

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова»  
Приборостроительный факультет  
Кафедра «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к выпускной квалификационной работе бакалавра  
на тему «Разработка видеокамеры системы “умный город” на базе  
искусственной нейронной сети»

Студент гр. Б17-071-1

С.А. Струков

Руководитель

А.Ю. Печенкин  
канд.техн.наук, доцент

Заведующий кафедрой

В.А. Глушков  
канд.техн.наук, доцент

Ижевск 2021

## Содержание

1. Введение.....	3
2. Аналитический обзор существующих решений.....	5
3. Анализ технического задания.....	8
4. Структурная и принципиальная разработка решения.....	9
5. Выбор элементной базы.....	12
6. Выбор и разработка печатной платы.....	14
7. Разработка печатного узла.....	18
8. Разработка корпуса РЭС.....	19
9. Расчет надежности.....	22
10. Анализ технологичности.....	32
10.1. Качественная оценка технологичности.....	33
10.2. Количественная оценка технологичности.....	34
11. Разработка ПО демонстрационной нейронной сети.....	38
11.1. Исходные данные.....	38
11.2. Ход работы.....	40
11.2.1. Аппаратная платформа.....	41
11.2.2. Операционная система.....	43
11.2.3. Приложение для реализации нейросети.....	43
11.2.4. Запуск программы на ZedBoard.....	44
11.3. Результаты.....	46
12. Заключение.....	46
13. Список использованных источников.....	47
Приложение А. Раскладка слоев печатной платы устройства.....	49
Приложение Б. 3D-рисунки общей сборки устройства.....	54
Приложение В. Расчет надежности.....	57

## 1. Введение

В настоящее время технический прогресс позволяет переложить исполнение некоторых функций, которые ранее были уникальными для человека, таких как, например, способность отличать один объект от другого и выносить самостоятельные умозаключения, на электронно-вычислительные комплексы, не потеряв при этом в точности. Это реализуется с использованием искусственных нейронных сетей.

Одна из областей применения таких комплексов – круглосуточное видеонаблюдение. Если устройство круглосуточного видеонаблюдения будет в состоянии без вмешательства человека определять, какие объекты попадают в объектив камеры в тот или иной момент времени, это очень упростит задачу выявления того или иного события, например, произошедшего рядом преступления, так как ускорит в значительной степени процесс нахождения видеоматериала, относящегося непосредственно к преступлению.

Если же таких систем видеонаблюдения (видеокамер) будет несколько, и они будут расположены в ключевых точках города, то при помощи такой системы можно будет намного эффективнее проводить мониторинг активности в городе для оптимизации ключевых городских процессов, таких как, например, составление портрета граждан, проходящих по той или иной улице, мониторинг ношения гражданами медицинских масок и прочее, для чего требуется способность выносить заключения об увиденных объектах.

Существует несколько существенных препятствий для реализации такого рода систем на практике.

Во-первых, существующие искусственные нейронные сети, как правило, реализуются на основе настольных компьютеров или серверов. Это накладывает определенные ограничения на их производительность относительно потребляемой мощности (Performance Per Watt, PPW). Так как

требуется повысить данный показатель до предела, а также желательно, чтобы система обработки захватываемого видеоматериала находилась там же, где и расположено непосредственно устройство захвата видео, соответственно, не занимала много места, требуется использовать Программируемые Логические Интегральные Схемы (ПЛИС) в качестве вычислительной основы.

Во-вторых, при использовании ПЛИС возникает проблема в острой нехватке методического материала и/или квалифицированных специалистов по теме реализации искусственных нейронных сетей на ПЛИС, что создает довольно высокий порог вхождения в данную область, не говоря уже о высокой стоимости современных производительных ПЛИС.

Таким образом, целью данной работы является как разработка описанной видеокамеры на основе ПЛИС, так и создание методического пособия по созданию систем на ПЛИС, использующих искусственные нейронные сети в процессе обработки информации.

Обобщив, мы можем сказать, что данная работа будет состоять из следующих разделов:

1. Аналитического обзора существующих решений, где будет приведен сравнительный анализ существующих на рынке решений по реализации концепта данного устройства
2. Формулировки технического задания
3. Разработки электронной платформы – печатного узла с кристаллом ПЛИС с необходимыми электронными компонентами и разъемами
4. Разработки принципов соединения электронной платформы с остальными частями устройства, а также методов крепежа устройства в пространстве
5. Методического пособия по созданию прототипа разработанного устройства на основе отладочной платы с выбранной ПЛИС

## 2. Аналитический обзор существующих решений

На данный момент существует несколько видеокамер круглосуточного видеонаблюдения со встроенной реализацией алгоритмов обработки изображения, а именно:

1. Видеообрабатывающее ядро от Xilinx [1]. Исходя из описания на сайте продукта, можем заключить, что, во-первых, это именно обрабатывающее ядро, а не полноценная камера, а во-вторых, видеопрезентация не обновлялась с 2015 года. Соответственно, это не является одним из их основных продуктов, и не является конкурентом.
2. Система машинного зрения от Xilinx на двух камерах [2]. Это также не является полноценной камерой, и всего лишь выполняет функцию 3D-визуализации видимой области в реальном времени. Остальное аналогично с первым устройством
3. Также, существуют устройства захвата и обработки изображений на основе Intel FPGA [3]. На сайте Intel еще меньше информации, чем на сайте Xilinx, что говорит об еще более острой нехватке специалистов в этой области.
4. Существует несколько завершенных камер видеонаблюдения, имеющих встроенную функцию распознавания образов, но их существенным недостатком является закрытое проприетарное ПО, и, как правило, ограниченность «из коробки» только распознаванием лиц. Закрытое ПО также означает, что невозможно модернизировать камеру для изменения категорий распознаваемых образов.

Таким образом, не существует какого-либо прямого аналога разрабатываемого устройства, и нам остается выбрать ПЛИС и камеру, чтобы самостоятельно разработать такое устройство.

В плане выбора ПЛИС, есть два основных производителя, из каталога которых можно что-либо выбрать, что не будет сильно устаревшим: это Xilinx и Intel FPGA.

Мы сделали выбор в сторону Xilinx, так как они имеют более развитое сообщество (форум Xilinx), а также их фирменный Xilinx DPU (Deep learning Processing Unit) – высокоэффективный обрабатывающий узел, выполняемый посредством ПЛИС. Не говоря уже о намного более дружелюбном к пользователю пакете разработки систем с искусственными нейронными сетями Vitis AI (в прошлом, с поддержкой большого количества устройств, DNNDK – Deep Neural Network Development Kit), по сравнению с программными пакетами Intel FPGA (OpenVINO toolkit), и намного более широкого разнообразия поддерживаемых Vitis AI (DNNDK) микросхем.

Что касается конкретной ПЛИС, то, так как данное устройство всего лишь является первым экземпляром, в некотором роде прототипом, то достаточно использовать такое устройство, которое есть в наличии, с достаточной мощностью, и поддерживаемое Vitis AI (DNNDK).

В наличии была отладочная плата ZedBoard на основе кристалла семейства Zynq-7000, представляющего собой ARM Cortex-A9 микропроцессор и ПЛИС, выполненных на одной подложке, а именно – микросхемы Z-7020 [4]. Её структура представлена на рисунке 1.

Соответственно, в качестве ядра системы будет использоваться та же микросхема, что и на отладочной плате, так как перед тем, как изготавливать рабочий экземпляр устройства, можно проверить его способность выполнять свои функции на отладочной плате.

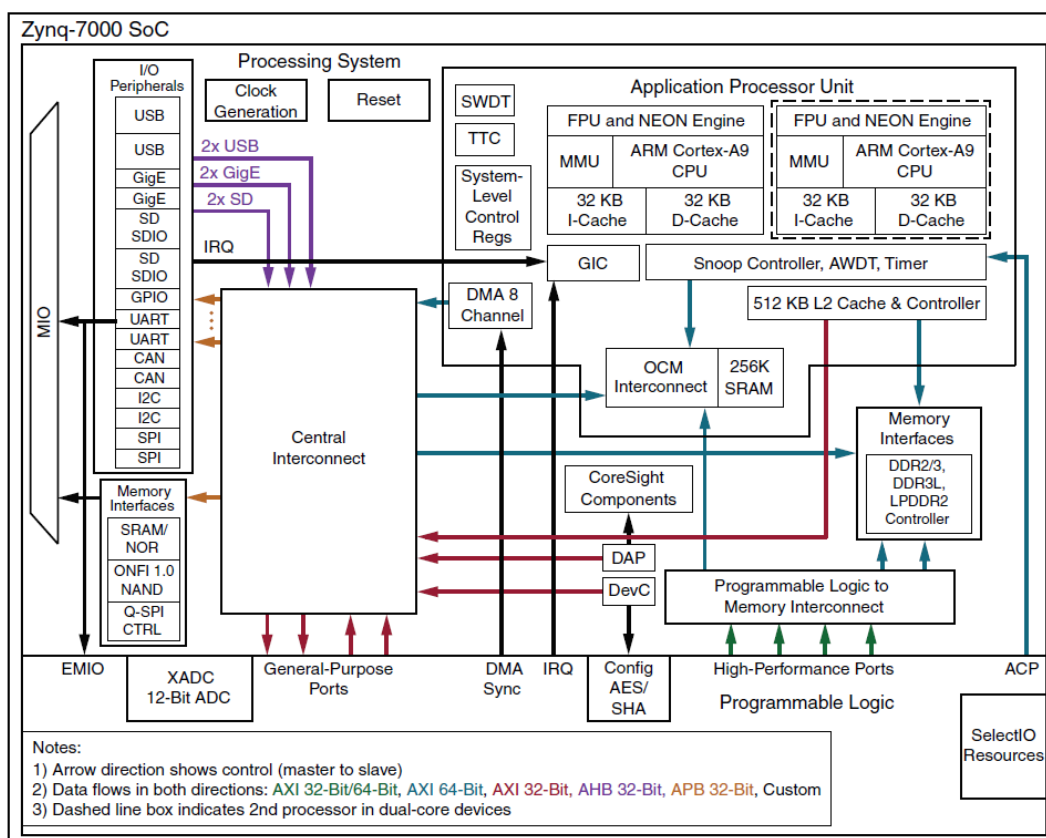


Рисунок 1. Структура ПЛИС семейства Zynq-7000

При выборе камеры будем руководствоваться принципом миниатюризации – возьмем такую камеру, которая при наименьшем размере имеет наибольшее количество функций. В нашем случае это камера Tamron MP1110M-VC (рис. 2). Она имеет достаточно широкий климатический диапазон, может снимать в разрешении 1920x1080p с частотой кадров 60fps (1080p60), имеет оптическое приближение, программную регулировку фокусировки и увеличенный динамический диапазон.



Рисунок 2. Фотография камеры Tamron MP1110M-VC

### 3. Анализ технического задания

При разработке технического задания будем руководствоваться спецификациями выбранной камеры [5] и отладочной платы ZedBoard [6].

Напряжение потребления как камеры, так и ZedBoard, 12В, Ток потребления, скорее всего, не будет превышать 2А (максимальный ток потребления ZedBoard – 3А), разъем питания подбираем такой же, как и на ZedBoard, но с учетом крепления не на плату, а на корпус.

Так как не требуется высокое сжатие видеопотока, используем кодек h.264, так как более эффективный кодек h.265, хоть и почти в два раза сокращает занимаемое видеоматериалом пространство, заметно повышает нагрузку на кодирующую вычислительную систему.

Наиболее разумно будет не хранить данные на самой камере, а передавать их по протоколу Ethernet на удаленный сервер.

При кодировании видео 1080p60 кодеком h.264, битрейт видео будет около 10 Мбит/с. Соответственно, протокол передачи данных между камерой и сервером возьмем Ethernet 10/100 BASE-T, т.к. простого Ethernet в 10 Мбит будет недостаточно, а 1Gbit Ethernet будет избыточным, так как он сильно удорожает стоимость производства и эксплуатации данных изделий.

Пункт 2.5 – необходимый угол обзора требуется для понимания тех мест, в которые можно будет эту камеру установить.

Пункты 2.6 и 2.7 ТЗ берем, потому что выбранная камера предусматривает возможность такого управления. И наличие таких функций сильно упростит работу оператора данного устройства.



Что касается конструктивно-технологических требований, то условия эксплуатации, опять же, берем из спецификаций камеры и ZedBoard. Следует отметить, что в спецификации камеры Tamron не отмечена эксплуатация при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$ , но опытным путем было установлено, что при такой температуре данная камера успешно выполняет свои функции в течении длительного промежутка времени.

Габаритные размеры берем, исходя примерно из габаритов камеры и ZedBoard, с учетом, что последняя будет значительно уменьшена в размерах.

Перечень вопросов, подлежащих разработке, составляется таким образом, чтобы можно было изготовить и проверить работоспособность разработанного устройства.

Перечень графического материала составляется на основе вопросов, подлежащих разработке.

#### **4. Структурная и принципиальная разработка решения**

Следующим этапом в разработке устройства будет описание точных принципов его работы.

Структурная и принципиальная схемы устройства приведены в документах ИГТУ.466216.001 Э1 и ИГТУ.466216.001 Э3 соответственно.

Часть структурной схемы изображена на рисунке 3.

В логическом центре устройства находится система на кристалле (System on Chip, SoC) Zynq – ARM Cortex A9 микроконтроллер и ПЛИС, выполненные на одном кристалле. На принципиальной схеме это микросхема D10.

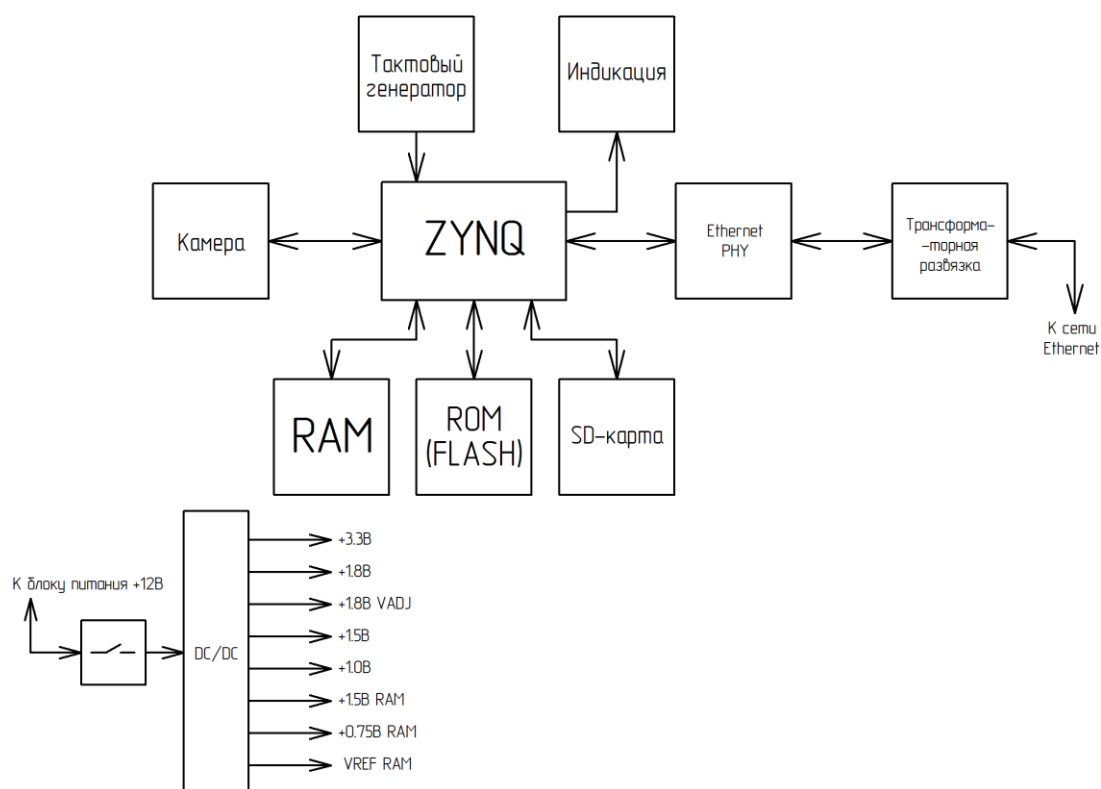


Рисунок 3. Структурная схема устройства

Питание на устройство подается через разъем X3 через включенный последовательно выключатель S1 и преобразователи напряжения D1-D3, D6.

Так как напряжение питания устройства составляет 12В, а напряжения питания SoC, оперативной памяти и других блоков устройства ниже, и требуются напряжения питания разных номиналов, требуются какие-то устройства, предоставляющие эти напряжения.

Всего преобразователей представлено 4 экземпляра. Первые 3, D1...D3, отвечают за питание основной части устройства. На выходе D1 напряжения в 3.3В и 1.8В, D2 – +1.8В (линия VADJ) и +1.0В, и на D3 – +1.5В и +1.0В (совместно с D2).

D6 же является т.н. «Регулятором конечной нагрузки DDR» (DDR termination regulator) – регулятором мощности по линиям передачи оперативной памяти. Он уменьшает энергопотребление оперативной памяти,

выделяя на ее работу столько мощности, сколько нужно в конкретный момент времени.

Важными составляющими устройства являются память программ (ROM) и оперативная память (RAM). Они представлены микросхемами D9 и D7 соответственно. В нашем случае уместно было взять память программ 16 Мб (так как память программ использоваться не будет, а будет использоваться SD-карта, можно поставить практически любое количество памяти программ) и оперативную память на 4Гб (рекомендуемые системные требования ОС Linux Ubuntu Desktop). Частота оперативной памяти составляет 2133 МГц (чем больше, тем лучше).

Для хранения операционной системы используется внешняя SD-карта, которая устанавливается в разъем X1.

Тактовый генератор BQ1 на 50 МГц служит для генерации тактовых импульсов для Zynq.

Камера подключается по разъему X3, по нему подается питание +12В, а также передаются как данные об изображении (выводы 1-10 разъема), так и управляющие команды по проприетарному RS232-подобному протоколу (выводы 12,13).

Индикация представляет из себя оранжевый светодиод HL1, который загорается при включении устройства, и зеленый светодиод HL2, подключенный ко входу BOOT, который загорается уже при успешной инициализации Zynq-кристалла.

Микросхема Ethernet PHY D4 работает в качестве интерфейса для коммутации ПЛИС с Ethernet-сетью по разъему RJ-45 X4. Она выполняет

физическую реализацию протокола Ethernet, тогда как за непосредственно программную реализацию отвечает чип Zynq.

Микросхема D5 выполняет сброс D4 при включении питания.

Трансформаторная развязка разъема RJ-45 в виде трансформатора T1 нужна для изоляции канала Ethernet от каких-либо внутренних сигналов, и наоборот.

Передача данных, управление устройством и его отладка осуществляются по сети Ethernet через разъем X4.

## **5. Выбор элементной базы**

Произведем выбор конкретных электронных компонентов, которые будут использованы в разрабатываемом устройстве.

Для повышения технологичности и предельной миниатюризации требуется при его разработке устремить использование компонентов поверхностного монтажа, Surface Mounted Devices, или SMD, к 100%.

Все резисторы и конденсаторы используем стандартных SMD типоразмеров, таких как «0201», «0402», «0603», «0805» и «1206». Типоразмер определяет предельную емкость конденсатора, или же максимальную рассеиваемую мощность резистора.

Исключение составляет конденсатор C45, который стоит в цепи питания +1.0В, являющийся электролитическим SMD с танталовым электролитом. В данной цепи необходим конденсатор повышенной емкости – 100мкФ, что невозможно обеспечить при использовании керамического диэлектрика и установленных типоразмеров.

У всех остальных конденсаторов тип диэлектрика – керамический, X7R.

Тип резистивного слоя SMD резисторов не играет роли, с условием того, что разброс сопротивлений должен составлять не более 5%.

Катушки индуктивности подобрали такие, чтобы также обеспечить попадание в заданные SMD типоразмеры.

Разъем подключения камеры определяется её спецификацией.

Разъем питания устройства, а также выключатель, решили сделать с крепление на корпус, поэтому, забегая вперед, на печатной плате будут только контактные площадки для их соединения проводами (рисунок 4).

Также исключением из правил решили сделать разъем X4, розетку RJ45. Её необходимо закрепить именно монтажом в отверстия, потому что с разъемом Ethernet при эксплуатации камеры будет совершаться наибольшее количество манипуляций.

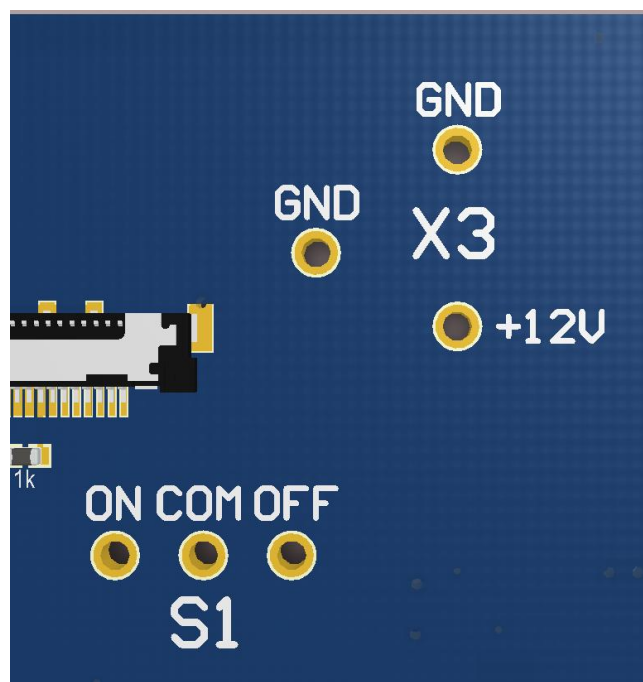


Рисунок 4. Посадочные места на печатной плате для разъема питания и выключателя

Соблюдая концепцию предельной миниатюризации, карту памяти решили использовать не полноразмерную SD, как на ZedBoard, а формата microSD, что отразилось на выборе разъема X1.

В качестве индикационных элементов решили использовать SMD-светодиоды типоразмера 0603: как уже было сказано, оранжевый для индикации подачи питания, и зеленый для индикации успешной инициализации устройства.

Также стоит отметить использование в качестве элемента стабилизации частоты тактового сигнала процессора именно кварцевого генератора, а не резонатора. Такое решение позволяет уменьшить общее количество элементов в схеме, при этом повысив точность частоты тактового сигнала.

Трансформатор развязки и приемо-передатчик Ethernet выбрали, исходя из реализуемого протокола 10/100 BASE-TX.

Обоснование выбора остальных элементов приведено в предыдущих разделах.

## **6. Выбор и разработка печатной платы**

Для разрабатываемого устройства оптимальным количеством слоев печатной платы при сохранении концепта миниатюризации будет 10 слоев, не считая слою паяльной маски и надписей.

Из них, 4 – экранирующие, 2 – силовые, 2 – внутренние сигнальные (высокочастотные, так внутри платы на них не влияют внешние помехи), 2 – внешние сигнальные, верхний и нижний.

Раскладка слоев, если смотреть на плату сверху вниз:

1. Сигнальный слой 1, верхний
2. Экранирующий полигон общей массы 1
3. Силовой слой 1, шины +12В +1,8В и +1,5В
4. Экранирующий полигон общей массы 2
5. Сигнальный слой 2, средний 1
6. Сигнальный слой 3, средний 2
7. Экранирующий полигон общей массы 3
8. Силовой слой 2, шины +1,5В, +3,3В, +1,0В
9. Экранирующий полигон общей массы 4
10. Сигнальный слой 4, нижний, включает шину +1,8В VADJ и шины питания RAM.

Следует отметить, что при соединении разъема камеры (рис.5) и микросхемы RAM (рис.6) с Zynq критична длина проводников – сигналы, идущие от RAM, могут превышать 1 ГГц (тактовая частота оперативной памяти – 2,133 ГГц), а частота тактового сигнала камеры при передаче видеопотока в формате 1080p60 при используемом интерфейсе подключения составляет 148.5 МГц.

В качестве материалов печатной платы были выбраны двусторонний фольгированный стеклотекстолит марки IS 420 и толщиной 0,2мм с фольгой 18мкм на обеих сторонах и стеклоткань толщиной 0,073 мм, тоже марки IS 420.

С учетом толщины всех материалов, толщина печатной платы, с учетом, что слои паяльной маски будут 10 мкм, будет чуть меньше 1,5мм (рис. 7).

Рисунки каждого слоя печатной платы устройства (снимки экрана из ПО Altium Designer) приведены в Приложении А.

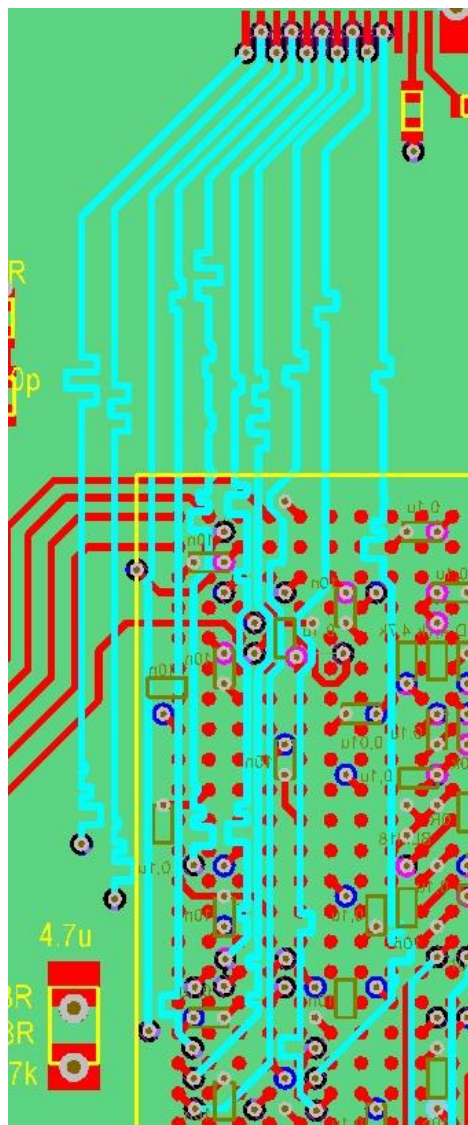


Рисунок 5. Часть соединения разъема камеры с Zynq

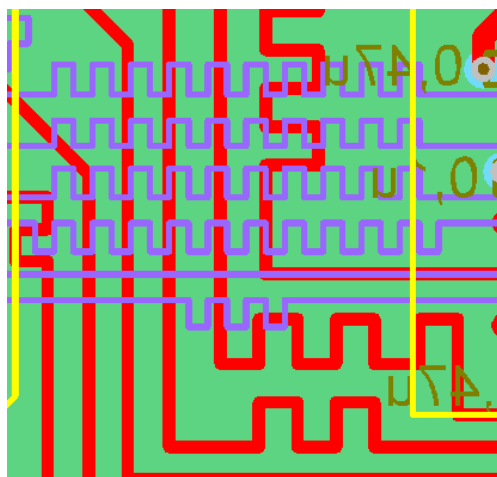


Рисунок 6. Часть соединения RAM с Zynq



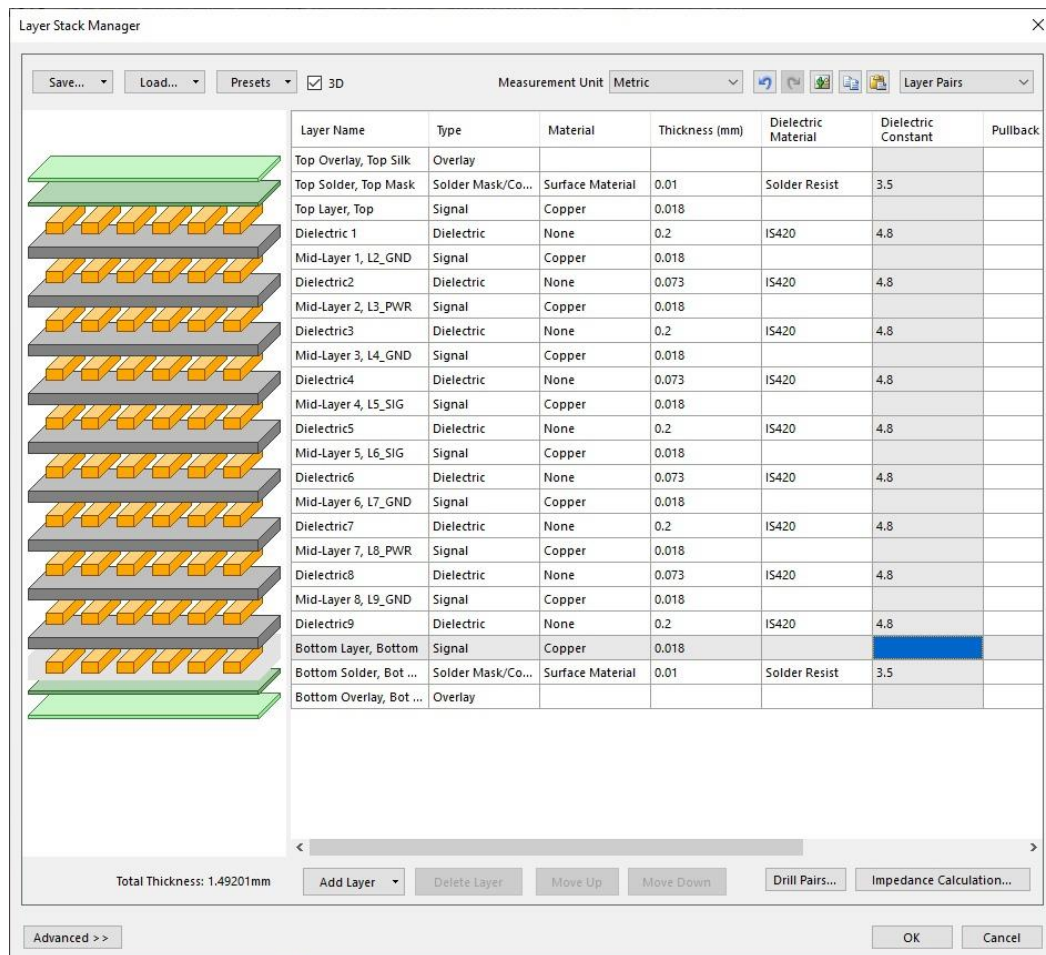


Рисунок 7. Расчет толщины печатной платы в ПО Altium Designer, инструмент «Layer stack manager»

Форму печатной платы решили сделать прямоугольной, а не круглой, как у большинства камер видеонаблюдения, из-за её большей технологичности.

Однако, крепежных отверстий решили сделать не 4, по углам, а 3, так как в одном из углов на нижней стороне печатной платы после монтажа элементов будет располагаться разъем microSD-карты. Соответственно, третье крепежное отверстие сместили ближе к центру.

Рядом с каждым крепежным отверстием есть небольшое количество свободного места, чтобы при операциях, требующих перемещение печатного

узла в пространстве, был меньший риск его выхода из строя от воздействия статического электричества.

Наиболее подходящая под наши цели технология изготовления печатной платы – с металлизацией сквозных отверстий.

## 7. Разработка печатного узла

Что касается непосредственно печатного узла, то, как и было сказано ранее в разделе 5, большая часть монтажа – поверхностный монтаж, с исключением в виде разъемов X3, X4 и переключателя S1.

Используемая для поверхностного монтажа припойная паста – NC-SMQ92H, содержащая 62% олова, 36% свинца и 2% серебра.

Следует отметить, что при установке элемента X4, часть его на 3мм выходит за пределы печатной платы.

Забегая вперед, следует сказать, что толщина стенки выбранного корпуса устройства – 3мм. И такой выступ разъема необходим, чтобы его стенка была на одном уровне с внешней гранью устройства (рисунок 8).

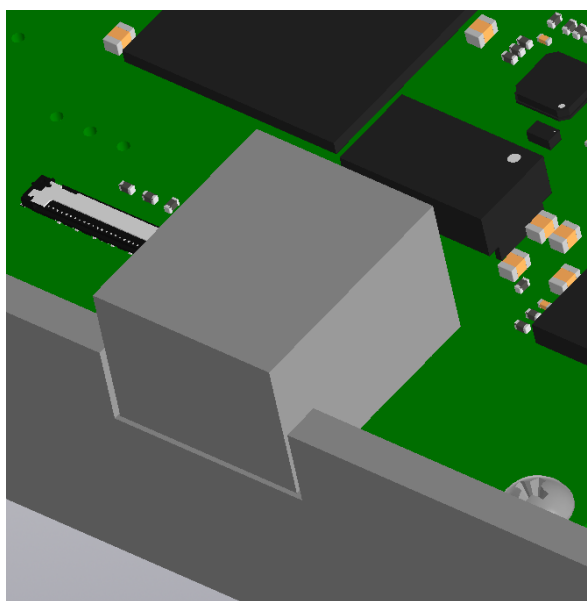


Рисунок 8. Расположение разъема Ethernet относительно стенки корпуса

Также следует выделить расположение элементов индикации – на нижней стороне печатного узла. Индикация включения – примерно под трансформатором развязки Ethernet, индикация инициализации – непосредственно под чипом Zynq.

## **8. Разработка корпуса РЭС**

Для данной камеры мы решили изготовить наш собственный, проприетарный, корпус, чтобы уменьшить количество свободного места в нем к минимуму.

Так как данное устройство все-таки является прототипом, самым подходящим методом изготовления корпуса является фрезерование из листа алюминия марки Д16, так как на данный момент существуют такие станки с ЧПУ, которые могут изготовить требуемую деталь практически любой формы с минимальными затратами на работу с материалом, по сравнению с какими-либо ручными методами.

Рисунки общей сборки устройства, визуализированной в ПО КОМПАС-3D, приведены в приложении Б.

Как уже было ранее сказано, толщину стенок корпуса мы решили выполнить толщиной 3мм. Этого достаточно для жесткости корпуса при выполнении его из алюминия.

Для крепления печатной платы используются шестигранные латунные стойки высотой 10мм и сквозной резьбой М3, которые по своей сути представляют собой высокие гайки с толстой стенкой. Таким образом, они закрепляются винтами М3 к основанию корпуса, и сверху, тоже винтами М3,

на них закрепляется печатный узел. Использование стоек позволяет избежать нежелательного короткого замыкания без использования диэлектрической прокладки между печатным узлом и корпусом.

Камера Tamron крепится на нижнюю её часть, где на ней располагаются 4 отверстия с резьбой M2 глубиной до 2,5мм. Крепление производится винтами M2.

На нижней стороне корпуса располагаются 3 сквозных отверстия с нарезанной резьбой M3 для крепления на какое-то основание. Например, на скобу, крепящуюся тем или иным образом к фонарному столбу.

В передней стенке корпуса располагается отверстие для объектива камеры. Как именно производится сборка, мы поговорим чуть позже.

Разъем питания +12В, также, как и выключатель, располагаются на задней стенке. Выключатель крепится двумя винтами M3 в нарезанную на корпусе резьбу, а разъем питания вставляется в круглое отверстие на корпусе, и закрепляется входящей в комплект гайкой.

Что касается сборки устройства. Корпус изготавливается из двух частей: верхней и нижней, или крышки и основания (в чертеже на основание оно называется «корпус», так как на него крепятся все основные элементы).

Выключатель и разъем питания крепятся именно на крышку.

Правая, передняя, часть задней и левая стенки корпуса выполняются именно на крышке, так как если у основания будут высокие стенки, это сильно затруднит закрепление элементов на нем. Крышка крепится винтами на корпус в отверстия с резьбой на передней, правой и левой частях

Следует отметить, что вырез под Ethernet-разъем, выступающий с печатной платы, по высоте наполовину выполняется на крышке, и наполовину на основании. Это необходимо для того, чтобы «надеть» крышку на объектив камеры.

Также на крышке над переключателем должны присутствовать надписи «ON» и «OFF», для понимания, какой стороной вставлять переключатель

Таким образом, последовательность действий при сборке устройства будет следующей:

1. Обрезать провод МГТФ 0.2 – 6 проводов, по 10см каждый, по проводу на каждый контакт (см. ИГТУ.466216.002 Э4)
2. Паять провода МГТФ 0.2 к переключателю и к разъему питания
3. Паять провода от переключателя и разъема питания к печатному узлу, предварительно продев их в соответствующие отверстия в крышке
4. Закрепить винтами камеру к основанию
5. Закрепить винтами стойки к основанию, и закрепить печатный узел на стойках
6. Соединить камеру с печатным узлом шлейфом
7. Закрепить разъем питания на крышке
8. Написать краской на крышке «ON» и «OFF»
9. Закрепить винтами выключатель на крышке
10. Установить крышку, совместив отверстия с отверстиями основания
11. Закрепить винтами крышку к основанию

Так как разработка устройства на этом закончена, следующим логичным этапом будет проведение расчетов надежности и технологичности, которые должны определить ориентировочный срок службы изделия и готовность его к серийному производству.

## 9. Расчет надежности

Полный расчет надежности подразумевает собой оценку вероятности отказа изделия в зависимости от условий работы каждого его элемента.

Будем проводить расчет надежности по упрощенной схеме, рассчитав показатели надежности только печатного узла устройства. Камера и элементы конструкции учитываться не будут.

Будем считать, что при выходе из строя одного элемента выйдет из строя всё сразу, то есть используем последовательную модель надежности.

Тогда формулы для расчета необходимых показателей:  
Средняя интенсивность отказов  $\Lambda$  определяется по формуле 1.

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n k_p \lambda_{0i} k_{э1}, \quad (1)$$

где

$k_p$  – коэффициент режима, зависит от коэффициента нагрузки  $k_n$  и температуры окружающей среды, и определяется по таблице [7].

$\lambda_{0i}$  – интенсивность отказов изделия при испытании в режиме нормальной нагрузки и нормальной температуре, определяется по таблице

$k_{э1}$  – эксплуатационный коэффициент при наличии  $k_p$ , определяется по таблице

$n$  – количество элементов в изделии.

Средняя наработка до отказа  $T$  (или, если упрощенно, среднее время работы устройства) выражается через среднюю интенсивность отказов, и определяется по формуле 2.

$$T = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\sum k_p \lambda_{0_i} k_{э1}} \quad (2)$$

Также, для наглядности можно найти зависимость вероятности безотказной работы изделия от времени  $P(t)$  и построить её график.

Эта зависимость находится по формуле 3.

$$P(t) = e^{-\Lambda t} = \exp \left( - \left\{ \sum_{i=1}^n k_p \lambda_{0_i} k_{э1} \right\} t \right) \quad (3)$$

Формулы расчета коэффициентов нагрузки  $k_n$  также определяются по таблице [7].

Для дальнейших расчетов нам понадобится описать условия работы всех элементов печатного узла (238, не считая разъемов Х1-Х4 и переключателя S1).

## 1. Конденсаторы

Коэффициент нагрузки конденсаторов определяется отношением их рабочего напряжения к максимально допустимому.

Для упрощения расчетов будем считать, что ко всем конденсаторам прикладываются максимально возможные в устройстве напряжения – +12В и +3,3В.

1.1. К конденсаторам С6-С11 прикладывается напряжение +12В. Их максимальное рабочее напряжение –  $\pm 50В$ .  $k_n = \frac{12}{50} = 0,24$

1.2. Ко всем остальным конденсаторам прикладываются напряжения от +0,75В до +3,3В. Как и было сказано ранее, для упрощения расчетов будем считать, что к ним ко всем прикладывается максимальное напряжение в +3,3В.

1.2.1. Максимальное рабочее напряжение конденсаторов C2, C3, C13-

$$C15, C36, C69 - \pm 10\text{В}. k_n = \frac{3,3}{10} = 0,33$$

1.2.2. Максимальное рабочее напряжение конденсатора C45 – +20В.

$$k_n = \frac{3,3}{20} = 0,165$$

1.2.3. Максимальное рабочее напряжение конденсаторов C1, C4, C5, C12, C16-C35, C37-C44, C46-C68, C70-C130 –  $\pm 50\text{В}$ .

$$k_n = \frac{3,3}{50} = 0,066$$

## 2. Резисторы

Коэффициент нагрузки резисторов определяется отношением их рабочей рассеиваемой мощности к максимально допустимой.

По аналогии с конденсаторами, будем считать, что к резисторам также прикладываются напряжения только +12В и +3,3В. Расчет мощности будем вести по постоянному току.

2.1. На резистор R5 подается напряжение +12В, его номинал – 10 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность, рассеиваемая данным резистором –  $\frac{12^2}{10000} = 0,0144$  Вт.

$$k_n = \frac{0,0144}{0,063} = 0,23$$

2.2. На практически все остальные резисторы, за исключением некоторых, будем считать, подается напряжение +3,3В.

2.2.1. Номинал резисторов R1, R2 – 470 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{470} = 0,023$  Вт.

$$k_n = \frac{0,023}{0,063} = 0,36$$



2.2.2. Номинал резистора R3 – 1 кОм, максимальная рассеиваемая

мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{1000} = 0,011$  Вт

$$k_H = \frac{0,011}{0,063} = 0,17$$

2.2.3. Номинал резистора R4 – 220 Ом, максимальная рассеиваемая

мощность – 0,125 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{220} = 0,05$  Вт.

$$k_H = \frac{0,05}{0,125} = 0,4$$

2.2.4. Номинал резисторов R8, R9, R32, R33, R77, R82-R85, R88-R90 –

10 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная

мощность –  $\frac{3,3^2}{10000} = 0,001$  Вт

$$k_H = \frac{0,001}{0,063} = 0,016$$

2.2.5. Номинал резисторов R6, R7, R20, R53-R55, R72, R79-R81 – 4,7

кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная

мощность –  $\frac{3,3^2}{4700} = 0,002$  Вт

$$k_H = \frac{0,002}{0,063} = 0,03$$

2.2.6. Номинал резисторов R58-R62 – 4,7 кОм, максимальная

рассеиваемая мощность – 0,05 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{4700} =$

0,002 Вт

$$k_H = \frac{0,002}{0,05} = 0,04$$

2.2.7. Номинал резисторов R10-R15, R75, R76 – 33 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность зависит от использования микросхем, к которым они подключены.

Так как расчет упрощенный, возьмем в данном случае  $k_{\text{н}} = 1$  (реальная мощность равна максимально возможной).

2.2.8. Номинал резистора R16 – 6.49 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{6490} = 0,002$  Вт

$$k_{\text{н}} = \frac{0,002}{0,063} = 0,03$$

2.2.9. Номинал резисторов R17, R28 – 12 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{12000} = 0,001$  Вт

$$k_{\text{н}} = \frac{0,001}{0,063} = 0,016$$

2.2.10. Номинал резисторов R18, R19, R22 – 3.16 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{3160} = 0,003$  Вт

$$k_{\text{н}} = \frac{0,003}{0,063} = 0,045$$

2.2.11. Номинал резистора R21 – 27 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{27000} = 0,0004$  Вт

$$k_{\text{н}} = \frac{0,0004}{0,063} = 0,006$$

2.2.12. Номинал резисторов R23, R30, R31, R34 – 51 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Так как они являются т.н. «подтягивающими», соединенными с общим выводом (через конденсатор), не будем включать их в расчет, так как они в процессе работы практически не проводят ток.

2.2.13. Номинал резистора R24 – 2.2 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{2200} = 0,005$  Вт

$$k_H = \frac{0,005}{0,063} = 0,08$$

2.2.14. Номинал резисторов R25, R26, R29, R35 – 1.5 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{1500} = 0,007$  Вт

$$k_H = \frac{0,007}{0,063} = 0,115$$

2.2.15. Номинал резистора R27 – 7.5 кОм, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность –  $\frac{3,3^2}{7500} = 0,0014$  Вт

$$k_H = \frac{0,0014}{0,063} = 0,02$$

2.2.16. Номинал резисторов R36-R50, R63-R70 – 50 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,05 Вт.

Из-за низкого значения сопротивления, во избежание грубых ошибок стоит взять реальное прикладываемое к ним напряжение – +0,75В.

$$\text{Реальная мощность} - \frac{0,75^2}{50} = 0,011$$

$$k_H = \frac{0,011}{0,05} = 0,225$$

2.2.17. Номинал резисторов R51, R73 – 50 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность – R51 в расчете не учитывается, т.к. зависит от использования микросхемы D8, R73 – исходя из подаваемого напряжения 0,75В –  $\frac{0,75^2}{50} = 0,011$

$$k_H = \frac{0,011}{0,063} = 0,17$$

2.2.18. Номинал резистора R52 – 10 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность – в расчете не учитывается, т.к. данный элемент является частью ФНЧ, необходимого для функционирования трансформатора Ethernet развязки T1.

2.2.19. Номинал резисторов R56, R57, R78, R86 – 75 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Они также не учитываются в расчете, т.к., аналогично с п. 2.2.18, являются частью фильтра (ФВЧ) для T1.

2.2.20. Номинал резистора R71 – 100 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Напряжение, подаваемое на R71 – +0.75В. Реальная мощность –  $\frac{0,75^2}{100} = 0,006$  Вт

$$k_H = \frac{0,006}{0,063} = 0,09$$

2.2.21. Номинал резистора R74 – 240 Ом, максимальная рассеиваемая мощность – 0,063 Вт. Реальная мощность – аналогично с предыдущим пунктом, –  $\frac{0,75^2}{240} = 0,002$  Вт

$$k_H = \frac{0,002}{0,063} = 0,032$$

2.2.22. Номинал резисторов R87, R91 – 0 Ом. Так как они по своей сути являются перемычками, мы не будем включать их в расчет.

### 3. Микросхемы

Коэффициент нагрузки цифровых микросхем определяется их коэффициентом разветвления по выходу (англ. «splitting ratio») – количеству выводов элементов нагрузки, которые можно подключить к выходу микросхемы без искажения передаваемой информации. [8]

В случае с TTL логикой, коэффициент нагрузки определяется по формуле 4.

$$k_n = 1 + \frac{N_p}{N_{p_{max}}}, \quad (4)$$

где  $N_p$  – реальный коэффициент разветвления по выходу (максимальное подключенное к одному выводу количество элементов),

$N_{p_{max}}$  – максимально допустимый коэффициент разветвления по выходу.

Для силовых микросхем (к примеру, стабилизаторов напряжения) немного упростим расчет: будем считать их коэффициенты нагрузки подобно биполярным транзисторам.

В таком случае,  $k_n$  будет определяться отношением реальной рассеиваемой мощности микросхемы к максимально допустимой.

#### 3.1. Микросхемы D1-D3, D6 – стабилизаторы напряжения.

3.1.1. Максимально допустимый выходной ток микросхем D1-D3 – по 2,5А на один канал (в пике 3А). Максимально допустимый входной ток – 0,35А на каждую микросхему. Основные источники потребления – ПЛИС D10, максимальный ток потребления, Ethernet

PHY D4, стабилизатор напряжения ОЗУ D6 и интерфейс SD-карты D8.

Опытным путем было установлено, что отладочная плата ZedBoard при исполнении приложения распознавания образов при помощи нейросети YOLOv3 (см. раздел 11) потребляет ток 0,43А по линии питания +12В.

Таким образом, общий входной ток разрабатываемого устройства также должен составлять примерно 0,43А. Соответственно, на каждом преобразователе входной ток ориентировочно будет составлять  $0,43/3=0,143\text{А}$ .

Соответственно,  $k_n = \frac{0,143\text{ А}}{0,35\text{ А}} \approx 0,41$  для микросхем D1-D3.

3.1.2. Микросхема D6 является подсистемой питания для чипа RAM.

Согласно её листу данных (datasheet), её максимальный выходной ток лежит в пределах от 3,5 до 5,5 А. Возьмем среднее значение – 4,5А.

Ток потребления чипа RAM D7 зависит от его использования. Согласно листу данных, ток при однократном чтении RAM частотой 2133 МГц составляет порядка 300мА.

Таким образом,  $k_n$  нужно определять экспериментально. Но ориентировочно,

$$k_n = \frac{0,3\text{А}}{4,5\text{А}} \approx 0.067$$

3.2. Микросхемы D4, D5, D7-D10 – цифровые. Ни у одной из этих микросхем коэффициент разветвления по выходу не указан. На основе этого считаем, что для них  $N_p = N_{p_{max}}$ , и  $k_n = 1 + 1 = 2$ .

#### 4. Остальные элементы

##### 4.1. Светодиоды.

Коэффициент нагрузки светодиодов будем рассчитывать по аналогии с полупроводниковыми диодами:  $k_n$  определяется как среднее значение прямого тока к максимально допустимому.

4.1.1. Средний рабочий ток HL1 определяется резистором R4: номинал резистора 220 Ом, напряжение питания +3,3В. Таким образом, рабочий ток равен  $\frac{3,3}{220} = 0,015$  А.

Максимальный ток данного типа светодиодов равен 30мА. Соответственно,

$$k_n = \frac{0,015}{0,030} = 0,5$$

4.1.2. Ограничительный резистор для светодиода HL2 не требуется, поэтому для него  $k_n = \frac{0,030}{0,030} = 1$ .

#### 4.2. Трансформатор Т1

Коэффициент нагрузки трансформаторов и дросселей определяется как отношение реальной максимальной температуры в одной из их обмоток к максимально допустимой.

Так как мы не знаем заранее тепловыделение трансформатора Т1, будем считать, что он работает на пределе, и его  $k_n = 1$ .

4.3. Индуктивности L1-L3. В данном случае расчет ведется аналогично с трансформатором:  $k_n = 1$ .

Сводные таблицы расчета интенсивности отказов приведены в Приложении В, таблице В.1. Группа аппаратуры, согласно ГОСТ15150-69, выбрана 1, для эксплуатации под открытым небом.

$$\text{Таким образом, } \Lambda = 11,066207 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

Средняя наработка до отказа  $T = \frac{1}{\Lambda} \approx 90365,2$  часов, или около 10 лет и 4 месяцев.

График зависимости вероятности безотказной работы от времени приведен на рисунке 9.

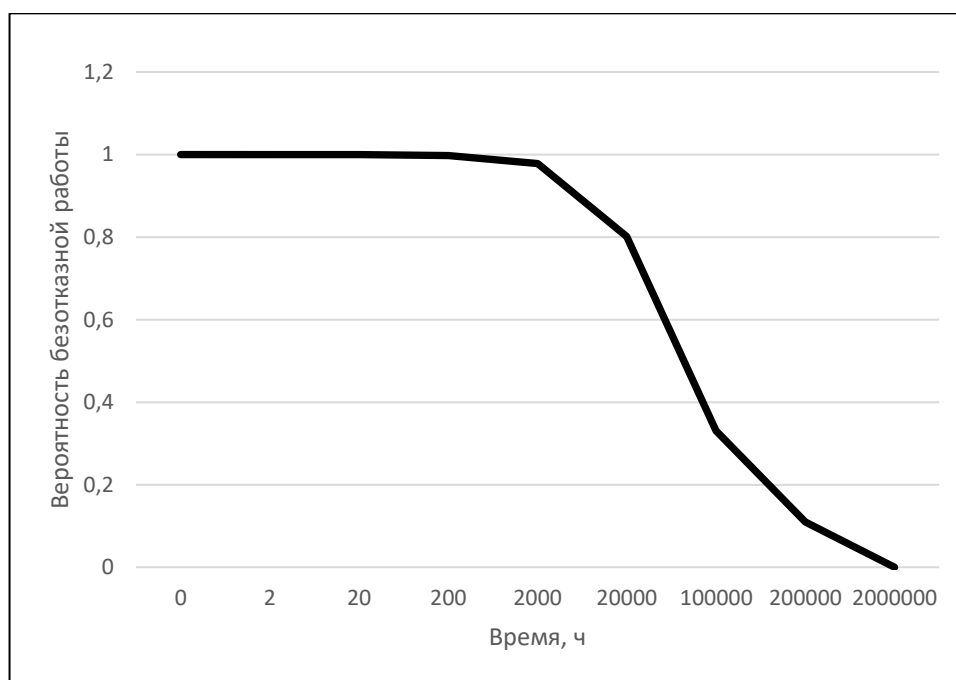


Рисунок 9. Зависимость вероятности безотказной работы устройства от времени

## 10. Анализ технологичности

Как и было сказано ранее, анализ технологичности определяет готовность изделия к серийному производству.

Анализ технологичности изделия проводится в соответствии с ГОСТ 14.201–83[9] и ОСТ 4.ГО.091.219[10]. Его можно разделить на два вида: качественный и количественный.

Качественный анализ представляет из себя сравнение изделия с подобными, производя анализ наиболее удачных конструктивно-технологических решений.



Количественный анализ представляет из себя расчет определенных показателей, на основе которых можно сделать заключение, к какому виду серийного производства готово разрабатываемое устройство.

### **10.1. Качественная оценка технологичности**

Для проведения качественного анализа технологичности печатного узла требуется дать ответы на следующие вопросы:

1. Имеет ли печатная плата устройства прямоугольную форму?
2. Соответствует ли печатная плата ГОСТ10317-79:
  - Кратны ли размеры платы:  
2,5мм – при длине до 100 мм  
5 мм – при длине до 350 мм  
10 мм – при длине более 350 мм?
  - Не превышает ли соотношение сторон печатной платы 3:1?
  - Не превышает ли максимальный размер любой из сторон печатной платы 470 мм?
3. Имеется ли возможность использовать групповые методы сборки? (монтажа нескольких печатных узлов одновременно)
4. Имеется ли возможность применения групповых методов пайки?
5. Соблюдена ли идентичность установочных размеров однотипных элементов?
6. Параллельны ли радиокомпоненты краям платы и друг другу?
7. Применяется ли паяльная маска?
8. Используется ли финишное защитное покрытие печатного узла?

В нашем случае, ответы будут следующими:

1. Да, плата прямоугольна

2. Размеры платы составляют 78,5мм в длину и 63мм в ширину. В данном плане, устройство соответствует ГОСТ.

3. Так как монтаж преимущественно SMD компонентов, то да, возможность имеется.

4. Аналогично с 3 пунктом

5. Да, т.к. выводы всех элементов или находятся непосредственно на их корпусе, или заранее отформованы.

6. Да, все элементы параллельны краям платы

7. Паяльная маска применяется

8. Финишное покрытие печатного узла, согласно ИГТУ.466216.001, лак УР-231.

Таким образом, в ходе проведения качественного анализа технологичности, предварительно можно сказать, что изделие отвечает необходимым для его производства параметрам.

Для формирования окончательного вывода необходимо произвести количественный анализ технологичности.

## **10.2. Количественная оценка технологичности**

В ходе количественного анализа технологичности необходимо рассчитать базовые и комплексный показатели технологичности.

Базовые показатели технологичности:

1. Коэффициент использования интегральных микросхем и микросборок

$$K_{\text{ИСИМС}} = \frac{N_{\text{ИСМС}}}{(N_{\text{ИСМС}} + N_{\text{ЭРЭ}})}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{ИСМС}}$  – количество микросхем и микросборок

$N_{\text{ЭРЭ}}$  – общее количество элементов

2. Коэффициент механизации и автоматизации

$$K_{A.M} = \frac{N_{A.M}}{N_M}, \quad (6)$$

где  $N_{A.M}$  – число автоматизированных монтажных соединений элементов

$N_M$  – общее число монтажных соединений элементов

3. Коэффициент механизации и автоматизации по подготовке элементов к монтажу

$$K_{M.П} = \frac{N_{M.П}}{N_{ЭРЭ}}, \quad (7)$$

где  $N_{M.П}$  – число элементов с автоматизированной подготовкой к монтажу (например, автоматизированной формовкой выводов)

$N_{ЭРЭ}$  – общее число элементов

4. Коэффициент механизации контроля и настройки параметров блока

$$K_{МКН} = \frac{N_{МКН}}{N_{КН}}, \quad (8)$$

где  $N_{МКН}$  – количество автоматизированных операций настройки блока

$N_{КН}$  – общее количество операций настройки

5. Коэффициент повторяемости элементов

$$K_{ПОВ} = 1 - \frac{N_{ТЭРЭ}}{N_{ЭРЭ}}, \quad (9)$$

где  $N_{ТЭРЭ}$  – общее количество типоразмеров элементов

$N_{ЭРЭ}$  – общее количество элементов

6. Коэффициент применяемости элементов

$$K_{ПЭРЭ} = 1 - \frac{N_{ТОРЭРЭ}}{N_{ТЭРЭ}}, \quad (10)$$

где  $N_{ТОРЭРЭ}$  – общее количество оригинальных элементов в блоке (например, нестандартных трансформаторов)

7. Коэффициент прогрессивности формообразования деталей

$$K_{\Phi} = \frac{D_{\text{ПР}}}{D}, \quad (11)$$

где  $D_{\text{ПР}}$  – число деталей, изготовленных прогрессивными методами формообразования

$D$  – общее число деталей в блоке

На основе базовых показателей технологичности считается комплексный показатель

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i}, \quad (12)$$

где  $K_i$  –  $i$ -й базовый показатель технологичности

$n$  – общее число показателей технологичности

$\varphi_i$  – весовой коэффициент.

Весовой коэффициент определяется порядковым номером базового показателя технологичности, который (номер), в свою очередь, определяется ранжированием показателей в порядке убывания важности. Важность показателя определяется экспериментальным путем.

$$\varphi_i = \frac{i}{2^{i-1}} \quad (13)$$

В нашем случае:

(такие показатели, как количество монтажных соединений, количество элементов и прочее, были получены из ПО Altium Designer)

$$K_{\text{ИСИМС}} = \frac{10}{(10 + 233)} \approx 0,041$$

$$K_{\text{А.М}} = \frac{1262}{1280} \approx 0,986$$

$$K_{\text{М.П}} = \frac{241}{243} \approx 0,992$$

Единственная операция настройки или контроля – загрузка данных на SD-карту

$$K_{\text{МКН}} = \frac{0}{1} = 0$$

$$K_{\text{ПОВ}} = 1 - \frac{19}{243} \approx 1 - 0,078 = 0,922$$

$$K_{\text{ПЭРЭ}} = 1 - \frac{0}{19} = 1$$

Единственная деталь в печатном узле – это печатная плата.

$$K_{\text{Ф}} = \frac{1}{1} = 1$$

Таким образом,

$$K_{\text{T}} = \frac{0,041 + 0,986 + 0,992 * 0,75 + 0 + 0,922 * 0,31 + 0,187 + 0,11}{1 + 1 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187 + 0,11} \approx 0,539$$

Сравним полученный показатель с таблицей 1.

Так как разрабатываемое устройство является электронным, то можно сделать вывод, что разработанное устройство подходит как для единичного, так и для мелкосерийного и установившегося серийного производства.

Таблица 1. Зависимость типа производства от показателя технологичности

Виды блоков	Нормативные диапазоны комплексного показателя технологичности для приведенных типов производств		
	Единичное производство	Мелкосерийное производство	Установившееся серийное производство
Электронные	0,30...0,60	0,40...0,70	0,50...0,75
Электромеханические	0,20...0,50	0,40...0,60	0,45...0,65
Механические	0,10...0,30	0,25...0,35	0,30...0,40
Радиотехнические	0,20...0,50	0,25...0,35	0,30...0,60
Соединительные, коммутационные, распределительные	0,20...0,630	0,25...0,65	0,30...0,70

## 11. Разработка ПО демонстрационной нейронной сети

Вторая часть данной работы – проверить, что на разработанной электронной платформе действительно можно реализовать устройство обработки входящего видеопотока при помощи искусственной нейронной сети (нейросети).

### 11.1. Исходные данные

ZedBoard (рис.10) – отладочная плата, позволяющая разрабатывать приложения для гибридной ПЛИС серии Zynq-7000 перед их реализацией на конкретном устройстве. Она имеет такую периферию, как HDMI-контроллер, JTAG-USB и UART-USB адаптеры, несколько переключателей, тактовых кнопок и светодиодов, разъемы для подключения к выводам ПЛИС, 512 Мбайт DDR3 RAM, 256 Мбайт ROM, OLED-матрицу разрешением 128x32 точек, разъем SD-карты и многое другое [6].

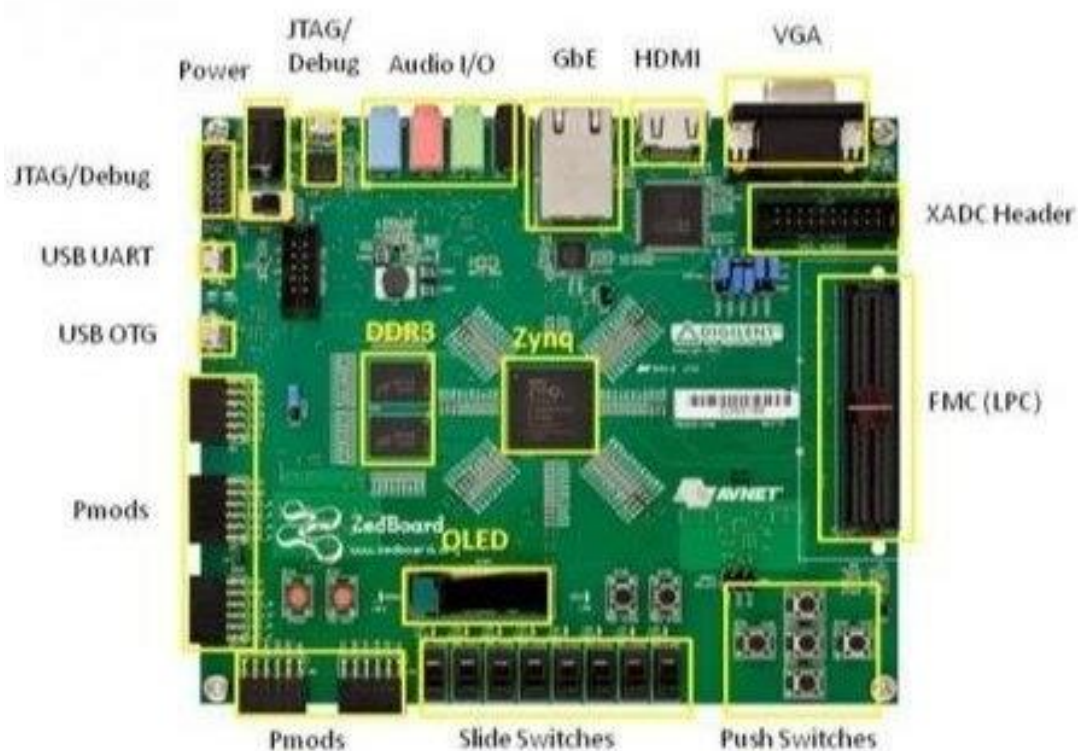


Рисунок 10. ZedBoard

Загрузка программы происходит, в зависимости от выбранной операционной системы (RTOS, низкоуровневой, или на основе ядра linux), или загрузкой необходимых файлов на внешнюю SD-карту, или через JTAG и USB-UART разъемы.

Petalinux – специализированная операционная система от Xilinx на основе ядра linux для ПЛИС серий Versal, Zynq Ultrascale+, Zynq-7000 и MicroBlaze, призванная ускорить разработку и продуктивность интегрированных приложений [11].

В Таллинском Техническом Университете уже были проведены испытания ZedBoard с искусственной нейронной сетью YOLOv3 [12]. В приведенной статье приводится доказательство концепции того, что на ZedBoard действительно можно реализовать данную нейросеть.

YOLO (v3, v4, TinyYOLO, и т.д.) – группа искусственных нейронных сетей, являющаяся одним из самых быстрых существующих алгоритмов обработки изображения [13].

Так как в статье приводится пошаговое руководство для реализации именно YOLOv3 на ZedBoard, возьмем данную нейронную сеть за основу нашей работы.

Также стоит упомянуть DNNDK – Deep Neural Network Development Kit, специализированное программное обеспечение, позволяющее ускорить реализацию нейронных сетей на ПЛИС Xilinx.

На данный момент Xilinx DNNDK переименован в программный пакет «Vitis AI», который, хоть и заявляет поддержку чипов Zynq-7000, на практике

не предоставляет необходимых заранее скомпилированных примеров приложений, тем самым требуя на порядок больше трудозатрат для его изучения, и, соответственно, реализации нейросети на ZedBoard на его основе.

Для создания структуры аппаратного ускорителя непосредственно на основе логических ячеек ПЛИС использовался программный пакет Vivado.

## 11.2. Ход работы

Полное описание рабочего процесса и использованного программного и аппаратного обеспечения приводится в статье [12]. Здесь мы затронем только основные моменты, касающиеся непосредственно темы нашей работы.

На рисунках 11 и 12 приведены схемы процесса реализации YOLO, выполняемые на персональном компьютере (ПК) и на непосредственно плате ZedBoard соответственно.

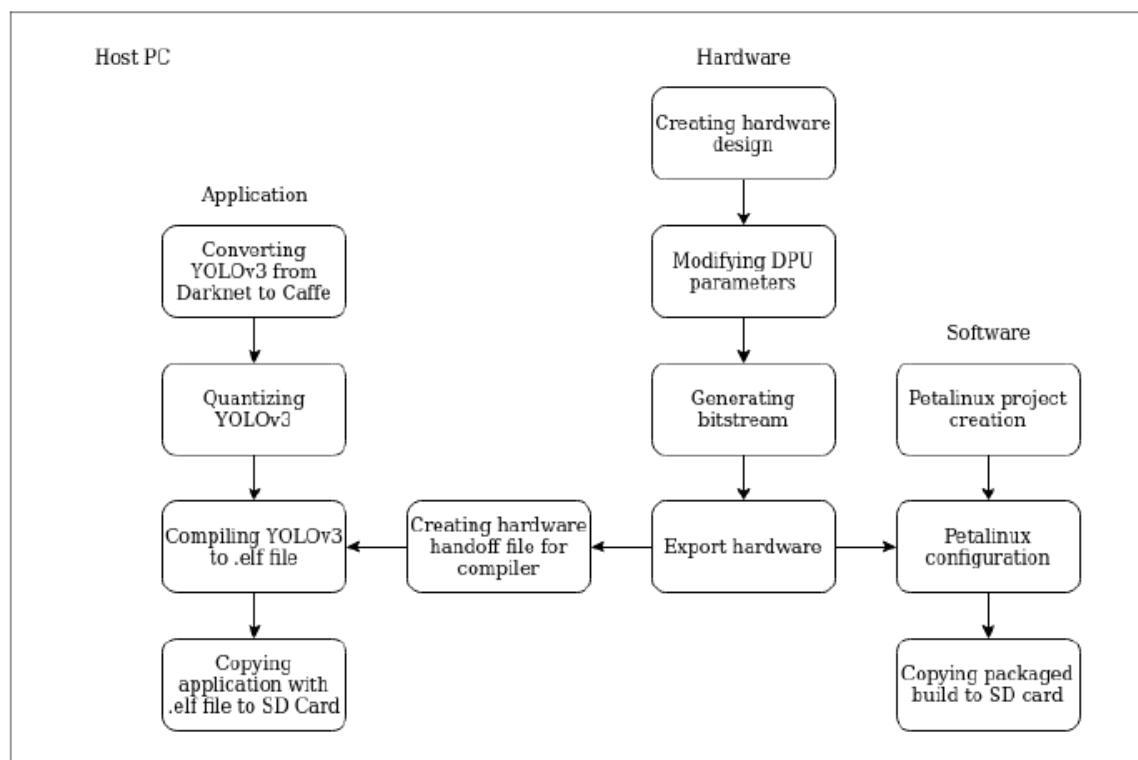


Рисунок 11. Ход работы на ПК



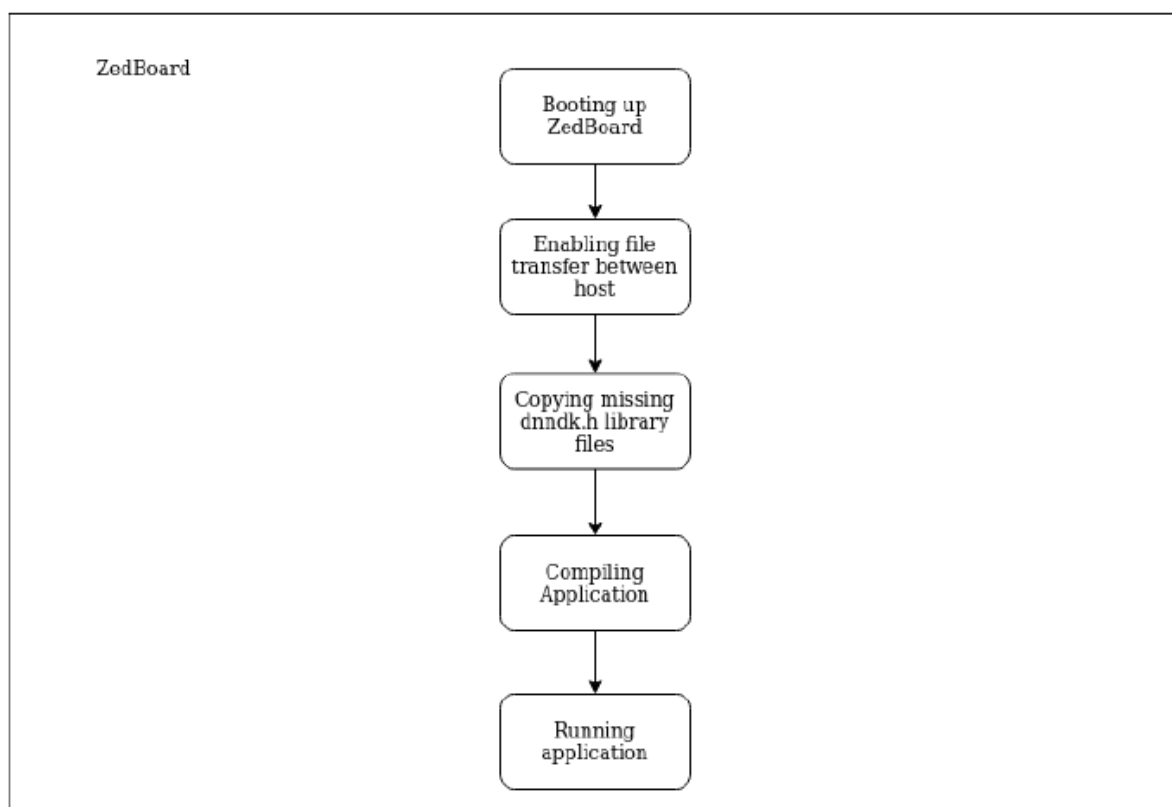


Рисунок 12. Ход работы на ZedBoard

Ход работы на ПК подразделяется на 3 взаимосвязанных категории: разработка аппаратной платформы в Vivado (ветка «Hardware»), подготовка операционной системы petalinux (ветка рис.11 «Software») и подготовка непосредственно программного обеспечения обработки изображения (ветка рис.11 «Application»).

На ZedBoard же нужно просто загрузить готовый образ системы petalinux, скомпилировать приложение работы с YOLO и запустить его.

### 11.2.1. Аппаратная платформа

Первое, что нужно сделать – это разработать аппаратную платформу в Vivado (рис.13).

Аппаратная платформа представляет из себя разработанный Xilinx блок обработки нейросетей (Xilinx Deep learning Processing Unit, или DPU),

соединенный определенным образом с остальными частями микросхемы, такими как ARM-микропроцессор и другое.

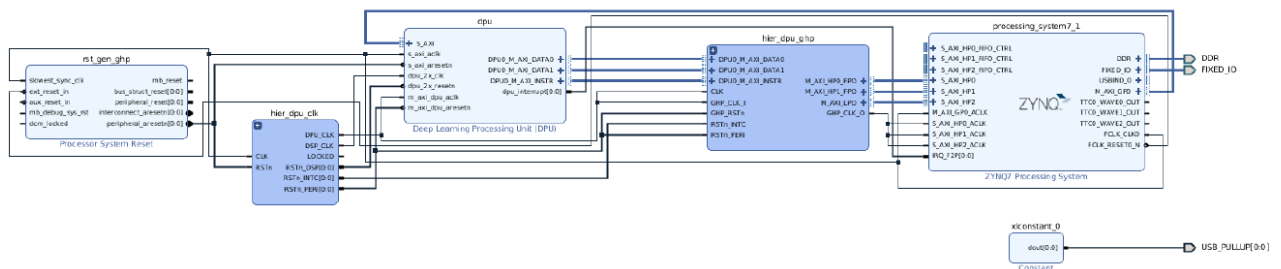


Рисунок 13. Раскладка аппаратной платформы в Vivado

Построение данной структуры выполняется при помощи специального скрипта, предоставленного Xilinx-разработчиками при описании реализации другой нейросети, Resnet50, на ZedBoard [12]. В нашем же случае нужно дополнительно расширить используемый DPU набор команд командой «LeakyReLU» (рисунок 14, графа ReLU Type), из-за особенностей нейросети YOLO.

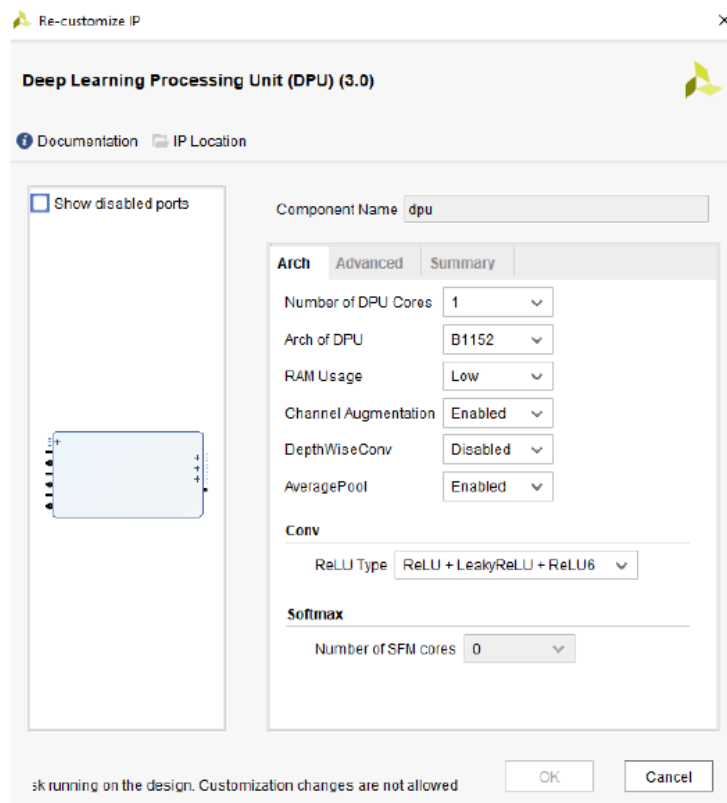


Рисунок 14. Изменение настроек DPU

После этого необходимо экспортировать данную конфигурацию в файл, предварительно ее скомпилировав.

На данном этапе разработка аппаратной платформы закончена.

### **11.2.2. Операционная система**

После того как сгенерирован файл, описывающий аппаратную платформу, можно или собрать операционную систему с нужными для работы программы дополнениями, или создать приложение для ZedBoard, развертывающее данную нейросеть на отладочной плате.

Подробное описание сборки операционной системы приведено в статье [12]. Нам же лишь необходимо знать, что «сырая» petalinux не содержит критичных для обработки изображений при помощи YOLOv3 библиотек – таких как OpenCV, компилятора gcc и пр. Поэтому, помимо настройки petalinux именно под ZedBoard (указания количества памяти, включения необходимых драйверов и т.д.), необходимо также указать включаемые в petalinux библиотеки.

После того как ОС собрана, её можно загрузить на SD-карту с предварительно размеченными двумя разделами – одним, содержащим информацию о загрузке платой ОС, и вторым, содержащим непосредственно корень файловой системы и все необходимые файлы.

О разметке файловой системы SD-карты также сказано в статье [12].

### **11.2.3. Приложение для реализации нейросети**

Следует отметить, что нейросеть YOLOv3 выполняется на основе фреймворка Darknet. ZedBoard же, если использовать аппаратное ускорение с

помощью ПЛИС и пакета DNNDK, поддерживает только фреймворки нейросетей Caffe и TensorFlow.

Таким образом, нужно провести конвертацию фреймворка нейросети из Darknet в Caffe.

Уже есть готовое руководство для конвертации фреймворка из фреймворка Darknet в фреймворк Caffe, но для платы ZCU102 на основе чипа серии Zynq Ultrascale+ [15].

Особенности данной процедуры конкретно для ZedBoard, выполненной на основе чипа z7020, приводятся в статье [12].

#### **11.2.4. Запуск программы на ZedBoard**

Перед тем как запустить программу обработки изображения, её необходимо скомпилировать прямо на отладочной плате.

Включенный в руководство [15] программный код выполняет только заключение распознанных образов в прямоугольные рамки желтого и красного цветов (распределение цветов рамок случайно).

Для того чтобы отображались названия распознанных объектов (классов), и вероятности того, что классы распознаны верно, нужно частично отредактировать исходный код и добавить файл с названиями классов (80 слов, через перенос строки) к программе.

Мы разместили руководство, как это сделать, с уже измененным кодом, в виде репозитория на сайте github [16].

Для непосредственно компиляции, нужно в консоли управления ZedBoard (подключается или по USB-UART разъему, или по протоку SSH

через сеть Ethernet) зайти в папку с приложением (папка «yolov3\_deploy»), и выполнить команду «make».

Чтобы распознать образы на изображении, необходимо ввести команду «./yolo [имя\_изображения] i», где [имя изображения] – это название файла изображения, находящегося в одной папке с Makefile (можно также задать полный путь к изображению).

Результатом выполнения данной команды будет изображение с распознанными классами объектов: их местонахождением, названием и вероятностью того, что они распознаны верно (рисунок 15). Также, эти же самые данные, наряду с координатами углов прямоугольных рамок, по завершению обработки будут выведены в консоль управления ZedBoard.



Рисунок 15. Пример обработанного изображения

### **11.3. Результаты**

В статье [12] приводится анализ производительности и эффективности данного приложения на ZedBoard.

Нас интересует только время, за которое производится анализ одного изображения.

Эта величина у автора статьи получилась в среднем порядка 4,526 секунд. Это частично из-за того, что DPU работает только на половине своей тактовой частоты, так как на ZedBoard не хватает пропускной способности подсистем питания, чтобы обеспечить его работу на частоте выше 90 МГц (максимальная частота работы DPU – 200 МГц). В разрабатываемом нами устройстве эта проблема решена.

Также не стоит забывать, что распознавание образов на захватываемом видео можно проводить и не в реальном времени – достаточно, например, раз в минуту узнавать, что находится перед объективом камеры. Оставшееся же время будет вестись кодирование входящего с камеры видеопотока.

## **11. Заключение**

В ходе данной работы мы разработали камеру на базе гибридной ПЛИС серии Zynq-7000, способную к обработке захватываемого видеоматериала при помощи искусственных нейронных сетей и рассчитали её показатели надежности.

Также мы привели пример, как реализовать одну из искусственных нейронных сетей – YOLOv3 – на отладочной плате с такой же ПЛИС, ZedBoard.

Главным преимуществом разработанного устройства является использование открытого ПО, petalinux, в качестве операционной системы, что позволяет конечному пользователю самому определять используемые при обработке изображения алгоритмы (нейросети).

## Список использованных источников

1. *Xilinx*. Cameras. [Online; accessed 16-06-2021]. URL: <https://www.xilinx.com/applications/broadcast/cameras.html#overview>
2. *Xilinx*. Machine and computer vision. [Online; accessed 16.06.2021]. URL: <https://www.xilinx.com/applications/industrial/machine-vision-systems.html>
3. *Intel FPGA*. Intelligent Vision & Video. [Online; accessed 16.06.2021] URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/smart-video/products/programmable/overview.html>
4. *Xilinx*. Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview. [Online; accessed 16.06.2021], DS190, July 2, 2018. URL: [https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf)
5. *Tamron MP1110M-VC*. Technical Reference Manual. [Online; accessed 16-06-2021] URL: <https://www.activesilicon.com/wp-content/uploads/MP1110M-VC-Technical-Manual.pdf>
6. *Avnet*. ZedBoard (Zynq™ Evaluation and Development) Hardware User's Guide. [Online; accessed 16.06.2021]. URL : [https://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/previewBody/90929-102-1-377430/ZedBoard\\_HW\\_UG\\_v2\\_2.pdf](https://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/previewBody/90929-102-1-377430/ZedBoard_HW_UG_v2_2.pdf)
7. *Глушков В.А.* Методические указания к лабораторным работам на тему «Расчет показателей надежности по внезапным отказам» по курсу «Методы обработки экспериментальных данных». – Ижевск: ИжГТУ, 2020 г. – 56с.
8. Архив Studfiles. Лекции курса «Архитектура компьютера». [Онлайн. дата обращения: 16.06.2021] <https://studfile.net/preview/3791668/page:14/>
9. ГОСТ 14.201–83. Обеспечение технологичности конструкции изделий.
10. ОСТ 4Г 0.091.219. Методы количественной оценки технологичности конструкций изделий РЭА.

11. Xilinx. Petalinux User Guide. [Online; accessed 16.06.2021], UG1144, October 30, 2019. URL:  
[https://www.xilinx.com/support/documentation/sw\\_manuals/xilinx2019\\_2/ug1144-petalinux-tools-reference-guide.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2019_2/ug1144-petalinux-tools-reference-guide.pdf)
12. *Lembitu Valdmets, Madis Kerner, Kalle Tammemäe*. Running YOLO Artificial Neural Network on ZedBoard Using Xilinx DNNDK. – Tallinn: Tallinn University of Technology, 2020 – 49p.
13. *Joseph Redmon and Ali Farhadi*. YOLO: Real-Time Object Detection. [Online; accessed 16.06.2021]. 2018. URL:  
<https://pjreddie.com/darknet/yolo/>
14. *Giovanni Guasti Antonello Di Fresco*. Long Form Answer Record73058: ResNet-50CNN application implemented on a ZedBoard using Vivado and PetaLinux 2019.2. [Online; accessed 16.06.2021]. URL:  
[https://www.xilinx.com/Attachment/73058\\_Porting\\_a\\_ResNet-50\\_CNN\\_application\\_to\\_a\\_ZedBoard\\_2019\\_2.pdf](https://www.xilinx.com/Attachment/73058_Porting_a_ResNet-50_CNN_application_to_a_ZedBoard_2019_2.pdf).
15. *Xilinx*. YOLOv3 Tutorial: Darknet to Caffe to Xilinx DNNDK. [Online; accessed 16.06.2021]. URL: <https://github.com/rulai-hu/DNNDK-YOLOv3>
16. *Струков, С.А.* ZedBoard YOLOv3 improved code. [Онлайн. дата обращения: 16.06.2021]  
[https://github.com/ssastrukovs/zedboard\\_YOLOv3\\_improved\\_code](https://github.com/ssastrukovs/zedboard_YOLOv3_improved_code)



## Приложение А. Раскладка слоев печатной платы устройства

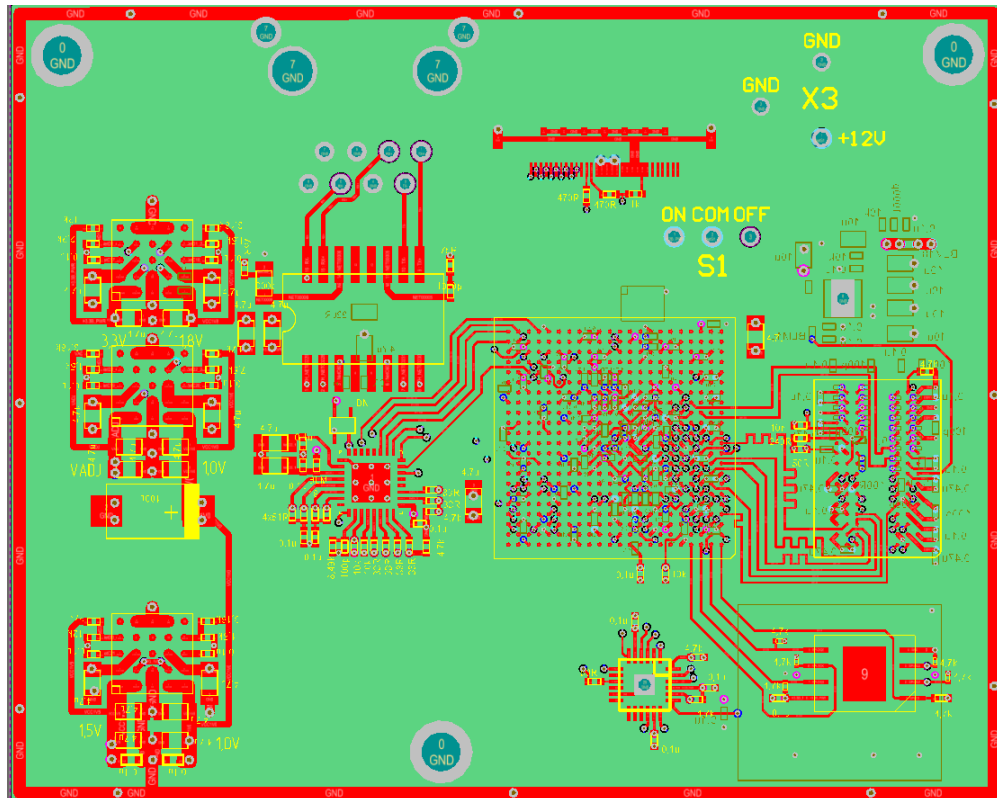


Рисунок А.1. Сигнальный слой 1, верхний

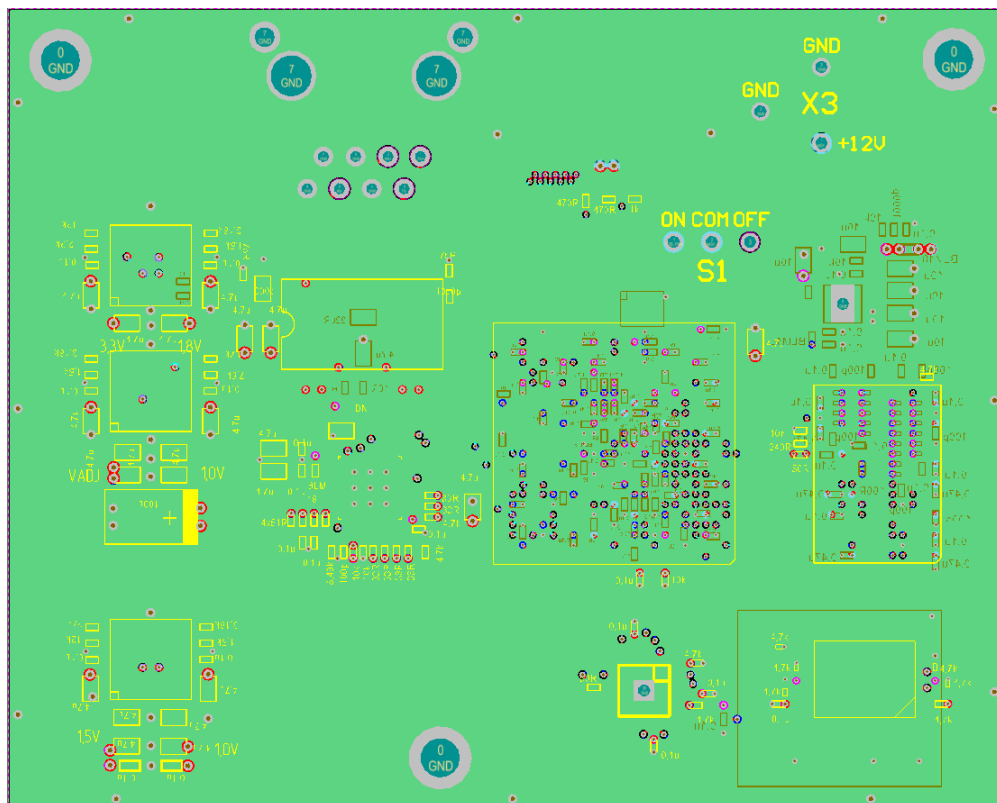


Рисунок А.2. Экранирующий полигон общей массы 1

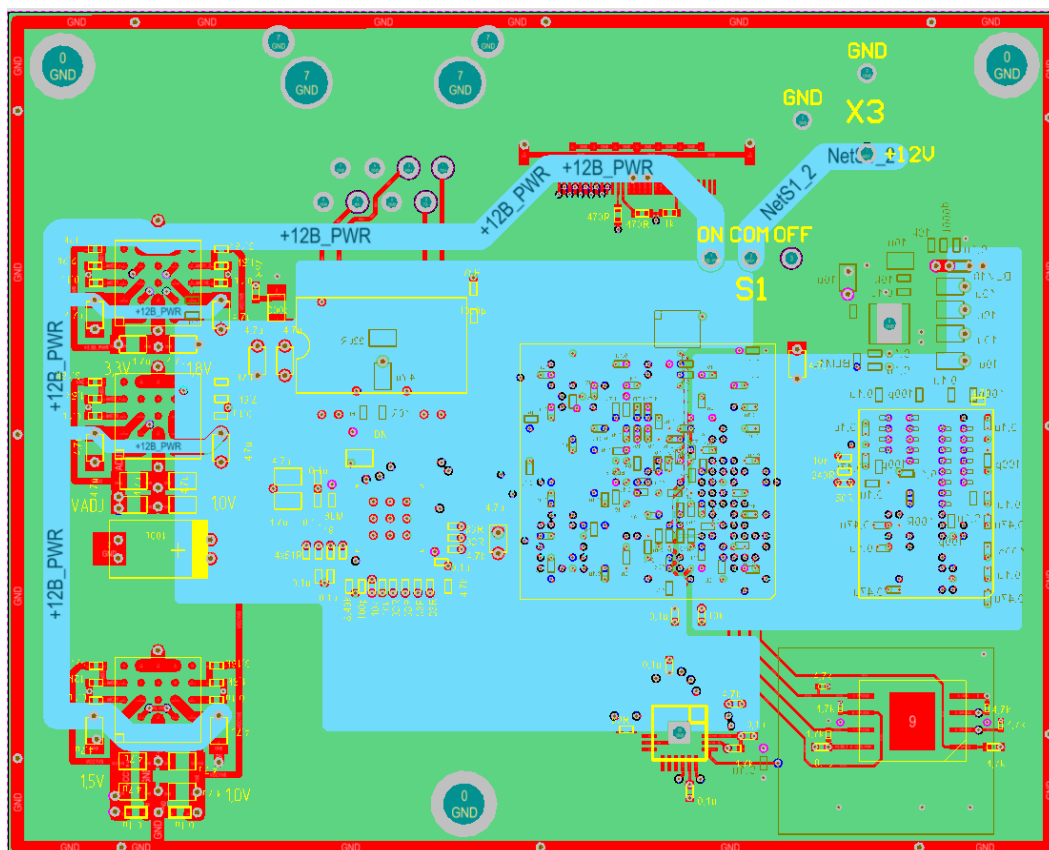


Рисунок А.3. Силовой слой 1

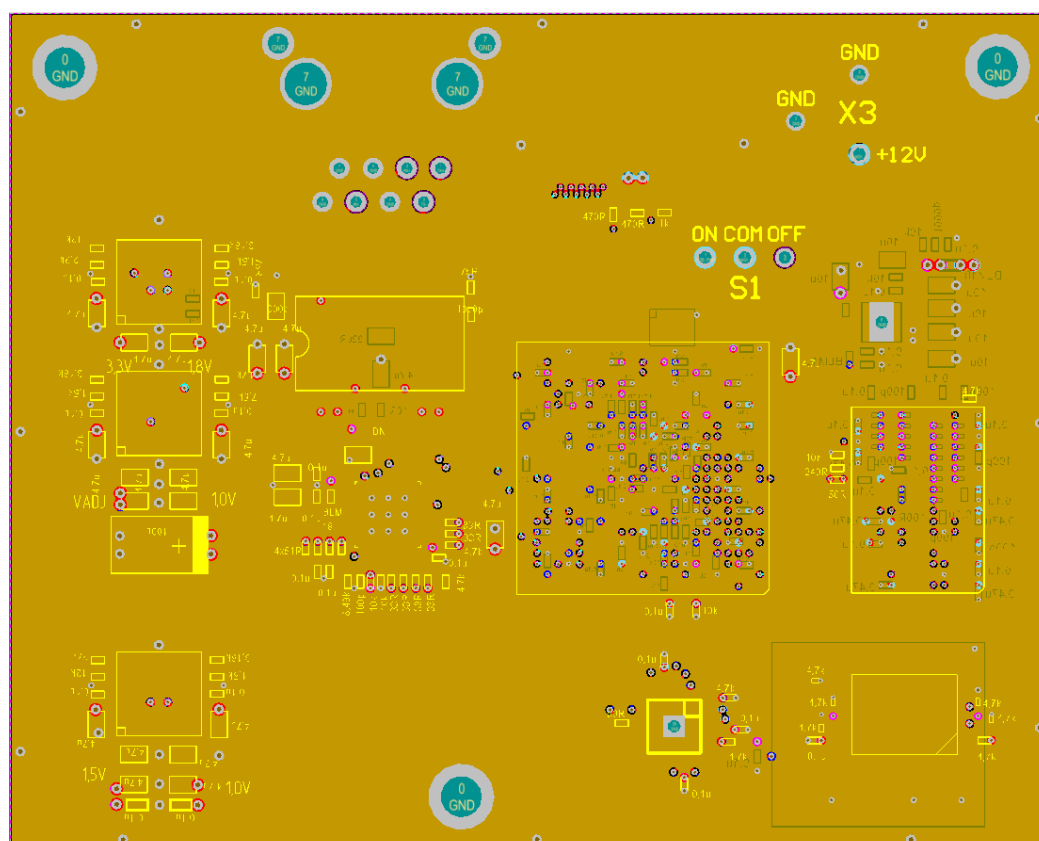


Рисунок А.4. Экранирующий полигон общей массы 2

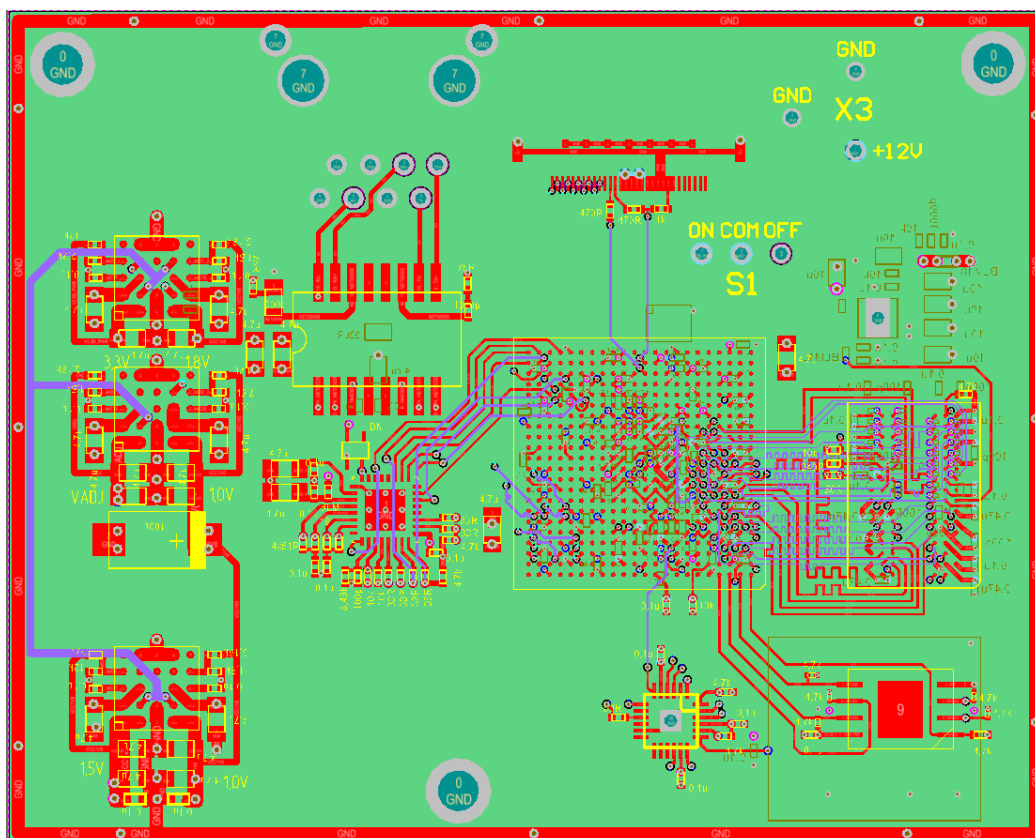


Рисунок А.5. Сигнальный слой 2, средний 1

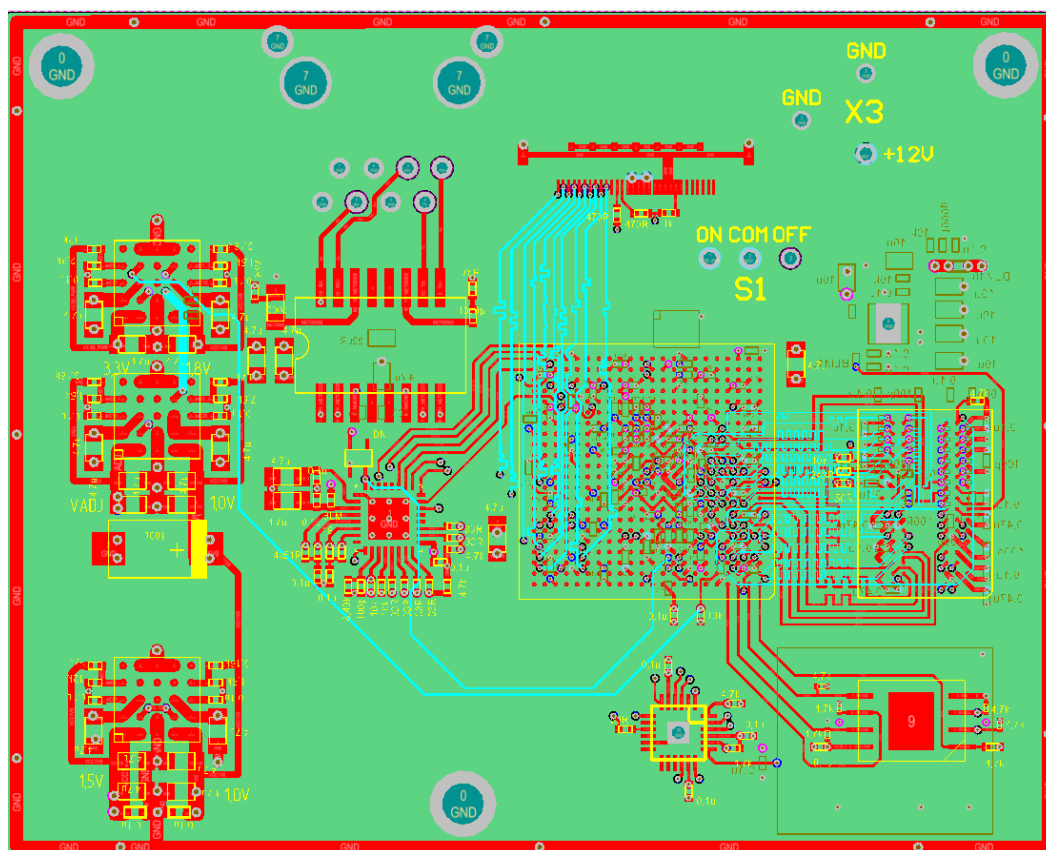


Рисунок А.6. Сигнальный слой 3, средний 2

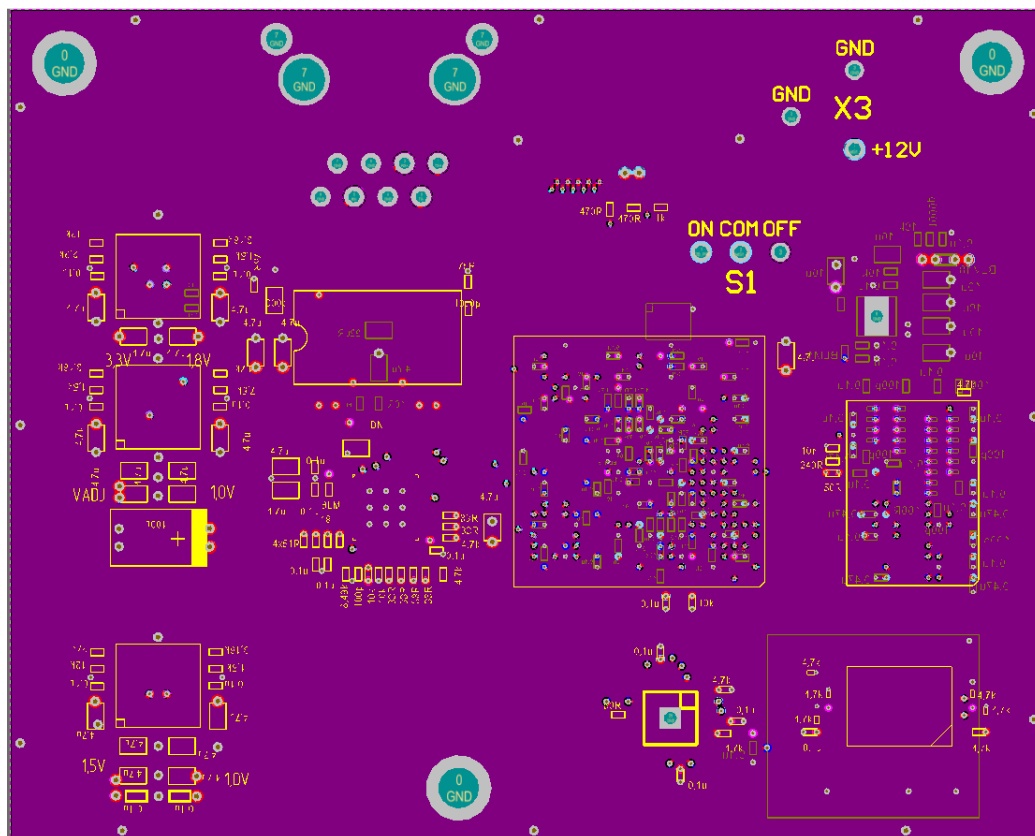


Рисунок А.7. Экранирующий полигон общей массы 3

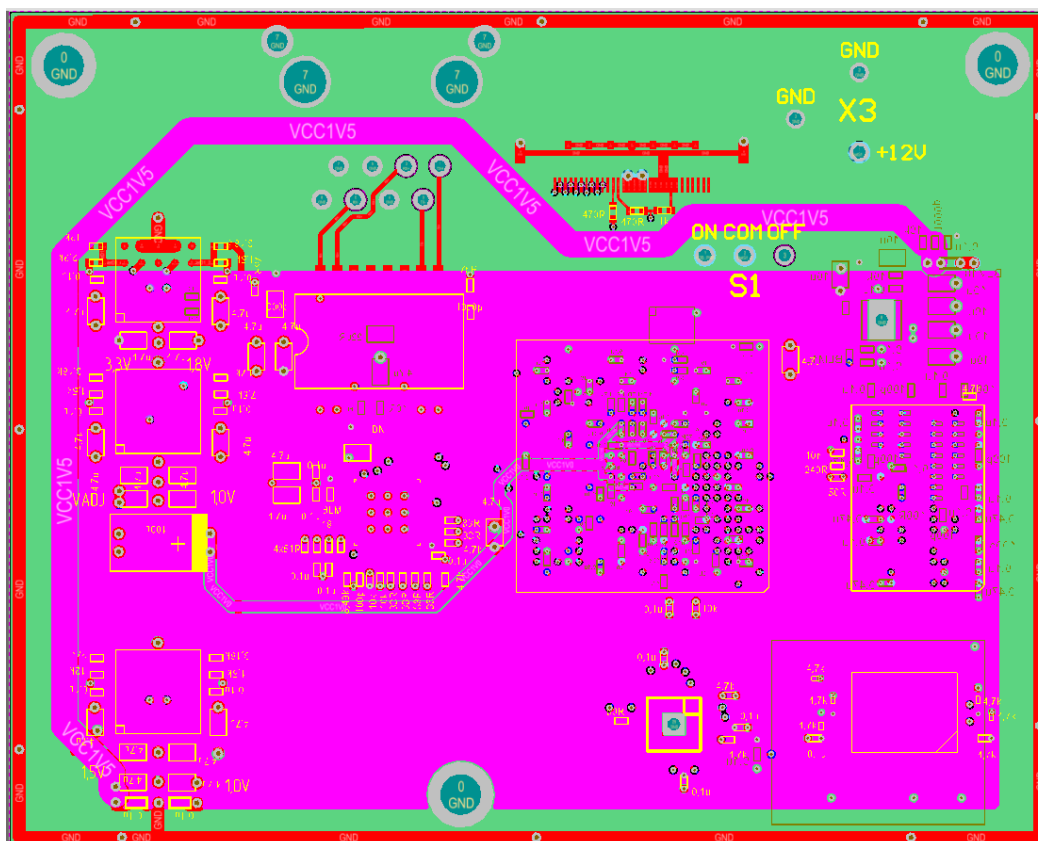


Рисунок А.8. Силовой слой 2

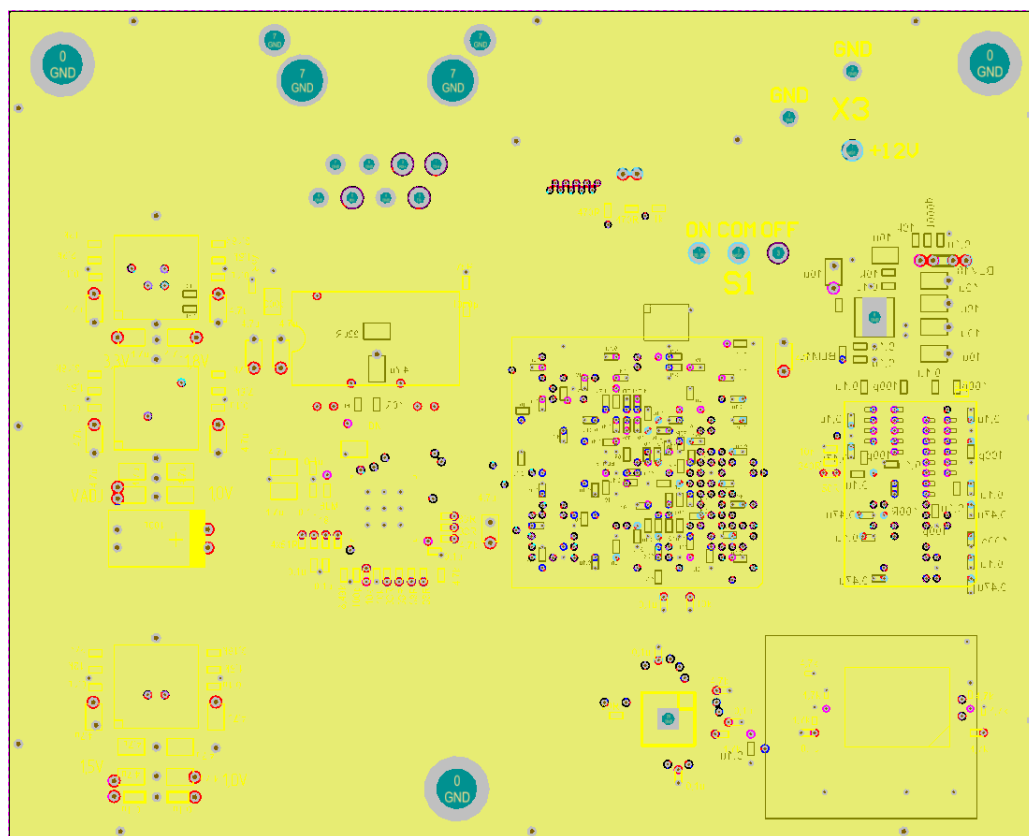


Рисунок А.9. Экранирующий слой общей массы 4

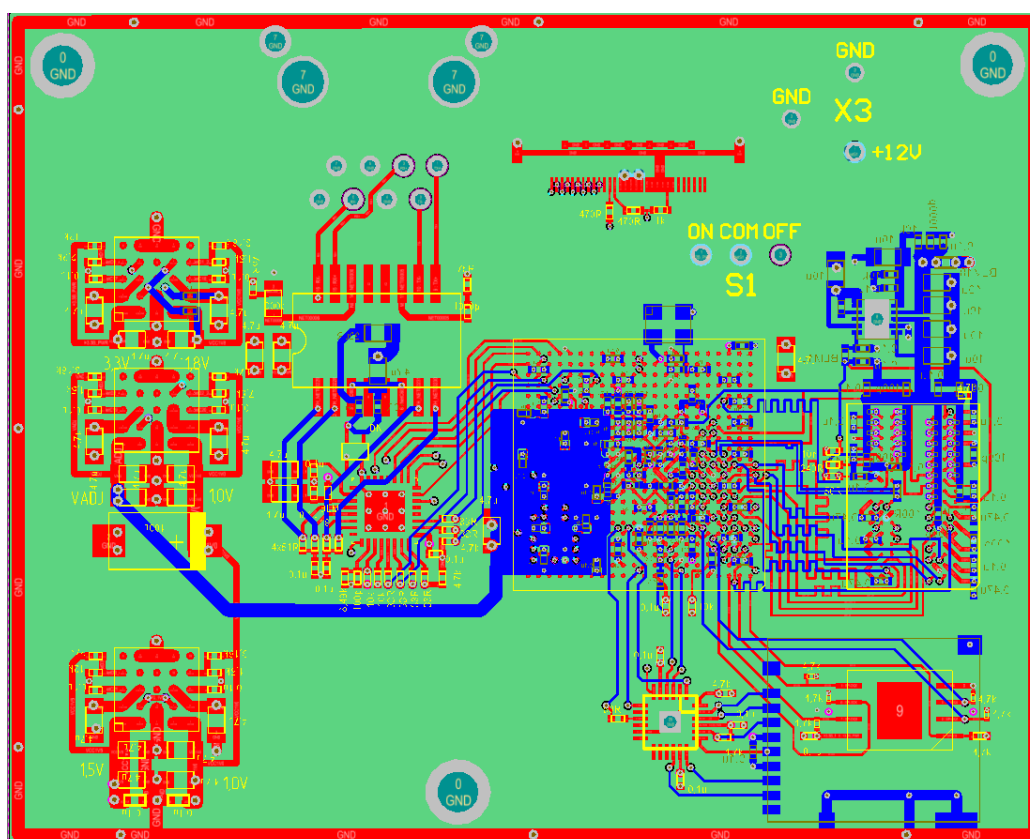


Рисунок А.10. Сигнальный слой 4, нижний

## Приложение Б. 3D-рисунки общей сборки устройства

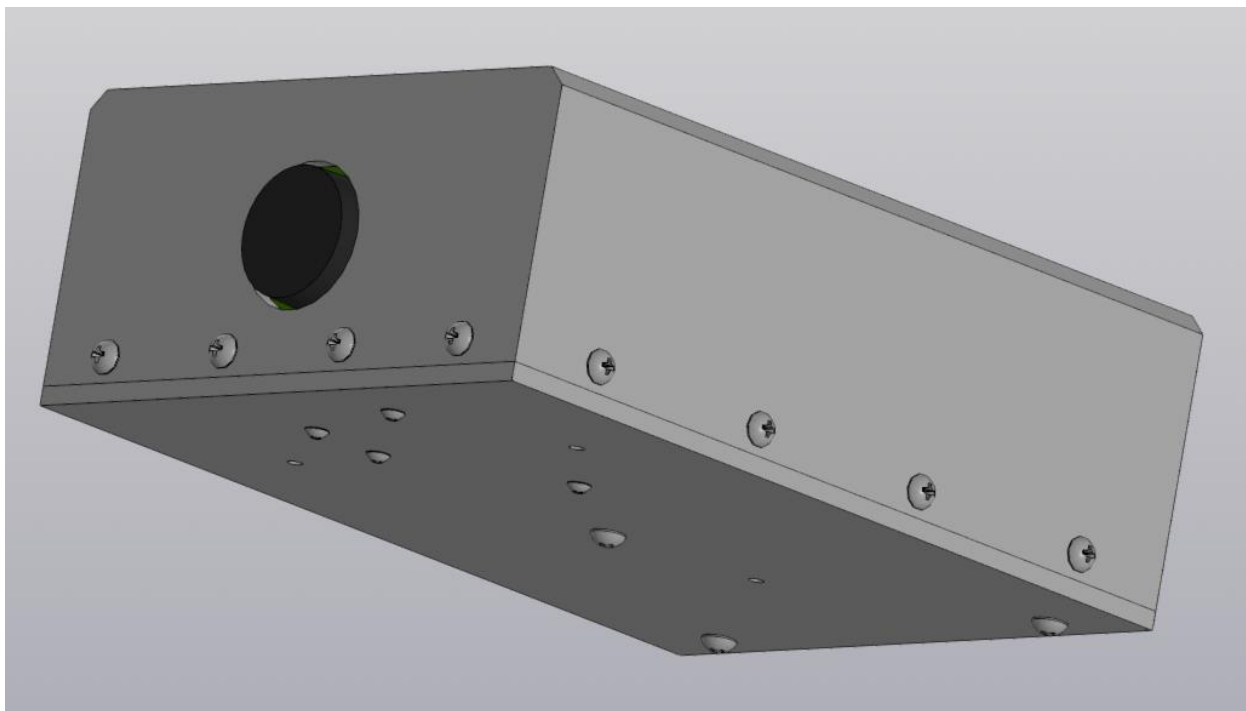


Рисунок Б.1. 3D-изображение общей сборки: вид снизу спереди

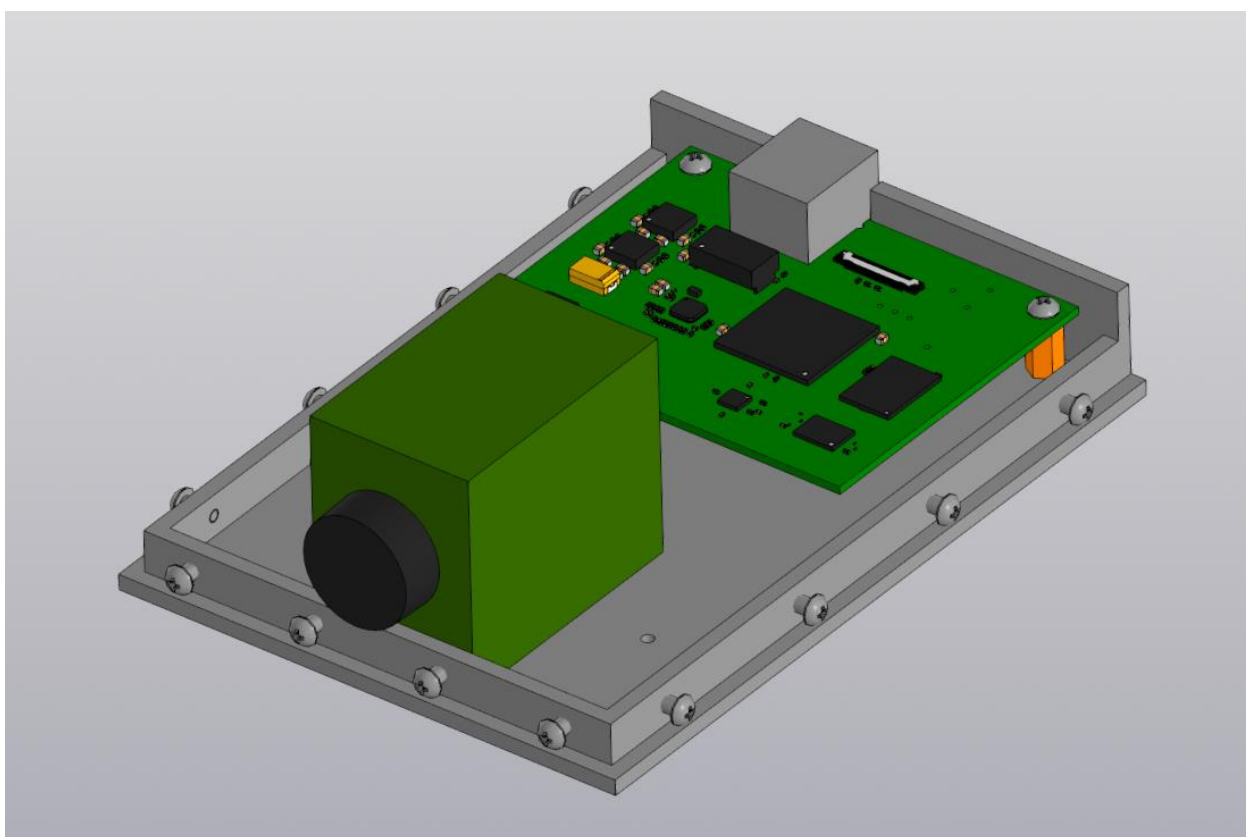


Рисунок Б.2. 3D-изображение общей сборки: вид сверху спереди, без крышки, разъема питания и переключателя



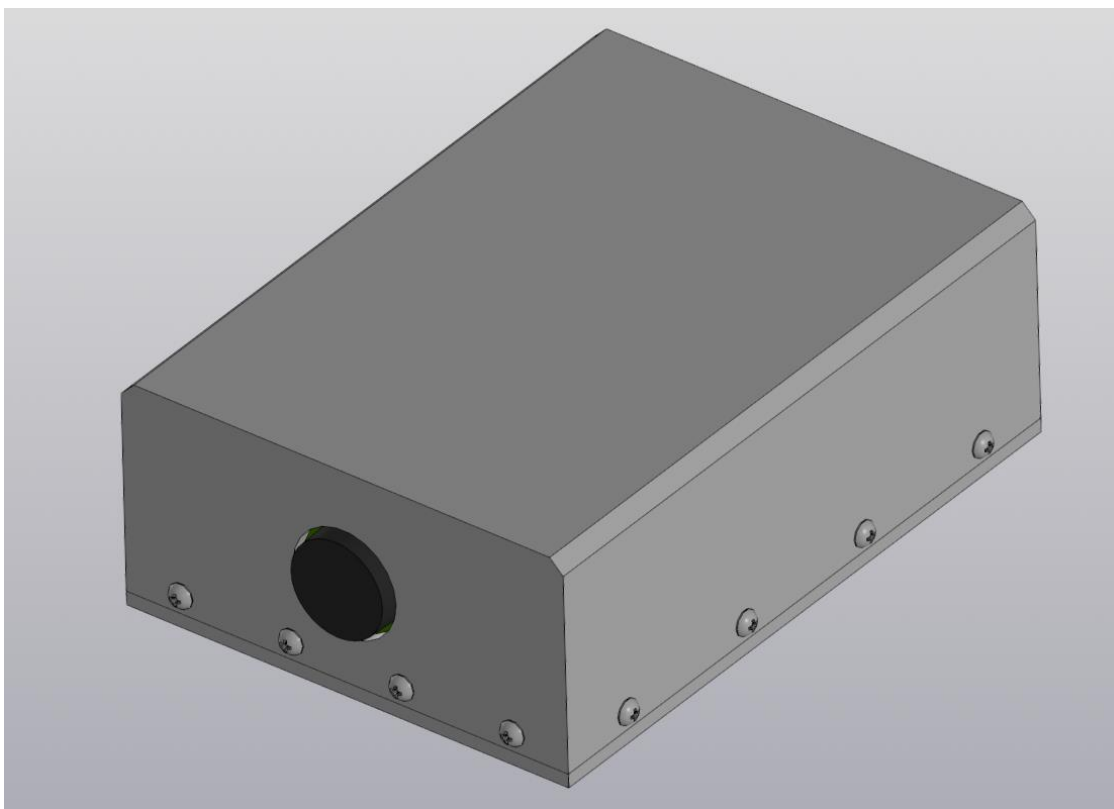


Рисунок Б.3. 3D-изображение общей сборки: вид сверху спереди

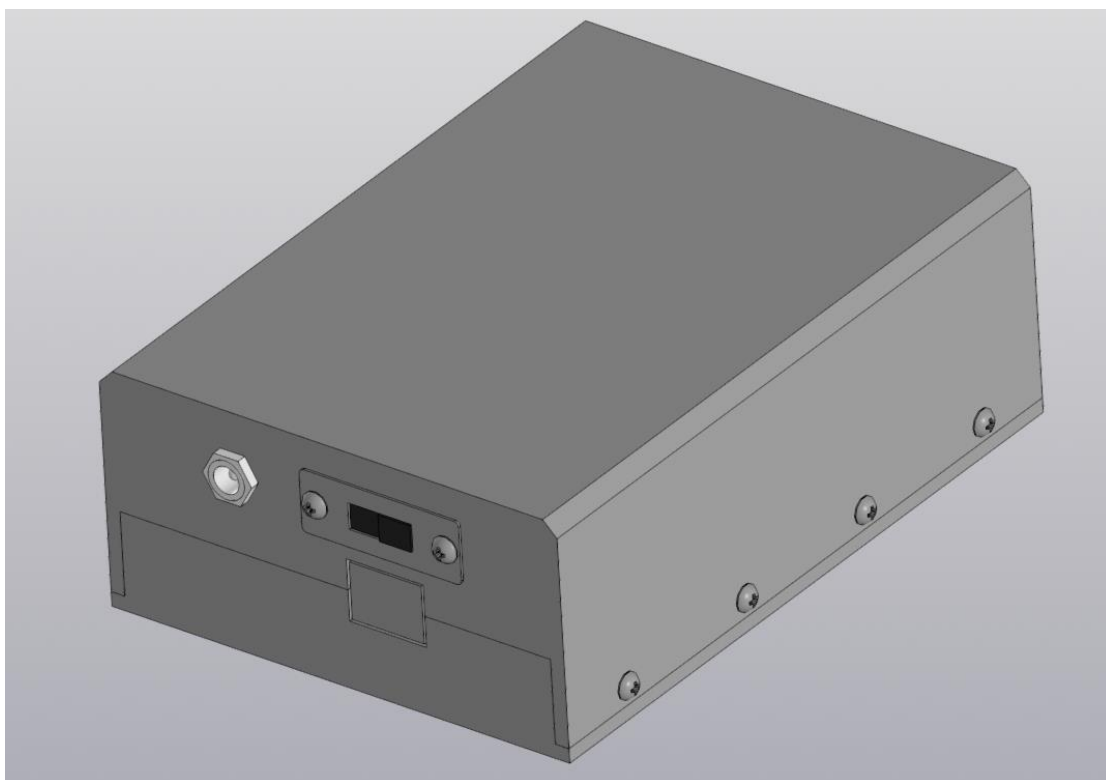


Рисунок Б.4. 3D-изображение общей сборки: вид сверху сзади

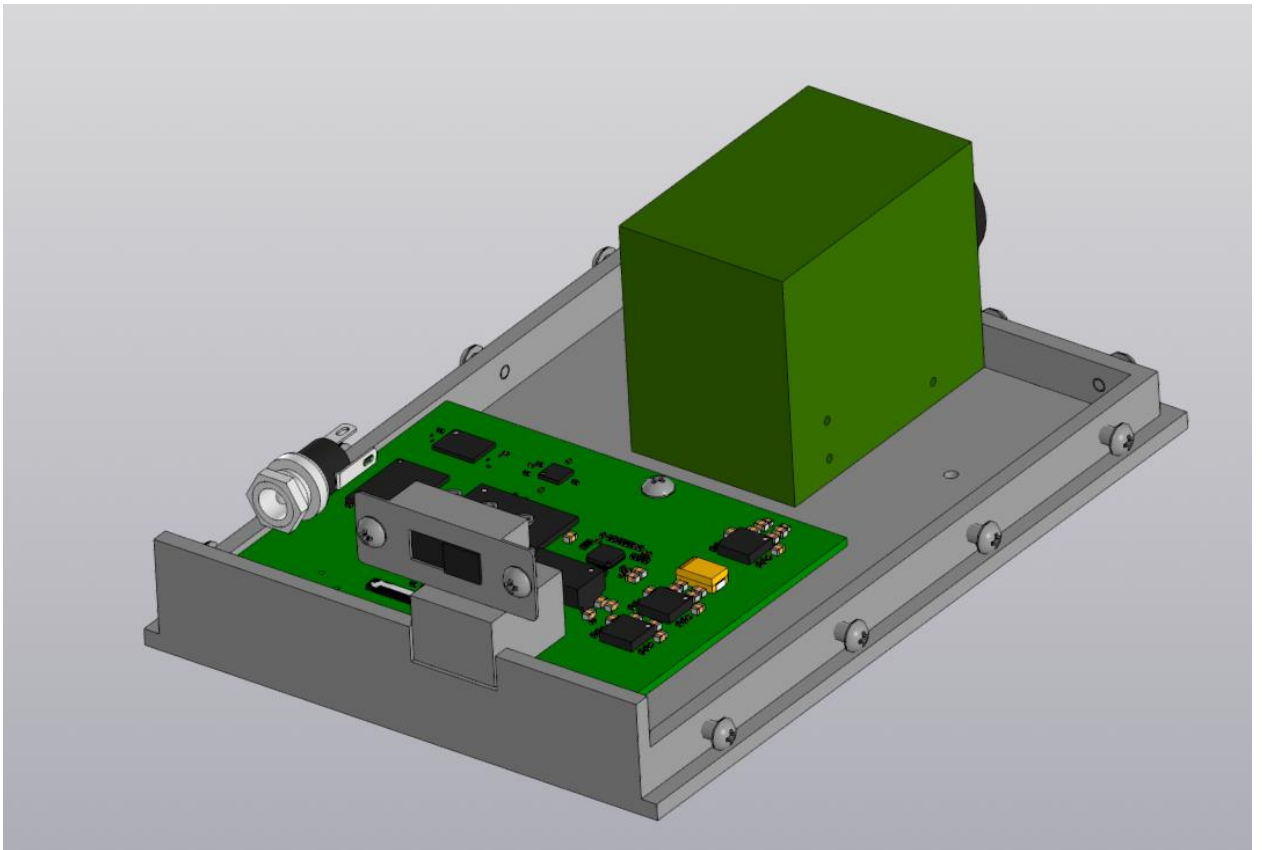


Рисунок Б.5. 3D-изображение общей сборки: вид сверху сзади, без крышки



## Приложение В. Расчет надежности

### Таблица В.1. Сводная таблица расчета надежности

Наименование и типы элементов	Обозначение на схеме	Кол-во элементов Ni (шт)	Интенсивность отказов $\lambda_{0i} \cdot 10^{-6} \cdot 1/ч$	Режим работы		Коэффициент режима Kpi	Эксплуатационный к-т, кэ1	Интенсивность отказов i-го элемента $\lambda_{ij} = k_{pi} \cdot k_{\theta} \cdot \lambda_{0i} \cdot 10^{-6} \cdot 1/ч$	Интенсивность отказа группы элементов $N_i \cdot \lambda_{ij} \cdot 10^{-6} \cdot 1/ч$
				Температура $\theta$ , оС	Коэффициент нагрузки kn				
Конденсаторы SMD керамические	C6-C11	5	0,04	35	0,24	0,64	0,07	0,001792	0,00896
Конденсаторы SMD керамические	C2, C3, C13-C15, C36, C69	7	0,04	35	0,33	0,7	0,07	0,00196	0,01372
Конденсатор SMD танталовый	C45	1	0,07	35	0,165	0,54	0,23	0,008694	0,008694
Конденсаторы SMD керамические	C1, C4, C5, C12, C16-C35, C37-C44, C46-C68, C70-C130	116	0,04	35	0,066	0,54	0,07	0,001512	0,175392
Резистор SMD 10 кОм 0402	R5	1	0,18	35	0,23	0,46	0,9	0,07452	0,07452
Резисторы SMD 470 Ом 0402	R1, R2	2	0,18	35	0,36	0,62	0,9	0,10044	0,20088
Резистор SMD 1 кОм 0402	R3	1	0,18	35	0,17	0,46	0,9	0,07452	0,07452
Резистор SMD 220 Ом 0805	R4	1	0,18	35	0,4	0,62	0,9	0,10044	0,10044
Резисторы SMD 10 кОм 0402	R8, R9, R32, R33, R77, R82-R85, R88-R90	12	0,18	35	0,016	0,2	0,9	0,0324	0,3888
Резисторы SMD 4,7 кОм 0402	R6, R7, R20, R53-R55, R72, R79-R81	10	0,18	35	0,03	0,2	0,9	0,0324	0,324
Резисторы SMD 4,7 кОм 0201	R58-R62	5	0,18	35	0,04	0,25	0,9	0,0405	0,2025
Резисторы SMD 33 Ом 0402	R10-R15, R75, R76	8	0,18	35	1	1,1	0,9	0,1782	1,4256
Резистор SMD 6,49 кОм 0402	R16	1	0,18	35	0,03	0,2	0,9	0,0324	0,0324
Резисторы SMD 12 кОм 0402	R17, R28	2	0,18	35	0,016	0,2	0,9	0,0324	0,0648
Резисторы SMD 3,16 кОм 0402	R18, R19, R22	3	0,18	35	0,045	0,31	0,9	0,05022	0,15066
Резистор SMD 27 кОм 0402	R21	1	0,18	35	0,006	0,1	0,9	0,0162	0,0162
Резистор SMD 2,2 кОм 0402	R24	1	0,18	35	0,08	0,31	0,9	0,05022	0,05022
Резисторы SMD 1,5 кОм 0402	R25, R26, R29, R35	4	0,18	35	0,115	0,31	0,9	0,05022	0,20088
Резистор SMD 7,5 кОм 0402	R27	1	0,18	35	0,02	0,1	0,9	0,0162	0,0162
Резисторы SMD 50 Ом 0201	R36-R50, R63-R70	23	0,18	35	0,225	0,46	0,9	0,07452	1,71396
Резистор SMD 50 Ом 0402	R73	1	0,18	35	0,17	0,46	0,9	0,07452	0,07452
Резистор SMD 100 Ом 0402	R71	1	0,18	35	0,09	0,31	0,9	0,05022	0,05022
Резистор SMD 240 Ом 0402	R74	1	0,18	35	0,032	0,54	0,9	0,08748	0,08748
Микросхемы стабилизации напряжения устройства	D1-D3	3	0,85	35	0,41	0,11	0,05	0,004675	0,014025
Микросхема стабилизации напряжения RAM	D6	1	0,85	35	1,067	1	0,05	0,0425	0,0425
Все цифровые микросхемы	D4, D5, D7-D10	6	0,34	35	2	2	0,05	0,034	0,204
Светодиод SMD оранжевый	HL1	1	0,63	35	0,5	0,18	5,3	0,60102	0,60102
Светодиод SMD зеленый	HL2	1	0,63	35	1	1	5,3	3,339	3,339
Трансформатор развязки Ethernet SMD	T1	1	0,28	35	1	3,54	0,58	0,574896	0,574896
Индуктивности SMD	L1-L3	3	0,48	35	1	1	0,58	0,2784	0,8352
							Итого	6,056469	11,066207