

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Промышленная электроника
(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Генератор электромагнитных помех для контроля аппаратуры

Обучающийся

Р.М. Слободин
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.К. Кудинов
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Тема данной выпускной квалификационной работы "Генератор электромагнитных помех для контроля аппаратуры".

В состав работы входит пояснительная записка на 60 страницах, включающая 58 рисунков, 2 приложения, список используемой литературы, состоящий из 20 источников, в том числе 6 иностранных источников и графическую часть на 6 плакатах формата А1.

Цель выполнения данной выпускной квалификационной работы заключается в автоматизации процесса тестирования электронного оборудования на стадии комплексной проверки соответствия требованиям ЭМС, по средствам создания генератора электромагнитных помех, представляющего из себя генератор нелинейных искажений в цепи и обеспечивающего повышение качества проектируемой электронной аппаратуры.

В первой части работы рассмотрены общие понятия и положения, касающиеся электромагнитной совместимости электронных приборов и устройств, помимо того, был проведен анализ готовых решений, существующих на рынке и определена основная концепция разработки с определенным рядом задач, подлежащих решению.

Во второй части работы рассматривается выбранная для реализации проекта аппаратная составляющая системы управления, подобранная и необходимая компонентная база, а также все схемотехнические и программные решения, применяемые при реализации составных элементов ГЭП.

В третьей части рассмотрена структура системы НМИ.

В четвертой главе рассмотрен процесс разработки печатной платы для схемотехнической части ГЭП.

Результатом выполнения ВКР является готовый программно-аппаратный комплекс, необходимый для реализации ГЭП

Abstract

The topic of this graduate qualification work is “Electromagnetic interference generator for equipment control”.

The work includes an explanatory note on 60 pages, including 58 figures, 2 annexes, a list of references consisting of 20 sources, including 6 foreign sources and a graphical part on 6 A1 posters.

The purpose of this graduate qualification work is to automate the process of testing electronic equipment at the stage of complex verification of compliance with EMC requirements, by means of creating a generator of electromagnetic interference, which is a generator of nonlinear distortions in the circuit and provides quality improvement of the designed electronic equipment.

In the first part of the work the general concepts and provisions concerning electromagnetic compatibility of electronic devices and appliances are considered, in addition, the ready-made solutions existing on the market were analyzed and the basic concept of development with a certain number of tasks to be solved was defined.

In the second part of the work the hardware component of the control system selected for the project realization, the selected and necessary component base, as well as all circuit and software solutions used in the realization of the HEP components are considered.

The third part considers the structure of the HMI system.

The fourth chapter considers the process of developing a printed circuit board for the circuitry part of the HMI.

The result of the work is a ready hardware-software complex, necessary for the implementation of the HMP

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	7
1.1 Общие вопросы ЭМС.....	7
1.2 Анализ существующих решений.....	11
1.3 Анализ данных по проекту и определение его концепции	20
2 Разработка генератора электромагнитных помех для контроля аппаратуры	22
2.1 Аппаратное обеспечение системы управления ГЭП.....	22
2.2 Генератор треугольных импульсов.....	25
2.3 Генератор синусоидального сигнала	40
3 Разработка системы НМІ	48
3.1 Система визуализации ГЭП.....	48
3.2 Органы регулировки и управления ГЭП.....	51
4 Разработка печатной платы	54
Заключение	58
Список используемой литературы.....	59
Приложение А Перечень элементов к схеме электрической принципиальной ГЭП	61
Приложение Б Программный код системы управления ГЭП	62

Введение

В современном мире разнообразная электронная аппаратура продолжает активно внедряться в разные сферы жизни и деятельности людей для автоматизации разнообразных задач, облегчения трудоемких процессов и выполнения прочих сложных и точных или рутинных задач, что положительно сказывается на качестве жизни и получаемых качественных и количественных показателях в отраслевых сферах.

Разработка любого электронного устройства, после определения его основной концепции и функционала, начинается с подбора электронной компонентной базы и проектирования электрических схем. После выполнения данного этапа проектирования начинается процесс отладки и тестирования электрических и электронных частей разработанного устройства.

Ввиду того факта, что в подавляющем большинстве случаев электронные устройства и аппаратура работают в составе какой-либо объектно-ориентированной системы, к примеру электронные системы автомобиля, заключения о бесперебойной и штатной работе одного отдельно взятого устройства становится недостаточным, что связано с возможностью влияния устройств друг на друга через индуктивные и кондуктивные помехи.

«Исследованием совместимости электронных устройств при совместной работе занимается такая отрасль научно-исследовательской деятельности, как ЭМС. Проведение исследований по электромагнитной совместимости электронных приборов и устройств является основополагающим фактором для конечного выпуска электронной продукции, так как в ходе специализированных тестов проверяется как защищенность конкретного устройства от разнообразных электромагнитных помех так и вероятность создания нежелательных наводок, пагубно влияющих на работу системы, самим устройством» [11].

К одной из разновидностей помех, пагубно влияющих на работу системы, можно отнести нелинейные искажения в информационных и силовых цепях, являющиеся в том числе и следствием возникновения электромагнитных помех, наводимых из вне.

Преднамеренная и автоматизированная генерация нелинейных искажений в электронных цепях, при помощи специализированных устройств на этапе тестирования разработанной аппаратуры, положительно сказывается на качестве, надежности и стабильности функционирования конечного электронного продукта, а также позволяет своевременно оценить и скорректировать степень помехоустойчивости и реакцию системы на подобные аномальные ситуации.

Готовые решения в области генерации электромагнитных помех и нелинейных искажений не отличаются доступностью, портативностью и должной степенью автоматизации процесса тестирования, что усложняет общий цикл выполнения необходимых исследований. Исходя из этого, большой актуальностью обладает направление разработки устройств генерации нелинейных искажений и электромагнитных помех, отличающихся удобством эксплуатации, универсальностью, компактностью, должной степенью автоматизации процесса тестирования и приемлемой для большинства конечных пользователей ценой, напрямую зависящей от себестоимости генератора нелинейных искажений или электромагнитных помех.

Целью выполнения данной выпускной квалификационной работы является автоматизация процесса тестирования электронного оборудования на стадии комплексной проверки соответствия требованиям ЭМС, по средствам создания генератора электромагнитных помех, представляющего из себя генератор нелинейных искажений в цепи и обеспечивающего повышение качества проектируемой электронной аппаратуры.

1 Состояние вопроса

1.1 Общие вопросы ЭМС

Под электромагнитной совместимостью электронных приборов и устройств подразумевают штатное и предсказуемое функционирование приемников и передатчиков того или иного сигнала, иными словами, сигнал передатчиков должен достигать только необходимых и определенных функциональным процессом приемников, в свою очередь приемники должны реагировать только на сигналы, передаваемые их передатчиком, паразитные и нежелательные взаимные влияния должны отсутствовать [6, 20].

«Электронные устройства способны одновременно выполнять функции приемника и передатчика сигнала, отсюда, согласно стандарту VDE 0870 ЭМС определяют как способность электрического устройства удовлетворительно функционировать в его электромагнитном окружении, не влияя на это окружение, к которому принадлежат также другие устройства, недопустимым образом. Поэтому, электрическое устройство считается совместимым, если оно в качестве передатчика является источником помех не выше допустимых, а в качестве приемника обладает допустимой чувствительностью к посторонним влияниям, т.е. достаточной помехоустойчивостью или иммунитетом» [18].

«Сами по себе электромагнитные помехи представляют из себя случайные электромагнитные воздействия отдельно взятых электронных и электрических устройств друг на друга или нежелательное воздействие сторонней системы на рассматриваемую через функциональные и паразитные каналы связи» [11]. На рисунках 1 и 2 представлена классификация источников и приемников помех.

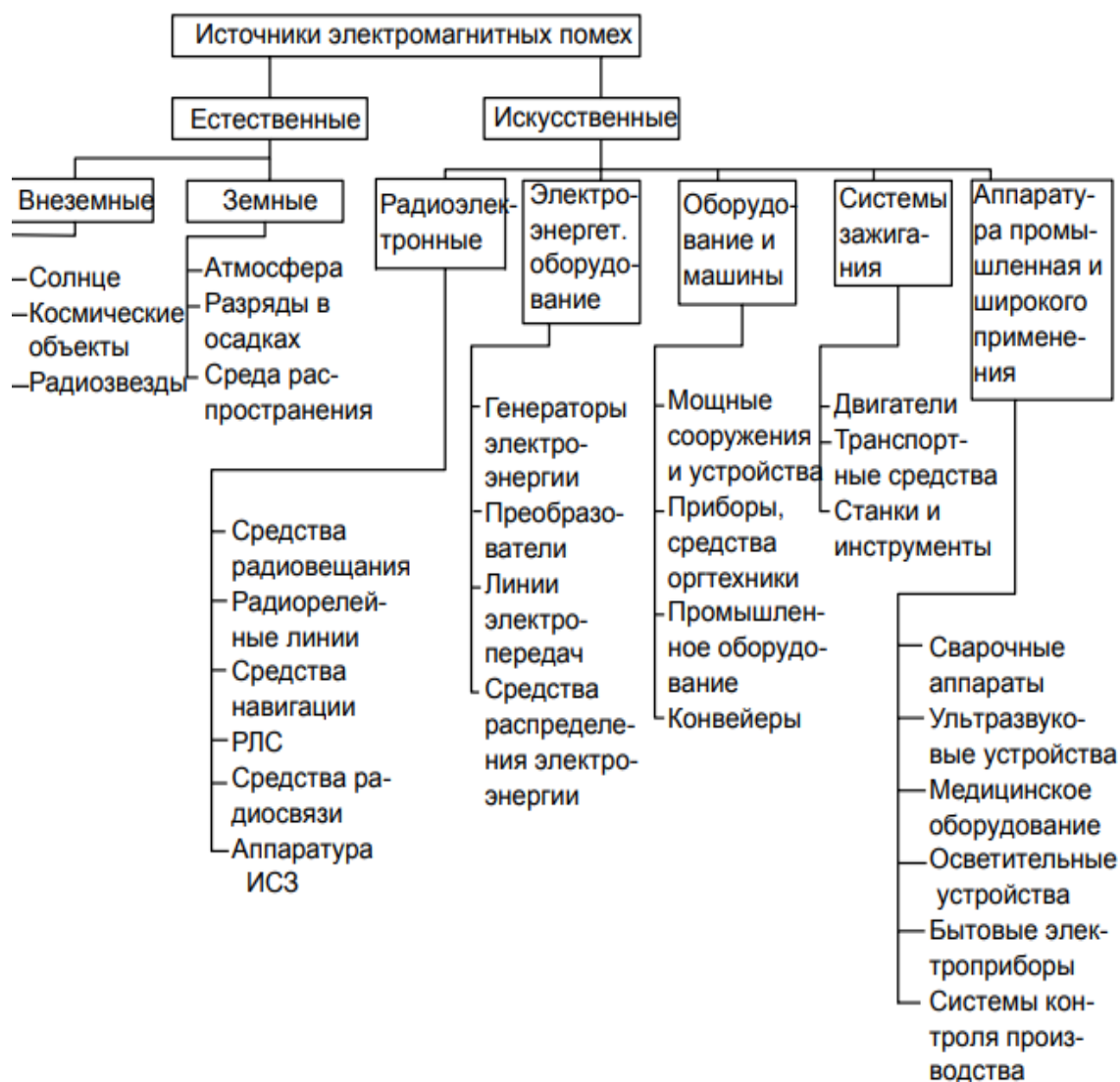


Рисунок 1 – Источники помех

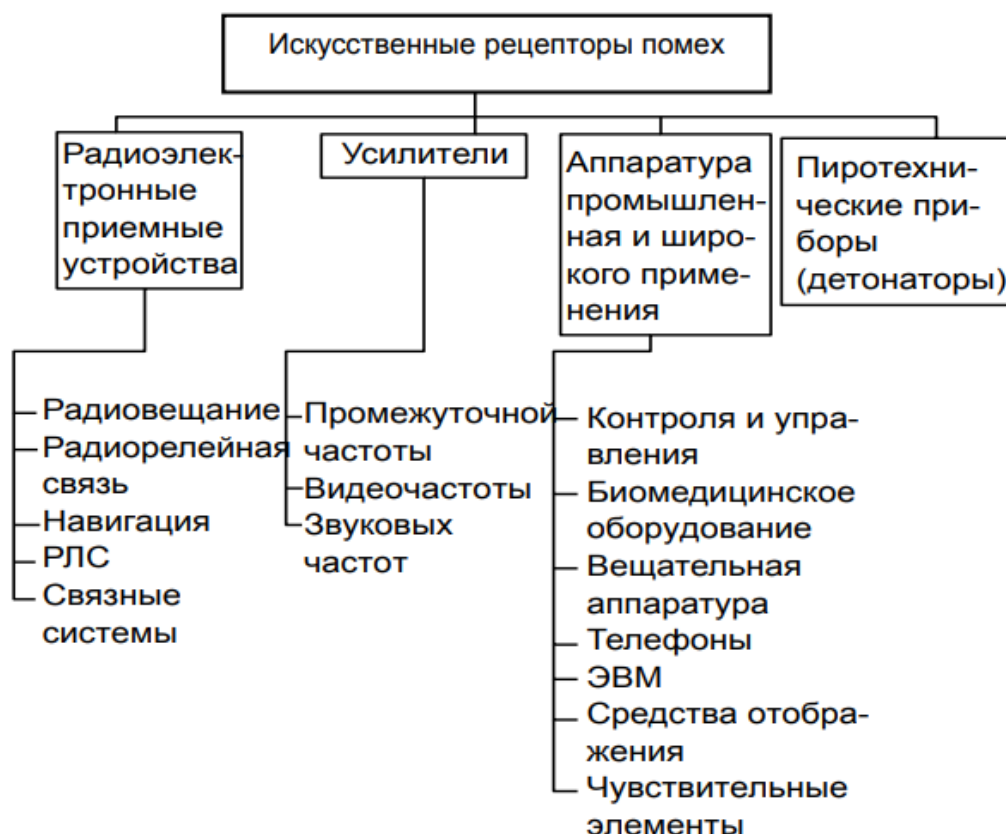


Рисунок 2 – Приемники помех

Проблема в области электромагнитной совместимости возникает у приемников сигнала в следствии искажения и нарушения процесса приема идеального полезного сигнала, в том числе из-за невозможности источника передать приемлемый к обработке сигнал, к примеру, помехи, поступающие от преобразователя частоты в приводной системе [19], используемой при автоматизации производственных процессов, способны выдавать наводки и нежелательные искажения передаваемых сигналов как по линии связи энкодера, так и по линии сигналов управления модуля частотного преобразователя и программируемого логического контроллера. В таких случаях речь ведется о наличии электромагнитных воздействий.

Среди основных разновидностей путей передачи и природы помех можно выделить 2 группы кондуктивные и индуктивные. Кондуктивными являются помехи, возникающие и передающиеся в системах и устройствах, имеющих жесткую связь, к примеру, соединены проводниками. Индуктивные же помехи распространяются в виде электромагнитных полей, распространяющихся в непроводящих средах [10,12]. На рисунках 3 и 4 представлены модель влияния и распространения электромагнитной помехи, а также модель межсистемного взаимодействия соответственно.

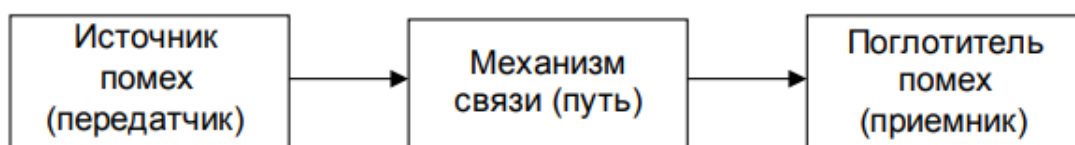


Рисунок 3 – Модель распространения ЭМ помехи

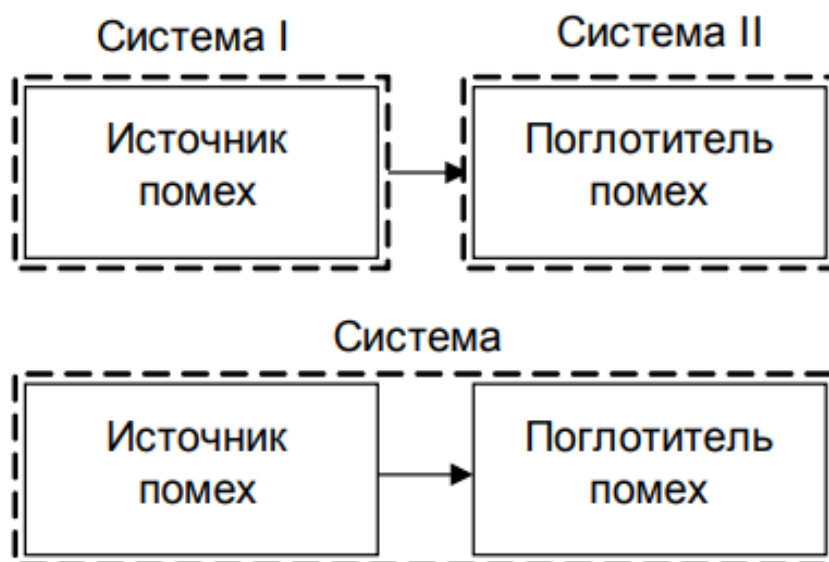


Рисунок 4 – Межсистемное и внутрисистемное влияние

1.2 Анализ существующих решений

Одним из следствий влияния электромагнитных помех являются возникающие нелинейные искажения в цепях питания и сигнальных цепях, негативно влияющие на конечную форму выходного сигнала устройства передатчика, предназначенного для приемника. Чтобы убедиться в этом соберем простейшую имитационную схему, моделирующую возникновение нежелательной помехи в сигнальной цепи устройства. Для моделирования данного процесса и всех последующих исследований в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы воспользуемся средой проектирования электронных схем Micro-Cap 12, обладающей обширным перечнем встроенных функциональных инструментов анализа и большим набором библиотек компонентной базы. Полученная имитационная схема представлена на рисунке 5.

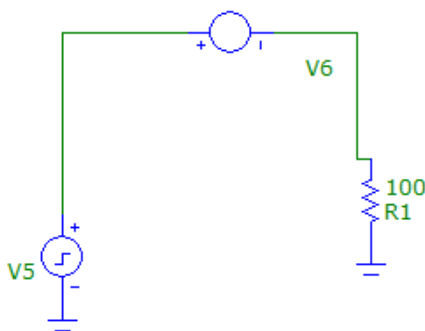


Рисунок 5 – Имитационная схема

Представленная выше схема состоит из источника полезного сигнала V5, имитации нагрузки приемника сигнала R1 и последовательно подключенного источника помех, возникающих в данной системе V6.

Для определения степени влияния источника помех на форму конечного выходного сигнала источника воспользуемся встроенным инструментом анализа по времени Transient analysis, осциллограммы выходного сигнала, полученные в ходе моделирования представлены на рисунке 6.

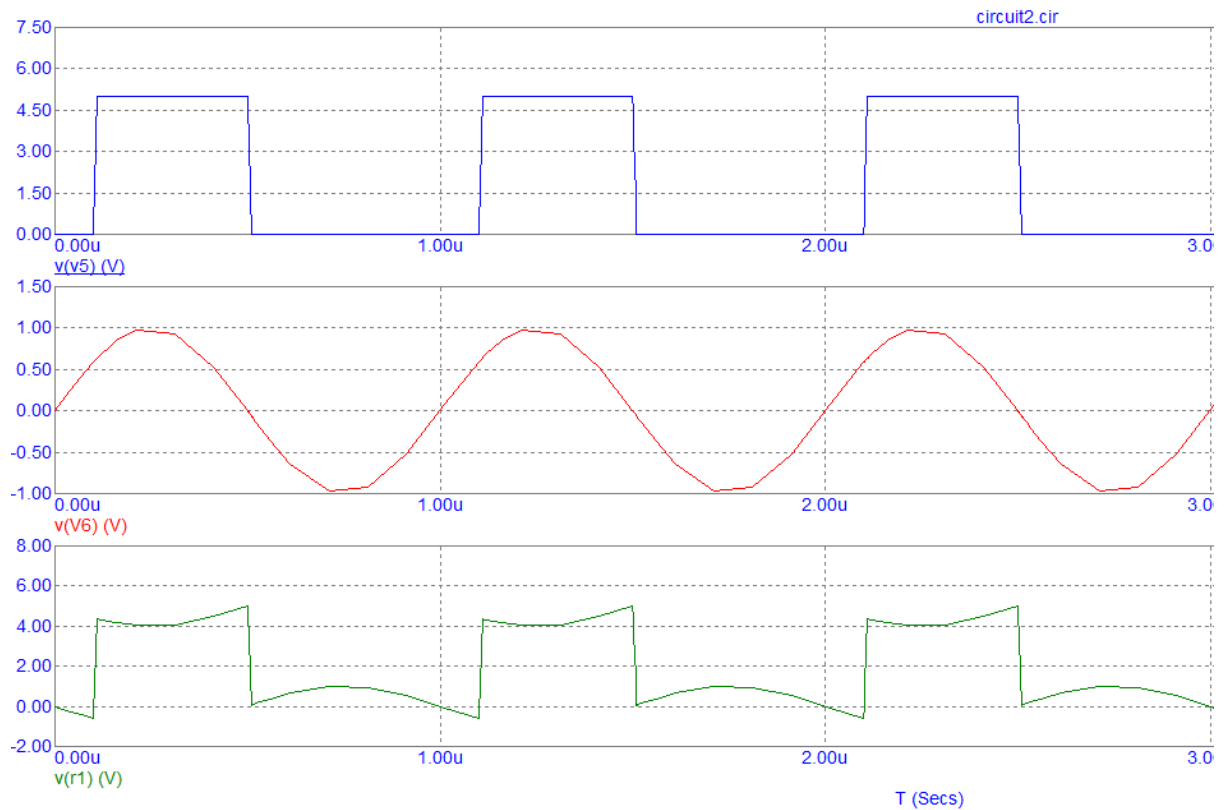


Рисунок 6 – Осциллограммы выходного сигнала

Как можно заметить, наложение нежелательного синусоидального сигнала помехи на идеальный и необходимый нам прямоугольный сигнал, влечет за собой значительное изменение конечного выходного сигнала для приемника, что в некоторых случаях может значительно отразиться на степени корректности реакции и функционировании устройства. Без включения источника помех сигнал на нагрузке полностью дублирует выходной сигнал источника V5.

Видоизменим схему, добавив в нее имитацию влияния паразитных емкостей проводных соединений и влияние проложенных рядом кабельных трасс, а также изменим настройки и периодичность сигнала помехи. Видоизмененная схема представлена на рисунке 7.

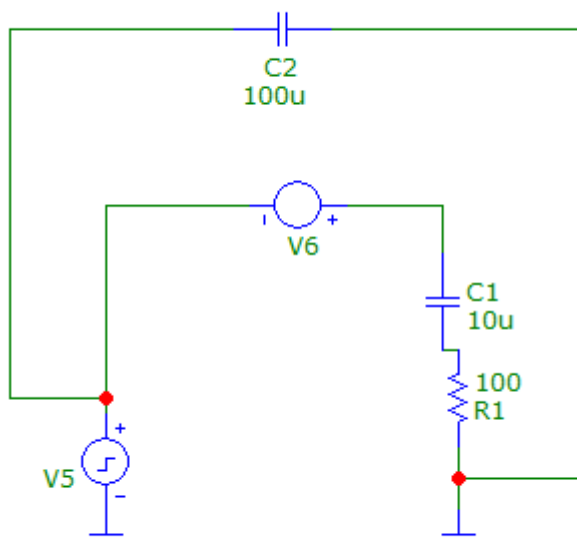


Рисунок 7 – Видоизмененная схема анализа влияния помех

На рисунке 8 представлены осциллограммы сигналов, полученных в ходе выполнения эксперимента.

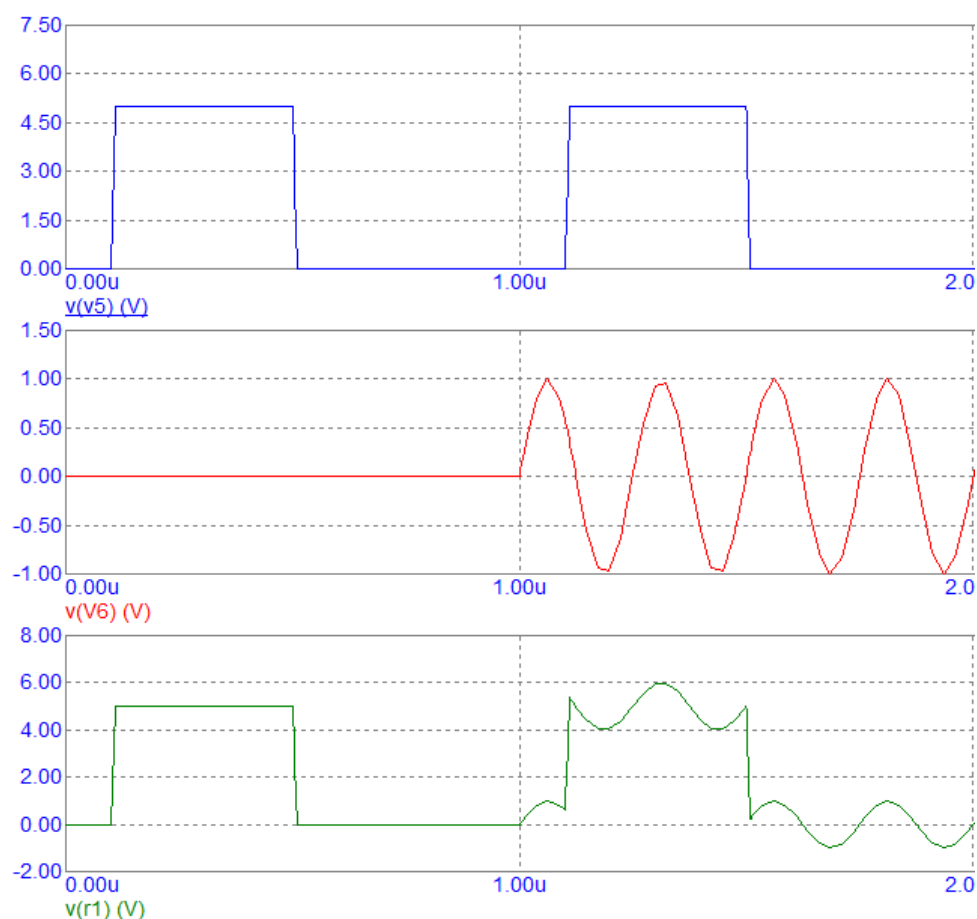


Рисунок 8 – Осциллограммы выходных сигналов

Как видно из рисунка выше, при наличии всех вышеперечисленных факторов, при возникновении помехи форма конечного выходного сигнала, предназначенного приемнику значительно отличается от исходного прямоугольного сигнала, что может привести к непредсказуемым реакциям со стороны приемника, вплоть до выхода его отдельных элементов из строя. Именно поэтому критически важно проводить подобные ЭМС тесты оборудования на стадии их проектирования.

На рынке готовых решений существует множество генераторов сигналов разнообразной формы и характеристик, представленных в модульном исполнении, к примеру генераторы импульсов АКПП, представленные на рисунке 9.



АКИП-3304



АКИП-3302

Рисунок 9 – Генераторы импульсов АКИП

Генераторы АКИП обладают технологией прямого цифрового синтеза; высокой точностью установки временных параметров сигнала, разнообразными режимами генерации импульсов, возможностью регулировки формы выходного сигнала и прочих параметров. На рисунке 10 представлены некоторые технические характеристики генератора импульсов АКИП 3300, заявляемые заводом изготовителем.

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Вид выходного сигнала	Синхроимпульс, одиночный или парный импульс
	Временные параметры	Период следования 20 нс...10000 с Длительность импульса и задержка 5 нс...10000 с
	Разрешение	5 нс при временном интервале менее 4 с 10 мкс при временном интервале более 4 с
	Погрешность установки временного интервала	$\pm(5 \cdot T \cdot 10^{-5} + 5 \text{ нс})$
	Погрешность опорного источника частоты	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$
	Время нарастания/спада	Не более 10 нс
	Выброс	Не более 10% при амплитуде импульса 5 Впик на 50 Ом
	Вход внешней опорной частоты	5 и 10 МГц, 0,5 В скз
АМПЛИТУДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Каналы	2 канала с регулируемой амплитудой, 1 канал ТТЛ АКИП-3301: 1 канал с регулируемой амплитудой, 2 канала ТТЛ)
	Диапазон амплитуды	Канал А: $\pm(25 \text{ мВпик} \dots 5 \text{ Впик})$ на нагрузке 50 Ом с аттенуатором Канал В: $\pm(250 \text{ мВпик} \dots 5 \text{ Впик})$ на нагрузке 50 Ом Канал С: ТТЛ-уровень
	Разрешение	10 мВпик
	Погрешность установки амплитуды	$\pm(2\% + 25 \text{ мВпик})$
	Диапазон смещений	$\pm(25 \text{ мВ} \dots 5 \text{ В})$ на нагрузке 50 Ом
	Разрешение	20 мВ
	Погрешность установки смещения	$\pm(5\% + 25 \text{ мВ})$
	Внутреннее сопротивление выхода	50 Ом
СИНХРОЗАПУСК	Режимы	Внутренний, внешний, однократный
	Диапазон частот внешнего синхросигнала	1 Гц...10 МГц (меандр)
	Диапазон уровней внешнего синхросигнала	1 Впик...20 Впик
	Сопротивление входа внешней синхронизации	Более 100 кОм
ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ (АКИП-3304, 3305)	Входное сопротивление	50 Ом
	Выходное напряжение	$\pm 50 \text{ Впик}$ для АКИП-3304 (до 1 МГц) $\pm 150 \text{ Впик}$ для АКИП-3305 (до 500 кГц)
	Выходной ток	100 мА
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	Дисплей	Индикатор VFD 40 символов для серии АКИП-3301/3302 Индикатор ЖКИ 5,7 дюймов для серии АКИП-3303/3304/3305
	Напряжение питания	230 В ($\pm 15\%$), 50 / 60 Гц, 50 Вт
	Габаритные размеры, масса	254 x 103 x 384 мм; 3 кг (без усилителя)

Рисунок 10 – Технические характеристики генераторов АКИП 3300

К недостаткам представленного готового решения можно отнести недостаточную степень автоматизации тестирования разработанной электронной схемы при использовании данного устройства в качестве генератора помех сигнала, высокую стоимость устройства (варьируется от 400 до 500 тысяч рублей) и отсутствие гибкости системы.

В качестве еще одного примера готового решения в области генерации импульсов рассмотрим генератор DG4162, представленный на рисунке 11.



Рисунок 11 – Цифровой генератор DG4162

На рисунке 12 представлены некоторые технические характеристики цифрового генератора DG4162, заявляемые заводом изготовителем.

Параметр	Значение
Число каналов	2
Частота	160 МГц
Частота дискретизации	500 МВ/б/сек
Разрешение по вертикали	14 бит
Стабильность частоты	2 ppm
Виды сигналов	до 150 встроенных в память форм сигналов
Виды модуляции	AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK, BPSK, QPSK, 3FSK, 4FSK, OSK, PWM
Частотомер	встроенный 7-разрядный до 200МГц
Дисплей	ЖК, 7 дюймов, 800х480 точек
Габариты	313х160,7х116,7 мм
Вес	3,2 кг

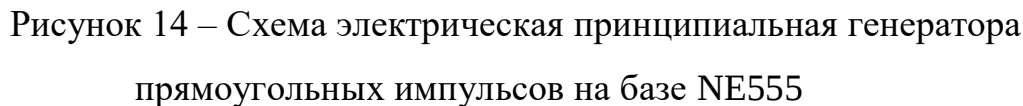
Рисунок 12 – Технические характеристики генератора DG4162

Данный генератор поддерживает возможность генерации до 150 встроенных в память форм сигналов, что частично может автоматизировать процесс тестирования помехоустойчивость электронных устройств, при условии наличия приемлемой для теста формы сигнала. Однако представленный генератор также не отличается гибкостью и мобильностью, а также имеет существенную стоимость.

В качестве более дешевого аналога готовых решений в области генерации импульсов разной формы и характеристик можно рассмотреть дискретные платы от разных производителей, к примеру готовый генератор прямоугольных импульсов на таймере NE555, представленный на рисунке 13.



Рисунок 13 – Готовый генератор импульсов на базе NE555



19

1.3 Анализ данных по проекту и определение его концепции

Для выполнения перечня задач в рамках выпускной квалификационной работы были изучены основные принципы ЭМС, методы основных исследований устройств на предмет помехозащищенности и электромагнитной совместимости с другими устройствами. Произведен поиск и анализ готовых решений в области имитации влияния электромагнитных помех на электрические цепи за счет генерации импульсов определенной формы и внесении нелинейных искажений в информационные цепи.

Ориентируясь на выданное техническое задание, регламентирующее работы, выполняемые в рамках данной выпускной квалификационной работы, необходимо разработать устройство для последовательного или параллельного подключения в сигнальные и питающие цепи для генерации импульсов помех. Амплитуда генерируемых импульсов должна осуществляться в пределах от 0 до 2 В, а питание устройства осуществляться от сети 12 В DC.

Форма импульсов должна соответствовать следующим требованиям:

- одиночный треугольный, длительностью не более 0,5 мкс;
- затухающий синусоидальный с возможностью выбора в частотном диапазоне 0,1; 1,0; 10,0 МГц (время затухания не более 1 мс).

Периодичность генерации импульсов должна осуществляться следующим образом:

- непрерывная генерация 1 раз в секунду;
- одиночный ручной запуск.

После проведения анализа готовых решений, представленных на рынке, было решено, что проектируемый ГЭП должен отличаться гибкостью и функциональностью системы, а также должной степенью автоматизации процесса тестирования в сочетании с наименьшим возможным увеличением себестоимости устройства. Нарботки, схемы, алгоритмы и программы, полученные в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы, должны предоставлять исчерпывающую информацию для

последующей сборки прототипа генератора электромагнитных помех и его эксплуатации.

Для реализации автоматизации процесса тестирования сигнальных цепей в разрабатываемый генератор электромагнитных помех решено было включить систему управления, реализованную на базе микроконтроллера. В процессе подбора устройства управления и аппаратного обеспечения системы управления предпочтения будут отдаваться микроконтроллерам, имеющим AVR архитектуру, а также отладочным платам, реализованным на их основе.

Исходя из анализа технического задания и всего вышеперечисленного, был составлен список задач, которые необходимо выполнить в рамках данной выпускной квалификационной работы для достижения поставленной цели:

- разработка структуры устройства и необходимых внутренних и внешних функциональных связей;
- выбор и анализ необходимой компонентной базы;
- разработка необходимых схемотехнических решений;
- разработка программного кода системы управления и системы НМІ.

Выводы по разделу

В данном разделе выпускной квалификационной работы была поставлена основная цель выполнения работы и обозначен список задач, подлежащих проработке и решению. Был проведен анализ рынка готовых решений в области генерации сигналов и электромагнитных помех, рассмотрены основные понятия в ЭМС, виды помех и каналы их передачи, а также определена основная концепция разрабатываемого устройства

2 Разработка генератора электромагнитных помех для контроля аппаратуры

2.1 Аппаратное обеспечение системы управления ГЭП

На текущем этапе выполнения выпускной квалификационной стояла задача подбора всей необходимой компонентной базы для разработки устройства, проектирования структуры разрабатываемого устройства и всех необходимых электрических связей.

Начать было решено с подбора аппаратной части планируемой системы управления ГЭП ввиду того, что от особенностей и параметров ее функционирования будет зависеть последующий выбор составных элементов и схемотехнических решений.

При выборе аппаратной платформы для реализации системы управления ГЭП руководствовались следующими факторами:

- наличие достаточных вычислительных мощностей устройства управления;
- доступность процессора и составных компонентов;
- гибкость и функциональность прикладных систем IDE.

Учитывая все вышеперечисленное, выбор устройства управления был отдан в пользу аппаратной платформы Arduino, а также ее прямым аналогам от других производителей. Отладочные платы данного типа активно применяются при решении задач в области проектирования и прототипирования электронных устройств и систем управления.

Линейка отладочных плат Arduino представлена множеством готовых устройств, отличающихся форм-фактором, техническими характеристиками, набором встроенного функционала и микроконтроллерами на борту.

Руководствуясь тем фактором, что выбранную отладочную плату планируется использовать в том числе и для непосредственного участия в формировании некоторых необходимых сигналов решено было выбрать плату Arduino Mega на базе микроконтроллера ATmega 2560 [16]. Выбранная отладочная плата представлена на рисунке 15.



Рисунок 15 – Arduino Mega

Отладочная плата Arduino Mega спроектирована на базе микроконтроллера ATmega2560. Рассматриваемая плата имеет 54 цифровых входных/выходных каналов, 14 каналов, адаптированных под работу с ШИМ сигналом, 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, тактовую частоту работы 16 МГц, USB коннектор, разъем питания и разъем ICSP. На рисунке 16 представлены некоторые технические характеристики рассматриваемой платы [17].

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение	5В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12В
Входное напряжение (предельное)	6-20В
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 из которых могут работать также как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
Флеш-память	256 КВ (из которых 8 КВ используются для загрузчика)
ОЗУ	8 КВ
Энергонезависимая память	4 КВ
Тактовая частота	16 МГц

Рисунок 16 – Технические характеристики Arduino Mega

На рисунке 17 представлено схематичное изображение расположения портов на отладочной плате.

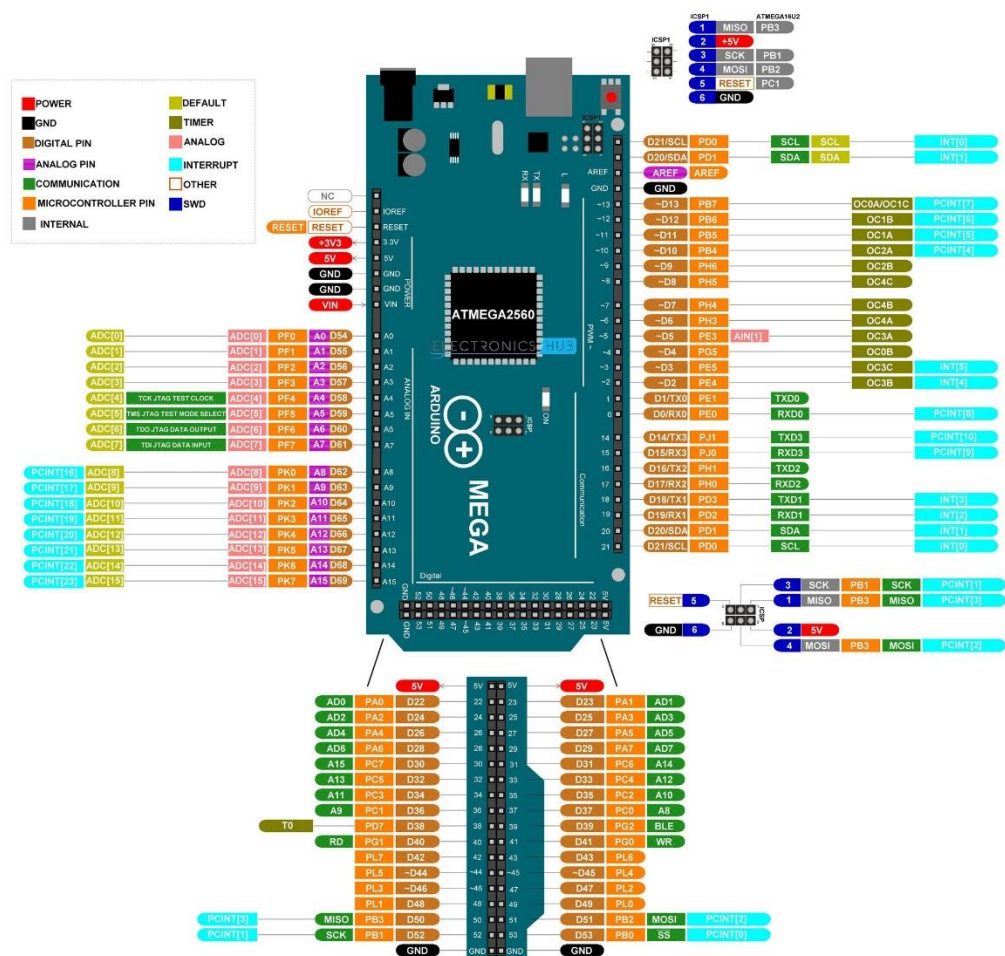


Рисунок 17 – Расположение портов Arduino Mega

2.2 Генератор треугольных импульсов

Для генерация чистого треугольного сигнала возникает необходимость в разработке схемотехнических решений и введении специальных программных надстроек для генерации треугольных импульсов, отвечающих требованиям представленным в техническом задании, ввиду отсутствия возможности генерации сигналов подобной формы стандартными программными средствами Arduino без применения специализированных функций, прямого обращения к регистрам, а также настройки Fast PWM и внутренних таймеров/счетчиков, однако применение вышеупомянутых глубоких надстроек нецелесообразно для решения поставленной задачи[1-5].

В качестве основы для последующего формирования треугольного сигнала решено было использовать прямоугольный сигнал. Существует множество надежных схемотехнических решений, обеспечивающих возможность генерирования импульсов прямоугольной формы, к примеру, генератор на таймере 555, схема которого представлена на рисунке 18.

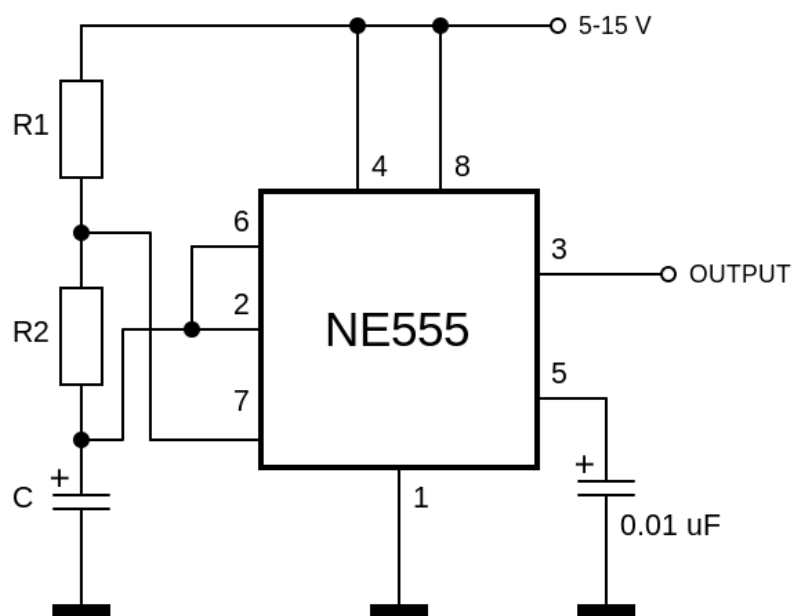


Рисунок 18 – Генератор прямоугольных импульсов NE555

В качестве еще одного решения для формирования прямоугольных импульсов, а помимо того, необходимых нам треугольных можно рассмотреть схему, состоящую из последовательно включенных триггера Шмитта и интегрирующего устройства, к примеру на операционном усилителе. Пример схемы такого генератора представлен на рисунке 19.

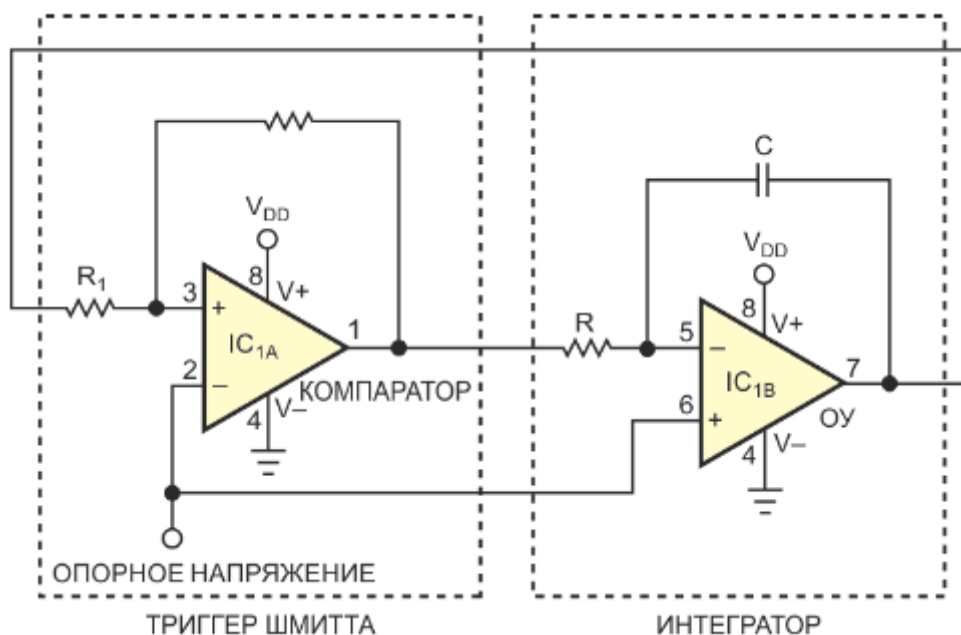


Рисунок 19 – Генератор прямоугольных и треугольных импульсов

Интегрирование тока, который возникает в следствии протекания постоянного напряжения через резистор, образует на выходе операционного усилителя, включенного в цепь интегратора, линейно нарастающее напряжение. Данное напряжение поступает на вход триггера Шмитта, сигнал с выхода которого подается обратно на интегратор. Сам по себе триггер Шмитта является электронным устройством с двумя устойчивыми состояниями 0 и 1. В момент достижения определенного порога напряжения на входе триггера, обуславливающее изменение его состояния, устройство переключается из одного устойчивого состояния в другое. На рисунке 20 представлен график, иллюстрирующий работу триггера.

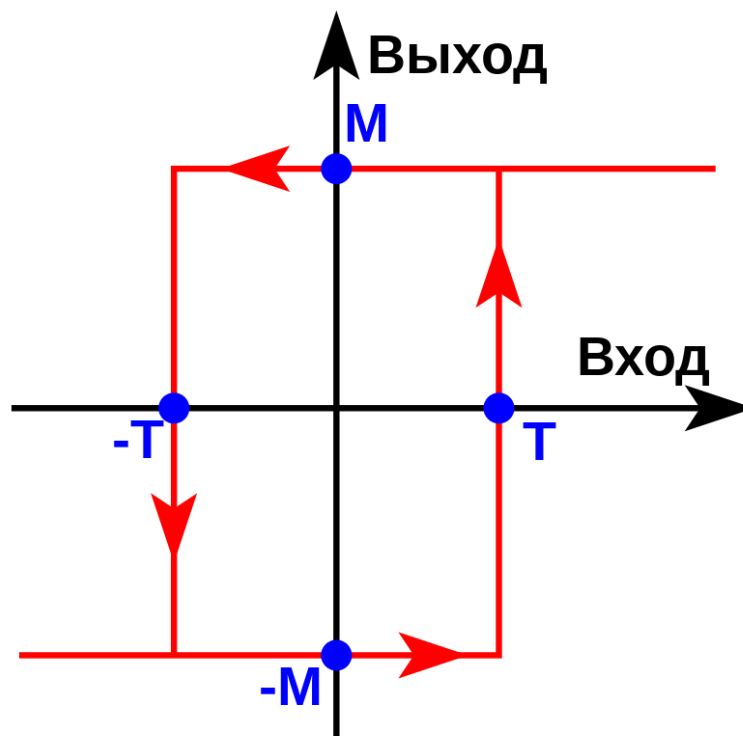


Рисунок 20 – Петля гистерезиса триггера Шмитта

Резкие изменения состояния на выходе триггера Шмитта, в рассматриваемой нами схеме, определяют напряжения пиков выходных треугольных импульсов. Эти изменения, в свою очередь, зависят от входных пороговых напряжений, установленных для триггера Шмитта. Однако, стоит отметить, что пики треугольных импульсов в этой схеме должны быть симметричны относительно опорного напряжения, подаваемого на инвертирующий вход компаратора. Например, чтобы получить треугольные импульсы размахом от 0.5 до 4.5 В, требуется опорное напряжение $(0.5 \text{ В} + 4.5 \text{ В}) / 2 = 2.5 \text{ В}$.

Убедимся в работоспособности данного схемотехнического решения собрав и промоделировав аналогичную по функционалу схему в среде Micro-Cap 12. Собранная и подлежащая исследованию схема представлена на рисунке 21.

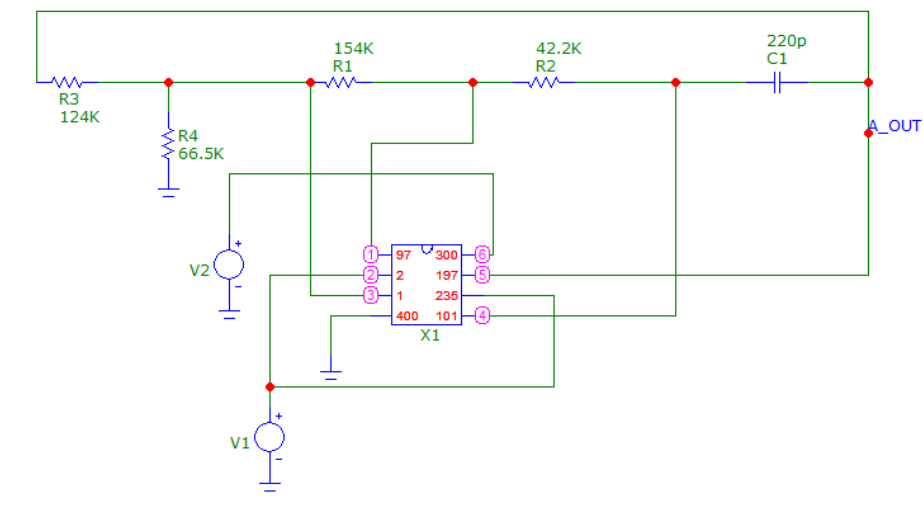


Рисунок 21 – Генератор треугольных импульсов

В данной схеме вместо отдельных блоков компаратора и интегратора используется микросхема MAX9000 содержащая быстродействующий операционный усилитель, 185-наносекундный компаратор и прецизионный источник опорного напряжения (ИОН) 1.23 В, равного ширине запрещенной зоны. На рисунке 22 представлена осциллограмма работы собранного генератора.

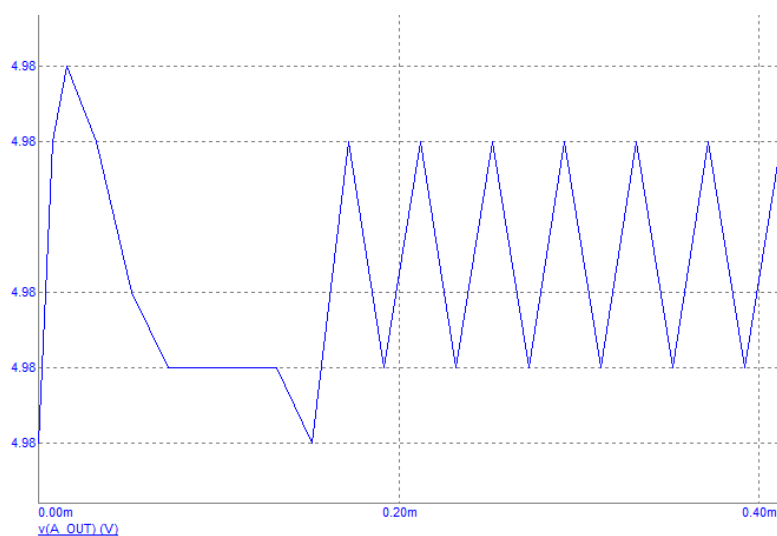


Рисунок 22 – Осциллограмма работы генератора

Несмотря на готовые типовые схемотехнические решения для обеспечения должной степени автоматизации и гибкости разрабатываемого устройства в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы мы будем генерировать прямоугольные импульсы для последующего их преобразования при помощи встроенных дискретных выходов отладочной платы Arduino Mega, ввиду удобства и широкого спектра возможностей по регулировке и настройке параметров сигнала, однако некоторые схемотехнические решения, рассмотренные выше будут использованы для преобразования формы сигнала. На рисунке 23 представлена структурная схема генератора треугольных импульсов на базе используемого микроконтроллера ATmega 2560.

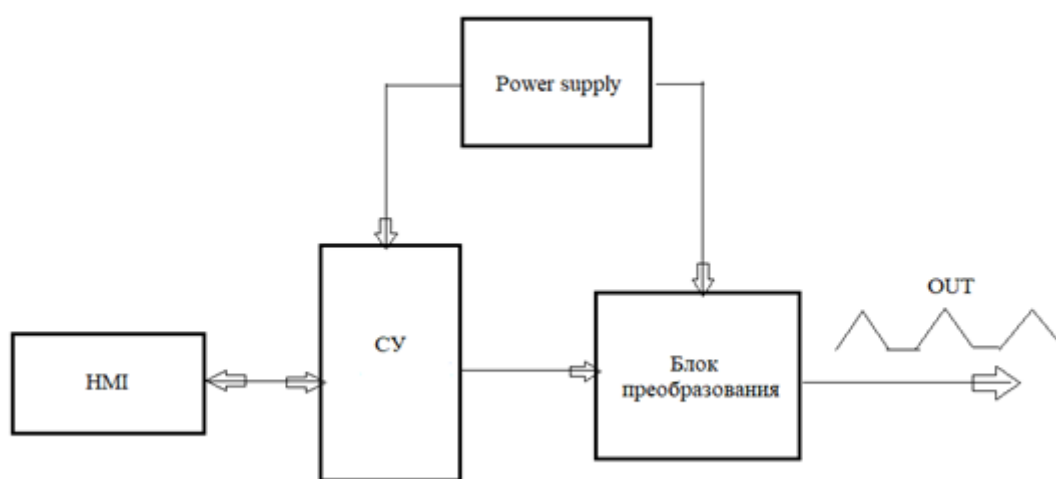


Рисунок 23 – Структурная схема генератора треугольных импульсов

Существует несколько способов генерации прямоугольного сигнала с портов микроконтроллера Atmega 2560, самым простейшим является использование стандартных функций подачи высокого и низкого логического уровня на выбранный порт отладочной платы, как показано на рисунке 24.

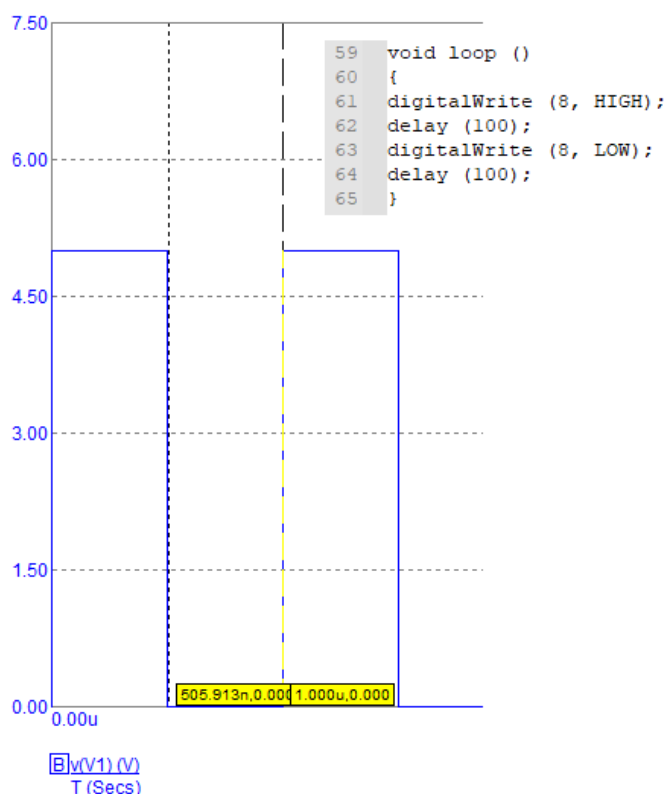


Рисунок 24 – Использование стандартных функций Arduino для генерации прямоугольного сигнала

При использовании данного способа генерации мы можем программно регулировать длительность высокого и низкого логического уровня на необходимом нам выводе, в следствии чего определяя период и частоту импульсов. Однако в рамках выполнения текущей работы данный способ не удовлетворяет нашим требованиям, ввиду отсутствия возможности регулирования высокого уровня логического сигнала.

Для обеспечения возможности регулирования временных показаний и показаний рабочего напряжения на нагрузке генерируемого сигнала необходимо воспользоваться широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). ШИМ сигнал представляет собой цифровой сигнал, который модулируется для управления мощностью, скоростью и/или положением устройств в автоматизированной системе, а также для модулирования более сложных

составных сигналов. На рисунке 25 представлен ШИМ сигнал с разной степенью заполнения.

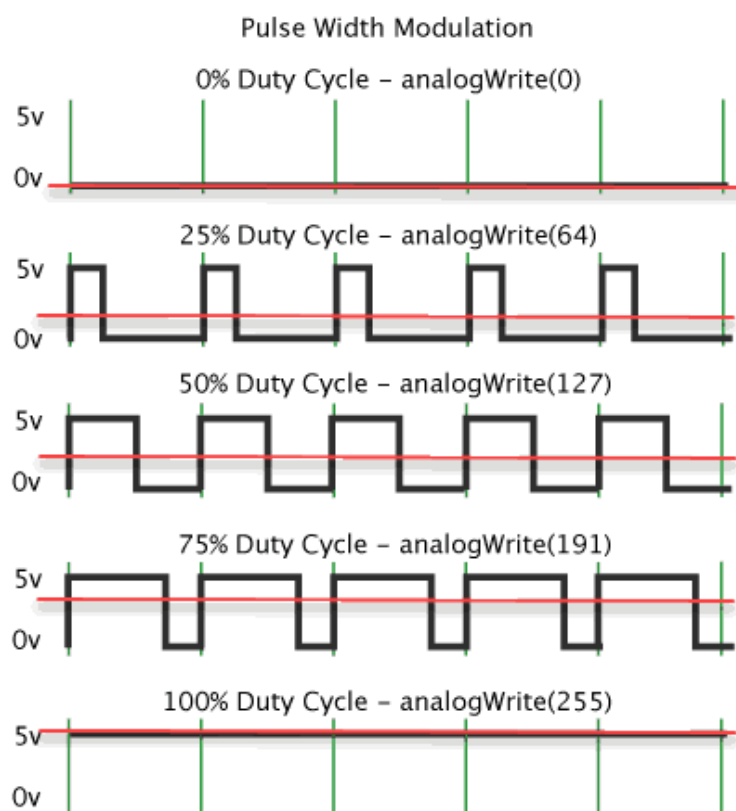


Рисунок 25 – ШИМ сигнал

Результаты эксперимента, демонстрирующего использование простейших функций генерации ШИМ сигнала с разным коэффициентом заполнения, а также влияние данного сигнала на нагрузку представлены на рисунке 25.

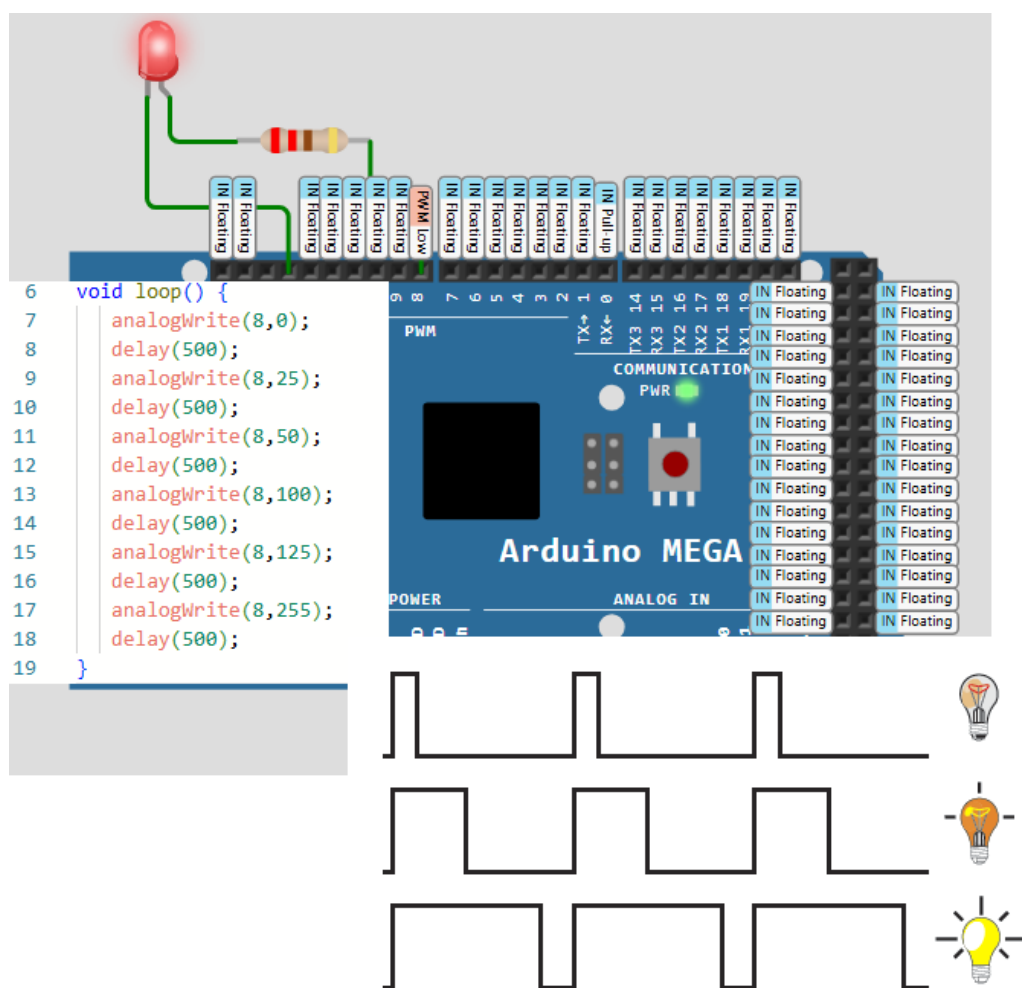


Рисунок 26 – Работа ШИМ сигнала

Из рисунка, представленного выше, видно, что при изменении коэффициента заполнения ШИМ сигнала увеличивается интенсивность излучения светодиода, что свидетельствует об изменении подаваемого на него напряжения. Однако, стоит помнить, что аппаратная платформа Arduino способна принимать, обрабатывать и генерировать сигналы в диапазоне от 0 до 5 В DC и нечувствительна к сигналам отрицательной полярности из чего следует невозможность использования интеграторов на базе операционного усилителя [8,9]. Убедимся в этом, промоделировав схему, состоящую из блока имитации подачи ШИМ сигнала с вывода микроконтроллера и блока интегратора. Исследуемая схема представлена на рисунке 27.

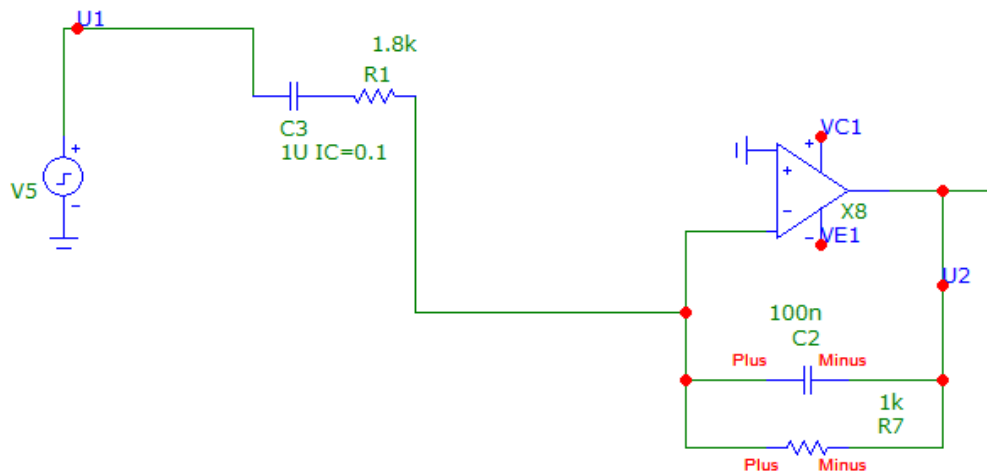


Рисунок 27 – Исследуемая электрическая схема

На рисунке 28 представлены осциллограммы входного и выходного сигнала.

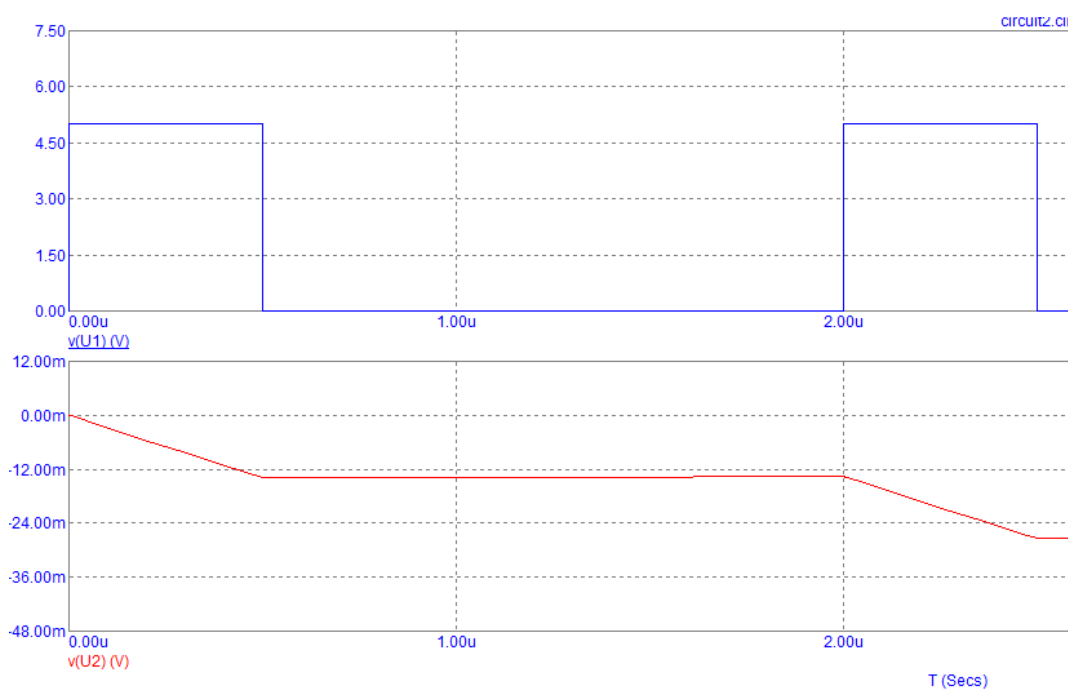


Рисунок 28 – Осциллограмма входного и выходного сигнала

Как и ожидалось, при разных настройках пассивных и активных элементов электронной цепи мы, как правило, будем наблюдать бесконечную зарядку конденсатора, ввиду отсутствия у него пути разряда и невозможности переключения ОУ от приходящего импульса отрицательной полярности. Видоизменим рассматриваемую схему и попробуем подать на интегратор двуполярный прямоугольный импульс. Измененная схема представлена на рисунке 29.

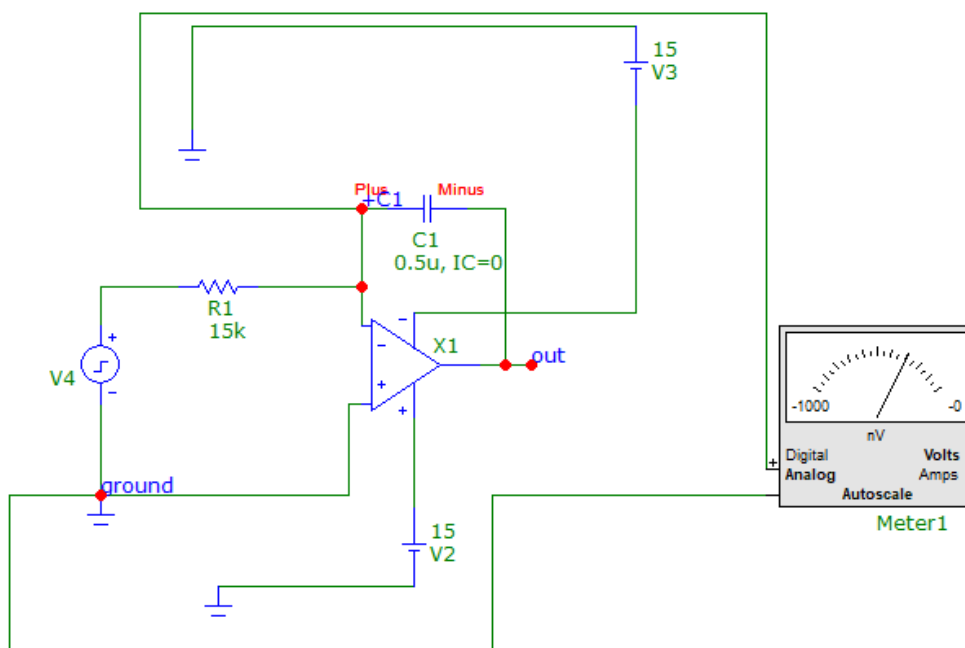


Рисунок 29 – Видоизмененная схема интегратора

На рисунке 30 представлена осциллограмма, иллюстрирующая работу данной схемы.

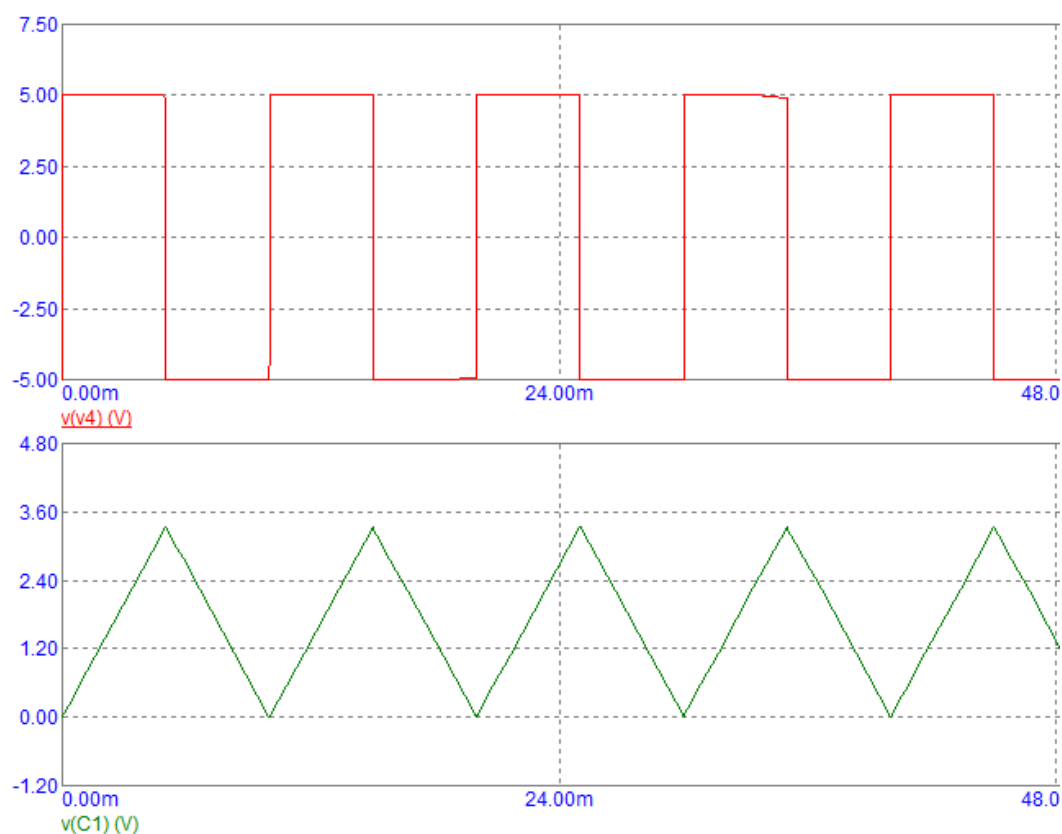


Рисунок 30 – Осциллограмма работы генератора

Из рисунка выше видно, что при данных условиях интегратор работает в штатном и ожидаемом режиме. Исходя из этого, возникает необходимость реализации возможности подачи на вход интегратора двуполярного импульса с вывода микроконтроллера.

Решено было сформировать необходимый двуполярный прямоугольный импульс, используя 2 вывода микроконтроллера, один из которых будет генерировать сигнал с задержкой, равной длительности импульса с другого вывода микроконтроллера, который, в свою очередь будет подаваться на вход инвертирующего операционного усилителя с коэффициентом усиления равным единице, после чего оба сигнала будут подаваться на вход сумматора. Схема, реализующая работу данной системы с указанными параметрами генераторов представлена на рисунке 31.

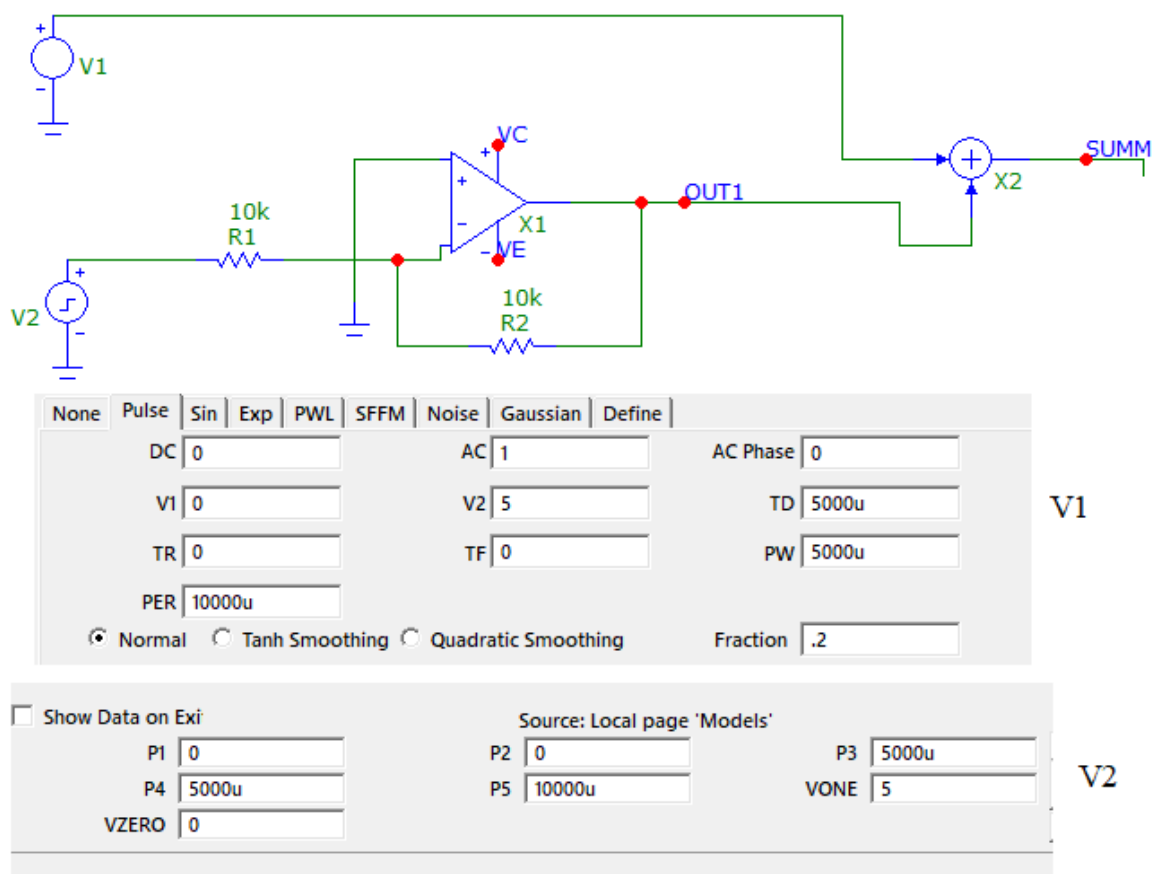
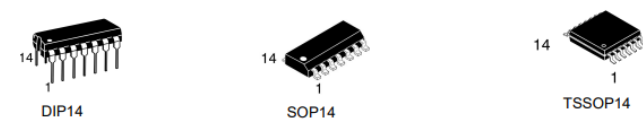


Рисунок 31 – Схема формирования двуполярного прямоугольного сигнала

В качестве суммирующего устройства в данной схеме использован стандартный блок сумматора напряжения, при сборке реальной схемы вместо сумматора X2 можно использовать, к примеру интегральную микросхему 74НС32, реализующую функцию логического ИЛИ. Микросхема 74НС32 и некоторые ее технические характеристики, заявляемые заводом изготовителем, представлены на рисунке 32.



参数名称	符号	测试条件	最小	典型	最大	单位
电源电压	V_{CC}	-	2.0	5.0	6.0	V
输入电压	V_I	-	0	-	V_{CC}	V
输出电压	V_O	-	0	-	V_{CC}	V
工作环境温度	T_{amb}	-	-40	+25	+85	°C
输入上升/下降沿 延时	t_r, t_f	$V_{CC} = 2.0V$	-	-	100 0	ns
		$V_{CC} = 4.5V$	-	6.0	500	ns
		$V_{CC} = 6.0V$	-	-	400	ns

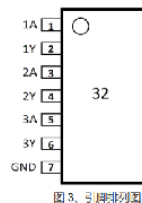
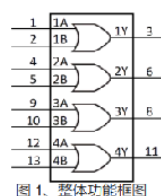


Рисунок 32 – ИМС 74НС32

На рисунке 33 представлена осциллограмма, иллюстрирующая работу собранной ранее схемы.

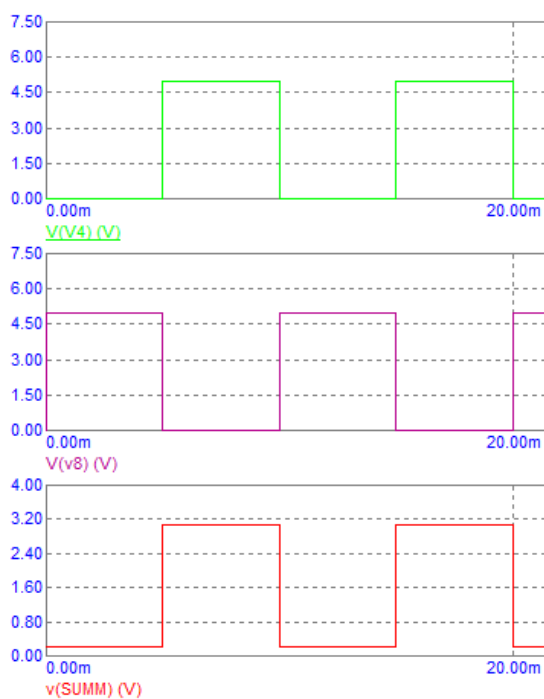


Рисунок 33 – Осциллограмма работы генератора двуполярного прямоугольного импульса

После успешного формирования двуполярного прямоугольного сигнала необходимо преобразовать его в треугольные импульсы при помощи ранее рассматриваемого интегратора на базе операционного усилителя. Формула, необходимая для настройки интегратора и регулирования выходного сигнала представлена на рисунке 34.

$$U_{BbIX} = \frac{1}{R1C1} \int U_{BX}$$

$$\tau = R1C1$$

Рисунок 34 – Настройка интегратора

На рисунке 35 представлен окончательный вариант электрической схемы генератора треугольных импульсов.

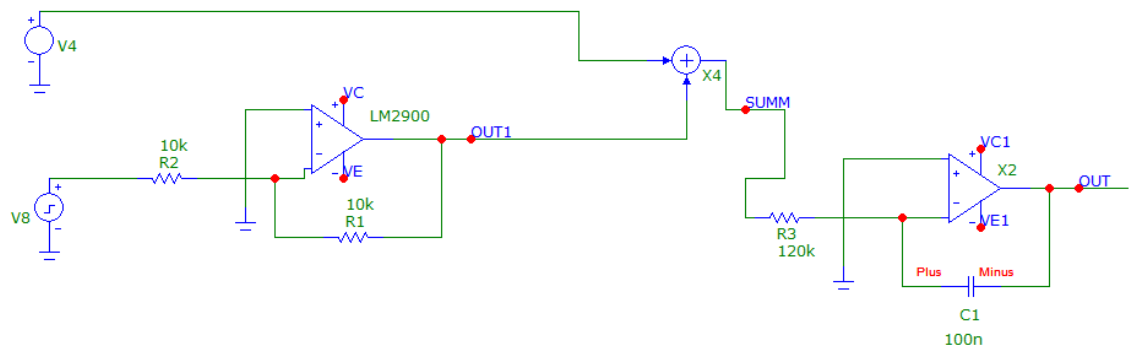


Рисунок 35 – Схема электрическая принципиальная генератора треугольных импульсов

В цепь интегратора был дополнительно включен шунтирующий конденсатор R4, препятствующий появлению дрейфа выходного сигнала, связанного с зарядом конденсатора токами утечки и смещения ОУ, а настройка амплитуды выходного сигнала будет производиться при помощи изменения напряжения потенциометра R3. На рисунке 36 представлена осциллограмма, иллюстрирующая работу спроектированной схемы.

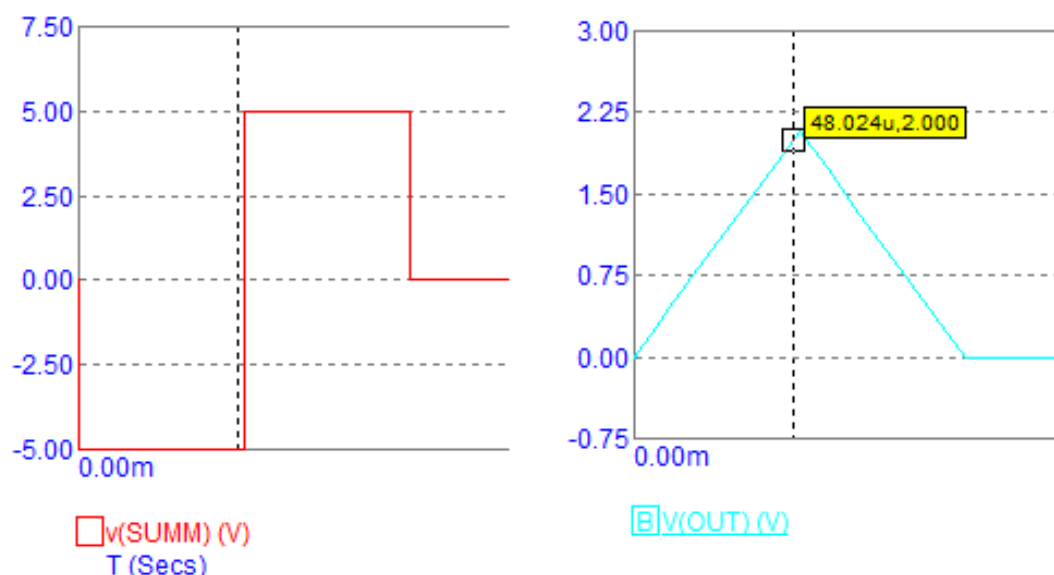


Рисунок 36 – Осциллограмма работы генератора

Рассмотренная реализация генератора треугольных импульсов, являющегося составной частью ГЭП, дает пользователю возможность гибкой настройки параметров выходного сигнала за счет изменения характеристик интегратора и выходных сигналов с выводов микроконтроллера при помощи функциональных органов управления на простейшей панели оператора.

2.3 Генератор синусоидального сигнала

Как упоминалось ранее, ШИМ сигнал при использовании соответствующих настроек можно использовать и для генерации сложных аналоговых сигналов, в том числе и синусоидального, как показано на рисунке 37.

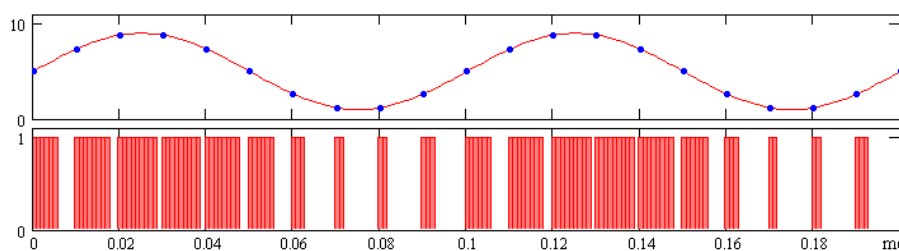


Рисунок 37 – ШИМ синусоида

Таким образом, изменяя частоту и коэффициент заполнения, генерируемого ШИМ сигнала мы можем получить синусоидальной формы. Цифро-аналоговый преобразователь Arduino, участвующий в этом процессе имеет размерность 8 бит, следовательно, ЦАП и АЦП способен выдавать выходные значения в диапазоне от 0 до 255, где значение 0 соответствует напряжению 0 В, а число 255 соответствует высокому логическому уровню напряжения микроконтроллера, а именно 5 В, как показано на рисунке 38 [13,17].

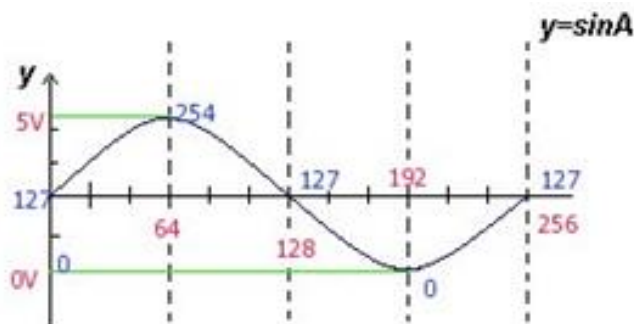


Рисунок 38 – Синусоидальный сигнал ЦАП Arduino

В данном случае начальное значение синусоиды принято за 127 и для одного периода значение функции поменяется 255 раз, стоит отметить, что при увеличении частоты дискретизации, иными словами увеличении количества точек, синусоида будет вырисовываться точнее. Для того, чтобы сгенерировать первичную синусоиду для последующей настройки воспользуемся математической функцией, представленной на рисунке 39.

$$Y=a+b*\sin(c*X)$$

a характеризует сдвиг графика по оси Oy. Чем больше **a**, тем выше поднимается график;
b характеризует растяжение графика по оси Oy. Чем больше увеличивается **b**, тем сильнее возрастает **амплитуда** колебаний;
c характеризует растяжение графика по оси Ox. При увеличении **c** частота колебаний **повышается** ;
d характеризует сдвиг графика по оси Ox. При увеличении **d** график движется в отрицательном направлении **оси абсцисс**.

Рисунок 39 – Математическое описание синусоиды

Период сигнала равняется $2*\pi$, ранее оговаривалось, что за один период значение нашей функции должно измениться 255 раз, поэтому каждый 255-шаг должен иметь значение $2*\pi$, из чего следует $C=2*\pi*(1/255)$ или $\pi*0.007843$. Аппаратная платформа Arduino способна работать с математическими операторами и функциями, поэтому для автоматизации процесса подбора значений ЦАП был написан следующий программный код:

```
void setup(){
    Serial.begin(9600);
}
void loop(){
    for (int i=0;i<256;i++) {
        Serial.print(byte(127+(127*sin(PI*i*0.007843))));
        Serial.print(", ");
    }
    delay(10000);
}
```

На рисунке 40 представлен результат работы написанного программного кода в среде разработки Arduino IDE.

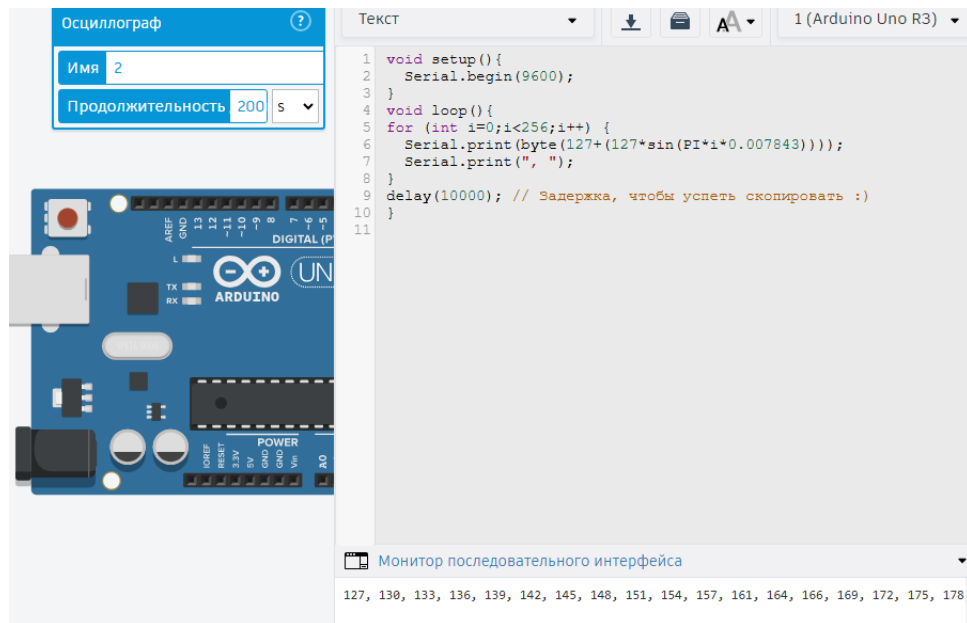


Рисунок 40 – Результат работы программного кода

Полученные значения для ЦАП Arduino представлены на рисунке 41.

```

1. 127, 130, 133, 136, 139, 142, 145, 148, 151, 154, 157, 161, 164, 166, 169, 172,
175, 178, 181, 184, 187, 189, 192, 195, 197, 200, 202, 205, 207, 210, 212, 214,
217, 219, 221, 223, 225, 227, 229, 231, 232, 234, 236, 237, 239, 240, 242, 243,
244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 251, 252, 252, 253, 253, 253, 253, 253,
253, 253, 253, 253, 253, 252, 252, 251, 251, 250, 249, 249, 248, 247, 246, 245,
243, 242, 241, 239, 238, 236, 235, 233, 231, 230, 228, 226, 224, 222, 220, 218,
215, 213, 211, 209, 206, 204, 201, 199, 196, 193, 191, 188, 185, 182, 180, 177,
174, 171, 168, 165, 162, 159, 156, 153, 150, 147, 144, 141, 137, 134, 131, 128,
125, 122, 119, 116, 112, 109, 106, 103, 100, 97, 94, 91, 88, 85, 82, 79, 76, 73,
71, 68, 65, 62, 60, 57, 54, 52, 49, 47, 44, 42, 40, 38, 35, 33, 31, 29, 27, 25,
23, 22, 20, 18, 17, 15, 14, 12, 11, 10, 8, 7, 6, 5, 4, 4, 3, 2, 2, 1, 1, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 2, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 19,
21, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 39, 41, 43, 46, 48, 51, 53, 56, 58, 61, 64,
66, 69, 72, 75, 78, 81, 84, 86, 89, 92, 96, 99, 102, 105, 108, 111, 114, 117,
120, 123, 126,

```

Рисунок 41 – Числовые значения для ЦАП Arduino

Рассчитанные значения справедливы для синусоиды частотой порядка 50 Гц, для увеличения частоты генерируемого сигнала, необходимо настраивать программные параметры ШИМ сигнала и/или изменять коэффициент c в формуле, описывающей синусоиду как показано на рисунке 42.

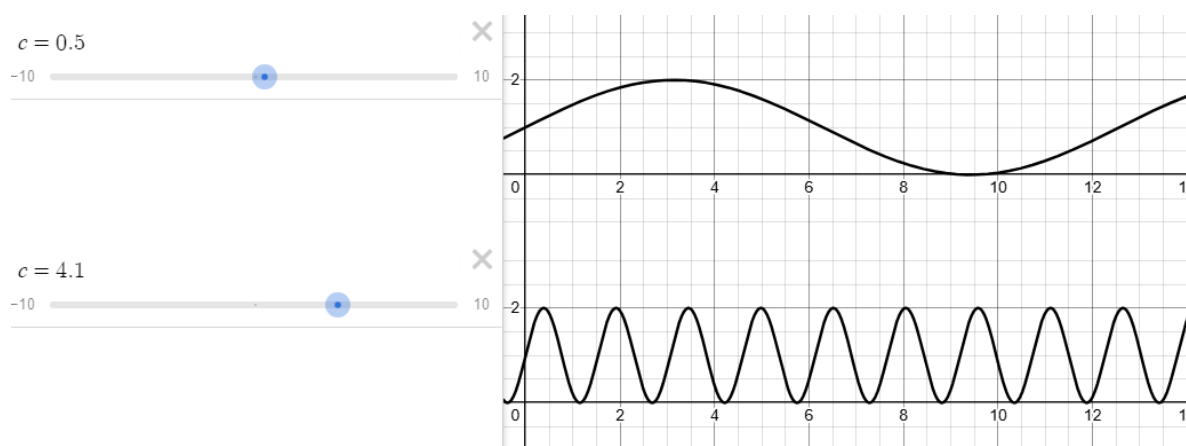


Рисунок 42 – Влияние коэффициента c на частоту сигнала

Для изменения амплитуды сигнала необходимо изменять значения коэффициента b , как показано на рисунке 43.

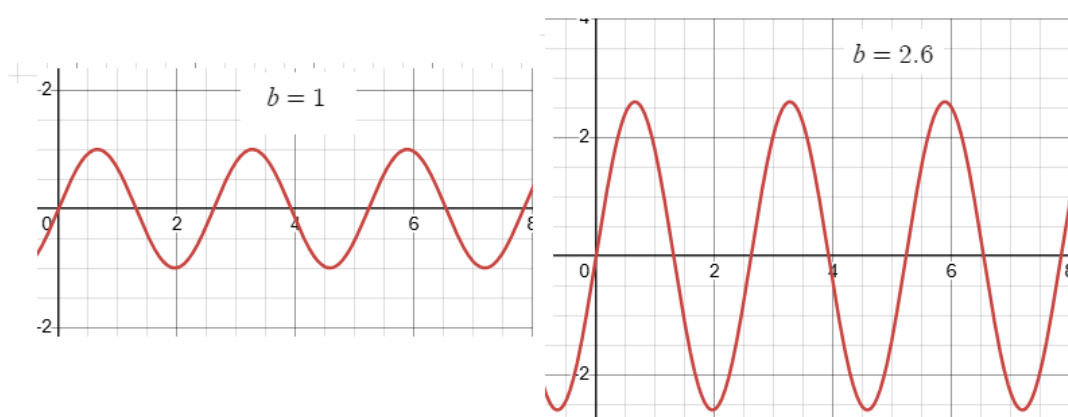


Рисунок 43 – Влияние коэффициента b на амплитуду сигнала

Для настройки функций портов будет использоваться прямое обращение к регистрам микроконтроллера ATmega 2560, в обход использования стандартных функций Arduino, значительно задействующих основные вычислительные мощности микроконтроллера, тем самым увеличивая общее время выполнения цикла [14]. На рисунке 44 представлены основные инструкции взаимодействия с портами микроконтроллера.

- DDRD – The Port D Data Direction Register (регистр направления передачи данных порта D)
- PORTD – The Port D Data Register (регистр данных порта D)
- PIND – The Port D Input Pins Address (адрес входных выводов порта D)

Рисунок 42 – Инструкции прямого обращения к регистрам

Для преобразования генерируемого цифрового ШИМ сигнала в синусоидальный будет использована стандартная схема ЦАП R-2R, представленная на рисунке 43.

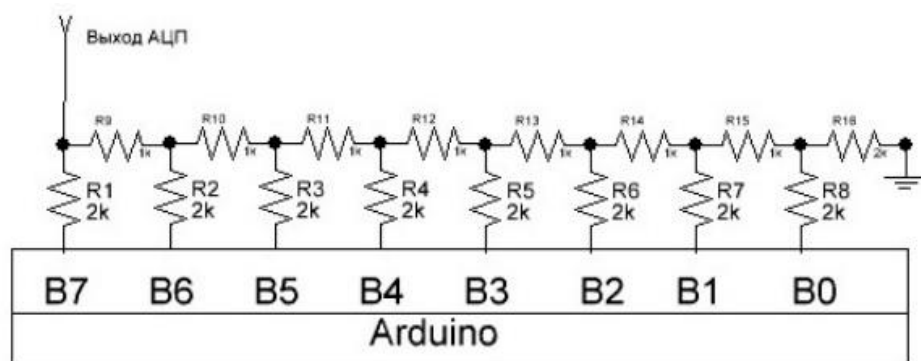


Рисунок 44 – ЦАП R-2R

Принцип действия данной схем достаточно прост и основан на включении делителей напряжения, если выставить на вход ЦАП-а (порт В Arduino) 8 бит сигналы высокого уровня 11111111, что соответствует числу 255, то на выходе ЦАП получаем сигнал высокого уровня, равный напряжению питания внутренней логики системы управления. Если на вход

ЦАП мы подадим 8 бит 00000000, соответствующие числу 0, но напряжение на выходе ЦАП будет равняться нулю. Таким образом, рассматриваемый восьмибитный ЦАП способен выдать 256 различных напряжений с шагом около 20 милливольт, при опорном напряжении 5 Вольт.

При проектировании общей электрической схемы к выходу собранного ЦАП, как и в случае выхода, формирующего треугольный импульс будет подключен повторитель на ОУ, являющийся буферным каскадом согласования сопротивлений, обеспечивающий развязку выхода устройства и исследуемой цепи, снижает влияние нагрузок и обеспечивает близкое к нулю выходное сопротивление без искажения и усиления выходных сигналов ГЭП.

Для проверки работоспособности генератора синусоидального сигнала разработали необходимое программное обеспечение для генерации ШИМ сигнала и воспользовались симулятором Autodesk Tinkercad, предоставляющий возможности по отладке программного кода и симуляции работы собранных схем. Результаты работы схемотехнического решения и разработанного программного обеспечения представлены на рисунке 45.

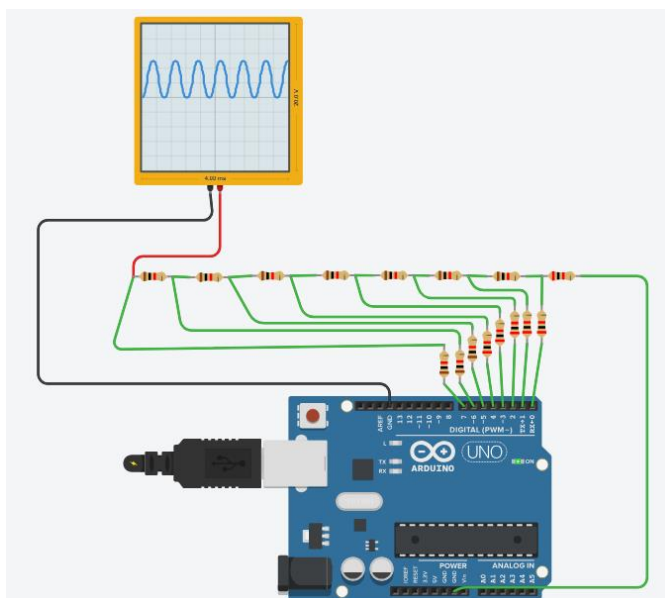


Рисунок 45 – Работа системы

Для модуляции затухающей синусоиды модернизировали разработанную ранее управляющую программу и пересчитали значения массива, отвечающего за формирование синусоиды с учетом изменения амплитуды сигнала, регулируя коэффициент b в расчетной формуле. На рисунке 46 представлена полученная осциллограмма затухающей синусоиды.

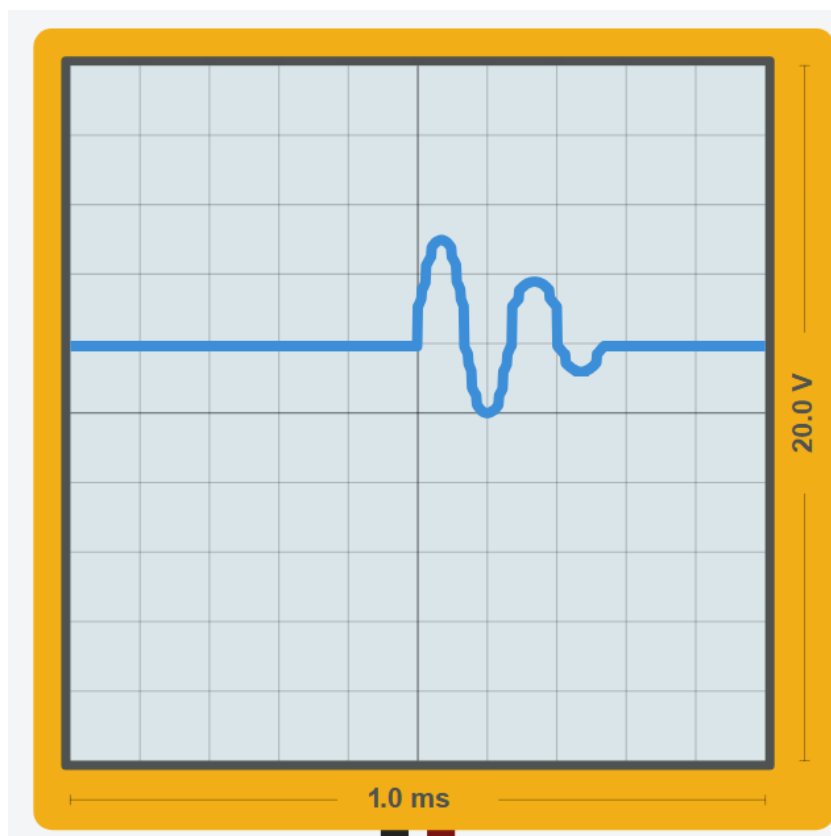


Рисунок 46 – Затухающая синусоида

Полученная синусоида имеет частоту порядка 10 КГц и время затухания 0,3 мс. Модернизируем управляющую программу и смоделируем затухающую синусоиду с временем затухания 1 мс и частотой 10 МГц с использованием специализированных ШИМ библиотек и внутренних настроек МК, результаты представлены на рисунке 47.

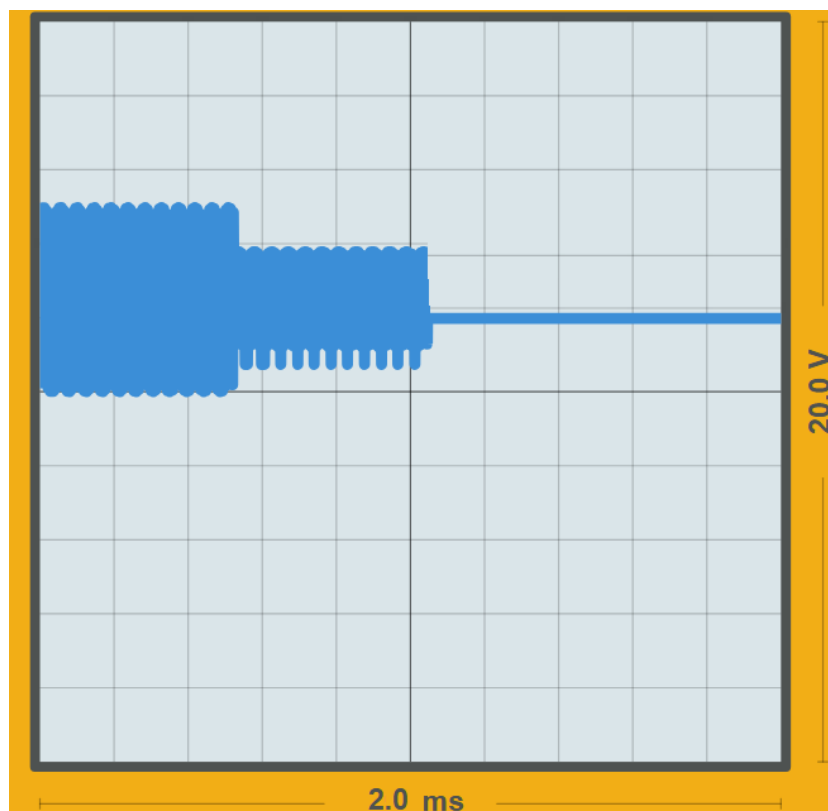


Рисунок 47 – Затухающий синусоидальный сигнал 10 МГц

Все разработанное программное обеспечение, реализующее управление ГЭП, в том числе и генерацию синусоидального сигнала разной частоты представлено в приложении Б.

Выводы по разделу

В разделе были представлены предлагаемые схемотехнические решения для реализации генераторов синусоидального и треугольного сигнала, являющихся составной частью ГЭП, а также программные надстройки и коды.

3 Разработка системы НМП

3.1 Система визуализации ГЭП

Для реализации системы визуализации генератора электромагнитных помех будет использован достаточно популярный и доступный LCD экран, совместимый с аппаратной платформой Arduino и представленный на рисунке 48.

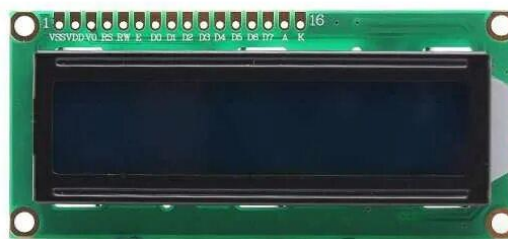


Рисунок 48 – Дисплей LCD 1602

Существует два варианта подключения данного устройства к аппаратной платформы Arduino, 12-и проводным соединением, как показано на рисунке 49 или при помощи платы адаптера под I2C интерфейс, как показано на рисунке 50. Для минимизации монтажных работ и удобства подключения в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы мы будем использовать именно второй вариант с подключением специализированной библиотеки для обработки и вывода графической информации LiquidCrystal_I2C.

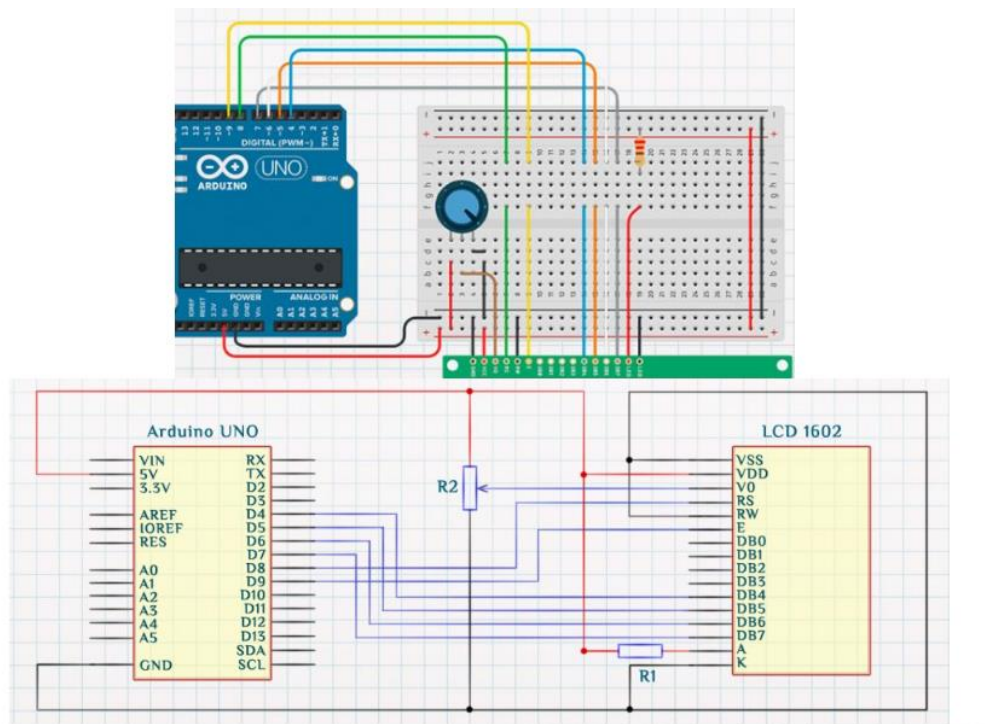


Рисунок 49 – Стандартное 12-и проводное подключение LCD 1602

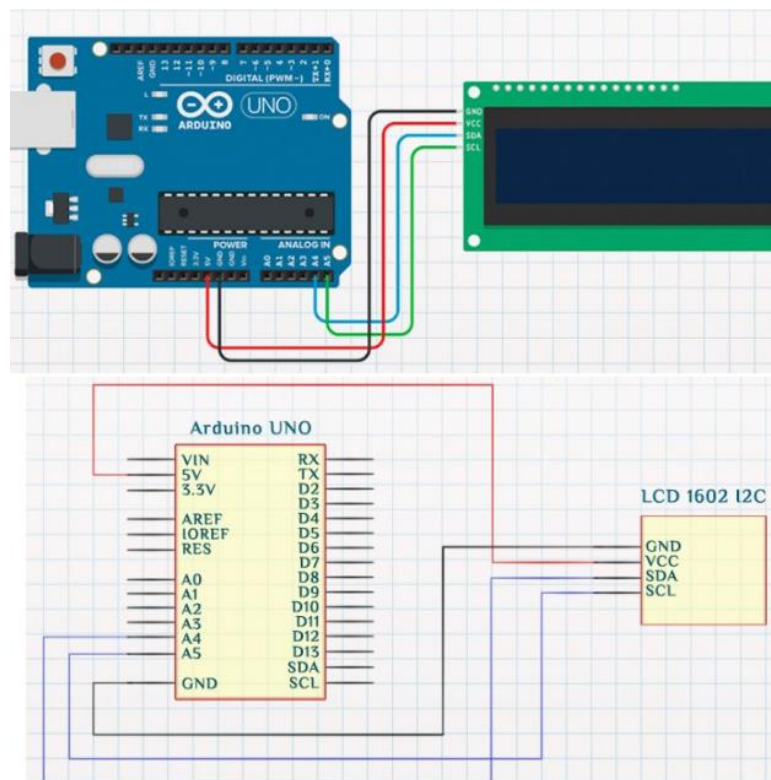


Рисунок 50 – Подключение LCD 1602 по интерфейсу I2C

На рисунке 51 представлен алгоритм работы системы визуализации.

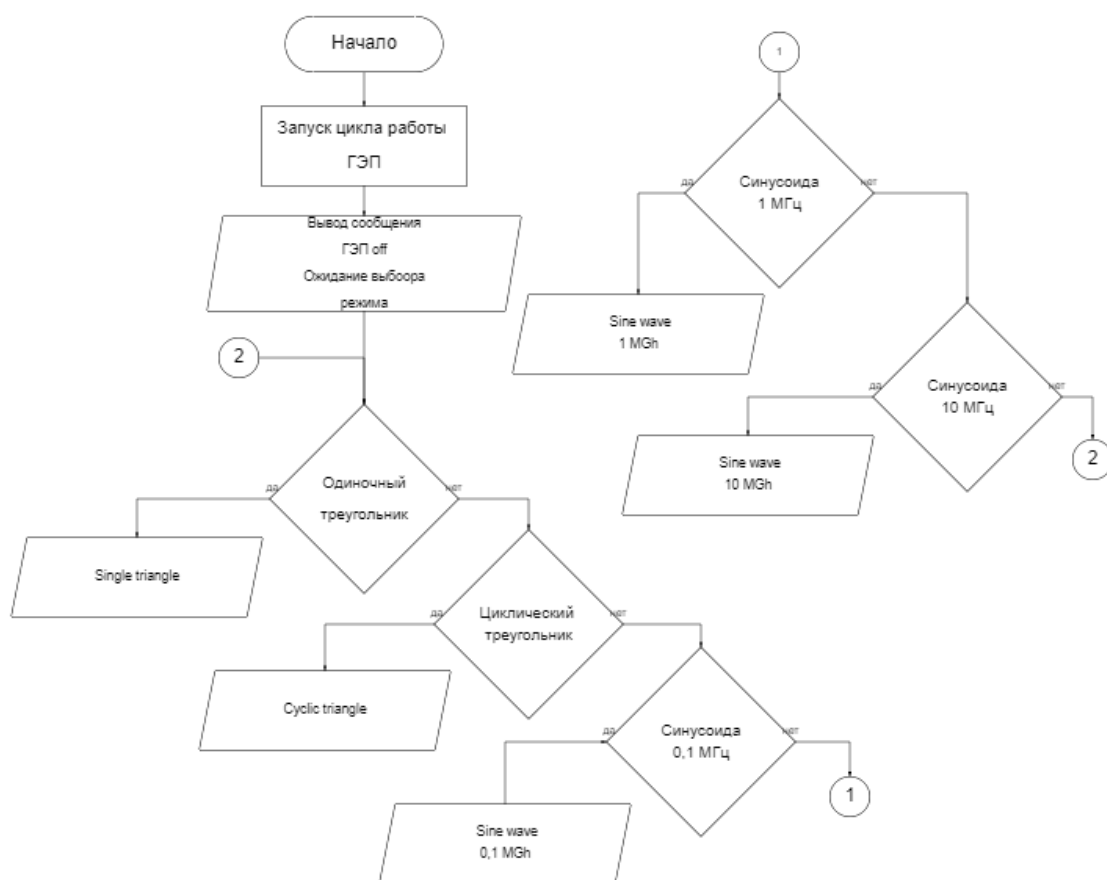


Рисунок 51 – Алгоритм работы системы визуализации ГЭП

Система управления ГЭП ожидает от оператора установки выбор режима работы путем нажатия функциональных клавиш на корпусе устройства, после чего выводит на дисплей информационное сообщение, характеризующее выбранный режим работы и запускает цикл модуляции выбранного сигнала [7].

3.2 Органы регулировки и управления ГЭП

Для выбора режимов работы генератора электромагнитных импульсов решено было использовать функциональные кнопки без фиксации, а факт их нажатия, избегая дребезга контактов обрабатывать программным путем. Пример использованных кнопок представлен на рисунке 52.



Рисунок 52 – Функциональная клавиша

Все функциональные клавиши располагаются непосредственно на крышке корпуса устройства, как показано на рисунке 53.

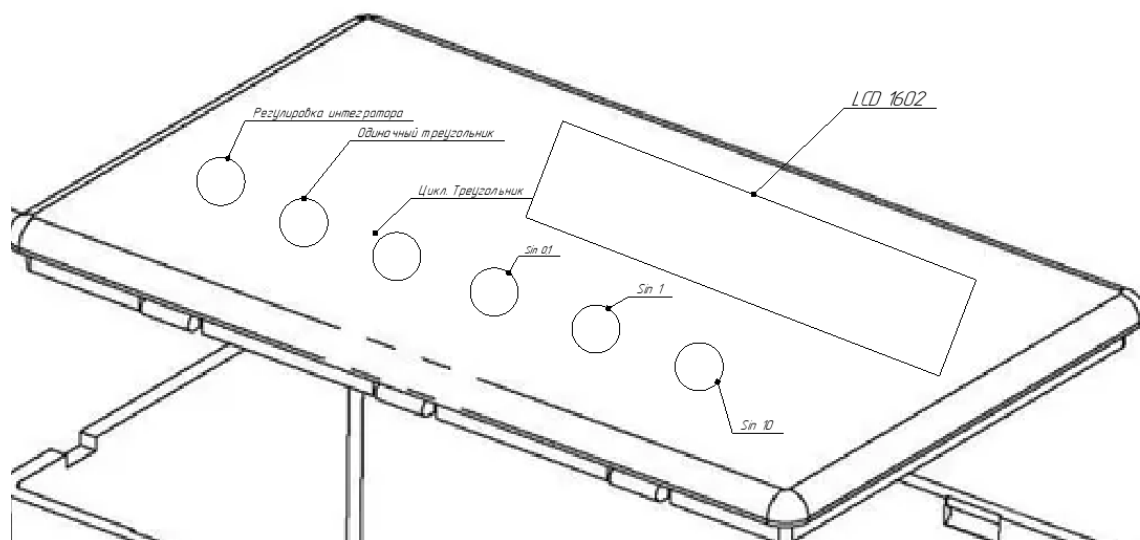


Рисунок 53 – Расположение органов управления

Система управления будет воспринимать событие нажатия кнопки по появлению высокого логического сигнала на соответствующем входе, поэтому при физическом подключении кнопок будет использоваться принцип подтяжки к земле pull-down, схема данного подключения представлена на рисунке 54.

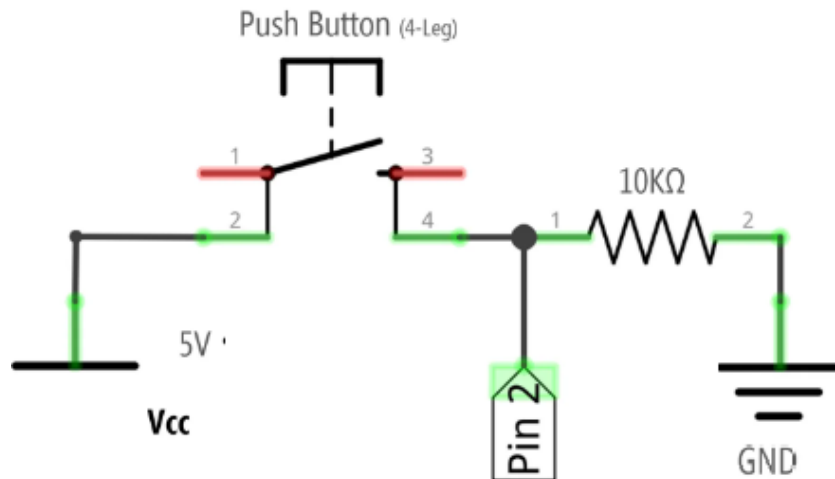


Рисунок 54 – Input pull-down

Для предотвращения нежелательного влияния дребезга контактов при переключении и самопроизвольного срабатывания составных частей ГЭП в программный код обработки нажатия функциональных клавиш введены временные задержки, необходимые для корректного восприятия сигналов. Ниже представлен пример программного кода, реализующий функцию считывания сигнала и запуска цикла при однократном нажатии кнопки с реализованной функцией защиты от дребезга контактов:

```
void setup() {  
  pinMode(3, INPUT);  
}  
  
bool flag = false;  
uint32_t btnTimer = 0;
```

```
void loop() {  
  bool btnState = !digitalRead(3);  
  if (btnState && !flag && millis() - btnTimer > 100) {  
    flag = true;  
    btnTimer = millis();  
  }  
  if (!btnState && flag && millis() - btnTimer > 100) {  
    flag = false;  
    btnTimer = millis()  
  }  
}
```

Выводы по разделу

В данном разделе была рассмотрена реализация системы человеко-машинного интерфейса для разрабатываемого генератора электромагнитных помех и ее составные части. Представлены алгоритмы работы системы визуализации, а также подключение, принцип и пример обработки сигналов с функциональных органов управления.

4 Разработка печатной платы

Для разработки печатной платы воспользовались сервисом сквозного проектирования печатных плат EasyEDA. Рабочая область данной среды представлена на рисунке 55.

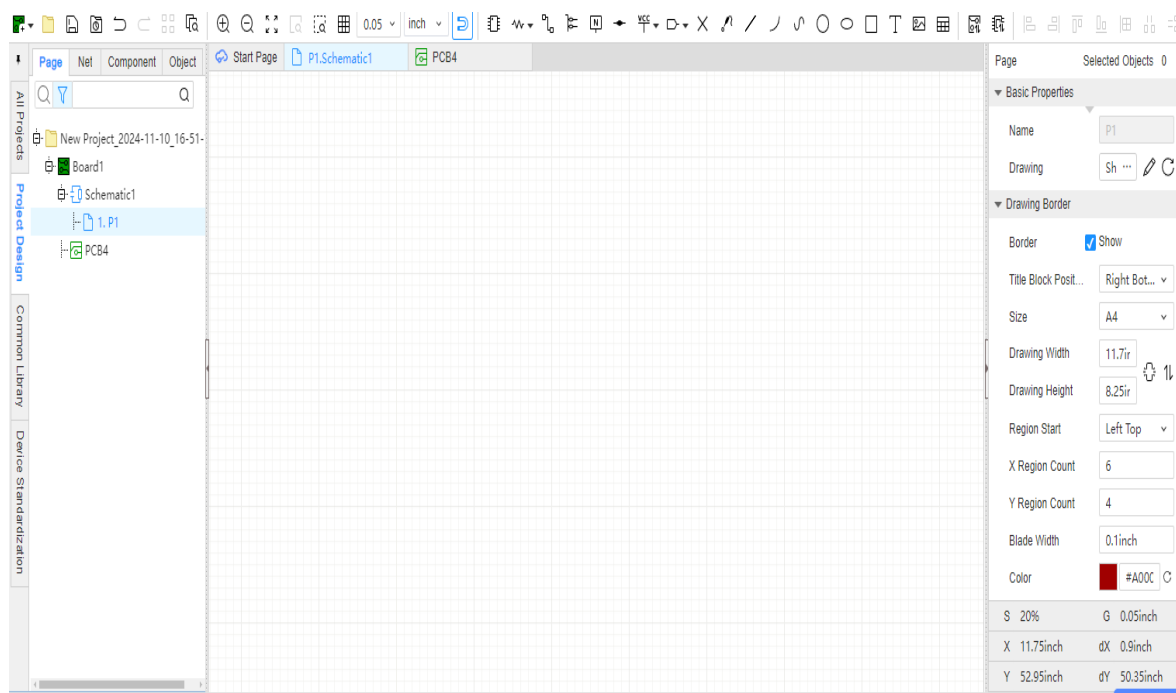


Рисунок 55 – Рабочая среда EasyEDE

В среду сквозного проектирования EasyEDE была перенесена разработанная ранее схема электрическая принципиальная, с учетом использования готового модуля управления Arduino Mega и возможности ее подключения к схемотехнической части, а также подключения тестируемой аппаратуры, как показано на рисунке 56.

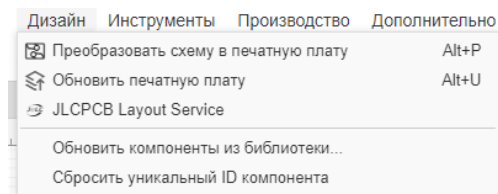


Рисунок 57 – Панель инструментов проверки и конвертации схемы

Результаты конвертации разработанной схемы в 2D модель печатной платы представлены на рисунке 58.

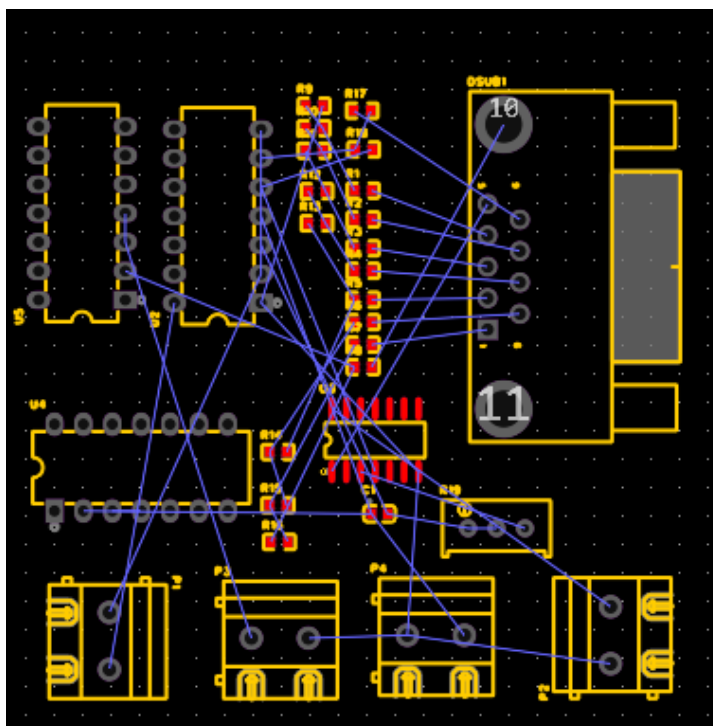


Рисунок 58 – 2D модель разработанной печатной платы

Из полученной модели была сконвертирована 3D модель разработанной печатной платы, представленная на рисунке 58.

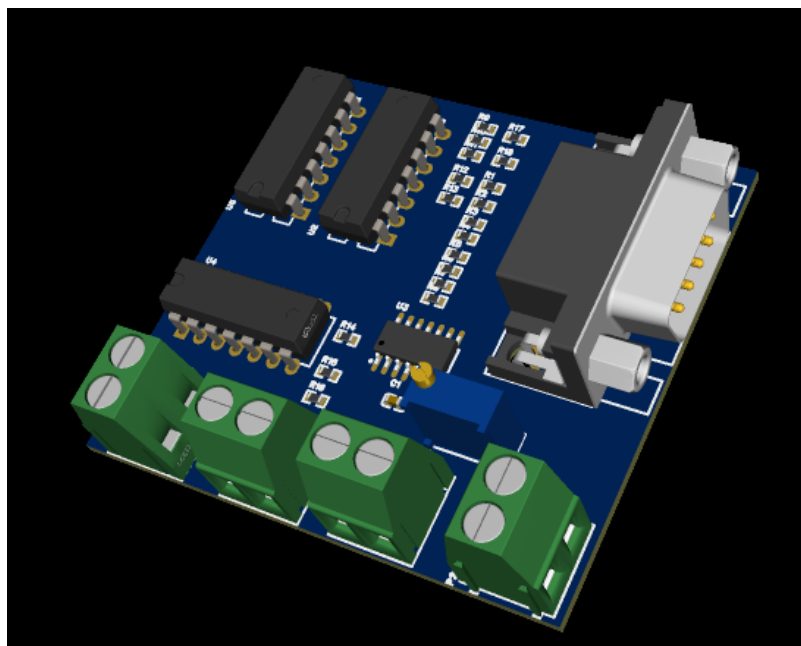


Рисунок 58 – 3D модель разработанной платы

Стоит отметить, что разработанная печатная плата является прототипом и носит опциональный характер, при проектировании реального устройства может видоизменяться под особенности и требования, предъявляемые к подключению, форм-фактору и так далее. Также, для рядового пользователя данного сервиса, ввиду определенных причин, доступен не весь функционал по редактированию и трассировке печатных плат, поэтому при проектировании данной печатной платы для схемотехнической части генератора электромагнитных импульсов использовалась автоматическая трассировка с наиболее оптимальной компоновкой активных и пассивных элементов электронной цепи внутри рабочего пространства.

Выводы по разделу

В рассмотренном разделе приведен процесс разработки печатной платы для схемотехнической части ГЭП, представлены результаты работы в виде 2D и 3D модели печатной платы для размещения схемотехнической части генераторов синусоиды и треугольных импульсов.

Заключение

В рамках выполнения рассматриваемой выпускной квалификационной работы были выполнены все поставленные задачи и реализована основная цель. Было разработано электронное устройство, представляющее собой автоматизированный генератор электромагнитных помех для контроля аппаратуры.

Результатами выполнения работы является полномерная и исчерпывающая информация, представляющая собой пакет технической документации, необходимой для дальнейшей сборки, физической реализации, программировании и отладки генератора электромагнитных помех.

Для разработанного устройства были спроектированы все необходимые схемотехнические решения и электрические связи, выбрана компонентная база и разработана управляющая программа системы управления, разработана структурная схема и схема электрическая принципиальная.

Разработаны алгоритмы формирования нелинейных искажений в электронной цепи тестируемого устройства.

Представлены программные и аппаратные составляющие генераторов синусоидального и треугольного сигналов, являющихся составной частью генератора электромагнитных импульсов.

Был разработан программный код системы управления, реализующий цикл выбора и запуска программы генерации необходимого электрического сигнала, с реализованной обратной связью для оператора в виде вывода информационного сообщения на экран HMI.

Устройство, разработанное в ходе выполнения данной ВКР, при дальнейшей проработке и схемотехнических решений, а также отладке и оптимизации программного кода, может быть физически реализовано и использовано в составе средств комплексной проверки электронных устройств и цепей на соответствие требованиям ЭМС.

Список используемой литературы

1. Белов, А.В. «Микроконтроллеры AVR: от азов программирования до создания практических устройств» / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2016. - 544 с.
2. Белов А.В. «Разработка устройств на микроконтроллерах AVR: шагаем от "чайника" до профи»: Книга / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2013. - 528 с.
3. Белов, А.В. Микроконтроллеры AVR от азов программирования до создания практических устройств / А.В. Белов. – Издание второе, переработанное и дополненное. – Санкт-Петербург: Наука и Техника, 2020. – 544 с. – ISBN 978-5-94387-874-9.
4. Бьерн Страуструп. «Язык программирования C++». - 369 с
5. Вагнер Б. «C#. Эффективное программирование. 50 рекомендаций по усовершенствованию программирования на C#» / Б. Вагнер; Пер. с англ. М. Горелик. - М.: Лори, 2013. - 256 с.
6. Валиуллина, Д. М. Электромагнитная совместимость / Д. М. Валиуллина, В. К. Козлов. – 2-е изд., доп. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 95 с.
7. «Википедия» [Электронный ресурс] // «Человеко-машинный интерфейс» URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Человеко-машинный_интерфейс (дата обращения: 20.10.2024).
8. Водовозов А.М. «Микроконтроллеры для систем автоматики»: Учебное пособие / А.М. Водовозов. - Вологда: ВоГТУ, 2002. - 123 с.
9. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL, 5-е издание / А.В. Евстифеев. – Москва: Издательский дом «Додэка XXI», 2008. – 558 с.
10. Ефанов В. И. Электромагнитная совместимость РСiC / В. И. Ефанов, А. А. Тихомиров. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и, 2012. – 224 с.

11. Хайров А.М. Электромагнитная совместимость: методы и устройства защиты от помех / А.М. Хайров. – Москва: Радио и связь, 2004. – 496 с.
12. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Р. К. Борисов [и др.]; под ред. чл .-корр. РАН, докт. техн. наук, проф. А.Ф. Дьякова. – учебник для вузов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. – 543 с. – ISBN 978-5-383-00973-4.
13. «AlexGyver» [Электронный ресурс] // «Увеличение частоты ШИМ» URL: <https://alexgyver.ru/lessons/pwm-overclock/> (дата обращения: 13.10.2024).
14. «AVR» [Электронный ресурс] // «Учебный курс. Устройство и работа портов ввода-вывода» URL: <https://easyelectronics.ru/avr-uchebnyj-kurs-ustrojstvo-i-rabota-portov-vvoda-vyvoda.html> (дата обращения: 07.11.2024).
15. «Arduino IDE» [Электронный ресурс]. «Download the Arduino IDE» URL: <https://www.arduino.cc/en/main/software> (дата обращения: 16.10.2024).
16. «Arduino oficial store» [Электронный ресурс] // «Arduino Mega» URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> (дата обращения: 11.10.2024).
17. Atmel, Corporation 8-bit AVR Microcontroller with 128K Bytes In-System Programmable Flash / Corporation Atmel. – USA: Literature Requests, 2004. – 381 с.
18. «ETSI» [Электронный ресурс] // «Electro Magnetic Compatibility» URL: <https://www.etsi.org/technologies/emc> (дата обращения: 12.10.2024).
19. «European Commission» [Электронный ресурс] // «Electromagnetic Compatibility (EMC) Directive» URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/electromagnetic-compatibility-emc-directive_en (дата обращения: 13.10.2024).
20. «Wikipedia» [Электронный ресурс] // «Electromagnetic_compatibility» URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_compatibility (дата обращения: 17.10.2024).

Перечень элементов к схеме электрической принципиальной ГЭП

Рисунок А.1 – Перечень элементов

Приложение Б

Программный код системы управления ГЭП

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Объявление объекта класса LiquidCrystal_I2C
#include <GyverTimers.h>

void setup()
{
    lcd.init(); // Инициализация и запуск работы дисплея
    lcd.backlight(); // Включение подсветки
    // Устанавливаем положение курсора, 0-й столбец, 0-я строка
    DDRA = 0b00000000; // Регистр направления передачи данных порт A - входа
    DDRD = 0xFF; // Порт D выход
    DDRH |= (1 << 3)|(1 << 4); // Порты PH3 и PH4 ШИМ выходя для генерации
треугольных импульсов
    // Предварительная настройка регистров ШИМ
    TCCR1B = 0b01010101;
    TCCR1A = 0b11010101;
    TCCR2H = 0b11010101;
    PWM_resolution (PORTA,FAST_PWM);
    PWM_resolution (PORTB,FAST_PWM);
    // Поднастройка регистров счетчиков портов A, B, D
    //OCRA
    //OCRB
    //OCRD
    //OCRH
}

while (1) {

    lcd.clear (); // Отчистка дисплея
    lcd.setCursor(0, 0); // Установка курсора в положение 0.0
    lcd.print ('OFF')
    // Флаги состояния кнопок для режима работы в формировании треугольных
импульсов
    bool flag = 0;
    bool flag1 = 0;
```

Продолжение Приложения Б

```
// Запуск синусоиды 10 МГц
if ((1 <= PA0) & PINA) // Выполнение действий при PA0==1
{
    lcd.clear (); // Отчистка дисплея
    lcd.setCursor(0, 0); // Установка курсора в положение 0.0
    lcd.print ('Sin vawe 10')
    // Объявление массивов данных для формирования затухающей синусоиды 10 МГц
    «unsigned char sin_tab [255] = {};
    unsigned char sin_tab1 [255] = {};
    unsigned char sin_tab2 [255] = {};
    unsigned char sin_tab3 [255] = {};

    bool k = 0; // Переменная шага затухания
    if (k==0){
    for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива
    {
        PORTD=sin_tab[i];
        delayMicroseconds(0.00039); // Частота 10 МГц
    }
        k = 1; // Переменная шага затухания
    }
    if (k==1){
    for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива
    {
        PORTD=sin_tab1[i];
        delayMicroseconds(0.00039); // Частота 10 МГц
    }
        k = 2; // Переменная шага затухания
    }
}
```

Продолжение Приложения Б

```
if (k==2)
{
for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива
{
PORTD=sin_tab2[i];
delayMicroseconds(0.00039); // Частота 10 МГц
}
k = 3; Переменная шага затухания
}
if (k==3)
{
for (int i=0;i<256;i++)// Цикл вывода массива
{
PORTD=sin_tab3[i];
delayMicroseconds(0.00039);// Частота 10 МГц
}
}
}

// Запуск синусоиды 0.1 МГц
if ((1 << PA1) & PINA) // Выполнение действий при PA1==1
{
lcd.clear (); // Отчистка дисплея
lcd.setCursor(0, 0); // Установка курсора в положение 0.0
lcd.print ('Sin vawe 01')
// Объявление массивов данных для формирования затухающей синусоиды 0.1 МГц
unsigned char sin_tab [255] = {};
unsigned char sin_tab1 [255] = {};
unsigned char sin_tab2 [255] = {};
unsigned char sin_tab3 [255] = {};
```

Продолжение Приложения Б

```
bool k = 0; // Переменная шага затухания
if (k==0){
for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива{
    PORTD=sin_tab[i];
    delayMicroseconds(0.039); // Частота 0.1 МГц
}
    k = 1; // Переменная шага затухания
}
if (k==1){
for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива
{
    PORTD=sin_tab1[i];
    delayMicroseconds(0.039); // Частота 0.1 МГц
}
    k = 2; // Переменная шага затухания
}

if (k==2)
{
for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива
{
    PORTD=sin_tab2[i];
    delayMicroseconds(0.039); // Частота 0.1 МГц
}
    k = 3; // Переменная шага затухания
}
if (k==3)
{
for (int i=0;i<256;i++)// Цикл вывода массива
{
    PORTD=sin_tab3[i];
    delayMicroseconds(0.039);// Частота 0.1 МГц
```

Продолжение Приложения Б

```
}  
}  
}  
// Запуск синусоиды 1 МГц  
if ((1 << PA2) & PINA) // Выполнение действий при PA2==1  
{  
    lcd.clear (); // Отчистка дисплея  
    lcd.setCursor(0, 0); // Установка курсора в положение 0.0  
    lcd.print ("Sin vawe 1")  
    // Объявление массивов данных для формирования затухающей синусоиды 1 МГц  
    unsigned char sin_tab [255] = {};  
    unsigned char sin_tab1 [255] = {};  
    unsigned char sin_tab2 [255] = {};  
    unsigned char sin_tab3 [255] = {};  
  
    bool k = 0; // Переменная шага затухания  
    if (k==0){  
for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива  
    {  
        PORTD=sin_tab[i];  
        delayMicroseconds(0.0039); // Частота 1 МГц  
    }  
        k = 1; // Переменная шага затухания  
    }  
    if (k==1){  
for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива  
    {  
        PORTD=sin_tab1[i];  
        delayMicroseconds(0.0039); // Частота 1 МГц  
    }  
        k = 2; // Переменная шага затухания  
    }  
}
```

Продолжение Приложения Б

```
    if (k==2)
    {
    for (int i=0;i<256;i++) // Цикл вывода массива
    {
        PORTD=sin_tab2[i];
        delayMicroseconds(0.0039); // Частота 0.1 МГц
    }
        k = 3; Переменная шага затухания
    }
    if (k==3)
    {
    for (int i=0;i<256;i++)// Цикл вывода массива
    {
        PORTD=sin_tab3[i];
        delayMicroseconds(0.0039);// Частота 0.1 МГц
    }
    }
    }
    if (((1 << PA3) & PINA)& flag ==0) // Выполнение действий при PA3==1
    {
    flag = 1;
    lcd.clear (); // Отчистка дисплея
    lcd.setCursor(0, 0); // Установка курсора в положение 0.0
    lcd.print ('Single triangle')
    PWM_resolution (6,FAST_PWM); // Запуск формирования положительной
составляющей двуполярного прямоугольника
        delayMicroseconds (5000); // Задержка для формирования отрицательной
составляющей
        PWM_resolution (7,FAST_PWM);// Запуск формирования отрицательной
составляющей двуполярного прямоугольника
        delay (100); // Выдержка формирования
    flag = 0;
```

Продолжение Приложения Б

```
    }  
    if (((1 << PA4) & PINA) & flag1 == 0) // Выполнение действий при PA3==1  
    {  
        flag1 = 1;  
        if ((flag == 1) ((1 << PA4) | PINA))  
        {  
            lcd.clear (); // Отчистка дисплея  
            lcd.setCursor(0, 0); // Установка курсора в положение 0.0  
            lcd.print ('Cicle triangle')  
            PWM_resolution (6,FAST_PWM); // Запуск формирования положительной  
составляющей двуполярного прямоугольника  
            delayMicroseconds (5000); // Задержка для формирования отрицательной  
составляющей  
            PWM_resolution (7,FAST_PWM); // Запуск формирования отрицательной  
составляющей двуполярного прямоугольника  
            delay (1000); // Выдержка формирования  
        }  
    }  
}
```