

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	7
1.1 Сравнение с аналогами на рынке	7
1.2 Обзор систем моделирования	8
1.2.1 EasyEDA.....	9
1.2.2 Proteus.....	11
1.2.3 LTspice.....	12
1.3 Обзор систем проектирования	13
1.3.1 Altium Designer	14
1.3.2 KiCad EDA	15
1.3.3 EasyEDA.....	16
1.4 Вывод.....	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	21

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире без беспроводных технологий невозможно представить повседневную жизнь. Беспроводные сети Bluetooth и Wi-Fi, являются основными каналами передачи данных для множества устройств, от мобильных телефонов и ноутбуков, до домашних умных устройств и промышленного оборудования. С их помощью обеспечивается доступ к каналам связи, необходимым для мобильного образа жизни, позволяя пользователям оставаться подключенными ко всему миру в любой момент времени. Беспроводные сети являются открытыми каналами связи [1], а это значит, что подключиться к ним могут все, у кого есть пароль.

Однако, с ростом популярности и распространенности беспроводных технологий возникают новые угрозы, связанные с их использованием. Одной из таких угроз является возможность незаконного доступа к данным через сети Bluetooth и Wi-Fi, что может привести к серьезным последствиям для безопасности и конфиденциальности информации. Существует риск подслушивания и шпионажа через эти каналы, особенно в ситуациях, когда данные передаются без должного уровня защиты. Поэтому критически важно обеспечивать безопасность сетей и их недоступность в определенных местах, например, в частных корпоративных средах, в которых важна конфиденциальность информации, в военных целях и даже в школах и университетах.

Целью данного дипломного проекта является разработка аппаратного комплекса генерации помех на частотах Wi-Fi и Bluetooth, который позволит временно прекратить доступ к сети и, соответственно, к конфиденциальным данным, повысив уровень безопасности. Это представляет собой важный шаг в защите как личной и корпоративной, так и государственной информации от потенциального прослушивания и угроз. Так же в результате разработки данного проекта будет достигнута возможность обеспечить чистоту связи на важных мероприятиях, таких как переговоры, заседания или же государственные экзамены.

Для достижения данной цели необходимо провести обширный анализ и исследования в области Wi-Fi и Bluetooth, передачи сигналов на физическом уровне. Так же следует изучить передачу сигнала в эфир, генерацию шумов, а также использование высокочастотных генераторов, управляемых напряжением (в дальнейшем – ГУН). Особенно важно учесть работу на физическом уровне беспроводных сетей в целом, так как генератор будет направлен именно на данный уровень.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи:

1. Исследование физического уровня протоколов 802.11 и 802.15.
2. Проектирование модуля генерации помех.
3. Реализация прототипа модуля генерации помех.
4. Тестирование и оценка работоспособности модуля.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Сравнение с аналогами на рынке

Среди аналогов на рынке следует выделить аналоги в низком ценовом диапазоне, так как проект рассчитан на генерацию шумов только на частотах Wi-Fi и Bluetooth, а современные подавители связи рассчитаны на более широкий спектр.

Среди самых дешёвых – Скорпион Wi-Fi - 15 [2], который показан на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Скорпион Wi-Fi - 15 [2]

Данное устройство обладает высокой выходной мощностью, что можно заметить и по его размерам. Так же это отображается на некоторых характеристиках, к примеру на выходной мощности.

Основные характеристики данного подавителя указаны в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Подавитель Скорпион Wi-Fi - 15

Характеристика	Значение
Цена	414 бел. руб.
Радиус распространения шумов	От 1 до 15 метров
Выходная мощность	4 Вт
Частоты работы	2400-2500 МГц, 5150-5350 МГц
Питание	От сети/от батареи до 60 минут

Стоит выделить, что выходная мощность данного прибора – 4 Ватта, к тому же устройство работает в двух диапазонах частот: 2.4 и 5 ГГц, из-за чего образуется высокий ценник.

Ещё один дешёвый вариант – Wi-Fi 2400 [3], который показан на рисунке 1.2, а его характеристики указаны в таблице 1.2.



Рисунок 1.2 – Подавитель Wi-Fi 2400 [3]

Таблица 1.2 – Подавитель Wi-Fi 2400

Характеристика	Значение
Цена	191 бел. руб.
Радиус распространения шумов	до 20 метров
Выходная мощность	0.8 Вт
Частоты работы	2400-2500 МГц
Питание и время работы	От сети/от батареи до 90 минут

В данном варианте видно, что при уменьшении полосы частот и выходной мощности устройства уменьшается и цена товара. При этом, в данном продукте все ещё стоит СВЧ-усилитель, который обеспечивает радиус распространения шумов до 20 метров. Из-за данного усилителя и аккумулятору со временем работы до 90 минут и возникает цена в 191 рубль.

1.2 Обзор систем моделирования

Схемотехническое моделирование представляет собой моделирование электрических процессов в электронных устройствах с использованием принципиальных электрических схем. Данные схемы включают в себя

соединения условных обозначений электрических элементов, таких как транзисторы, резисторы, конденсаторы, диоды и другие. В отличие от логического моделирования, схемотехническое учитывает физические законы схем. В нём могут описываться важнейшие характеристики элементов, большая степень строгости описания электронных схем и элементов позволяют получить более точные сведения о процессах, происходящих в схеме. Цель схемотехнического моделирования – определение формы и параметров величин тока и напряжения, зависимости сигнала от тока и так далее. Из этих параметров можно рассчитать дальнейшие необходимые параметры схемы [4].

Соответственно, под системой моделирования понимается программное обеспечение, которое позволяет инженерам создавать, изменять и проверять функциональность электронных схем, прогнозировать производительность и выявлять потенциальные проблемы прежде, чем переходить к этапу физической реализации [5]. Данные системы позволяют экономить время и ресурсы, что является ключевыми фактами как у огромного предприятия, так и у обычных радиолюбителей. Так же данные системы позволяют подходить к проектированию и расчёту схем с большей надёжностью.

Исходя из вышесказанного, ключевыми факторами при выборе системы моделирования могут стать:

1. Производительность: система должна прогнозировать производительность схем с заданной точностью.
2. Поддержка анализа результатов: система должна иметь инструмент для работы над анализом полученных путём моделирования результатов.
3. Полнота описания: в системе должно быть возможным описание как можно большего количества характеристик элементов.
4. Поддержка большой элементной базы.
5. Поддержка аналогового и цифрового моделирования.
6. Удобство в использовании.

Данные факторы расположены в порядке убывания; это значит, что самый важный фактор – производительность системы, а наименее важный – удобство использования. Кроме того, для данного проекта критически необходима точность и аналоговое моделирование, что значит, что без соблюдения пунктов 1 и 5 система будет считаться не подходящей.

1.2.1 EasyEDA

EasyEDA [6] – это веб-среда для автоматизированного проектирования и разработки электронных схем и печатных плат, доступная бесплатно любому человеку. Система бесплатна не только для персонального использования, но и для коммерческих приложений. Данная среда является кроссплатформенной, и доступна даже с телефона в браузере. Так же EasyEDA позволяет конвертировать электрическую схему в шаблон печатной платы, генерировать Gerber-файлы, а также документацию. Главный плюс данной

среды – простота и доступность создания принципиальных схем с возможным дальнейшим заказом печатных плат. Так же все проекты могут храниться в облаке личного аккаунта, что позволяет иметь доступ к проектам лишь с выходом в интернет.

Система EasyEDA поддерживает как аналоговые, так и цифровые сигналы, что является обязательным требованием. Для задания и измерения сигналов все провода должны быть подключены к своеобразным устройствам, представляющим генераторы (как переменного, так и постоянного тока), мультиметры, осциллографы и логические анализаторы. Создание схем происходит перетягиванием элементов из специальной SPICE-библиотеки элементов и подключением их с помощью проводов друг с другом, которые могут идти под свободным углом. Библиотека элементов предоставляет доступ к основным элементам, по типу резисторов, конденсаторов, операционных усилителей и так далее. Так же поддерживаются логические элементы («И», «ИЛИ», «НЕ» и так далее).

Правила моделирования указываются с помощью специальной строки, именуемой SPICE-директивой, которая представляет собой обычную текстовую строку, помещаемую на схему и передаваемую непосредственно в список соединения. Директивы можно задавать как одним сплошным текстом, так и в виде блоков. Они необходимы для задания типа, времени, параметров анализа, а также создания специальных функций. Интерфейс EasyEDA показан на рисунке 1.3.

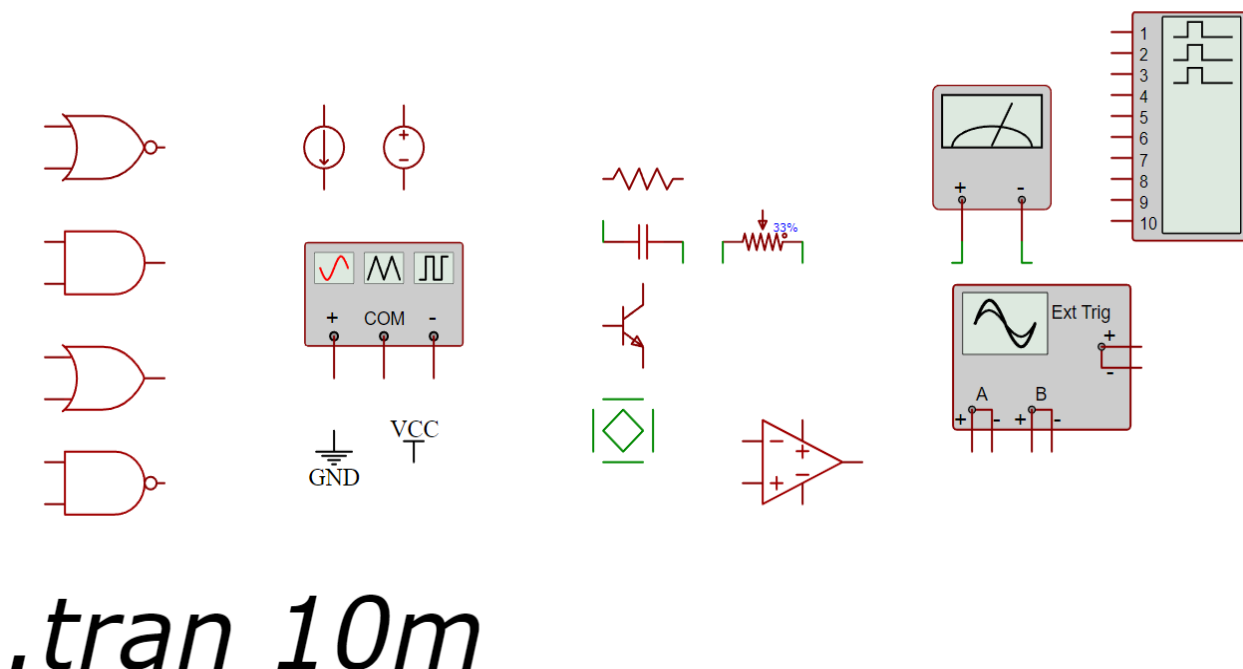


Рисунок 1.3 – Пример интерфейса EasyEDA

Данная среда так же позволяет моделировать электронные схемы, с помощью SPICE-модели, которая используется практически во всех

эмуляторах на данный момент. Модель SPICE [7] была разработана в 1973 году, после чего претерпела два обновления (SPICE 2 и SPICE 3) в 1983 и 1993 годах. Модель обладает открытым исходным кодом и высокой точностью, которая обеспечивается точным математическим прогнозированием поведения элементов в различных условиях. Схемы, описываемые моделью SPICE, могут варьироваться от простейших, как резистор, до огромных корпоративных проектов, описываемых сотнями строк.

Если оценивать параметры моделирования согласно списку, указанному в подразделе 1.2, то подпункты поддержки аналогового и цифрового сигнала, точности системы, а также простоты использования соблюдаются.

Производительность данной системы слабая, так как моделирование происходит в облаке и изменить данный параметр нельзя. Соответственно, при больших схемах или при плохом интернете с моделированием могут возникнуть проблемы.

Также анализ результатов не реализован на нужном уровне. При этом нельзя выбрать конкретную цепь для анализа и разделить несколько графиков. При большом количестве сигналов становится сложно ориентироваться. Так же нельзя измерить частоту сигнала, амплитуду и фазу.

Кроме того, невозможно полностью описать элементы. Доступны лишь базовые характеристики. К примеру, у резистора можно описать лишь сопротивление, однако нельзя описать допуск и номинальную мощность.

Следовательно, система не подходит для моделирования проекта.

1.2.2 Proteus

Proteus [8] – среда для проектирования и моделирования электронных схем, широко используемая в промышленности. Среда предлагает полный процесс проектирования, сочетающий в себе создание электрических схем, интерактивное моделирование, и разводку плат в единой интегрированной среде. Так же данное программное обеспечение поддерживает моделирование микроконтроллеров, таких как Raspberry Pi или различные модели Arduino.

Главными преимуществами данной среды является её интегрированность, которая заключается во встроенных функциях поддержки конструирования печатной платы, моделирования и отладки.

Так же из дополнительных преимуществ мощно упомянуть, что Proteus позволяет производить интерактивное моделирование, которое позволяет отлаживать плату в реальном времени, с помощью модели SPICE, что обеспечивает высокую точность моделирования и поддержку как аналоговых, так и цифровых сигналов.

Из главных недостатков можно выделить слабую поддержку результата моделирования, так как в данной системе на обычном осциллографе нельзя измерить частоту сигнала в отличие от физических цифровых осциллографов.

Так же из минусов можно выделить сложность использования. Данная система является программным обеспечением, использующимся в больших

корпорациях, поэтому в среде большой порог входа. К тому же, программа является платной, и специальная бесплатная подписка для студентов отсутствует.

Пользовательский интерфейс Proteus показан на рисунке 1.4

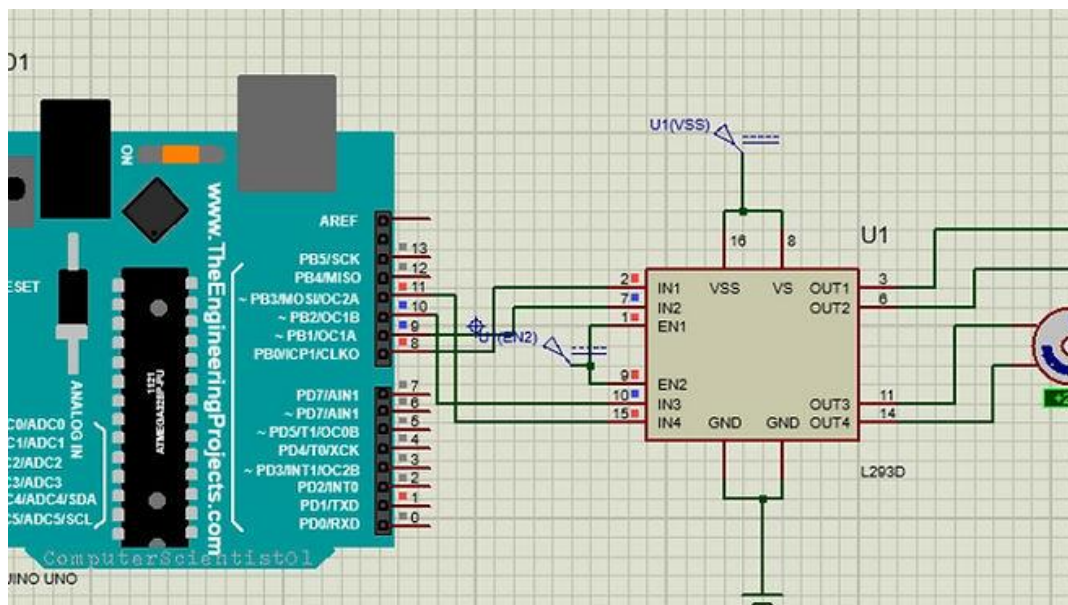


Рисунок 1.4 – Пример интерфейса Proteus [9]

1.2.3 LTspice

LTspice [10] – популярное и мощное программное обеспечение для моделирования электронных схем, разработанное компанией Linear Technologies. LTspice является бесплатной средой моделирования, использующей модель SPICE, захвата схем и просмотра форм сигналов для улучшения схем на этапе моделирования. Среда позволяет составлять платы, задавать точные характеристики каждому из компонентов, не привязываясь к фирме или конкретной модели компонента, создавать собственные.

LTspice основан на движке SPICE 3. С момента создания проект совершенствовался каждый год, в следствие чего на данный момент представляет собой один из лучших симуляторов электронных схем, используемый как крупными компаниями, так и радиолюбителями.

В данной среде моделирования доступна точная настройка элементов, большая элементная база, удобное устройство анализа результата моделирования.

Данная среда использует модель SPICE, что обеспечивает точность, симуляцию как цифровых, так и аналоговых сигналов, имеет большой инструментарий для анализа сигнала, такой как частота сигнала, амплитуду, фазу сигнала и так далее. Кроме того, в среде можно описывать практически каждую характеристику.

Пример пользовательского интерфейса LTspice указан на рисунке 1.5.

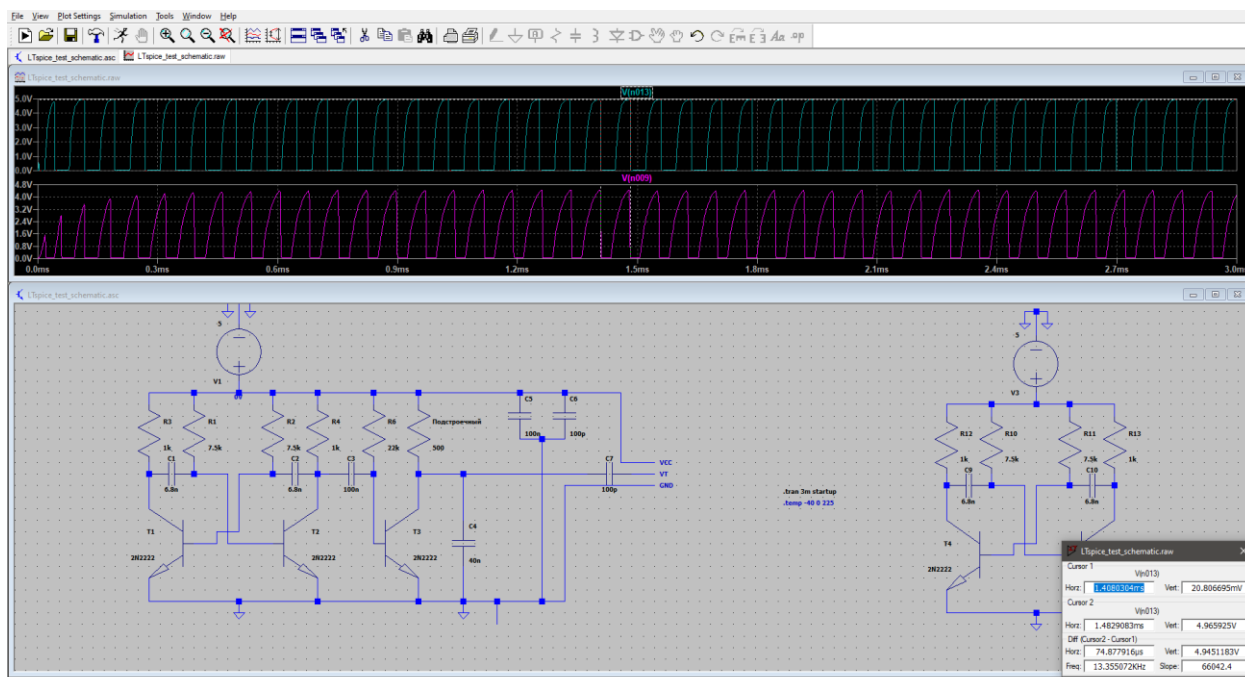


Рисунок 1.5 – Пример интерфейса LTspice

Из недостатков можно выделить лишь устаревший и сложный для изучения пользовательский интерфейс, однако так как данная система моделирования имеет больше преимуществ, чем недостатков – было решено выбрать её в качестве основной системы моделирования.

1.3 Обзор систем проектирования

Системы проектирования понадобятся для двух этапов разработки устройства [12]:

1. Создание принципиальной схемы устройства.
2. Проектирование печатной платы устройства.

Оба этих процесса выполняются на последнем этапе проектирования.

Создание принципиальной схемы устройства – это процесс разработки конечной основной электрической схемы, которая отображает функциональную структуру устройства, взаимосвязь компонентов и их маркировки. В процессе создания принципиальной схемы определяются функциональные элементы, составляющие устройство, и их взаимосвязь. При этом конкретное расположение на плате не учитывается, так как для этого предназначен следующий этап.

Проектирование печатной платы – это комплексный процесс создания электрических схем и расположения компонентов на специальной печатной плате (PCB, Printed Circuit Board). Данный этап не включает в себя подбор конкретных элементов, так как должен выполняться после разработки принципиальной схемы, в котором должны быть указаны конкретные элементы. Этап характеризуется выбором конструкции платы (выбор формы,

размеров и слоёв), компоновкой и размещением компонентов, трассировкой, и при необходимости разводкой дорожек вручную, необходимыми расчётами и документацией для конструкторов. Данный этап критически важен при изготовлении устройства, так как при неправильном проектировании на этапе создания печатной платы чревато нарушением работоспособности не только разрабатываемой платы, но и устройства в целом.

Из вышесказанного можно выделить некоторые факторы, которым должна удовлетворять система проектирования:

1. Интегрированность: система должна предоставлять возможность создания как принципиальных схем, так и проектирование печатных плат.
2. Поддержка обширной элементной базы.
3. Автоматизация процессов: система должна предоставлять базовую автоматизацию процессов, такую как автоматическая трассировка дорожек.
4. Проверка и анализ: система должна иметь базовый функционал проверки принципиальных схем.
5. Простота использования.

Как и с предыдущим подразделом, факторы строятся от самого важного к наименее важным.

1.3.1 Altium Designer

Altium Designer [13] – это комплексная система проектирования электронных устройств, включающая в себя инструменты и средства создания принципиальных схем, проектирования печатных плат, симуляции, анализа и создания производственной документации. Эта одна из самых популярных и мощных систем в области электронного проектирования во всем мире.

Altium Designer обладает широкой элементной базой, что облегчает выбор и проектирование принципиальных схем и печатных плат. Система имеет интегрированную систему, которая может помочь выбором и организацией компонентов. Данная среда пользуется большой популярностью в коммерческих организациях при разработке устройств.

Система позволяет создавать новые схемы, добавлять компоненты из встроенных библиотек или собственных скриптов, создавать производственные файлы по типу Gerber, Pick and Place, BOM и так далее. Так же имеет удобный пользовательский интерфейс.

Однако, данная система имеет некоторые минусы, о которых нельзя не упомянуть:

1. Большая цена: самая обычная версия стоит \$358 в месяц, что, по сравнению с конкурентами, слишком много.
2. Сложность в создании новых компонентов.
3. Система требует большого количества ресурсов.

Так же из минусов можно выделить плохие отзывы на автоматическую трассировку и жалобы на обязательные облачные сервисы [14].

Пример пользовательского интерфейса Altium Designer – на рисунке 1.6.

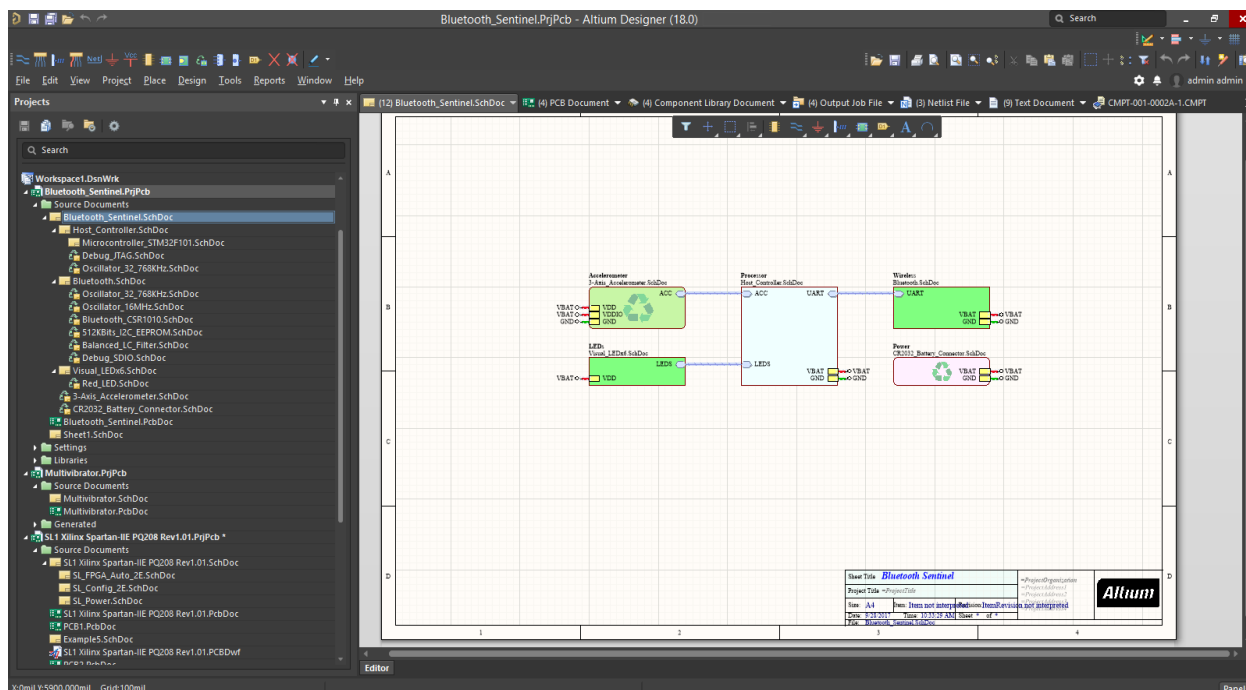


Рисунок 1.6 – Пример интерфейса Altium Designer [15]

1.3.2 KiCad EDA

KiCad EDA [16] – свободная открытая система автоматизированного проектирования печатных плат. С 7 февраля 2023 года была разработана версия 7.0.0, сформированная после перехода проекта в организацию Linux Foundation. Система распространяется для различных дистрибутивов Linux, Windows и macOS.

KiCad предоставляет полную поддержку разработки плат, в том числе создание принципиальных схем, разработку печатных плат, просмотр Gerber-файлов и лёгкое создание собственных элементов с функцией задания макета на печатной плате. Так же KiCad предоставляет функции конвертации изображений, для ручного создания плат или создания масок для плат. Так же система обладает менеджером плагинов, которые могут создаваться другими пользователями и загружаться в сеть.

Хоть KiCad EDA и является мощным и бесплатным инструментом проектирования, в нём присутствует ряд недостатков:

1. Малая элементная база.
2. Ограниченная документация: большинство информации, найденное во время использования данной среды было взято из форумов.
3. Интерфейс пользователя: среда имеет менее интуитивный пользовательский интерфейс по сравнению с конкурентами.

Следуя из первых двух пунктов, данная среда плохо подходит как для коммерческого использования, так и для любителей.

Пример пользовательского интерфейса KiCad EDA показан на рисунке 1.7.

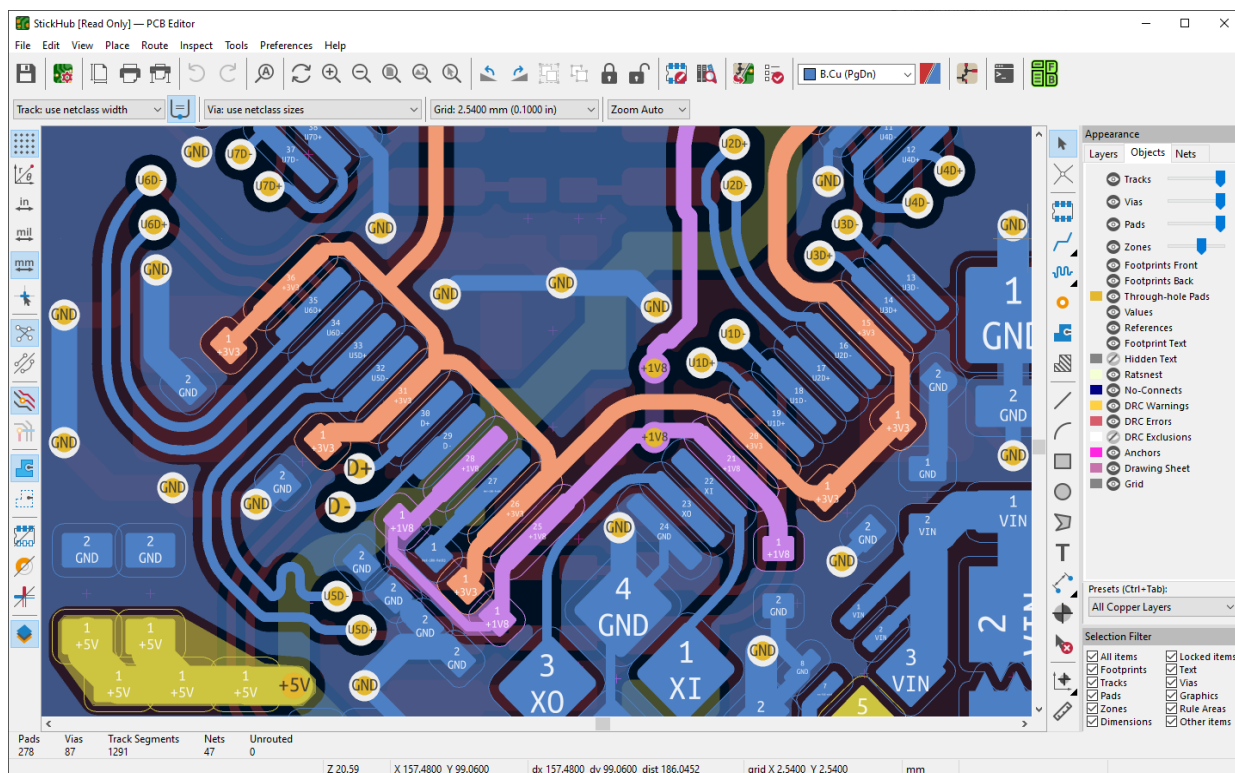


Рисунок 1.7 – Пример интерфейса KiCad EDA [17]

1.3.3 EasyEDA

Так как функции данной среды с точки зрения среды моделирования уже обзоревались, и основная информация была предоставлена ранее – следует сфокусироваться на функциях проектирования принципиальных схем и проектирования печатных плат.

Среда позволяет создавать принципиальные схемы с помощью встроенной библиотеки элементов, которые в последующем можно заказать как по-отдельности, так и на готовой печатной плате. Так же готовые принципиальные схемы легко изменяются и дополняются. Доступны средства написания документации к схемам.

С точки зрения проектирования печатных плат EasyEDA имеет значительные преимущества по сравнению с конкурентами. Как говорилось ранее, среда кроссплатформенная и доступна бесплатно как для персонального, так и для коммерческого использования. Система позволяет конвертировать принципиальные схемы в печатные платы и настраивать параметры плат с прецизионной точностью и гибкой настройкой различных характеристик. Так же доступен автоматический трассировщик в двух форматах: в облачном виде и локальном.

Кроме того, среда обладает возможностью загрузки проектов на облако и совместной работой над ними. Так же имеется интегрированная поддержка заказа готовых плат с jlcpcb.com, что позволяет просматривать оставшееся количество определённых элементов, их характеристики в реальном времени.

Среда обладает приятным, не перегруженным графическим интерфейсом, показанном на рисунке 1.8.

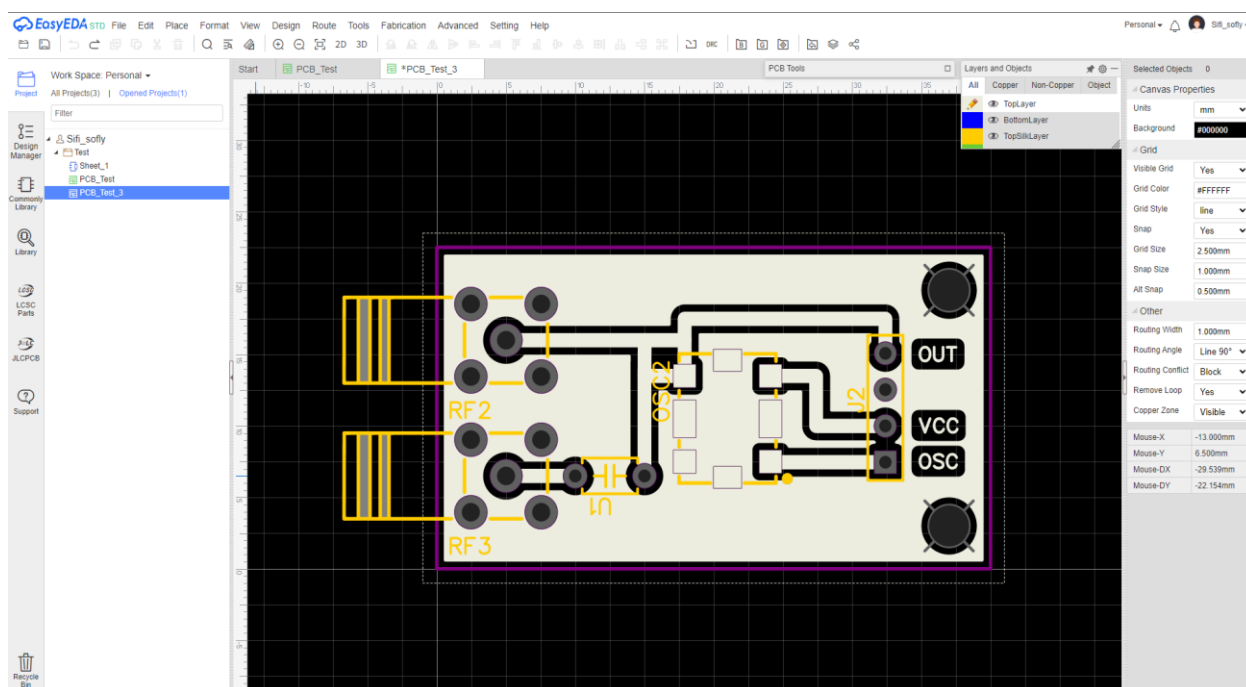


Рисунок 1.8 – Пример интерфейса EasyEDA

Из минусов можно выделить ограниченность среды для больших проектов, так как автоматический трассировщик и среда принципиальных схем могут не справиться с нагрузкой. Однако, так как данный проект не будет являться большим коммерческим проектом – данная среда отлично для него подходит.

1.4 Вывод

Исходя из вышеперечисленного обзора систем моделирования и проектирования, было решено использовать две различные среды, одну для моделирования и вторую для проектирования.

В качестве среды моделирования будет использоваться LTspice, так как программа обладает гибким выбором компонентов, широкими возможностями построения принципиальных схем и их последующим моделированием.

В качестве среды проектирования будет использоваться EasyEDA, так как в дальнейшем печатную плату можно будет заказать на jlcpcb.com. Среда обладает широким выбором компонентов, с функцией просмотра оставшихся компонентов, что позволит заказывать заранее собранную плату.

Так же исходя из обзора аналогов была поставлена цель изготовить продукт, работающий на минимальном расстоянии и использующий минимальное количество ресурсов, что обеспечит приемлемую цену продукта.

2 СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

В данном разделе описано разбиение проекта на структурные модули. Это производится с целью упрощения архитектуры путём разработки каждого из конкретных блоков как отдельной сущности. Такой подход упрощает совместную работу и позволяет разделить конкретные блоки между командой разработки, что упрощает работу над проектом в целом.

Так же такой подход упрощает сложность устройства, так как большая и сложная архитектура разбивается на более мелкие и понятные. Это так же позволяет придать модульности проекту, что позволяет создавать устройства из множества компонентов, которые можно разрабатывать, тестировать и заменять независимо друг от друга.

После анализа требуемых для реализации аппаратного продукта функций было решено разбить всё устройство на следующие структурные модули:

- Модуль источника питания
- Модуль регулирования питания
- Модуль развязки питания
- Модуль импульсного генератора
- Модуль генератора, управляемого импульсами
- Модуль настройки импульсов
- Модуль генератора, управляемого напряжением
- Модуль RF-вывода

Взаимосвязь между основными компонентами отображена на структурной схеме ГУИР.400201.024 С1.

2.1 Модуль источника питания

Данный модуль является основным модулем, который обеспечивает питание всего устройства. Модуль источника питания – это блок, предназначенный для обеспечения электроэнергией других компонентов всей конечной схемы. Его основной задачей является преобразование электрической энергии из одной формы в другую с нужными параметрами напряжения, тока и частоты.

Модуль питания может иметь различные характеристики по форме, размеру. Так же модули питания могут располагаться как внутри самого устройства, без предоставления непосредственного доступа к ним, как это происходит в телефонах, так и внутри устройства со специальным доступным отделом, как это реализовано в пультах, часах, и других устройствах, первостепенная важность которых – быстрая замена разрядившегося источника питания.

Некоторые модули питания предоставляются сразу с функцией заряда источника, например в современных смартфонах не используется заряд

аккумулятора отдельно. Вместо этого достаточно подключить телефон к сети, после чего пойдёт заряд.

2.2 Модуль регулирования питанием

Регулирование питания схемы является отдельной задачей. Так как модуль источника питания отвечает лишь за предоставление энергии – модуль регулирования эту энергию преобразовывает в нужный вид. В данном случае этот модуль предназначен для преобразования входного напряжения, которое может быть повышенным или пониженным, в постоянное напряжение с линейной зависимостью после некоторого порога.

Процесс регулирования может быть реализован различными методами, включая использование

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ДОПОЛНИТЬ

Главными преимуществами аппаратного комплекса является генерация шумов на частотах Wi-Fi и Bluetooth, которая позволяет «заражать» проходящий в эфире сигнал. Таким образом, любой сигнал, попадающий под частоты работы данного аппаратного комплекса будет зашумлён, и передача будет прервана или нарушена. Данные устройства используются для полной блокировки связи в любых целевых местах.

Очевидным недостатком данных комплексов является блокировка абсолютно любой проходящей сети. Таким образом, нельзя выбрать конкретную цель для зашумления или наоборот, для блокировки от шума. Однако, такие генераторы могут послужить созданием уникальных новых устройств, которые будут иметь «иммунитет» к шумам данного типа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Значение открытых каналов связи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://obzorposudy.ru/polezno/znacenie-otkrytyx-kanalov-svyazi>. – Дата доступа: 29.03.2024
- [2] Подавитель Скорпион Wi-Fi - 15 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://mrgadget.by/product/podavitel-skorpiion-wi-fi---15/>. – Дата доступа: 29.03.2024
- [3] Глушилка Wi-Fi 2400 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://mrgadget.by/product/glushilka-wi-fi-2400/>. – Дата доступа: 29.03.2024
- [4] Схемотехническое моделирование [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/8753/5/Тема_4_Схемотехнич_моделирование.pdf. – Дата доступа: 01.04.2024
- [5] Electronic Circuit Simulation Software [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://electronicsguruji.com/best-circuit-simulation-software/>. – Дата доступа: 01.04.2024
- [6] Официальный сайт EasyEDA [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://easyeda.com/>. – Дата доступа: 01.04.2024
- [7] SPICE Simulation Models [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.ni.com/en/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim/spice-simulation-fundamentals/spice-simulation-models>. – Дата доступа: 01.04.2024
- [8] Официальный сайт Proteus [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.labcenter.com/>. – Дата доступа: 01.04.2024
- [9] Stepper Motor Interface using Arduino with Proteus [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://computerscientist01.wixsite.com/computerscientist/items/stepper-motor-interface-using-arduino-with-proteus>. Дата доступа: 02.04.2024
- [10] Официальный сайт LTspice [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator>. – Дата доступа: 02.04.2024
- [11] Electronic Circuit Simulation Software [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://electronicsguruji.com/best-circuit-simulation-software/>. – Дата доступа: 02.04.2024
- [12] Руководство по проектированию печатных плат [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://resources.altium.com/ru/p/pcb-design-for-manufacturing-guidelines-how-to-avoid-critical-design-mistakes>. – Дата доступа: 02.04.2024

[13] Официальный сайт Altium Designer [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.altium.com/altium-designer>. – Дата доступа: 02.04.2024

[14] Altium Designer Reviews and Rating [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – <https://www.trustradius.com/products/altium-designer/reviews>. – Дата доступа: -02.04.2024

[15] A Fresh User Interface of Altium Designer [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.altium.com/documentation/altium-designer/nfs-18-0a-fresh-user-interface-ad?version=18.1>. – Дата доступа: 02.04.2024

[16] Официальный сайт KiCad EDA [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.kicad.org/>. – Дата доступа: 02.04.2024

[17] KiCad 6.0.0 Brings a New Look [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.hackster.io/news/kicad-6-0-0-brings-a-new-look-new-features-and-a-much-improved-3d-viewer-for-your-pcb-designs-fa0b1d278a68>. – Дата доступа: 02.03.2024

Вычислительные машины, системы и сети: дипломное проектирование [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_136308.pdf. – Дата доступа: 08.04.2024

Экономика проектных решений: методические указания по экономическому обоснованию дипломных проектов [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_161144.pdf. – Дата доступа: 08.04.2024