

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и в акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полюс».

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор,
Солдатов Алексей Иванович.

Официальные оппоненты:

Якунин Алексей Григорьевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой информатики, вычислительной техники и информационной безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова»;

Майстренко Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Ведущая организация –

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Защита состоится «02» декабря 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/bnt3mo15>.

Автореферат разослан «___» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Костюченко Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В современных системах управления и телеметрии широкое распространение получили различные устройства контроля технических объектов, а именно устройства контроля электрических параметров радиоэлектронной аппаратуры, в том числе преобразователи напряжения. Принцип работы данных устройств заключается в слежении за электрическими параметрами и записи информации о них в течение всего цикла эксплуатации. Кроме того, они выполняют функцию «черного ящика» для фиксации параметров на момент аварии. По сохраненным параметрам можно провести анализ аварийной ситуации и определить вероятную причину ее возникновения. При этом данные устройства формируют диагностическую информацию. 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. Ими были предложены новые способы контроля объектов, основанные на алгоритмах оценки общих вероятностных критериев состояний технических объектов, тестовых диагностических команд, передающихся по бортовым вычислительным сетям.

Для построения подобных устройств контроля применяются элементы памяти, которые широко распространены в технике, доступны и имеют невысокую стоимость. Также память допускает многократную перезапись информации. Однако при этом возрастает физический износ элемента памяти, что может привести к его отказу и потере данных.

Минимизация износа памяти и исключение потерь данных может достигаться за счет применения различных алгоритмов сжатия данных и их архивации. 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. На данный момент способы сжатия широко используются для передачи данных в высокоскоростных информационных сетях, телевизионных и информационно-измерительных системах. Также применяются аппаратные способы минимизации износа памяти.

Однако применение подобных способов для большого числа контролируемых параметров может вызывать сложности в программных реализациях, увеличение количества цифровых ресурсов устройства, снижение надежности и ухудшение технико-экономических показателей.

В настоящем исследовании предложены новая структура устройства контроля и способ сжатия данных. Они могут быть представлены как альтернативное устройство с минимальным использованием цифровых ресурсов и относительно гибким алгоритмом работы при контроле достаточно большого количества параметров. Предложенные способ и устройство позволяют уменьшить объем сохраняемых данных, минимизировать физический износ элементов памяти, улучшить массогабаритные характеристики и увеличить надежность изделия.

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.

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

Для реализации поставленной цели определены следующие **задачи исследования:**

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 основываются на положениях теории электрических цепей, аналоговой и цифровой схемотехнике, теории рядов Фурье, алгебраических уравнениях, вычислительных методах и использовании современных систем имитационного, а также математического моделирования. Проверка адекватности полученной модели и ее работоспособности осуществлялась с помощью экспериментального исследования на физических моделях и макетных образцах.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, компьютерным моделированием и хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

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 и устройства 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 г. при непосредственном участии автора было получено 3 патента РФ: № 2682802, 2687302, 2689323.

Созданные технические решения для минимизации объема сохраняемых данных используются в научно-исследовательской работе АО «НПЦ «Полус» и в учебном процессе подготовки магистрантов и аспирантов национального исследовательского Томского политехнического университета.

Осуществлена отработка макетного образца устройства контроля технических объектов, сняты электрические параметры, получены характеристики. Даны технические рекомендации при проектировании подобных устройств.

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:

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны практическая ценность работы и научная новизна.

В первой главе описаны основные типы информационно-измерительных систем, показаны структурные схемы и принципы работы устройств контроля. Представлены актуальные способы минимизации объема сохраняемых данных при контроле электрических параметров.

На сегодняшний день имеется большое количество типов измерительных систем, отличающихся друг от друга принципами построения и алгоритмами работы.

По принципу построения различают последовательные, параллельные и смешанные системы.

По алгоритму работы и контролю выделяют следующие системы:

- с заданным алгоритмом контроля. Устройства предназначены для исследования технических объектов, работающих в штатном неизменном режиме;

- адаптивные (алгоритм работы адаптируется под изменения контролируемых данных технического объекта);

- программируемые (последовательность шагов работы меняется по заданной программе, подготовленной под конкретный тип технического объекта и принцип его работы).

Практически любая измерительная система имеет в своем составе устройство памяти, которое отвечает за хранение контролируемой информации, полученной от объекта контроля. При этом для хранения большого объема данных и минимизации физического износа памяти используют следующие способы:

- снижение частоты циклов записи информации. Способ является классическим и довольно простым. Однако вследствие отсутствия синхронизации процесса записи с моментом возникновения аварии или переходного процесса он может не подходить для широкого круга устройств. Этот недостаток влечет за собой логическую возможность потери информации из-за рассинхронизации по времени;

- прерывание при снижении уровня питания. В современных микроконтроллерах (МК) данный способ используют для записи последнего значения параметра в память, в то время как система контроля отключается при потере питания.

Способ заключается в хранении интересующей информации в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) и записи ее в память только при выключении питания. При этом необходим дополнительный источник питания, который будет поддерживать некоторое время напряжение, достаточное для программирования памяти.

Достоинство данного способа – минимальное использование ячеек памяти, так как информация записывается только на момент аварии.

Недостатками являются отсутствие записи при возникновении переходных процессов до момента аварии, а также необходимость применения дополнительных мер для поддержания питания устройств памяти и вычислительных элементов, которые осуществляют запись необходимой информации;

– применение кольцевого буфера FIFO, содержащего N последних записей значения контролируемого параметра. Это уменьшает износ памяти пропорционально числу копий в данном буфере. Например, если через буфер проходит 10 различных адресов для сохранения одного значения, каждая ячейка модифицируется в 10 раз реже и ресурс записи возрастает в 10 раз. Другими словами, понадобится два буфера: первый для хранения значения контролируемого параметра, второй – для счетчика. Если сохранять счетчик по одному и тому же адресу, это приведет его к износу.

Недостатком данного способа является то, что необходимо иметь в 10 раз больше объема памяти, чтобы увеличить ресурс ее работы в 10 раз. Подобное наращивание физических элементов памяти приводит к снижению надежности и увеличению массогабаритных показателей.

Рассмотрим алгоритмические способы минимизации сохраняемой информации с помощью процедуры ее сжатия.

Существует два способа сжатия информации:

– сжатие с потерями. Используется в системах передачи видео, аудио и изображений, где восстановление данных может быть воспроизведено с незначительными искажениями. Эти искажения не заметны для человеческого восприятия;

– сжатие без потерь. Дает возможность восстановления информации без искажений и отклонений от начального вида.

Достоинства алгоритмического способа заключаются в его удобстве и в широком выборе технических средств для задач, связанных с обработкой данных.

К недостаткам можно отнести то, что сжатие с потерями не позволяет качественно сохранить кратковременные высокочастотные изменения сигнала при его длительном контроле.

Обработать высокочастотные изменения позволяет сжатие без потерь, но при этом объем сохраняемых данных будет больше, чем у сжатия с потерями.

Во второй главе продемонстрирована математическая модель контролируемого сигнала, которая позволяет проводить анализ с применением теории рядов Фурье и восстанавливать сигнал с различной точностью. Представлена оценка затрачиваемого объема памяти при непрерывном контроле параметров. Показаны способ контроля и имитационная модель устройства, обеспечивающего минимизацию объема сохраняемых данных. Приведена оценка затрачиваемого объема памяти при контроле с использованием вычисления производной.

Для полноты исследования представим переходный процесс выходного напряжения в виде аппроксимированной функции $S(t)$. Данную функцию (рис. 1) можно аппроксимировать, разделив на несколько интервалов.

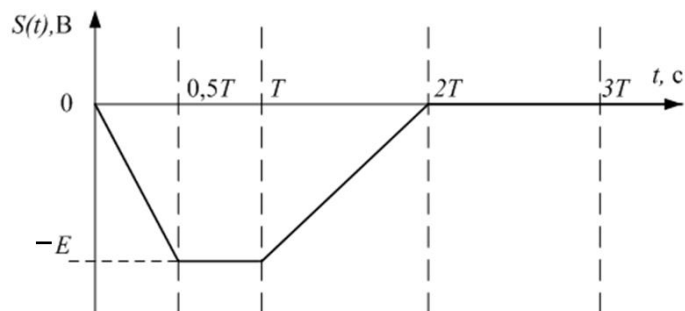


Рисунок 1 – Переходный процесс в виде функции $S(t)$

Аналитическое поинтервальное описание функции $S(t)$ выглядит следующим образом:

$$S(t) = \begin{cases} -\frac{2Et}{T} & \text{при } t \in (0; 0,5T); \\ -E & \text{при } t \in (0,5T; T); \\ \frac{Et}{T} - 2E & \text{при } t \in (T; 2T); \\ 0 & \text{при } t \in (2T; 3T), \end{cases} \quad (1)$$

где E – амплитуда сигнала; T – длительность аппроксимированного интервала.

Для составления математической модели переходного процесса опишем имеющуюся функцию $S(t)$ с помощью простейших функций (рис. 2):

– единичной ступенчатой функции:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \in (-\infty; 0); \\ 1 & \text{при } t \in (0; +\infty); \end{cases} \quad (2)$$

– линейной функции, проходящей через начало координат:

$$y(t) = \frac{Et}{T}, \quad (3)$$

где t – время.

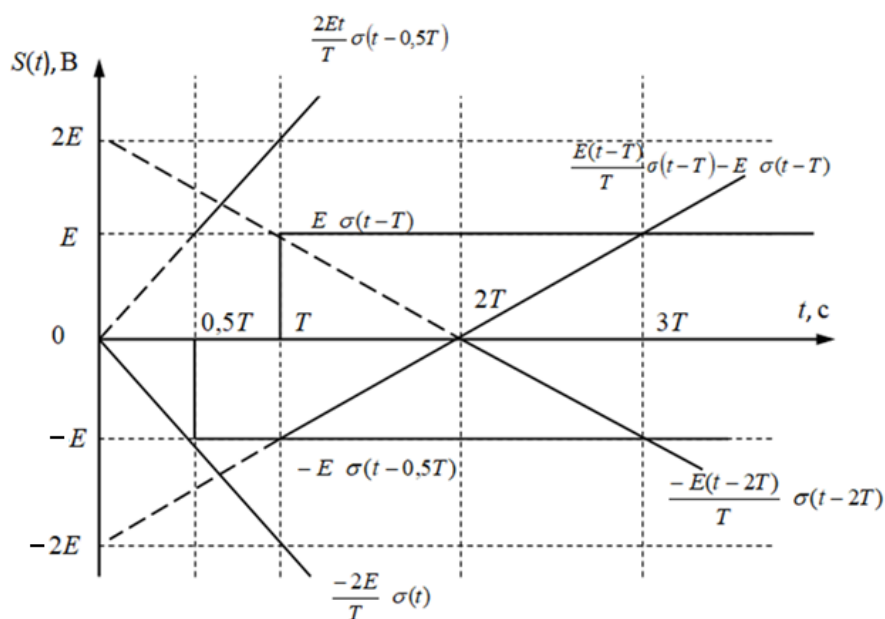


Рисунок 2 – Представление функции $S(t)$ суммой простейших функций

При алгебраической сумме представленных функций получаем исходную аппроксимированную функцию (см. рис. 1).

Таким образом, математическая модель переходного процесса примет следующий вид:

$$S(t) = \frac{-2Et}{T} \sigma(t) + \frac{2Et}{T} \sigma(t-0,5T) - E \sigma(t-0,5T) + E \sigma(t-T) + \left(\frac{E(t-T)}{T} \sigma(t-T) - E \sigma(t-T) \right) - \frac{E(t-2T)}{T} \sigma(t-2T). \quad (4)$$

Получив математическую модель функции $S(t)$, перейдем к ее дальнейшему исследованию. Определим частоту дискретизации для данной функции. Согласно теореме Котельникова частоту дискретизации ω_d выбирают так, чтобы $\omega_d = 2\omega_b$, где ω_b – верхняя граничная частота. Верхнюю граничную частоту ω_b определяют исходя из построения функции спектральной плотности по пороговому критерию. Выражение для спектральной плотности функции (рис. 3) имеет вид

$$\dot{S}(\omega) = \int_0^{T_c} S(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (5)$$

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

Для определения верхней граничной частоты спектра сигнала воспользуемся пороговым критерием: на частотах выше ω_b модуль спектральной плотности не должен превышать уровня 0,1 от максимального значения.

Построим график модуля спектральной плотности (см. рис. 3) контролируемого сигнала, предварительно подставив значения параметров E и T_c в формулу (5).

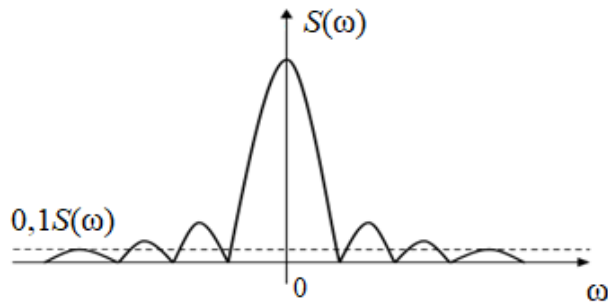


Рисунок 3 – График модуля спектральной плотности контролируемого параметра

Графически определив ω_b (см. рис. 3), получим частоту дискретизации. Период дискретизации сигнала будет равен

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d}. \quad (6)$$

Функция может быть приближенно описана конечным числом выборочных значений, которое является количеством степеней свободы сигнала.

Количество отсчетов (степеней свободы) определяется из выражения

$$N = \frac{T_c}{T_d} = \frac{3T}{T_d}. \quad (7)$$

Тогда дискретизированная функция $S(nT_d)$ будет представлена набором отсчетов (рис. 4).

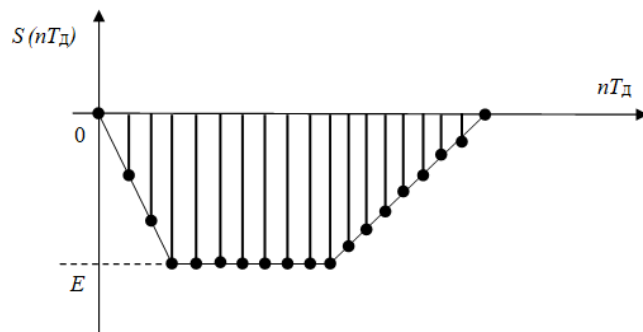


Рисунок 4 – Дискретизированная функция

С помощью прямого дискретного преобразования Фурье установим связь между временными отсчетами функции и отсчетами спектральной плотности сигнала через коэффициенты преобразования:

$$\dot{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(nT_d) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, \quad (8)$$

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

Используя частотные отсчеты, которые являются результатом расчета коэффициентов дискретного преобразования Фурье, можно восстановить исходную аналоговую функцию, применяя ряд Фурье:

$$s_{\text{вос}}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{C}_k e^{jnk \frac{2\pi}{N}}. \quad (9)$$

Качество восстановления контролируемого сигнала будет зависеть от количества суммируемых отсчетов N .

Восстановление исходной функции с различным числом суммируемых гармоник (рис. 5) осуществляется по следующей формуле:

$$s_{\text{вос}}(t) = C_0 + \left(\sum_{k=1}^{\frac{N-1}{2}} 2|C_k| \cos(k\omega t + \arg(C_k)) \right). \quad (10)$$

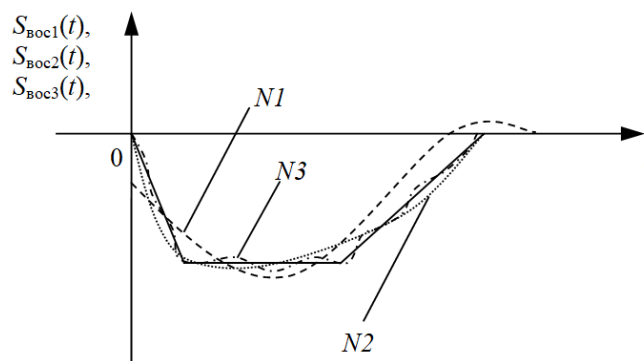


Рисунок 5 – Восстановление исходной функции с различным количеством суммируемых гармоник, $N3 > N2 > N1$

Можно сделать вывод, что качество восстановления сигнала увеличивается пропорционально количеству суммированных гармоник. Наибольшее качество восстановления достигается при количестве гармоник $N3$.

Для сохранения ресурсов энергонезависимой памяти используют различные методы сжатия и архивации данных. Методы сжатия информации на сегодняшний день очень широко распространены, но они требуют определенных программных и алгоритмических решений, в результате чего увеличиваются время вычислений, обработки электрических параметров и вычислительные ресурсы.

Для построения такого устройства необходимо знать его граничные параметры работы, при которых оно может адекватно оценить событие и записать его в память.

Чтобы избежать вышеизложенных недостатков, предлагается новый подход, обеспечивающий уменьшение физического износа памяти. Его суть заключается в одновременной привязке к событию и времени, т. е. запись информации производится с переменным значением частоты циклов, которая зависит от скорости изменения контролируемого электрического параметра и синхронизирована по времени с событием, подлежащим регистрации.

Рассмотрим подробно реализацию данного способа на примере контроля одного электрического параметра с помощью устройства, позволяющего производить запись информации с переменным значением частоты циклов (рис. 6).

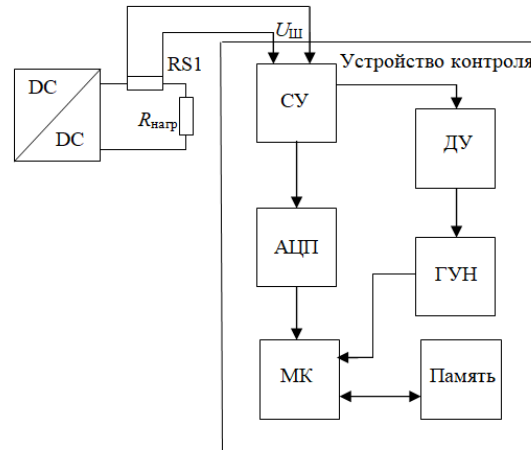


Рисунок 6 – Взаимосвязь преобразователя напряжения и устройства контроля

Принцип работы устройства контроля заключается в слежении за электрическим параметром преобразователя напряжения, а именно напряжением шунта $U_{ш}$. Напряжение, снимаемое с шунта, поступает на согласующее устройство (СУ) для нормирования по уровню, требуемому для согласованной работы АЦП и ДУ. АЦП преобразовывает контролируемые параметры в цифровой вид и передает данные на МК. ДУ вычисляет значение производной от измеряемого параметра. После дифференцирования сигнал поступает на ГУН. Пропорционально изменению амплитуды напряжения выходного сигнала ДУ ГУН формирует тактовые импульсы с переменным значением частоты, которые поступают на МК, записывающий значение контролируемого параметра $U_{ш}$ в память.

При ступенчатом изменении тока нагрузки на участке времени от t_0 до t_1 напряжения устройства контроля меняются, как показано на рисунке 7.

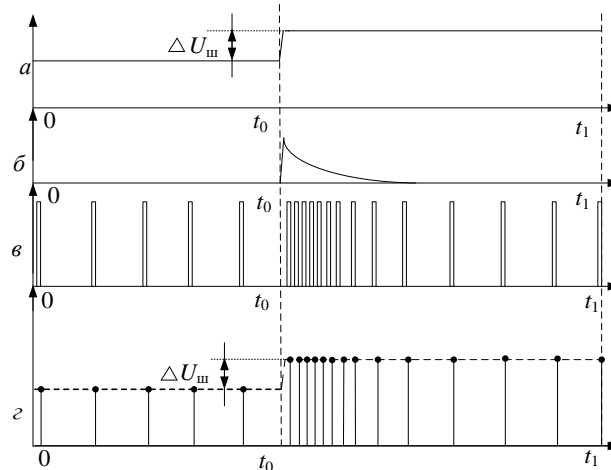


Рисунок 7 – Эпюры напряжений устройства контроля: a – форма напряжения $U_{ш}$ на шунте; $б$ – выходное напряжение ДУ; $в$ – импульсы на выходе ГУН; $г$ – временные отсчеты сохраняемых в память значений напряжения шунта $U_{ш}$

На эпюре (рис. 7, a) видно, что на участке времени от t_0 до t_1 при ступенчатом увеличении тока нагрузки напряжение на шунте увеличивается на значение $\Delta U_{ш}$.

ДУ вычисляет производную поступающих электрических сигналов. Отклик дифференцирующей цепи $U_{вых}(t)$ связан с входным воздействием $U_{вх}(t)$ через соотношение

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \tau \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}, \quad (11)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени ДУ.

Результаты моделирования работы устройства контроля (см. рис. 6) при изменении параметров ДУ и ГУН представлены на рисунках 8 и 9.

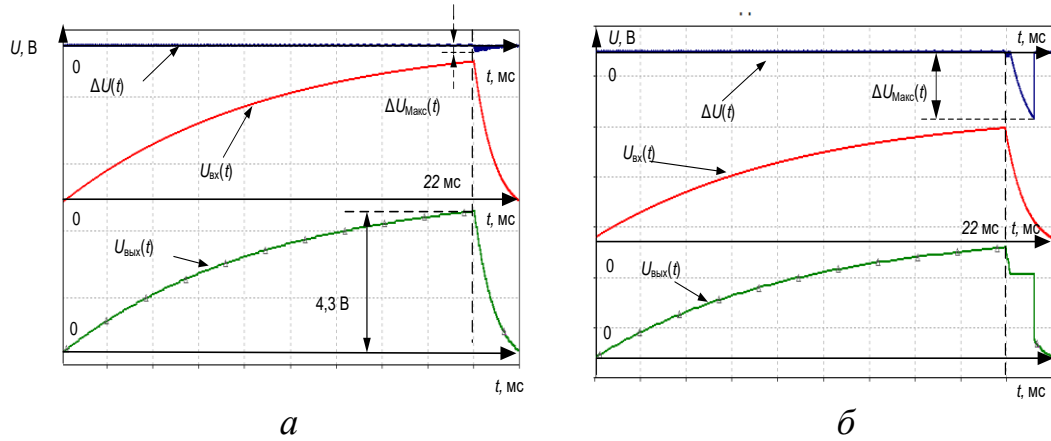


Рисунок 8 – Форма $U_{\text{ВХ}}(t)$, $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ и сигнала их разности $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$ при постоянной времени ДУ:
a – при $\tau_1 = 600$ мкс; *б* – при $\tau_2 = 30$ мкс

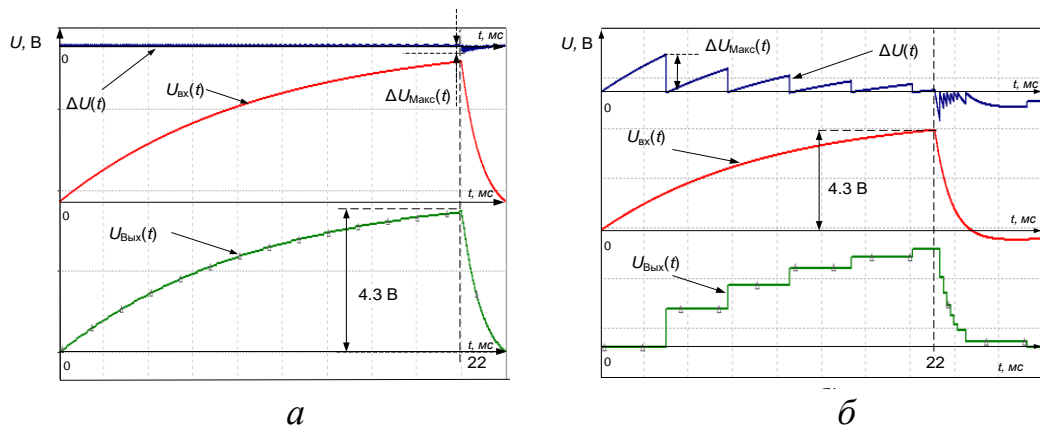


Рисунок 9 – Форма $U_{\text{ВХ}}(t)$, $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ и сигнала их разности $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$:
a – при диапазоне выходной частоты ГУН 20 – 104 кГц;
б – при диапазоне выходной частоты ГУН 0,17 – 2,8 кГц

Оценим соотношение постоянной времени дифференцирующей цепи к длительности изменения сигнала. За длительность изменения сигнала примем его экспоненциальный срез, так как при этом наблюдается максимальная погрешность восстановления (см. рис. 8). Длительность среза составляет $t_{\text{ср}} = 2,0$ мс. Постоянные времени обозначены $\tau_1 = 600$ мкс и $\tau_2 = 30$ мкс соответственно.

Тогда соотношение при минимальном значении погрешности составит

$$\frac{\tau_1}{t_{\text{ср}}} = \frac{600 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,3. \quad (12)$$

Соотношение при максимальном значении погрешности составит

$$\frac{\tau_2}{t_{\text{ср}}} = \frac{30 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,015. \quad (13)$$

Из полученных данных следует, что для восстановления сигнала с погрешностью не хуже $\pm 4,6$ % отношение постоянной времени дифференцирующей цепи к длительности изменения сигнала должно быть не менее 0,3.

При этом минимальное искажение сигнала происходит при работе ГУН на частотах 20 – 104 кГц и составляет 0,1 В (см. рис. 9, а).

Наибольшее искажение сигнала происходит в диапазоне от 0,17 кГц и ниже (см. рис. 9, б). Максимальное отклонение $\Delta U_{\text{вых}}(t)$ составило 4,2 В.

Влияние частотного диапазона ГУН связано с тем, что за одно и то же время он формирует гораздо большее количество тактовых импульсов, в результате чего пропорционально возрастает количество отсчетов данных, сохраняемых в запоминающее устройство.

Для сравнения рассмотрим два способа обработки контролируемого сигнала: разрядность АЦП $M = 16$ бит, частота дискретизации $F_d = 100$ кГц, а длительность сигнала $T_c = 24$ мс. Определим период дискретизации

$$T_d = \frac{1}{F_d} = \frac{1}{100 \cdot 10^3} = 10 \text{ мкс.} \quad (14)$$

Количество отсчетов составит

$$N = \frac{T_c}{T_d} = \frac{24 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 2400. \quad (15)$$

Объем требуемой памяти будет равен

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

Далее оценим объем памяти, необходимый для сохранения этого же сигнала, при условии, что контролируемый параметр будет обрабатываться 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, касательными к исходному сигналу (рис. 10).

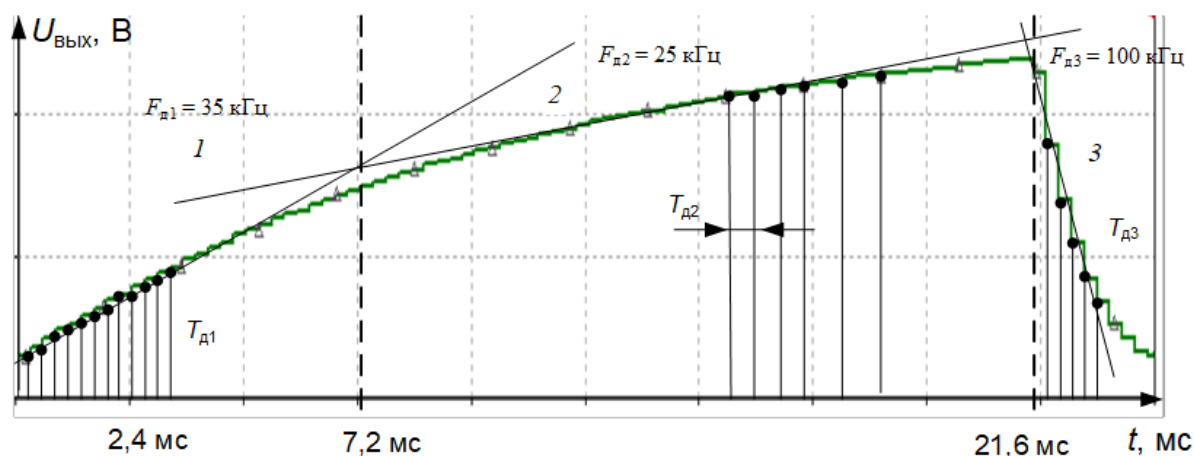


Рисунок 10 – Изменение периода дискретизации сигнала при различной скорости его изменения

Частота дискретизации имеет три разных значения, а именно $F_{d1} = 35$ кГц, $F_{d2} = 25$ кГц и $F_{d3} = 100$ кГц.

Соответственно, периоды дискретизации будут равны: $T_{d1} = 28,6$ мкс, $T_{d2} = 40$ мкс, $T_{d3} = 10$ мкс.

Вычислим необходимое количество отсчетов для каждого из трех участков:

$$N_1 = \frac{T_{c1}}{T_{d1}} = \frac{7,2 \cdot 10^{-3}}{28,6 \cdot 10^{-6}} = 252; \quad (17)$$

$$N_2 = \frac{T_{c2}}{T_{d2}} = \frac{14,4 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-6}} = 360; \quad (18)$$

$$N_3 = \frac{T_{c3}}{T_{d3}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 240. \quad (19)$$

Объем требуемой памяти составит

$$V = (N_1 + N_2 + N_3)M = (252 + 360 + 240) \cdot 16 \approx 13,6 \text{ Кбит}. \quad (20)$$

Объем необходимой памяти для сохранения данного сигнала с последующим его восстановлением получился приблизительно в 2,8 раз меньше, чем при контроле его с непрерывной частотой дискретизации $F_d = 100 \text{ кГц}$. При этом отклонение восстановленного сигнала от исходного не превысило 6 %.

В третьей главе проведено экспериментальное исследование, получены характеристики устройства контроля. Описано устройство контроля технических объектов, обеспечивающее минимизацию объема сохраняемых данных.

Рассмотрим сигнал в виде случайного переходного процесса и проведем анализ его спектральной плотности по аппроксимированной функции (рис. 11). Длительность спада импульса t_c составляет 25 мс.

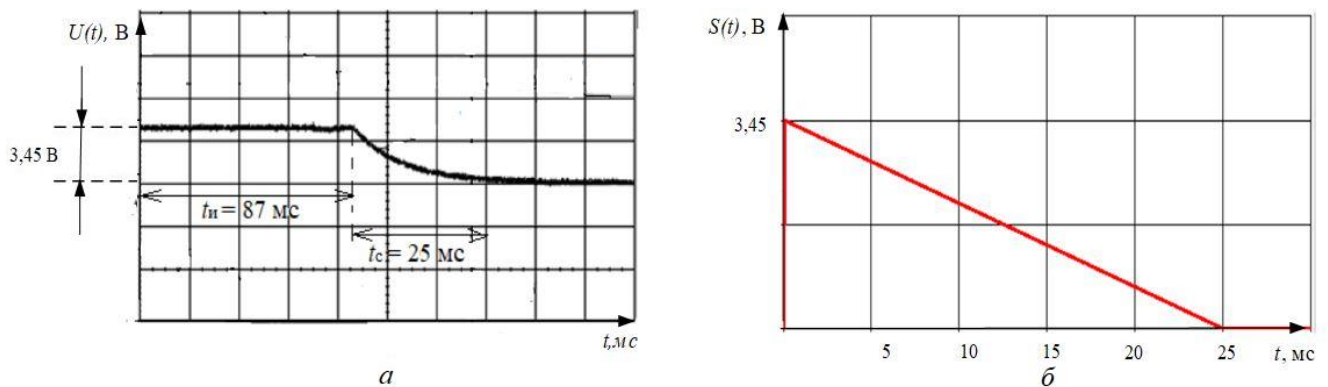


Рисунок 11 – Случайный переходный процесс (а) и его аппроксимированная функция (б)

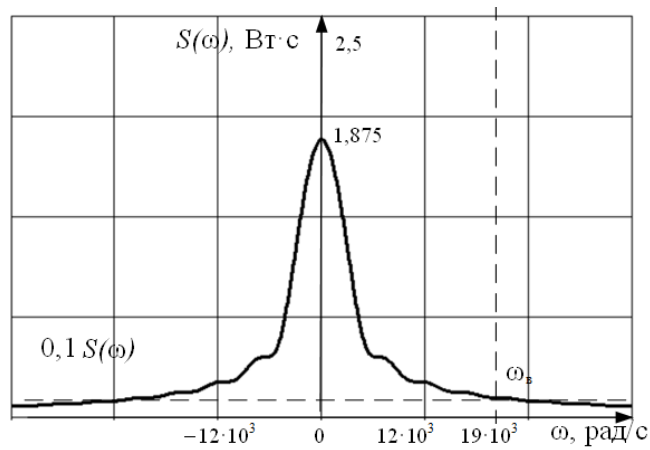
Для упрощения анализа аппроксимированная функция построена только для участка, изменяющегося во времени экспоненциально, остальные участки исключены.

Аппроксимированная функция выражена через поинтервальное описание и имеет вид

$$S(t) = \begin{cases} S(t_0) - \frac{S(t_0)}{t_c} \cdot t, & t \in [0; t_c], \\ 0, & t \in (-\infty; 0) \cup (t_c; +\infty). \end{cases} \quad (20)$$

Верхнюю граничную частоту ω_B определяют исходя из построения функции спектральной плотности по пороговому критерию.

Исходя из графика модуля спектральной плотности (рис. 12), для определения верхней граничной частоты спектра сигнала воспользуемся пороговым критерием: на частотах выше ω_B модуль спектральной плотности не должен превышать уровня 0,1 от максимального значения.

Рисунок 12 – Спектральная плотность сигнала $S(t)$

Из полученного графика можно определить ω_b и, соответственно, частоту дискретизации f_d .

Графически определив $f_b = 3$ кГц (см. рис. 12), получим частоту дискретизации $f_d = 6$ кГц.

Для определения соотношений рабочих частот ГУН и верхней частоты спектра контролируемого сигнала, при которых происходит восстановление с наименьшим искажением, проведем экспериментальную оценку.

Постоянную времени ДУ определим, исходя из условия

$$RC \approx 0,1t_c. \quad (21)$$

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

$$RC \approx 0,1t_c = 0,1 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (22)$$

Восстановление контролируемого сигнала проводилось при следующих диапазонах частот ГУН:

$$\begin{aligned} f_1 &= (f_{\text{нижн1}} \dots f_{\text{нижн2}}); \\ f_2 &= (f_{\text{нижн2}} \dots f_d); \\ f_3 &= (f_d \dots f_{\text{верх1}}); \\ f_4 &= (f_{\text{верх1}} \dots f_{\text{верх2}}), \end{aligned} \quad (23)$$

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

Данные диапазоны выбраны исходя из значения имеющейся частоты дискретизации f_d . Они находятся в разных частотных областях – как выше значения f_d , так и ниже, что позволяет провести оценку для выбора оптимального диапазона частот ГУН.

Контролируемый (1) и восстановленный сигналы (2) при различных рабочих диапазонах частот ГУН представлены на рисунках 13 и 14.

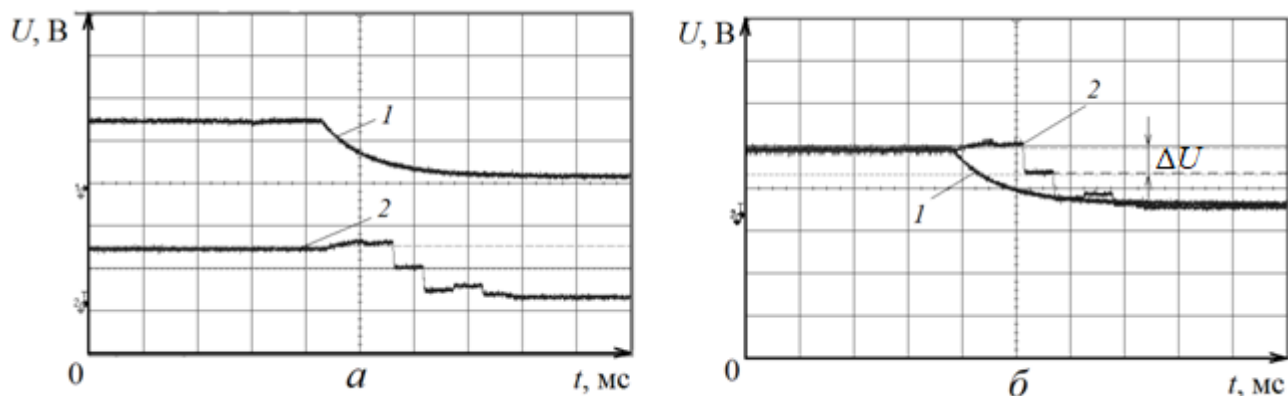


Рисунок 13 – Контролируемый (1) и восстановленный (2) сигналы при диапазоне частот ГУН 50 – 330 Гц: a – раздельное представление сигналов; b – наложение сигналов (вертикальная развертка 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)

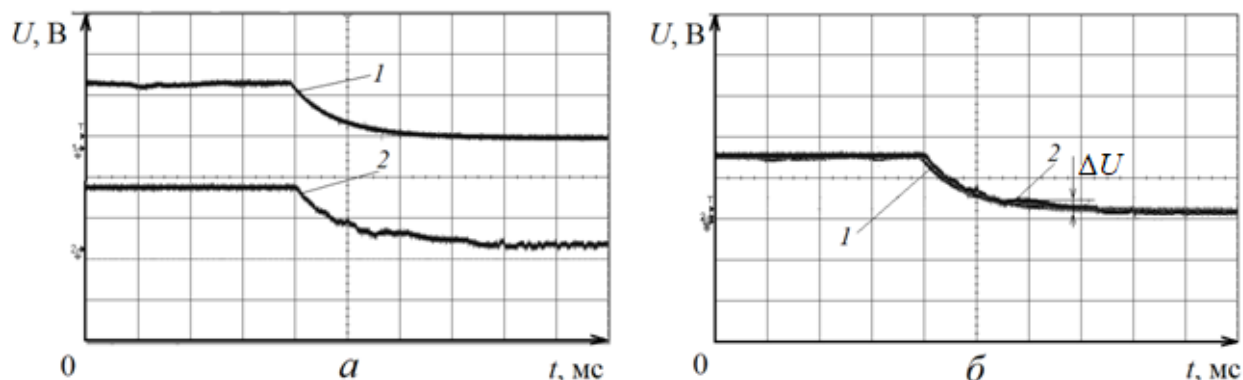


Рисунок 14 – Контролируемый (1) и восстановленный (2) сигналы при диапазоне частот ГУН 6 – 80 кГц: a – раздельное представление сигналов; b – наложение сигналов (вертикальная развертка 2,3 В/дел., горизонтальная – 10 мс/дел.)

Из полученных экспериментальных результатов определим (табл. 1.): отклонение восстановленного сигнала ΔU , максимальную погрешность восстановления сигнала, количество требуемых отсчетов и объем требуемой памяти ОЗУ. Полный размах исходного сигнала составляет 3,45 В.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Отклонение ΔU , В	Погрешность $\delta = \frac{\Delta U \cdot 100}{3,45}, \%$	Количество отсчетов $N_1 = \frac{t_{\text{ГУН}}}{T_d}$	Объем ОЗУ $V_1 = N_1 M$, бит	Диапазон частот ГУН, кГц
1,9	55	8	128	0,05 – 0,33
0,4	11,6	150	2400	0,33 – 6
0,11	3,1	2000	32 000	6 – 80
0,07	2,02	25 000	400 000	20 – 1000

Для наглядности результаты эксперимента представим графически (рис. 15).

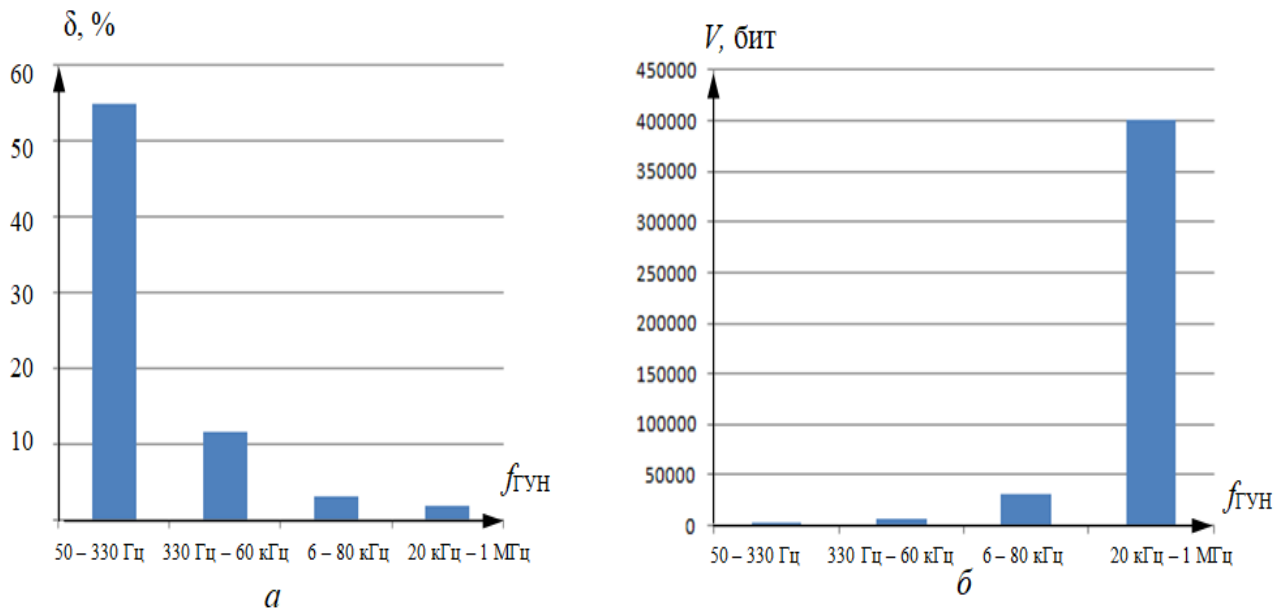


Рисунок 15 – Зависимости:

а – погрешностей восстановленного сигнала от диапазона рабочих частот ГУН;
б – требуемого объема памяти ОЗУ от диапазона рабочих частот ГУН

Определим, во сколько раз отличаются объемы сохраняемых данных при диапазоне частот ГУН 20 – 1000 кГц и 6 – 80 кГц для контроля сигнала с диапазоном спектра 0 – 3 кГц:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{400000}{32000} = 12,5. \quad (24)$$

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

Структурная схема устройства контроля технических объектов с минимизацией объема сохраняемых данных представлена на рисунке 16, *а*.

СУ предназначено для преобразования уровней контролируемых напряжений и дальнейшего их согласования с остальными рабочими АЦП и блоком сжатия (БС).

Контроль параметров проводится по четырем каналам контроля. Информация о контролируемых параметрах поступает на СУ в виде напряжений: $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, $U_4(t)$. При этом допускается увеличивать количество контролируемых каналов путем введения дополнительных преобразующих цепей в СУ и подключения данных цепей к входам многоканального АЦП и БС (рис. 16, *б*).

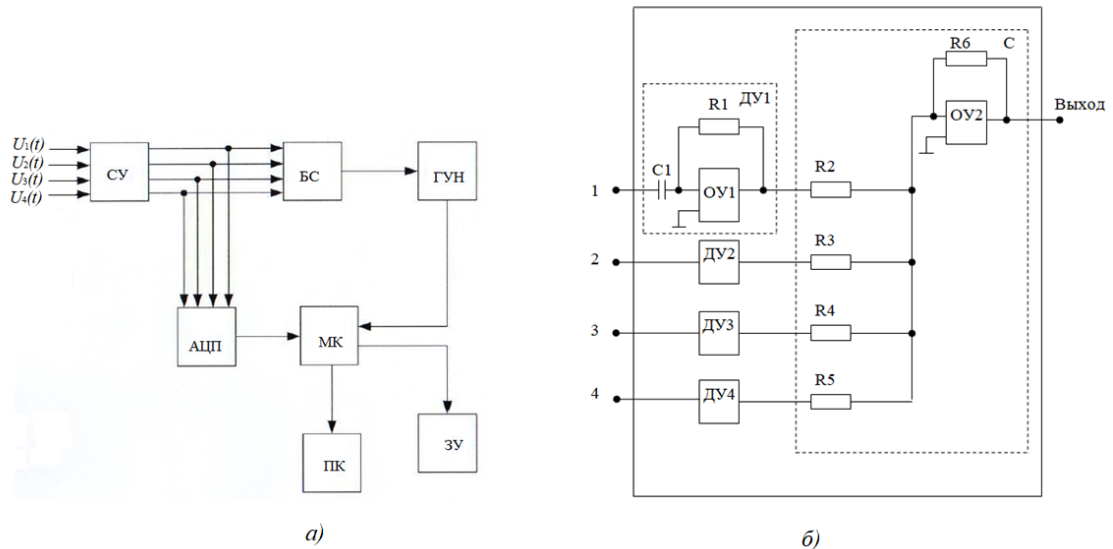


Рисунок 16 – Структурная схема:
a – устройства контроля; *б* – БС

Устройство контроля работает следующим образом: при изменении выходного тока и выходного напряжения на входе СУ в момент времени t_0 (рис. 17, *a*, *б*) на выходе ДУ1 и ДУ2 появляются напряжения, пропорциональные производной от этих изменений в отрицательной полярности (рис. 17, *в*, *г*), которые, пройдя через сумматор С (рис. 17, *д*), поступают на ГУН. При этом частота генерируемых импульсов растет (рис. 17, *е*). В соответствии с выходной частотой ГУН МК производит считывание данных с АЦП и записывает их в запоминающее устройство (ЗУ). Кроме этого, МК записывает текущее время, в которое произошло считывание данных с АЦП. При анализе по сигналу запроса с персонального компьютера (ПК) МК считывает данные из ЗУ и передает их на ПК, в котором производится восстановление и анализ данных о работе источника питания.

На ПК отображаются следующие параметры: восстановленная форма выходного тока вторичного источника питания, мгновенный уровень тока в амперах, уровень отклонения выходного тока ΔI (рис. 17, *ж*), восстановленная форма выходного напряжения, уровень отклонения выходного напряжения ΔU , мгновенное значение напряжения вольтах, длительность T переходного процесса (рис. 17, *з*).

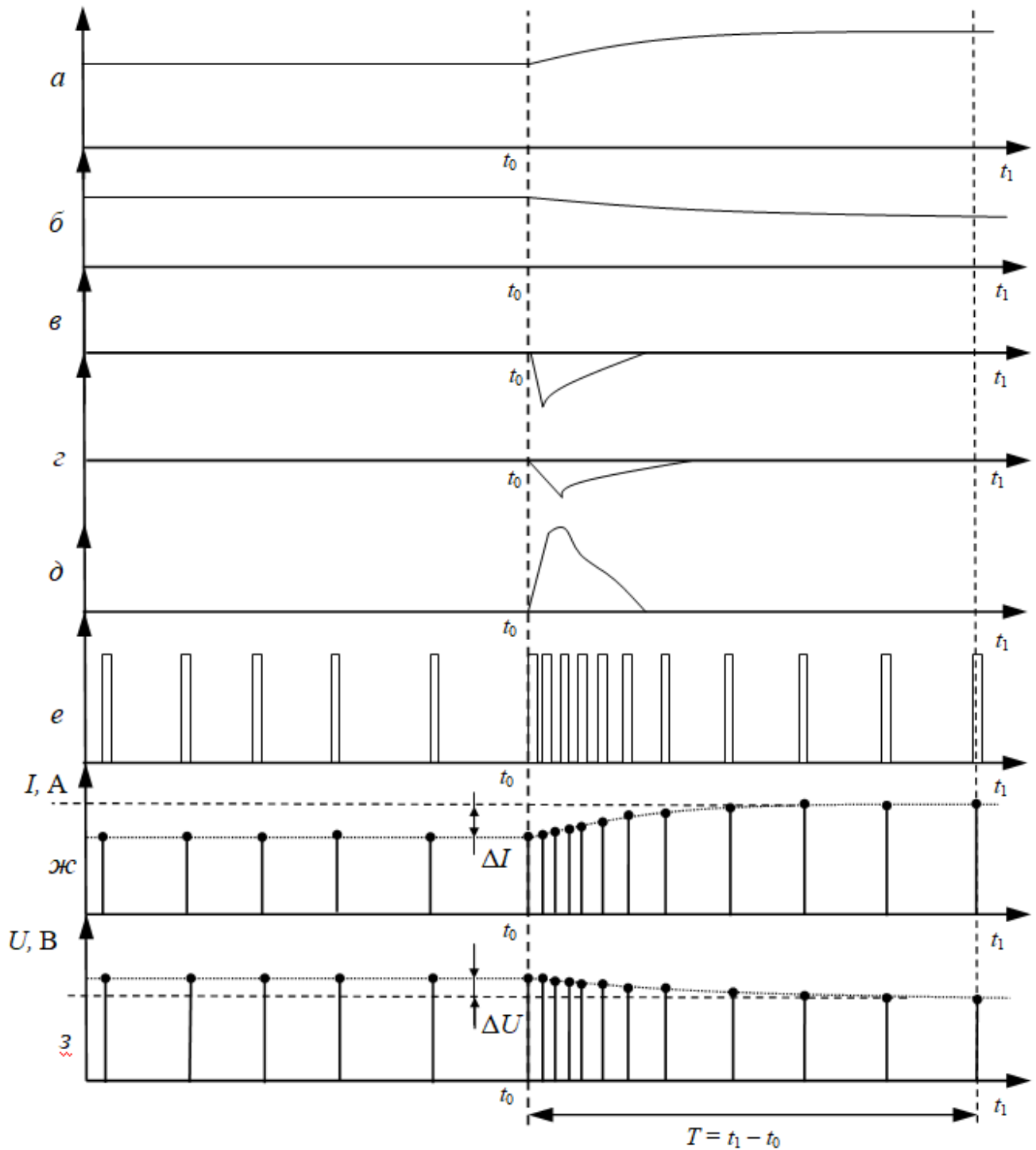


Рисунок 17 – Эпюры напряжений и токов:

a – форма выходного тока, поступающего на СУ; b – выходное напряжение, поступающее на СУ; c – напряжение на выходе ДУ1; d – напряжение на выходе ДУ2; e – напряжение на выходе сумматора; $ж$ – форма выходного тока вторичного источника бесперебойного питания, отображаемая на ПК; $з$ – форма выходного напряжения вторичного источника питания, отображаемая на ПК

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования

Представленный способ минимизации физического износа памяти является альтернативным для имеющихся. Фактически он представляет собой простейшую операцию сжатия информации, благодаря которой интенсивное заполнение информацией ячеек памяти происходит только при возникновении переходного процесса (события). Тем самым отсутствует потребность в частой записи информации об электрическом параметре, значение которого не изменяется, либо допускается реже записывать эту информацию.

В результате проделанной работы разработаны устройство контроля электрических параметров технических объектов и способ сжатия информации, а также проведено их экспериментальное исследование.

В процессе исследования разработана имитационная модель устройства контроля, позволяющая 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 определить оценку необходимых параметров и отношения частот ГУН к верхней граничной частоте спектра сигнала.

Экспериментальная проверка показала, что объем сохраняемых данных может уменьшаться в 6 и более раз при условии, что свободная частота ГУН в 2 раза выше верхней граничной частоты спектра контролируемого сигнала, а постоянная времени ДУ составляет около 10 % от длительности фронта переходного процесса. Погрешность восстановленного сигнала не хуже $\pm 3,1$ %.

Таким образом, данное устройство контроля можно использовать для слежения за электрическими параметрами технических объектов, при этом использование ДУ позволяет увеличить быстродействие изделия, а благодаря использованию сумматора в БС можно подключать параллельно большее количество каналов.

Дополнительно стоит отметить, что объем необходимой памяти при работе на постоянной частоте ГУН 80 кГц в 1,5–2 раза превышает объем, который необходим для записи информации с переменной частотой. Таким образом, с помощью записи информации с переменной частотой достигается минимизация объема сохраняемых данных.

По результатам проделанной работы даны рекомендации по проектированию основных узлов устройства контроля технических объектов.

Рекомендации

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

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

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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.
2. 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.

В изданиях, индексируемых в SCOPUS, Web of Science

1. 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. P. 1 – 9.
2. 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.

Патенты

1. 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.
2. 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.
3. 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.

В сборниках конференций

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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). Ч. 3. Сер. XI. Екатеринбург : АО «НПО автоматики им. акад. Н. А. Семихатова», 2017. С. 4 – 8.
5. 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.
6. 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», 2018. С. 1 – 2.
7. 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.