

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Мазунов Д.А.
Абрамова К.Н.
Газизов Т.Р.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В САПР KiCad

Методические указания к практическим занятиям

Томск 2026

УДК 621.396.6
ББК 32.844.1
М11

Рецензент:

Абраменко А.Ю., руководитель группы программирования ПЛИС
ОЦС ДИИС АО «НПФ «Микран»

Авторы:

Д.А. Мазунов, инженер 2 категории в АО «НПФ «Микран»
К.Н. Абрамова, ассистент кафедры ТУ
Т.Р. Газизов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ТУ

Мазунов Дмитрий Александрович

М11 Проектирование печатных плат в САПР KiCad: Методические указания к практическим занятиям / Д.А. Мазунов, К.Н. Абрамова, Т.Р. Газизов – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026. – 56 с.

Методические указания содержат руководство и описание практических работ по дисциплине «Основы конструирования и технологии производства электронных средств» (ОКиТПЭС) для бакалавров технических специальностей. Практические работы охватывают основные разделы курса ОКиТПЭС и служат для закрепления у студентов теоретических знаний и привития им навыков практической работы.

Одобрено на заседании кафедры ТУ, протокол № 2 от 10.06.2026.

УДК 621.396.6
ББК 32.844.1

© Мазунов Д.А., Абрамова К.Н.
Газизов Т.Р., 2026

© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1	5
1 Знакомство с функциональными возможностями KiCad	5
1.1 Установка САПР KiCad.....	5
1.2 Знакомство с интерфейсом программы KiCad.....	6
1.3 Создание проекта и формирование файлов структуры.....	7
1.4 Разработка условных графических обозначений в Symbol Editor и посадочных мест в Footprint Editor.....	8
1.5 Постановка задания для самостоятельной работы	20
1.6 Контрольные вопросы к практическому занятию №1	21
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2	22
2 Знакомство с редактором электрической схемы Schematic Editor.....	22
2.1 Интерфейс редактора электрической схемы Schematic Editor	22
2.2 Настройка формата листа и основной надписи схемы.....	23
2.3 Освоение функциональных возможностей Schematic Editor на примере схемы STM32F103C8T6 Blue Pill	24
2.4 Постановка задания для самостоятельной работы	31
2.5 Контрольные вопросы к практическому занятию №2	32
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3	33
3 Знакомство с редактором	33
3.1 Интерфейс редактора печатной платы PCB Editor	33
3.2 Подготовка файла печатной платы к трассировке.....	34
3.3 Разработка топологии печатной платы.....	40
3.4 Постановка задания для самостоятельной работы	47
3.5 Контрольные вопросы к практическому занятию №3	48
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4	49
4 Подготовка производственной документации печатной платы.....	49
4.1 Общие сведения о производственной документации печатной платы.....	49
4.2 Формирование Gerber и NC Drill файлов	49
4.3 Проверка Gerber-файлов и NC Drill в Gerber Viewer	50
4.4 Формирование Pick and Place файла	52
4.5 Формирование файла ведомости компонентов.....	53
4.6 Постановка задания для самостоятельной работы	55
4.7 Контрольные вопросы к практическому занятию №4	56

ВВЕДЕНИЕ

С развитием современных технологий электроники и все большим разнообразием электронных устройств проектирование печатных плат (ПП) становится неотъемлемой частью процесса создания современных радиоэлектронных средств (РЭС). Процесс проектирования ПП обычно включает создание электрической схемы, размещение компонентов, трассировку проводников, проверку и верификацию. Изучение процесса проектирования ПП позволит студентам технических специальностей приобрести необходимые знания и навыки для успешного осуществления проектов в области электроники. Проектирование ПП в системе автоматизированного проектирования (САПР) повышает эффективность и надежность разработки схем и устройств. САПР предоставляет инструменты, которые значительно упрощают и ускоряют процесс разработки ПП, а также обеспечивает ее высокую точность и надежность.

Одной из популярных и доступных САПР для проектирования ПП является KiCad – бесплатный комплекс с открытым исходным кодом. Система включает менеджер библиотек, редакторы схем и топологии плат, SPICE-симулятор и систему 3D-визуализации.

KiCad является кроссплатформенным решением с локальным хранением данных и поддержкой систем контроля версий (Git). Огромная библиотека компонентов и плагинов поддерживается мировым сообществом.

В данном пособии рассмотрены основные возможности KiCad и этапы проектирования ПП на конкретных практических примерах.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

1 Знакомство с функциональными возможностями KiCad

Цель работы – ознакомиться с функциональными возможностями САПР KiCad, научиться создавать файлы проекта, а также получить практические навыки разработки собственных библиотек условных графических обозначений (УГО) и посадочных мест компонентов (Footprints).

1.1 Установка САПР KiCad

Установка KiCad начинается с загрузки дистрибутива с официального сайта www.kicad.org (рисунок 1.1). Для этого на главной странице сайта необходимо перейти в раздел **Download**, затем выбрать используемую операционную систему, после чего указать соответствующую разрядность дистрибутива, например **64-bit x64**. В перечне доступных зеркал загрузки следует выбрать источник **GitHub**, после чего выполняется скачивание установочного файла.

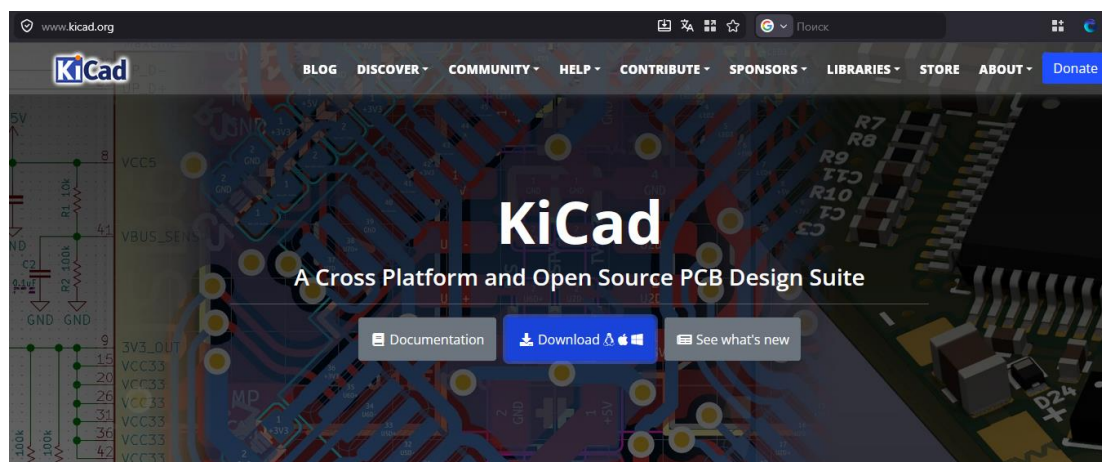


Рисунок 1.1 – Официальный сайт KiCAD

После завершения загрузки необходимо запустить установочный файл, в результате чего откроется мастер установки KiCad (рисунок 1.2).

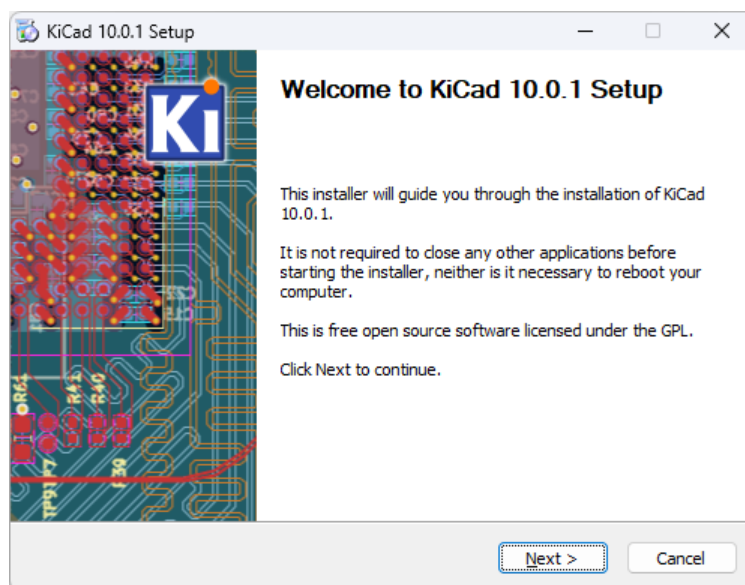


Рисунок 1.2 – Мастер установки KiCad

На начальном этапе установки отображается приветственное окно, подтверждающее запуск процесса инсталляции. Для продолжения необходимо нажать кнопку «Next». На последующих этапах установки рекомендуется выбрать полную конфигурацию, поскольку она включает стандартные библиотеки символов, посадочных мест и 3D-моделей, необходимых для полноценной работы в САПР.

1.2 Знакомство с интерфейсом программы KiCad

В начале работы с САПР KiCad пользователь запускает программу и переходит в стартовое окно (рисунок 1.3), из которого осуществляется доступ ко всем основным инструментам разработки. Данное окно представляет собой стартовую рабочую среду, обеспечивающую управление проектом, библиотеками компонентов и редакторами схемы и печатной платы.

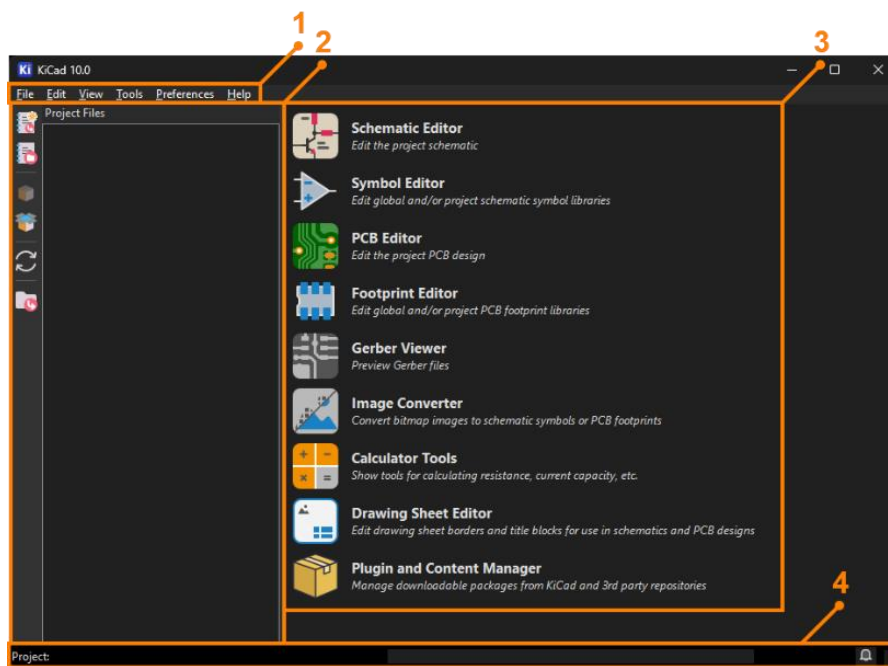


Рисунок 1.3 – Стартовое окно KiCad

Стартовое окно KiCad содержит:

1. Панель инструментов. Она содержит основные команды управления программой, такие как создание и открытие проектов, настройку параметров, вызов инструментов и справочной информации.
2. Панель Project Files. В данной области отображаются все файлы проекта.
3. Панель программ. В ней размещены все основные модули:
 - Schematic Editor – редактор электрической принципиальной схемы;
 - Symbol Editor – редактор библиотек УГО;
 - PCB Editor – редактор печатной платы;
 - Footprint Editor – редактор библиотек посадочных мест;
 - Gerber Viewer – средство просмотра gerber-файлов;
 - Image Converter – инструмент преобразования графических изображений;
 - Calculator Tools – набор инженерных расчетных инструментов;
 - Drawing Sheet Editor – редактор рамок и штампов;
 - Plugin and Content Manager – менеджер подключаемых модулей и библиотек.
4. Строку состояния, в которой отображается служебная информация о текущем проекте и режиме работы программы.

1.3 Создание проекта и формирование файлов структуры

Создание нового проекта в KiCad выполняется из стартового окна программы. Для этого необходимо выбрать команду в панели инструментов **File / New Project**. Также данная операция может быть выполнена с помощью сочетания клавиш **Ctrl + N**. После вызова команды создания проекта открывается окно **Project Template Selector** (рисунок 1.4), где можно создать проект как на основе готовых шаблонов, содержащих предварительно заданную структуру и настройки, так и в стандартном виде. В данном примере выбран шаблон **Default**, соответствующий базовому проекту KiCad без дополнительных специализированных настроек. После выбора шаблона необходимо нажать кнопку «**OK**».

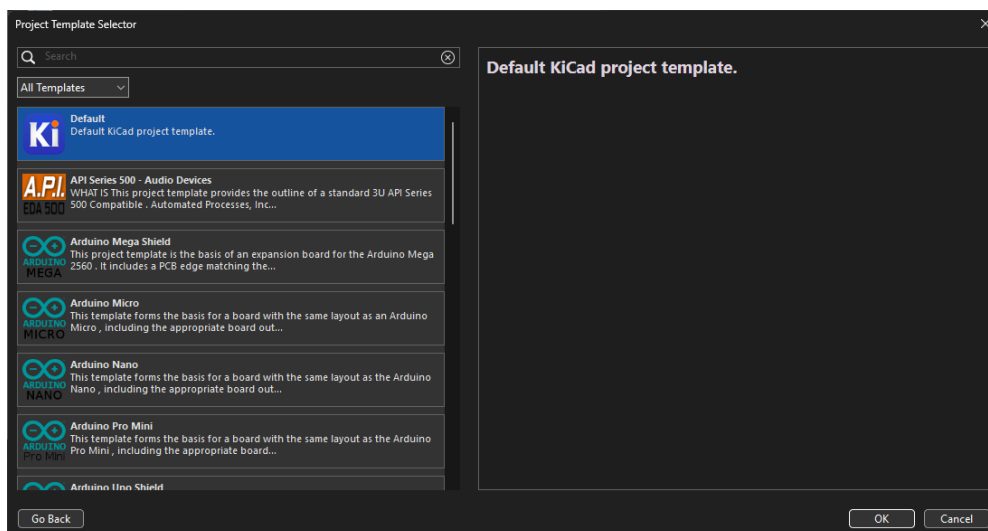


Рисунок 1.4 – Окно выбора шаблона проекта Project Template Selector

Затем открывается окно сохранения проекта (рисунок 1.5), где необходимо указать папку размещения файлов и задать имя проекта. В поле имени файла вводится название «**Project_1**». Если установлен флаг «**Create a new folder for the project**» для проекта автоматически создаётся отдельная папка, в которой будут размещены все связанные с ним файлы. После этого необходимо нажать кнопку «**Сохранить**».

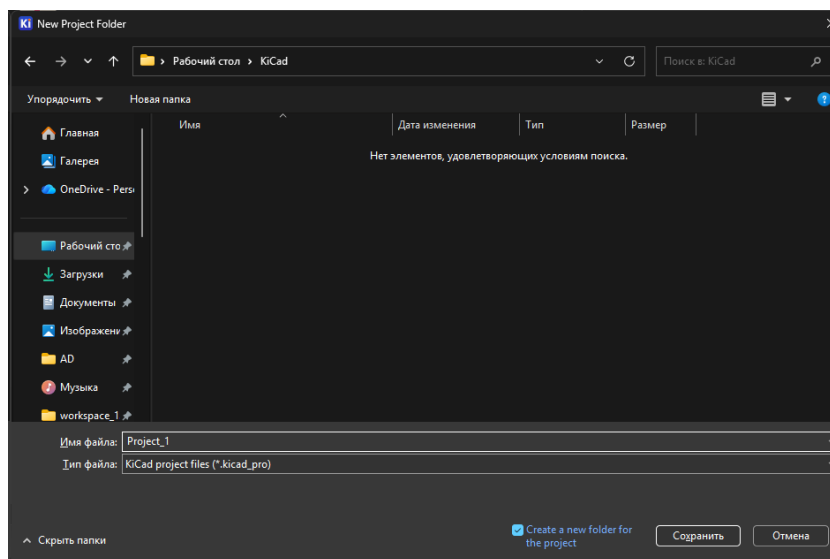


Рисунок 1.5 – Окно сохранения нового проекта KiCad

После сохранения проекта вновь открывается стартовое окно KiCad, в левой панели **Project Files** отображается созданный проект «**Project_1.kicad_pro**», а также автоматически сформированные основные файлы проекта электрической схемы (формат файла **.kicad_sch**) и

печатной платы (формат файла .kicad_pcb). Кроме того, создается служебная папка **.history**, используемая программой для хранения истории изменений.

Перед тем как переходить к разработке электрической схемы и печатной платы необходимо создать пользовательские библиотеки компонентов, включающие УГО и посадочные места.

1.4 Разработка условных графических обозначений в Symbol Editor и посадочных мест в Footprint Editor

Для открытия редактора УГО в стартовом окне KiCad, представленном на рисунке 1.3, в списке программных модулей необходимо выбрать пункт **Symbol Editor** (рисунок 1.6), после чего открывается окно редактора символов, предназначенное для создания и редактирования УГО электронных компонентов. Окно редактора УГО в KiCad включает:

1. **Панель инструментов**, которая содержит основные команды управления редактором, включая создание, сохранение, редактирование, просмотр, размещение графических объектов и настройку параметров.

2. **Панель инструментов быстрого доступа**, содержащая часто используемые команды: сохранение, отмена и повтора действия, масштабирование, обновление и запуск отдельных команд редактора.

3. **Панель библиотек**, отображающая список доступных библиотек символов и содержащихся в них элементов.

4. **Панель свойств**, используемая для отображения и редактирования свойств выбранного объекта.

5. **Панель фильтра выделения**, предназначенная для задания типов объектов, доступных для выделения и редактирования в рабочей области.

6. **Левая вертикальная панель инструментов**, которая содержит вспомогательные команды управления отображением, сетками и режимами редактирования.

7. **Рабочая область символа**, представляющая собой основное поле редактирования, в котором выполняется построение графических обозначений компонента и размещение его выводов.

8. **Строка состояния**, отображающая координаты курсора, шаг сетки, единицы измерения и служебную информацию о текущем режиме работы редактора.

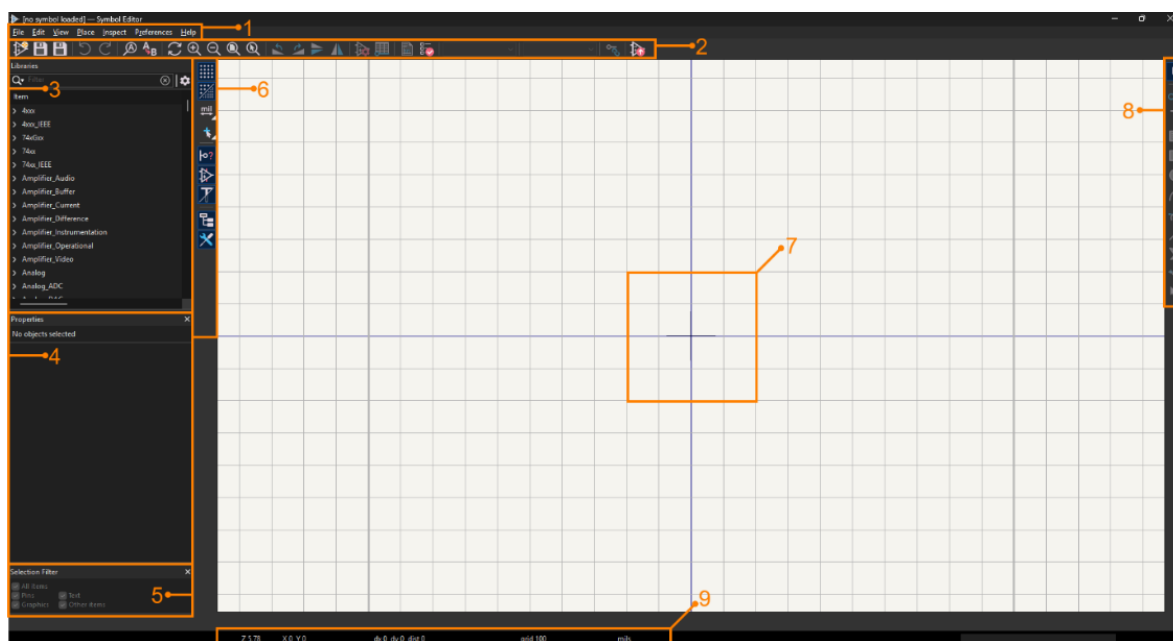


Рисунок 1.6 – Интерфейс редактора Symbol Editor

Для разработки пользовательских символов в KiCad необходимо предварительно создать отдельную библиотеку УГО. Создание новой библиотеки УГО выполняется в редакторе **Symbol Editor** через панель инструментов **File / New Library...** (рисунок 1.7).

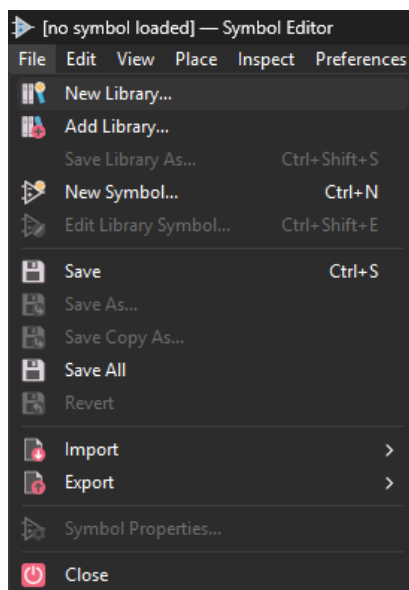


Рисунок 1.7 – Выбор команды создания новой библиотеки в редакторе Symbol Editor

В открывшемся окне необходимо задать имя файла библиотеки и указать место его сохранения (рисунок 1.8). Библиотеку рекомендуется сохранять непосредственно в папке проекта, при этом имени файла можно присвоить, например, значение **Lib_project_1.kicad_sym**. После сохранения новая библиотека появляется в левой панели **Libraries** редактора **Symbol Editor**.

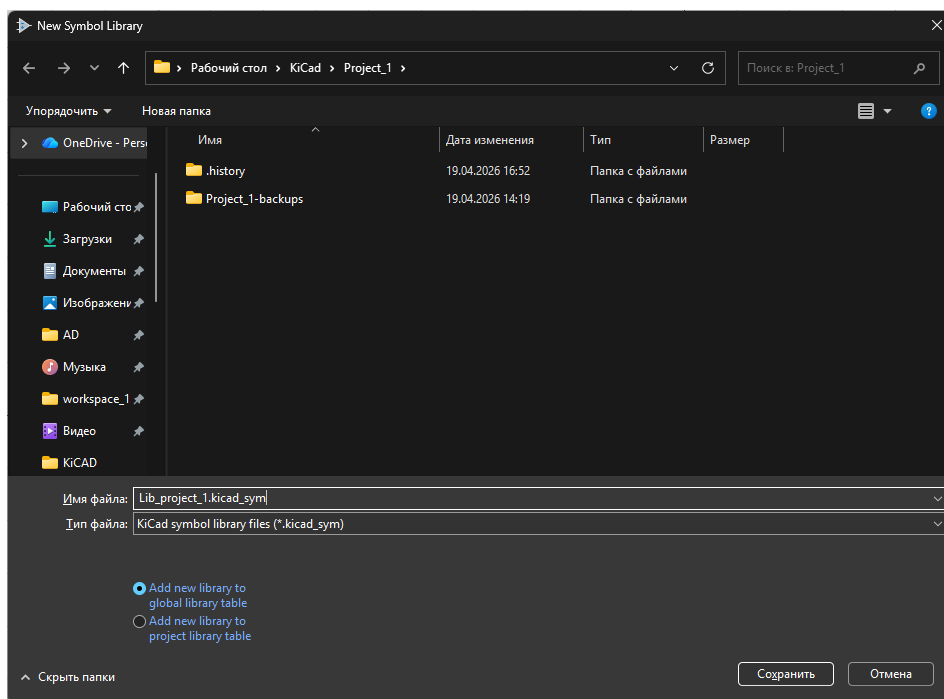


Рисунок 1.8 – Сохранение файла библиотеки символов в папке проекта

Для добавления нового символа необходимо щелкнуть по названию созданной библиотеки правой кнопкой мыши и выбрать команду **New Symbol...** (рисунок 1.9), после чего откроется окно задания параметров для УГО.

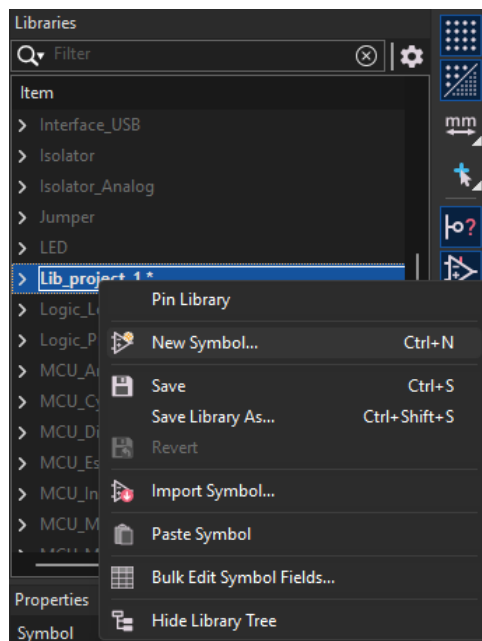


Рисунок 1.9 – Отображение созданной библиотеки в панели Libraries и выбор команды создания нового символа

Окно создания нового символа представлено на рисунке 1.10, в нем можно задать следующие параметры:

- **Symbol name** – имя создаваемого символа;
- **Derive from existing symbol** – создание нового символа на основе уже существующего;
- **Default reference designator** – префикс позиционного обозначения элемента на схеме. Значение данного поля следует задавать в соответствии с принятыми обозначениями элементов по требованиям ЕСКД и ГОСТ: R – резистор, C – конденсатор, VD – диод, VT – транзистор, D – микросхема (в некоторых случаях микросхемы распределяют на DD – цифровую микросхему; DA – аналоговую);
- **Number of units per package** – количество логических секций в одном корпусе компонента. Этот параметр используется для элементов, содержащих несколько одинаковых или связанных секций, например двух операционных усилителей в одном корпусе или нескольких логических элементов в одной микросхеме;
- **All units are interchangeable** – признак взаимозаменяемости функциональных секций внутри одного корпуса. Данный параметр используется в том случае, если все части компонента имеют одинаковое назначение и могут быть использованы на схеме в произвольном порядке без нарушения логики работы, например для нескольких одинаковых логических элементов или операционных усилителей в одном корпусе.
- **Create symbol with alternate body style (De Morgan)** – создание альтернативного графического представления;

- **Create symbol as power symbol** – создание символа питания;
- **Exclude from bill of material** – исключение элемента из перечня элементов;
- **Exclude from board** – исключение элемента из печатной платы;
- **Pin name position offset** – смещение текста имени вывода;
- **Show pin number text** – отображение номера вывода;
- **Show pin name text** – отображение имени вывода;
- **Pin name inside** – размещение имени вывода внутри графического контура символа.

В качестве примера будет рассмотрено создание символа для микроконтроллера STM32F103C8T6.

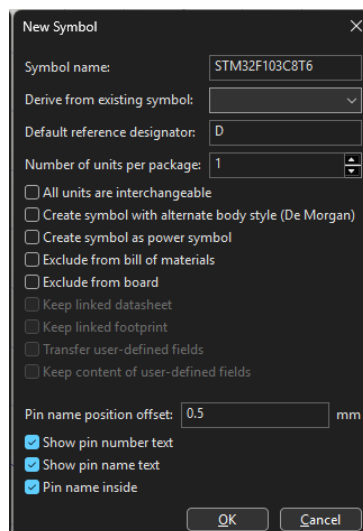


Рисунок 1.10 – Окно задания параметров нового символа

Перед началом построения УГО символа необходимо выполнить настройку сетки редактора в соответствии с требованиями ЕСКД. Выбор шага сетки должен обеспечивать удобство построения символа и соблюдение норм оформления, установленных ГОСТ 2.701, ГОСТ 2.702 и соответствующими стандартами на УГО элементов. На рисунке 1.11 показана настройка сетки, которая выполняется по следующему алгоритму:

1. Вызов окна редактирования параметров сетки, с помощью кнопки на левой вертикальной панели инструментов.
2. В открывшемся окне настроек выбрать создание или редактирование шага сетки;
3. Задать требуемое значение сетки 2,5 мм;
4. Подтвердить введенные параметры нажатием кнопки ОК.

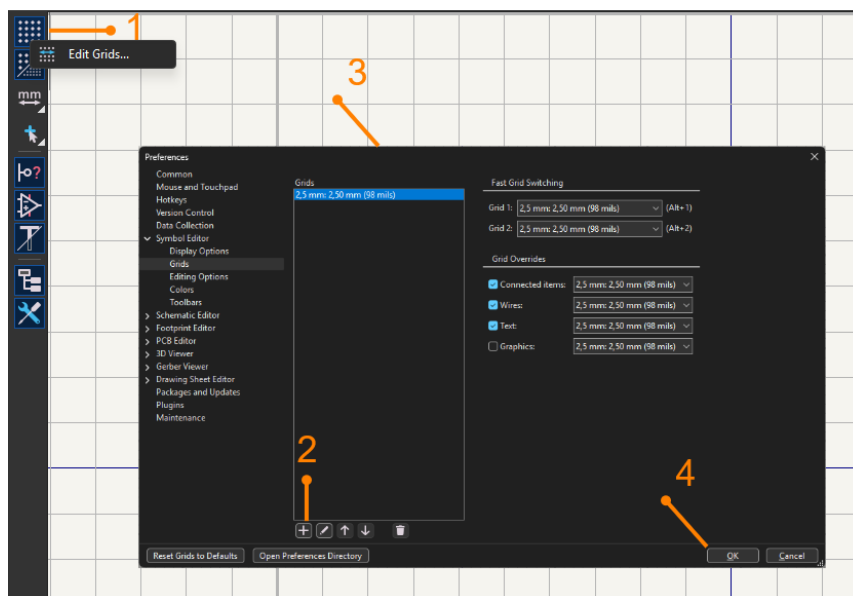


Рисунок 1.11 – Настройка сетки в редакторе Symbol Editor

После настройки сетки можно переходить к построению УГО компонента. Одним из основных элементов УГО являются выводы (инструмент Pin). Данный инструмент предназначен для размещения на символе электрических выводов с указанием их наименования, номера, типа и графических параметров. Для добавления вывода (рисунок 1.12) на правой вертикальной панели инструментов необходимо выбрать инструмент Pin. Это открывает окно Pin Properties, в котором выполняется настройка его основных параметров:

– **Pin name** – вводится имя вывода, соответствующее его функциональному назначению, например PA0, VCC, GND, RESET;

– **Pin number** – указывается номер вывода в соответствии с документацией на компонент;

– **Electrical Type** – выбирается электрический тип вывода, например вход (Input), выход (Output), двунаправленный (Bidirectional), питание (Power input) или пассивный (Passive);

– **Graphic style** – задается графический стиль отображения вывода;

– **X position** и **Y position** – задаются координаты размещения вывода в рабочей области;

– **Orientation** – выбирается направление вывода относительно корпуса символа;

– **Pin length** – задается длина линии вывода;

– **Name text size** – устанавливается размер шрифта имени вывода;

– **Number text size** – устанавливается размер шрифта номера вывода;

– **Visible** – определяет, будет ли вывод отображаться на символе;

– **Preview** – позволяет предварительно просмотреть внешний вид вывода до подтверждения настроек.

После завершения настройки вывода необходимо нажать кнопку ОК, после чего вывод будет размещён на УГО с указанными параметрами.

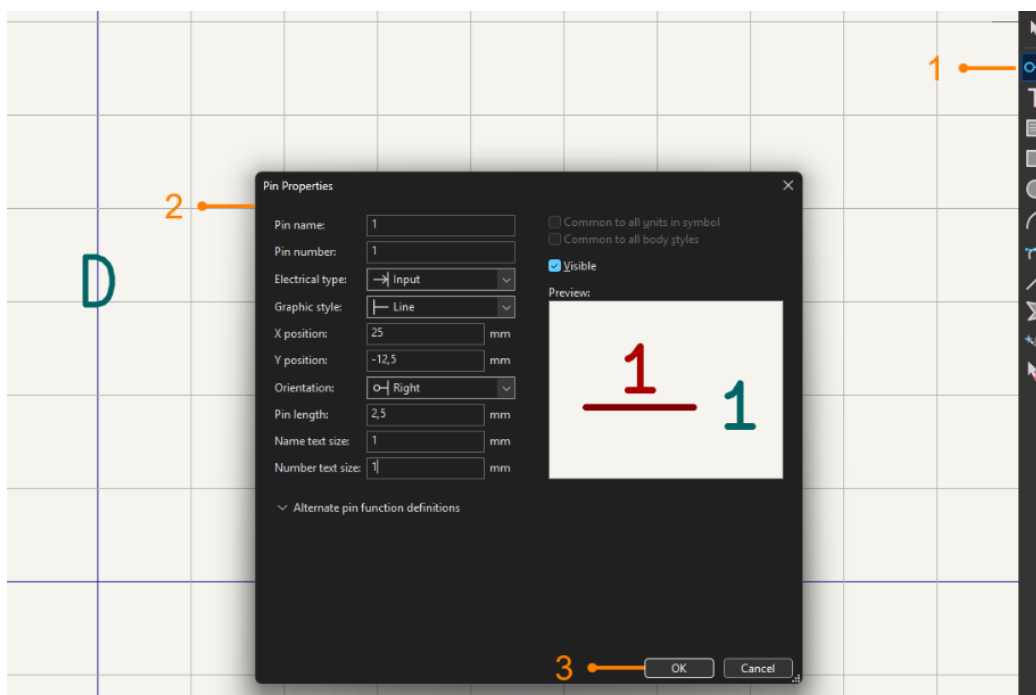


Рисунок 1.12 – Добавление и настройка вывода в редакторе Symbol Editor

В качестве примера было создано УГО микроконтроллера **STM32F103C8T6**, результат показан на рисунке 1.13. При построении символа применялся инструмент **Draw Rectangle** (1), с помощью которого был сформирован прямоугольный контур УГО микросхемы. Такое представление соответствует общепринятому способу изображения интегральных схем и обеспечивает удобство чтения электрической принципиальной схемы. Для обозначения функционального назначения элемента внутри контура применяется инструмент **Draw Text** (2), с помощью которого размещается надпись **MCU**.

При добавлении выводов необходимо обеспечивать соответствие их имен, номеров и электрических типов данным технической документации на компонент, а также располагать их по сторонам символа с учетом функционального назначения.

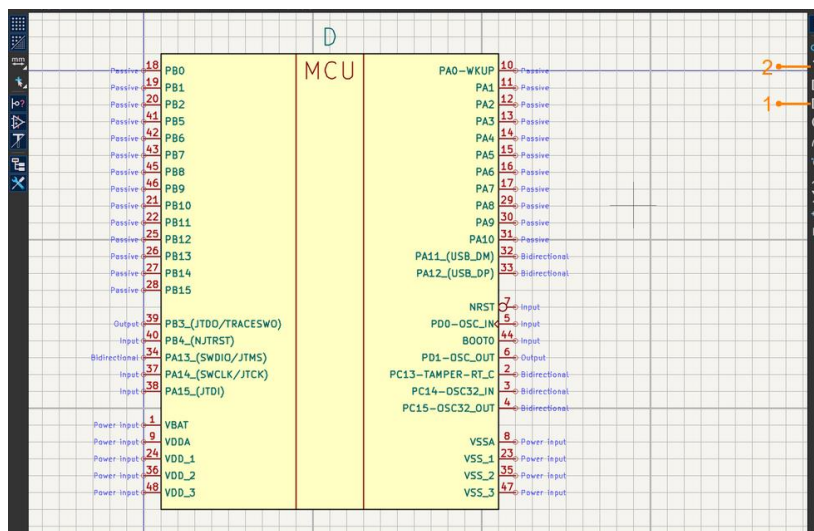


Рисунок 1.13 – УГО микроконтроллера

Следующим этапом после построения УГО является разработка посадочного места микроконтроллера. Для открытия редактора посадочных мест в стартовом окне KiCad (рисунок 1.3), в списке программных модулей необходимо выбрать пункт **Footprint Editor**, после чего открывается соответствующее окно, предназначенное для создания и редактирования посадочных мест электронных компонентов. На рисунке 1.14 показан интерфейс редактора посадочных мест Footprint Editor.

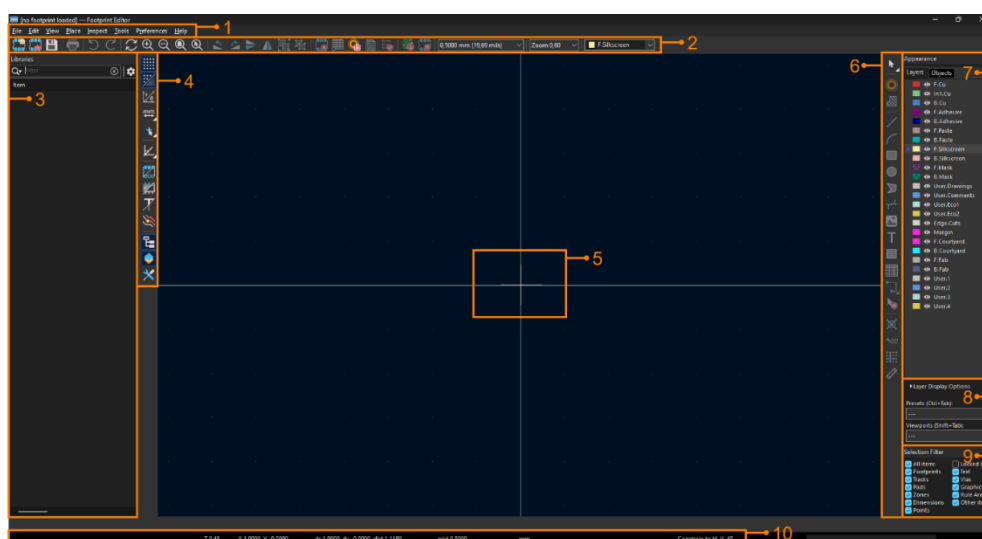


Рисунок 1.14 – Интерфейс редактора посадочных мест Footprint Editor

Ниже будет приведено пояснение, с обозначением для отдельных областей, отмеченных на рисунке 1.14.

1. **Панель инструментов** содержит основные команды управления редактором, включая создание, сохранение, редактирование, просмотр, размещение графических объектов и настройку параметров.

2. **Панель инструментов быстрого доступа** содержит такие часто используемые команды, как сохранение, отмена и повтор действия, масштабирование, обновление и запуск отдельных команд редактора.

3. **Панель библиотек** отображает список библиотек посадочных мест и содержащихся в них элементов.

4. **Левая вертикальная панель инструментов.**

5. **Рабочая область посадочного места.**

6. **Правая вертикальная панель инструментов.**

7. **Панель слоев** используется для управления отображением слоев, объектов и других элементов рабочей области.

8. **Панель дополнительных параметров отображения** содержит настройки пользовательских настроек отображения, режимов просмотра и параметров визуального представления редактора.

9. **Панель фильтра выделения** предназначена для задания типов объектов, доступных для выделения и редактирования.

10. **Строка состояния** отображает координаты курсора, шаг сетки, единицы измерения и служебную информацию о текущем режиме работы редактора.

Для разработки пользовательских посадочных мест в KiCad необходимо предварительно создать отдельную библиотеку посадочных мест компонентов. В рамках учебной работы такую библиотеку целесообразно размещать в папке текущего проекта. Это обеспечивает удобство хранения файлов и позволяет использовать созданные посадочные места только в пределах разрабатываемого проекта.

Создание новой библиотеки посадочных мест выполняется в редакторе **Footprint Editor** через команду **File → New Library...** (рисунок 1.15), после чего появится окно создания новой библиотеки посадочных мест.

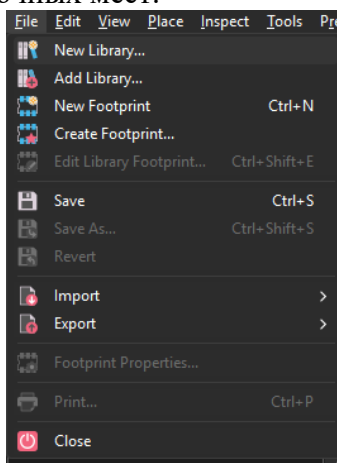


Рисунок 1.15 – Выбор команды создания новой библиотеки в редакторе Footprint Editor

В открывшемся окне необходимо задать имя файла библиотеки и указать место его сохранения (рисунок 1.16). Библиотеку рекомендуется сохранять непосредственно в папке проекта, при этом имени файла можно присвоить, например, значение **Footprint_lib_project1.pretty**. После выбора имени и каталога размещения необходимо сохранить библиотеку.

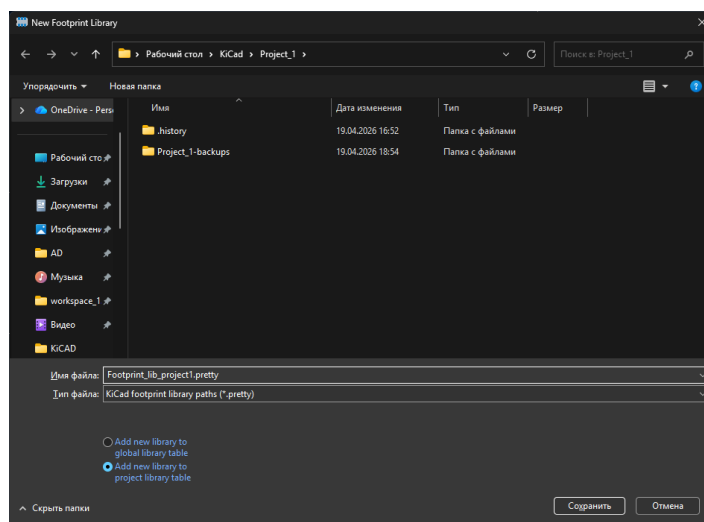


Рисунок 1.16 – Сохранение файла библиотеки посадочных мест в папке проекта

После сохранения новая библиотека появляется в левой панели **Libraries** редактора **Footprint Editor**, что подтверждает ее успешное создание.

Для добавления нового посадочного места в созданную библиотеку необходимо щелкнуть по ее имени правой кнопкой мыши и выбрать команду **New Footprint**, после чего открывается окно создания нового посадочного места компонента (рисунок 1.17).

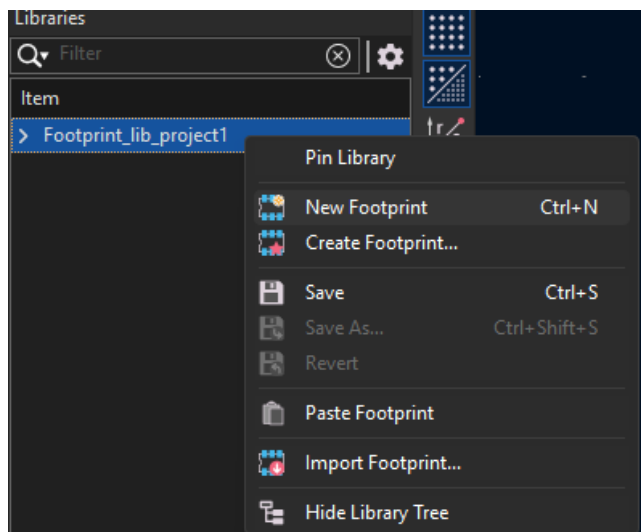


Рисунок 1.17 – Отображение созданной библиотеки в панели Libraries и выбор команды создания нового посадочного места

После создания библиотеки можно переходить к добавлению в неё новых посадочных мест компонентов. Для начала необходимо ознакомиться со слоями, используемыми в редакторе Footprint Editor (Панель Appearance/Панель слоев). Каждый слой в составе посадочного места выполняет определённую функцию и отвечает за отображение или формирование отдельных элементов компонента на печатной плате.

Основными слоями, применяемыми при разработке посадочного места, являются:

F.Cu – верхний медный слой печатной платы. На нём размещаются контактные площадки SMD-компонентов и другие токопроводящие элементы верхней стороны платы.

B.Cu – нижний медный слой печатной платы. Используется, если посадочное место разрабатывается для монтажа на нижней стороне платы.

F.Silkscreen – верхний слой шелкографии. Применяется для нанесения контура компонента, позиционного обозначения и других вспомогательных надписей, видимых после изготовления платы.

B.Silkscreen – нижний слой шелкографии. Используется для аналогичных обозначений на нижней стороне платы.

F.Mask – верхний слой паяльной маски. Определяет области, в которых контактные площадки остаются открытыми для пайки на верхней стороне платы.

B.Mask – нижний слой паяльной маски. Используется для формирования открытых под пайку областей на нижней стороне платы.

F.Paste – верхний слой паяльной пасты. Применяется при автоматизированном монтаже SMD-компонентов и задает области нанесения паяльной пасты через трафарет.

B.Paste – нижний слой паяльной пасты. Используется для компонентов, устанавливаемых на нижней стороне платы.

F.Courtyard – верхний слой монтажной зоны компонента. Показывает рекомендуемую область размещения элемента и используется для проверки отсутствия механических пересечений между соседними компонентами.

B.Courtyard – нижний слой монтажной зоны для элементов, размещаемых на нижней стороне платы.

F.Fab – верхний слой технического контура компонента. Применяется для точного отображения геометрии элемента и используется в конструкторской и технологической документации.

B.Fab – нижний слой технического контура компонента.

Edge.Cuts – слой контура печатной платы. Используется для задания внешних границ платы, однако при разработке отдельного посадочного места, как правило, не применяется.

User.Drawings, **User.Comments** и другие пользовательские слои – вспомогательные слои, которые могут использоваться для временных построений, пояснений и технологических пометок.

При разработке посадочного места для микроконтроллера в корпусе **LQFP48** в первую очередь используются слои **F.Cu**, **F.Silkscreen**, **F.Mask**, **F.Paste**, **F.Courtyard** и **F.Fab**, так как именно они формируют основные элементы посадочного места на верхней стороне печатной платы.

Посадочное место формируется на основе габаритных и монтажных размеров, приведённых в технической документации на компонент. На рисунке 1.18 представлено типовое посадочное место корпуса **LQFP48**, содержащее 48 контактных площадок, расположенных по 4 сторонам корпуса с шагом **0,5 мм**.

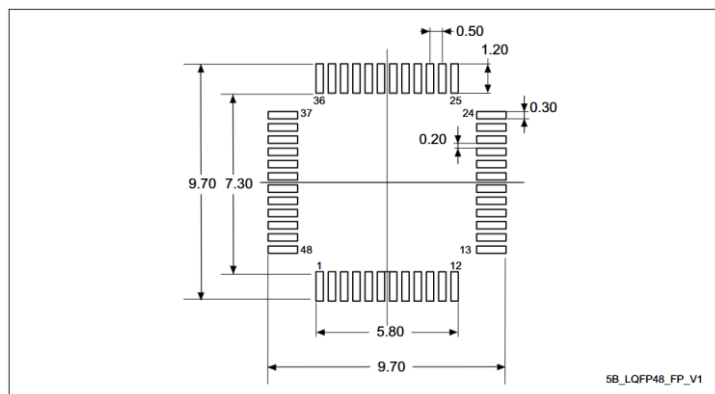


Рисунок 1.18 – Посадочное место корпуса LQFP48 для микроконтроллера STM32F103C8T6

Перед размещением контактных площадок в посадочном месте целесообразно предварительно выполнить настройку их параметров по умолчанию, что позволяет обеспечить единообразие геометрических размеров и используемых слоев для всех создаваемых контактов компонента. Для этого в редакторе **Footprint Editor** используется окно **Default Pad Properties for Add Pad Tool** (рисунок 1.19), в котором задаются стандартные параметры новых площадок, добавляемых инструментом **Add Pad**.

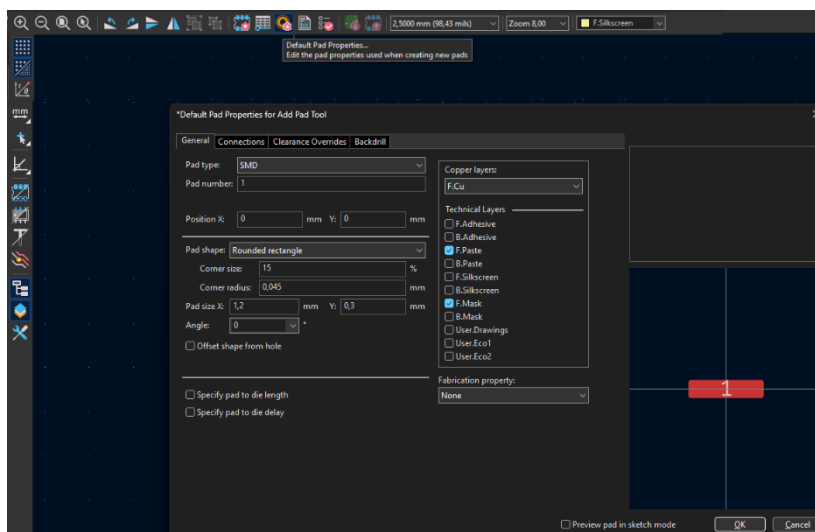


Рисунок 1.19 – Окно редактирования контакта

Во вкладке **General** настраиваются основные характеристики контактной площадки:

- **Pad type** – тип площадки, например SMD для компонентов поверхностного монтажа;
- **Pad number** – номер контактной площадки;
- **Position X** и **Position Y** – координаты размещения площадки;
- **Pad shape** – форма площадки, например прямоугольная или скругленная прямоугольная;
- **Corner size** и **Corner radius** – параметры скругления углов площадки;
- **Pad size X** и **Y** – размеры площадки по горизонтали и вертикали;
- **Angle** – угол поворота площадки;
- **Copper layers** – медные слои, на которых размещается площадка;
- **Technical layers** – технические слои, связанные с отображением маски, пасты и других элементов технологического оформления.

Остальные вкладки в данном примере не понадобятся, ниже приведены краткие сведения об их назначении.

Connections – вкладка предназначена для настройки электрического подключения контактной площадки к проводникам и медным зонам печатной платы. Здесь задаются параметры соединения площадки с дорожками, полигонами меди и термобарьерами.

Clearance Overrides – вкладка используется для задания индивидуальных зазоров контактной площадки. С ее помощью можно настроить электрический зазор, расширение паяльной маски и изменение области нанесения паяльной пасты относительно размеров площадки.

Backdrill – вкладка предназначена для настройки параметров обратного рассверливания переходных отверстий. Данный режим применяется в многослойных печатных платах для уменьшения паразитных эффектов.

После задания параметров контактных площадок и выбора необходимых слоев выполняется построение посадочного места компонента в редакторе **Footprint Editor**. На рисунке 1.20 представлено сформированное посадочное место корпуса **LQFP48**, предназначенное для микроконтроллера **STM32F103C8T6**.

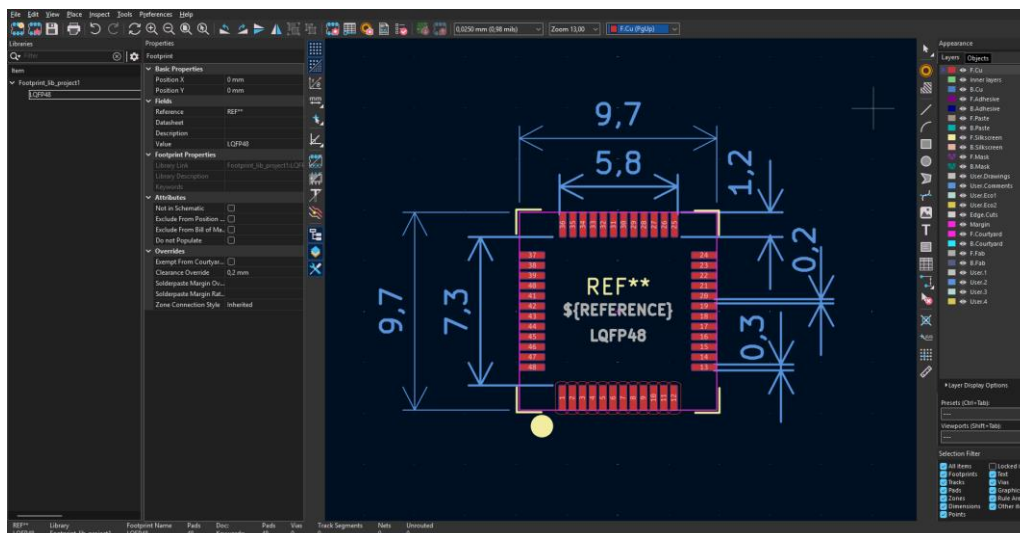


Рисунок 1.20 – Посадочное место корпуса LQFP48 для микроконтроллера STM32F103C8T6, созданное в редакторе Footprint Editor

Шелкография в посадочном месте размещается на слое **F.Silkscreen** и служит для обозначения границ компонента на печатной плате. Её линии располагаются так, чтобы не пересекать контактные площадки и не попадать в область пайки, поэтому контур корпуса обычно выносится за пределы зоны выводов или выполняется с разрывами. Окружность предназначена для отображения первого контакта микросхемы.

Текстовое поле **REF**** является шаблоном позиционного обозначения компонента в посадочном месте. После размещения элемента на плате вместо него автоматически подставляется конкретное обозначение, например **DD1**, **DA2** или **U1**.

Надпись **\${REFERENCE}** представляет собой переменную KiCad, которая автоматически заменяется текущим позиционным обозначением компонента. Это обеспечивает синхронизацию текстового поля посадочного места с обозначением элемента на схеме.

После завершения посадочного места к нему можно добавить 3D-модель. Она должна быть в формате **.step**, большая часть моделей есть в открытом доступе. Обычно они размещаются на сайтах производителей электронных компонентов, в библиотеках CAD-моделей или на специализированных ресурсах. Загруженный файл рекомендуется сохранить в папку проекта или в отдельную пользовательскую библиотеку 3D-моделей.

Для добавления 3D-модели к посадочному месту необходимо открыть созданный ранее элемент в редакторе **Footprint Editor** (рисунок 1.21). В данном примере выполняется назначение 3D-модели корпусу **LQFP48**.

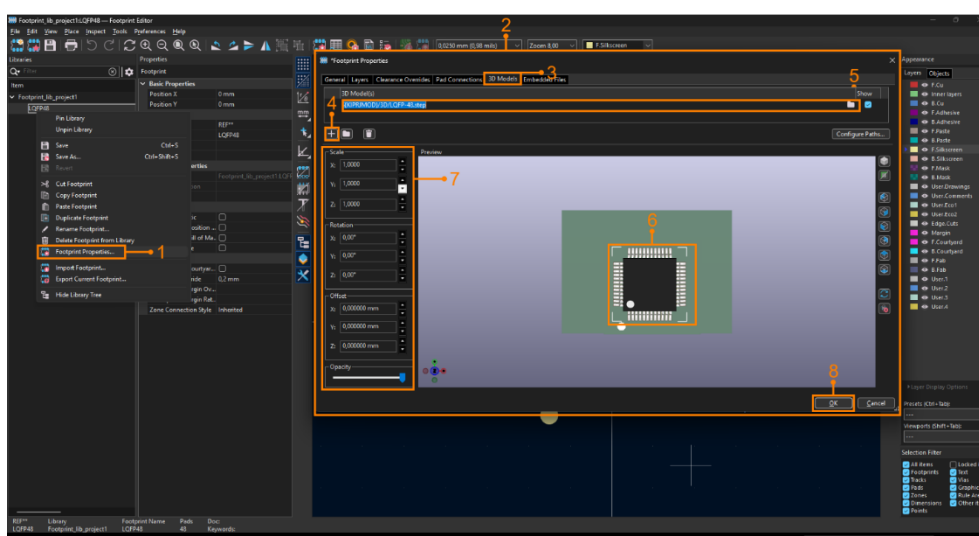


Рисунок 1.21 – Добавление 3D-модели в свойства посадочного места

Порядок добавления 3D-модели к посадочному месту:

1. В левой панели необходимо выбрать нужное посадочное место, после чего щелкнуть по нему правой кнопкой мыши и выбрать пункт **Footprint Properties**.

2. После в открывшемся окне **Footprint Properties**, предназначенном для настройки параметров выбранного посадочного места, необходимо перейти во вкладку **3D Models**. Данная вкладка используется для добавления и настройки 3D-моделей, связанных с посадочным местом.

3. Для добавления новой 3D-модели нужно нажать кнопку **Add 3D Shape** с изображением знака «+».

4. В поле **3D Model(s)** необходимо указать путь к файлу 3D-модели формата **.step**. Путь можно ввести вручную или выбрать файл через кнопку открытия проводника справа от строки пути.

5. После выбора файла модель отображается в области предварительного просмотра. По изображению необходимо убедиться, что 3D-модель соответствует выбранному посадочному месту и правильно совмещается с контактными площадками.

6. При необходимости выполняется настройка положения модели относительно посадочного места. Для этого используются параметры, приведённые в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Параметры настройки 3D-модели в Footprint Editor

Параметр	Назначение
Scale	Изменение масштаба модели по осям X,Y,Z
Rotation	Поворот модели относительно осей X,Y,Z
Offset	Смещение модели относительно посадочного места
Opacity	Настройка прозрачности модели в окне просмотра

7. После проверки положения модели необходимо нажать кнопку **ОК** для сохранения настроек.

После выполнения данных действий 3D-модель будет привязана к выбранному посадочному месту и сможет отображаться при просмотре печатной платы в 3D-режиме KiCad. Для сохранения изменений в библиотеке необходимо дополнительно сохранить отредактированный **Footprint**.

После завершения разработки посадочного места необходимо вернуться в редактор **Symbol Editor** для выполнения синхронизации УГО с соответствующим посадочным местом компонента. Данная операция позволяет установить связь между символом, используемым на электрической схеме, и ранее созданным посадочным местом, которое будет применяться при проектировании печатной платы (рисунок 1.22).

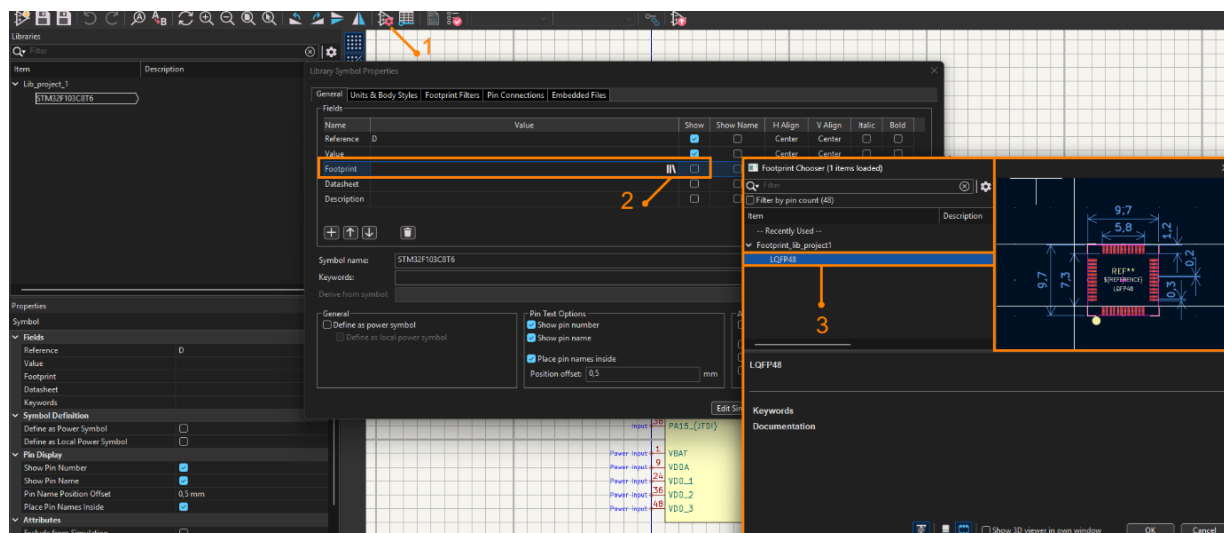


Рисунок 1.22 – Синхронизация условного графического обозначения и посадочного места в редакторе Symbol Editor

Для синхронизации УГО и посадочного места в окне Library Symbol Properties необходимо выбрать поле Footprint и нажать кнопку выбора посадочного места, расположенную справа от данного поля. После этого открывается окно Footprint Chooser, в котором необходимо раскрыть библиотеку посадочных мест проекта и выбрать ранее созданное посадочное место компонента, например LQFP48. В правой части окна Footprint Chooser отображается предварительный просмотр выбранного посадочного места. На данном этапе необходимо убедиться, что выбрано корректное посадочное место, соответствующее разрабатываемому компоненту.

1.5 Постановка задания для самостоятельной работы

В ходе выполнения первой практической работы необходимо:

- Выбрать электрическую принципиальную схему ЭЗ из предложенных вариантов либо предложить собственную схему для согласования с преподавателем;
- Проанализировать состав выбранной схемы и определить перечень компонентов, для которых требуется разработка условных графических обозначений и посадочных мест;
- Создать проект в среде **KiCad** и подготовить файловую структуру проекта: Файл проекта, файл схемы, файлы печатной платы, файл библиотеки УГО, файл посадочных мест компонентов.
- Разработать УГО необходимых компонентов согласно выбранной схемы, в соответствии с требованиями ЕСКД и ГОСТ;
- Разработать посадочные места необходимых компонентов согласно выбранной схемы, в соответствии с технической документацией на элементы;
- Выполнить синхронизацию УГО и соответствующих посадочных мест;
- Подготовить отчет по практической работе, содержание отчета: цель работы, выбранную схему ЭЗ, этапы проектирования УГО и посадочных мест компонентов, выводы.

Требования к схеме

Выбранная электрическая принципиальная схема ЭЗ должна соответствовать следующим требованиям:

- содержать не менее 20 элементов суммарно, включая резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, микросхемы и другие компоненты;
- включать не менее 3 функциональных узлов, например: входной каскад или датчик, блок обработки сигнала или логики, выходной каскад, индикация или реле;
- содержать сочетание дискретных компонентов и интегральных микросхем;
- включать компоненты различных классов:
- пассивные элементы (R, C, L);
- полупроводниковые элементы (VT, VD);
- коммутационные или исполнительные элементы (кнопки, реле, соединители, динамики).

Для студентов, выполняющих работу в рамках дипломного проектирования, допускается использование собственной схемы, если она соответствует указанным требованиям и предварительно согласована с преподавателем.

1.6 Контрольные вопросы к практическому занятию №1

1. Что представляет собой САПР KiCad и для каких задач она используется?
2. Какие основные модули входят в состав KiCad?
3. Какие файлы создаются при создании нового проекта KiCad?
4. Для чего в KiCad используются пользовательские библиотеки компонентов?
5. Что такое УГО компонента?
6. Для чего используется редактор символов KiCad?
7. Что такое библиотека символов и чем проектная библиотека отличается от глобальной?
8. Что такое посадочное место компонента?
9. Для чего используется редактор посадочных мест KiCad?
10. Как связаны между собой УГО компонента и его посадочное место?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

2 Знакомство с редактором электрической схемы Schematic Editor

Цель работы – ознакомиться с функциональными возможностями редактора электрических принципиальных схем **Schematic Editor** САПР KiCad, научиться размещать компоненты на схеме, выполнять электрические соединения между ними, использовать локальные и глобальные метки цепей, а также получить практические навыки оформления и проверки схемы средствами **ERC**.

2.1 Интерфейс редактора электрической схемы Schematic Editor

После изучения структуры проекта KiCad и разработки пользовательских библиотек компонентов дальнейшая работа переходит к созданию электрической принципиальной схемы. Для этого в составе проекта открывается файл схемы формата **.kicad_sch**, после чего запускается редактор **Schematic Editor** (рисунок 2.1).

Данный редактор предназначен для размещения компонентов, выполнения электрических соединений, добавления меток цепей, текстовых обозначений и других графических объектов, необходимых для построения и оформления схемы.

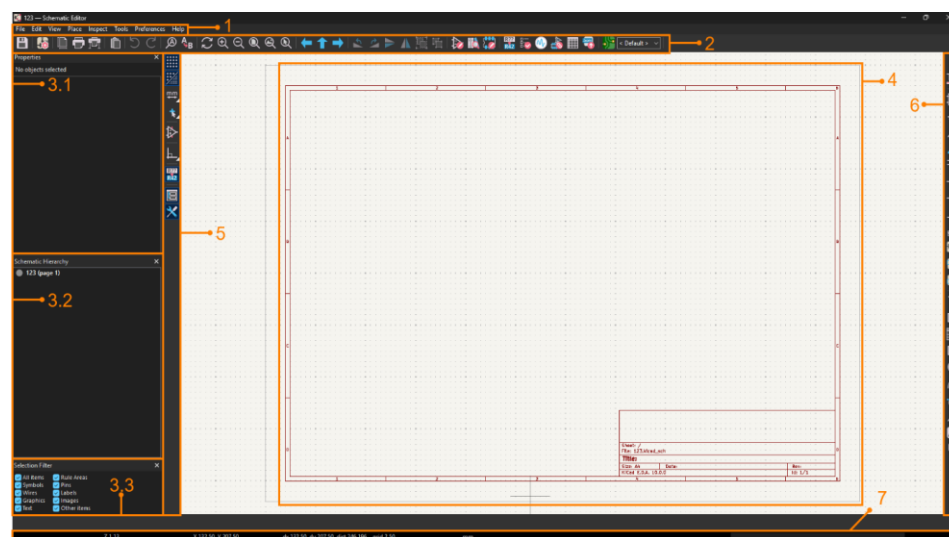


Рисунок 2.1 – Интерфейс редактора электрической схемы KiCad

Основные области редактора электрической схемы в KiCad:

1. **Панель инструментов**, которая содержит основные команды управления схемой: создание, сохранение, редактирование, просмотр, размещение компонентов, проверку и настройку параметров.

2. **Панель инструментов быстрого доступа**, которая содержит команды, которые часто используются, такие как сохранение, отмена и повтор действия, масштабирование, обновление и запуск отдельных команд редактора.

3. **Левая служебная панель**, которая включает окна Properties, Schematic Hierarchy и Selection Filter:

- Properties – отображает свойства выбранного объекта;
- Schematic Hierarchy – отображает структуру листов схемы;
- Selection Filter – инструмент задаёт тип объектов, доступных для выделения.

4. **Рабочая область схемы**, которая представляет собой основное поле редактирования, на котором размещается лист схемы с рамкой и основной подписью. Именно в этой области выполняется построение электрической принципиальной схемы.

5. **Левая вертикальная панель инструментов**, которая содержит команды настройки отображения и вспомогательные средства работы с сеткой и графическими режимами.

6. **Правая вертикальная панель инструментов**, которая содержит основные инструменты построения схемы: добавление проводников, шин, меток, символов, текстовых полей, графических элементов, изображений и других объектов.

7. **Строка состояния**, которая отображает текущие координаты курсора, шаг сетки, единицы измерения и служебную информацию о режиме работы редактора.

2.2 Настройка формата листа и основной надписи схемы

Перед началом размещения компонентов необходимо настроить формат листа схемы и заполнить основную надпись. Для этого в редакторе **Schematic Editor** используется окно **Page Settings** (рисунок 2.2).

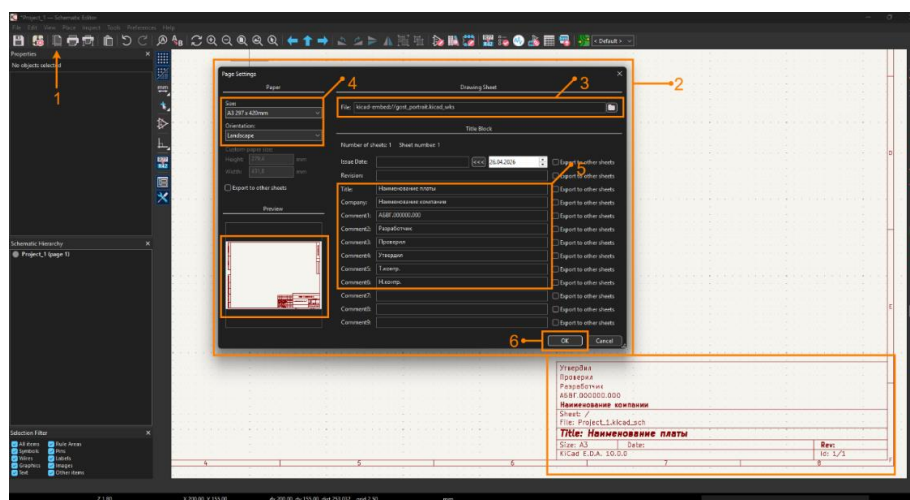


Рисунок 2.2 – Настройка формата листа и основной надписи схемы

Настройка выполняется следующим образом:

1. На верхней панели инструментов необходимо нажать кнопку **Page Settings**. После этого открывается окно настройки параметров листа.

2. В рабочей области редактора отображается лист схемы с рамкой и основной надписью. После выбора шаблона и заполнения данных изменения автоматически отображаются в правой нижней части листа.

3. В поле **File** выбирается файл шаблона чертёжного листа. В данном случае используется встроенный шаблон KiCad: `kicad-embed://gost_portrait.kicad_wks`.

4. Данный шаблон содержит рамку и основную надпись, оформленные в соответствии с требованиями к конструкторской документации.

5. В области **Paper** задаются параметры листа: Size: A3 297×420 mm Orientation: Landscape.

6. В области **Title Block** заполняются поля основной надписи. В них указываются сведения о разрабатываемой схеме, назначение которых приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Назначение полей основной надписи в окне Page Settings

Поле	Назначение
Title	Наименование платы или устройства
Company	Наименование организации
Comment1	Обозначение документа
Comment2	Разработчик
Comment3	Проверил
Comment4	Утвердил
Comment5	Технический контроль
Comment6	Нормоконтроль

7. После заполнения всех необходимых полей следует нажать кнопку **ОК**. После этого выбранный формат листа, рамка и заполненная основная надпись будут применены к текущей электрической схеме.

Также необходимо выполнить настройку сетки редактора в соответствии с требованиями ЕСКД.

Выбор шага сетки должен обеспечивать удобство построения символа и соблюдение норм оформления, установленных ГОСТ 2.701, ГОСТ 2.702 и соответствующими стандартами на условные графические обозначения элементов.

Как показано на рисунке 2.3, настройка выполняется следующим образом:

1. Нажать кнопку редактирования параметров сетки на левой вертикальной панели инструментов.
2. В открывшемся окне настроек выбрать создание или редактирование шага сетки.
3. Задать требуемое значение сетки 2,5 мм.
4. Подтвердить введенные параметры нажатием кнопки **ОК**.

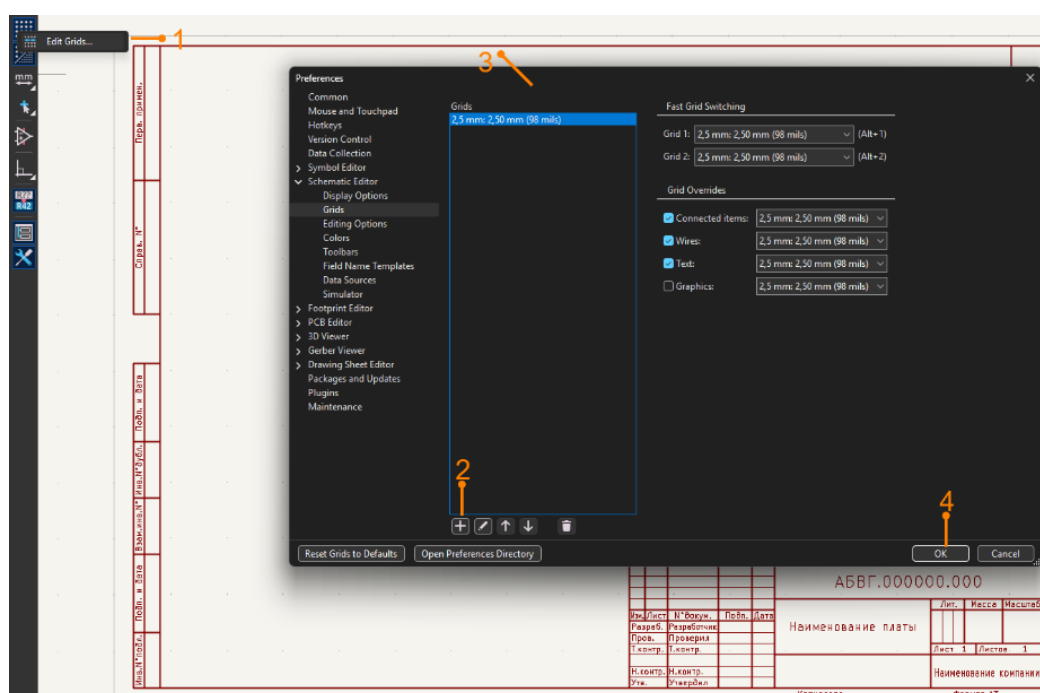


Рисунок 2.3 – Настройка сетки в редакторе Schematic Editor

2.3 Освоение функциональных возможностей Schematic Editor на примере схемы STM32F103C8T6 Blue Pill

После настройки формата листа и заполнения основной надписи выполняется разработка электрической принципиальной схемы. В качестве учебного примера используется схема отладочной платы на базе микроконтроллера **STM32F103C8T6 Blue Pill**.

Данный пример позволяет последовательно рассмотреть основные функциональные возможности редактора **Schematic Editor**: размещение компонентов, выполнение электрических соединений, применение меток цепей, добавление цепей питания, оформление функциональных узлов, аннотацию элементов и проверку схемы средствами ERC.

Размещение компонентов является первым этапом построения электрической принципиальной схемы. В редакторе **Schematic Editor** для добавления условных графических обозначений используется команда **Place Symbols** (рисунок 2.4).

Данная команда позволяет выбрать компонент из стандартной или пользовательской библиотеки и разместить его на листе схемы.

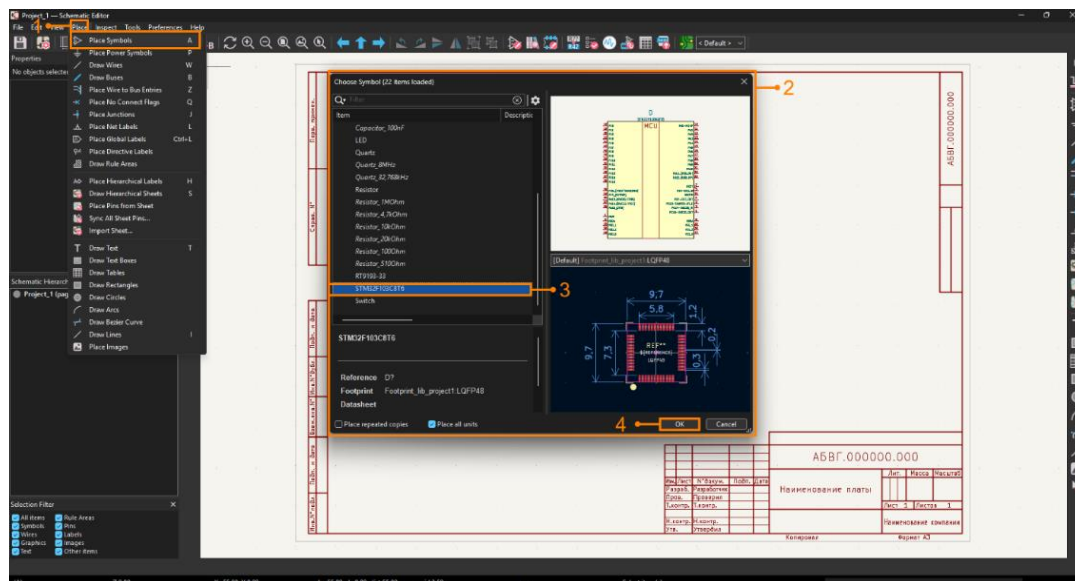


Рисунок 2.4 – Размещение компонента в редакторе Schematic Editor

Разместим элементы таким образом, чтобы минимизировать количество пересечений будущих линий связи и обеспечить компактность схемы (рисунок 2.5).

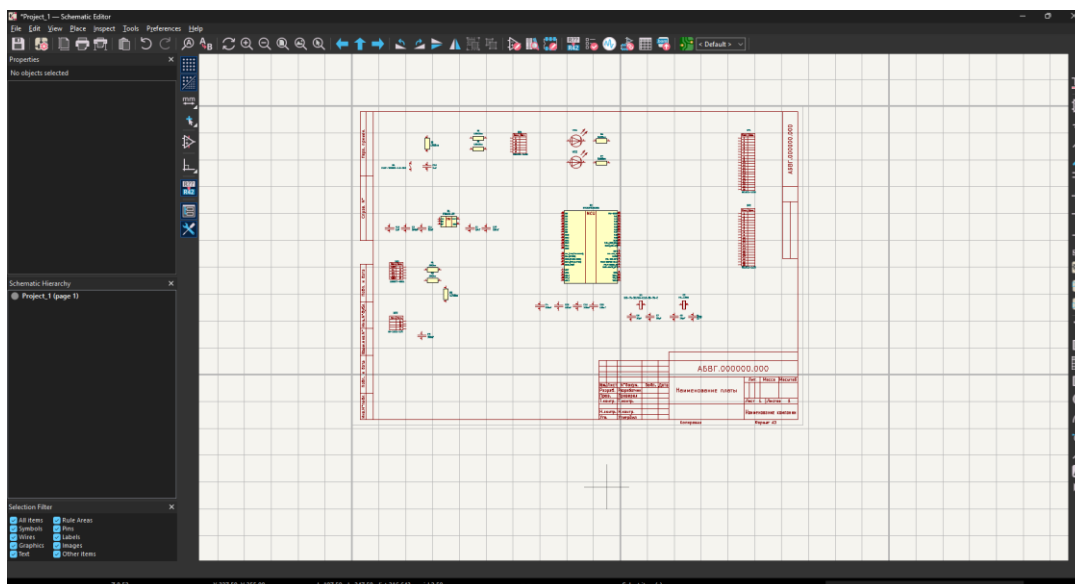


Рисунок 2.5 – Размещение всех компонентов

Для повышения эффективности работы и ускорения процесса компоновки в редакторе **Schematic Editor** предусмотрено использование «горячих» клавиш. Основные комбинации клавиш, предназначенные для быстрого размещения, поворота и перемещения элементов, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Горячие клавиши для работы в Schematic Editor

Клавиша	Действие
A	Вызов окна выбора компонента (Add Symbol)
R	Поворот компонента на 90 градусов
X	Зеркальное отображение относительно оси X
Y	Зеркальное отображение относительно оси Y
M	Перемещение компонента (Move)
G	Перемещение компонента с сохранением связей (Drag)
C	Копирование выбранного элемента
Del	Удаление выбранного элемента

После завершения размещения компонентов на поле чертежа необходимо выполнить их электрическое соединение в соответствии с принципиальной схемой устройства.

В редакторе **Schematic Editor** для этих целей используется инструмент **Add Wire**. (рисунок 2.6)

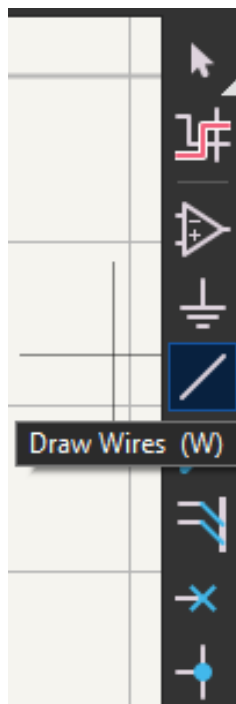


Рисунок 2.6 – Расположение инструмента Add Wire

Процесс создания связей (рисунок 2.7) включает в себя следующие шаги:

1. Выбор инструмента отрисовки проводника на панели инструментов (или нажатие горячей клавиши **W**).
2. Последовательное соединение выводов (Pins) компонентов.
3. Формирование узлов соединения в местах пересечения линий.

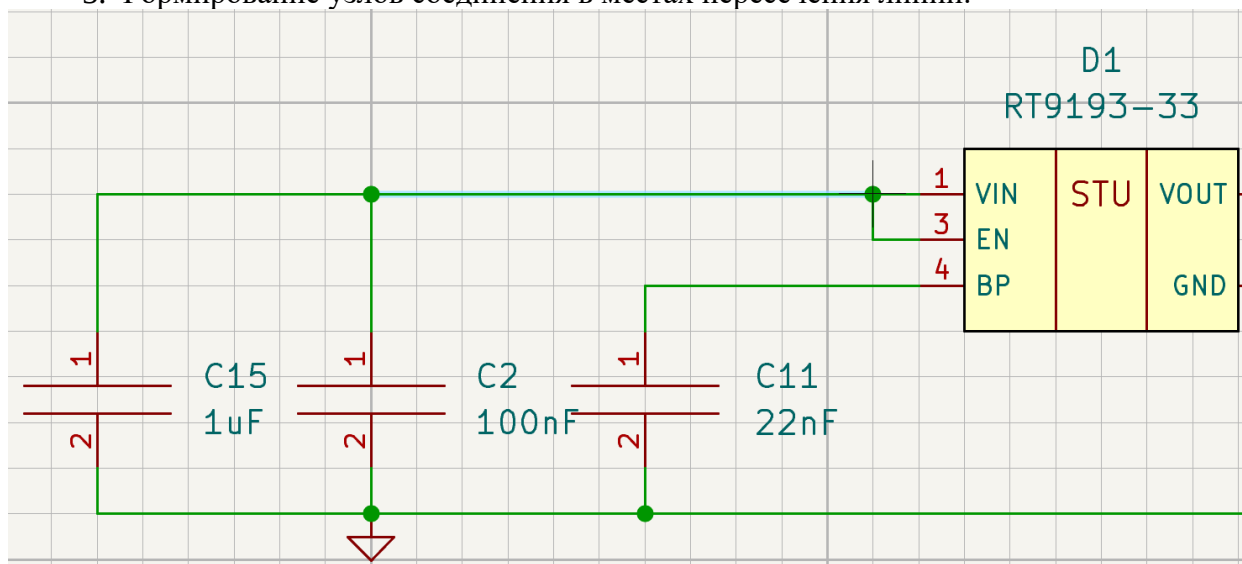


Рисунок 2.7 – Процесс соединения компонентов проводниками

Чтобы присвоить цепи **опорный потенциал** (заземление) или определенный **уровень напряжения** питания, в редакторе используются специальные символы портов питания. С помощью **Place Power Symbol** (рисунок 2.8).

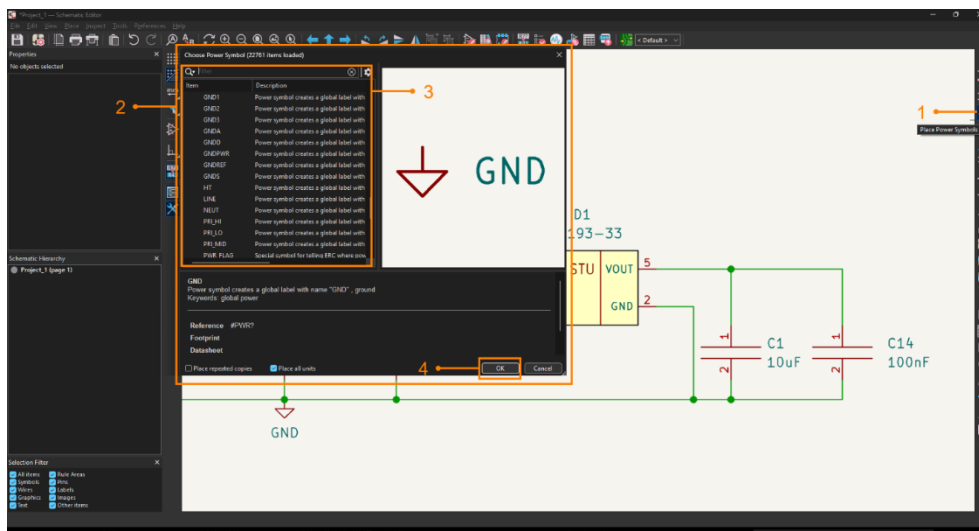


Рисунок 2.8 – Размещение специального символа с помощью Place Power Symbol

Процесс добавления портов питания и заземления выполняется следующим образом:

1. На правой панели инструментов необходимо нажать кнопку Add Power Port. После этого открывается диалоговое окно «Choose Power Symbol» для выбора символа питания.
2. В поле фильтра (строка поиска) вводится наименование цепи, которой необходимо присвоить опорный потенциал или уровень напряжения. Например, для выбора общей шины вводится значение GND, а для линий питания – соответствующий номинал, например +3.3V или +5V.
3. В центральной области окна из списка доступных библиотек выбирается требуемый компонент. В окне предварительного просмотра отображается его условное графическое обозначение (УГО), которое будет размещено на чертеже.
4. Для завершения выбора необходимо нажать кнопку OK. После этого выбранный символ фиксируется на курсоре; его следует разместить в нужной точке схемы и соединить с выводом компонента или сегментом цепи.

После размещения соединителя USB и микроконтроллера STM32F103C8T6 необходимо обеспечить логическую связь между ними (рисунок 2.9).

Использование меток цепей (Net Labels) в **Schematic Editor** позволяет избежать нагромождения линий связи, сохраняя читаемость схемы.

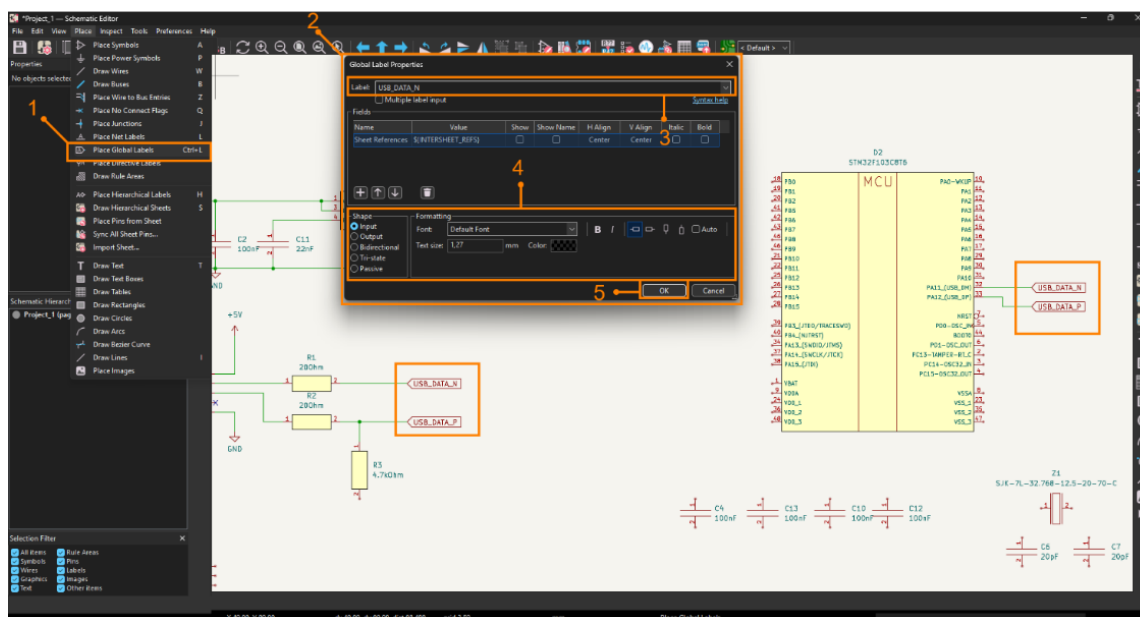


Рисунок 2.9 – Настройка меток цепей связи Global Label Properties

Для организации логических связей между разрозненными функциональными узлами или различными листами иерархической схемы используются глобальные метки. Процесс их размещения в **Schematic Editor** выполняется следующим образом:

1. Выбор инструмента: На правой панели инструментов необходимо нажать кнопку **Add Global Label** (или воспользоваться сочетанием клавиш **Ctrl+N**). После этого курсор переходит в режим размещения, и при клике в рабочей области открывается диалоговое окно «Global Label Properties».

2. Именованная цепи: В поле **Label** вводится уникальное имя идентификатора. Для обеспечения корректной работы интерфейса USB в проекте Blue Pill используются имена **USB_DATA_N** (для линии D-) и **USB_DATA_P** (для линии D+). Для обозначения дифференциальной пары USB в KiCad используйте метки цепей с обязательными суффиксами **_P** и **_N**, например **USB_D_P** и **USB_D_N**.

3. Настройка графических параметров: В блоке **Shape** выбирается форма графического оформления метки, определяющая тип сигнала (**Input**, **Output**, **Bidirectional** или **Passive**). Для дифференциальных линий обмена данными рекомендуется устанавливать тип **Bidirectional** или **Passive**. При необходимости в блоке **Formatting** настраиваются размер текста и его выравнивание относительно точки подключения.

4. Размещение на схеме: После нажатия кнопки **OK** символ метки фиксируется на курсоре. Его следует расположить таким образом, чтобы точка привязки соединилась с соответствующим проводником. Для завершения узла USB идентичные метки устанавливаются как со стороны защитных резисторов соединителя **XS1**, так и у выводов **PA11** и **PA12** микроконтроллера.

5. Верификация соединений: Правильность присвоения имен проверяется визуально по наличию меток на обоих концах логической связи. В случае использования многостраничных схем KiCad автоматически сформирует перекрестные ссылки (**Inter-sheet references**) рядом с именем метки, указывая номер листа, на котором данная цепь имеет продолжение.

После завершения формирования всех электрических связей и размещения основных функциональных узлов, электрическая принципиальная схема на базе микроконтроллера **STM32F103C8T6** принимает законченный вид (рисунок 2.10).

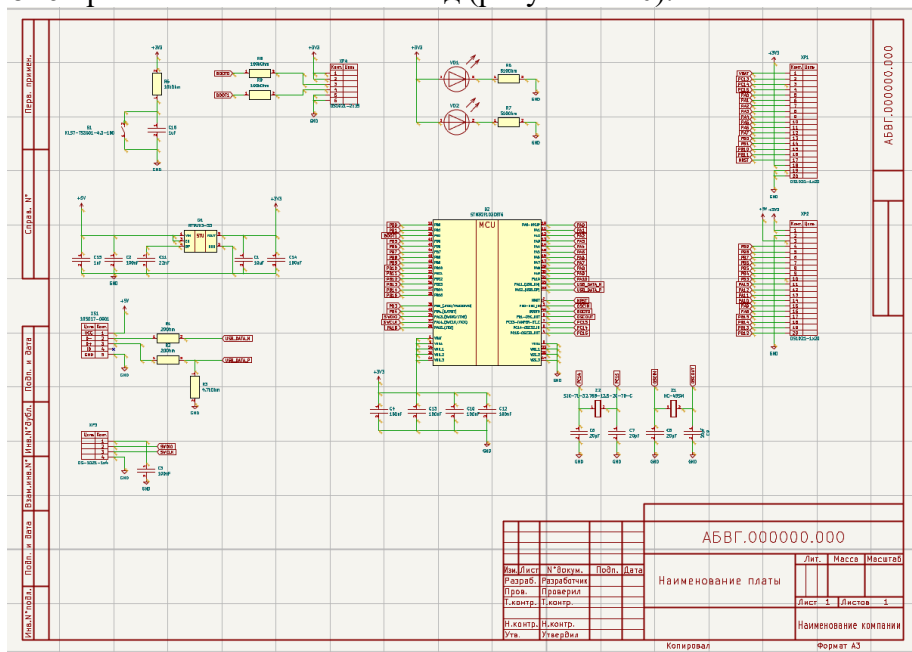


Рисунок 2.10 – Схема электрическая принципиальная Blue Pill на базе микроконтроллера STM32F103C8T6

После завершения отрисовки всех электрических связей необходимо присвоить каждому компоненту уникальный буквенно-цифровой индекс. В KiCad этот процесс автоматизирован и выполняется с помощью инструмента **Annotate Schematic** (рисунок 2.11).

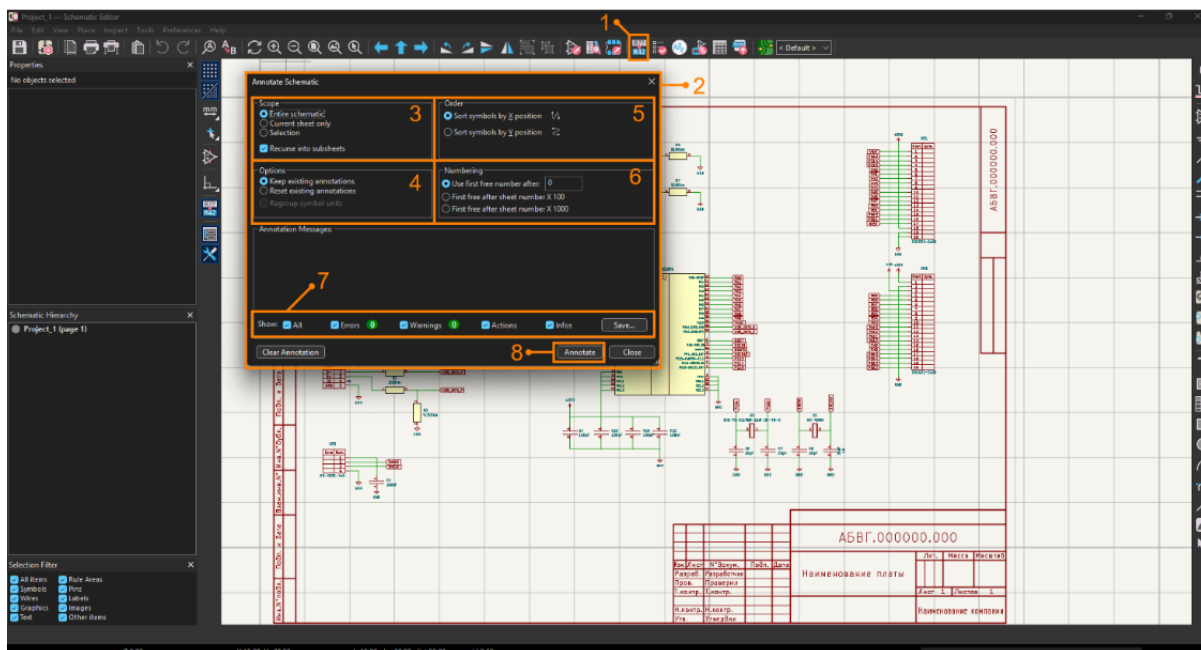


Рисунок 2.11 – Окно инструмента Annotate Schematic

Для выполнения аннотации (или её обновления) необходимо выполнить следующие шаги:

1. На верхней панели инструментов необходимо нажать кнопку **Annotate Schematic**. После этого открывается одноименное диалоговое окно для настройки параметров нумерации.

2. В открывшемся окне «**Annotate Schematic**» сосредоточены все элементы управления процессом. Оно позволяет гибко настроить логику именования компонентов перед переходом к проектированию платы.

3. В блоке **Scope** (Область действия) выбирается масштаб аннотации. Для полной нумерации проекта Blue Pill устанавливается параметр **Entire schematic**, что позволяет обработать все компоненты на всех листах схемы одновременно.

4. В блоке **Options** (Параметры) задается режим обработки существующих индексов. Опция **Keep existing annotations** сохраняет текущие номера, а **Reset existing annotations** сбрасывает их до знаков вопроса (например, R?), что необходимо для полной перенумерации схемы.

5. В блоке **Order** (Порядок) выбирается алгоритм сортировки компонентов на листе. Можно установить приоритет нумерации по горизонтали (**Sort symbols by X position**) или по вертикали (**Sort symbols by Y position**).

6. В блоке **Numbering** (Нумерация) настраиваются правила формирования числовых значений. Здесь можно задать начальный номер (например, с 1) или установить зависимость индекса от номера листа (например, первый лист — 100, второй — 200).

7. В области **Annotation Messages** отображается лог выполнения операции. С помощью фильтров (**Errors, Warnings, Actions**) можно отследить корректность присвоения имен и выявить возможные конфликты.

8. Для завершения процесса необходимо нажать кнопку **Annotate**. После этого выбранные параметры применяются к схеме, и все компоненты (например, резисторы обвязки STM32) получают свои окончательные обозначения (R1, R2 и т.д.).

Процесс проверки электрических правил схемы (**ERC**) выполняется для выявления логических ошибок, таких как отсутствие питания, конфликты выводов или незавершенные цепи (рисунок 2.12).

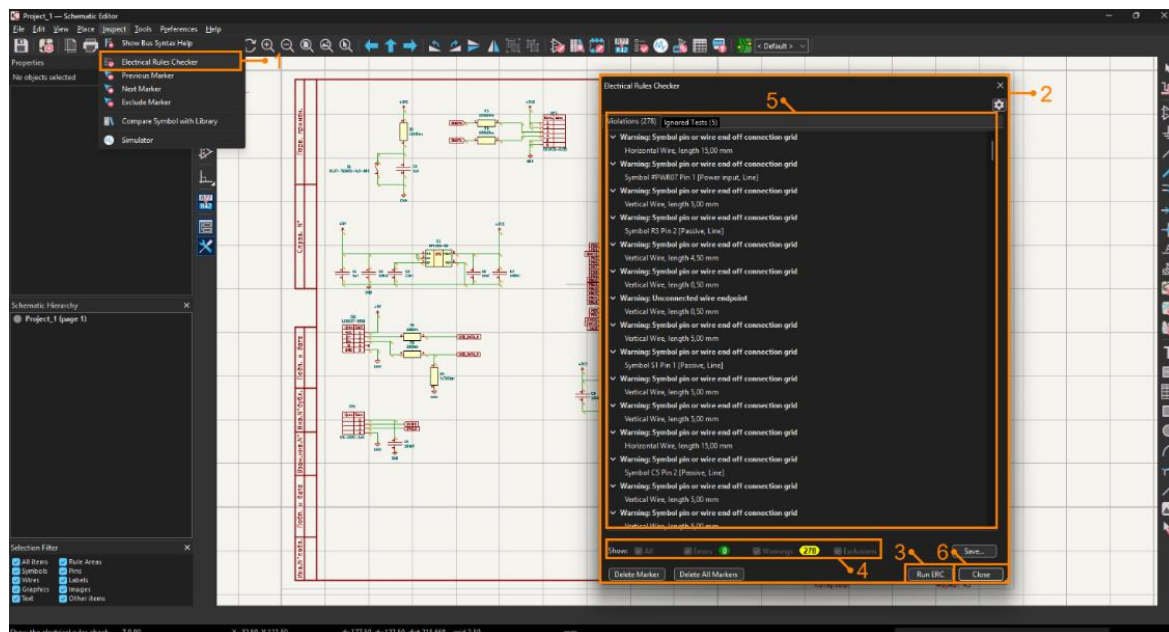


Рисунок 2.12 – Окно проверки электрических правил схемы (ERS)

Процесс автоматизированной проверки электрических правил схемы (ERC) выполняется в следующей последовательности:

1. На верхней панели инструментов в меню Inspect необходимо выбрать пункт Electrical Rules Checker (или нажать кнопку с изображением зеленого жука). После этого открывается диалоговое окно для верификации электрических соединений схемы.

2. В правой верхней части окна расположена кнопка настроек (иконка шестеренки). Она позволяет задать параметры матрицы нарушений, определяя, какие типы соединений будут считаться критическими ошибками, а какие – предупреждениями.

3. Для запуска процесса проверки необходимо нажать кнопку Run ERC. Программа выполнит полный анализ всех проводников, портов питания и меток цепей на соответствие заданным правилам проектирования.

4. В нижней части окна расположены фильтры управления списком сообщений. С их помощью можно включить или отключить отображение различных категорий: Errors (ошибки), Warnings (предупреждения) и Exclusions (исключения).

5. В центральной области Violations отображается детализированный список всех обнаруженных несоответствий. Каждая запись содержит описание проблемы, например, предупреждение о размещении вывода компонента вне координатной сетки.

6. Для завершения работы с инструментом необходимо нажать кнопку Close. После устранения выявленных замечаний процедуру проверки следует запустить повторно до получения чистого отчета.

2.4 Постановка задания для самостоятельной работы

Ход выполнения работы

1. Открыть проект, созданный в ПЗ №1, и проверить наличие разработанных библиотек УГО и посадочных мест компонентов.
2. Открыть редактор **Schematic Editor** и разместить на листе электрической схемы компоненты согласно выбранной схеме ЭЗ.
3. Выполнить электрические соединения между компонентами, добавить цепи питания, земли, а также необходимые локальные и глобальные метки.
4. Выполнить аннотирование компонентов, проверить назначение посадочных мест и провести проверку схемы средствами **ERC**.
5. Устранить выявленные ошибки и подготовить отчет по практической работе.

Требования к электрической схеме

1. Схема должна быть выполнена на основе проекта, созданного в ПЗ №1.
2. На схеме должны быть размещены все необходимые компоненты согласно выбранной схеме ЭЗ.
3. Электрические соединения, цепи питания и земли должны быть выполнены корректно.
4. Компоненты должны быть аннотированы, а посадочные места – назначены.
5. Проверка схемы средствами **ERC** не должна выявлять критических ошибок.

Содержание отчета

1. Цель работы.
 2. Краткое описание выбранной электрической принципиальной схемы ЭЗ.
 3. Этапы размещения компонентов и выполнения электрических соединений в **Schematic Editor**.
1. Результаты аннотирования компонентов и проверки схемы средствами **ERC**.
 2. Вывод по практической работе.

2.5 Контрольные вопросы к практическому занятию №2

1. Для чего используется редактор электрических схем Schematic Editor в KiCad?
2. Какие основные элементы интерфейса Schematic Editor используются при создании схемы?
3. Как выполняется размещение компонентов на листе электрической принципиальной схемы?
4. Для чего в схеме используются электрические соединения между выводами компонентов?
5. Чем электрическое соединение отличается от графической линии?
6. Для чего на схеме используются обозначения цепей питания и земли?
7. Какие правила необходимо соблюдать при соединении компонентов проводниками и метками цепей на электрической схеме?
8. Для чего используется аннотирование компонентов на схеме?
9. Какие ошибки позволяет выявить проверка ERC?
10. Для чего перед переходом к разработке печатной платы выполняется проверка схемы средствами ERC?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

3 Знакомство с редактором

Цель работы – ознакомиться с функциональными возможностями редактора печатных плат **PCB Editor** САПР KiCad, научиться размещать посадочные места компонентов на плате, выполнять трассировку электрических соединений, настраивать слои и правила проектирования, а также получить практические навыки оформления и проверки печатной платы средствами **DRC**.

3.1 Интерфейс редактора печатной платы PCB Editor

После создания проекта и открытия файла печатной платы **.kicad_pcb** запускается редактор платы PCB Editor (рисунок 3.1). Данный редактор предназначен для размещения посадочных мест компонентов, трассировки проводников, настройки слоев печатной платы и подготовки топологии печатной платы.

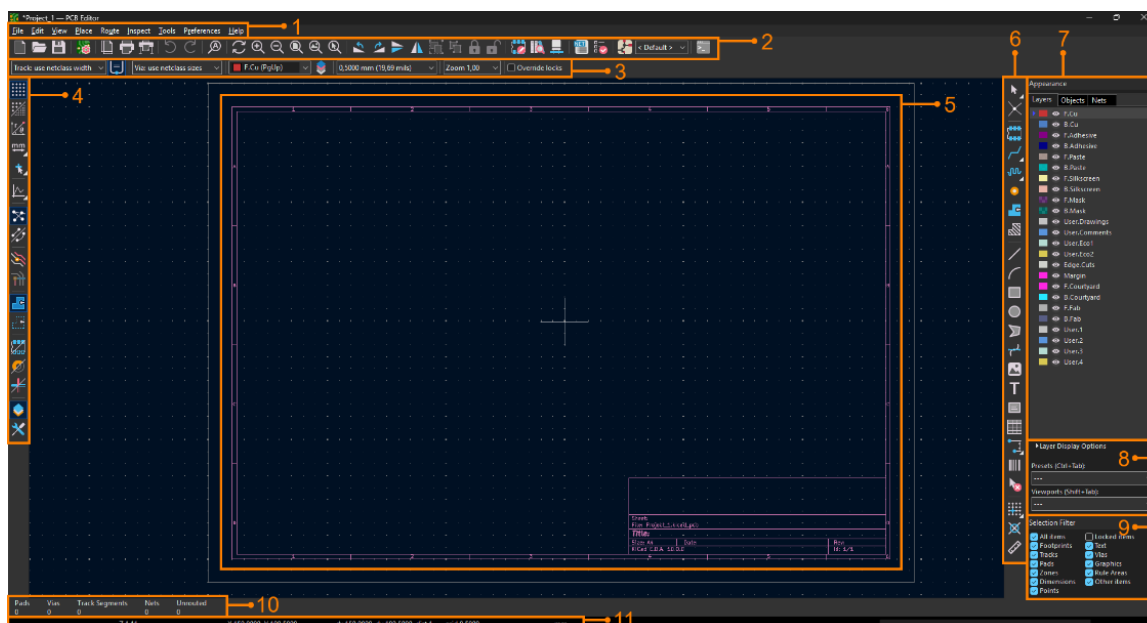


Рисунок 3.1 – Интерфейс редактора печатной платы KiCad

Основные области редактора печатной платы в KiCad:

1. **Панель инструментов** содержит основные команды управления проектом, редактирования, просмотра, размещения объектов, трассировки, проверки и настройки параметров редактора.

2. **Панель инструментов быстрого доступа** содержит команды, которые часто используются, такие как сохранение, отмена и повтор действия, масштабирование, обновление и запуск отдельных команд редактора.

3. **Панель параметров трассировки и слоев** используется для выбора активного слоя, задания ширины проводников, параметров переходных отверстий, масштаба отображения и других технологических настроек.

4. **Левая вертикальная панель инструментов** содержит инструменты размещения и редактирования объектов печатной платы, включая дорожки, переходные отверстия, графические элементы, зоны металлизации, размеры и другие конструктивные объекты.

5. **Работа области редактирования платы** представляет собой основное поле проектирования, в котором размещаются компоненты, проводники, контур платы, технологические надписи и иные элементы конструкции.

6. **Правая вертикальная панель инструментов** содержит дополнительные команды редактирования и размещения объектов, применяемые при создании и оформлении топологии печатной платы.

7. **Панель слоев** предназначена для настройки отображения слоев, объектов и электрических цепей, а также для управления визуализацией элементов платы.

8. **Панель дополнительных параметров отображения** содержит настройки шаблонов отображения, пользовательских режимов просмотра и параметров визуального представления рабочей области.

9. **Панель фильтра выделения** предназначена для задания типов объектов, доступных для выделения и редактирования.

10. **Строка состояния печатной платы** отображает краткую информацию о проверке, включая количество площадок, переходных отверстий, сегментов проводников цепей и неподключенных соединений.

11. **Строка состояния** содержит служебную информацию, такую как координаты курсора, шаг сетки, единицы измерения и текущее состояние редактора.

3.2 Подготовка файла печатной платы к трассировке

Первым этапом подготовки файла печатной платы к трассировке является перенос данных из электрической принципиальной схемы в редактор **PCB Editor**. На данном этапе из файла схемы формата **.kicad_sch** в файл печатной платы **.kicad_pcb** передаются сведения о компонентах, посадочных местах, электрических цепях и связях между выводами.

Перед выполнением обновления необходимо убедиться, что в электрической схеме всем компонентам назначены посадочные места. Если у элемента отсутствует **Footprint**, он не сможет быть корректно размещён на печатной плате.

Обновление печатной платы из электрической схемы выполняется с помощью команды **Update PCB from Schematic** (рисунок 3.2). Данная команда переносит в файл печатной платы **.kicad_pcb** посадочные места компонентов, назначенные в электрической схеме, а также формирует электрические связи между контактными площадками.

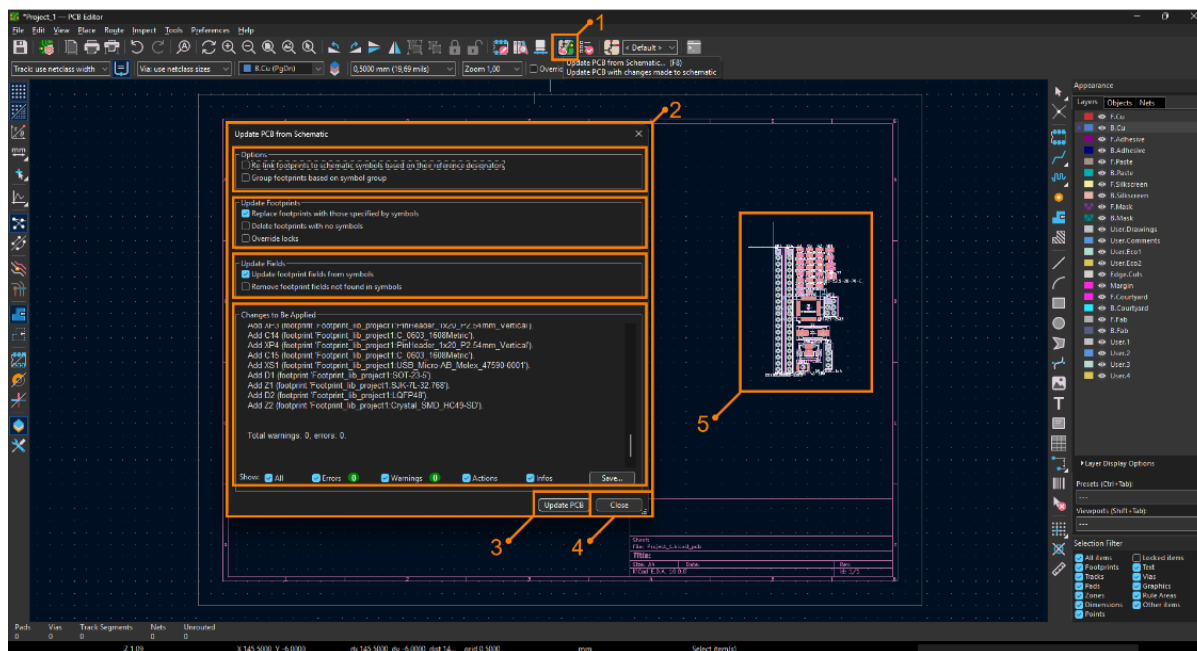


Рисунок 3.2 – Обновление печатной платы из электрической схемы

Обновление выполняется следующим образом:

1. На верхней панели инструментов редактора **PCB Editor** необходимо нажать кнопку **Update PCB from Schematic**. Также данную команду можно вызвать через верхнее меню: **Tools → Update PCB from Schematic...**

2. После запуска команды открывается окно **Update PCB from Schematic**. В данном окне отображаются параметры обновления и список изменений, которые будут внесены в файл печатной платы. В области настроек можно выбрать дополнительные параметры обновления (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Назначение параметров окна Update PCB from Schematic

Параметр	Назначение
Re-link footprints to schematic symbols based on their reference designators	Повторно связать посадочные места с символами схемы по позиционным обозначениям
Group footprints based on symbol group	Группировать посадочные места по группам символов
Replace footprints with those specified by symbols	Заменять посадочные места на указанные в символах схемы
Delete footprints with no symbols	Удалять посадочные места, отсутствующие в схеме
Update footprint fields from symbols	Обновлять поля посадочных мест по данным из схемы

3. В нижней части окна необходимо нажать кнопку **Update PCB**. После этого KiCad выполнит перенос компонентов из электрической схемы в редактор печатной платы.

4. После завершения обновления следует нажать кнопку **Close** для закрытия окна.

5. В рабочей области **PCB Editor** появятся посадочные места компонентов, перенесённые из схемы. Первоначально они могут быть расположены в неупорядоченном виде или вне контура платы. Между контактными площадками отображаются тонкие линии связей, которые показывают электрические соединения между компонентами и используются как ориентир при дальнейшей трассировке.

После выполнения данной операции необходимо убедиться, что в окне обновления отсутствуют ошибки. Если в списке сообщений отображаются ошибки, связанные с отсутствующими посадочными местами, необходимо вернуться в **Schematic Editor**, назначить компонентам корректные **Footprints** и повторить обновление печатной платы.

После обновления печатной платы из электрической схемы необходимо выполнить настройку стека слоёв. Он определяет количество медных слоёв, расположение диэлектриков, материал основания, толщину платы и параметры, влияющие на дальнейшую трассировку проводников.

Настройка стека слоёв выполняется в окне **Board Setup**, как показано на рисунке 3.3.

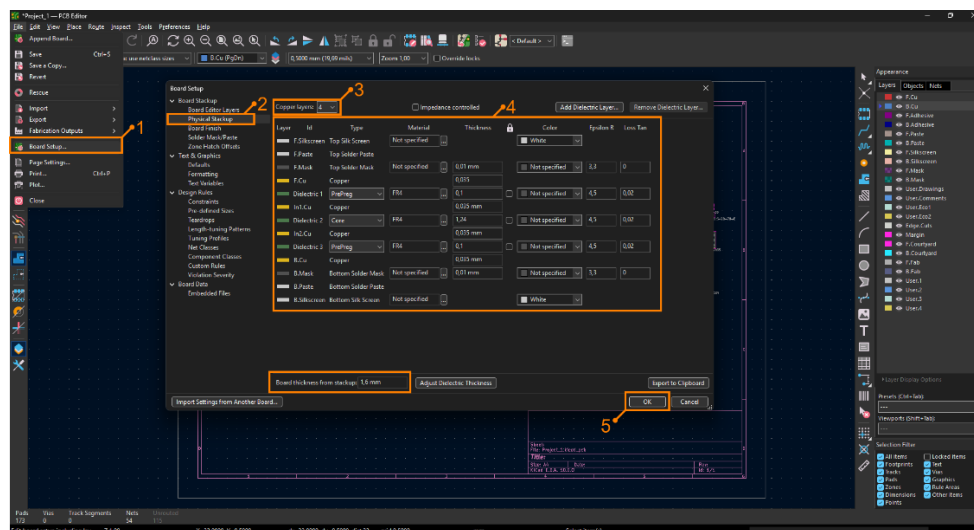


Рисунок 3.3 – Настройка стека слоёв печатной платы

Порядок настройки:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: **File → Board Setup...**

2. После этого откроется окно настройки параметров печатной платы. В левой части окна необходимо перейти в раздел: **Board Stackup → Physical Stackup**.

3. Данный раздел предназначен для настройки физической структуры печатной платы. В поле **Copper layers** необходимо выбрать количество медных слоёв. Для данного примера устанавливается значение: Copper layers: 4.

4. В таблице слоёв (таблица 3.2) необходимо проверить и настроить последовательность слоёв печатной платы.

4.1 Назначение слоев печатной платы.

Таблица 3.2 – Слои печатной платы

Слой	Назначение
F.Silkscreen	Верхняя шелкография. Используется для нанесения обозначений компонентов, контуров корпусов, маркировки выводов и служебных надписей
F.Paste	Верхний слой паяльной пасты. Используется при изготовлении трафарета для нанесения пасты на SMD-площадки
F.Mask	Верхняя паяльная маска. Защищает медные проводники от окисления и предотвращает случайные замыкания при пайке
F.Cu	Верхний медный слой. Используется для размещения компонентов и трассировки основных сигнальных цепей
Dielectric 1	Диэлектрическая прослойка между верхним медным слоем F.Cu и первым внутренним слоем In1.Cu
In1.Cu	Первый внутренний медный слой. Рекомендуется использовать как сплошной слой земли GND
Dielectric 2	Центральный диэлектрический слой между внутренними медными слоями In1.Cu и In2.Cu
In2.Cu	Второй внутренний медный слой. Используется для распределения цепей питания, например +3V3 и +5V
Dielectric 3	Диэлектрическая прослойка между вторым внутренним слоем In2.Cu и нижним медным слоем B.Cu
B.Cu	Нижний медный слой. Используется для дополнительной трассировки сигнальных цепей
B.Mask	Нижняя паяльная маска. Защищает медь на нижней стороне платы
B.Paste	Нижний слой паяльной пасты. Используется при наличии SMD-компонентов на нижней стороне платы
B.Silkscreen	Нижняя шелкография. Используется для маркировки компонентов и служебных обозначений на нижней стороне платы

4.2 Выбор толщины медных слоёв.

Для медных слоёв **F.Cu**, **In1.Cu**, **In2.Cu** и **B.Cu** задаётся толщина: 0,035 мм

Выбор толщины меди **35 мкм** удобен, так как:

- поддерживается большинством производителей печатных плат;
- подходит для сигнальных цепей микроконтроллерных устройств;
- позволяет выполнять дорожки стандартной ширины без чрезмерного увеличения габаритов;
- обеспечивает достаточную проводимость для цепей питания небольшой мощности;
- используется как типовое значение в расчётах ширины проводников и токовой нагрузки.

4.3 Выбор структуры диэлектрических слоёв.

Для диэлектрических слоёв необходимо указать материал **FR-4** и задать следующую структуру (таблица 3.3)

Таблица 3.3 – Диэлектрическая структура печатной платы

Слой	Тип	Материал	Толщина
Dielectric 1	PrePreg	FR-4	0,1 мм
Dielectric 2	Core	FR-4	1,24 мм
Dielectric 3	PrePreg	FR-4	0,1 мм

Центральный слой **Core** имеет наибольшую толщину и является основой платы, обеспечивающей механическую жёсткость.

Слои **PrePreg** расположены между внешними и внутренними медными слоями и служат связующим диэлектрическим материалом.

4.4 Настройка параметров материала FR-4.

Для материала **FR-4** задаются электрические параметры:

- Epsilon R = 4,5;
- Loss Tan = 0,02.

Параметр **Epsilon R** — это относительная диэлектрическая проницаемость материала. Он показывает, во сколько раз электрическое поле в материале отличается от электрического поля в вакууме. В печатных платах этот параметр влияет на ёмкость между проводниками и опорными слоями, а также на расчёт волнового сопротивления дорожек.

Чем выше **Epsilon R**, тем сильнее электрическое поле концентрируется в диэлектрике, а волновое сопротивление проводника при той же геометрии становится ниже.

Параметр **Loss Tan** — это тангенс угла диэлектрических потерь. Он показывает, какая часть энергии сигнала теряется в диэлектрике при распространении по плате. Чем выше значение **Loss Tan**, тем больше потери, особенно на высоких частотах.

1 После настройки количества слоёв, материала и толщины платы необходимо нажать кнопку **ОК** для сохранения параметров.

После настройки стека слоёв необходимо задать правила проектирования печатной платы. Они определяют минимально допустимые технологические параметры платы: ширину дорожек, зазоры между медными объектами, размеры переходных отверстий, расстояние от меди до края платы, параметры отверстий и ограничения для шелкографии.

Данные параметры используются редактором **PCB Editor** при трассировке и автоматической проверке платы средствами **DRC (Design Rule Check)**.

Если при проектировании будет нарушено одно из заданных ограничений, KiCad отобразит соответствующее предупреждение или ошибку. Настройка правил проектирования выполняется в окне **Board Setup**, как показано на рисунке 3.4.

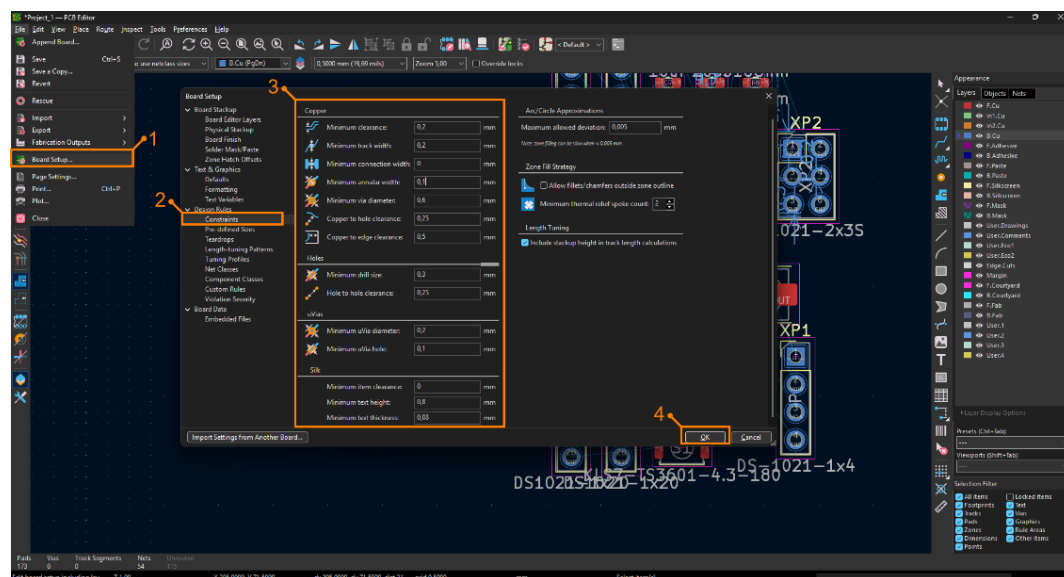


Рисунок 3.4 – Настройка правил проектирования печатной платы

Порядок настройки:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: **File → Board Setup...**

2. После этого откроется окно настройки параметров печатной платы. В левой части окна необходимо перейти в раздел: **Design Rules → Constraints**.

3. Данный раздел содержит основные технологические ограничения, применяемые ко всей печатной плате. В центральной части окна задаются минимально допустимые значения для медных объектов, отверстий, переходных отверстий, микропереходов и шелкографии. В таблице 3.4 представлены основные правила для проектирования печатной платы.

Таблица 3.4 – Основные правила проектирования печатной платы

Параметр	Назначение
Minimum clearance	Минимальный зазор между разными медными объектами: дорожками, площадками, переходными отверстиями и полигонами
Minimum track width	Минимальная допустимая ширина дорожки
Minimum connection width	Минимальная ширина медного соединения в узких местах; значение 0 означает отсутствие дополнительного ограничения
Minimum annular width	Минимальная ширина медного кольцевого пояса вокруг отверстия
Minimum via diameter	Минимальный внешний диаметр переходного отверстия
Copper to hole clearance	Минимальное расстояние от медных объектов до отверстий
Copper to edge clearance	Минимальное расстояние от меди до края печатной платы
Minimum drill size	Минимальный диаметр сверления отверстия
Hole to hole clearance	Минимальное расстояние между отверстиями
Minimum uVia diameter	Минимальный внешний диаметр отверстия микроперехода
Minimum uVia hole	Минимальный диаметр отверстия микроперехода
Minimum text height	Минимальная высота текста шелкографии
Minimum text thickness	Минимальная толщина линий текста шелкографии

4. После ввода необходимых значений следует нажать кнопку **ОК** для сохранения настроек.

После задания общих правил проектирования необходимо настроить классы цепей. Они позволяют назначать различным группам сигналов собственные параметры трассировки: ширину дорожек, минимальные зазоры, размеры переходных отверстий, а также параметры дифференциальных пар.

В рассматриваемой плате на базе **STM32F103C8T6 Blue Pill** отдельный класс цепей необходимо создать для USB-интерфейса, так как линии **USB_DP** и **USB_DM** являются дифференциальной парой и должны трассироваться с контролируемым дифференциальным сопротивлением **90 Ом**. Настройка класса цепей выполняется в окне **Board Setup**, как показано на рисунке 3.5.

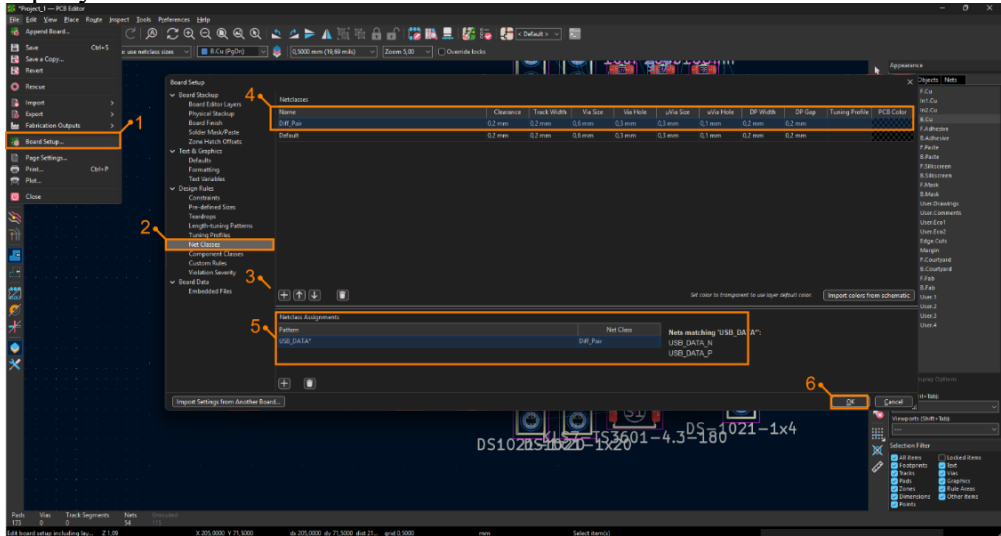


Рисунок 3.5 – Создание класса цепей для дифференциальной пары

Порядок настройки:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: File → Board Setup...
2. В левой части окна необходимо перейти в раздел: Design Rules → Net Classes.
3. Для создания нового класса цепей необходимо нажать кнопку добавления класса.
4. В таблице классов цепей создаётся новый класс, например: Diff_pair.
5. Для созданного класса задаются параметры трассировки дифференциальной пары: минимальный зазор, ширина дорожки, размер переходного отверстия, ширина линий дифференциальной пары и расстояние между ними.
6. В нижней области **Netclass Assignments** необходимо назначить USB-цепи созданному классу. Для этого в поле **Pattern** указывается шаблон: USB_*.
7. В поле **Net Class** выбирается созданный класс: Diff_Pair.
8. Шаблон USB_* означает, что все цепи, имена которых начинаются с USB_, будут автоматически отнесены к классу **Diff_Pair**.
9. После настройки класса цепей и назначения USB-линий необходимо нажать кнопку **ОК** для сохранения изменений.

Для интерфейса USB требуется дифференциальное волновое сопротивление линии около **90 Ом**. Для проверки выбранных параметров трассировки в KiCad используется инструмент **Calculator Tools**. Расчёт выполняется в разделе **Transmission Lines**, как показано на рисунке 3.6.

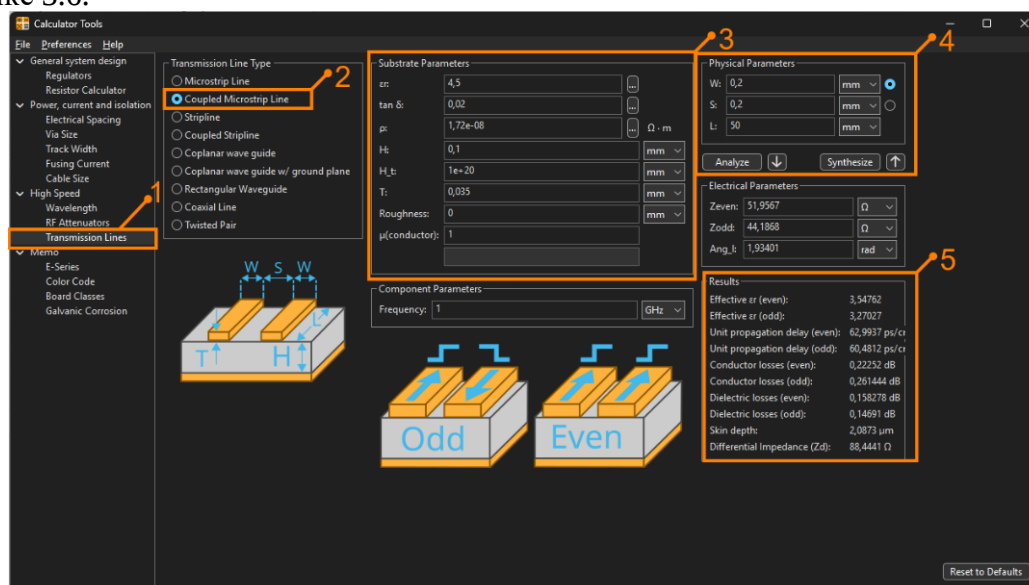


Рисунок 3.6 – Расчёт дифференциального сопротивления USB-линии в Calculator Tools

Порядок расчёта:

1. В KiCad необходимо открыть инструмент **Calculator Tools**.
2. В левой части окна выбрать раздел: High Speed → Transmission Lines.
3. В качестве типа линии выбрать: Coupled Microstrip Line.

Данный тип линии соответствует двум связанным проводникам, расположенным на внешнем слое печатной платы над опорным слоем земли.

В блоке **Substrate Parameters** задаются параметры материала и стека платы, в таблице 3.5 приведены параметры.

Таблица 3.5 – Параметры стека печатной платы

Параметр	Значение	Назначение
Er	4,5	Относительная диэлектрическая проницаемость FR-4
tan δ	0,02	Тангенс угла диэлектрических потерь
H	0,1 мм	Расстояние от сигнального слоя до опорного слоя земли
T	0,035 мм	Толщина медного слоя

Параметр **H = 0,1 мм** соответствует расстоянию от верхнего сигнального слоя **F.Cu** до ближайшего внутреннего слоя земли **In1.Cu**.

4. В блоке **Physical Parameters** задаются геометрические параметры дифференциальной пары, в таблице 3.6 приведены параметры.

Таблица 3.6 – Геометрические параметры диффпары

Параметр	Значение	Назначение
W	0,2 мм	Ширина каждой дорожки USB-линии
S	0,2 мм	Зазор между дорожками дифференциальной пары
L	50 мм	Расчётная длина линии

После ввода параметров необходимо нажать кнопку **Analyze**. В правой части окна появятся рассчитанные электрические параметры линии. В результате расчёта KiCad показывает значение: Differential Impedance (Zd) = 88,4441 Ом. Требуемое значение для USB-линии составляет: Zdiff = 90 Ом. Отклонение от требуемого значения можно определить как

$$\delta = \frac{|90 - 88,4441|}{90} \cdot 100 \approx 1,73\%.$$

Полученное отклонение составляет примерно **1,73%**, что меньше **5%**. Следовательно, выбранные параметры трассировки можно использовать для линии USB с дифференциальным сопротивлением **90 Ом**.

На практике для таких линий часто считается допустимым отклонение до **10%**, поэтому рассчитанное значение находится в допустимых пределах.

3.3 Разработка топологии печатной платы

После настройки стека слоёв и правил проектирования необходимо сформировать контур печатной платы. Контур определяет внешние габаритные размеры платы, её форму и область, внутри которой будут размещаться посадочные места компонентов и будет выполняться трассировка электрических соединений.

В редакторе **PCB Editor** контур печатной платы создаётся на специальном слое **Edge.Cuts**. Данный слой используется для задания линии механической обработки платы и учитывается при последующем формировании производственных файлов. Формирование контура печатной платы показано на рисунке 3.7.

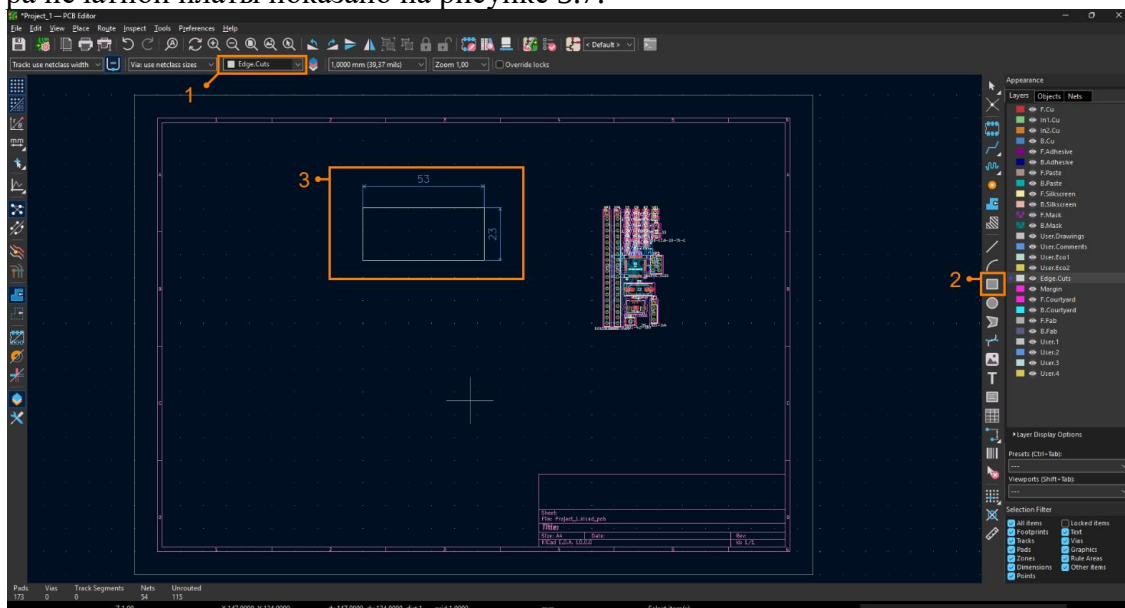


Рисунок 3.7 – Формирование контура печатной платы на слое Edge.Cuts

Порядок создания контура:

1. На верхней панели выбора слоёв необходимо выбрать слой **Edge.Cuts**. Именно на данном слое создаётся внешний контур печатной платы.

2. На правой вертикальной панели инструментов необходимо выбрать инструмент построения графического контура. Для прямоугольной платы удобно использовать инструмент **Draw Rectangle**.

3. В рабочей области платы строится замкнутый прямоугольный контур. В рассматриваемом примере задан контур размером **53 × 23 мм**, соответствующий габаритам платы на базе **STM32F103C8T6 Blue Pill**.

Требования к контуру печатной платы:

1. Контур должен выполняться на слое **Edge.Cuts**, так как данный слой используется для задания внешних границ платы и передаётся в производственные файлы.

2. Контур должен быть замкнутым, то есть все линии внешней границы платы должны соединяться между собой без разрывов. Это необходимо для корректного определения формы платы при проверке проекта и изготовлении.

3. Все компоненты, контактные площадки, переходные отверстия и проводники должны находиться внутри контура, чтобы элементы схемы не выходили за физические границы будущего изделия.

4. Медные объекты должны располагаться на заданном расстоянии от края платы, так как при фрезеровке или резке заготовки возможны технологические отклонения. Минимальный отступ определяется параметром **Copper to edge clearance**.

После формирования контура печатной платы выполняется первичное размещение компонентов. На данном этапе посадочные места компонентов распределяются внутри границ платы с учётом их функционального назначения, электрических связей, удобства трассировки и требований к дальнейшему монтажу. Первичное размещение компонентов показано на рисунке 3.8.

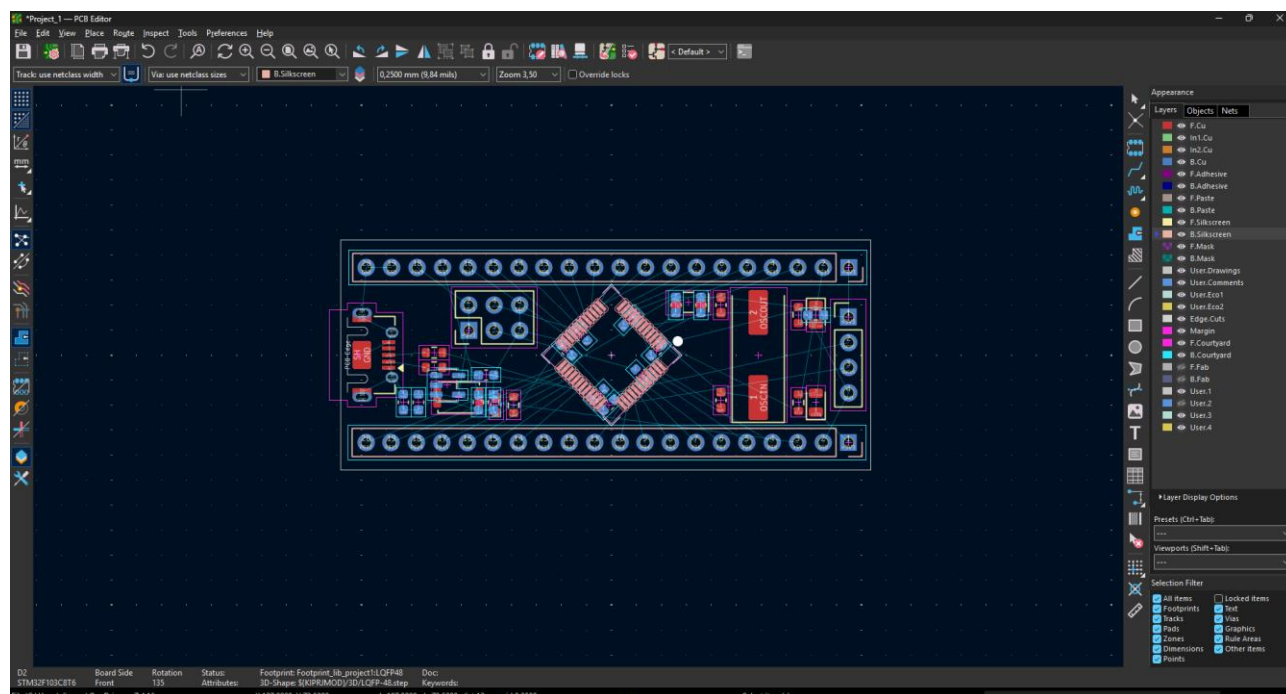


Рисунок 3.8 – Первичное размещение компонентов на печатной плате

Для работы с компонентами в **PCB Editor** используются горячие клавиши. Основные горячие клавиши для размещения компонентов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Основные горячие клавиши для размещения компонентов

Действие	Клавиша
Переместить компонент	M
Перетащить компонент с сохранением соединений	G
Повернуть компонент	R
Отразить компонент на другую сторону платы	F
Открыть свойства компонента	E
Выделить несколько объектов	Shift + ЛКМ (левая кнопка мыши)
Отменить действие	Ctrl + Z
Повторить действие	Ctrl + Y

При необходимости компонент можно повернуть не только на 90°, но и задать точный угол поворота вручную. Для этого необходимо выделить посадочное место, нажать клавишу **E** или открыть пункт **Properties** через контекстное меню. В открывшемся окне **Footprint Properties** во вкладке **General** в области **Position** задаётся параметр **Orientation**.

После формирования контура платы и первичного размещения компонентов выполняется трассировка печатной платы. Трассировка представляет собой процесс создания медных проводников между контактными площадками компонентов в соответствии с электрическими связями, переданными из схемы.

В редакторе **PCB Editor** для трассировки используются инструменты меню **Route**. Основными инструментами являются **Route Single Track** для прокладки одиночных проводников и **Route Differential Pair** для прокладки дифференциальных пар, например линий USB.

Одиночная дорожка используется для соединения обычных сигнальных цепей, цепей управления, индикации, сброса, тактирования и других соединений, которые не требуют согласованной пары проводников. Трассировка одиночной дорожки показана на рисунке 3.9.

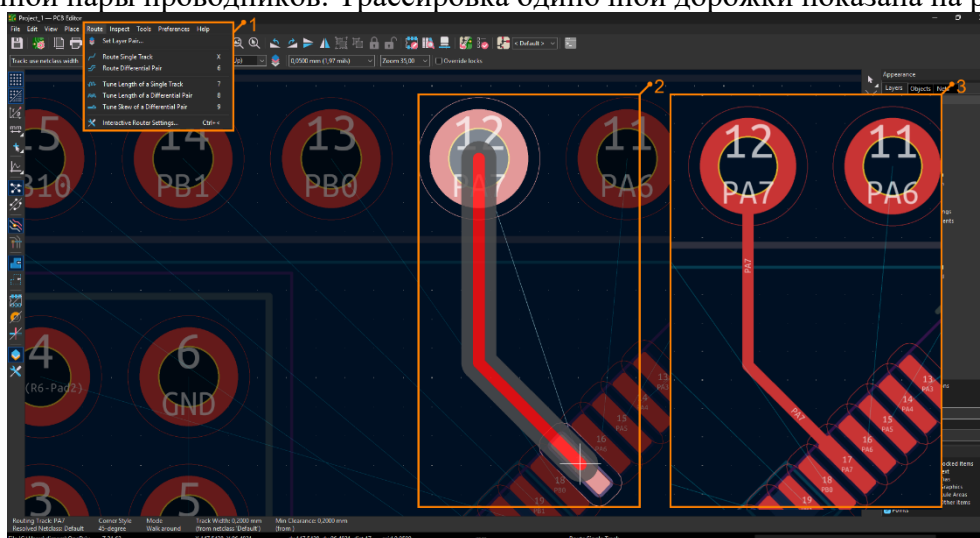


Рисунок 3.9 – Трассировка одиночной дорожки в PCB Editor

Порядок трассировки одиночной дорожки:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: **Route** → **Route Single Track** либо нажатием **X**.
2. После выбора инструмента необходимо щёлкнуть по контактной площадке, от которой начинается трассировка. Далее дорожка прокладывается в направлении второй контактной площадки. При перемещении курсора KiCad отображает будущий участок проводника с учётом заданных правил проектирования.
3. Для завершения трассировки необходимо щёлкнуть по конечной контактной площадке. Если соединение выполнено правильно, линия связи между этими точками исчезает.

Дифференциальная пара используется для передачи сигнала по двум связанным линиям. В рассматриваемом проекте такой парой являются линии USB.

Для USB-интерфейса важно, чтобы дорожки шли рядом, имели одинаковую длину и сохраняли заданный зазор между собой. Эти параметры задаются ранее созданным классом цепей **Diff_Pair**. На рисунке 3.10 показан пример трассировки линии USB.

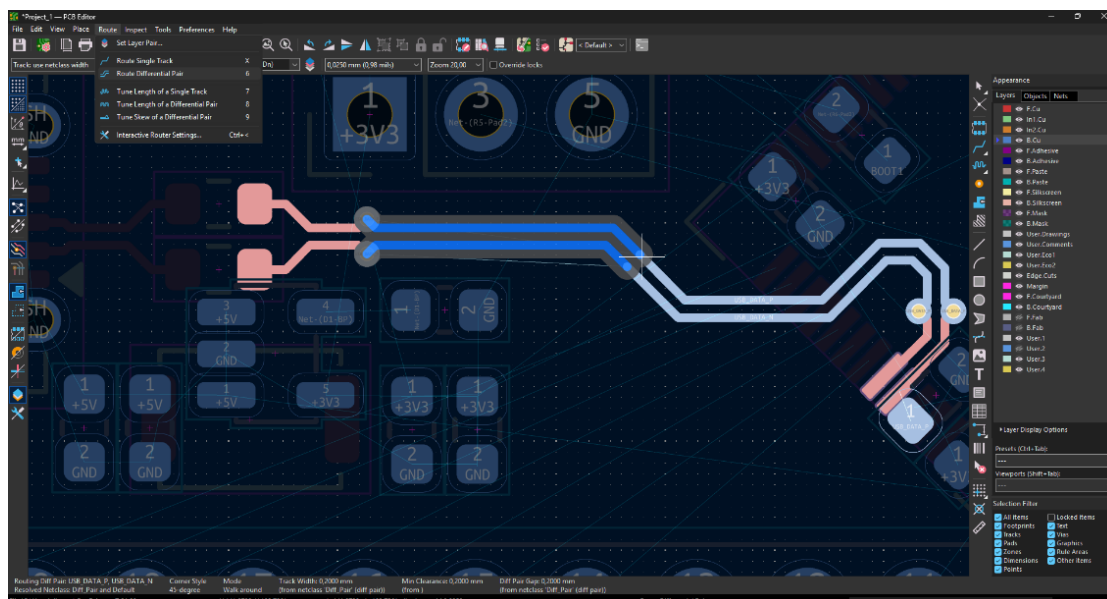


Рисунок 3.10 – Пример трассировки дифференциальной пары линии USB

Порядок трассировки дифференциальной пары:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: Route → Route Differential Pair.
2. После выбора инструмента необходимо щёлкнуть по одной из контактных площадок дифференциальной пары, например **USB_DATA_P** или **USB_DATA_N**.
3. KiCad автоматически определит вторую цепь пары и начнёт прокладывать две дорожки одновременно.
4. При трассировке необходимо вести линии параллельно друг другу, без резких изменений направления и без лишних переходных отверстий.
5. После подключения пары к конечным контактным площадкам линии связи исчезают, что означает выполнение соединения.

Полезные горячие клавиши при трассировке представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Горячие клавиши для трассировки печатной платы

Действие	Клавиша
Трассировка одиночной дорожки	X
Трассировка дифференциальной пары	6
Настройка интерактивного трассировщика	Ctrl + .
Установка переходного отверстия	Ctrl + Shift + X
Отменить последнее действие трассировки	Shift+Backspace
Перемещение компонента	M
Перетаскивание компонента с сохранением соединений	G
Поворот компонента	R
Переключение слоя при трассировке с установкой via	V
Переключить отображение активного слоя	H
Выбор всей трассы	U

После трассировки основных соединений рекомендуется создать полигон заливки. Полигон используется для заполнения свободной области платы медью, чаще всего подключённой к цепи **GND**. Такая заливка уменьшает сопротивление цепи земли, улучшает

помехоустойчивость платы, обеспечивает более короткий путь обратного тока и упрощает подключение выводов земли компонентов.

Создание полигона заливки показано на рисунке 3.11.

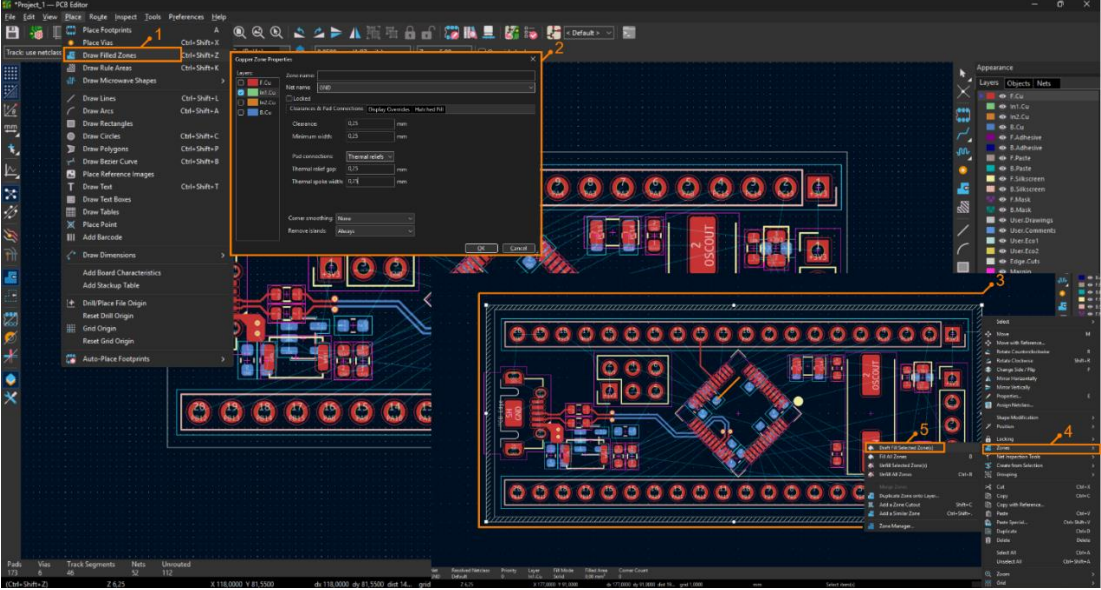


Рисунок 3.11 – Создание и заливка полигона в PCB Editor

Порядок создания полигона:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: **Place → Draw Filled Zones**.

2. После запуска команды открывается окно **Copper Zone Properties**. В данном окне необходимо задать параметры полигона:

- выбрать слой, на котором будет создана заливка;
- указать цепь, к которой относится полигон;
- задать зазоры и параметры подключения к контактным площадкам.

Для полигона земли в поле **Net name** выбирается цепь **GND**. В качестве слоя можно выбрать, например **In1.Cu**.

3. После настройки параметров необходимо построить область заливки в рабочей области платы. Для этого последовательно указываются вершины контура полигона. Обычно полигон строится по внутренней области платы, не выходя за контур **Edge.Cuts**.

4. После построения контура полигона необходимо открыть контекстное меню правой кнопкой мыши и перейти в раздел **Zones**.

5. В открывшемся меню необходимо выбрать команду: **Fill Selected Zone(s)**.

Основные параметры окна **Copper Zone Properties** приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Основные параметры полигона заливки

Параметр	Назначение
Layers	Выбор слоя, на котором создаётся полигон
Net name	Цепь, к которой подключается полигон, например GND
Clearance	Минимальный зазор от полигона до объектов других цепей
Minimum width	Минимальная ширина участков меди внутри полигона
Pad connections	Способ подключения контактных площадок к полигону
Thermal relief gap	Зазор термобарьера между площадкой и полигоном
Thermal spoke width	Ширина тепловых перемычек, соединяющих площадку с полигоном
Corner smoothing	Настройка сглаживания углов полигона
Remove islands	Удаление изолированных участков меди, не соединённых с основной зоной

После завершения трассировки печатной платы необходимо выполнить проверку проекта средствами DRC. Инструмент Design Rules Checker предназначен для поиска

нарушений правил проектирования: недостаточных зазоров, слишком узких дорожек, ошибок переходных отверстий, незамкнутых соединений, проблем с полигонами и других ошибок топологии. Проверка трассировки средствами DRC показана на рисунке 3.12.

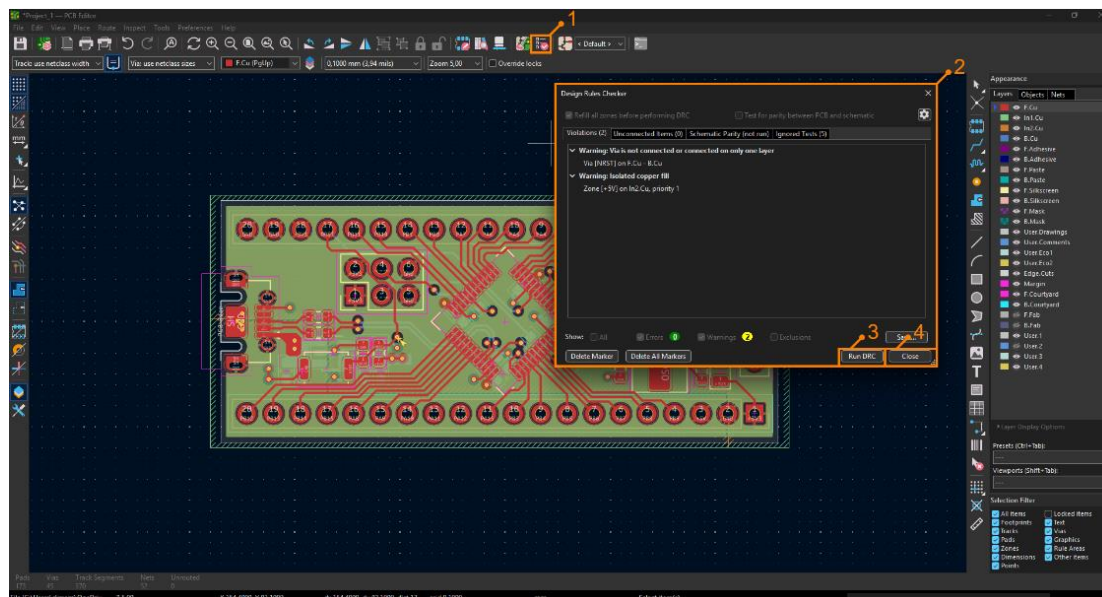


Рисунок 3.12 – Проверка печатной платы средствами DRC

Порядок выполнения проверки:

1. На верхней панели инструментов редактора **PCB Editor** необходимо нажать кнопку **Design Rules Checker**. После этого открывается окно проверки правил проектирования.
2. В окне **Design Rules Checker** отображаются результаты проверки платы. Ошибки и предупреждения группируются по вкладкам:
 - Violations;
 - Unconnected Items;
 - Schematic Parity;
 - Ignored Tests.

Вкладка **Violations** содержит нарушения правил проектирования, например ошибки зазоров, размеров дорожек, переходных отверстий или полигонов. Вкладка **Unconnected Items** показывает незавершённые электрические соединения. Вкладка **Schematic Parity** используется для проверки соответствия печатной платы электрической схеме.

3. Для запуска проверки необходимо нажать кнопку **Run DRC**. После этого KiCad выполнит анализ платы с учётом заданных правил проектирования, классов цепей, стека слоёв и параметров трассировки.

4. После просмотра результатов проверки окно можно закрыть с помощью кнопки **Close**.

В результате проверки KiCad может вывести ошибки или предупреждения. Ошибки требуют обязательного исправления, так как они могут привести к невозможности изготовления платы или неправильной работе устройства. Предупреждения также необходимо анализировать, так как они могут указывать на потенциальные проблемы.

Типовые сообщения DRC приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Типовые ошибки

Сообщение	Причина	Способ устранения
Unconnected items	Не все цепи были разведены	Найти незавершённые соединения и выполнить трассировку
Clearance violation	Нарушен минимальный зазор между объектами	Увеличить расстояние между дорожками, площадками или полигонами
Track width violation	Ширина дорожки меньше допустимой	Увеличить ширину дорожки или изменить класс цепи
Via size violation	Размер переходного отверстия меньше допустимого	Изменить диаметр via или параметры класса цепей
Copper to edge clearance violation	Медь расположена слишком близко к краю платы	Отодвинуть дорожки, полигоны или площадки от контура платы
Isolated copper fill	Изолированный участок полигона не соединён с цепью	Удалить островок меди или изменить настройки полигона
Via is not connected or connected on only one layer	Переходное отверстие не имеет корректного соединения	Проверить подключение via к дорожкам или полигонам

3.4 Постановка задания для самостоятельной работы

Ход выполнения работы

1. Открыть проект, выполненный в ПЗ №1–2, и убедиться в корректности электрической схемы.
2. Открыть **PCB Editor** и выполнить перенос компонентов из электрической схемы на печатную плату.
3. Задать контур печатной платы и разместить посадочные места компонентов в пределах заданного контура.
4. Настроить правила проектирования и выполнить трассировку электрических соединений между компонентами.
5. Выполнить проверку платы средствами **DRC**, устранить ошибки и подготовить отчёт.

Требования к электрической схеме

1. Печатная плата должна быть разработана на основе электрической схемы, созданной в ПЗ №2.
2. Все компоненты должны иметь назначенные посадочные места и быть размещены в пределах контура платы.
3. Трассировка должна соответствовать электрическим связям схемы и правилам проектирования.
4. На плате должны быть оформлены контур, маркировка компонентов и основные элементы шелкографии.
5. Проверка платы средствами **DRC** не должна выявлять критических ошибок.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое описание исходной электрической схемы и структуры печатной платы.
3. Этапы задания контура платы, размещения компонентов и настройки правил проектирования.
4. Результаты трассировки печатной платы и проверки средствами **DRC**.
5. Вывод по практической работе.

3.5 Контрольные вопросы к практическому занятию №3

1. Что такое редактор печатных плат PCB Editor в KiCad и для чего он используется?
2. Почему после разработки электрической схемы необходимо перейти к проектированию печатной платы?
3. Как выполняется перенос компонентов из электрической схемы в редактор печатной платы?
4. Почему перед размещением компонентов необходимо задать контур печатной платы?
5. Что такое трассировка электрических соединений на печатной плате?
6. В каких случаях расположение компонентов может усложнить трассировку печатной платы?
7. Как выполняется размещение посадочных мест компонентов в пределах заданного контура печатной платы?
8. Почему при трассировке необходимо соблюдать правила ширины дорожек и зазоров?
9. Как выполняется проверка печатной платы средствами DRC?
10. Почему перед изготовлением печатной платы необходимо устранить ошибки, найденные средствами DRC?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

4 Подготовка производственной документации печатной платы

Цель работы – ознакомиться с процессом подготовки производственной документации печатной платы в САПР KiCad, научиться формировать комплект файлов для изготовления и монтажа платы, включая Gerber-файлы, NC Drill-файлы, Bill of Materials (BOM) и Pick and Place (PaP), а также получить практические навыки проверки экспортированных данных перед передачей в производство.

4.1 Общие сведения о производственной документации печатной платы

После завершения разработки электрической схемы, размещения компонентов, трассировки печатной платы и проверки проекта средствами **DRC** необходимо подготовить комплект производственной документации. Данный комплект используется для изготовления печатной платы, сверления отверстий, нанесения паяльной маски, шелкографии и последующего автоматизированного монтажа компонентов.

В САПР **KiCad** производственные файлы формируются на основании разработанного файла печатной платы формата **.kicad_pcb**. Перед выгрузкой документации необходимо убедиться, что печатная плата полностью разведена, контур платы задан на слое **Edge.Cuts**, полигоны залиты, а проверка **DRC** не содержит критических ошибок.

К основным видам производственной документации печатной платы относятся файлы и документы, приведённые в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные виды производственной документации печатной платы

Вид документации	Назначение
Gerber-файлы	Содержат информацию о слоях печатной платы: медных слоях, паяльной маске, шелкографии и контуре платы
NC Drill-файлы	Содержат данные для сверления отверстий: переходных, монтажных и отверстий выводных компонентов
Bill of Materials	Ведомость компонентов, содержащая перечень элементов, их номиналы, корпуса, количество и дополнительную информацию для закупки
Pick and Place	Файл координат компонентов, используемый для автоматизированной установки SMD-компонентов на плату

4.2 Формирование Gerber и NC Drill файлов

Формирование Gerber-файлов выполняется в редакторе **PCB Editor** через окно **Plot**. Порядок выгрузки показан на рисунке 4.1.

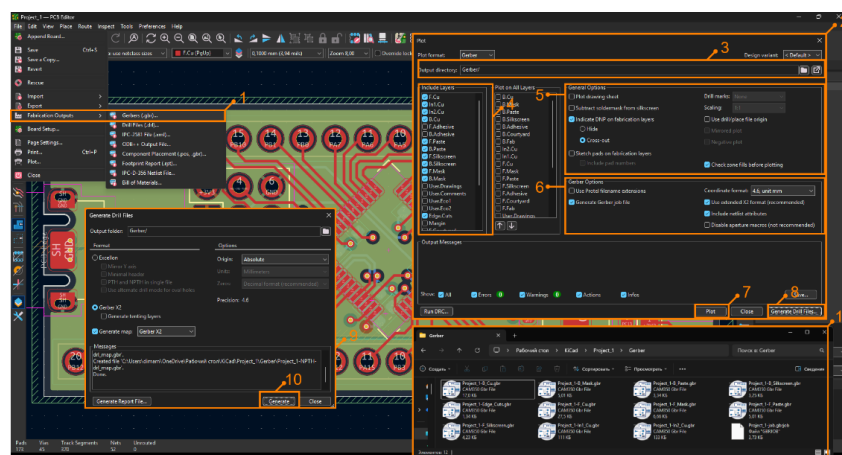


Рисунок 4.1 – Формирование Gerber-файлов в KiCad

Порядок формирования Gerber-файлов:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: File → Fabrication Outputs → Gerbers (.gbr)...

2. После выбора команды открывается окно **Plot**, предназначенное для настройки параметров выгрузки Gerber-файлов.

3. В поле **Output directory** необходимо указать папку для сохранения производственных файлов. Для удобства рекомендуется создать отдельную папку, например: Gerber/.

4. В области **Include Layers** выбираются слои, которые необходимо выгрузить в Gerber-файлы. Для четырёхслойной печатной платы следует отметить основные технологические слои.

5. В области **General Options** задаются общие параметры выгрузки. Рекомендуется включить проверку заливки полигонов перед формированием файлов: **Check zone fills before plotting**.

6. В области **Gerber Options** задаются параметры формата Gerber. Рекомендуется использовать следующие настройки:

- Generate Gerber job file;
- Use extended X2 format;
- Include netlist attributes;
- Coordinate format: 4.6, unit mm.

Параметр **Use extended X2 format** добавляет в Gerber-файлы расширенную информацию о слоях и объектах. Параметр **Generate Gerber job file** формирует служебный файл задания, содержащий сведения о комплекте производственных файлов.

7. После выбора слоёв и настройки параметров необходимо нажать кнопку **Plot**. После этого KiCad сформирует Gerber-файлы выбранных слоёв и сохранит их в указанную папку.

8. Для формирования файлов сверления необходимо нажать кнопку **Generate Drill Files...** Gerber-файлы не содержат информацию об отверстиях, поэтому файлы сверления создаются отдельно.

9. После нажатия кнопки **Generate Drill Files...** открывается окно **Generate Drill Files**. В данном окне задаются параметры выгрузки файлов сверления. Для стандартной платы можно оставить формат **Excellon**, единицы измерения **Millimeters** и десятичный формат координат.

10. Для создания файлов сверления необходимо нажать кнопку **Generate**. После этого KiCad сформирует файлы сверления, содержащие данные о переходных, монтажных и выводных отверстиях.

11. После завершения выгрузки необходимо открыть указанную папку и проверить наличие сформированных файлов. После этого закрыть окна **Generate Drill Files** и **Plot**.

4.3 Проверка Gerber-файлов и NC Drill в Gerber Viewer

После формирования **Gerber-файлов** и файлов сверления **NC Drill** необходимо выполнить их проверку в программе **Gerber Viewer**. Данная проверка позволяет убедиться, что все производственные слои были выгружены корректно, отверстия совпадают с контактными площадками, контур платы отображается правильно, а данные готовы для передачи производителю.

Порядок проверки Gerber-файлов и файлов сверления показан на рисунке 4.2.

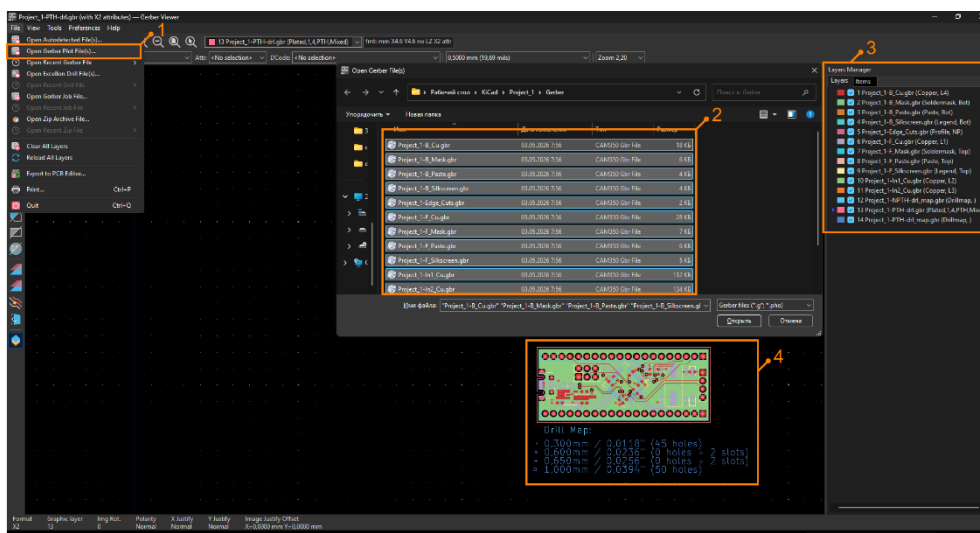


Рисунок 4.2 – Проверка Gerber-файлов и файлов сверления в Gerber Viewer

Порядок действий:

1. В окне **Gerber Viewer** необходимо открыть меню **File** и выбрать команду: Open Gerber Plot File(s)...
2. В открывшемся окне выбора файлов необходимо перейти в папку, в которую ранее были выгружены производственные файлы, например: Gerber/.
3. Далее следует выбрать все необходимые Gerber-файлы, соответствующие слоям печатной платы и файлы сверления **NC Drill**.
4. После загрузки файлов в правой части окна отображается панель **Layers Manager**. В ней перечислены все открытые слои платы. С помощью данной панели можно включать и отключать отображение отдельных слоёв, чтобы проверить каждый слой отдельно.

На данном этапе необходимо убедиться, что загружены:

- все медные слои;
- слои паяльной маски;
- слои паяльной пасты;
- слои шелкографии;
- контур платы;
- файлы сверления.

5. В рабочей области **Gerber Viewer** отображается итоговый вид платы на основании производственных файлов. Здесь необходимо проверить корректность расположения проводников, отверстий, контура платы и технологических слоёв.

При проверке необходимо обратить внимание на следующие пункты:

- Контур платы должен отображаться корректно и соответствовать слою **Edge.Cuts**.
- Все отверстия должны совпадать с контактными площадками компонентов.
- Медные слои **F.Cu**, **In1.Cu**, **In2.Cu** и **B.Cu** должны отображаться без смещений относительно друг друга.
- Слои паяльной маски **F.Mask** и **B.Mask** должны открывать только контактные площадки, предназначенные для пайки.
- Шелкография не должна попадать на открытые контактные площадки.
- Слои паяльной пасты **F.Paste** и **B.Paste** должны присутствовать для SMD-компонентов.
- Файлы сверления должны содержать все переходные, монтажные и выводные отверстия.
- Внутренние слои платы должны соответствовать выбранному стеку слоёв.

Если при просмотре обнаружены ошибки, необходимо вернуться в **PCB Editor**, исправить проект, повторно выполнить проверку **DRC**, заново сформировать Gerber- и NC Drill-файлы, после чего снова открыть их в **Gerber Viewer**.

4.4 Формирование Pick and Place файла

После формирования Gerber-файлов и файлов сверления необходимо подготовить файл **Pick and Place**. Данный файл содержит координаты расположения компонентов на печатной плате и используется при автоматизированном монтаже SMD-компонентов.

Файл **Pick and Place** содержит сведения о позиционном обозначении компонента, его номинале, посадочном месте, координатах установки, угле поворота и стороне размещения на плате.

Формирование файла Pick and Place показано на рисунке 4.3.

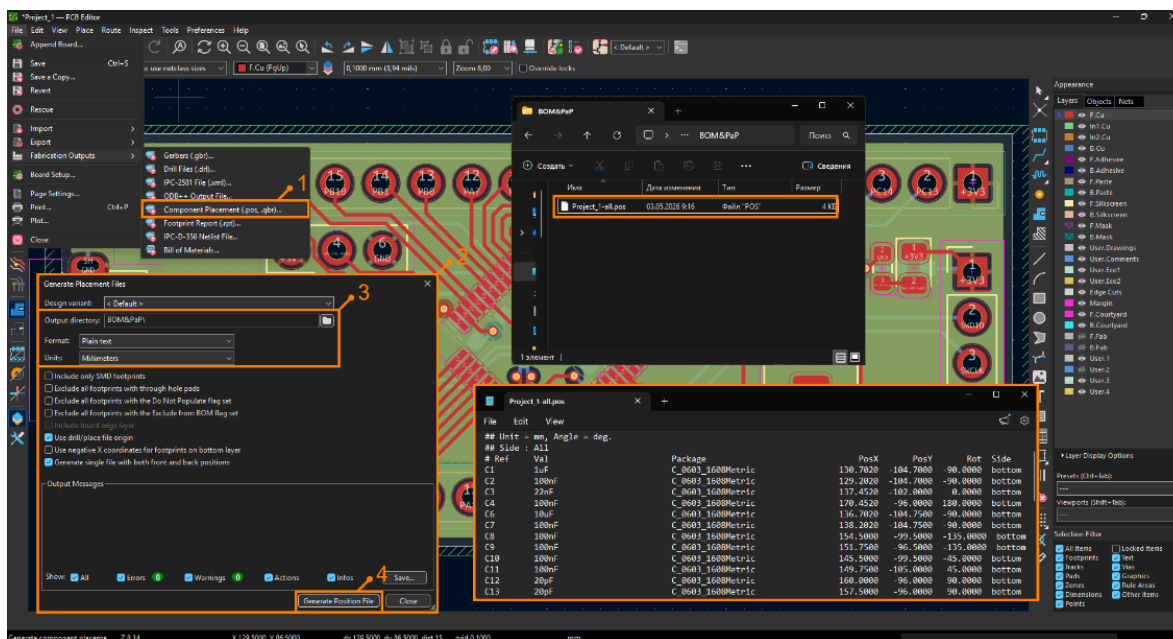


Рисунок 4.3 – Формирование файла Pick and Place в KiCad

Порядок формирования файла Pick and Place:

1. В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: **File** → **Fabrication Outputs** → **Component Placement (.pos, .gbr)...** После этого открывается окно **Generate Placement Files**, предназначенное для настройки выгрузки координат компонентов.

2. В окне **Generate Placement Files** задаются параметры формирования файла размещения компонентов. Данное окно позволяет выбрать формат файла, единицы измерения, папку сохранения и дополнительные параметры выгрузки.

3. В поле **Output directory** необходимо указать папку, в которую будет сохранён файл Pick and Place. Для удобства рекомендуется создать отдельную папку, например: **BOM&PaP**.

В параметрах выгрузки рекомендуется использовать следующие настройки:

– Параметр **Format: Plain text** формирует файл в текстовом виде, удобном для просмотра и проверки.

– Параметр **Units: Millimeters** задаёт координаты компонентов в миллиметрах.

– Параметр **Use drill/place file origin** означает, что координаты компонентов будут отсчитываться от заданного начала координат платы.

– Параметр **Generate single file with both front and back positions** позволяет сформировать один общий файл для компонентов, расположенных на верхней и нижней сторонах платы.

4. После настройки параметров необходимо нажать кнопку **Generate Position File**. После этого KiCad сформирует файл координат компонентов и сохранит его в указанную папку. В результате будет создан текстовый файл, содержащий таблицу координат компонентов. Основные поля файла Pick and Place приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные поля файла Pick and Place

Поле	Назначение
Ref	Позиционное обозначение компонента на плате
Val	Номинал или значение компонента
Package	Посадочное место компонента
PosX	Координата компонента по оси X
PosY	Координата компонента по оси Y
Rot	Угол поворота компонента
Side	Сторона размещения компонента: верхняя или нижняя

4.5 Формирование файла ведомости компонентов

После формирования файла **Pick and Place** необходимо подготовить ведомость компонентов **Bill of Materials**. Она представляет собой таблицу, содержащую перечень всех элементов, установленных на печатной плате. Данный файл используется для закупки компонентов, проверки состава изделия и подготовки автоматизированного монтажа. Формирование ведомости компонентов показано на рисунке 4.4.

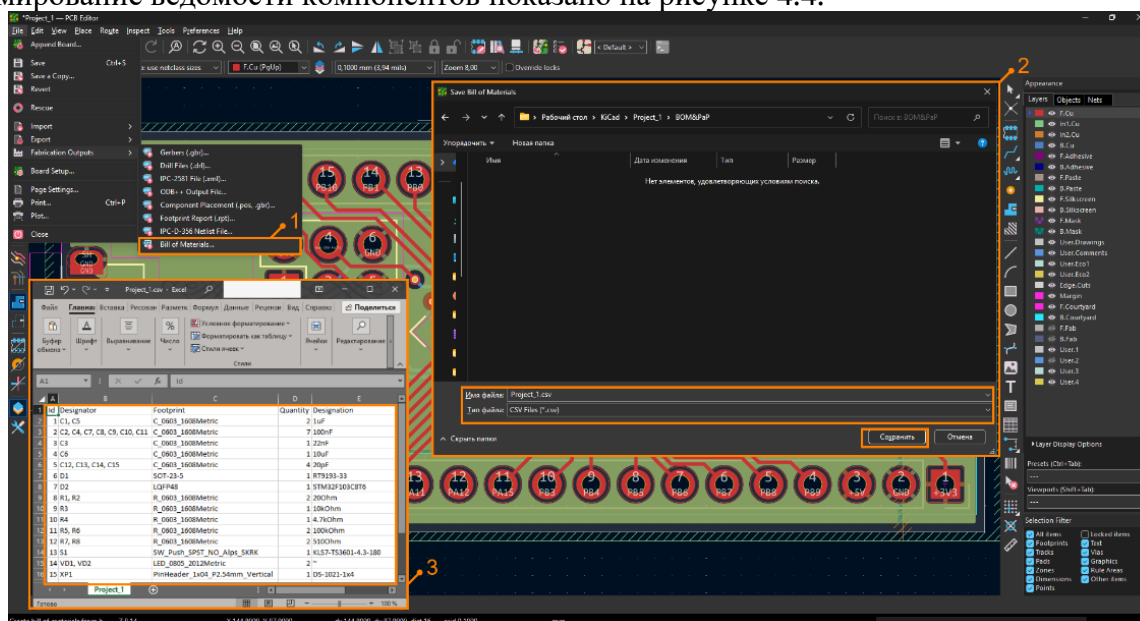


Рисунок 4.4 – Формирование ведомости компонентов Bill of Materials

Порядок формирования **Bill of Materials**:

В верхнем меню редактора **PCB Editor** необходимо выбрать команду: File → Fabrication Outputs → Bill of Materials... После этого открывается окно сохранения файла ведомости компонентов. В открывшемся окне необходимо выбрать папку для сохранения файла. Для удобства рекомендуется использовать отдельную папку, например BOM&PaP. В поле имени файла задаётся название ведомости компонентов. Файл сохраняется в формате **CSV**, например: Project_1.csv После выбора папки и имени файла необходимо нажать кнопку **Сохранить**. После сохранения файл **Bill of Materials** можно открыть в табличном редакторе, например в Microsoft Excel. В сформированной таблице отображается перечень компонентов платы, их позиционные обозначения, посадочные места, количество и номиналы. Основные поля ведомости компонентов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Основные поля ведомости компонентов Bill of Materials

Поле	Назначение
Designator	Позиционные обозначения компонентов
Quantity	Количество одинаковых компонентов
Designation	Номинал, тип или обозначение компонента

4.6 Постановка задания для самостоятельной работы

Ход выполнения работы

1. Открыть проект, разработанный в ПЗ №1–3, и проверить готовность электрической схемы и печатной платы.
2. Сформировать **Gerber-файлы** и **NC Drill-файлы** для изготовления печатной платы.
3. Проверить экспортированные производственные файлы в **Gerber Viewer**.
4. Сформировать спецификацию компонентов **Bill of Materials** и файл координат компонентов **Pick and Place**.
5. Проверить комплект производственной документации, подготовить файлы для передачи производителю и оформить отчёт.

Требования к электрической схеме

1. Производственная документация должна быть сформирована на основе проекта, выполненного в ПЗ №1–3.
2. Комплект файлов должен включать **Gerber-файлы** и **NC Drill-файлы**.
3. Экспортированные файлы должны корректно отображаться в **Gerber Viewer**.
4. Должны быть сформированы **Bill of Materials** и **Pick and Place**.
5. Подготовленный комплект файлов должен соответствовать данным проекта и быть пригоден для передачи производителю.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое описание проекта, подготовленного к формированию производственной документации.
3. Этапы формирования **Gerber-файлов** и **NC Drill-файлов**.
4. Этапы формирования **Bill of Materials**, **Pick and Place** и проверки файлов в **Gerber Viewer**.
5. Вывод по практической работе.

4.7 Контрольные вопросы к практическому занятию №4

1. Что такое производственная документация печатной платы и для чего она используется?
2. Как выполняется формирование Gerber-файлов в KiCad?
3. Что такое NC Drill-файл и какую информацию он содержит?
4. Для чего после экспорта необходимо проверять Gerber-файлы в Gerber Viewer?
5. Как выполняется формирование файла Bill of Materials в KiCad?
6. Как формируется файл Pick and Place для автоматизированного монтажа компонентов?
7. Какие данные содержатся в Gerber-файлах печатной платы?
8. Что проверяется при просмотре платы в Gerber Viewer?
9. Какие ошибки могут быть обнаружены при проверке экспортированных производственных файлов?
10. Какие файлы входят в комплект документации, передаваемый производителю печатной платы?