

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт цифровых технологий, электроники и физики

Кафедра вычислительной техники и электроники (ВТиЭ)

УДК: 004.94

Работа защищена

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Оценка \_\_\_\_\_

Председатель ГЭК, д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_ С. П. Пронин

Допустить к защите

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Заведующий кафедрой ВТиЭ,

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ В. В. Пашнев

ЦИФРОВОЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ  
МИКРОКОНТРОЛЛЕРА STM32F103

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ  
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

БР 09.03.01.506.294 ПЗ

Студент группы: \_\_\_\_\_ 506 \_\_\_\_\_ Д. С. Вебер

Руководитель работы: \_\_\_\_\_ ст. преп. \_\_\_\_\_ П. Н. Уланов

Консультанты: \_\_\_\_\_

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ к.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ А. В. Калачёв

Барнаул 2024 г.

## РЕФЕРАТ

Полный объём работы составляет 28 страниц, включая 21 рисунок и 0 таблиц.

В первой главе были рассмотрены семейства микроконтроллеров, различные среды разработки и изучены методы программной генерации сигналов.

Во второй главе был спроектирован генератор. Проведено моделирование выбранного метода генерации, разработан алгоритм работы и создана схема электрическая принципиальная.

В третьей главе была произведена сборка макета, написана и протестирована результирующая программа.

Ключевые слова: генератор сигналов, микроконтроллер.

Дипломная работа оформлена с помощью системы компьютерной вёрстки  $\text{\TeX}$  и его расширения  $\text{X}\text{\TeX}$  из дистрибутива *TeX Live*.

## ABSTRACT

The total amount of work is 28 page's, include 21 image and 0 table's.

In the first chapter, families of microcontrollers, various development environments were considered and methods of software signal generation were studied.

In the second chapter, a generator was designed. The simulation of the selected generation method was carried out, an algorithm of operation was developed and an electrical circuit was created.

In the third chapter, the layout was assembled, the resulting program was written and tested.

Keyword: signal generator, microcontroller.

Thesis is framed using the computer layout system  $\text{\TeX}$  and its extension  $\text{X}\text{\TeX}$  from the distribution *TeX Live*.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	4
1 Теоретическая часть . . . . .	5
1.1 Развитие генераторов сигналов . . . . .	5
1.2 Основные типы сигналов . . . . .	6
1.2.1 Синусоидальные сигналы . . . . .	6
1.2.2 Линейно-меняющийся сигнал . . . . .	7
1.2.3 Треугольный сигнал . . . . .	8
1.2.4 Шум . . . . .	8
1.2.5 Прямоугольный сигнал . . . . .	9
1.2.6 Импульсы . . . . .	10
1.2.7 Скачки и пики . . . . .	10
1.3 Виды генераторов . . . . .	11
1.3.1 Генераторы синусоидальных сигналов . . . . .	11
1.3.2 Функциональные генераторы . . . . .	12
1.3.3 Генераторы сигналов произвольной формы . . . . .	13
1.3.4 Генераторы импульсов . . . . .	13
1.4 Методы цифровой генерации сигнала . . . . .	14
1.4.1 Метод аппроксимации . . . . .	14
1.4.2 CORDIC . . . . .	15
1.4.3 Табличный метод . . . . .	17
1.4.4 Метод DDS . . . . .	18
1.5 Вывод из первой главы . . . . .	20
2 Глава 2 (проектирование) . . . . .	21
2.1 Вывод из второй главы . . . . .	24
3 Глава 3 . . . . .	25
3.1 Вывод из третьей главы . . . . .	25
Заключение . . . . .	26
Список использованной литературы . . . . .	27
Приложение 1 . . . . .	28

## ВВЕДЕНИЕ

В ходе эксплуатации электронных устройств регулярно возникает необходимость в настройке или ремонте. Для калибровки и отладки приборов необходимы колебания разных форм и периодов. Формирование требуемых электрических колебаний может обеспечить специализированное устройство — генератор сигналов.

Генератор сигналов — это неотъемлемый инструмент для любого специалиста в области электроники. На сегодняшний день разрабатывается достаточно много генераторов сигналов, но не все генераторы, которые есть на рынке, обладают компактными размерами, лёгкостью транспортировки и доступностью в цене.

Ранее практически все лабораторные генераторы были аналоговыми и конструировались на различных схемах. К их достоинствам можно отнести простоту и надёжность, но у них есть существенные недостатки в виде меньшей стабильности и более тщательной настройке. Сейчас практически все генераторы, которые есть на рынке создаются на основе цифровых методов синтеза аналоговых сигналов, т. к. они стабильные и точные. Такого рода генераторы могут найти применение и в промышленности, но не всем пользователям требуются такие высокие характеристики. Разработанный в данной работе генератор претендует на применение в домашней лаборатории в качестве простого и функционального дешёвого генератора сигналов.

Применением такого генератора может быть генерация сигналов разных форм, работа с аналоговыми системами для исследования влияния сигналов на них, изучение методов обработки сигнала или основ электроники.

**Цель** выпускной квалификационной работы состоит в разработке цифрового генератора сигналов на микроконтроллере STM32F103.

### **Задачи**

1. Исследовать методы генерации сигналов и осуществить выбор.
2. Рассмотреть семейства микроконтроллеров и осуществить выбор.
3. Выбрать среду разработки.
4. Спроектировать генератор.
5. Сконструировать макет.
6. Разработать и протестировать программу.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1.1. Развитие генераторов сигналов

История развития генераторов сигналов начинается с аналоговых устройств, которые использовались для генерации различных форм сигналов, включая низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные и импульсные. «Во времена СССР потребности в новых средствах генерации сигналов удовлетворялись разработкой огромного числа всевозможных аналоговых генераторов сигналов» [1]. Однако, с развитием технологий и потребностями в более сложных и модулируемых сигналах, стало очевидно необходимость в универсальных генераторах сигналов, способных генерировать сигналы типовых форм, такие как синусоидальные, прямоугольные, пилообразные и треугольные.

В результате развития технологий и потребностей в более сложных и модулируемых сигналах, появились новейшие разработки генераторов сигналов на основе прямого цифрового синтеза частот и форм сигналов. Эти генераторы сигналов используют минимальное количество аналоговой элементной базы и основываются на стандартных и специализированных сверхскоростных цифровых микросхемах, а также аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователях. Это позволяет легко интегрировать такие генераторы с цифровыми системами и современными компьютерами, открывая широкие возможности их применения в испытании и отладке различных электронных и радиотехнических систем и устройств.

В современной измерительной технике генераторы сигналов играют ключевую роль, особенно в области электронно-оптических приборов, видеоимпульсных и ультразвуковых локаторов, гео- и подповерхностных радаров, а также в системах цифровой связи, включая мобильные системы. Несмотря на то, что в прошлом развитие в этой области было активно, в настоящее время наблюдается отставание от многих передовых направлений применения электронных устройств, включая микропроцессоры, работающие на частотах в единицы ГГц и выше.

В целом, история развития генераторов сигналов отражает эволюцию технологий, потребностей в модулируемых сигналах и влияние глобальных изменений в науке и технике.

## 1.2. Основные типы сигналов

Для начала стоит дать определение, что такое сигнал. «Термин "сигнал" происходит от слова *signum* (знак), где знак подразумевается не в смысле полярности напряжения или тока, а в информационном смысле — сигналы являются переносчиками неких знаков, образующих информационную основу (алфавит) передаваемых сообщений» [1]. Таким образом, можно сделать вывод, что постоянное напряжение  $U = const$  и постоянный ток  $I = const$  сигналами не являются, т.к. их параметры во времени не меняются.

Впрочем постоянный ток или напряжение можно отнести к простейшим сигналам, которые несут в себе информацию о полярности напряжения или тока и их величинах, но в основном они не используются в качестве сигналов, а задают смещение чаще всего синусоидальным сигналам.

Рассмотрим некоторые распространённые типы сигналов (напряжений, которые определённым образом меняются во времени).

### 1.2.1. Синусоидальные сигналы

Именно синусоидальные сигналы мы извлекаем из розетки. Математическое выражение, описывающее синусоидальное напряжение, имеет вид:

$$U = A \sin 2\pi f t, \quad (1.1)$$

где  $A$  — амплитуда сигнала, а  $f$  — частота в герцах.

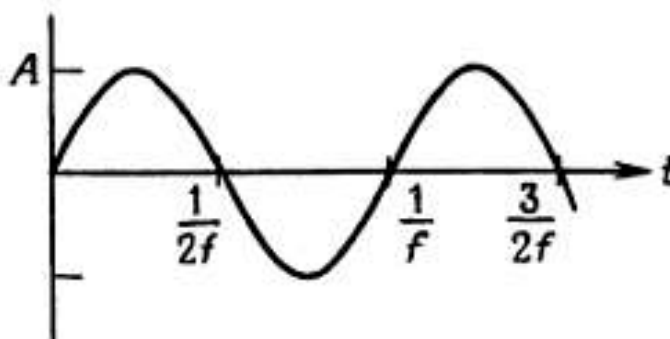


Рис. 1.1 Синусоидальный сигнал.

Эффективное значение равняется двойной амплитуде, то есть размаху сигнала.

Если нужно переместить начало координат ( $t = 0$ ) в какой-то момент времени, то в формулу следует добавить фазу:

$$U = A \sin 2\pi f t + \theta, \quad (1.2)$$

Синусоидальные сигналы характеризуются тремя параметрами:

- $U_M$  или  $I_M$  — амплитуда переменного напряжения или тока;
- $f$  — частота (период);
- $\theta$  — фазовый сдвиг.

Данный тип сигналов является периодическим, т. е. временная зависимость повторяется и есть условия:

$$u(t) = u(t + T), \quad (1.3)$$

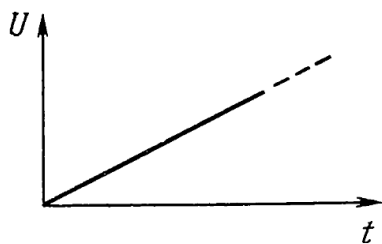
$$i(t) = i(t + T), \quad (1.4)$$

где  $T = \frac{1}{f}$  — период повторения сигнала.

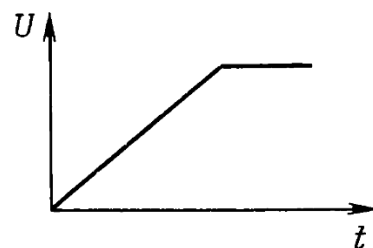
«Основное достоинство синусоидальной функции (а также основная причина столь широкого распространения синусоидальных сигналов) состоит в том, что эта функция является решением целого ряда линейных дифференциальных уравнений, описывающих как физические явления, так и свойства линейных цепей.» [2]. Если подать на вход линейной цепи синусоидальный сигнал, то на выходе мы также получим синусоиду, но как правило с другой амплитудой и фазой. На практике поведение схемы оценивают по её амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), которая показывает, как изменяется амплитуда синусоидального сигнала в зависимости от частоты. Для примера на усилителе звуковых частот амплитудно-частотная характеристика в идеале имеет ровную линию в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Чаще всего частоты, с которыми приходится работать на синусоидальном сигнале, лежат в диапазоне от нескольких герц до нескольких мегагерц.

### 1.2.2. Линейно-меняющийся сигнал

Линейно-меняющийся сигнал — это напряжение, возрастающее (или убывающее) с постоянной скоростью.



(а) Возрастающее напряжение в виде сигнала.



(б) Ограниченный сигнал.

Рис. 1.2 Линейно-меняющийся сигнал.

Напряжение не может, конечно, расти бесконечно. Поэтому обычно данная величина имеет конечное значение (рис. 1.2 (б)) или сигнал становится пилообразным (рис. 1.3).

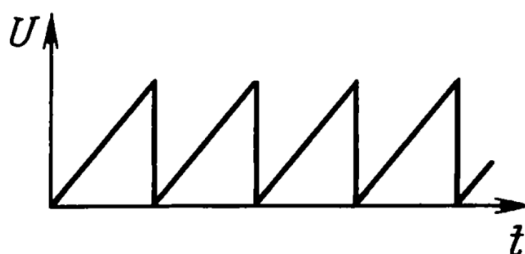


Рис. 1.3 Пилообразный сигнал.

### 1.2.3. Треугольный сигнал

Треугольный сигнал очень похож на линейно-меняющийся, но его отличие в том, что он симметричный.

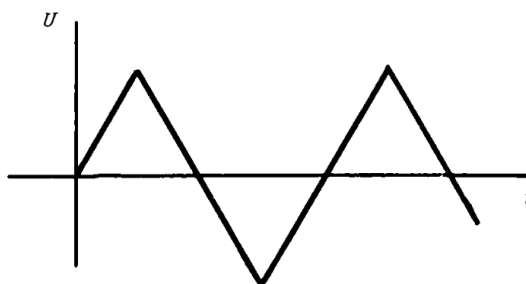


Рис. 1.4 Треугольный сигнал.

### 1.2.4. Шум

Также существует потребность в генерации шумов для анализа реакции на такой сигнал схемы. Характеризуется частотным спектром (произведение



мощности на частоту в герцах). Самое распространённое шумовое напряжение — белый шум с распределением Гаусса.

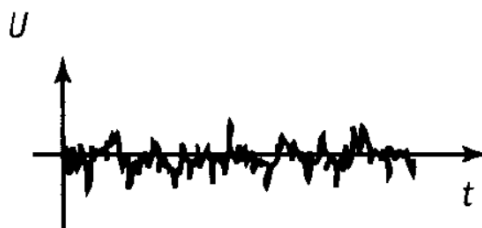


Рис. 1.5 Сигнал шума.

### 1.2.5. Прямоугольный сигнал

Прямоугольный сигнал или как его ещё называют меандр, характеризуется так же как и синусоидальный сигнал частотой и амплитудой.

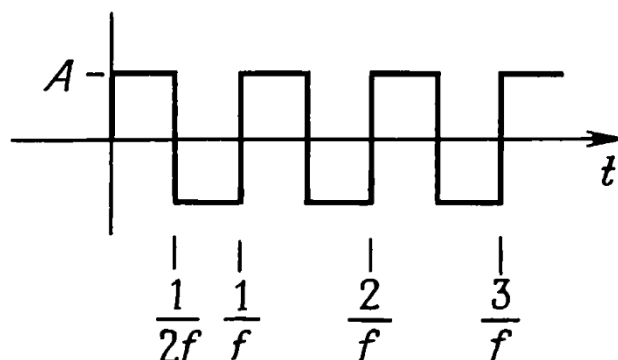


Рис. 1.6 Прямоугольный сигнал.

Если на вход линейной схемы подать прямоугольный сигнал, то на выходе вряд ли будет прямоугольник. Эффективным значением для данного сигнала является значение его амплитуды. «Форма реального прямоугольного сигнала отличается от идеального прямоугольника; обычно в электронной схеме время нарастания сигнала  $t_H$  составляет от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд.» [2].

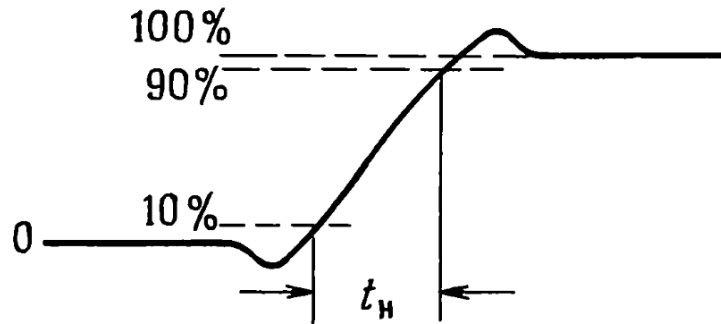


Рис. 1.7 Время нарастания скачка прямоугольного сигнала.

На рисунке 1.7 изображено как обычно выглядит скачок сигнала прямоугольника. Время когда сигнал нарастет определяется в промежутке от 10 до 90% максимальной амплитуды сигнала.

### 1.2.6. Импульсы

Сигналы в виде импульса изображены на рисунке 1.8.

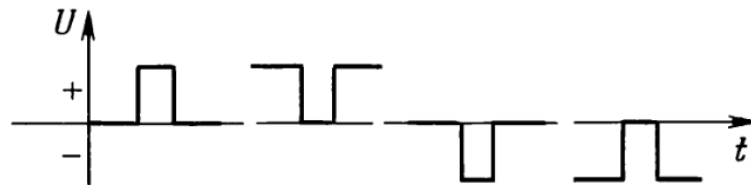


Рис. 1.8 Импульсы.

Данный вид сигналов характеризуется амплитудой и длительностью импульса. Можно генерировать последовательность периодических импульсов и тогда можно ещё характеризовать сигнал частотой (повторением импульса). У импульсов есть полярность — положительная и отрицательная. Кроме этого импульс может спадать, а может нарастать.

### 1.2.7. Скачки и пики

Часто можно слышать о сигналах в виде скачков и пиков, но на самом деле широкого применения они не находят. «К их помощи прибегают для описания работы схем» [2]. Данный вид сигналов изображён на рисунке 1.9.

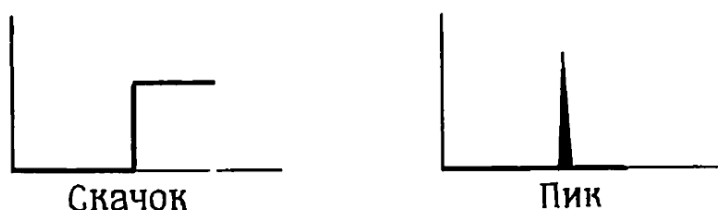


Рис. 1.9 Сигнал в виде скачка и пика.

Скачок представляет из себя отдельную часть прямоугольного сигнала, в то время как пик представляет собой два скачка, разделенных очень коротким промежутком.

### 1.3. Виды генераторов

Источник сигнала часто является неотъемлемой частью схемы, но для тестирования работы удобно иметь отдельный, независимый источник сигнала. В качестве такого источника могут использоваться следующие виды генераторов.

1. Генераторы синусоидальных сигналов.
2. Функциональные генераторы.
3. Генераторы сигналов произвольной формы.
4. Генераторы импульсов.

#### 1.3.1. Генераторы синусоидальных сигналов

Генераторы таких сигналов широко применяются при тестировании различных радиоэлектронных устройств. «Достоинством обычных генераторов синусоидальных сигналов является возможность получения синусоидальной формы выходного сигнала с малыми нелинейными искажениями. А главным недостатком — низкая стабильность частоты.» [1]. Сами же синусоидальные сигналы являются простейшими. Они изменяются во времени, но их параметры — амплитуда, частота и фаза остаются постоянными. Изменяя эти параметры, возможно осуществить модуляцию синусоидальных сигналов и использовать их для переноса информации. На таком принципе построены разнообразные области применения синусоидальных сигналов в технике электросвязи и радиотехнике.

В области измерительных приборов существуют различные виды генераторов синусоидального напряжения:

1. Высокочастотные LC-генераторы.
2. Низкочастотные RC-генераторы.
3. Генераторы с разными типами резонаторов (кварцевые, пьезоэлектрические).
4. Генераторы, которые формируют синусоиды, плавно ограничивая сигнал треугольника.
5. Генераторы построенные на основе цифровых методах синтеза синусоидального сигнала.

Конечно в настоящее время первые четыре типа генераторов уже прошлый век. Развитие цифровых и вычислительных технологий способствовало созданию и широкому распространению генераторов пятого типа, которые используют цифровые методы для генерации синусоидальных и различных других форм сигналов.

### **1.3.2. Функциональные генераторы**

Функциональными генераторами обычно называют генераторы, которые могут создавать несколько функциональных зависимостей. Данные устройства генерируют сигналы разной формы. Их простота и плавная регулировка частоты в большом диапазоне привела к массовому применению генераторов такого типа. Из всех генераторов, генераторы функций являются очень гибкими. Они позволяют генерировать синусоидальные, треугольные и прямоугольные сигналы в широком спектре частот, при этом возможно регулировать амплитуду и смещать сигнал по постоянному току. Благодаря такому разнообразию сигналов, сфера применения таких генераторов сильно расширяется. Данный вид источника сигнала может быть одним на все случаи жизни. Их можно использовать для тестирования, исследования и отладки абсолютно разной электронной аппаратуры. «Наиболее часто функциональные генераторы используются при отладке ВЧ, НЧ и сверхнизкочастотных устройств. В СВЧ диапазоне частот эти устройства не используются, за исключением применения в качестве источников модулирующих сигналов.» [1].

Функциональные генераторы также существуют как аналоговые так и цифровые, но в настоящее время аналоговые неактуальны. Переход к функциональным генераторам с цифровым синтезом выходных сигналов и цифро-

вой элементной базой связан с растущими требованиями к сигналам источника. У сигнала должна быть стабильная частота с амплитудой и верная форма. Благодаря применению цифровых элементов в массовой продукции (персональный компьютер, мобильный телефон), цифровые интегральные схемы стали бурно развиваться. Стала повышаться функциональность схем и понижаться их стоимость.

### **1.3.3. Генераторы сигналов произвольной формы**

Данный вид генератора дополняет функциональный генератор. Достаточно новое направление в генераторах сигналов, которое основывается на прямом цифровом синтезе различных сигналов, по сути произвольных форм. Прямой цифровой синтез открыл возможность построить новую группу цифровых генераторов сигналов — как обилие стандартных функций, так и произвольных форм. Однако синтез сигналов произвольных форм неминуемо усложняет устройство, «так как требует применения перепрограммируемой электрическим способом памяти, введения редактора форм сигналов и средств отображения синтезируемой формы сигнала.» [1]. Следовательно, генераторы такого типа относятся к достаточно сложным и дорогим приборам.

И всё же в ряде случаев данный вид генератора сигналов бывает очень необходим. С ростом сложности связной, телекоммуникационной, телевизионной и радиолокационной техники, увеличивается разнообразие форм сигналов, требующих тестирования.

### **1.3.4. Генераторы импульсов**

Важно иногда передавать значительное количество энергии за короткий промежуток времени. Генерация импульсов необходима для тестирования и отладки импульсных систем. Это может быть радиолокатор или устройства и цифровые системы различного назначения. В радиолокации импульс направляется в пространство затем отражается от достигнутой цели и воспринимается радиолокационным приёмником. Получив информацию о времени задержки отражённого сигнала, можно оценить расстояние до цели, а

проанализировав отражённый импульс можно сделать какие-то выводы о характере цели. Такого рода генераторы находят большое применение в качестве источников несинусоидальных сигналов. «Импульсные сигналы нужны и в целом ряде других применений, например для запуска мощных лазерных диодов, построения ультразвуковых и видеоимпульсных локаторов, запуска ядерных и термоядерных процессов и даже при испытании многих электронных устройств, использующих импульсные сигналы или отдельные их свойств.» [1].

#### 1.4. Методы цифровой генерации сигнала

После рассмотрения видов генераторов сигналов можно сделать вывод о том, что способы получения сигнала также делятся на аналоговые и цифровые. Однако, в настоящее время аналоговые генераторы неактуальны и изучать способы генерации и схемы на аналоговой элементной базе большого смысла не имеет. Следует провести исследование цифровых методов генерации сигнала.

##### 1.4.1. Метод аппроксимации

Метод аппроксимации подразумевает собой вычисление отсчётов функции по заданным параметрам. «В памяти устройства хранятся лишь параметры генерируемого сигнала. Программа вычисляет отсчеты функции с некоторым заданным интервалом.» [3]. Исходя из этого, данный метод позволяет затратить небольшой объём памяти, но его недостаток это затраты на вычисления, что ограничивает максимальную частоту сигнала. Одним из видов аппроксимации является ступенчатая. Ступенчатая аппроксимация заключает в себе замену гармонического колебания напряжением ступенчатой формы, которая будет мало отличаться от синусоидальной кривой. «При ступенчатой аппроксимации аппроксимируемое гармоническое напряжение  $u(t) = U_m \sin \omega t$  дискретизируется по времени (равномерная дискретизация с шагом  $\Delta t$ ), и в интервале, разделяющем два соседних момента времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$ , заменяют синусоидальное колебание напряжением постоянного тока — ступенькой, высота которой равна значению аппроксимируемого напряжения в момент  $t_i$ , т. е.  $u(t_i) = U_m \sin \omega t_i$ » [4]. В результате замены получим

ступенчатую линию вместо кривой. Число ступенек при заданном периоде определяется шагом дискретизации  $p = \frac{T}{\Delta t}$ .

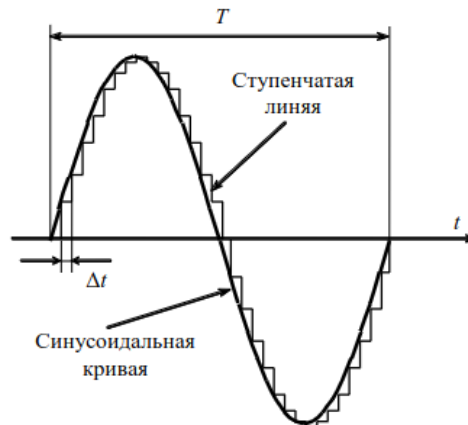


Рис. 1.10 Ступенчатая аппроксимация.

### 1.4.2. CORDIC

Следующий метод тоже предполагает вычисление отсчётов. Для генерации сигналов также применяется итерационный метод CORDIC. «CORDIC — это аббревиатура от Coordinate Rotation Digital Computer: цифровое вычисление поворота системы координат. Алгоритм "цифра за цифрой" был разработан для аппаратного поворота вектора на плоскости с помощью простых операций "сдвиг регистра вправо" и сложение/вычитание регистров.» [5]. Смысл итерационного метода заключается в том, чтобы построить следующую последовательность:  $y_{i+1} = f(y_i)$ , сходящейся к функции  $y(x)$ . Математической моделью в данном методе является единичная окружность с парой векторов, исходящих из центра.

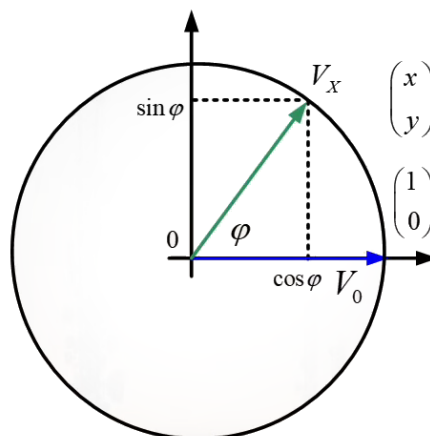


Рис. 1.11 Математическая модель CORDIC.

Вектор  $V_x$  отклонён от горизонтальной оси на угол являющимся аргументов функции. Второй вектор  $V_0$  будет производить вращение от начальной точки относительно начала координат. Координаты векторов имеют значения  $\sin$  и  $\cos$  угла, на который вектор отклоняется от горизонтальной оси.

Для вектора  $V_0$ :  $\cos 0 = 1$ ,  $\sin 0 = 0$ .

Для вектора  $V_x$ :  $\cos \phi = x$ ,  $\sin \phi = y$ .

Необходимо найти координаты вектора  $V_x$   $x$  и  $y$  после поворота на угол  $\phi$ . Координаты вычисляются по тригонометрическим формулам:

$$x = x_0 * \cos \phi - y_0 * \sin \phi, \quad (1.5)$$

$$y = x_0 * \sin \phi + y_0 * \cos \phi. \quad (1.6)$$

Так как  $\tan \phi = \frac{\sin \phi}{\cos \phi}$ , то можно выразить  $\sin \phi = \tan \phi * \cos \phi$  и выполнить преобразование формул. Тогда получим:

$$x = \cos \phi (x_0 - y_0 * \tan \phi), \quad (1.7)$$

$$y = \cos \phi (y_0 + x_0 * \tan \phi). \quad (1.8)$$

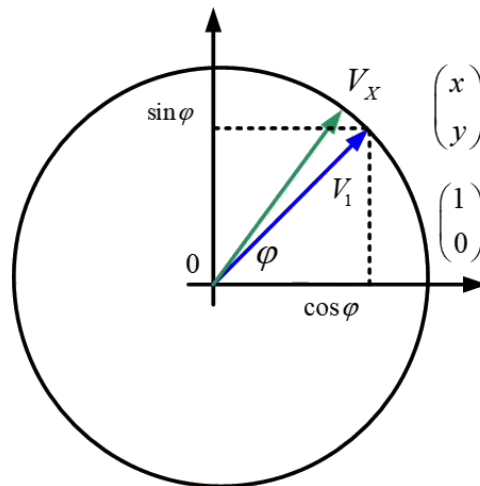


Рис. 1.12 Поворот вектора.

Если задавать такой угол поворота, что  $\tan \phi = \pm 2^{-i}$ , где  $i$  — целое число, то умножение  $x_0$  и  $y_0$  сведётся к простому сдвигу их значений вправо



на  $i$  разрядов, так как деление на 2 представляет из себя побитовый сдвиг числа право.

Произвольный угол можно представить в виде суммы углов:

$$\phi_i = \pm atan2^{-i}, \quad (1.9)$$

где  $i = 0, 1, 2$ , и т.д.

Тогда операция поворота вектора будет состоять из последовательных простых поворотов. В каждой итерации проводятся следующие вычисления:

$\sigma_i = sign(z_i)$  — направление поворота,

$x_{i+1} = x_i - \sigma_i * y_i * 2^{-i}$  — значение координаты  $x$ ,

$y_{i+1} = y_i + \sigma_i * x_i * 2^{-i}$  — значение координаты  $y$ ,

$z_{i+1} = z_i - \sigma_i * atan(z^{-i})$  — отклонение вектора.

Данный алгоритм применим для генерации синуса и его применение целесообразно только при необходимости быстрогодействия и высокой точности системы.

### 1.4.3. Табличный метод

В табличном методе генерации сигналов предполагается, что заранее вычисленные отсчёты хранятся в памяти. То есть никаких вычислений не требуется и генерация сводится к тому, что в порт цифро-аналогового преобразователя нужно вывести ячейку по заданному адресу. «Достоинством этого метода является меньшее время, затрачиваемое на формирование отсчета и, как следствие, возможность генерации сигналов с более высокой частотой. Недостатком является необходимость иметь большой объем памяти данных.» [3].

Частота сигнала будет зависеть от опорной частоты устройства.

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{n} \quad (1.10)$$

где  $n$  — количество отсчётов (длина таблицы).

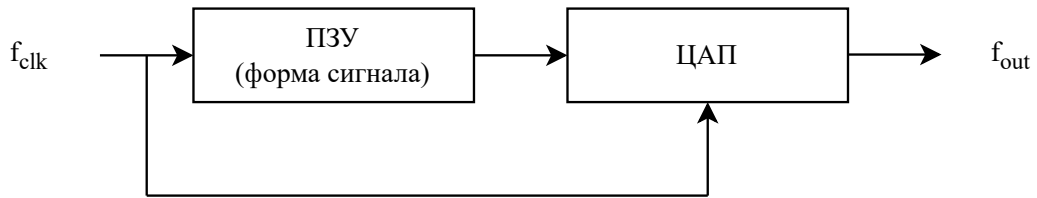


Рис. 1.13 Функциональная схема табличного метода.

Управлять частотой устройства не всегда удобно. При желании уменьшить частоту сигнала придётся добавлять какую-то задержку в цикл, а что делать, если появилась необходимость увеличить частоту и код уже максимально оптимизирован. К примеру максимальная частота, которой удалось достигнуть 10 кГц и на большее наше устройство уже не способно. Так как увеличить частоту опроса таблицы уже невозможно, то нужно уменьшить её длину. То есть чтобы нам получить на выходе 20 кГц мы должны будем выводить каждый второй отсчёт таблицы, если 30 кГц, то каждый третий и т. д. Это хороший вариант, но тогда возникает проблема как дополнить программу, чтобы она пропускала нужное количество отсчётов.

#### 1.4.4. Метод DDS

К табличным методам относится также метод прямого цифрового синтеза или как его ещё называют метод DDS и он решает проблему, в которую упирается обычный табличный метод. «Прямой цифровой синтез (от англ. DDS – Direct Digital Synthesizer) – метод, позволяющий получить аналоговый сигнал (обычно это синусоидальный сигнал, пилообразный, последовательность треугольных импульсов) за счет генерации временной последовательности цифровых отсчетов и их дальнейшего преобразования в аналоговую форму посредством ЦАП.» [3]. На рисунке 1.14 изображена функциональная схема DDS с аккумулятором фазы.

Частота сигнала в этой архитектуре определяется следующей формулой:

$$f_{out} = \frac{D * f_{clk}}{2^A}, \quad (1.11)$$

где  $f_{out}$  — выходная частота,  $f_{clk}$  — частота устройства,  $D$  — код частоты,  $A$  — разрядность аккумулятора фазы.

Благодаря разрядности аккумулятора фазы можно определять насколько точно будет регулироваться частота выходного сигнала.



Рис. 1.14 Функциональная схема DDS с аккумулятором фазы.

В аккумуляторе фазы и есть ключевое отличие метода DDS от простого табличного синтеза. Аккумулятор фазы представляет из себя регистр, в котором в каждом такте работы устройства происходит перезагрузка величины и прибавляется заданный код частоты. Приращение зависит как раз-таки от кода частоты и регулирует это значение. Таким образом, происходит вычисление какой отсчёт нужно отправить в порт цифро-аналогового преобразователя. Ещё одним отличием от табличного способа генерации является работа на фиксированной частоте. Алгоритм метода DDS можно описать блок-схемой на рисунке 1.14.

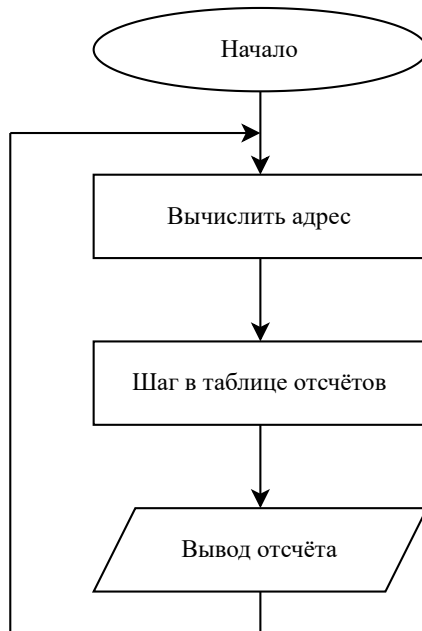


Рис. 1.15 Алгоритм метода DDS.

С помощью данного метода можно производить синтез не только стандартных форм сигналов, но и создавать произвольные формы. Метод DDS

позволяет управлять цифровым способом амплитудой и фазой сигнала, а также лежит во основе многих приборов. «Эти приборы находят широкое применение в различных устройствах: тестовом, измерительном, коммуникационном оборудовании. Интегральные DDS — это компактные, потребляющие минимум электроэнергии, недорогие устройства и, кроме того, очень простые с точки зрения применения.» [6].

### **1.5. Вывод из первой главы**

Таким образом, можно сделать вывод о том, что среди генераторов сигналов наиболее выделяются функциональные генераторы своей универсальностью и гибкостью. Они способны создавать различные функциональные зависимости, что позволяет генерировать сигналы разной формы, включая синусоидальные, треугольные и прямоугольные сигналы в широком спектре частот. Это делает их очень полезными для тестирования, исследования и отладки электронной аппаратуры. В следствие этого было принято решение разрабатывать функциональный генератор сигналов. В качестве метода генерации сигнала был выбран метод DDS за его простоту реализации и гибкость.

## 2. ГЛАВА 2 (ПРОЕКТИРОВАНИЕ)

Будем рассматривать табличный метод синтеза. Для начала потребуется таблица отсчётов, чтобы её вычислить используем готовый инструмент.

Рис. 2.1 Программа для вычисления значений сигнала.

У таблицы есть 4 параметра:

1. Разрядность ЦАП: 8 или 12 бит.
2. Максимальное значение.
3. Количество значений.
4. Смещение от нуля.

Использовать мы будем 12-битные значения в количестве 256 чисел. Максимальное значение амплитуды сигнала может быть 4095, но так как для улучшения генерации будет задействован встроенный в цифро-аналоговый преобразователь выходной буфер, то он будет срезать сигнал сверху и снизу на 0.2В, поэтому значения тоже следует срезать на эту же величину для корректной генерации.

В документе от ST про работу с цифро-аналоговым преобразователем есть формула для расчета выходного напряжения.

$$DAC_{output} = V_{REF} * \frac{DOR}{DAC_{MaxDigitalValue} + 1},$$
 где DOR — цифровое значение.

Нам нужно найти какое значение соответствует напряжению 0.2В. Выразим DOR и подставим имеющиеся значения.

$$DOR = \frac{V_{REF}}{DOR} * DAC_{MaxDigitalValue} + 1 = \frac{3.3}{0.2} * (4095 + 1) = 248$$

Укажем смещение от нуля 248, а максимальное значение 4095 меньше на 248, то есть 3847 и сгенерируем таблицу отсчётов для синусоиды.

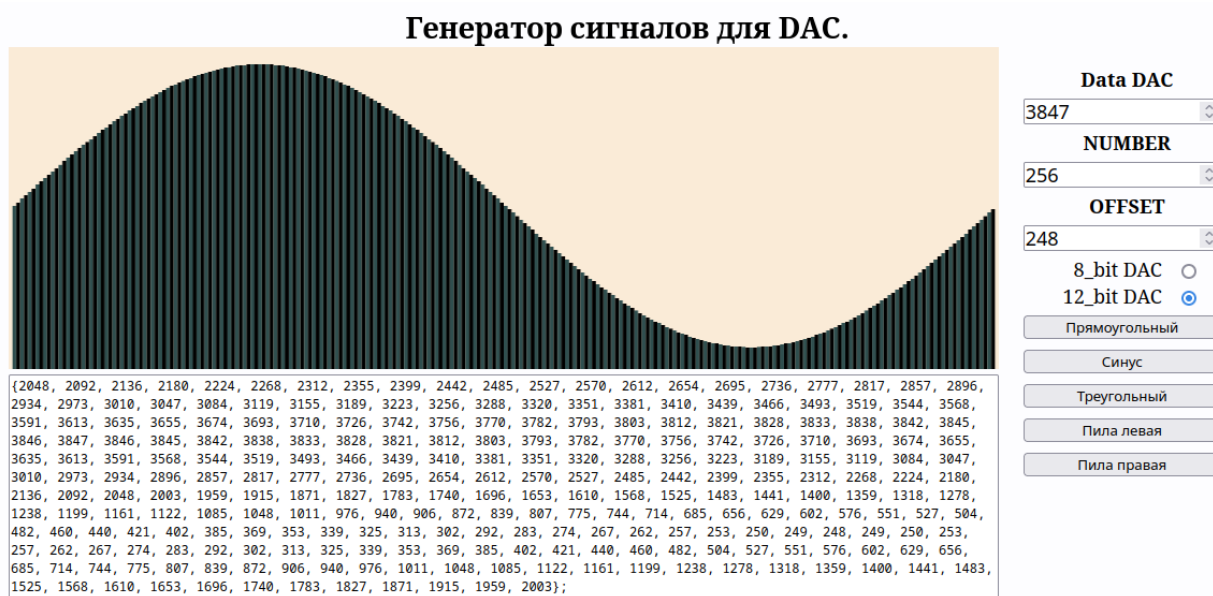


Рис. 2.2 Вычисление таблицы сигнала.

Теперь у нас есть данные для генерации сигнала, но теперь нужно продумать как передавать их в цап и как вообще работать с цапом.

Смоделируем алгоритм метода прямого цифрового синтеза на языке Си для дальнейшей реализации на микроконтроллере.

#### Листинг 2.1 Метод DDS.

```

1 int main() {
2     uint16_t p_acc, p_step;
3     uint8_t addr = 0; // адрес ячейки
4
5     p_acc = 0;        // аккумулятор фазы
6     p_step = 128;     // код частоты
7
8     while(1)
9     {
10        addr = p_acc >> 8; // выделение старшей части
           ↪ аккумулятора фазы

```

```

11     p_acc += p_step;    // шаг
12     printf("%d 0x%X\n", addr, sinus[addr]); // вывод
        ↪ отсчёта
13 }
14
15 return 0;
16 }

```

---

Код частоты задаёт выходную частоту генератора. При значении 256 вывод будет следующий:



```

kenny@desktop:~/workspace/vkr/dds
> gcc dds.c -o dds && ./dds
0 0x800
1 0x82C
2 0x858
3 0x884
4 0x8B0

```

Рис. 2.3 Формирование отсчётов при коде частоты 256.

Увеличим код частоты в два раза и получим следующее:



```

kenny@desktop:~/workspace/vkr/dds
> gcc dds.c -o dds && ./dds
0 0x800
2 0x858
4 0x8B0
6 0x908
8 0x95F

```

Рис. 2.4 Формирование отсчётов при коде частоты 512.

Как можно заметить отсчёты стали формироваться через один, соответственно частота вырастит в два раза. Теперь уменьшим частоту в два раза выставив код частоты 128.



```

kenny@desktop:~/workspace/vkr/dds
> gcc dds.c -o dds && ./dds
0 0x800
0 0x800
1 0x82C
1 0x82C
2 0x858
2 0x858

```

Рис. 2.5 Формирование отсчётов при коде частоты 128.

Программа стала выводить каждый отсчёт по два раза тем самым, понизив частоту.

В данном виде модуляции код частоты просто абстрактное число, которое добавляется к аккумулятору фазы и узнать реальную частоту проблематично. Результат синтеза будет проверен опытным путём на микроконтроллере.

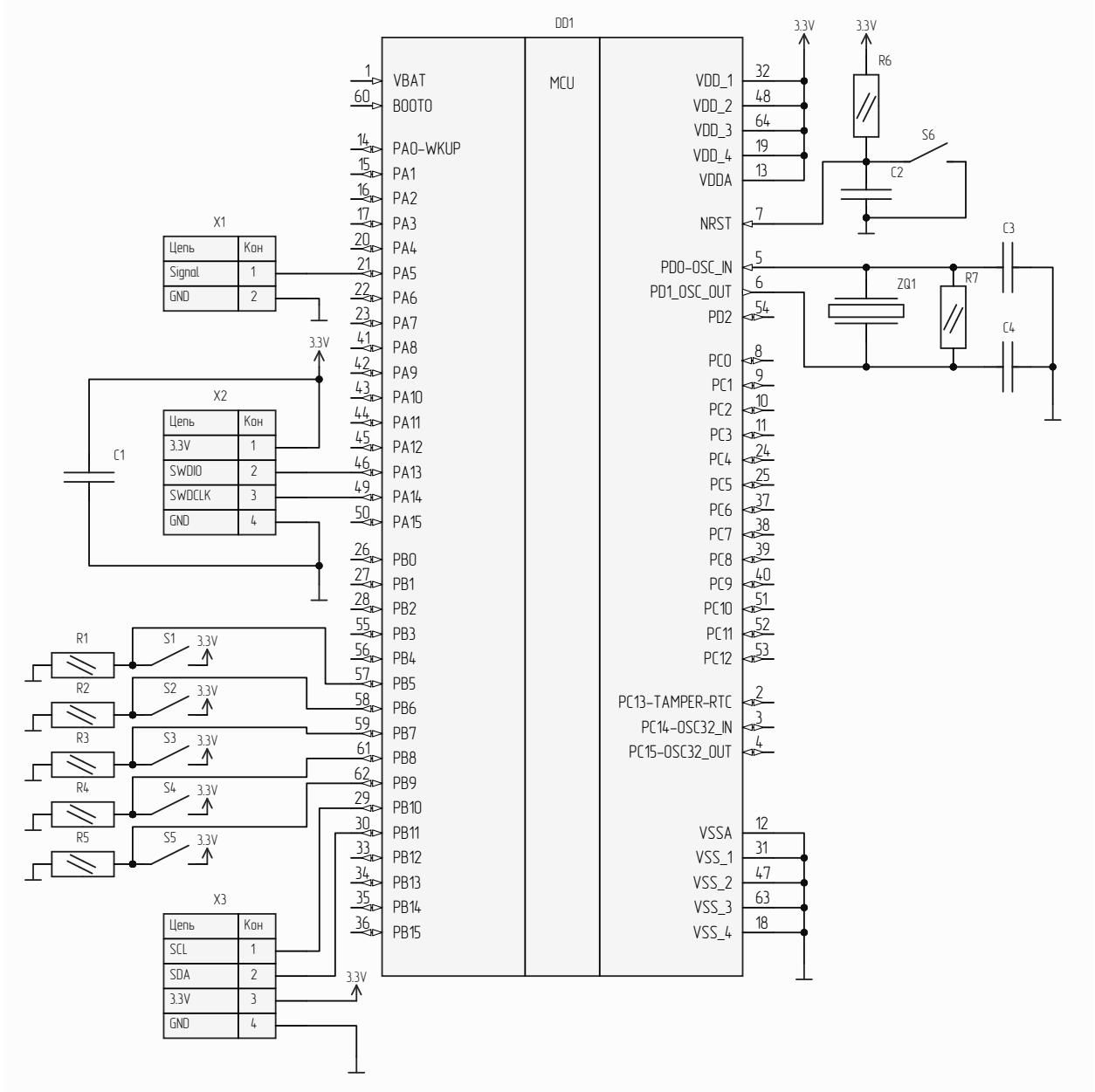


Рис. 2.6 Схема электрическая принципиальная.

## 2.1. Вывод из второй главы



### **3. ГЛАВА 3**

#### **3.1. Вывод из третьей главы**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной выпускной квалификационной работы была достигнута поставленная цель — разработан программный генератор сигналов на микроконтроллере STM32F103RCT6, позволяющий генерировать сигналы разной формы, со следующими характеристиками:

- Формы сигналов: синус, треугольник, прямоугольник, пилообразная, обратная пилообразная.
- Частота сигнала: 125 — 50000 Гц.
- Амплитуда: 3 В.
- Шаг по частоте: 125, 250, 500, 1000 Гц.

Помимо микроконтроллера генератор состоит из дисплея с разрешением 128 на 64 пикселя, работающего по интерфейсу I2C, и пяти кнопок управления.

Для достижения поставленной цели были выполнены все задачи, а именно:

1. Выбран метод генерации сигналов.
2. Выбран микроконтроллер.
3. Выбрана среда разработки.
4. Спроектирован генератор.
5. Сконструирован макет.
6. Разработана и протестирована программа.

Реализованный генератор сигналов отличается простотой, так как использует встроенный цифро-аналоговый преобразователь микроконтроллера и тем самым компактен, а также доступные элементы периферии ввиду этого также его плюсом является невысокая стоимость.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дьяконов В. П.* Генерация и генераторы сигналов. — Москва : ДМК Пресс, 2009. — 384 с. — (Учебное пособие). — ISBN 978-5-94074-493-1.
2. *Хоровиц П. Хилл У.* Искусство схемотехники Том 1. — Москва : Мир, 2003. — 704 с. — (Пер. с англ. Б.Н. Бронина [и др.]) — ISBN 5-03-003395-5.
3. Исследование способов генерации сигналов [Электронный ресурс] Лаборатория Электронных Средств Обучения (ЛЭСО) СибГУТИ. Режим доступа: <http://www.labfor.ru/guidance/fpga-dsp/dds>.
4. *Аминев А. В.* Основы радиоэлектроники: измерения в телекоммуникационных системах : Учебное пособие. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — 223 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-10395-3.
5. *Беспалов Н. Н.* Применение итерационного метода CORDIC для реализации алгоритма трёхфазного генератора. — Научно-технический вестник Поволжья., 2020. — № 7. — С. 43-46.
6. *Мёрфи Е.* Прямой цифровой синтез DDS в тестовом, измерительном и коммуникационном оборудовании. — Компоненты и технологии., 2006. — № 8(61). — С. 52-55.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## ПОСЛЕДНИЙ ЛИСТ ВКР

Выпускная квалификационная работа выполнена мной совершенно самостоятельно. Все использованные в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

\_\_\_\_\_ Д. С. Вебер