

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа автоматизации и робототехники

ОТЧЁТ

по курсовому проекту

Дисциплина: Современные методы автоматизированного проектирования
электронных устройств роботов

Тема: Материнская плата Jetson Nano

Студент гр. 3331506/70401

<подпись>

А.А. Ларионов

Преподаватель

<подпись>

Д.А. Капустин

«__»_____2021 г.

Санкт-Петербург

2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....	3
1 Организация питания Jetson Nano.....	4
1.1 Логика включения/выключения.....	5
1.2 Вспомогательные выводы.....	6
2 Преобразователи напряжения.....	7
2.1 Преобразователь 24 В/5 В.....	7
2.2 Преобразователь 5 В/3,3 В.....	10
2.3 Преобразователь 3,3 В/1,8 В.....	12
3 Интерфейсы.....	13
3.1 Последовательный порт.....	13
3.2 USB.....	15
3.3 DisplayPort.....	18
3.4 HDMI.....	21
3.5 Ethernet.....	25
4 Дополнительные функции.....	26
4.1 Выводы общего назначения.....	26
4.2 Подключение внешнего охлаждения.....	27
4.3 Индикация работы Jetson Nano.....	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Принципиальная электрическая схема.....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Перечень электронных компонентов.....	32

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Разработать материнскую плату для процессорного модуля (System on Module, SoM) ф. NVIDIA Corporation – Jetson Nano. Устройство предназначено для работы в составе 3D-принтера и соответствует схеме, приведенной на рисунке 1.

Для выполнения задания использовать САПР Altium Designer. Предоставить файлы проекта Altium Designer, принципиальную электрическую схему изделия, перечень электронных компонентов и отчет по курсовому проекту.

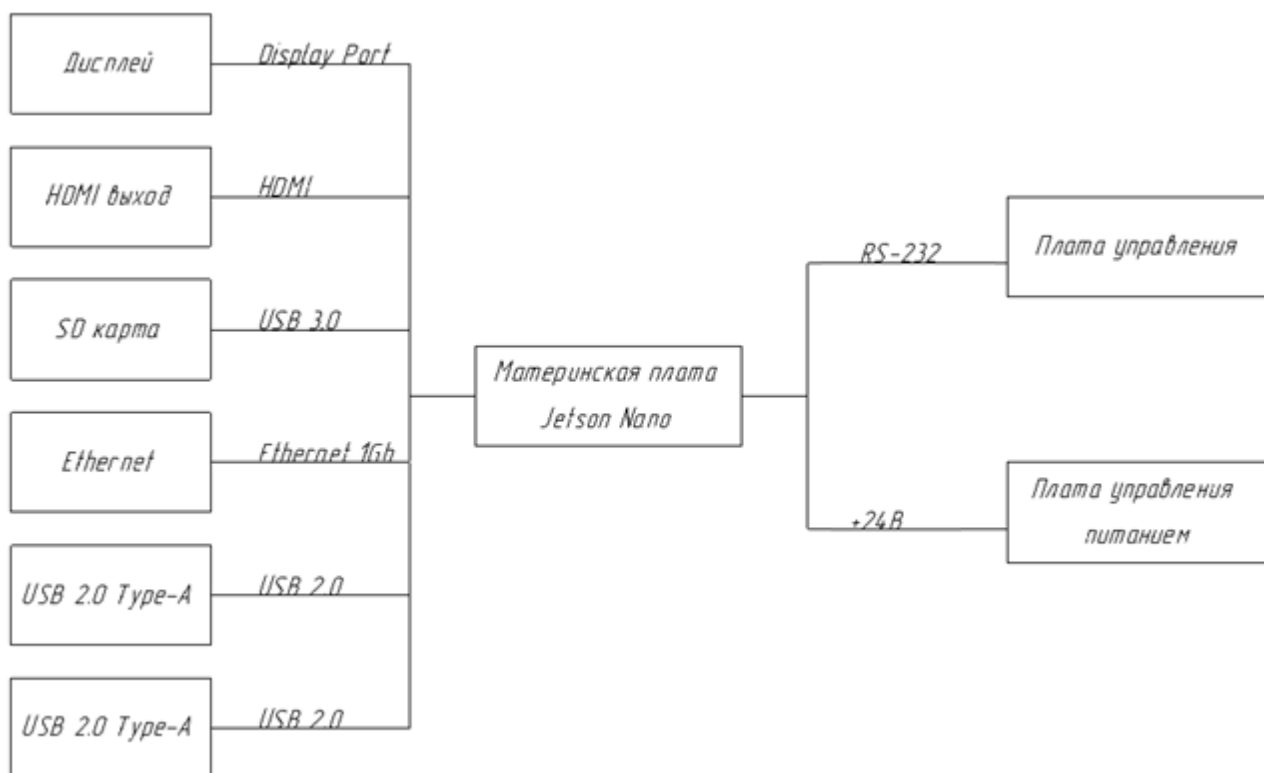


Рисунок 1 – Функциональная схема

1 Организация питания Jetson Nano

Процессорный модуль Jetson Nano изготавливается в форм-факторе SO-DIMM с 260 выводами. Основные характеристики приведены в таблице 1 [1]. Для соединения с модулем на материнскую плату установим разъем 2309413-1 ф. TE Connectivity.

Таблица 1 – Основные характеристики модуля Jetson Nano

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное напряжение	от 4,75 до 5,25	В
Максимальное значение потребляемого тока	5	А
Рабочая температура	-25 до +97	°C
Разъем	260 pin SO-DIMM	—

Модуль имеет как силовые выводы питания VDD IN и земли GND, так и вспомогательные, контролирующие состояние и обеспечивающие правильную эксплуатацию устройства. Вспомогательные выводы приведены в таблице 2, их настройка обсуждается в последующих главах. Между выводами питания и земли в непосредственной близости расположим ряд фильтрующих конденсаторов: керамический с номиналом 47 мкФ (×4); алюминиевый полимерный с номиналом 330 мкФ (×2) (Приложение А).

Таблица 2 – Вспомогательные выводы модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Уровень напряжения, В	Назначение
MOD_SLEEP* (178)	1,8	Индикация состояния сна (низкий логический уровень)
FORCE_RECOVERY* (214)	1,8	Запуск режима восстановления
SHUTDOWN_REQ* (233)	5	Запрос отключения питания (внутренняя подтяжка к питанию)

* сигнал с активным низким уровнем

Таблица 2 – Вспомогательные выводы модуля Jetson Nano (продолжение)

Вывод (№)	Уровень напряжения, В	Назначение
PMIC_BBAT (235)	1,65-5,5	Подключение резервного питания (для часов реального времени)
POWER_EN (237)	5	Включение/выключение модуля
SYS_RESET* (239)	1,8	Перезагрузка модуля (внутренняя подтяжка к питанию)

* сигнал с активным низким уровнем

1.1 Логика включения/выключения

Включения и выключения модуля, т.е. взаимодействие в выводе POWER_EN, осуществляется с помощью логических элементов SN74LVC1G38DBVRE4 ф. Texas Instruments Inc. Они выполняют логическую функцию И-НЕ. При высоких логических уровнях входных сигналов на выходе устанавливается сигнал низкого уровня. В остальных случаях выход находится в высокоимпедансном состоянии. Непосредственно с POWER_EN взаимодействует только выходной сигнал первого логического элемента.

На первый вход элементов подается управляющий сигнал питания и SHUTDOWN_REQ* соответственно. Первый поступает от источника питания модуля через резистор с номиналом 100 кОм, второй – от самого модуля. С учетом активного низкого уровня сигнала здесь обеспечивается подтяжка к питанию 5 В с помощью резистора с номиналом 100 кОм для исключения случайных срабатывания.

На второй вход поступают выходные сигналы самих элементов, соединенные перекрестно.

Однозначность выходных сигналов элементов при высокоимпедансном состоянии обеспечивается подтяжкой их к питанию через резисторы с номиналом 1 кОм.

После логических элементов сигнал проходит через параллельную цепь из резистора с номиналом 470 кОм и диода Шоттки, включенного встречно. Данная цепь инвертирует сигнал, который затем поступает на вход буферной микросхемы SN74LVC1G126DCKR ф. Texas Instruments Inc. Основное ее

предназначение – изоляция вывода POWER_EN. Микросхема в общем случае имеет три состояния на выходе в зависимости от комбинации логических уровней на входе и на выводе ОЕ. Подключив вывод ОЕ к питанию, получим передачу логического уровня с входа на выход без изменений.

Таблица истинности, соответствующая описанной выше схеме, приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Таблица истинности

Сигнал источника питания	1	1	0	1
SHUTDOWN_REQ*	0	1	1	1
Выходной сигнал логических элементов	0	0	1	1
Инвертированный сигнал	1	1	0	0
Действие	Вкл./Выкл.	Без изменений	Вкл./Выкл.	Без изменений

1.2 Вспомогательные выводы

Резервное питание для работы часов реального времени обеспечим с помощью элемента питания CR1225 с номинальным напряжением 3 В, для чего установим разъема 3001 ф. Keystone Electronics Corp. Т.к. элемент не является аккумулятором, то для защиты элемента последовательно установим диод Шоттки SL13-E3/5AT ф. Vishay Intertechnology, Inc. с максимальным падением напряжения 0,445 В. Тогда минимальное напряжение на выводе PMIC_BBAT равно

$$U_{PMIC} = 3 - 0,445 = 2,555 \text{ В.}$$

Это значение находится в допустимом диапазоне 1,65-5,5 В.

Выводы FORCE_RECOVERY* и SYS_RESET* вместе с общей землей выведем на двухконтактные разъемы DS1021-1x2SF11-B ф. Connfly Electronic Co., Ltd. Для защиты от электростатических разрядов установим диодную сборку TPD1E10B06DPYT ф. Texas Instruments Inc. Замкнув контакты разъема

перемычкой, можно выполнить запуск режима восстановления или перезагрузку модуля соответственно.

2 Преобразователи напряжения

Напряжение питания Jetson Nano равно 5 В, при этом используемые уровни напряжения на сигнальных выводах, включают значения 1,8/3,3/5 В. Напряжение, поступающее на материнскую плату от платы управления питанием, равно 24 В. Таким образом, требуется построить каскад преобразователей: 24/5, 5/3,3, 3,3/1,8 В.

2.1 Преобразователь 24 В/5 В

Построим импульсный преобразователь 24 В/5 В на основе микросхемы LMZM33606RLXR ф. Texas Instruments Inc., отличительной особенностью которой является наличие встроенной катушки индуктивности. Основные характеристики приведены в таблице 4. Значения параметров напряжения и тока, необходимые для работы Jetson Nano (5 В, 5 А), допустимы для данной микросхемы.

Таблица 4 – Основные характеристики микросхемы LMZM33606RLXR

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное входное напряжение	от 3,6 до 36	В
Номинальное выходное напряжение	от 1 до 20	В
Номинальный ток	до 6	А
Частота переключения	от 350 до 2200	кГц
Рабочая температура	-40 до +105	°С

Установим разъем для соединения с платой управления питанием 39502-1004 ф. Molex.

Проведем расчет преобразователя согласно документации на микросхему.

Рекомендуемое значение входной емкости составляет 20 мкФ. Расположим ряд конденсаторов: керамический с номиналом 10 мкФ (×2), керамический с номиналом 1 мкФ, керамический с номиналом 0,1 мкФ.

Рассчитаем резисторы для делителя напряжения, который подключается к выводу FB микросхемы для настройки обратной связи по напряжению, по формуле

$$U_{fb} = U_{out} \cdot \frac{R_{fbb}}{R_{fbt} + R_{fbb}} \rightarrow \frac{R_{fbt}}{R_{fbb}} = \frac{U_{out}}{U_{fb}} - 1, \quad (1)$$

где $U_{out} = 5$ – выходное напряжение, В;

$U_{fb} = 1,006$ – напряжение обратной связи, В;

R_{fbt} – сопротивление верхнего резистора, кОм;

R_{fbb} – сопротивление нижнего резистора, кОм.

Из уравнения (1) получим отношение сопротивлений

$$\frac{R_{fbt}}{R_{fbb}} = \frac{5}{1,006} - 1 = 3,97.$$

Согласно отношению, возьмем резисторы со стандартными номиналами $R_{fbt} = 82$ кОм и $R_{fbb} = 20$ кОм. Получившееся напряжение обратной связи равно

$$U_{fb} = 5 \cdot \frac{20}{82 + 20} = 0,98 \text{ В.}$$

Значение не укладывается в указанные допустимые интервалы напряжения $U_{fb} = 0,987 \dots 1,017$ В. Но с учетом других условий работы, указанных для этого параметра в документации, и допуска на сопротивление резисторов оставим рассчитанные значения.

Для лучшей компенсации переходных процессов добавим конденсатор параллельно верхнему резистору делителя напряжения. Его емкость рассчитывается по формуле

$$C_{ff} = 4,3 \cdot \frac{U_{out} \cdot C_{out}}{R_{fbt}}, \quad (2)$$

где C_{out} – выходная емкость, мкФ.

Рекомендуемое значение выходной емкости для напряжения 5 В составляет 100 мкФ. Расположим ряд конденсаторов: керамический с номиналом 22 мкФ, керамический с номиналом 47 мкФ (×2). Тогда по формуле (2) получим

$$C_{ff} = 4,3 \cdot \frac{5 \cdot (22 + 2 \cdot 47)}{82} = 30,4 \text{ пФ.}$$

Выберем конденсатора со стандартным номиналом 30 пФ.

Установим частоту переключения преобразователя равно 500 кГц, оставив вывод RT неподключенным. Небольшие частоты работы обеспечивают повышенную эффективность и снижают нагрев. Микросхема также допускает синхронизацию частоты с внешними источниками через вывод SYNC/MODE. Если эта функция не используется, то на вывод можно подать внешнее напряжение или подключить к земле. В первом случае устройство будет работать с фиксированной частотой при любой нагрузке, во втором – с автоматической подстройкой частоты. Работа с фиксированной частотой выгодна при постоянной нагрузке. Подключим вывод SYNC/MODE к напряжению питания на выходе.

Вывод EN отвечает за включение микросхемы и настройку нижнего порога рабочего напряжения через делитель напряжения. Т.к. дополнительные функции не требуются, подключим вывод напрямую к напряжению питания на входе.

Внутренний линейный стабилизатор напряжения используется для питания внутренних цепей микросхемы. Он может питаться от напряжения на выводе BIAS_SEL или с помощью генерации от входного напряжения микросхемы в случае его отсутствия. Чем ближе значение напряжения питания к значению 3,27 В, тем меньше тепловые потери. Исходя из этого подключим вывод BIAS_SEL к напряжению питания на выходе устройства.

Остальные функциональные выводы микросхемы оставим неподключенными.

Для индикации питания на выходе преобразователя установим светодиод TLMG1100-GS08 ф. Vishay Intertechnology, Inc. Проведем расчет резистора для

светодиода. Сопротивление и мощность резистора вычисляются по следующим формулам

$$R = \frac{V_s - V_{led}}{I_{led}}, \quad (3)$$

$$P = I^2 R, \quad (4)$$

где $V_s = 5$ – напряжение питания, В;

V_{led} – номинальное падение напряжения на светодиоде, В;

I_{led} – номинальный прямой ток светодиода, А;

I – прямой ток светодиода, А.

Для светодиода TLMG1100-GS08 с номинальным падением напряжения $V_{led} = 2,1$ В и прямым током $I_{led} = 30$ мА вычислим сопротивление резистора из (3)

$$R = \frac{5 - 2,1}{30 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ Ом.}$$

Ограничим яркость светодиода, взяв больший номинал резистора $R = 330$ Ом.

Тогда ток через светодиод равен

$$I_{led} = \frac{5 - 2,1}{330} = 8 \text{ мА.}$$

По формуле (4) определим необходимую мощность резистора

$$P = (8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 330 = 0,021 \text{ Вт.}$$

Возьмем резистор с номиналом 330 Ом и мощностью 0,1 Вт.

2.2 Преобразователь 5 В/3,3 В

Построим импульсный преобразователь 5 В/3,3 В на основе микросхемы TLV62130ARGTT ф. Texas Instruments Inc. Основные характеристики приведены в таблице 5.

Возьмем за основу готовую схему преобразователя с параметрами на выходе 3,3 В/3 А из документации на микросхему, но внесем в нее изменения, описанные ниже.

Таблица 5 – Основные характеристики микросхемы TLV62130ARGTT

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное входное напряжение	от 3 до 17	В
Номинальное выходное напряжение	от 0,9 до 5,25	В
Номинальный ток	до 3	А
Частота переключения	от 1250 до 2500	кГц
Рабочая температура	-40 до +85	°С

Установим на входе ряд конденсаторов: керамический с номиналом 10 мкФ, керамический с номиналом 1 мкФ, керамический с номиналом 0,1 мкФ.

Подключим вывод EN, обеспечивающий включение микросхемы, к выводу SYS_RESET* Jetson Nano. Это обеспечит правильную последовательность включения, т.е. преобразователь начнет работу после запуска модуля.

Рассчитаем конденсатор плавного пуска устройства по формуле

$$C_{ss} = t_{ss} \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{1,25}, \quad (5)$$

где t_{ss} – желаемое время плавного пуска, с.

Зададимся временем плавного пуска равным $t_{ss} = 5$ мс, тогда емкость конденсатора равна

$$C_{ss} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{1,25} = 0,01 \text{ мкФ.}$$

Выберем конденсатора со стандартным номиналом 0,01 мкФ.

Согласно документации, возьмем рекомендуемую катушку индуктивности XFL4020-222MEC ф. Coilcraft, Inc. с номиналом 2,2 мкГн и током насыщения 3,5 А.

2.3 Преобразователь 3,3 В/1,8 В

Построим линейный преобразователь 3,3 В/1,8 В на основе микросхемы MAX1983EUT+T ф. Maxim Integrated Products, Inc. Основные характеристики приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Основные характеристики микросхемы MAX1983EUT+T

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное входное напряжение	от 1,25 до 5,5	В
Номинальное выходное напряжение	от 0,8 до 2	В
Номинальный ток	до 0,3	А
Рабочая температура	-40 до +85	°С

Проведем расчет преобразователя согласно документации на микросхему.

Установим на входе ряд конденсаторов: керамический с номиналом 10 мкФ, керамический с номиналом 1 мкФ, керамический с номиналом 0,1 мкФ.

Вывод BIAS служит источником питания для внутренних цепей микросхемы. Подключим его к напряжению питания 5 В.

Вывод $\overline{\text{SHDN}}$ служит для отключения микросхемы. Для правильной последовательности включения подключим к нему сигнал PG от преобразователя 5 В/3,3 В. Это обеспечит запуск микросхемы только после стабилизации работы старшего преобразователя.

Рассчитаем резисторы для делителя напряжения, который подключается к выводу ADJ для настройки обратной связи по напряжению, по формуле

$$U_{out} = 0,8 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right), \quad (6)$$

где $U_{out} = 1,8$ – выходное напряжение, В;

R_1 – сопротивление верхнего резистора, кОм;

R_2 – сопротивление нижнего резистора, кОм.

Примем сопротивление второго резистора равным $R_2 = 20$ кОм. Тогда по формуле (6)

$$R_1 = 20 \cdot \left(\frac{1,8}{0,8} - 1 \right) = 25 \text{ кОм.}$$

Возьмем резисторы со стандартными номиналами $R_1 = 27$ кОм и $R_2 = 20$ кОм. Тогда напряжение на выходе равно

$$U_{out} = 0,8 \cdot \left(1 + \frac{27}{20} \right) = 1,88 \text{ В.}$$

Рекомендуемое значение выходной емкости составляет 10 мкФ и более. Установим керамический конденсатор с номиналом 22 мкФ.

3 Интерфейсы

Jetson Nano обладает широким перечнем доступных интерфейсов: UART, SPI, I2C, USB, HDMI, Display Port, Ethernet и др. Для построения схем требуемых интерфейсов используем руководство по проектированию [2].

3.1 Последовательный порт

По заданию необходимо обеспечить соединение с платой управления через интерфейс RS-232. Т.к. Jetson Nano не имеет аппаратной реализации данного интерфейса, такую возможность можно обеспечить через микросхему-приемопередатчик. Модуль поддерживает отладку через один из доступных интерфейсов UART, поэтому необходимо также обеспечить к нему доступ.

Используем выводы модуля, приведенные в таблице 7.

Таблица 7 – Выводы UART модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Уровень напряжения, В	Назначение
UART1_TXD (203)	1,8	Передача данных
UART1_RXD (205)	1,8	Прием данных
UART2_TXD* (236)	1,8	Передача данных
UART2_RXD* (238)	1,8	Прием данных

* отладочный интерфейс

Для вывода интерфейса RS-232 выберем разъем DS1069-4MRW6XA ф. Connfly Electronic Co., Ltd.

Выберем микросхему-приемопередатчик ADM101EARM ф. Analog Devices, Inc. Для правильной работы приемопередатчика необходимо расположить полярные конденсаторы с номиналом 0,1 мкФ следующим образом с соблюдением полярности: между выводами C1+ и C1-, между выводом V- и землей GND.

На сигнальных линиях между приемопередатчиком и разъемом установим диодную сборку SD15C-01FTG ф. Littelfuse, Inc. для защиты от электростатических разрядов и резисторы с номиналом 22 Ом для ограничения протекающего тока.

Для вывода отладочного интерфейса UART выберем разъем DS1069-4MRW6XA ф. Connfly Electronic Co., Ltd.

Приемопередатчик требует уровень напряжения входных сигналов равный 5 В. Для преобразования уровня напряжения с 1,8 В на выводах Jetson Nano до требуемых 5 В используем микросхему TXB0104DR ф. Texas Instruments Inc. Микросхема имеет выводы, которые следует подключить к соответствующим уровням напряжения на входе и выходе, т.е. 1,8 В и 5 В.

Для исключения плавающего состояния линий приема данных обеспечим их подтяжку к напряжению питания на выходе через резисторы с номиналом 100 кОм.

3.2 USB

По заданию необходимо вывести на разъемы два интерфейса USB 2.0 и один интерфейс USB 3.0.

Модуль Jetson Nano поддерживает стандарты USB 2.0 и USB 3.0. Используем выводы модуля, приведенные в таблице 8.

Таблица 8 – Выводы USB модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Тип сигнала	Назначение
USB0_D_N* (109)	Дифференциальный (90 Ом, $\pm 15\%$)	Передача данных USB 2.0
USB0_D_P* (111)		
USB1_D_N (115)	Дифференциальный (90 Ом, $\pm 15\%$)	Передача данных USB 2.0
USB1_D_P (117)		
USB2_D_N (121)	Дифференциальный (90 Ом, $\pm 15\%$)	Передача данных USB 2.0
USB2_D_P (123)		
USBSS_RX_N (161)	Дифференциальный (85-90 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростной прием данных
USBSS_RX_P (163)		
USBSS_TX_N (166)	Дифференциальный (85-90 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
USBSS_TX_P (168)		

* режим восстановления по USB

Для вывода двух интерфейсов USB 2.0 выберем разъем 292323-6 ф. TE Connectivity, для вывода интерфейса USB 3.0 – разъем 1932258-1 ф. TE Connectivity.

Для изоляции линий питания интерфейсов при выключенном состоянии модуля и защиты от перегрузки по току установим микросхему TPS259401AQRVCRQ1 ф. Texas Instruments Inc. Основные характеристики приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Основные характеристики микросхемы TPS259401AQRVCRQ1

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное напряжение	от 2,7 до 18	В
Максимальное значение тока	от 0,6 до 5,3	А
Номинальное входное сопротивление	42	МОм
Рабочая температура	-40 до +125	°С

Проведем расчет согласно документации на микросхему.

Установим на входе ряд конденсаторов: керамический с номиналом 1 мкФ, керамический с номиналом 0,1 мкФ.

Микросхема поддерживает настройку нижнего и верхнего порога напряжения питания с помощью выводов EN/UVLO и OVP. Кроме этого, вывод EN/UVLO служит для включения микросхемы. Если дополнительные функции не требуются, EN/UVLO следует подключить к входному напряжению питания, OVP – оставить неподключенным или подключить к земле. Для правильной последовательности питания подключим вывод EN/UVLO к выводу SYS_RESET* Jetson Nano. Вывод OVP подключим к земле.

Рассчитаем конденсатор плавного пуска на выводе dVdT устройства по формуле

$$t_{dVdT} = 8,3 \cdot 10^4 \cdot V_{in} \cdot C_{dVdT}, \quad (7)$$

где t_{dVdT} – время плавного пуска, с;

$V_{in} = 5$ – входное напряжение питания, В;

C_{dVdT} – емкость конденсатора плавного пуска, Ф.

Зададимся временем плавного пуска равным $t_{dVdT} = 5$ мс, тогда емкость конденсатора равна

$$C_{dVdT} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{8,3 \cdot 10^4 \cdot 5} = 0,012 \text{ мкФ.}$$

Выберем конденсатора со стандартным номиналом 0,01 мкФ.

Тогда время плавного пуска равно

$$t_{avdt} = 8,3 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} = 4,15 \text{ мс},$$

Рассчитаем резистор для ограничения максимального тока по формуле

$$I_{lim} = \frac{89}{R_{lim}}, \quad (8)$$

где I_{lim} – желаемый максимальный ток, А.

По стандарту USB 2.0 и USB 3.0 максимальное потребление тока по линии питания равно 500 мА и 900 мА соответственно, тогда $I_{lim} = 2 \cdot 0,5 + 0,9 = 1,9$ А. Необходимое сопротивление резистора по (8) равно

$$R_{lim} = \frac{89}{1,9} = 46,8 \text{ кОм}.$$

Выберем резистор со стандартным номиналом $R_{lim} = 47 \text{ кОм}$. Тогда максимальный ток равен

$$I_{lim} = \frac{89}{47} = 1,89 \text{ А}.$$

Остальные функциональные выводы могут быть оставлены неподключенными или подключены к земле.

На выходе установим ряд конденсаторов: керамический с номиналом 10 мкФ, алюминиевый полимерный с номиналом 100 мкФ.

Согласно руководству по проектированию, все линии передачи данных должны быть защищены от электростатических разрядов, для чего для каждой пары линий интерфейса USB 2.0 установим диодную сборку TPD2S017DBVR ф. Texas Instruments Inc. Для линий низкоскоростной передачи и высокоскоростного приема/передачи данных интерфейса USB 3.0 установим единую диодную сборку TPD6E05U06RVZR ф. Texas Instruments Inc. Также на линиях высокоскоростного приема/передачи данных следует установить со стороны модуля разделительные конденсаторы с номиналом 0,1 мкФ. Используем керамические конденсаторы с номиналом 0,1 мкФ.

3.3 DisplayPort

По заданию необходимо вывести на разъем интерфейс DisplayPort.

Модуль Jetson Nano поддерживает интерфейс Embedded DisplayPort и DisplayPort, совмещенный с HDMI. Использование Embedded DisplayPort в качестве DisplayPort ограничивает возможности интерфейса только передачей изображения. Назначение интерфейса в разрабатываемом устройстве заключается в выводе изображения на дисплей, поэтому Embedded DisplayPort подходит для выполнения данной задачи. Используем выводы модуля, приведенные в таблице 10.

Таблица 10 – Выводы DisplayPort модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Тип сигнала/ Уровень напряжения	Назначение
DP0_TXD0_N (39)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP0_TXD0_P (41)		
DP0_TXD1_N (45)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP0_TXD1_P (47)		
DP0_TXD2_N (51)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP0_TXD2_P (53)		
DP0_TXD3_N (57)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP0_TXD3_P (59)		
DP0_HPD (88)	1,8 В	Сигнала подключения/отключения дисплея
DP0_AUX_N (90)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Передача управляющих сигналов
DP0_AUX_P (92)		

Для вывода интерфейс DisplayPort выберем разъем 47272-0001 ф. Molex. Т.к. контакты 13 и 14 разъема не используются, обеспечим их подтяжку к земле через резисторы с номиналом 1 МОм.

Для изоляции линии питания интерфейса при выключенном состоянии модуля и защиты от перегрузки по току установим защитную микросхему TPS25200DRVR ф. Texas Instruments Inc. Основные характеристики приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Основные характеристики микросхемы TPS25200DRVR

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное напряжение	от 2,5 до 6,5	В
Максимальное значение тока	от 0,085 до 2,9	А
Номинальное входное сопротивление	60	МОм
Рабочая температура	-40 до +125	°С

Проведем расчет согласно документации на микросхему.

Установим на входе ряд конденсаторов: керамический с номиналом 1 мкФ, керамический с номиналом 0,1 мкФ.

Вывод EN обеспечивает включение микросхемы. Для правильной последовательности включения подключим к нему сигнал PG от преобразователя 5 В/3,3 В.

Рассчитаем резистор для ограничения максимального тока при ограничении сверху по формуле

$$I_{OSmax} = \frac{96754}{R_{ilim}^{0,985}} + 30, \quad (9)$$

где I_{OSmax} – желаемое верхнее значение максимального тока, мА.

По стандарту DisplayPort максимальное потребление тока по линии питания равно 500 мА, тогда $I_{OSmax} = 500$ мА. Необходимое сопротивление резистора по (9) равно

$$R_{ilim} = \left(\frac{96754}{500 - 30} \right)^{\frac{1}{0,985}} = 223 \text{ кОм},$$

С учетом допусков выберем резистор с номиналом $R_{lim} = 200$ кОм. Тогда максимальный ток на линии питания равен

$$I_{osmax} = \frac{96754}{200^{0,985}} + 30 = 550 \text{ мА.}$$

На выходе микросхемы установим керамический конденсатор с номиналом 22 мкФ.

Согласно руководству по проектированию, все дифференциальные линии передачи данных должны быть защищены от электростатических разрядов, для чего установим ряд диодных сборок TPD4E05U06DQAR ф. Texas Instruments Inc. Также на данных линиях следует установить со стороны модуля разделительные конденсаторы с номиналом 0,1 мкФ. Используем керамические конденсаторы с номиналом 0,1 мкФ. Обеспечим подтяжку линий DP0_AUX_N и DP0_AUX_P с помощью резисторов с номиналом 100 кОм к напряжению питания 3,3 В и к земле соответственно.

На линии сигнала подключения/отключения дисплея HPD необходимо установить неинвертирующий преобразователь уровня, т.к. интерфейс DisplayPort использует напряжение, отличное от напряжения на выводе модуля DP0_HPD (3,3 В и 1,8 В).

Используем решение на основе буферной микросхемы SN74LV1T125DBVR ф. Texas Instruments Inc. Питание микросхемы обеспечим от напряжения 1,8 В. Микросхема в общем случае имеет три состояния выходного сигнала в зависимости от комбинации логических уровней на входе и на выводе \overline{OE} . Подключив вывод \overline{OE} к земле, получим передачу логического уровня с входа на выход без изменений. Согласно спецификации, обеспечим подтяжку линии DP0_HPD к земле со стороны разъема через резистор с номиналом 100 кОм.

3.4 HDMI

По заданию необходимо вывести на разъем интерфейс HDMI.

Модуль Jetson Nano поддерживает интерфейс HDMI, совмещенный с DisplayPort. Используем выводы модуля, приведенные в таблице 12.

Таблица 12 – Выводы HDMI модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Тип сигнала/ Уровень напряжения	Назначение
DP1_TXD0_N (63) (TMDS Data 2-)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP1_TXD0_P (65) (TMDS Data 2+)		
DP1_TXD1_N (69) (TMDS Data 1-)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP1_TXD1_P (71) (TMDS Data 1+)		
DP1_TXD2_N (75) (TMDS Data 0-)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP1_TXD2_P (77) (TMDS Data 0+)		
DP1_TXD3_N (81) (TMDS Clock-)	Дифференциальный (90-100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
DP1_TXD3_P (83) (TMDS Clock+)		
HDMI_CEC (94)	1,8 В (толерантно к 3,3 В)	Передача управляющих сигналов
DP1_HPD (96) (Hot Plug Detect)	1,8 В	Сигнал подключения/отключения дисплея
DP0_AUX_N (98) (SDA)	1,8 В (толерантно к 3,3 В)	Передача данных
DP0_AUX_P (100) (SCL)	1,8 (толерантно к 3,3 В)	Сигнал синхронизации

Для вывода интерфейса HDMI выберем разъем 1827059-3 ф. TE Connectivity.

Для изоляции и защиты от перегрузки по току линии питания интерфейса и вспомогательного напряжения 3,3 В при выключенном состоянии модуля установим микросхемы – TPS25221DBVR (для 3,3 В) и TPS25200DRVR (для 5 В) ф. Texas Instruments Inc. Основные характеристики микросхемы TPS25221DBVR приведены в таблице 13. Характеристики микросхемы TPS25200DRVR приводились ранее (табл. 11)

Таблица 13 – Основные характеристики микросхемы TPS25221DBVR

Параметр	Значение	Размерность
Номинальное напряжение	от 2,5 до 5,5	В
Максимальное значение тока	от 0,25 до 2,7	А
Номинальное входное сопротивление	70	МОм
Рабочая температура	-40 до +125	°C

Проведем расчет TPS25221DBVR согласно документации на микросхему.

Установим на входе ряд конденсаторов: керамический с номиналом 1 мкФ, керамический с номиналом 0,1 мкФ.

Вывод EN обеспечивает включение микросхемы. Для правильной последовательности включения подключим к нему сигнал с вывода MOD_SLEEP* Jetson Nano. Дополнительно обеспечим подтяжку вывода EN к земле через резистор с номиналом 100 кОм.

Рассчитаем резистор для ограничения максимального тока при ограничении сверху по формуле

$$I_{OSmax} = \frac{52640}{R_{ilim}^{0,97}}, \quad (10)$$

где I_{OSmax} – желаемое верхнее значение максимального тока, мА.

Напряжение питания 3,3 В используется в качестве логического уровня для элементов на сигнальных линиях, которые рассматриваются в дальнейшем. Потребляемый ток не поддается точному расчету, зададимся значением максимального тока равным $I_{OSmax} = 1000$ мА.

Необходимое сопротивление резистора по (10) равно

$$R_{ilim} = \left(\frac{52640}{1000} \right)^{\frac{1}{0,97}} = 60 \text{ кОм.}$$

Выберем резистор со стандартным номиналом $R_{ilim} = 62$ кОм.

Тогда максимальный ток равен

$$I_{osmax} = \frac{52640}{62^{0,97}} = 960 \text{ мА.}$$

На выходе микросхемы установим керамический конденсатор с номиналом 10 мкФ.

Согласно руководству по проектированию на дифференциальных линиях передачи данных необходимо расположить разделительные конденсаторы с номиналом 0,1 мкФ со стороны модуля, обеспечить подтяжку линий к земле через резисторы с номиналом 500 Ом и контролем с помощью транзистора, защиту от электростатических разрядов, а также установить последовательно резисторы с номиналом не более 6 Ом.

В качестве разделительных конденсаторов используем керамические с номиналом 0,1 мкФ.

Для контроля подтяжки линий к земле используем транзистор NTK3043NT1G ф. ON Semiconductor. Подключим затвор транзистора к напряжению питания 3,3 В. Установим между затвором и истоком резистор с номиналом 22 кОм для предотвращения случайного срабатывания транзистора при отсутствии напряжения. Логический уровень сигналов на дифференциальных линиях HDMI составляет 5 В, тогда в наихудшем случае через транзистор будет течь ток

$$I_{max} = \frac{5}{500} \cdot 8 = 0,08 \text{ А.}$$

При этом ток, который способен пропустить транзистор при напряжении между истоком и затвором 3,3 В превышает 0,3 А. Мощность, которая рассеивается на транзисторе, можно найти по формуле

$$W = I_{max}^2 \cdot R, \quad (11)$$

где R – сопротивление транзистора при заданном напряжении, Ом.

Сопротивление транзистора при напряжении 3,3 В составляет $R = 2$ Ом. Тогда из (11) найдем рассеиваемую мощность

$$W = 0,08^2 \cdot 2 = 0,013 \text{ Вт.}$$

Допустимое значение рассеиваемой мощности для транзистора равно $W = 0,44$ Вт, что говорит об отсутствии нагрева транзистора при данных условиях.

Для защиты от электростатических разрядов установим на линиях пару диодных сборок TPD4E05U06DQAR ф. Texas Instruments Inc.

Работа линий передачи данных SDA и сигнала синхронизации SCL модуля Jetson Nano возможна при максимальном напряжении 3,3 В, поэтому требуется преобразователь уровней с 3,3 В на 5 В для соответствия уровню напряжения HDMI. Воспользуемся типовым решением, часто применяемым в шинах I2C [3]. Линии с разным уровнем напряжения связываются посредством транзисторов NTK3043NT1G, затворы которых подключены к напряжению питания 3,3 В. При этом с помощью резисторов обеспечивается подтяжка линий к соответствующему напряжению питания со стороны модуля и со стороны разъема, т.е. 3,3 В и 5 В. Согласно руководству по проектированию, номиналы резисторов со стороны модуля равны 10 кОм, со стороны разъема – 1,8 кОм.

Для защиты от электростатических разрядов установим на линиях пару диодных сборок SP3022-01ETG ф. Littelfuse, Inc.

Линия передачи управляющих сигналов CEC требует выполнения определенных условий переключения. Используем транзистор NTK3043NT1G, соединив с его помощью линии со стороны модуля и разъема и подключив затвор транзистора к напряжению питания 3,3 В. Согласно стандарту, требуется обеспечить подтяжку линии к напряжению питания 3,3 В. Логический уровень напряжения на выводе HDMI_CEC толерантен к 3,3 В. Используем для подтяжки резистор с номиналом 22 кОм со стороны модуля и резистор с номиналом 27 кОм со стороны разъема. Линия чувствительна к токам утечки, особенно при выключенном состоянии устройства [4]. Поэтому для ограничения максимального значения тока утечки подключим со стороны разъема диод Шоттки, встречно и последовательно с резистором подтяжки.

Для защиты от электростатических разрядов установим на линии диодную сборку TPD1E10B06DPYT ф. Texas Instruments Inc.

Вывод DP1_HPD модуля использует уровень напряжения 1,8 В и не толерантен к 5 В, логическому уровню напряжения HDMI. Используем транзистор NTK3043NT1G для преобразования. Подключим затвор транзистора к линии Hot Plug Detect со стороны разъема. Установим между затвором и истоком резистор с номиналом 22 кОм для предотвращения случайного срабатывания. Линию со стороны модуля подключим к стоку транзистора, а также обеспечим ее подтяжку к напряжению 1,8 В через резистор с номиналом 10 кОм.

Для защиты от электростатических разрядов установим на линии диодную сборку TPD1E10B06DPYT ф. Texas Instruments Inc.

3.5 Ethernet

По заданию необходимо вывести на разъем интерфейс Gigabit Ethernet. Используем выводы модуля, приведенные в таблице 14.

Таблица 14 – Выводы Gigabit Ethernet модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Тип сигнала	Назначение
GBE_MDI0_N (184)	Дифференциальный (100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
GBE_MDI0_P (186)		
GBE_LED_LINK (188)	—	Индикация скорости передачи данных (при подключении светодиода)
GBE_MDI1_N (190)	Дифференциальный (100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
GBE_MDI1_P (192)		
GBE_LED_ACT (194)	—	Индикация передачи данных (при подключении светодиода)
GBE_MDI2_N (196)	Дифференциальный (100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
GBE_MDI2_P (198)		
GBE_MDI3_N (202)	Дифференциальный (100 Ом, $\pm 15\%$)	Высокоскоростная передача данных
GBE_MDI3_P (204)		

Для вывода интерфейса выберем разъем 1-2301994-0 ф. TE Connectivity с встроенными трансформаторами и двумя светодиодами (индикация передачи данных и скорости передачи данных). Контакт опорного уровня и корпус разъема соединим с общей землей через керамический конденсатор с номиналом 100 пФ и ряд резисторов с номиналом 0,05 Ом.

Линии передачи данных в случае использования Jetson Nano данного разъема не требуют внешних компонентов. Линии индикации подключим к контактам разъема, соответствующим катодам светодиодов, через резисторы с номиналом 220 Ом. В руководстве по проектированию рекомендуемое значение номиналов резисторов равно 110 Ом, значением 220 выбрано с целью ограничить яркость светодиода.

4 Дополнительные функции

4.1 Выводы общего назначения

Для удобства пользователя выведем часть выводов общего назначения на разъем DS1021-1x4SF11-B ф. Connfly Electronic Co., Ltd. Используем выводы модуля, приведенные в таблице 15.

Повысим используемое напряжение с 1,8 В до 5 В с помощью преобразователя уровня TXB0104DR, описанного ранее.

Дополнительно установим аналогичный разъем и выведем на него напряжение питания 3,3 В и 5 В, а также общую землю. Их можно использовать для питания дополнительной нагрузки.

Таблица 15 – Выводы GPIO модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Уровень напряжения, В	Назначение
GPIO03 (126)	1,8	Вывод общего назначения
GPIO04 (127)	1,8	Вывод общего назначения
GPIO05 (128)	1,8	Вывод общего назначения
GPIO13 (228)	1,8	Вывод общего назначения, ШИМ

4.2 Подключение внешнего охлаждения

Модуль Jetson Nano характеризуется повышенным тепловыделением при работе и требует внешнего охлаждения. Для подключения внешнего охлаждения установим разъем DS1070-4MVB6 ф. Connfly Electronic Co., Ltd. Используем выводы модуля, приведенные в таблице 16. Вывод GPIO12 используется для считывания частоты вращения, вывод GPIO14 – для управления частотой вращения.

Таблица 16 – Выводы для внешнего кулера модуля Jetson Nano

Вывод (№)	Уровень напряжения, В	Назначение
GPIO12 (218)	1,8	Вывод общего назначения
GPIO14 (230)	1,8	Вывод общего назначения, ШИМ

Напряжение питания, которое подается на разъем, составляет 5 В.

Для преобразования уровней сигнала на линии управления частотой вращения используем микросхему SN74LVC1T45DBVR ф. Texas Instruments Inc. Она является неинвертирующим приемопередатчиком и позволяет настроить передачу между устройствами с разным уровнем напряжения. С помощью вывода DIR можно настроить направление передачи. Для передачи сигнала от разъема на модуль подключим вывод к земле. Вход и выход в общем случае находятся в высокоимпедансном состоянии и должны быть однозначно определены. Обеспечим подтяжку к земле линии со стороны модуля и со стороны разъема через резисторы номиналом 100 кОм.

Для преобразования уровней сигнала на линии считывания частоты вращения используем транзистор NTK3043NT1G. Линии с разным уровнем напряжения связываются посредством транзистора, затвор которого подключен к напряжению питания 3,3 В. Используем для подтяжки резистор с номиналом 22 кОм со стороны модуля и резистор с номиналом 10 кОм со стороны разъема.

4.3 Индикация состояния Jetson Nano

Для индикации состояния модуля Jetson Nano установим светодиод TLMY1000-GS08 ф. Vishay Intertechnology, Inc. В качестве управляющего элемента используем транзистор.

Установим транзистор NTK3043NT1G, к затвору которого подключим вывод MOD_SLEEP* модуля Jetson Nano. Установим между затвором и истоком резистор с номиналом 22 кОм для предотвращения случайного срабатывания. При напряжении 1,8 В между затвором и истоком транзистор способен пропустить не более 0,1 А.

Питание светодиода осуществляется от напряжения 5 В. Для светодиода TLMG1100-GS08 номинальное падение напряжения равно 1,8 В, прямой ток – 15 мА. Исходя из этих данных проведем расчет резистора для светодиода.

Сопротивление резистора по формуле (3) равно

$$R = \frac{5 - 1,8}{15 \cdot 10^{-3}} = 213 \text{ Ом.}$$

Ограничим яркость светодиода, взяв больший номинал резистора $R = 330 \text{ Ом}$.

Тогда ток через светодиод равен

$$I_{led} = \frac{5 - 1,8}{330} = 10 \text{ мА.}$$

По формуле (4) определим необходимую мощность резистора

$$P = (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 330 = 0,033 \text{ Вт.}$$

Возьмем резистор с номиналом 330 Ом и мощностью 0,1 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе курсового проекта разработана материнская плата под процессорный модуль Jetson Nano, являющаяся частью более крупного проекта – 3D-принтера. Описано назначение компонентов и дано обоснование их выбора в соответствии с требованиями проектирования, предъявляемые к модулю. Предоставлены принципиальная электрическая схема, перечень электронных компонентов и файлы проекта Altium Designer.

Выполнение работы позволило получить практические навыки проектирования устройства в составе крупного проекта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. NVIDIA Jetson Nano System-on-Module Maxwell GPU + ARM Cortex-A57 + 4GB LPDDR4 + 16GB eMMC. Data Sheet. – NVIDIA Corporation. – 2020.
2. NVIDIA Jetson Nano. Product Design Guide. – NVIDIA Corporation. – 2020.
3. Level shifting techniques in I2C-bus design. Application note. – NXP Semiconductors. – 2007.
4. Мачулла́т, Ф. Устранение проблем при формировании сигнала HDMI / Ф. Мачулла́т, Д. Сальвадор // Компоненты и технологии. – 2012. – № 2(127). – С. 98-100.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Принципиальная электрическая схема

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Перечень электронных компонентов