Width_In_data+1 downto
0);
```

```
out_angle            : OUT signed (Width_In_data+1 downto 0)
```

```
);
```

```
END CORDIC_v0_1;
```

```
ARCHITECTURE behavior_CORDIC_v0_1 OF CORDIC_v0_1 IS
```

```
signal angle_PI      : signed ((Width_In_data+1) downto 0);
```

```
signal angle_PI_over_2 : signed ((Width_In_data+1) downto 0);
```

```
subtype word_constant_angle is signed((Width_In_data+1) downto 0);
```



```
type constant_angle is array(Width_In_data-1 downto 0) of word_constant_angle;
```

```
signal angle : constant_angle;
```

```
signal latch_Re_first : signed (Width_In_data-1 downto 0);
```

```
signal latch_Im_first : signed (Width_In_data-1 downto 0);
```

```
signal latch_angle_first: signed (Width_In_data+1 downto 0);
```

```
signal signal_stage_Re : constant_angle;
```

```
signal signal_stage_Im : constant_angle;
```

```
signal signal_stage_angle : constant_angle;
```

```
BEGIN
```

```
    process(clk)
```

```
    begin
```

```
        for change in 0 to Width_In_data-1 loop
```

```
            if Type_angle = "radian" then
```

```
                angle(change) <= to_signed (integer ( ARCTAN(2**(-
real(change)))*real(2**(Width_In_data-1)) ) , Width_In_data+2);
```

```
                angle_PI <= to_signed (integer
(MATH_PI*real(2**(Width_In_data-1))), Width_In_data+2);
```

```

        angle_PI_over_2 <= to_signed (integer
(MATH_PI*real(2**(Width_In_data-2))), Width_In_data+2);

        elsif Type_angle = "normalize_angle" then

            angle (change) <= to_signed (integer ( ARCTAN(2**(-
real(change)))/ARCTAN(2**(-real(0)))*real(2**(Width_In_data-1)) ) ,
Width_In_data+2);

angle_PI <= to_signed (integer (MATH_PI*real(2**(Width_In_data-
1))/ ARCTAN(2**(-real(0)))), Width_In_data+2);

angle_PI_over_2 <= to_signed (integer (MATH_PI*real(2**(Width_In_data-2))/
ARCTAN(2**(-real(0)))), Width_In_data+2);

        elsif Type_angle = "relative_rotation" then

            angle (change) <= to_signed (2**(Width_In_data-change-1),
Width_In_data+2);

            angle_PI <= to_signed (2**(Width_In_data) ,
Width_In_data+2);

--            angle_PI_over_2 <= to_signed (integer
(MATH_PI*real(2**(Width_In_data-2))/ ARCTAN(2**(-real(0)))),
Width_In_data+2);

        else

            null;

        end if;

    end loop;

    if clk'EVENT and clk = '1' then

        if reset = '1' then

```

```

latch_Re_first <= to_signed (0, Width_In_data);

latch_Im_first <= to_signed (0, Width_In_data);

latch_angle_first <= to_signed (0, Width_In_data+2);

for change in 0 to Width_In_data-1 loop

    signal_stage_Re(change) <= to_signed (0,
Width_In_data+2);

    signal_stage_Im(change) <= to_signed (0,
Width_In_data+2);

    signal_stage_angle(change) <= to_signed (0,
Width_In_data+2);

end loop;

else

if Type_operation = "Phase" then

-----

--- "Phase"

-----

    if in_data_Re(Width_In_data-1) = '1' then

        latch_Re_first  <= - in_data_Re;

        latch_Im_first  <= - in_data_Im;

        if Type_angle    = "relative_rotation" then

            latch_angle_first <= angle_PI;

        else

```

156

```
if in_data_Im >= to_signed (0,
Width_In_data) then

    latch_angle_first <= angle_PI;

else

    latch_angle_first <= - angle_PI;

end if;

end if;

else

    latch_Re_first <= in_data_Re;

    latch_Im_first <= in_data_Im;

    latch_angle_first <= to_signed (0 ,
Width_In_data+2);

end if;

for change in 0 to Width_In_data-1 loop

    if change = 0 then

        if latch_Im_first >= to_signed (0,
Width_In_data) then

            signal_stage_Re(change) <= resize (latch_Re_first, Width_In_data+2) + resize
(latch_Im_first, Width_In_data+2);

            signal_stage_Im(change) <= resize (latch_Im_first, Width_In_data+2) - resize
(latch_Re_first, Width_In_data+2);

            if Type_angle = "relative_rotation" then
```

```

signal_stage_angle(change) <= latch_angle_first;

                                else

signal_stage_angle(change) <= latch_angle_first + angle (change);

                                end if;

                                else

signal_stage_Re(change) <= resize (latch_Re_first, Width_In_data+2) - resize
(latch_Im_first, Width_In_data+2);

signal_stage_Im(change) <= resize (latch_Im_first, Width_In_data+2) + resize
(latch_Re_first, Width_In_data+2);

if Type_angle = "relative_rotation" then

signal_stage_angle(change) <= latch_angle_first + angle (change);

                                else

signal_stage_angle(change) <= latch_angle_first - angle (change);

                                end if;

                                end if;

                                else

if signal_stage_Im(change-1) >= to_signed (0, Width_In_data) then

                                signal_stage_Re(change) <=
signal_stage_Re(change-1) + shift_right (signal_stage_Im(change-1), change);

                                signal_stage_Im(change) <=
signal_stage_Im(change-1) - shift_right (signal_stage_Re(change-1), change);

```

```

if Type_angle = "relative_rotation" then

signal_stage_angle(change) <= signal_stage_angle(change-1);

                                else

signal_stage_angle(change) <= signal_stage_angle(change-1) + angle (change);

                                end if;

                                else

signal_stage_Re(change) <= signal_stage_Re(change-1) - shift_right
(signal_stage_Im(change-1), change);

signal_stage_Im(change) <= signal_stage_Im(change-1) + shift_right
(signal_stage_Re(change-1), change);

                                if Type_angle      =
"relative_rotation" then

signal_stage_angle(change) <= signal_stage_angle(change-1) + angle (change);

                                else

signal_stage_angle(change) <= signal_stage_angle(change-1) - angle (change);

                                end if;

                                end if;

                                end if;

                                end loop;

elseif Type_operation      = "Rotation" then

```

```
-----  
--- "Rotation"  
-----
```

```
if Type_angle = "relative_rotation" then  
    latch_angle_first <= in_angle;  
    if in_angle (Width_In_data) = '1' then  
        latch_Re_first <= - in_data_Re;  
        latch_Im_first <= - in_data_Im;  
    else  
        latch_Re_first <= in_data_Re;  
        latch_Im_first <= in_data_Im;  
    end if;  
else  
    if in_angle > angle_PI_over_2 then  
        latch_angle_first <= in_angle - angle_PI;  
        latch_Re_first <= - in_data_Re;  
        latch_Im_first <= - in_data_Im;  
    elsif in_angle < - angle_PI_over_2 then  
        latch_angle_first <= in_angle + angle_PI;  
        latch_Re_first <= - in_data_Re;  
        latch_Im_first <= - in_data_Im;
```

```

else

    latch_angle_first <= in_angle;

    latch_Re_first  <= in_data_Re;

    latch_Im_first  <= in_data_Im;

end if;

end if;

for change in 0 to Width_In_data-1 loop

    if Type_angle    = "relative_rotation" then

        if change = 0 then

            if latch_angle_first(Width_In_data-change-1) = '0' then

                signal_stage_Re(change) <= resize (latch_Re_first, Width_In_data+2) - resize
                (latch_Im_first, Width_In_data+2);

                signal_stage_Im(change) <= resize (latch_Im_first, Width_In_data+2) + resize
                (latch_Re_first, Width_In_data+2);

            else

                signal_stage_Re(change) <= resize (latch_Re_first, Width_In_data+2) + resize
                (latch_Im_first, Width_In_data+2);

                signal_stage_Im(change) <= resize (latch_Im_first, Width_In_data+2) - resize
                (latch_Re_first, Width_In_data+2);

            end if;

        end if;

    end if;

end loop;

```



```
signal_stage_angle(change) <= latch_angle_first;
```

```
    else
```

```
    if signal_stage_angle(change)(Width_In_data-change-1) = '0' then
```

```
        signal_stage_Re(change) <= signal_stage_Re(change-1) - shift_right
```

```
        (signal_stage_Im(change-1), change);
```

```
        signal_stage_Im(change) <= signal_stage_Im(change-1) + shift_right
```

```
        (signal_stage_Re(change-1), change);
```

```
    else
```

```
        signal_stage_Re(change) <= signal_stage_Re(change-1) + shift_right
```

```
        (signal_stage_Im(change-1), change);
```

```
        signal_stage_Im(change) <= signal_stage_Im(change-1) - shift_right
```

```
        (signal_stage_Re(change-1), change);
```

```
    end if;
```

```
    signal_stage_angle(change) <= signal_stage_angle(change-1);
```

```
    end if;
```

```
else
```

if change = 0 then

if latch\_angle\_first >= to\_signed (0, Width\_In\_data+2) then

signal\_stage\_Re(change) <= resize (latch\_Re\_first, Width\_In\_data+2) - resize  
(latch\_Im\_first, Width\_In\_data+2);

signal\_stage\_Im(change) <= resize (latch\_Im\_first, Width\_In\_data+2) + resize  
(latch\_Re\_first, Width\_In\_data+2);

signal\_stage\_angle(change) <= latch\_angle\_first - angle (change);

else

signal\_stage\_Re(change) <= resize (latch\_Re\_first, Width\_In\_data+2) + resize  
(latch\_Im\_first, Width\_In\_data+2);

signal\_stage\_Im(change) <= resize (latch\_Im\_first, Width\_In\_data+2) - resize  
(latch\_Re\_first, Width\_In\_data+2);

signal\_stage\_angle(change) <= latch\_angle\_first + angle (change);

end if;

else

if signal\_stage\_angle(change-1) >= to\_signed (0, Width\_In\_data+2) then

```
signal_stage_Re(change) <= signal_stage_Re(change-1) - shift_right
(signal_stage_Im(change-1), change);

signal_stage_Im(change) <= signal_stage_Im(change-1) + shift_right
(signal_stage_Re(change-1), change);

signal_stage_angle(change) <= signal_stage_angle(change-1) - angle (change);
else

signal_stage_Re(change) <= signal_stage_Re(change-1) + shift_right
(signal_stage_Im(change-1), change);

signal_stage_Im(change) <= signal_stage_Im(change-1) - shift_right
(signal_stage_Re(change-1), change);

signal_stage_angle(change) <= signal_stage_angle(change-1) + angle (change);

end if;

end if;

end if;

end loop;

end if;

end if;

end if;

end process;
```

```
out_data_Re<= signal_stage_Re (Width_In_data-1);  
out_data_Im <= signal_stage_Im (Width_In_data-1);  
out_angle  <= signal_stage_angle(Width_In_data-1);
```

```
END behavior_CORDIC_v0_1;
```