



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет Радиотехнический Кафедра Радиотехника

Направление 11.03.01. «Радиотехника»

«УТВЕРЖДАЮ»  
Зав. кафедрой «Радиотехника»

\_\_\_\_\_ д.т.н. Ташлинский А.Г.

« 20 » апреля 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

по выпускной квалификационной работе студента группы РТбд-41

Капитанова Никиты Валерьевича

(фамилия, имя, отчество)

1. Тема работы «Узел подключения многоэлементных фотоприемных линеек»  
утверждена приказом по университету от «16» декабря 2019 г., №2639

2. Срок сдачи студентом законченной работы «10» июня 2020 г.

3. Исходные данные к работе: а) Узел подключения работает в составе системы измерения диаметра пластиковой нити для 3D-принтеров. Принцип измерения: нить освещается точечным источником и измеряется размер тени, отбрасываемой нитью на поверхность линеек; б) Номинальный диаметр нити – 1.75 и 3 мм; в) Точность измерения диаметра – не хуже  $\pm 1\%$ ; г) Узел подключения предназначен для управления работой двух многоэлементных фотоприемных линеек марки TCD1304DG, для приема и обработки их выходных сигналов, а также для управления осветителями; д) Обработка выходного сигнала линейки заключается в получении информации о ширине тени; е) Предусмотреть возможность передачи измерительных данных на компьютер.

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)  
а) Обзор по теме с описанием предлагаемого принципа измерения диаметра нити;  
б) Разработка структурной схемы устройства и определение требований к ее основным компонентам;  
в) Разработка и расчет электрической принципиальной схемы устройства;  
г) Разработка конструкции устройства (печатного узла);  
д) Результаты экспериментальных исследований разработанного устройства.

5 Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) \_\_\_\_\_  
а) Схема электрическая структурная устройства (1 лист); б) Схема электрическая принципиальная устройства (1 лист), в) Сборочный чертеж печатного узла, входящего в состав устройства (1 лист).

6 Дата выдачи задания «20» апреля 2020 г.

Фамилия, имя, отчество

руководителя (полностью) Черторийский Алексей Аркадьевич, к.т.н., доцент

Занимаемая должность доцент кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника»

Задание к исполнению принял \_\_\_\_\_

(подпись)

(подпись)

## РЕФЕРАТ

Каштанов Н. В. Узел подключения многоэлементных фотоприёмных линеек: Выпускная квалификационная работа по специальности 11.03.01. -Ульяновск, УлГТУ, 2020. - 94 страницы, 44 рисунка, 23 источника.

**МНОГОЭЛЕМЕНТНАЯ ФОТОПРИЁМНАЯ ЛИНЕЙКА, ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ТЕНЕВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ, МИКРОКОНТРОЛЛЕР, RS-485, ФИЛАМЕНТ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ, КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ, АВТОПОДСТРОЙКА ЯРКОСТИ СВЕТОДИОДОВ.**

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке узла подключения многоэлементных фотоприёмных линеек, работающих в составе датчика толщины пластикового филамента. Разработанное устройство обеспечивает управление двумя многоэлементными фотоприёмными линейками, обработку их выходных сигналов и передачу результатов обработки на персональный компьютер. Экспериментальным путем подтверждена верность принятых технических решений.

Практическая значимость работы заключается в разработанном узле подключения многоэлементных фотоприёмных линеек с возможностью доработки его до полноценного устройства контроля производства филамента.

Научную ценность могут представлять результаты экспериментальных исследований макета датчика при работе с пластиковыми нитями, имеющими различные оптические свойства.

По теме выпускной квалификационной работы на 54-й научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях» сделан доклад «Применение многоэлементной фотоприёмной линейки в датчике толщины пластиковой нити», материалы доклады опубликованы в сборнике трудов конференции.



На весенней студенческой научно-технической конференции 2020 года сделан доклад «Оптоэлектронный датчик толщины пластиковой нити».

На 22-ой Всероссийской молодежной научной школе-семинаре «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ» был сделан доклад «УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИАМЕТРА ЭКСТРУДИРУЕМОГО ПЛАСТИКОВОГО ПРУТКА», который опубликованы в сборнике материалов школы-семинара.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Аналитический обзор.....	8
1.1 Анализ объекта измерения.....	8
1.2 Анализ теневого метода измерения.....	8
1.3 Анализ фотоприёмника.....	11
1.4 Методы обработки сигнала с фотоприёмника.....	12
1.4.1 Метод обработки с использованием компаратора.....	12
1.4.2 Метод обработки с использованием АЦП.....	14
1.4.3 Комбинированный метод.....	14
1.5 Способы передачи данных на персональный компьютер.....	15
1.5.1 Интерфейс RS-485.....	15
1.5.2 Интерфейс USB.....	15
1.5.3 Интерфейс Ethernet.....	16
1.5.4 Интерфейс Wi-Fi.....	16
1.6 Выбор излучателя.....	17
1.6.1 Управление облучателями.....	17
1.8 Выбор устройства управления.....	19
1.8.1 Программируемые логические интегральные схемы.....	19
1.8.2 Дискретная логика.....	20
1.8.3 Микроконтроллеры.....	20
2 Обоснование структурной схемы.....	22
2.1 Устройство управления.....	22
2.2 Организация управления фотоприёмной линейкой.....	22
2.3 Обработка выходного сигнала с фотоприёмной линейки.....	26
2.3.1 Вычисление оптической мощности.....	26
2.3.2 Вычисление координаты, диаметра и эллиптичности филамента.....	29
2.4 Выбор облучателей и управление ими.....	32
2.5 Алгоритм автоподстройки яркости светодиодов.....	34
2.6 Интерфейсы передачи данных на ПК.....	35
2.7 Формирование тактового сигнала $\varnothing M$ .....	35
2.8 Алгоритм работы структурной схемы.....	36
3 Расчёт принципиальной схемы.....	38
3.1 Проектирование блока с фотоприёмной линейкой.....	38

<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Каштанов Н. В.		8.6.2020
Проверил		Черторыйский А. А.		9.6.2020
Рецензент				
Н.Контр		Дуров О.А.		13.6.2020
Утв.		Ташлинский А.Г.		16.6.2020
Узел подключения многоэлементных фотоприемных линеек Пояснительная записка				
		Литера	Лист	Листов
		У	4	94
<b>РТ6д-41</b>				



3.1.1 Обоснование схемы включения фотоприёмной линейки.....	38
3.1.2 Расчёт работы компаратора .....	39
3.2 Проектирование блока с микроконтроллером.....	43
3.2.1 Обоснование схемы преобразователя питания.....	43
3.2.2 Проектирование ГТИ .....	44
3.2.3 Согласование логических уровней и формирование импульса SH.....	46
3.2.4 Схема включения микроконтроллера AT91SAM7S64.....	47
3.2.5 Реализация интерфейса RS-485 .....	48
3.2.6 Формирование счётных импульсов .....	48
4 Результаты экспериментальных исследований .....	50
4.1 Исследование полутени, возникающей из-за отсутствия диафрагмы.....	50
4.2 Исследование влияния прозрачности филамента на выходной сигнал МФПЛ.....	55
4.3 Исследование управляющих сигналов .....	60
Заключение.....	61
Список использованных источников.....	62
Приложение А.....	64
Приложение Б .....	66
Приложение В.....	70
Приложение Г .....	76
Приложение Д.....	78
Приложение Е .....	80

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день 3D-печать становится всё более популярным способом получения изделий. Существуют различные технологии 3D-печати, однако самое широкое распространение на сегодняшний день получила технология моделирования методом послойного наплавления. Эта технология заключается в изготовлении изделий при помощи аддитивного нанесения слоёв расплавленного материала, которые соответствуют контурам цифровой модели этого изделия. В качестве материала выступает филамент - термопласт, произведённый в виде прутка круглого сечения с диаметром 1,75 мм либо 3 мм [1]. Одно из предъявляемых требований - удержание заданного диаметра на протяжении всей нити в рамках 5% погрешности [1]. Для его выполнения средствами измерения толщины производится мониторинг диаметра филамента в процессе его производства.

В настоящее время существуют готовые микрометры, обладающие хорошей точностью. Однако в случае применения их для вышеописанной задачи они имеют ряд общих недостатков.

Первый недостаток заключается в сложности, а зачастую невозможности интегрирования непосредственно с линией производства, что приводит к необходимости присутствия оператора, следящего за показаниями прибора, а применение систем автоматического регулирования оказывается невозможным. То есть, фактически, весь функционал существующих измерительных систем подобного рода сводится к оповещению о нарушении производственного процесса персонала, который и должен вручную произвести корректировку. Невозможность автоматизации приводит к более дорогому производству изделия за счёт расходов на содержание персонала.

Ещё один существенный недостаток существующих приборов – невозможность контроля эллиптичности филамента одним оптическим датчиком. Для измерения толщины нити в двух координатных осях необходимо использовать два полноценных датчика, что приводит к удорожанию измерительной системы в два раза.

В дополнение стоит отметить и ненужную универсальность существующих микрометров, особенно оптических. Их производители предусмотрели возможность измерения не только диаметра или положения, но и величины зазора, внешнего или внутреннего размера, положения нескольких объектов и т. п., что не требуется для решения поставленной задачи. Поэтому, разрабатывая устройство конкретно для измерения диаметра филамента, появляется возможность сделать устройство проще аналогичных – в нём не будет избыточного функционала. Излишняя универсальность плоха не только с технической, но и с финансовой точки зрения: приобретая готовый микрометр, покупатель заплатит за функции прибора, пользоваться которыми он априори не будет.

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

На основании вышесказанного, целью данной работы является разработка узла, который обеспечит:

- а) независимое управление двумя измерительными оптическими каналами;
- б) обработку информации о диаметре и эллиптичности филамента, поступающей с фотоприёмников;
- в) вывод обработанной информации на персональный компьютер;
- г) возможность последующего вложения в узел функции авторегуляции диаметра филамента, на основе обработанной информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- а) провести обзор по теме с описанием предлагаемого принципа измерения диаметра нити;
- б) разработать структурную схему устройства и определить требования к её основным компонентам;
- в) разработать и рассчитать схему электрическую принципиальную устройства;
- г) разработать конструкцию устройства (печатный узел);
- д) получить результаты экспериментальных исследований разработанного устройства.

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и двух приложений. В первом разделе проведен обзор теневого метода измерения и его оптимизация. Также рассмотрены возможные способы передачи информации на ПК, методы обработки сигнала МФПЛ и её управления. Второй раздел посвящен разработке структурной схемы. В нём рассмотрен алгоритм работы устройства, обоснованы требования ко всем основным сигналам и питающим напряжениям в нём. В третьем разделе произведён расчёт принципиальной схемы устройства, которая обеспечивает требование, предъявленные к устройству при разработке его структурной схемы. В четвёртом разделе представлены результаты экспериментов, подтверждающих возможность применения теневого метода измерения и правильность некоторых технических решений. В приложениях приведены дополнительные материалы к последнему разделу.

Практическую значимость представляет разработанный в ходе выполнения работы узел подключения многоэлементных фотоприёмных линеек с возможностью доработки его до полноценного устройства контроля производства филамента.

Научную ценность могут представлять результаты экспериментальных исследований макета датчика при работе с пластиковыми нитями, имеющими различные оптические свойства.



# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Анализ объекта измерения

Проектируемый узел предназначен для оценки диаметра нити, выполненной из ABS или PLA пластика с произвольными цветом и оптической прозрачностью. Номинальный диаметр сечения может составлять 1,75 мм либо 3 мм, в зависимости от возможностей производственной линии. Сам филамент производится методом экструзии, из-за чего сечение прутка может отличаться от круглого и получиться эллиптическим, что недопустимо и говорит о неисправности в экструдере. Исходя из этого, значение диаметра нити может различаться в зависимости от того, на какую из координатных осей спроецировать её сечение. Важно отметить и то, что измеряемый объект будет находиться в постоянном движении в направлении, перпендикулярном плоскости сечения, в течение всего процесса производства, а следовательно, и измерения. Кроме этого, нить может совершать незначительные случайные поступательные движения в направлениях, перпендикулярных вектору постоянного движения.

## 1.2 Анализ теневого метода измерения

Теперь, когда известны параметры объекта измерения, можно подробно рассмотреть метод, с помощью которого требуется проводить процесс измерения.

В статье [2] предлагается использование теневого датчика для контроля геометрических параметров объекта. Разработанная авторами [2, с. 175] схема оптического канала, поясняющая этот принцип измерения изображена на рисунке 1.

«Принцип оптического микрометра основан на проецировании тени измеряемого объекта на CMOS-матрицу через оптическую систему. Излучение полупроводникового лазера формируется в виде не расходящегося пучка и проецируется на объект. Теневая картина объекта телецентрическим объективом собирается на двумерной CMOS-матрице. Полученное изображение контура объекта анализируется на ПЛИС и процессором, который рассчитывает требуемые геометрические размеры» [2, с. 175]. При условии, что сечение представляет собой окружность, длина проекции (тени) будет равна диаметру нити. Тогда задача оценки величины диаметра сводится к нахождению размера тени на фотоприёмнике. Задача оценки эллиптичности можно решить путём ввода дополнительного оптического канала.

Метод хорош тем, что для нашего объекта получаемая проекция будет в виде прямоугольника, а значит проста в плане математической обработки, ведь все сводится к отысканию длины одной из сторон этой геометрической фигуры. Предлагаемая оптическая телецентрическая система [2, с. 175] обеспечивает очень хорошее качество проекции.

К недостаткам можно отнести использование фотодиодной матрицы в качестве приёмника оптического сигнала. А в силу необходимости контроля эллиптичности сечения

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

филамента, придётся задействовать два оптических канала, что не только дорого и сложно в установке и настройке, но и предполагает использование двух таких фотоприёмников, что фактически полностью перекрывает достоинство простого алгоритма обработки данных их огромным количеством. Также требования к процессу управления матрицей относительно линейки более высокие.

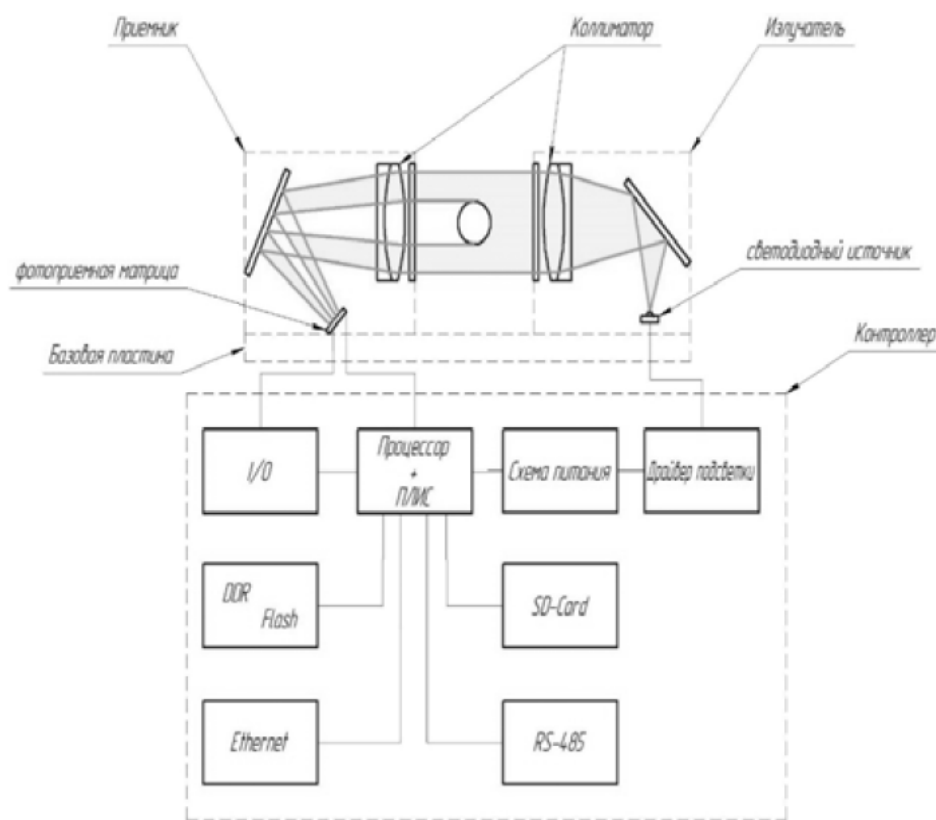


Рисунок 1 - Структурная схема теневого датчика

Предлагаемый способ можно использовать для измерения и получить хороший результат. Но его реализация для измерения филамента в том виде, в каком его предлагают авторы [2] явно не будет рациональной.

Во-первых, можно заменить матрицы на линейки. Использование фотоприёмных матриц в статье [2] обусловлено тем, что в общем случае, объект неподвижен, а следовательно, функция сканирования ложиться на саму измерительную систему, т. е. именно облучатель и фотоприёмник должны перемещаться относительно контролируемого объекта, а не наоборот. Чтобы решить эту задачу в качестве фотоприёмника использовалась матрица в сочетании с заложенным в оптический канал масштабированием проекции. И, таким образом, тень от всего объекта целиком падает на неподвижный фотоприёмник. Для иммобилизации источника излучения также использован эффект увеличения в оптическом канале – благодаря этому, облучается вся сторона изделия и отпадает необходимость его перемещать. Однако, в нашем случае объект всегда подвижен и нет никакого смысла возлагать сканирование на устройство измерения, так как объект сам будет перемещаться относительно оптического канала. Именно благодаря движению филамента в процессе его производства возможно

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

использование одномерной фотоприёмной линейки – тень на ней будет соответствовать диаметру филамента и обновляться по мере движения прутка.

Во-вторых, оптический канал можно упростить, убрав из него масштабирование проекции. Максимально возможный номинальный диаметр филамента - 3 мм, а длина фотоприёмных линеек составляет несколько сантиметров. Очевидно, нет необходимости уменьшать изображение тени, так как размера фоточувствительной области с избытком хватает. В этом случае оптический канал будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

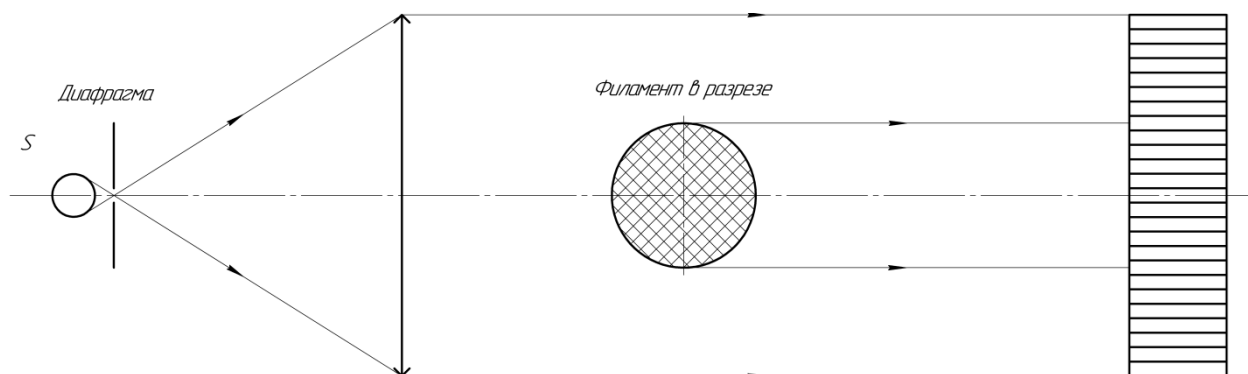


Рисунок 2 - Оптический канал без масштабирования

Скорее даже, имеет смысл увеличить тень, как показано на рисунке 3, чтобы использовать динамический диапазон измерения линейки по максимуму, но уменьшение проекции явно приведёт к снижению числа пикселей, задействованных для детектирования тени, что увеличит погрешность.

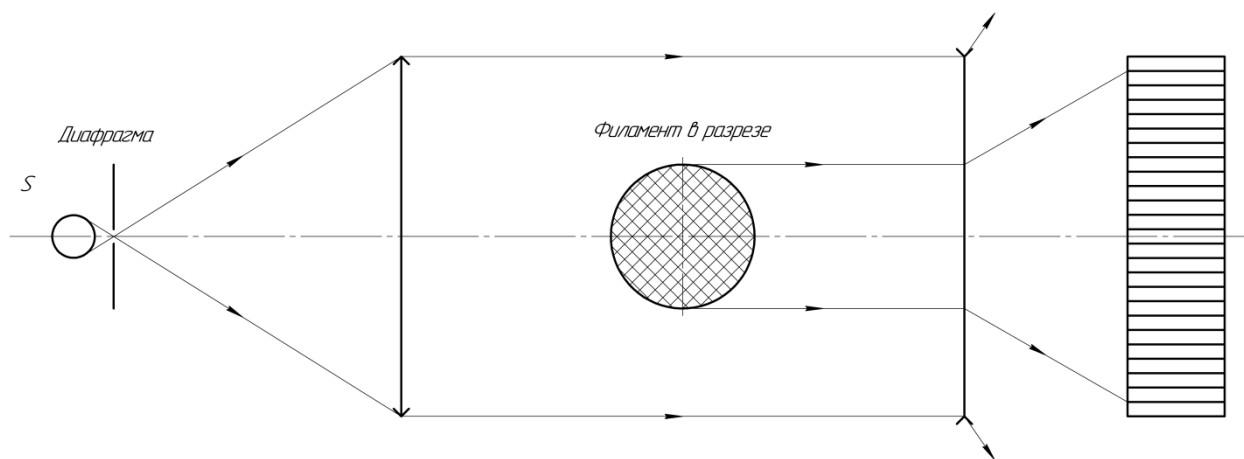


Рисунок 3 - Оптический канал с увеличением тени

Также стоит отметить, что возможен вариант, исключаящий применение коллимирующих линз (рис. 4а). В этом случае размер тени будет линейно зависеть от расстояния между источником света и прутком. Однако, благодаря процессу измерения в двух координатах, это расстояние можно узнать. Для этого достаточно заложить в микроконтроллер алгоритм расчёта координаты центра тени. Таким образом, использование двух МФПЛ не только позволяет измерить эллиптичность прутка, но и упростить конструкцию изделия, что также делает более оправданным применение дополнительной МФПЛ. [3]

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**



Более того, можно исключить и диафрагму, оставив только источник света и фотоприёмник (рис. 4б). Это приведёт к тому, что филамент будет облучаться неточечным источником, и, как следствие, на фотоприёмнике появится полутень, которая может внести неопределённость в границах тени и усложнить вычисление её длины. Однако проведённые исследования [3] показывают, что вполне возможно найти размер тени, не смотря на полутень от неточечного источника света. По этой причине фотоприёмник будет работать в составе оптического канала, структура которого представлена на рисунке 4б.

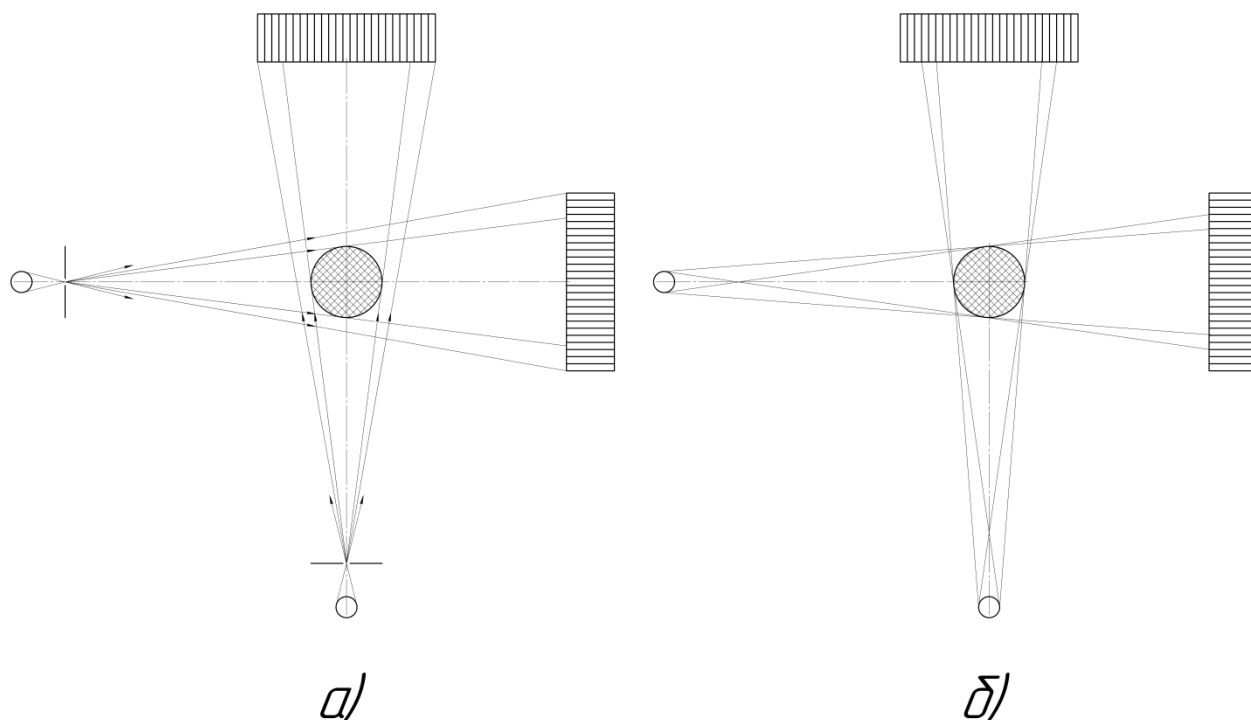


Рисунок 4 - Оптические каналы без коллимирования: а) - с диафрагмой; б) – без диафрагмы

### 1.3 Анализ фотоприёмника

В качестве фотоприёмника выступает ПЗС-линейка TCD1304DG [4], так как она имеет не избыточно большое число пикселей, у которых малые геометрические размеры. Основные характеристики линейки приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные технические характеристики МФПЛ TCD1304

Параметр МФПЛ	Значение параметра
Число пикселей, шт.	3648
Размеры пикселя, мкм x мкм	8 x 200
Диапазон рабочих тактовых частот, МГц	0,8...4
Диапазон частот отсчётов выходного сигнала, МГц	0,2...1
Диапазон напряжений питания, В	3...5,5
Спектральный диапазон чувствительности пикселей, нм	400...700
Типовое выходное сопротивление, Ом	500

В целом, МФПЛ на основе приборов с зарядовой связью имеют высокий коэффициент заполнения пикселями приёмного окна, разброса в чувствительности почти нет. Но частота

опроса таких линеек низкая, а опросить произвольную часть фоточувствительной области нельзя. Однако в нашем случае высокоскоростной вывод информации не требуется.

Сама МФПЛ выполнена в фирменном керамическом DIP-корпусе с 22 выводами. Длина фоточувствительной области составляет 29,1 мм.

Для управления линейкой помимо тактовых импульсов, на неё должны поступать два управляющих сигнала на входы SH (Shift Gate) и ICG (Integration Clear Gate). Первый отвечает за зарядку ёмкостей всех пикселей до опорного напряжения перед началом интегрирования оптической мощности. При попадании на пиксель оптической мощности, фотодиод, находящийся в нём, формирует фототок, который разряжает ёмкость. А когда интегрирование завершается, второй сигнал переводит заряды в этих ёмкостях в аналоговый сдвиговый регистр, который через каждые четыре тактовых импульса выводит на выход МФПЛ по одному значению в порядке возрастания номера пикселя. Из механизма работы линейки этого можно сделать вывод, что она инвертирующая – максимальный сигнал будет соответствовать тени.

В первом приближении можно принять, что тень, отбрасываемая от филамента, имеет вид распределения Гаусса (рисунок 5), что соответствует точечному источнику излучения.

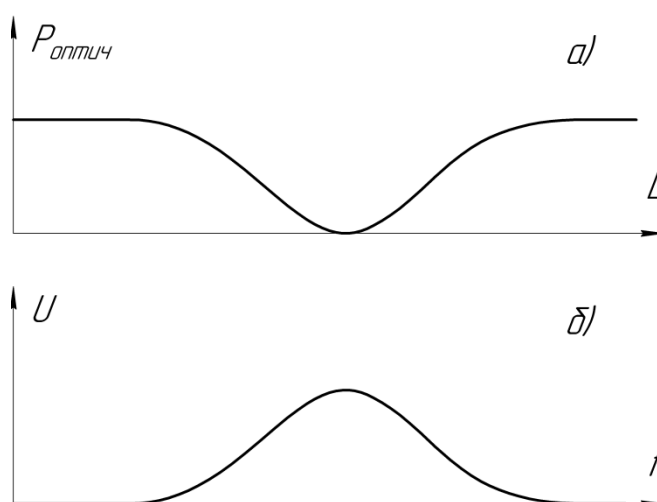


Рисунок 5 - Сигналы МФПЛ: а) – распределение входного оптического сигнала вдоль линейки; б) - выходной электрический сигнал инвертирующей линейки

#### 1.4 Методы обработки сигнала с фотоприёмника

Теперь, когда известен сигнал, который будет на выходе МФПЛ, можно говорить о методах его обработки. Из такого сигнала нужно извлечь две величины: длину тени и центр её положения на фотоприёмнике.

##### 1.4.1 Метод обработки с использованием компаратора

Суть данного метода заключается в следующем: нужно задаться тем, что полезный сигнал – в нашем случае тень – априорно выше некоего конкретного уровня напряжения. Реализация такого способа обеспечивается путём прохождения сигнала с выхода МФПЛ через аналоговый компаратор [5, с. 34], который сравнивает его с заданным порогом, так как показано на рисунке 6.

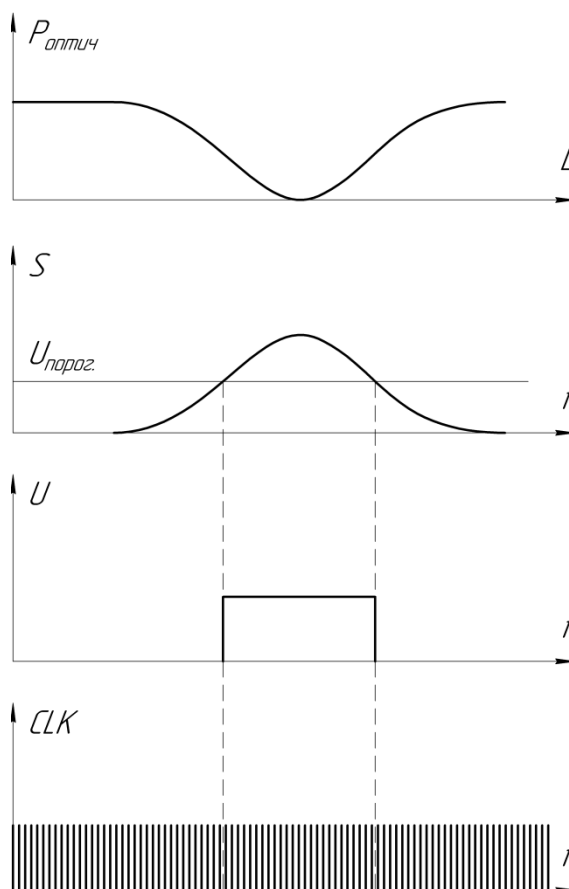


Рисунок 6 - Сигналы МФПЛ:  $P_{\text{опт}}(L)$  – распределение входного оптического сигнала вдоль линейки;  $S(t)$  - выходной электрический сигнал инвертирующей линейки;  $U(t)$  – выходной сигнал с компаратора;  $CLK(t)$  – тактовые импульсы МФПЛ

Заранее известно, что на опрос одного пикселя приходится некоторое число тактовых импульсов, поданных на линейку. «Для определения количества тёмных пикселей достаточно посчитать количество тактовых импульсов, поданных на линейку во время присутствия логической единицы, и разделить это количество на число тактовых импульсов, необходимое для опроса одного пикселя» [3]. Для определения длины следует умножить количество тёмных пикселей на длину одного такого.

Для расчёта координаты центра тени требуется знать номер пикселя, на напряжении которого компаратор сформировал передний фронт импульса в текущем кадре и прибавить к нему половину тёмных пикселей.

Этот способ хорош своей нетребовательностью к вычислениям, относительной простотой реализации. К недостаткам можно отнести отсутствие информации о характере тени: нельзя определить точно местоположение пика, который в силу отсутствия коллимации



излучения и возможного смещения филамента с оптической оси канала необязательно должен находиться в центре тени.

### 1.4.2 Метод обработки с использованием АЦП

В основе данного метода лежит аналого-цифровое преобразование выходного сигнала с МФПЛ. В этом случае значение напряжения с каждого пикселя преобразуется в цифровой вид. Таким образом, весь кадр, выдаваемый линейкой, должен храниться в виде массива значений напряжений пикселей.

Ясно, что потребуется АЦП, который будет успевать преобразовывать величину каждого пикселя до того, как на выходе появиться значение следующего.

Желательно для повышения точности, устранить постоянную составляющую сигнала и затем выполнить его нормированное к опорному напряжению АЦП усиление для того, чтобы максимально расширить используемый преобразователем динамический диапазон. Или же отдать предпочтение скорости преобразования, выбрав более скоростной режим работы АЦП, за счёт уменьшенной разрешающей способности.

Очевидное преимущество такой обработки сигнала в том, что известно полное распределение оптической мощности по всей длине МФПЛ. Благодаря полноценному массиву данных, появляется гибкость в использовании различных при подсчёте длины тени и её координаты. Однако есть и существенный недостаток в виде большой объёмности данных и требовательности к скорости преобразования АЦП. Даже если МФПЛ будут работать на минимальной частоте 1 МГц, частота обновления информации составит при этом 200 кГц. А так как линейки две, то АЦП должен совершать два преобразования и переключение между каналами менее, чем за 5 мкс.

### 1.4.3 Комбинированный метод

Как и следует из названия, данный метод сочетает в себя два предыдущих. Идея такого способа в том, чтобы оцифровать не весь сигнал с МФПЛ, а только ту его часть, которая выше порога напряжения, установленного на одном из входов компаратора. Таким решением объединяются преимущества обоих способов: с одной стороны, у нас есть информация о характере тени, а с другой – отсеивается ненужная информация на аппаратном уровне, за счёт чего объём данных значительно сокращается.

Разумеется, в предыдущем способе с АЦП также возможно устранить бесполезную информацию путём перебора массива данных, отсеивая значения «переступающие» пороговый уровень. Но проблема в том, что на момент начала работы с информацией мы имеем большое количество данных, которые требуется обработать. И из этого можно сделать вывод о том, что полностью избавиться от работы со значительным объёмом информации нельзя в силу того, что нужно, как минимум, затратить время на уменьшение массива.

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Комбинированный способ предлагает уменьшить объём данных до того, как он начнёт окажется в памяти и начнёт обрабатываться логикой устройства. К недостаткам можно отнести усложнение алгоритма работы устройства в целом, из-за необходимости обеспечения работы АЦП только в некоторые произвольные моменты времени, соответствующие появлению сигнала тени на выходе линейки. Также, способ не решает проблемы требовательности к производительности АЦП.

## **1.5 Способы передачи данных на персональный компьютер**

Одна из поставленных задач заключается в передаче данных о диаметре и эллиптичности филамента на персональный компьютер (ПК). Очевидно, что это придётся реализовать посредством стандартных интерфейсов передачи данных, которые наиболее часто имеются на компьютере.

### **1.5.1 Интерфейс RS-485**

Промышленный стандарт физического уровня для протокола UART. На ПК поддерживается наличием COM-порта. Предельная скорость передачи данных может достигать 10 Мбит/с. Расстояние при данной скорости ограничено 10 м, однако может быть увеличено пропорционально уменьшению скорости обмена данными. Отличается крайне простой реализацией, неприхотливостью. Асинхронный интерфейс практически всегда встречается в микроконтроллерах. Однако сам стандарт RS-485 поддерживается по большей части промышленными компьютерами. Чтобы передавать по нему данные на ПК, требуется конвертация в другой интерфейс, который поддерживает компьютер, например в USB. Конвертер интерфейса следует располагать вблизи ПК, чтобы большую часть пути сигнал проходил через RS-485.

### **1.5.2 Интерфейс USB**

Данный последовательный интерфейс находится практически в каждом ПК. USB обладает избыточной для поставленной задачи пропускной способностью в режиме Low-speed до 1500 Кбит/с. Так же стоит отметить, что, благодаря существованию в стандарте USB классификации периферийных устройств по их назначению, нет необходимости писать отдельный драйвер для проектируемого узла. В случае реализации этого интерфейса можно представить разрабатываемый датчик как устройство класса CDC (communications device class) - популярные операционные системы, как правило, уже предусматривают наличие драйвера для работы с таким типом периферийных устройств. К преимуществу можно отнести также и то, что USB может не только производить обмен данными, но и обеспечить электрическим питанием периферийное устройство.

К недостаткам можно отнести ограниченную пятью метрами длину кабеля – всё же фактической целью является соединение линии производства филамента, в которой и будет постоянно находиться измерительный прибор, и не факт, что компьютер возможно будет

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

поставить достаточно близко. Второй, более существенный недостаток, заключается в сложности реализации: сам протокол передачи данных сложен сам по себе, что серьёзно усложнит алгоритм работы устройства в целом, либо нужно ставить преобразователь более простого интерфейса в USB.

### 1.5.3 Интерфейс Ethernet

«Семейство технологий пакетной передачи данных между устройствами для компьютерных и промышленных сетей. Стандарты Ethernet определяют проводные соединения и электрические сигналы на физическом уровне, формат кадров и протоколы управления доступом к среде — на канальном уровне модели OSI. Ethernet в основном описывается стандартами IEEE группы 802.3 [6]».

Преимущество такой технологии заключается в виде возможности работы проектируемого устройства с персональным компьютером, как минимум, в рамках локальной сети, как максимум - через глобальную сеть. К тому же, алгоритм работы более простой, по сравнению с USB. Патч-корд, посредством которого могут соединяться разрабатываемый узел и ПК, может быть выполнен с экранированием (тип FTP), что благоприятно сказывается на помехозащищённости. Также, патч-корд имеет: большую длину порядка несколько десятков метров; улучшенную в сравнении с кабелем механическую прочность, что хорошо для промышленности. Скорость обмена может достигать до 10 Мбит/с, или даже до 100 Мбит/с, в зависимости от конкретного стандарта.

Как недостаток – ПК в подавляющем своём числе имеют только один физический Ethernet – порт, который зачастую уже использован. Проблема может быть решена использованием модема, либо освобождение порта Ethernet.

### 1.5.4 Интерфейс Wi-Fi

Технология беспроводной локальной сети с устройствами на основе стандартов IEEE 802.11. Её применение в данном случае может быть обусловлено высокой помехоустойчивостью, отсутствием необходимости прокладывать кабель. В свою очередь, Wi-Fi приборы не создают проблем для узкополосных сигналов. В тоже время, потребуется снабдить проектируемый прибор специальным контроллером, решить проблему передачи ему параметров сети, в которой устройство будет играть роль клиента. Можно поступить двумя способами:

- 1) заказчик заранее сообщает параметры своей сети Wi-Fi;
- 2) организовать возможность передачи пользователем этих параметров посредством другого интерфейса через ПО на ПК перед непосредственной установкой датчика на линию производства.

У первого варианта недостаток в том, что заказчик передаёт свои данные третьим лицам. К тому же он может изменить их в процессе эксплуатации, а это приведёт к

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16



невозможности работы сети, так как, данные, заложенные в датчике, уже будут неактуальными.

Второй способ плох тем, что придётся организовывать дополнительный интерфейс передачи данных, ради того, чтобы пользователь имел возможность вводить свои данные самостоятельно.

Таким образом, нежелательно использовать для передачи данных только Wi-Fi, но тем не менее, он будет приятным дополнением к основному проводному интерфейсу, который не требует аутентификации паролей/логинов/имён сетей.

## **1.6 Выбор излучателя**

В качестве источника оптического излучения может выступить светодиод. Излучаемой им оптической мощностью довольно легко управлять. Ранее отмечалось, что оптический канал будет организован без диафрагмы. А у светодиода относительно узкая диаграмма направленности – его излучение не затронет фотоприёмник из соседнего оптического канала. Также, светодиод может обладать достаточно малой излучающей площадкой: размер стороны таковой составляет порядка от 0,2 мм [7, с. 32] для компонентов поверхностного монтажа, что несколько уменьшит эффект неточечности излучателя по отношению к диаметру филамента.

Другой вариант источника света – полупроводниковый лазер. Размеры его светящейся области ещё меньше, чем у светодиода, поэтому картина, выдаваемая фотоприёмником получится более контрастной. С другой стороны, излучение лазера когерентно, в силу чего дифракционные свойства проявляются сильнее, чем у светодиода.

Таким образом, с точки зрения процесса измерения нельзя сказать однозначно, какой из облучателей лучше, поэтому желательно оставить возможность для использования обоих.

Длина волны должна выбираться исходя из спектральной чувствительности фотоприёмника. В то же время, следует смещать длину волны в сторону коротких, так как это уменьшает эффекты дифракции (особенно актуально для лазера).

### **1.6.1 Управление облучателями**

Стоит начать с того, что просто подключить излучатель через резистор к источнику постоянного напряжения нельзя.

Это обусловлено тем, что это решение подойдёт только для конкретного экземпляра и только на небольшой промежуток времени. Это связано с разбросом характеристик конкретных излучателей и разбросом чувствительностей МФПЛ. Соответственно, сопротивление, обеспечивающее одинаковую оптическую мощность, для каждого экземпляра индивидуальное. Недолговечность такого решения объясняется изменением характеристик облучателя во времени за счёт постепенной деградации кристалла. Может и оказать влияние запыление фотоприёмника и облучателя.

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Таким образом, в случае реализации такого решения каждый оптический канал в каждом отдельном устройстве придётся настраивать индивидуально не только на стадии сборки, но и в процессе эксплуатации. Это, в свою очередь, приводит к удорожанию жизненного цикла устройства.

В этом случае было бы логично использовать МФПЛ как элемент обратной связи для облучателя – можно выделить небольшую часть пикселей в априорно неиспользуемой фоточувствительной области линейки с целью определения уровня засветки. А на основании сигнала с этих пикселей регулировать яркость облучателя.

Один из наиболее доступных и простых методов электронного управления оптической мощностью облучателя заключается в подаче на него ШИМ – сигнала [8]. В этом случае, частота сигнала должна быть на порядок больше частоты смены кадров МФПЛ, чтобы за каждый цикл опроса на фотоприёмник упала примерно одинаковая усреднённая оптическая мощность, где её интегрирование происходит в ёмкостях пикселей (рисунок 7а). Как вариант, можно сгладить ШИМ-сигнал, проведя его через ФНЧ. Либо выбрать период ШИМ-сигнала, кратный периоду кадров, чтобы на каждый кадр приходилось одинаковое количество импульсов.

Однако, если для светодиода будет достаточно малого тока, который может обеспечить выход ШИМ-контроллера, то лазеры, как правило, потребляют больше. Поэтому, логично обеспечить работу лазера посредством источника тока, управляемого напряжением [9, с. 78]. А подавая на его вход ШИМ-сигнал, получим источник импульсного тока. Так как в конечном изделии будет лишь один тип излучателя, целесообразно использовать для подключения или светодиода, или лазера один и тот же источник тока. Для этого требуется только рассчитать номиналы входящих в него радиоэлементов для нужного тока. Использование одной универсальной схемы управления хорошее преимущество, так как экономит ресурсы управления, снижает количество электро- радиоэлементов в схеме.

Для того, чтобы не зависеть от длительности кадра, можно работать с облучателями и в режиме постоянного тока. Для этого тем же источником тока, нужно управлять постоянным напряжением, которое можно получить двумя способами. Можно пропустить ШИМ-сигнал через ФНЧ. В этом случае постоянное напряжение на выходе фильтра все равно будет обладать нестабильностью. К тому же ФНЧ внесёт в регулировку инерционность.

Другой вариант – для большей стабильности управляющего напряжения и меньшей инерционности отказаться от ШИМ и использовать вместо неё ЦАП. Как правило, ЦАП преобразуют цифровой сигнал в ток. Поэтому следует либо преобразовать ток в напряжение [10, с. 643-644] и подавать его на источник тока, управляемый напряжением; либо применить источник тока, управляемый выходным током ЦАП [9, с. 85-86]. Однако сам факт применения ЦАП делает этот вариант дороже.

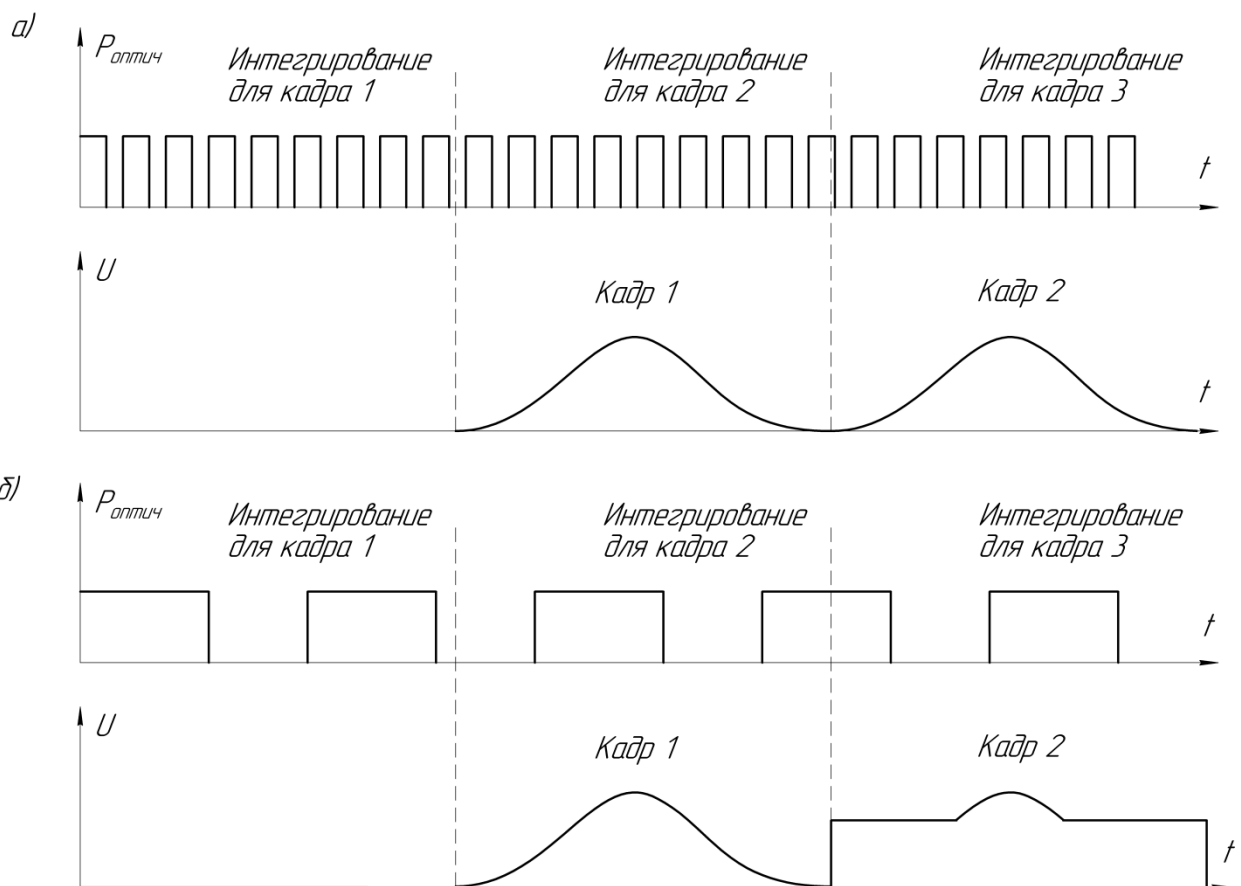


Рисунок 7 - Управление оптической мощностью с помощью ШИМ: а) – мощность, приходящаяся на каждый кадр одинакова, поэтому изображения с каждого кадра идентичны; б) – картины кадров разные: мощность, попавшая на инверсную МФПЛ на втором кадре меньше, чем на первом.

## 1.8 Выбор устройства управления

Теперь, когда стали ясными примерные требования к системе управления датчиком, можно рассмотреть варианты её реализации.

### 1.8.1 Программируемые логические интегральные схемы

Представляют собой БИС, которая используется для создания конфигурируемых электронных схем. В отличие от микросхем стандартной логики работа ПЛИС определяется не в процессе производства, а путём программирования. ПЛИС, как правило, используют для управления фотоприёмными матрицами и обработки поступающих с них данных [11].

Существенным преимуществом ПЛИС является максимально высокая скорость работы, физически ограниченная только тактовой частотой. Важно отметить, что возможно использовать большую гибкость при разработке внутренней схемы ПЛИС: в любой удобной конфигурации можно воспроизвести любой узел: таймеры счётчики, ШИМ-контроллеры, интерфейсы передачи данных, и т. д. Не зависимо от сложности схемы, задействованного в

ней числа компонентов, обеспечено использование минимального пространства на печатной плате.

ПЛИС присущи такие недостатки, как:

- а) высокая цена;
- б) повышенная сложность проектирования: может потребоваться знание специальных языков программирования, особенно если схема большая (Verilog, VHDL);
- в) отсутствие готовых узлов: гибкость создания схем, даваемая ПЛИС, оборачивается необходимостью подробно продумывать работу каждого узла, что ещё больше осложняет проектирование;
- г) могут остаться неиспользованные логические элементы – выходит, что часть денежных средств, уплаченных за ПЛИС, никак не используются.

### 1.8.2 Дискретная логика

Подразумевает использование готовых микросхем комбинационной логики и последовательностных устройств. От предыдущего варианта отличается тем, что все логические элементы дискретны, а не выполнены на одном кристалле. Их нет нужды программировать – их функции определяются на этапе производства. На практике существуют схемы, построенные на дискретной логике и работающие с фотоприёмниками [12].

Перед ПЛИС реализация на дискретной логике имеют ряд преимуществ:

- а) в схеме присутствуют только те элементы, которые нужны для работы схемы;
- б) максимальная свобода выбора элементной базы, в частности можно приобрести уже готовые узлы (ШИМ-контроллеры, например);
- в) нет необходимости приобретать IDE, отладочную плату, программатор.

Однако, алгоритм уже собранной схемы невозможно изменить, в отличие от ПЛИС, которую всегда можно перепрограммировать. Вдобавок, невозможно использовать программное представление схемы, в случае её сложности или специфичности. К тому же скорость работы дискретной логики ниже таковой у ПЛИС. Остается вопрос с ценой. Если говорить о дискретной логике, то с количеством элементов растёт и цена. С ПЛИС же наоборот: если схема большая и имеет сложный функционал, то выгоднее купить одну ПЛИС, чем десятки отдельных микросхем.

### 1.8.3 Микроконтроллеры

Типовой микроконтроллер представляет собой кристалл, на котором находятся процессор, память: оперативная и/или постоянная, система ввода/вывода, АЦП, таймеры-счётчики и иные периферийные устройства. Работа МК определяется программой, записанной в его память. Алгоритм, как правило, пишется в IDE на языке ассемблера или C/C++, хотя существуют интерпретаторы и на другие языки. Может быть применён для управления фотоприёмной линейкой. [13]

Достоинством микроконтроллера является наличие в нем разнообразной периферии, а благодаря существованию огромного количества различных видов МК, можно легко подобрать именно ту модель, на «борту» которой есть необходимые для выполнения поставленной задачи устройства. Ещё одним плюсом является невысокая цена микроконтроллеров.

В недостатки можно записать более медленную скорость работы, в сравнении с ПЛИС, в силу программной реализации алгоритма работы, а не аппаратной. Так же, требуется наличие программатора, IDE и отладочной платы, что несколько увеличит себестоимость проектируемых на основе МК устройств.

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21



## 2 ОБОСНОВАНИЕ СРУКТУРНОЙ СХЕМЫ

Исходя из технического задания и результатов аналитического обзора, известно, что устройство будет содержать в себе две МФПЛ в качестве фотоприёмников и два SMD – светодиода (либо два лазера) для облучения. С учётом этого, проектируемый узел должен обеспечить выполнение следующих функций:

- а) нормальную работу двух МФПЛ TCD1304DG;
- б) извлечение информации о диаметре и эллиптичности филамента из сигналов, поступающих с выходов МФПЛ;
- в) возможность передачи результатов измерений на компьютер;
- г) регулировку оптической мощности облучателей, исходя из чувствительности МФПЛ;
- д) возможность дальнейшего функционирования узла, как регулятора производственного процесса.

Теперь, когда предъявлены основные требования к структуре узла, проведён обзор вариантов их возможного выполнения, можно выбрать один из них и подробно описать, каким образом он будет реализован.

### 2.1 Устройство управления

Исходя из того, что устройство управления должно иметь в своём составе ШИМ-контроллеры, АЦП, счётчики, контроллеры интерфейсов передачи данных, в качестве устройства управления будет выбран микроконтроллер AT91SAM7S64, так как дешевле приобрести все эти узлы в рамках периферийных устройств МК, чем каждый отдельно. Упроститься настройка и синхронизация всех модулей контроллера, в силу их программной настройки.

Указанная марка микроконтроллера имеет архитектуру ARM с 32-битной разрядностью. В AT91SAM7S64 входят также контроллер прерываний, повышающий возможности синхронизации работы периферии, и контроллер прямого доступа к памяти, позволяющий разгрузить ядро в процессе работы [14].

В силу использования микроконтроллера следует предусмотреть возможность его программирования и отладки на проектируемом узле. Важно отметить, что AT91SAM7S64 работает при +3,3 В и тактируется частотой 48,054857 МГц.

### 2.2 Организация управления фотоприёмной линейкой

Уже отмечалось, что для управления заданной МФПЛ требуется два сигнала: SH и ICG, а также подача тактовой частоты  $\Phi M$ , определяющую скорость работы линейки.

Чтобы определить параметры управляющих сигналов, требуется выбрать режим работы МФПЛ, которых всего два.

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

Первый – режим «электронного затвора» [4] - позволяет управлять временем интегрирования, а следовательно, регулировать величину оптической мощности, которая воздействует на линейку. Но в силу того, что имеется возможность управления оптической мощностью непосредственно через облучатели, такой режим работы МФПЛ задействован не будет.

По этой причине будет задействован второй – стандартный режим работы, принцип действия которого отображён на рисунке 8.

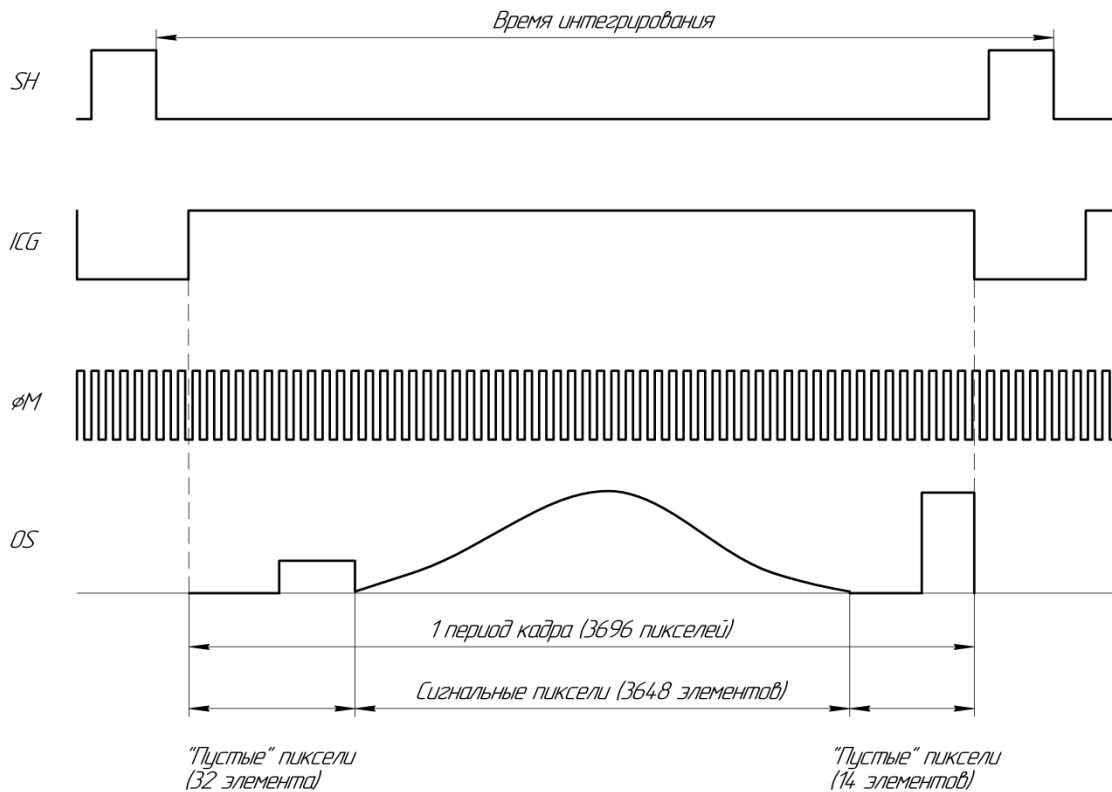


Рисунок 8 - Временная диаграмма стандартного режима работа МФПЛ

Исходя из временной диаграммы можно сделать вывод о том, что не все пиксели в МФПЛ несут в себе полезную информацию. Возможно, существование этих пикселей обусловлено обеспечением с их помощью нормальной работы неких внутренних механизмов линейки. Но тем не менее в силу того, что данная МФПЛ является прибором с зарядовой связью – работает за счёт аналогового сдвигового регистра – эти неинформативные пиксели придётся опросить. Это означает, что напряжения, которые содержатся в них независимо от входного сигнала, попадут в выходной сигнал: тридцать два значения в его начало и четырнадцать – в конец. Соответственно, к методу обработки сигнала предъявляется ещё одно требование – исключить эти значения.

Также, важно отметить, что между импульсами ICG и SH должны быть выдержаны определённые временные соотношения, показанные на рисунке 9. Значения этих временных интервалов приведены в таблице 2.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

Лист

23

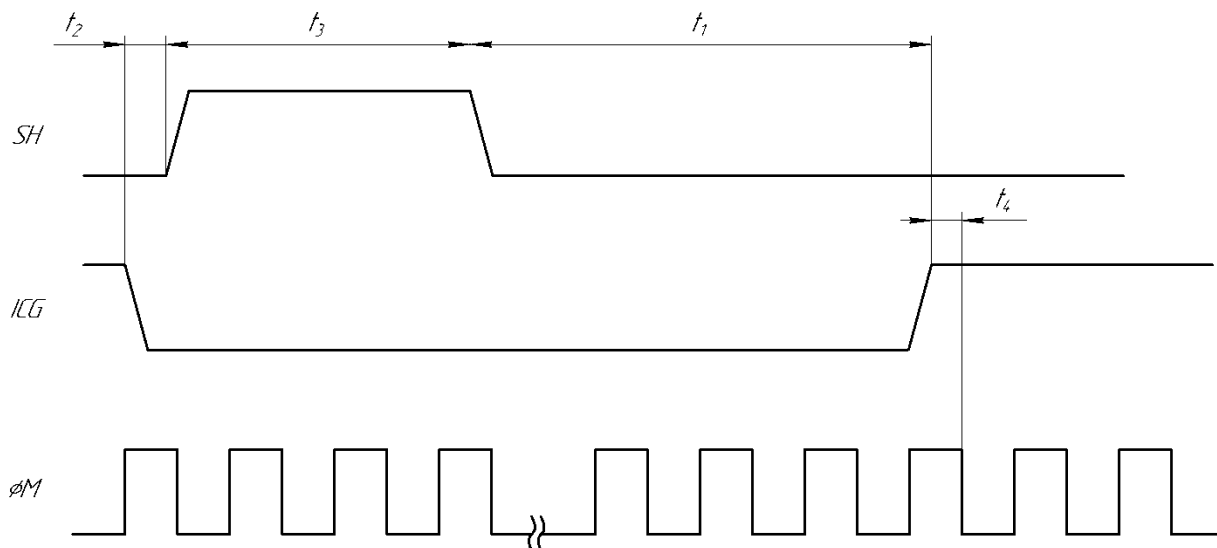


Рисунок 9 - Временные соотношения между управляющими сигналами

Таблица 2 - Значения временных интервалов

Интервал	Значение			Единица измерения
	Минимальное	Типовое	Максимальное	
t <sub>1</sub>	1000	5000	?	нс
t <sub>2</sub>	100	500	1000	нс
t <sub>3</sub>	1000	?	?	нс
t <sub>4</sub>	0	20	?	нс

Выдерживать описанные временные интервалы предлагается с помощью счётчика. Для этого следует выбрать значения временных интервалов такими, чтобы они были кратными периоду тактовой частоты линейки. В таком случае, длительность управляющих импульсов, их расположение друг относительно друга во времени можно представить через число тактовых импульсов. Соответственно, на основании достижения счётчиком определённого числа тактовых импульсов φM можно создать систему формирования управляющих импульсов ICG и SH. С помощью счётчика также возможно устранить из сигнала значения напряжений от неинформативных пикселей: достаточно посчитать количество тактовых импульсов, которые опросят эти пиксели, а затем сформировать импульс ENABLE, разрешающий микроконтроллеру работу с сигналом, так как это показано на рисунке 10.

AT91SAM7S64 имеет три шестнадцатитрёхбитных счётчика. Для формирования управляющих сигналов и устранения ненужных значений напряжений из сигнала МФПЛ будет задействован один счётчик T/C0. Зная, что для вывода значения одного пикселя необходимо подать четыре тактовых импульса, требуется, чтобы таймер считал количество тактовых импульсов N<sub>φM</sub>, необходимых для опроса N<sub>пикс.</sub> = 3694 пикселей, то есть:

$$N_{\phi M} = N_{\text{пикс}} * 4 = 3694 * 4 = 14776;$$

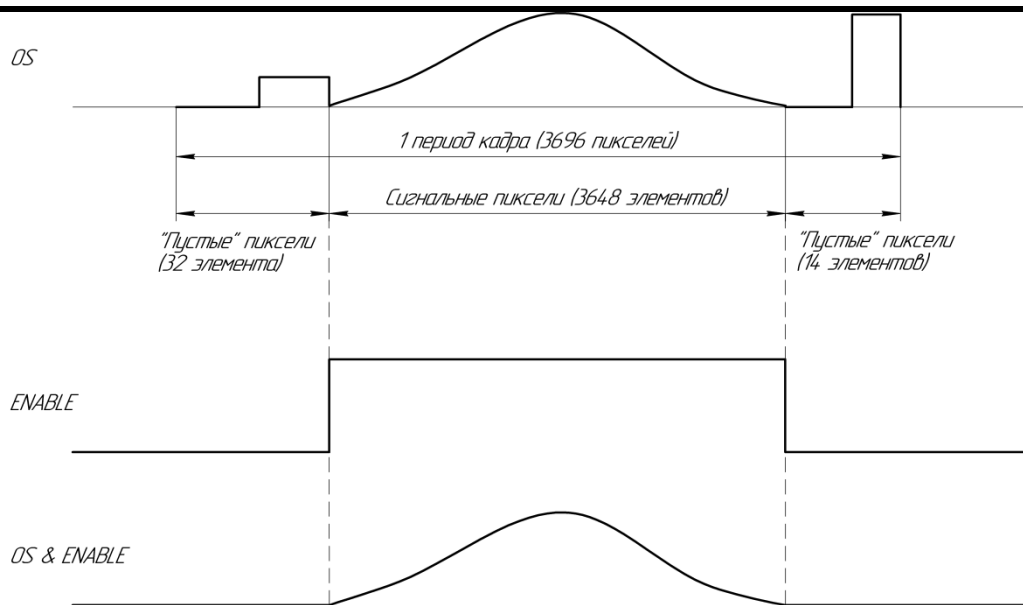


Рисунок 10 - Импульс ENABLE

Именно столько тактовых импульсов должно быть подано на МФПЛ во время присутствия логической единицы на её входе ICG. Во время сброса этого управляющего импульса так же должно пройти определённое количество тактов. Минимальное время сброса составляет 2,1 мкс. Но для определения числа тактовых импульсов требуется также знать их период, который может варьироваться в пределах 0,25...1,25 мкс. И требуется, чтобы минимальное время сброса всегда выдерживалось, не зависимо от периода. Так как максимальное время сброса не ограничено, будем исходить из минимально возможного значения периода  $T_{min} = 0,25$  мкс, что соответствует частоте работы МФПЛ 4 МГц:

$$N_{упр} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{T_{min}} = \frac{1 + 0,1 + 1}{0,25} = 8,4 \Rightarrow 9;$$

Таким образом, в течение каждого кадра на вход  $\emptyset$ М TCD1304DG должно поступать N импульсов:

$$N = N_{пикс} + N_{упр} = 14776 + 9 = 14785.$$

Важно отметить, что один таймер-счётчик на данном микроконтроллере может сформировать максимум два импульса, в то время как требуется три. Поэтому импульсы ICG и ENABLE будут сформированы таймером. А импульс SH будет получен в результате укорочения инвертированного импульса ICG. Правда в этом случае задержка  $t_2$  будет равна нулю, в то время как в документации на микросхему заявлено минимальное значение в 100 нс. Однако, как показала практика, это не повлияет на нормальную работу МФПЛ.

Также нельзя оставить без внимания выбор рабочего напряжения линейки. AT91SAM7S64 имеет рабочее напряжение 3,3 В, а МФПЛ – 3...5,5 В. Логично с одной стороны подавать на линейку те же 3,3 В. Однако, как показала практика для TCD1304DG для нормальной работы требуется 5 В даже на минимальных тактовых частотах. Так как МФПЛ

будет работать при 5 В, а микроконтроллер – при 3,3 В, требуется предусмотреть устройство согласования логических уровней. Частоту тактирования МФПЛ следует определить в последнюю очередь, когда будут рассмотрены более подробно возможности управляющей системы по обработке сигнала.

Способов формирования тактового сигнала  $\Phi M$  в виде меандра существует большое количество. Можно создать тактовый генератор на основе ШИМ-контроллера, логических элементов и. т. д. В этой связи, разумно будет выбрать метод формирования тактовой частоты в последнюю очередь из оставшихся ресурсов после того, как основные будут распределены между наиболее «нуждающимися» узлами.

### **2.3 Обработка выходного сигнала с фотоприёмной линейки**

Из выходного сигнала требуется извлечь три неизвестных:

- 1) диаметр филамента;
- 2) координату филамента;
- 3) уровень оптической мощности, воздействующий на МФПЛ.

Метод обработки информации во многом определяется возможностями микроконтроллера.

#### **2.3.1 Вычисление оптической мощности**

Способ с прямым использованием АЦП трудно реализуем для нахождения диаметра и координаты, так как TCD1304DG содержит три тысячи шестьсот сорок восемь пикселей, соответственно, полученных оцифрованных значений с двух таких линеек будет семь тысяч двести девяносто два. С таким количеством данных выбранный микроконтроллер не справится. А вот для оценки оптической мощности облучателей посредством определения значения среднего напряжения засвеченных пикселей метод вполне подходит. За счёт малого разброса чувствительностей пикселей данной ПЗС-линейки и практически равномерного распределения излучаемой smd-светодиодом оптической мощности по всей длине фоточувствительной области [3] можно снять напряжение только с одной засвеченной точки МФПЛ, так как в остальных участках (за исключением тени от прутка) сигнал будет точно таким же. Уровень «белого» в TCD1304DG составляет 1,2 вольта. Тени от непрозрачного филамента соответствует сигнал в 3 вольта, а от прозрачного – в 2 вольта [3]. Можно ограничиться оцифровкой показаний напряжений со ста пикселей (соответствует участку фоточувствительной области 80 мкм) и вычислить среднее арифметическое, чтобы учесть разброс чувствительности.

И всё же возможно, что на краях фоточувствительной области сигнал будет всегда чуть выше из-за того, что диаграмма направленности светодиода обеспечивает там меньшую мощность, чем в середине. Однако импульс ENABLE, сформированный схемой управления МФПЛ для устранения неинформативных пикселей, может быть так же использован для

запрета работы АЦП с краями информативной части фоточувствительной области, как показано на рисунке 11:

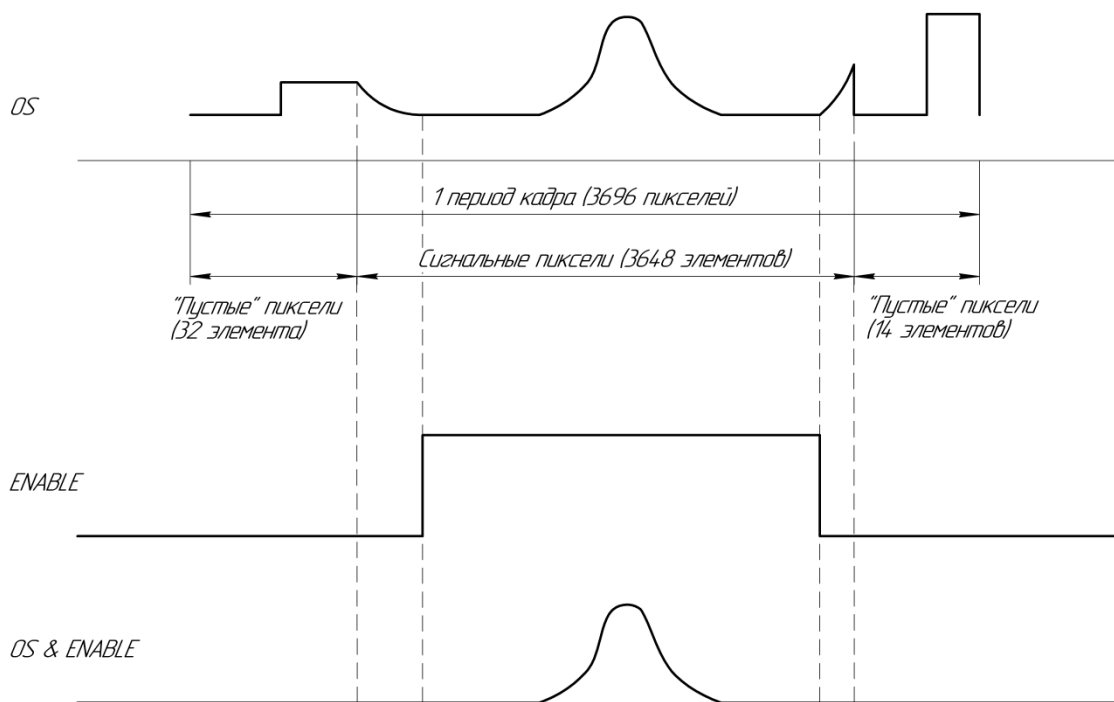


Рисунок 11 - Устранение неравномерной засветки из сигнала

В составе AT91SAM7S64 имеется восьмиканальный АЦП, который может совершить 533 тыс. выборки в секунду в восьмибитном режиме преобразования [14, с. 694]. Это значит, что для того, чтобы оцифровать одно значение потребуется 1,87 мкс. В качестве опорного напряжения можно использовать линию питания 3,3 В.

У нас имеется две МФПЛ, то есть понадобится два канала АЦП для отслеживания напряжений с выходов линеек. «Чтобы инициировать последовательность преобразований в нескольких каналах, необходима только одна команда запуска. Аппаратная логика АЦП автоматически выполняет преобразования в рабочих каналах, а затем ожидает нового запроса на запуск» [14, с. 463]. Поэтому, несмотря на использование двух каналов, нужна только одна команда, необходимая для преобразования напряжения с одного пикселя. Соответственно, для ста пикселей требуется сто импульсов. Однако, так как оцифровка происходит не параллельно, а последовательно, то преобразование двух текущих значений на двух каналах займёт уже минимум 3,74 мкс. Следовательно, период обновления информации на выходах МФПЛ должен быть больше. Например, при частоте тактирования TCD1304DG 1 МГц, период обновления сигнала на выходе составит 4 мкс. Запуск преобразований будет осуществляться посредством внешнего триггерного входа ADTRG. Процесс оцифровки начинает выполняться по обнаружению на этом входе положительного фронта импульса. Таким образом, процесс измерения будет происходить согласно рисунку 12.



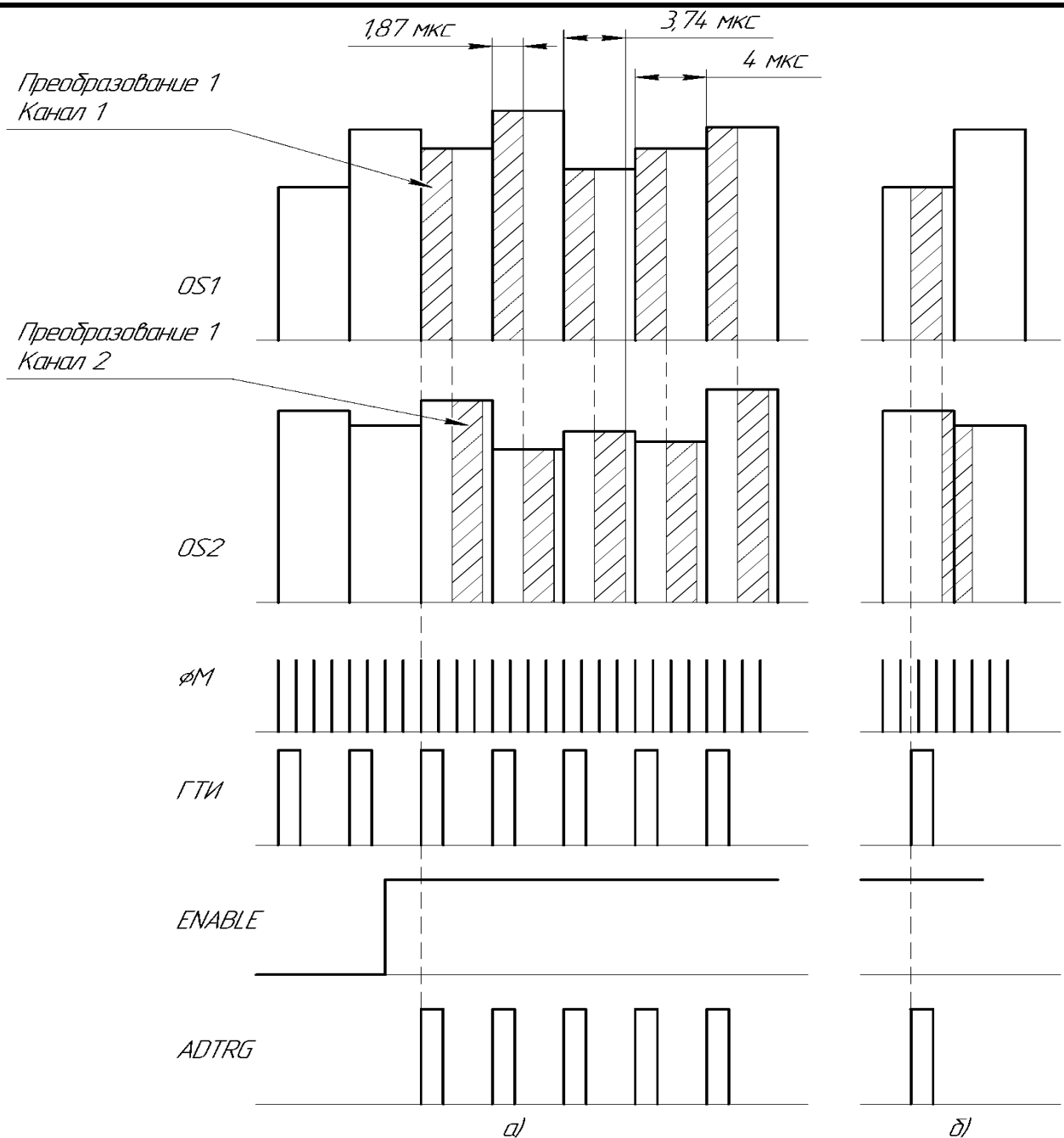


Рисунок 12 – Временные диаграммы, поясняющие процесс обработки сигнала с помощью АЦП: а) - все управляющие импульсы синхронизированы по положительному фронту с тактовым сигналом; б) – импульсы не синхронизированы с тактовым сигналом

Очевидно, что для того, чтобы успеть преобразовать значения обоих сигналов МФПЛ, процесс должен начаться сразу после обновления напряжения на выходе линейки, иначе, если будет задержка, в процессе одного из преобразований значение сигнала изменится, что нежелательно. Поэтому важно, чтобы положительные фронты импульсов ГТИ для ADTRG синхронизировались с передними фронтами тактового сигнала ФМ.

Сам ГТИ для ADTRG будет выполнен путём деления периода тактового сигнала ФМ с помощью внешнего счётчика для максимальной синхронизации.

Благодаря наличию периферийного контроллера прямого доступа к памяти (PDC), результаты преобразования будут заноситься в массив без участия ядра, что благоприятно скажется на производительности. Из принципа работы становится ясно, что импульсы

ADTRG будут запускать преобразование до тех пор, пока установлен импульс ENABLE и, следовательно, запускающих импульсов будет явно больше требуемых ста. В данном случае, за счёт задействия PDC, контроллер переместит в память лишь сто значений. И хотя АЦП будет и дальше совершать преобразования, значения в памяти фиксироваться не будут.

### 2.3.2 Вычисление координаты, диаметра и эллиптичности филамента

Использование АЦП в паре с компаратором имеет смысл только для уточнённого вычисления координаты, так как длина тени фактически будет определяться порогом срабатывания компаратора. АЦП в данном случае даст картину той части сигнала, на которую среагировал компаратор. А за счёт реализации математических алгоритмов – например, с помощью метода k-средних - можно точно вычислить пик тени (номер пикселя), который и будет считаться её серединой. Однако в силу того, что в проектируемой системе измерения не ожидается значимых отклонений пика тени от её середины, то смысл математической обработки отпадает, так как середину тени можно найти из её длины. А исходя из того, что размер тени определяется компаратором, то АЦП в таком случае не требуется.

Исходя из вышесказанного, для вычисления диаметра и координаты филамента оптимальным будет использование способа обработки сигнала МФПЛ, основанного на работе компаратора. Искомые параметры отражены на рисунке 13.

Ко входам компаратора подключены опорное напряжение и выходной сигнал с МФПЛ. Опорное напряжение выбирается исходя из того, какой уровень сигнала считается соответствующим тени от филамента, а какой уровню «белого». Во время присутствия тени компаратор срабатывает и формирует на своём выходе логическую единицу. Стоит отметить, что в силу имеющихся напряжений с неинформативных пикселей компаратор среагирует и на них, но, благодаря наличию сигнала ENABLE, ложные срабатывания можно устранить. И в конечном итоге таймеру-счётчику потребуется посчитать количество импульсов  $\Phi M$ , в время присутствия импульса от компаратора. В AT91SAM7S64 для подсчёта импульсов будут задействованы оставшиеся T/C1 и T/C2. Затем контроллер для вычисления размера тени разделит их на четыре, умножит на длину одного пикселя. Либо, логичнее считать не  $\Phi M$ , а сформированные для АЦП импульсы, подаваемые на вход ADTRG, так как они синхронизированы, а один такой импульс соответствует одному пикселю: нет нужды выполнять операцию деления. Таким образом, размер тени L будет определяться по формуле

$$L = N_{ADTRG} * l_{\text{пикс.}}; \quad (1)$$

где  $N_{ADTRG}$  – количество импульсов, поступивших на вход ADTRG во время присутствия импульса компаратора,  $l_{\text{пикс.}} = 8 \text{ мкм}$  – длина одного пикселя TCD1304DG.

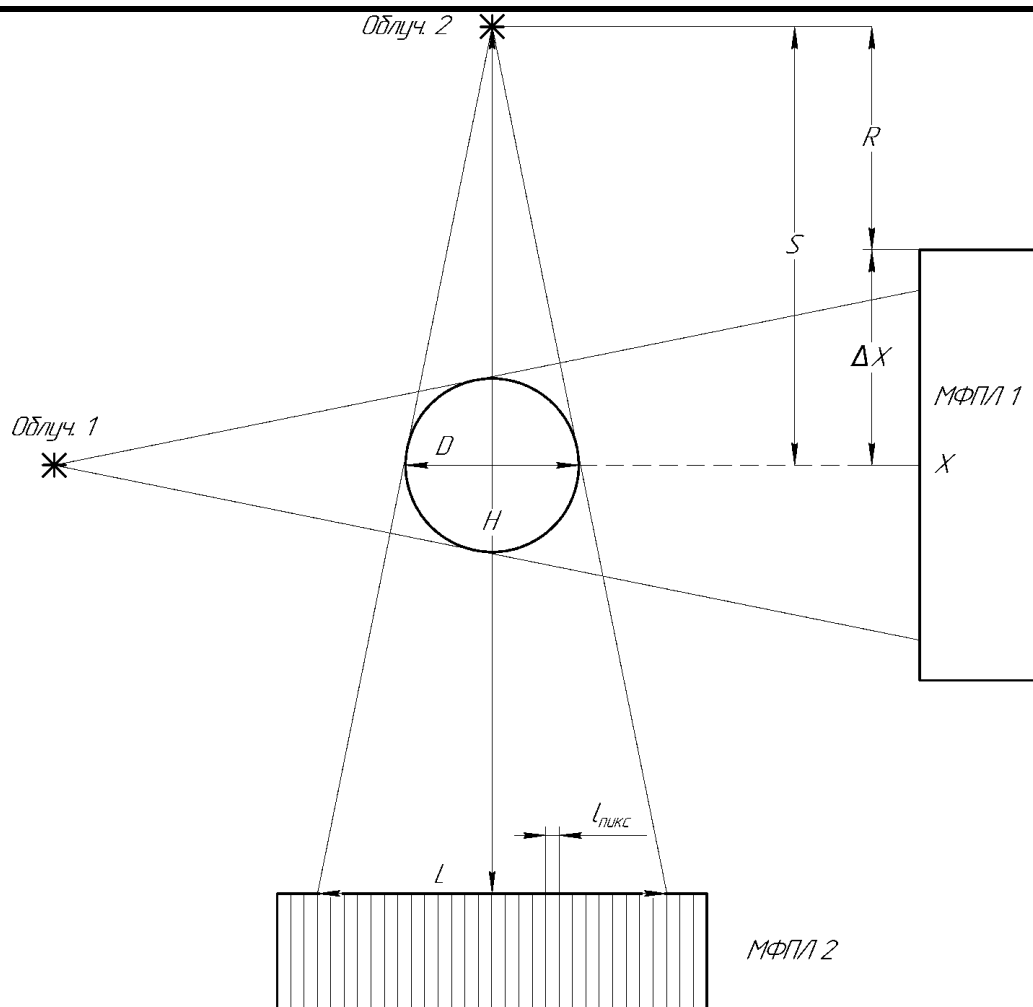


Рисунок 13 - Параметры в системе измерения

Чтобы найти координату  $X$  прутка, требуется знать номер пикселя  $N_{COM}$ , на котором компаратор сформировал положительный перепад и прибавить к нему половину тёмных пикселей  $N_{ADTRG}$ . Так как счётчик Т/С0, задействованный для управления МФПЛ уже ведёт подсчёт тактовых импульсов  $\phi M$ , то номер пикселя  $N_{COM}$  можно рассчитать по формуле (2):

$$N_{COM} = \frac{\phi M_{COM}}{4}, \quad (2)$$

где  $\phi M_{COM}$  – количество тактовых импульсов  $\phi M$ , поступивших на TCD1304DG на момент формирования компаратором положительного фронта импульса.

В итоге, с учётом (2) формула (3) для расчёта координаты  $X$  принимает вид:

$$X = N_{COM} + \frac{N_{ADTRG}}{2} = \frac{\phi M_{COM}}{4} + \frac{N_{ADTRG}}{2}. \quad (3)$$

Для расчёта расстояния  $S$  между облучателем и филаментом можно применить формулу (4):

$$S = R + \Delta X, \quad (4)$$

где R - заранее известное расстояние от плоскости соседнего облучателя до края фоточувствительной области МФПЛ,  $\Delta X$  - расстояние от края фоточувствительной области МФПЛ до координаты филамента X.

Величину  $\Delta X$  можно найти по формуле

$$\Delta X = X * l_{\text{фикс.}} \quad (5)$$

Процесс обработки выходного сигнала TCD1304DG поясняет рисунок 14.

А вот для того, чтобы найти диаметр оптическим каналам требуется работать в паре. Так как свет в оптическом канале не коллимирован, то существует зависимость размера тени L, находимого первым каналом, от расстояния S между облучателем и филаментом, находимого вторым каналом. Также, заранее зная неизменное расстояние между облучателем и фотоприёмником H, можем найти диаметр D по формуле (6), учитывая (1) - (5):

$$D = L * \frac{S}{H} = N_{ADTRG} * l_{\text{фикс.}} * \frac{R + \left( \frac{\Phi M_{COM}}{4} + \frac{N_{ADTRG}}{2} \right) * l_{\text{фикс.}}}{H}, \quad (6)$$

где H - неизменное расстояние между облучателем и фотоприёмником.

Зная значения диаметров сечения, фактически являющиеся главными осями эллипса, форму которого представляет в общем случае сечение филамента, пользуясь формулой (7) можно оценить эксцентриситет:

$$e = \sqrt{1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}}, \quad (7)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры филамента, измеренные первым и вторым измерительным каналом соответственно.

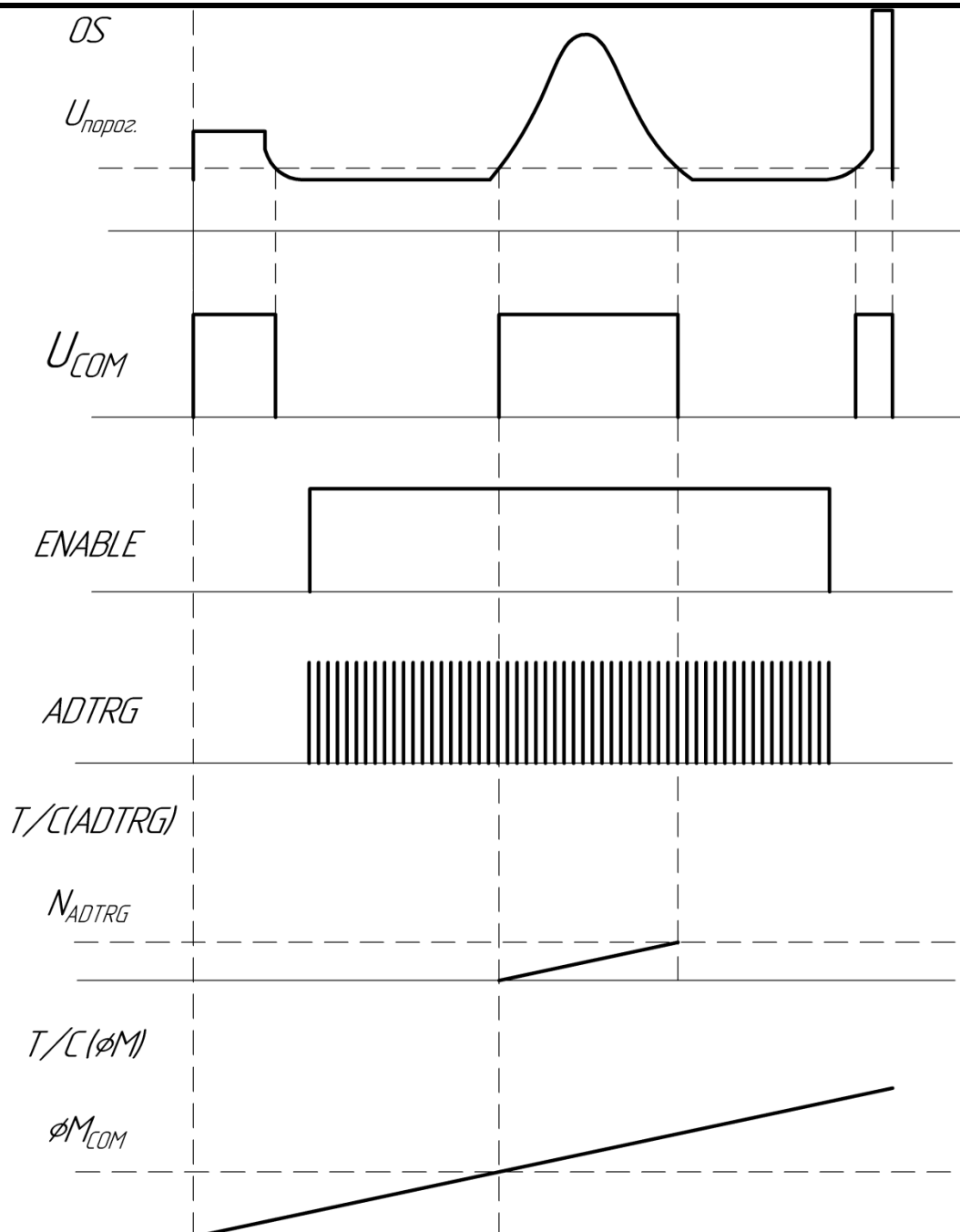


Рисунок 14 – Временные диаграммы, описывающие обработку выходного сигнала с помощью компаратора

## 2.4 Выбор облучателей и управление ими

В качестве облучателей будут выбраны smd-светодиоды. Они дешевле лазера и при своей низкой цене позволяют получить приемлемую картину кадра, о чём говорит проведённое исследование [3]. Лазер же, требует более сложной организации управления в виде источника тока, управляемого ШИМ-сигналом, в то время как на светодиод достаточно подавать ШИМ-сигнал напрямую, с «ноги» микроконтроллера. AT91SAM7S64 имеет ШИМ-контроллер с четырьмя независимыми каналами, два из которых можно задействовать для управления облучателями. Отмечалось, о том, что нужно выбрать период ШИМ-сигнала, опираясь на время одного кадра. В данном случае не представляется возможным сформировать ШИМ-сигнал с периодом точно кратным периоду кадра. Исходя из этого,

период ШИМ-сигнала должен быть много меньше длительности кадра. Так как тактовая частота определена равной 1 МГц, то легко найти время кадра:

$$T_{\text{кадр.}} = N * T_{\text{OM}} = 14785 * 1 = 14,785 \text{ мс.}$$

Известно, что ШИМ-контроллер в AT91SAM7S64 построен на шестнадцатибитном счётчике, который может считать тактовые импульсы с частотой  $f_M = 48,054857$  МГц. Причём период ШИМ-сигнала, как и общее количество шагов регулировки скважности, определяется значением  $REG_{T \text{ PWM}}$ , до которого считает счётчик. Таким образом, по формуле (8) можно найти период ШИМ  $T_{\text{PWM}}$

$$T_{\text{PWM}} = \frac{REG_{T \text{ PWM}}}{f_M}, \quad (8)$$

где  $REG_{T \text{ PWM}}$  – значение, до которого ведёт счёт счётчик ШИМ-контроллера,  $f_M = 48,054857$  МГц – частота тактирования счётчика ШИМ-контроллера.

Из этого следует, что чем меньше значение  $REG_{T \text{ PWM}}$ , тем с одной стороны: меньше период, но с другой – скважность изменяется менее гибко – в силу уменьшения общего количества шагов регулировки. Последнее также очень важно, по причине высокой чувствительности линейки. Если использовать ШИМ с большими шагами регулировки, то может сложиться ситуация, когда одно значение скважности слишком слабое для МФПЛ, а значение скважности, даваемое следующим шагом, слишком большое. Таким образом, эта погрешность  $\delta_{\text{REG}}$  определяется формулой (9) как половина шага дискретизации

$$\delta_{\text{REG}} = \frac{1}{2 * REG_{T \text{ PWM}}}. \quad (9)$$

Помимо шага регулировки существует и вторая погрешность: так как период ШИМ-сигнала в нашем случае не кратен длине кадра, то в нём будет укладываться нецелое число периодов. Иными словами, число всех периодов ШИМ-сигнала, полностью охватывающих кадр, складывается из периодов, полностью попадающих в кадр, и одного периода, который будет попадать в кадр лишь частично. Именно этим периодом и определяется вторая погрешность  $\delta_T$  по формуле

$$\delta_T = \frac{1}{2} * \frac{1}{N_T + 1}, \quad (10)$$

где  $N_T$  – количество периодов ШИМ-сигнала, полностью уложившихся в кадр МФПЛ.

Количество «целых» периодов  $N_T$  можно рассчитать приближенно по формуле (11) с учётом (8)

$$N_T \approx \frac{T_{\text{кадр.}}}{T_{PWM}} = \frac{T_{\text{кадр.}} * f_M}{REG_{T PWM}}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10), получим формулу для расчета погрешности  $\delta_T$

$$\delta_T = \frac{1}{2} * \frac{1}{N_T + 1} = \frac{1}{2} * \frac{1}{\frac{T_{\text{кадр.}} * f_M}{REG_{T PWM}} + 1}. \quad (12)$$

Очевидно, что обе погрешности  $\delta_T$  и  $\delta_{REG}$  зависят только от значения  $REG_{T PWM}$ . Ясно, что оно может быть только одно, и найти его можно, составив уравнение (13), приравняв для этого правые части (9) и (12):

$$\frac{1}{2 * REG_{T PWM}} = \frac{1}{2} * \frac{1}{\frac{T_{\text{кадр.}} * f_M}{REG_{T PWM}} + 1}. \quad (13)$$

Решив (13), получим значение  $REG_{T PWM} = 843$ . А подставив его в (9) и (12) затем просуммировав их, найдём относительную погрешность регулировки оптической мощности  $\delta$ :

$$\delta = \delta_T + \delta_{REG} = 0,12\%.$$

Частота ШИМ  $f_{PWM}$  при этом составит, исходя из (8):

$$f_{PWM} = \frac{f_M}{REG_{T PWM}} = 57 \text{ кГц.}$$

Абсолютную погрешность можно минимизировать за счёт уменьшения максимальной излучаемой светодиодами оптической мощности. Для этого достаточно лишь рассчитать токоограничивающее сопротивление не на номинальный ток, а на меньший в несколько раз.

Таким образом, схема удешевится ещё и за счёт не только самого облучателя, но простейшей схемы его управления, которая даст минимальную погрешность.

## 2.5 Алгоритм автоподстройки яркости светодиодов

Теперь, когда определён метод управления светодиодами через ШИМ-сигнал, когда известно, уровень яркости будет оцениваться по показаниям АЦП, можно разработать алгоритм автоматической подстройки оптической мощности, излучаемой светодиодами.

Регулировка будет проходить в два этапа:

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34



- 1) этап грубой регулировки;
- 2) этап точной регулировки.

В начальный момент времени на МФПЛ подаются тактовый сигнал и управляющие команды. Светодиоды не горят – скважность сигнала равна 0%. Сигнал с линейки соответствует постоянному напряжению 3 В. Подсчёт контролируемых параметров филамента не производится. Суть механизма грубой подстройки в том, чтобы постепенно начать изменение скважности и увеличивать её, ориентируясь на показания АЦП, до тех пор, пока уровень сигнала не опустится до уровня 1,2 В. Точка замера заранее выбрана так, что тень

от филамента не может упасть на неё. Скважность в этом режиме может только повышаться, а обновление её значения происходит каждый кадр в соответствии показаниями АЦП с контрольной точки.

Второй этап точной регулировки начинается сразу после того, как напряжение контрольной точки достигло 1,2 В. При таком уровне «белого» тень становится однозначно различимой и начинается процесс измерений. Обновление скважности теперь производится постепенно через некое кадров по показаниям АЦП, усреднённым по этому количеству кадров. В таком режиме значение скважности может как увеличиваться, так и уменьшаться, чтобы можно было держать значение уровня белого в районе 1,2 В. Важно, что при достижении отметки 1,15 В уровень белого больше не будет реагировать на увеличение оптической мощности, поэтому судить об её уровне, а соответственно, и о наличии теневого сигнала больше нельзя.

## 2.6 Интерфейсы передачи данных на ПК

AT91SAM7S64 имеет в своём составе порт USB – устройства, а так же асинхронный интерфейс UART, на котором можно реализовать RS-485. Поэтому, для того, что избежать задействования внешних контроллеров интерфейсов, логично использовать имеющиеся.

Имеющийся микроконтроллер не способен поддерживать работу USB в режиме хоста, поэтому устройство будет ведомым хост-контроллером USB персонального компьютера. Датчик будет классифицироваться в процессе обмена данными как CDC (communications device class), чтобы не было необходимости писать драйвер специально для этого устройства.

Для организации RS-485 потребуется драйвер SN75176, который обеспечит физическую реализацию команд встроенного в AT91SAM7S64 модуля UART.

## 2.7 Формирование тактового сигнала $\phi M$

Тактовый меандр можно сформировать посредством встроенного ШИМ – контроллера. AT91SAM7S64 имеет 4 независимых ШИМ канала, два из которых отводятся для управления облучателями. Ещё один резервируется для регуляции производственного процесса. Поэтому оставшийся канал можно будет задействовать для формирования тактового сигнала  $\phi M$ .

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

Частота тактового сигнала выбирается равной 1 МГц, так как говорилось, что АЦП может нормально работать именно при этой частоте.

## 2.8 Алгоритм работы структурной схемы

По результатам проведённого анализа составлена схема электрическая структурная, которая представлена на рисунке 15.

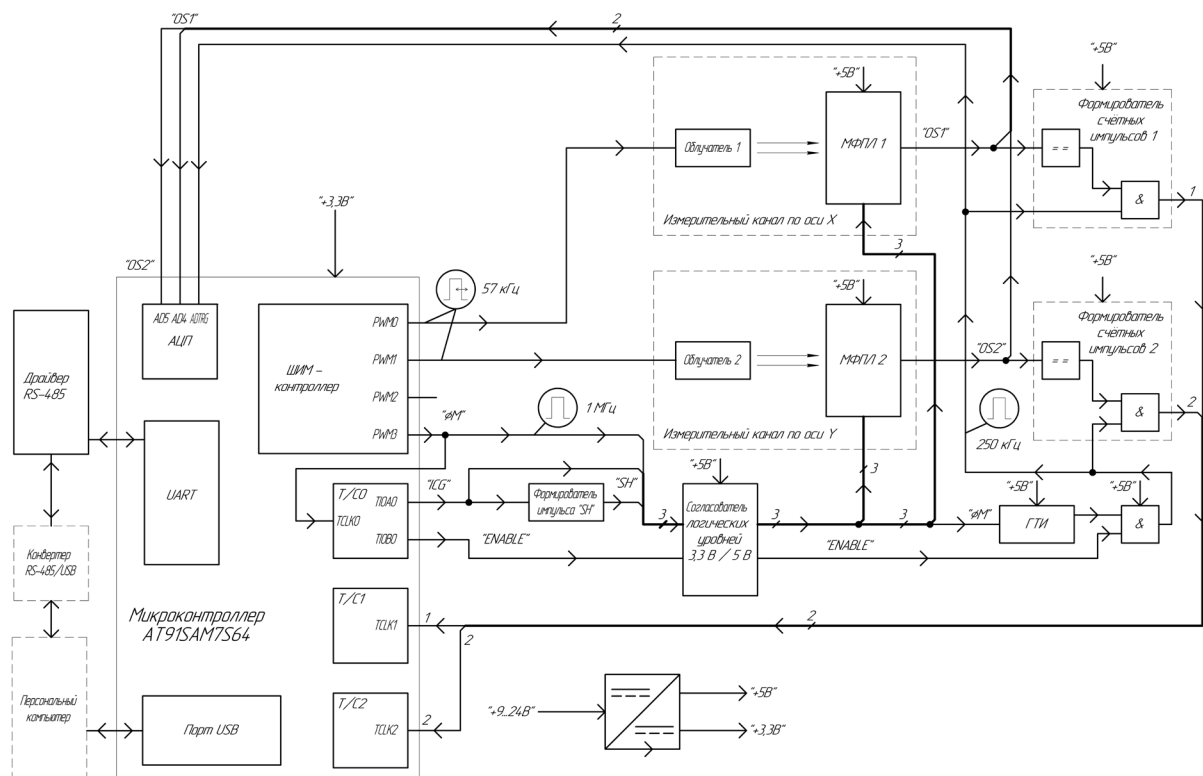


Рисунок 15 - Схема электрическая структурная узла подключения МФПЛ

Приведённая на рисунке 15 схема работает следующим образом.

Сразу после подачи напряжения питания на микроконтроллер, он начинает формировать тактовый сигнал  $\phi M$  с помощью канала ШИМ-контроллера PWM3. Тактовый сигнал начинает подаваться на линейки и счётчик T/C0, который формирует управляющие сигналы ICG и ENABLE для МФПЛ. Сигнал SH формируется внешней схемой путём укорочения инвертированного импульса ICG.

Цикл обработки самого кадра начинается сразу, как только импульс ICG примет значение логической единицы - тактовые импульсы  $\phi M$  начинают опрос МФПЛ. Опросив неинформативные технологические пиксели и крайние сигнальные пиксели, на которых засветка может быть неравномерной, формируется импульс ENABLE, разрешающий работу ГТИ, который начинает подавать импульсы на триггерный вход АЦП ADTRG, таким образом, запуская процесс оценки уровня засветки, более подробно описанный в подразделе 2.3.1. Импульсы с ГТИ так же подаются на формирователь счётных импульсов, принцип работы которого отражен в подразделе 2.3.2. В момент формирования отрицательного перепада ENABLE, микроконтроллер начинает подсчёт параметров на основе массива входных данных,

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР-2069378-11.03.01-09-20

который после расчёта контролируемых величин стирается. Далее ожидается положительный перепад ENABLE, и цикл повторяется.

Работа узла при этом разделена двумя этапами автоподстройки яркости светодиодов, которые описаны в разделе 2.5.

Сначала проводится грубая регулировка. Для оценки уровня мощности излучения используется АЦП, каналы AD4 и AD5 которого подключены к выходам МФПЛ. Для управления облучателями задействованы каналы ШИМ-контроллера PWM0 и PWM1. На первом этапе регулировки T/C1 и T/C2 выключены, так как формирователь счётных импульсов будет выдавать непредсказуемую информацию из-за малой засветки вплоть до завершения её грубой регулировки. Таким образом, вычисление контролируемых параметров филамента не производится.

После того, как завершиться процесс грубой регулировки AT91SAM7S64 начинает поддерживать достигнутое значение уровня засветки и включает T/C1 и T/C2, начиная, таким образом, подсчёт не только уровня засветки, но и других параметров: координаты, диаметра, эллиптичности сечения.

Необходимо отметить, что описанный выше цикл обработки кадра справедлив для обоих этапов. Разница лишь в том, что в первом этапе вычисляется только уровень мощности, излучаемой светодиодом. А во время второго этапа, кроме этого, рассчитываются и параметры филамента.

Схема электрическая структурная также приведена в приложении А.

### 3 РАСЧЁТ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ

После составления структурной схемы можно приступить к разработке схемы электрической принципиальной.

Учитывая особенности метода измерения, можно однозначно сказать, что проектируемое устройство расположить на одной печатной плате невозможно из-за того, что МФПЛ должны лежать в ортогональных плоскостях относительно друг друга, как и облучатели. Поэтому всего будет пять блоков, каждый из которых будет выполнен на отдельной печатной плате: блок с микроконтроллером, два блока с МФПЛ и два блока с облучателями. Остальные элементы структурной схемы будут распределяться по блокам в ходе их проектирования.

#### 3.1 Проектирование блока с фотоприёмной линейкой

Как уже отмечалось, всего будет два таких блока, которые будут идентичными между собой. На основании этого имеет смысл рассчитать один из блоков, а второй будет точно таким же.

##### 3.1.1 Обоснование схемы включения фотоприёмной линейки

Документация, прилагаемая к МФПЛ TCD1304DG, содержит типовую схему включения. На основании этого, она будет применена в качестве схемотехнического решения, с той разницей, что напряжение питания линейки будет составлять 5 В, а не 4 В. Также в качестве транзистора VT1 будет задействован BC860, а не предлагаемый 2SA1015, так как он дешевле, выполнен в исполнении для поверхностного монтажа, а его характеристики более хорошие.

Таким образом, схема включения МФПЛ примет вид, изображенный на рисунке 16.

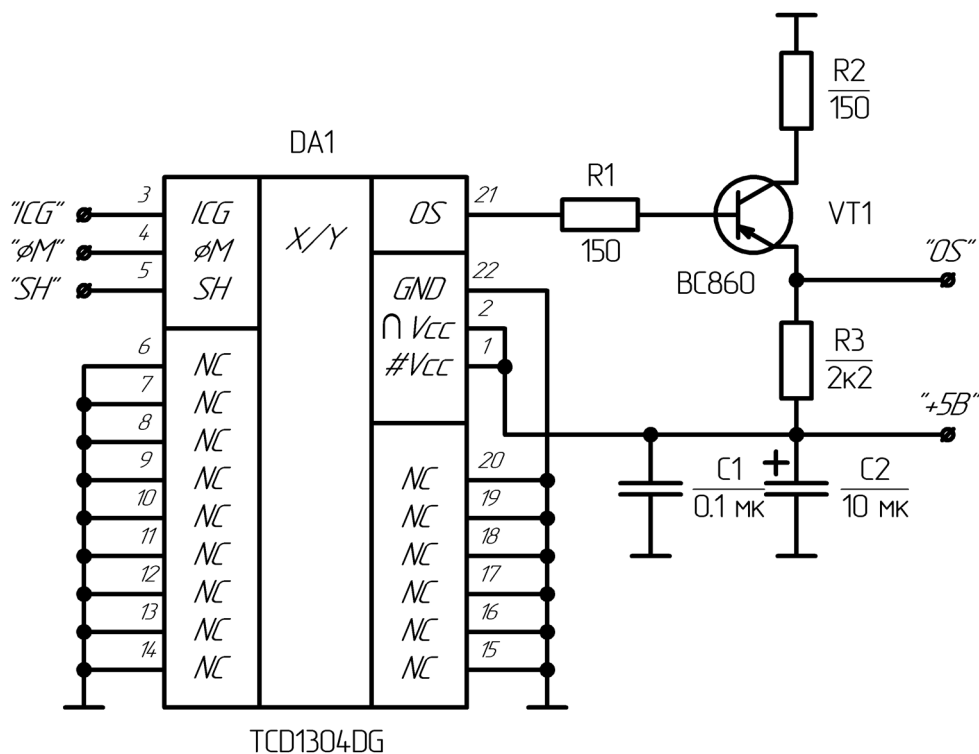


Рисунок 16 - Схема включения TCD1304DG

Сравнение характеристик транзисторов BC860 [15] и 2SA1015 [16] наглядно отражено в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики транзисторов BC860 и 2SA1015

Параметр транзистора	Марка транзистора и соответствующий ему параметр	
	BC860	2SA1015
$U_{к-э макс.}$ , В	45	50
$I_{к макс.}$ , мА	100	150
$f_{гр.}$ , МГц	100	80
$h_{21 э мин.}$	420...800	120...240
Корпусное исполнение	sot-23	to-92

### 3.1.2 Расчёт работы компаратора

На структурной схеме видно, что есть два формирователя счётных импульсов, поэтому, с одной стороны, логично расположить каждый из них на одной печатной плате с соответствующей им МФПЛ. Однако так же можно сказать, что на всю схему нужно всего три логических элемента «И», которые физически находятся в одной четырнадцативыводной микросхеме. Исходя из этого, было бы нерационально для каждой печатной платы – двух с МФПЛ и одной с МК – выделять отдельную микросхему с четырьмя логическими элементами «И», из которых будет задействован лишь один таковой. В этой связи вся логика «И», в том числе и участвующая в формировании счётных импульсов, будет на плате с микроконтроллером. А вот компаратор будет на одной плате с МФПЛ, так как в одной микросхеме всего один компаратор LM311.

Таким образом, формирователи счётных импульсов будут разнесены: компараторы будут на тех же печатных платах, что и МФПЛ, логика «И» будет целиком на плате с МК.

Из всех характеристик компаратора LM311 [17], приведённых в таблице 4, наибольший интерес представляет малое время задержки – 115 нс. Учитывая, что период обновления информации на выходе МФПЛ составит 4 мкс, при частоте её тактирования 1 МГц, такой малой задержкой можно пренебречь и считать, что компаратор срабатывает практически мгновенно.

Таблица 4 – Характеристики компаратора LM311

Параметр компаратора	Значение параметра
Количество каналов	1
Напряжение питания, В	3,5...30
Время задержки, нс	115
Ток потребления, мА	7,5
Корпусное исполнение	so-8

Оптимальное значение опорного напряжения, при котором будет происходить срабатывание компаратора, примем равным  $U_{опорн.} = 1,4$  В. Заданное значение напряжения обеспечивает делитель напряжения. На данную печатную плату будет подаваться

напряжение  $U_{пит.} = 5 \text{ В}$ , поэтому резистивный делитель будет рассчитываться, исходя из него. Опорное напряжение определяется, как:

$$U_{опорн.} = U_{пит.} * \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1}, \quad (14)$$

где  $U_{пит.} = 5 \text{ В}$  – напряжение делителя,  $R_1$  – верхнее плечо делителя,  $R_2$  – нижнее плечо делителя.

Чтобы рассчитать делитель, зададимся сопротивлением  $R_2 = 2,2 \text{ кОм}$  и решим уравнение (14) относительно  $R_1$ . В этом случае  $R_1 = 5656,2 \text{ Ом}$ . Ближайший стандартный номинал сопротивления  $5,6 \text{ кОм}$ .

Чтобы исключить «дребезг» на выходе компаратора можно ввести ПОС. В таком случае получим неинвертирующий триггер Шмидта [18, с. 678].

Гистерезис поможет против помех в сигнале от МФПЛ на входе компаратора, однако в таком случае пороги срабатывания для переднего и заднего фронта сигнала с выхода МФПЛ будут разными. Это не желательно, так как исказиться рассчитываемая на основе выходного сигнала компаратора длина тени. Так как предполагается, что помехи будут высокочастотными относительно входного сигнала компаратора, то эффект от ПОС для частот, которые ниже помех, можно убрать с помощью ёмкости в цепи ПОС. В таком случае мы вводим гистерезис только на время его заряда-разряда. Таким образом, схема включения компаратора примет вид, изображенный на рисунке 17.

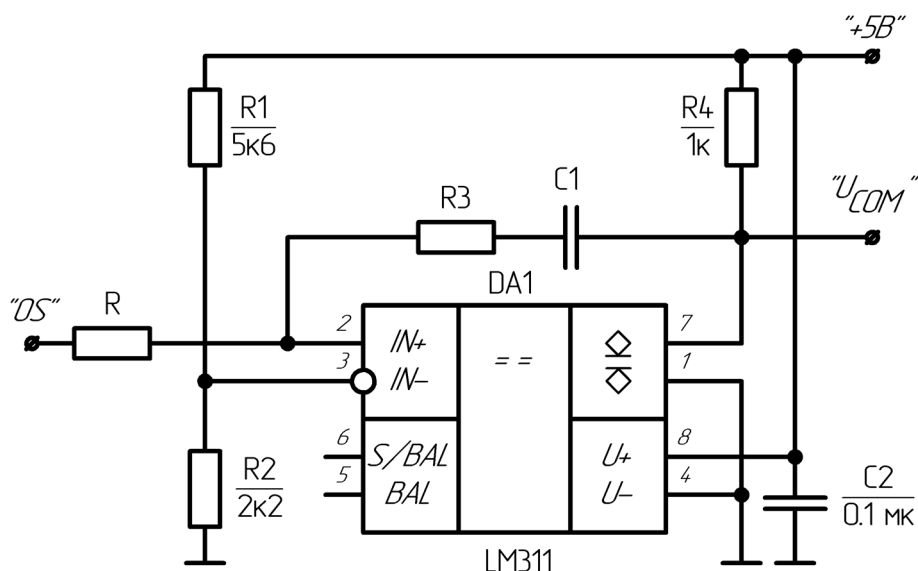


Рисунок 17 – Схема включения компаратора LM311

В этом случае гистерезис срабатывания будет рассчитываться по формуле

$$\Delta U_e = \frac{R}{R_3} (U_{вых.макс.} - U_{вых.мин.}), \quad (15)$$

где  $R$  – выходное сопротивление предыдущего каскада,  $R_3$  – сопротивление цепи ПОС,  $U_{\text{вых. макс.}} = 5 \text{ В}$  – максимальное выходное напряжение компаратора,  $U_{\text{вых. мин.}} = 0,65 \text{ В}$  – минимальное выходное напряжение компаратора.

Сопротивление  $R$  находится по формуле [18, с. 160]

$$R \approx R_3 \parallel \left( \frac{R_c}{\beta} + \frac{1}{S} \right), \quad (16)$$

где  $R_3 = 2,2 \text{ кОм}$  – эмиттерное сопротивление,  $R_c = 500 \text{ Ом}$  – выходное сопротивление источника сигнала,  $\beta \approx 600$  – коэффициент передачи по току транзистора BC860 в схеме с общим эмиттером,  $S$  – крутизна передаточной характеристики.

Крутизну передаточной характеристики  $S$  найдём из формулы

$$S = \frac{I_k}{\varphi_T}, \quad (17)$$

где  $I_k$  – ток коллектора,  $\varphi_T = 26 \text{ мВ}$  – температурный потенциал при  $25^\circ \text{ С}$ .

Ток коллектора найдём приближенно по формуле при напряжении на эмиттере  $U_3 = U_{\text{опорн.}}$

$$I_k \approx \frac{U_{\text{пит.}} - U_3}{R_3}, \quad (18)$$

где  $U_{\text{пит.}} = 5 \text{ В}$  – напряжение работы эмиттерного повторителя,  $U_3 = 1,4 \text{ В}$  – напряжение на эмиттере.

Подставив (18) и (17) в (16), получим:

$$R = R_3 \parallel \left( \frac{R_c}{\beta} + \frac{\varphi_T * R_3}{U_{\text{пит.}} - U_3} \right). \quad (19)$$

Решив уравнение (19) относительно  $R$ , получим выходное сопротивление эмиттерного повторителя  $R = 16,72 \text{ Ом}$ .

Из (19) становится очевидно, что выходное сопротивление каскада  $R$  зависит от напряжения на эмиттере  $U_3$ , которое изменяется в пределах  $1,2 \dots 3 \text{ В}$  [3]. А как видно из формулы (15) изменение  $R$  приведёт к изменению глубины ПОС, а следовательно, и к изменению порогов переключения. В таком случае можно специально завязать выходное сопротивление каскада, включив последовательно к нему постоянное добавочное



сопротивление  $R_{доб} \gg R$ . В этом случае полное выходное сопротивление каскада  $R'$  определяется, как:

$$R' = R + R_{доб}, \quad (19)$$

где  $R$  – собственное сопротивление каскада,  $R_{доб}$  -

Получится, что изменение  $R$  не приведёт к изменению выходного сопротивления каскада  $R'$  в целом. Важно, чтобы выходное сопротивление каскада  $R'$ , которое теперь определяется добавочным сопротивлением  $R_{доб}$ , было по-прежнему много меньше входного сопротивления компаратора. Всем перечисленным условиям удовлетворяет сопротивление  $R_{доб} = 750$  Ом. В таком случае, заменяя  $R$  на  $R'$  в (15), получим:

$$\Delta U_e = \frac{R + R_{доб}}{R_3} (U_{вых.макс.} - U_{вых.мин.}). \quad (20)$$

Задавшись  $\Delta U_e = 100$  мВ, что будет соответствовать нижнему порогу включения:

$$U_{нижн.} = U_{опорн.} - \frac{\Delta U_e}{2} = 1,35 \text{ В},$$

и верхнему порогу включения:

$$U_{верхн.} = U_{опорн.} + \frac{\Delta U_e}{2} = 1,45 \text{ В},$$

можем решить уравнение (20) относительно  $R_3$  и получим значение сопротивления цепи ПОС  $R_3 = 33,3$  кОм. Ближайший стандартный номинал сопротивления 33 кОм.

Ёмкость  $C1$  требуется выбрать так, чтобы постоянная времени в цепи ПОС была меньше, чем период обновления выходного сигнала OS от МФПЛ, то есть:

$$\tau = (R' + R_3) * C \ll 4 \text{ мкс.}$$

В этом случае зададимся  $\tau = 400$  нс, тогда:

$$C = \frac{\tau}{R' + R_3} = \frac{400 \text{ нс}}{33 \text{ кОм} + 750 \text{ Ом} + 16,72 \text{ Ом}} = 11,8 \text{ пФ.}$$

Ближайший стандартный номинал ёмкости 12 пФ.

Таким образом, схема блока с МФПЛ принимает вид на рисунке 18.

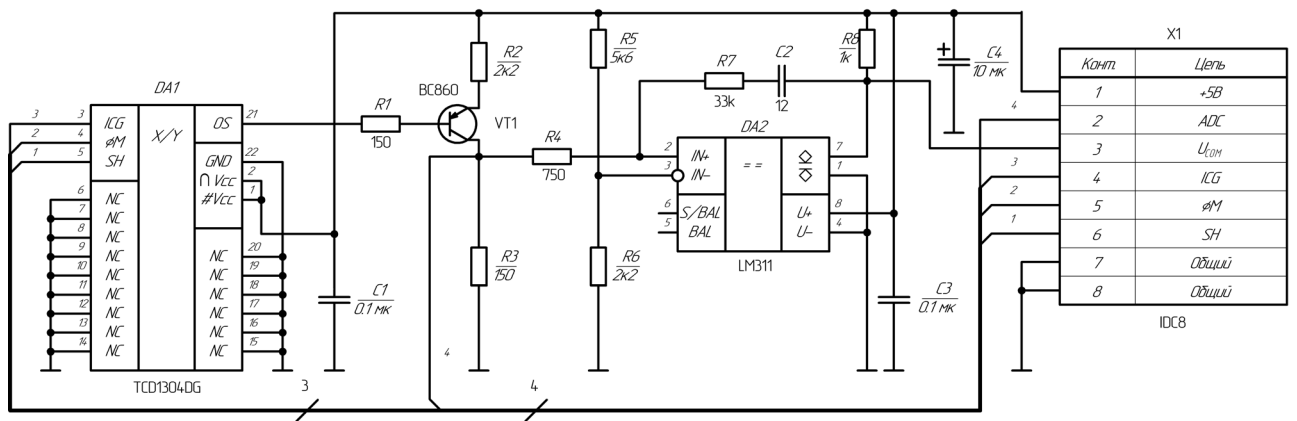


Рисунок 18 - Схема печатной платы с фотоприёмной линейкой

Сборочный чертёж блока МФПЛ приведён в приложении Б.

### 3.2 Проектирование блока с микроконтроллером

На плате вместе с микроконтроллером будут располагаться: преобразователь питания, ГТИ, согласователь логических уровней, формирователь импульса SH, логика «И» формирователя счётных импульсов, интерфейс RS-485.

#### 3.2.1 Обоснование схемы преобразователя питания

В схеме требуется организовать две линии питания: +3,3 В и +5 В. Входное напряжение от 9 В до 24 В будет постоянным.

Линию питания +5 В обеспечим с помощью понижающего импульсного DC-DC преобразователя на микросхеме LM2596 [19], характеристики которой представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики микросхемы LM2596

Параметр микросхемы	Значение параметра
Диапазон входных напряжений, В	4...60
Диапазон выходных напряжений, В	1,23...37
Максимальный выходной ток, А	3
Рабочая частота, кГц	150
Корпусное исполнение	to-220-51

Документация, прилагаемая к микросхеме LM2596, содержит типовую схему включения. На основании этого, она будет применена в качестве схемотехнического решения, поэтому схема включения LM2596 примет вид, изображенный на рисунке 19.

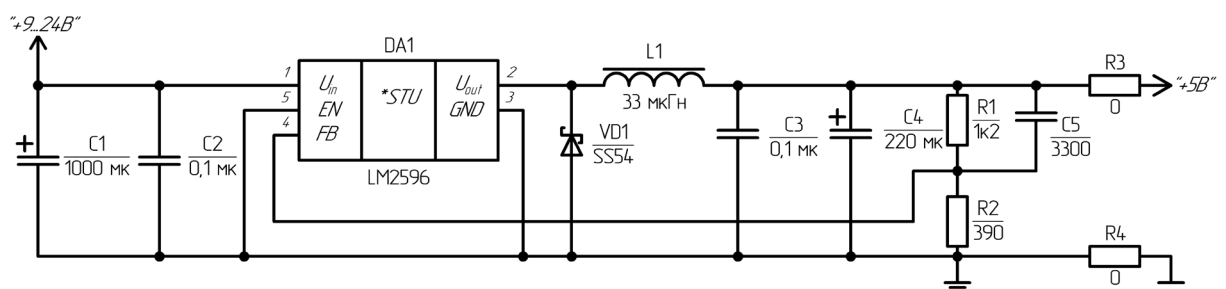


Рисунок 19 - Схема включения LM2596

Делителем  $R_1$  и  $R_2$  задаётся выходное напряжение +5 В. Задавшись  $R_1 = 1,2 \text{ кОм}$ ,  $R_2$  можно найти по формуле, описываемой в документации:

$$R_2 = \frac{R_1}{\left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{1,23 \text{ В}} - 1\right)} = 391,51 \text{ Ом.}$$

Ближайший стандартный номинал сопротивления 390 Ом.

В схему также добавлены перемычки  $R_3$  и  $R_4$  в виде чип-резисторов с нулевым сопротивлением, так как через них плохо проходят ВЧ-наводки.

Для организации +3,3 В линии понадобится микросхема NCP1117ST33, которая представляет собой линейный стабилизатор. Её характеристики приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики микросхемы NCP1117ST33

Параметр микросхемы	Значение параметра
Максимальное входное напряжение, В	20
Выходное напряжение, В	3,3
Максимальный ток нагрузки, А	1
Падение напряжения при $I_{\text{ВЫХ}}$ , В (А)	1,2 (0,8)
Корпусное исполнение	sot-223

Документация, прилагаемая к микросхеме NCP1117ST33 [20], содержит типовую схему включения. На основании этого, она будет применена в качестве схемотехнического решения, поэтому схема включения NCP1117ST33 примет вид, изображенный на рисунке 20.

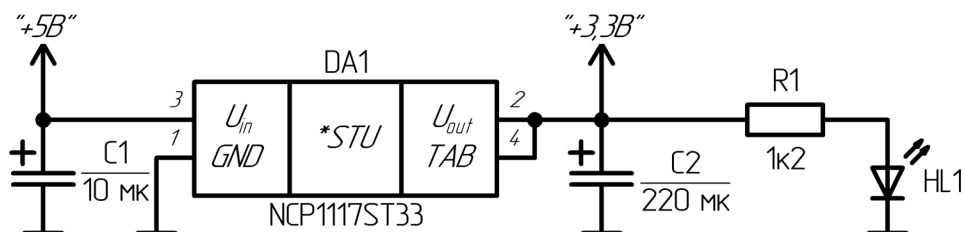


Рисунок 20 - Схема включения NCP1117ST33

Для индикации питания добавлена цепь  $R_1 - HL_1$ .

### 3.2.2 Проектирование ГТИ

Известно, что частота обновления выходного сигнала OS МФПЛ TCD1304DG в четыре раза меньше частоты её тактирования  $\phi M$ . По этой причине частота ГТИ будет привязана к частоте сигнала  $\phi M$  путём прохождения последнего через два последовательно включённых Т-триггера. Их можно получить из динамических D - триггеров, находящиеся в микросхеме 74НС74 [21], характеристики которой приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристики микросхемы 74НС74

Параметр микросхемы	Значение параметра
Напряжение питания, В	2...6
Тактирование	Передним фронтом
Время задержки распространения, нс	37
Количество элементов	2
Корпусное исполнение	soic-14

Важно, что сигнал OS линейки отсутствует во время воздействия на ней управляющего сигнала ICG, поэтому сигнал  $\phi M$  не должен подаваться на ГТИ во время присутствия логического нуля на входе ICG МФПЛ. Именно за счёт этого ГТИ формирует импульсы, положительные фронты которых совпадают по времени с моментом обновления информации на выходе OS линейки. Выход ГТИ управляется сигналом ENABLE посредством микросхемы 74HC08 [22], выполняющую функцию «2И». Её характеристики описаны в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристики микросхемы 74HC08

Параметр микросхемы	Значение параметра
Напряжение питания, В	2...6
Время задержки распространения, нс	15
Количество элементов	4
Корпусное исполнение	soic-14

Опираясь на вышесказанное, схема ГТИ принимает вид, показанный на рисунке 21.

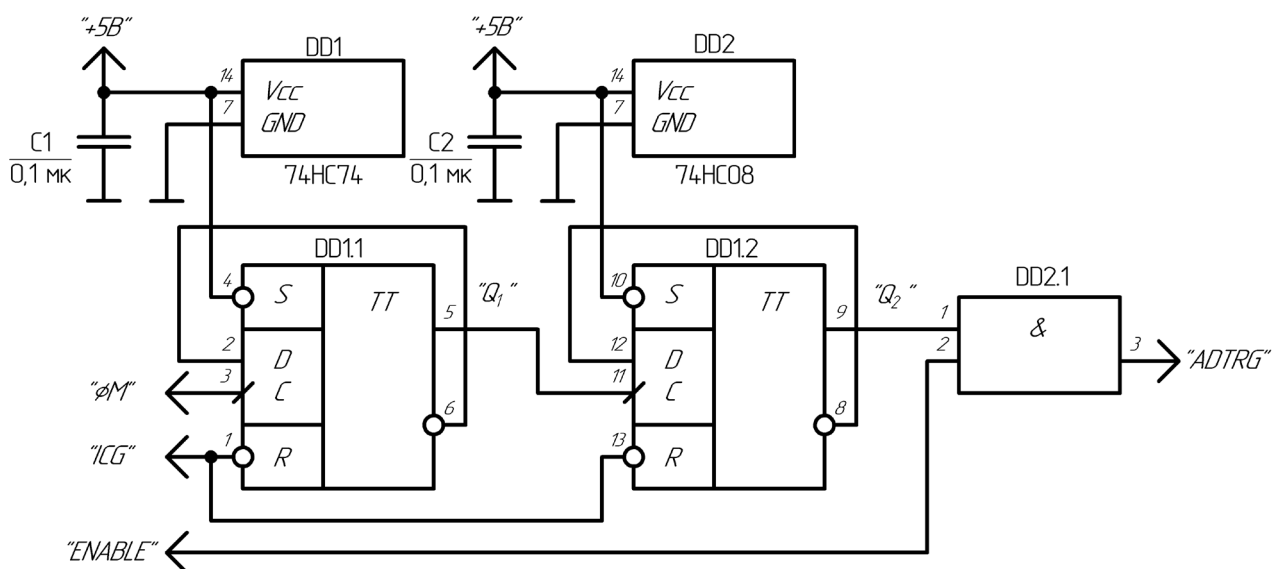


Рисунок 21 - Схема ГТИ

Временная диаграмма, поясняющая работу ГТИ, изображена на рисунке 22.

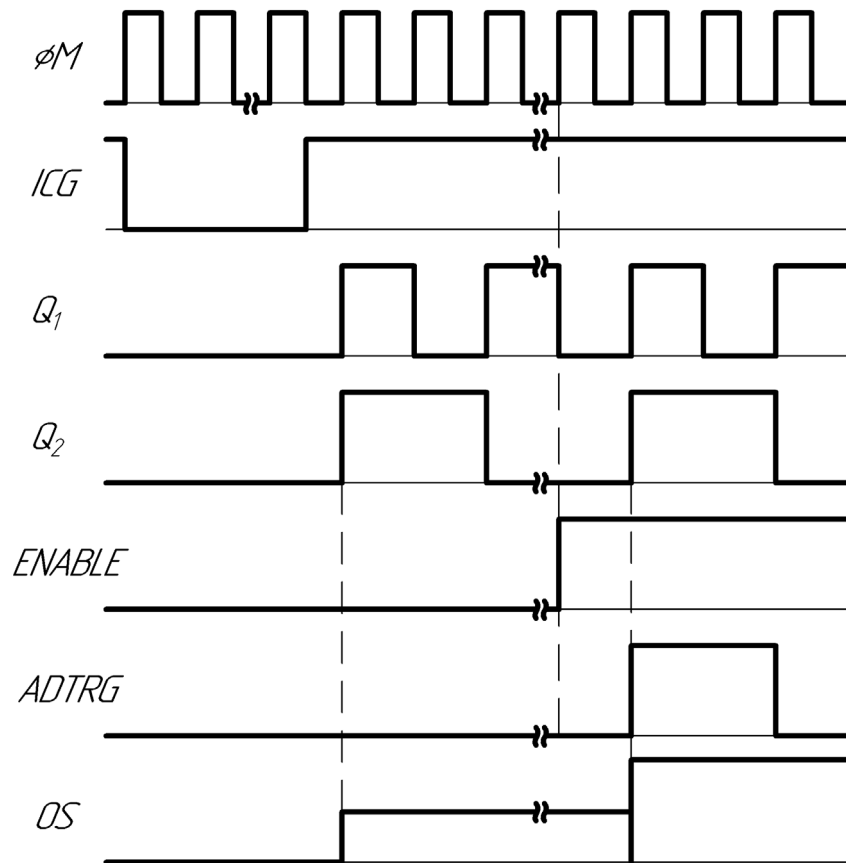


Рисунок 22 – Временная диаграмма работы ГТИ

### 3.2.3 Согласование логических уровней и формирование импульса SH

Согласование логических уровней с 3,3 В до 5 В будет производиться с помощью инвертирующего триггера Шмидта 74НС14 [23], характеристики которого представлены в таблице 9.

Таблица 8 – Характеристики микросхемы 74НС14

Параметр микросхемы	Значение параметра
Напряжение питания, В	2...6
Порог срабатывания на возрастающий фронт, В	2,38 В
Время задержки распространения, нс	21
Количество элементов	6
Корпусное исполнение	soic-14

Импульс SH будет получен путём укорочения импульса ICG и его последующем инвертировании через триггер Шмидта. Таким образом, схема формирования импульса SH и согласования логических уровней принимает вид, изображённый на рисунке 23а. Временная диаграмма, поясняющая работу схемы, изображена на рисунке 23б.

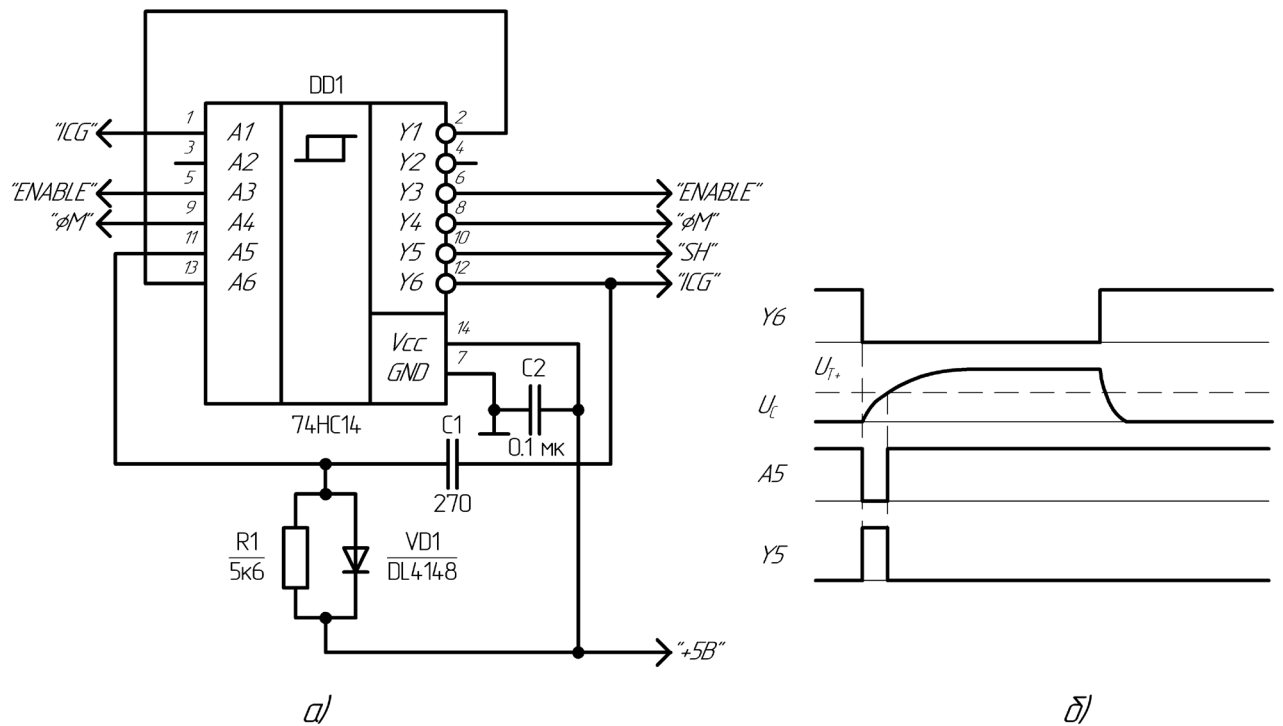


Рисунок 23 – Согласование логических уровней и формирование импульса SH:  
 а) – принципиальная схема; б) – временная диаграмма, поясняющая работу.

Длительность импульса SH определяется постоянной времени цепи  $R_1 - C_1$ , и погром срабатывания на положительный перепад входного напряжения триггера Шмидта. По документации, прилагаемой к микросхеме 74HC14, он равен 2,38 В. Изменение напряжения в RC-цепи описывается формулой

$$U_C(t) = U_{\text{вх}} \left( 1 - \exp \left[ -\frac{t}{\tau} \right] \right), \quad (21)$$

где  $U_C(t)$  – напряжение на ёмкости,  $U_{\text{вх}}$  – напряжение входного воздействия,  $\tau$  – постоянная времени RC-цепи.

Подставляя в (21)  $U_C = 2,38$  В,  $U_{\text{вх}} = 5$  В и  $t = 1$  мкс и решив это уравнение относительно постоянной времени получим  $\tau = 1547$  нс. Задаваясь  $R_1 = 5,6$  кОм, найдём ёмкость:

$$C_1 = \frac{\tau}{R_1} = 275 \text{ пФ}.$$

Ближайший стандартный номинал ёмкости 270 пФ. Диод VD<sub>1</sub> обеспечивает быстрый разряд ёмкости C<sub>1</sub>. При программировании ШИМ-контроллера для сигнала φM необходимо учесть, что он инвертируется, проходя через триггер Шмидта.

### 3.2.4 Схема включения микроконтроллера AT91SAM7S64

Документация, прилагаемая к данному микроконтроллеру, содержит типовую схему включения. На основании этого, она будет применена в качестве схемотехнического решения, поэтому схема примет вид, изображенный на рисунке 24.

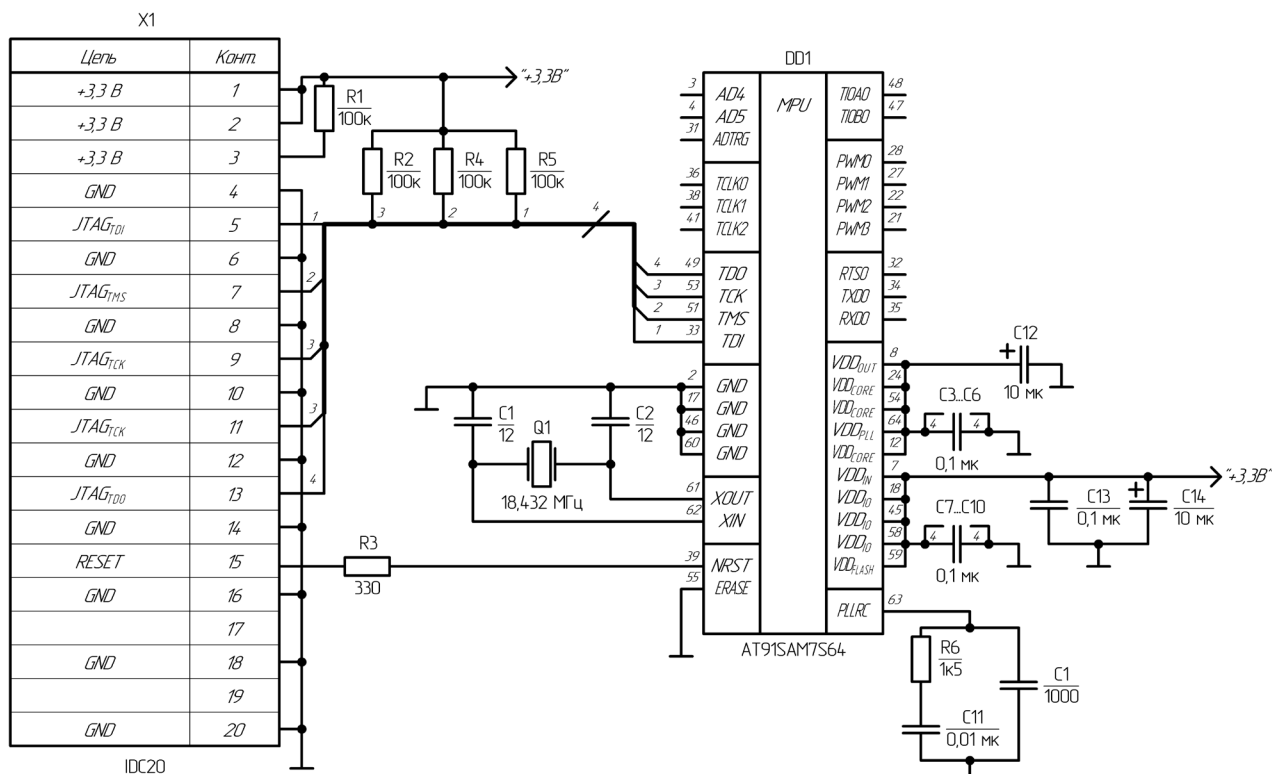


Рисунок 24 - Схема включения AT91SAM7S64

Можно отметить, что данная схема не только обеспечивает работу микроконтроллера, но и позволяет программировать его через интерфейс JTAG. Это существенно облегчит поставленную задачу внесения дополнительного функционала в устройство в дальнейшем и последующей отладки.

### 3.2.5 Реализация интерфейса RS-485

Применяемый микроконтроллер уже имеет встроенный UART, но для обеспечения физической работы протокола, а именно - посредством интерфейса RS-485, требуется драйвер. В качестве него была выбрана микросхема SN75176 [24], которая имеет типовую схему включения, показанную на рисунке 25.

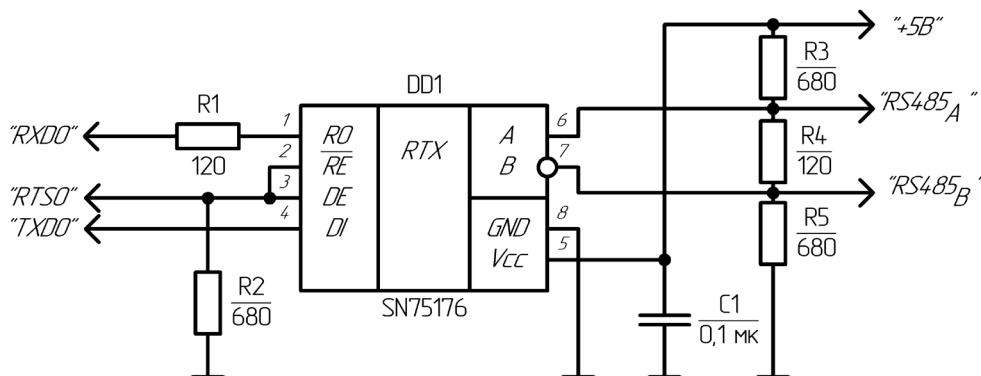


Рисунок 25 - Схема включения SN75176

### 3.2.6 Формирование счётных импульсов

Исходя из структурной схемы, логика формирователей счётных импульсов будет построена на оставшихся двух элементах «2И» уже упомянутой микросхемы 74НС08 так, как показано на рисунке 26.

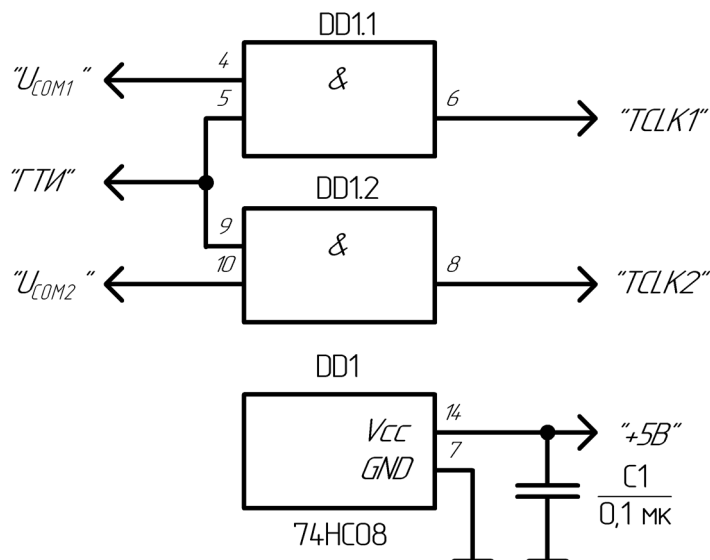


Рисунок 26 – Формирование счётных импульсов для таймеров/счётчиков микроконтроллера

Очевидно, что тактовые импульсы пойдут на счётчики только тогда, когда на соответствующие входы придут импульсы с компараторов. А благодаря тому, что работа ГТИ разрешается импульсом ENABLE, схема на рисунке 24 не тактируется в начале и конце кадра МФПЛ, где компараторы могут ложно сработать на неинформативные импульсы или на неравномерную засветку.

Полная схема электрическая принципиальная и соответствующий ей перечень элементов приведены в приложении В, а схема электрическая соединений – в приложении Г.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР-2069378-11.03.01-09-20



## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения возможности использования предлагаемого способа измерения был собран макет, с одним измерительным оптическим каналом, фото которого на рисунке 27. Схема макета приведена в приложении Д. Программа микроконтроллера AT91SAM7X256, управляющая макетом, приведена в приложении Е. Чтобы оценить работоспособность метода, требовалось провести два эксперимента, целью которых было следующее:

- 1) изучить чёткость тени, получаемой с помощью SMD – светодиода без коллимирующих линз;
- 2) изучить влияние прозрачности пластика филамента на выходной сигнал МФПЛ.

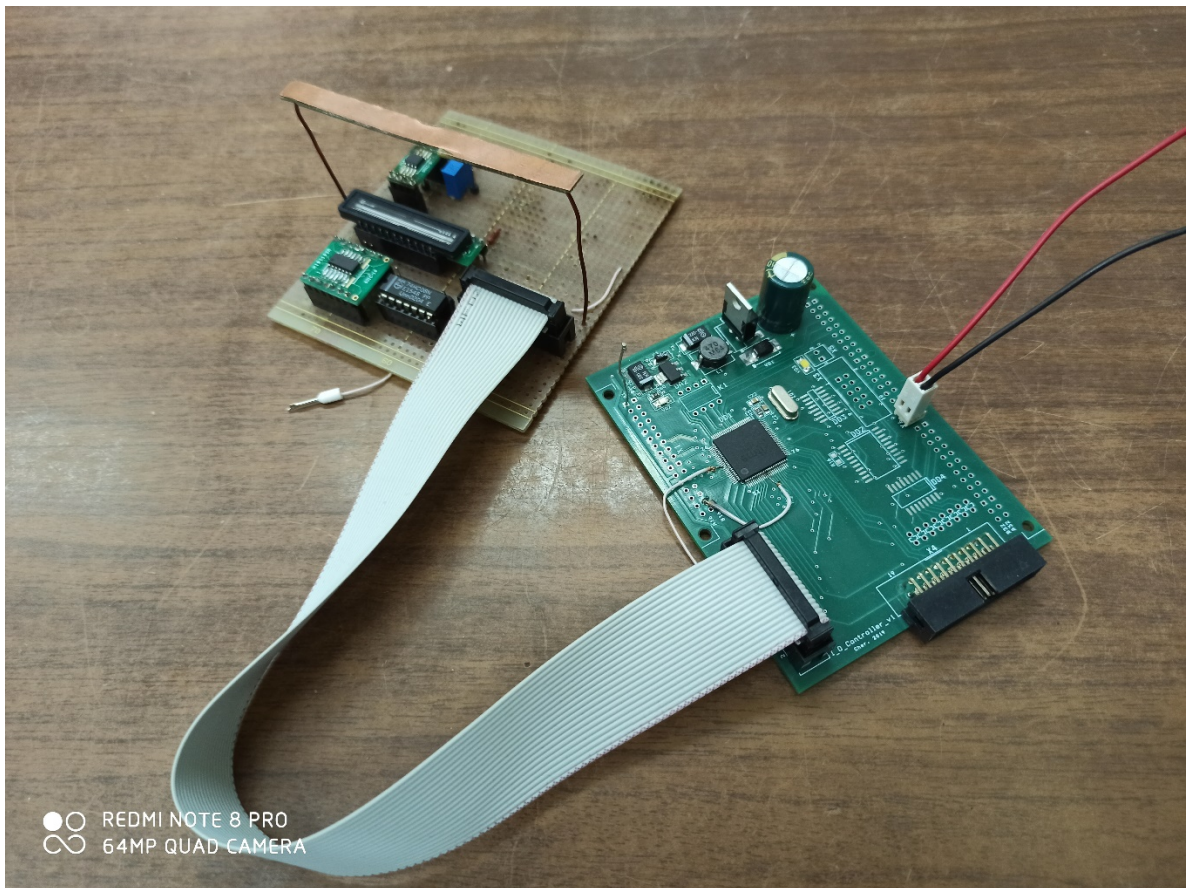


Рисунок 27 - Собранный макет для экспериментов

### 4.1 Исследование полутени, возникающей из-за отсутствия диафрагмы

Первый эксперимент обусловлен тем, что светодиод не может являться точечным источником света относительно филамента, ведь размер стороны излучающей площадки светодиода составляет минимум 0,2 мм [7, с. 32], а наименьший диаметр филамента – 1,75 мм. Получается, что отношение размера объекта, который отбросит тень, к источнику света, от которого она появится, менее десяти, а значит их можно считать сопоставимыми. Если нельзя пренебречь размером источника света, то тень будет нечёткой из-за появления области полутени. Исходя из этого и возникает вопрос о том, как будет выглядеть электрический сигнал, в который МФПЛ преобразует полутень. Поэтому неясна возможность однозначного определения размера филамента по полученному сигналу с данной МФПЛ.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ВКР-2069378-11.03.01-09-20

Лист

50

Ясно, что размер полутени, как и всей тени в целом, будет изменяться от расстояния между источником света и объектом, от которого падает тень. Поэтому суть данного эксперимента в том, чтобы получить различные сигналы от линейки, меняя расстояние между светодиодом и филаментом при неизменной дистанции между МФПЛ и облучателем 27 мм, и проследить как при этом будет «восприниматься» и изменяться область полутени МФПЛ. Схема исследуемого оптического канала, собранного на макете, отображена на рисунке 28. На рисунках 29 – 35 представлены результаты описанного опыта.

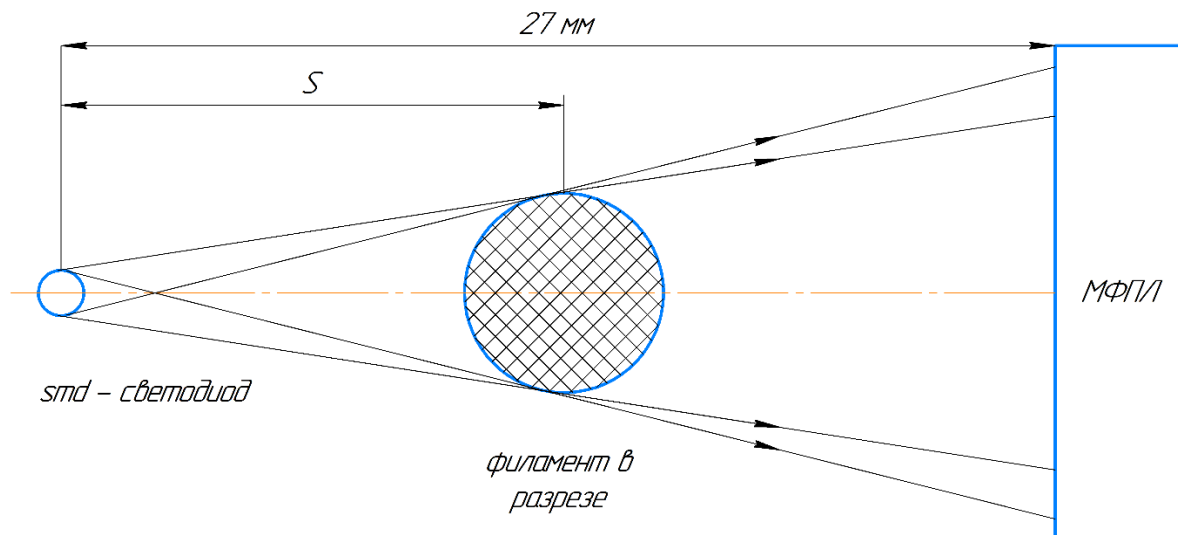


Рисунок 28 - Схема исследуемого оптического канала

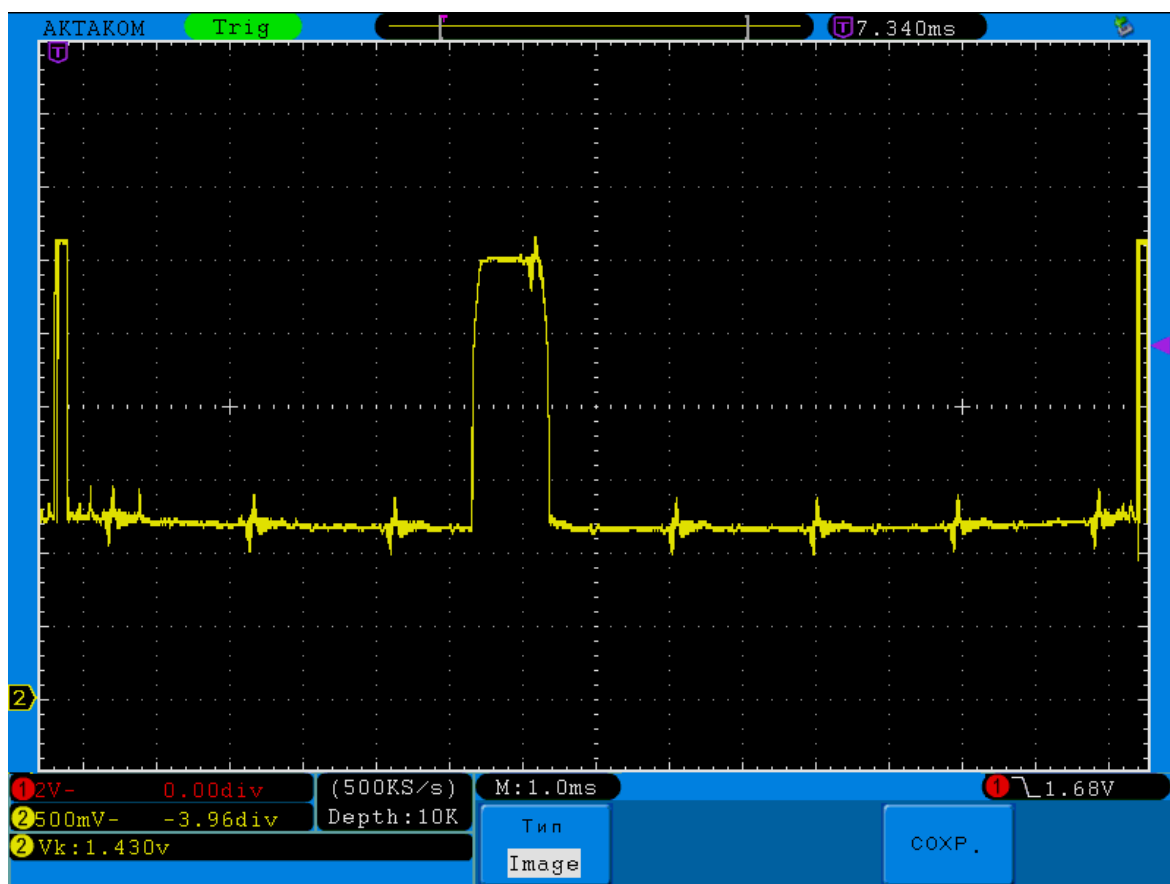


Рисунок 29 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и филаментом 26,4 мм (филамент расположен вплотную к МФПЛ)

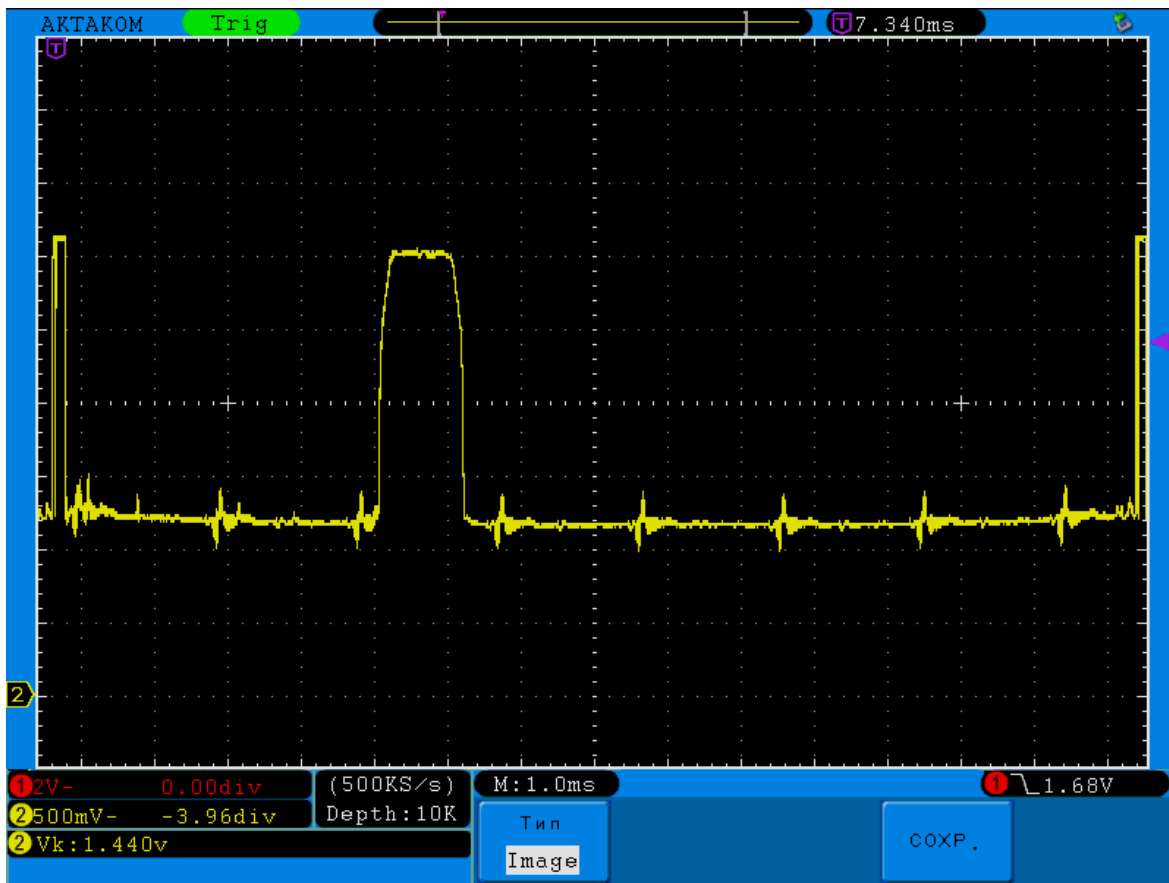


Рисунок 30 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и филаментом 24,2 мм

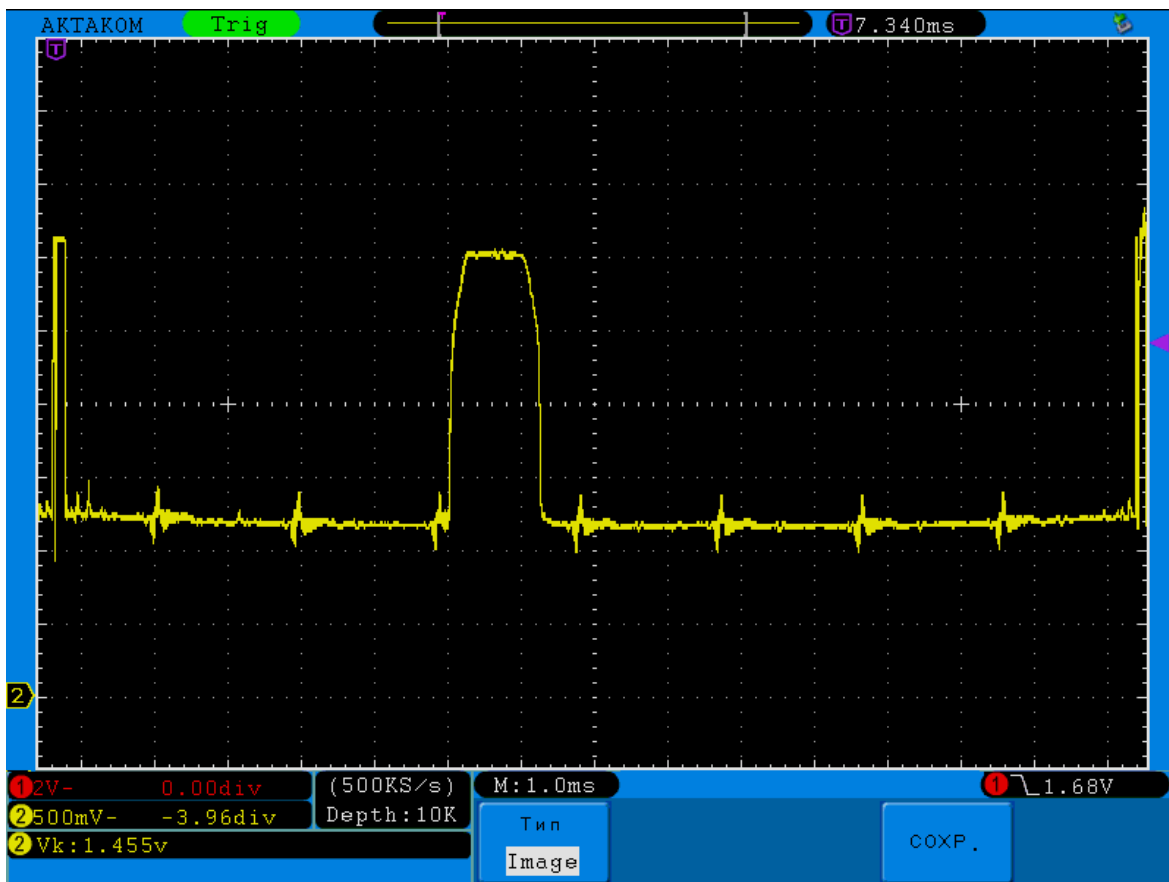


Рисунок 31 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и филаментом 22 мм

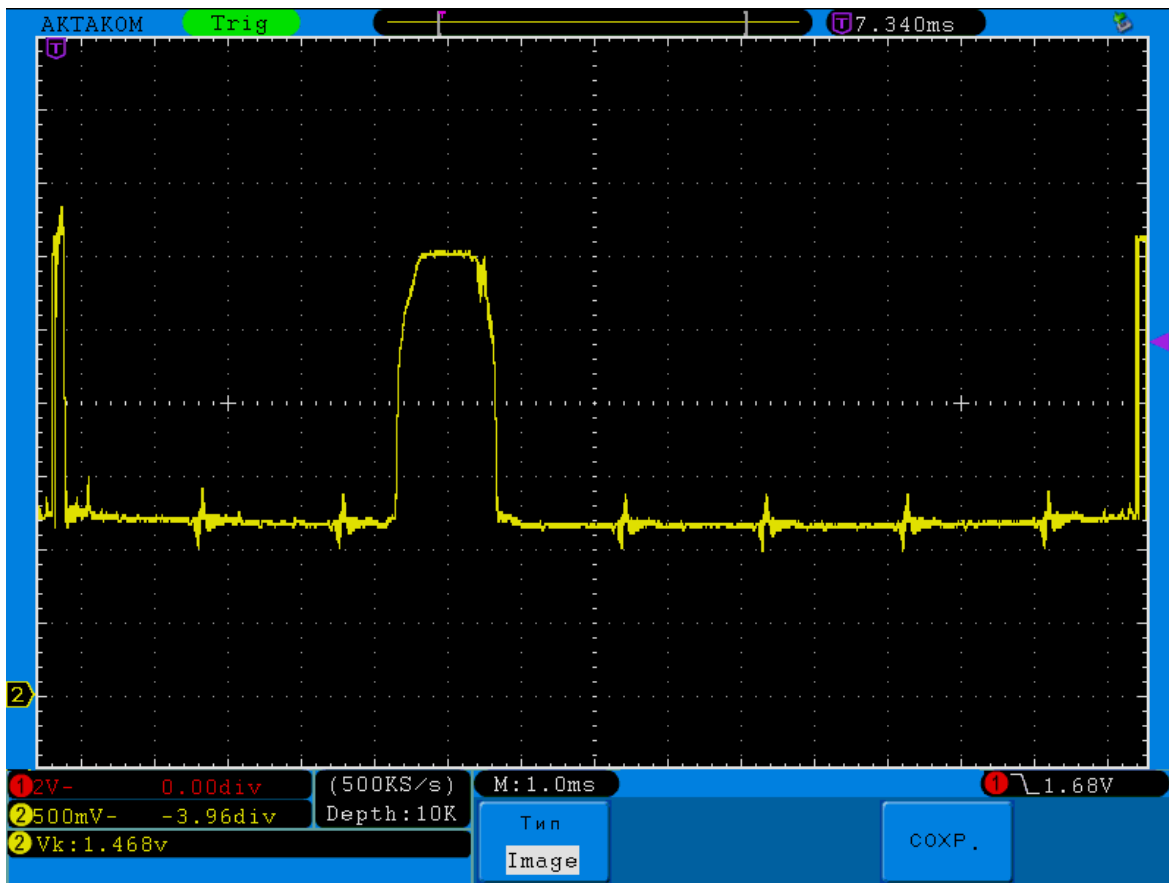


Рисунок 32 - Сигнал от МФПІ при расстоянии S между светодиодом и филаментом 19,8 мм

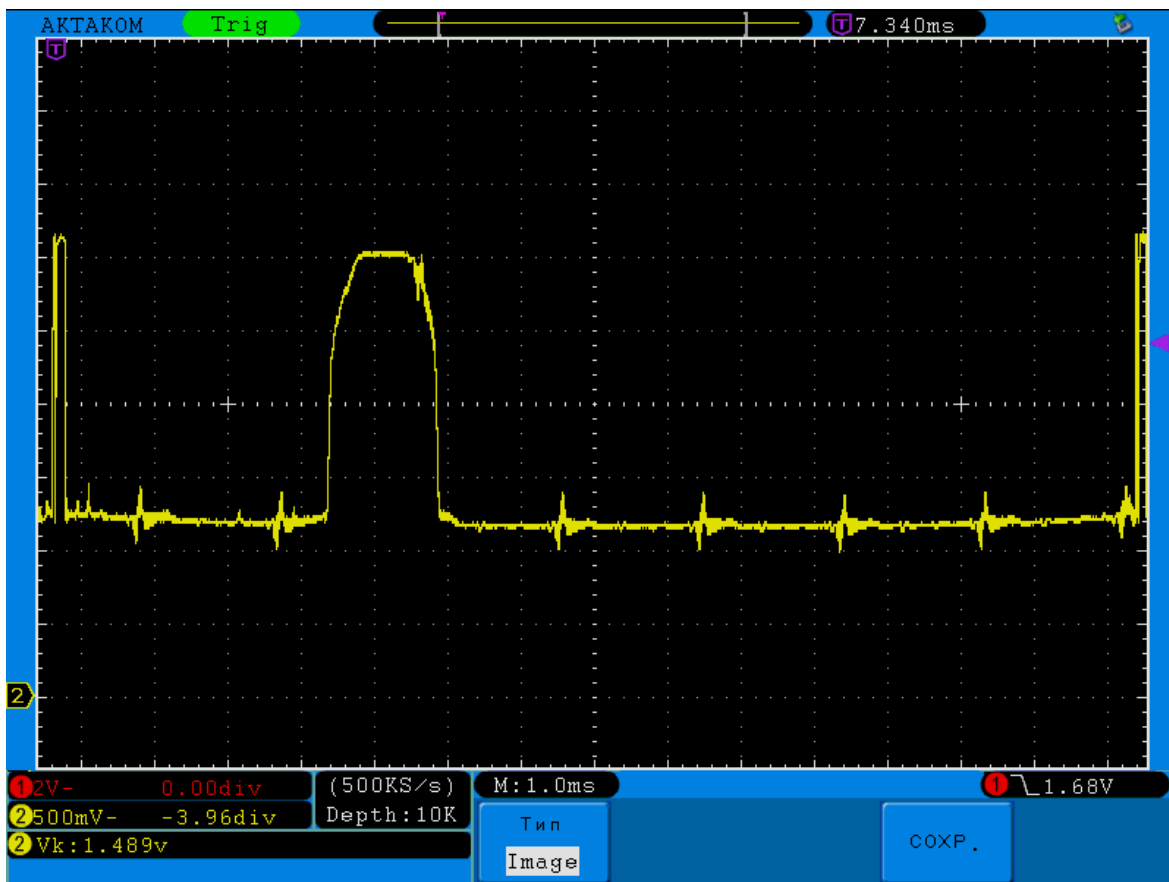


Рисунок 33 - Сигнал от МФПІ при расстоянии S между светодиодом и филаментом 17,6 мм

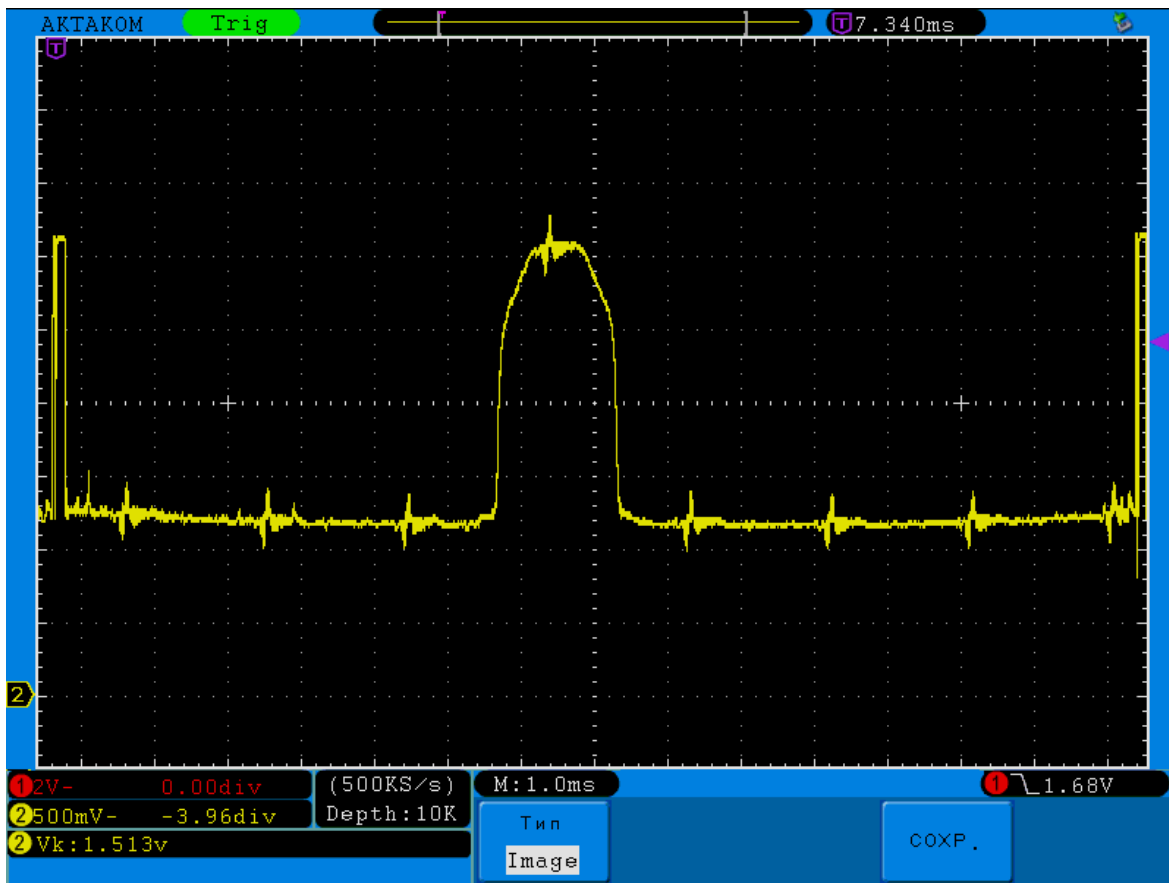


Рисунок 34 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и филаментом 15,4 мм

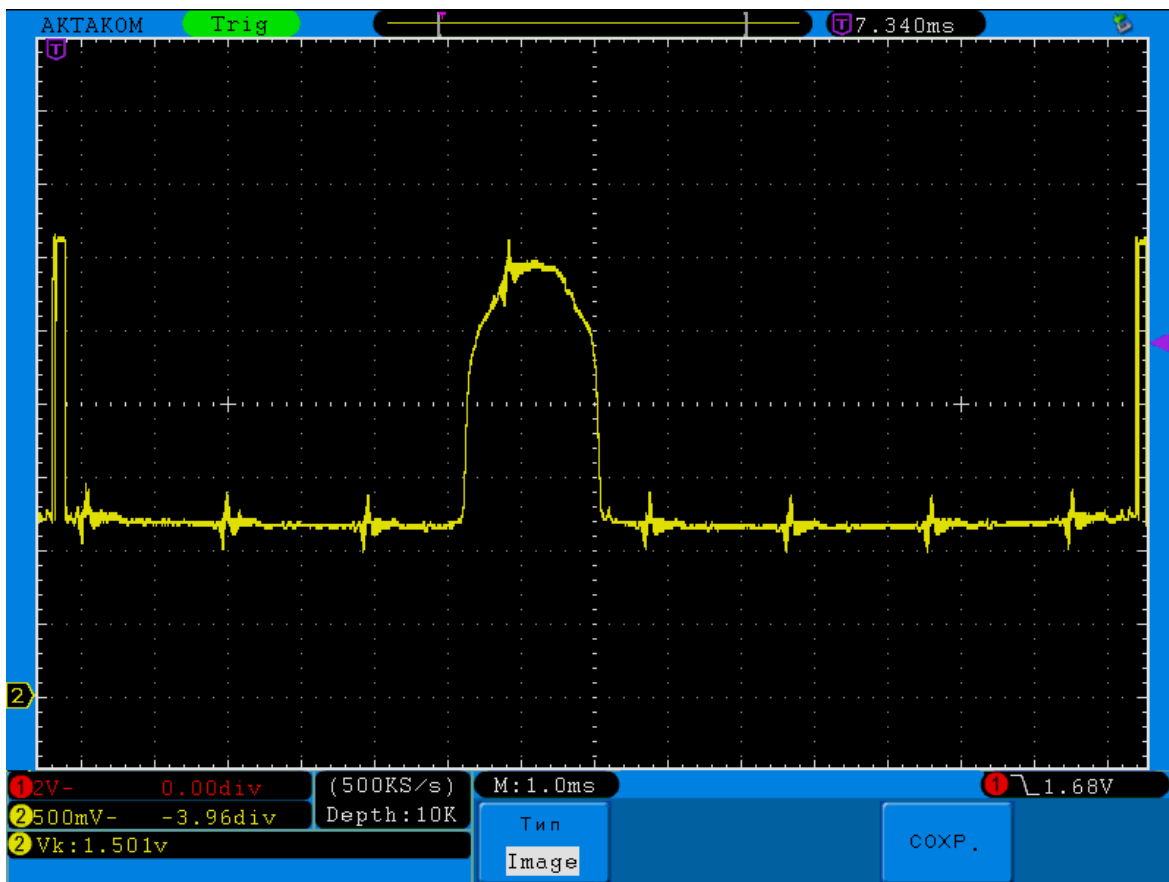


Рисунок 35 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и филаментом 13,2 мм  
(филамент на таком же расстоянии от МФПЛ)

Из осциллограммы на рисунке 29 видно, что на большом удалении от источника света тень получается достаточно чёткой и резкой, полутень практически отсутствует. Такой сигнал получен при том, что филамент был расположен практически вплотную к фотоприёмнику. Однако, буквально со следующей осциллограммы (рисунок 30) полутень начинает проявлять себя, и по мере приближения к светодиоду (и, соответственно, удаления от МФПЛ) она занимает всё большее количество пикселей. Это проявляется в том, что вершина импульса постепенно становится скруглённой, а не плоской. Особенно хорошо это заметно на рисунке 35. Здесь плоский участок занимает минимальное место, и по мере удаления от центра импульса, сигнал тени плавно спадает. Однако плавный спад заканчивается приблизительно на уровне 2 В. Далее сигнал от полутени спадает чуть менее резко, чем от тени на рисунке 29. Это как раз и говорит о том, что полутень «чувствуется» исследуемой МФПЛ достаточно хорошо. Получается, что по уровню напряжения от уровня белого - 1,2 В до 2 В можно более-менее однозначно сказать о величине диаметра филамента даже на его равноудалённом расстоянии от МФПЛ и светодиода. Действительно, ширина импульса по уровню 1,5 В на рисунке 35 практически в два раза больше, таковой на рисунке 2, что объясняется двукратной разницей расстояний филамента от светодиода для этих сигналов.

Таким образом, эксперимент показал, что использование smd-светодиода без диафрагмы позволяет оценить диаметр филамента и с помощью метода с компаратором: для этого требуется задать порог его срабатывания в пределах 1,2...2 В. Можно заметить, что теневой сигнал в различных осциллограммах меняет своё положение в кадре МФПЛ. Это следствие того, что филамент не во всех этапах измерения находился прямо под облучателем. Несмотря на это, импульсы получились практически симметричными, поэтому координату филамента можно определить, как середину импульса. Тем более, что в реальных условиях конструкция датчика и сам по себе процесс производства обеспечат постоянное нахождение филамента прямо под облучателем.

#### **4.2 Исследование влияния прозрачности филамента на выходной сигнал МФПЛ**

Суть второго опыта в том, чтобы проверить возможность вычисления параметров филамента, в случае, когда он изготовлен из прозрачного пластика. Этот эксперимент обусловлен тем, что датчик должен производить измерения филамента в независимости от цвета и прозрачности материала, из которого он изготовлен. Прозрачность в данном случае может ослабить выходной сигнал МФПЛ, поэтому возникла необходимость исследовать возможности данного метода измерения при описанных условиях, особенно учитывая, что по результатам предыдущего опыта полутень также ослабляет сигнал.

Таким образом, условия данного эксперимента аналогичны предыдущему. Разница лишь в том, что материалом филамента служит оптически прозрачный пластик, что отражено на рисунке 36. Осциллограммы, полученные в ходе данного опыта, представлены на рисунках 37 - 43.

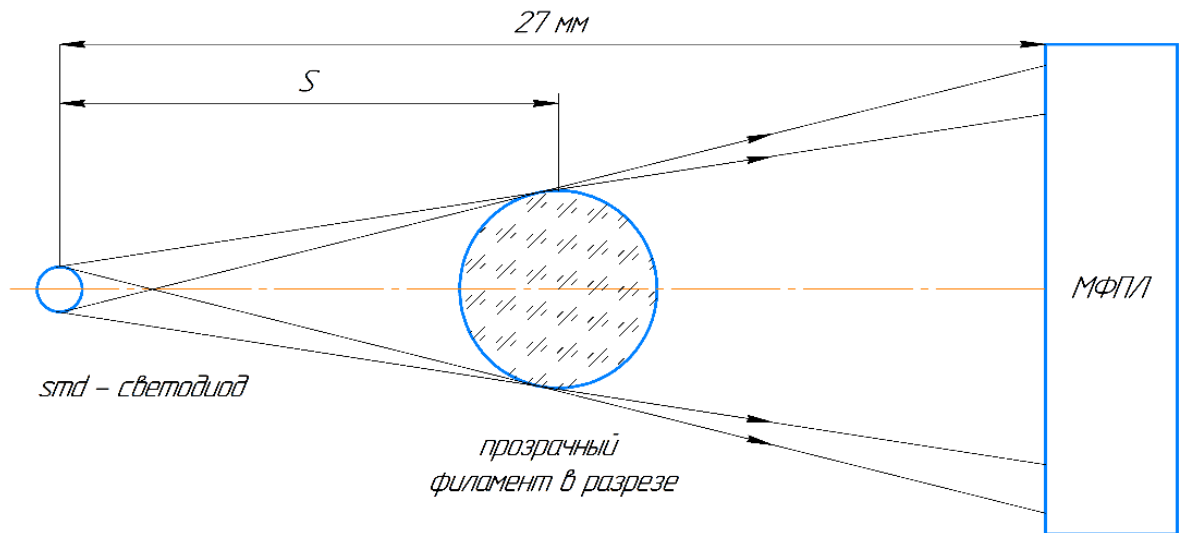


Рисунок 36 - Схема исследуемого оптического канала с прозрачным филаментом

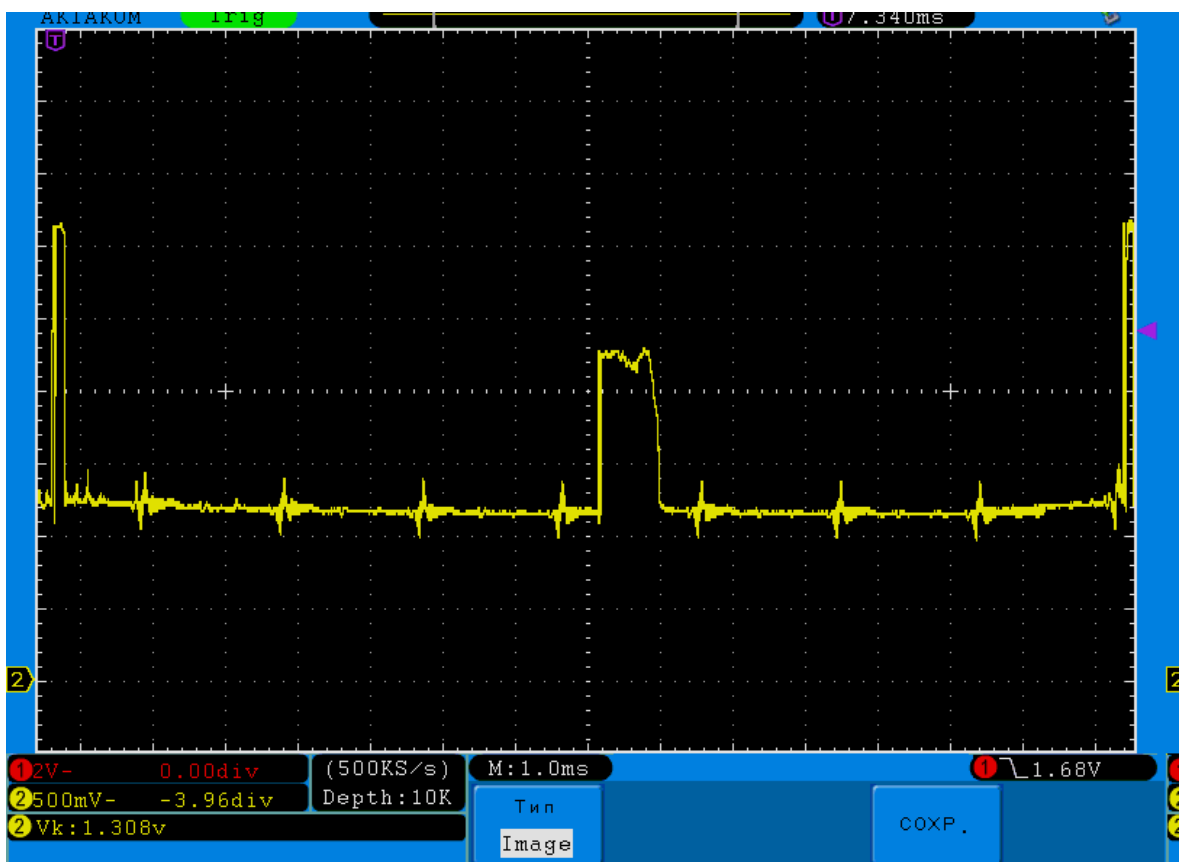


Рисунок 37 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и прозрачным филаментом 26,4 мм (филамент расположен вплотную к МФПЛ)

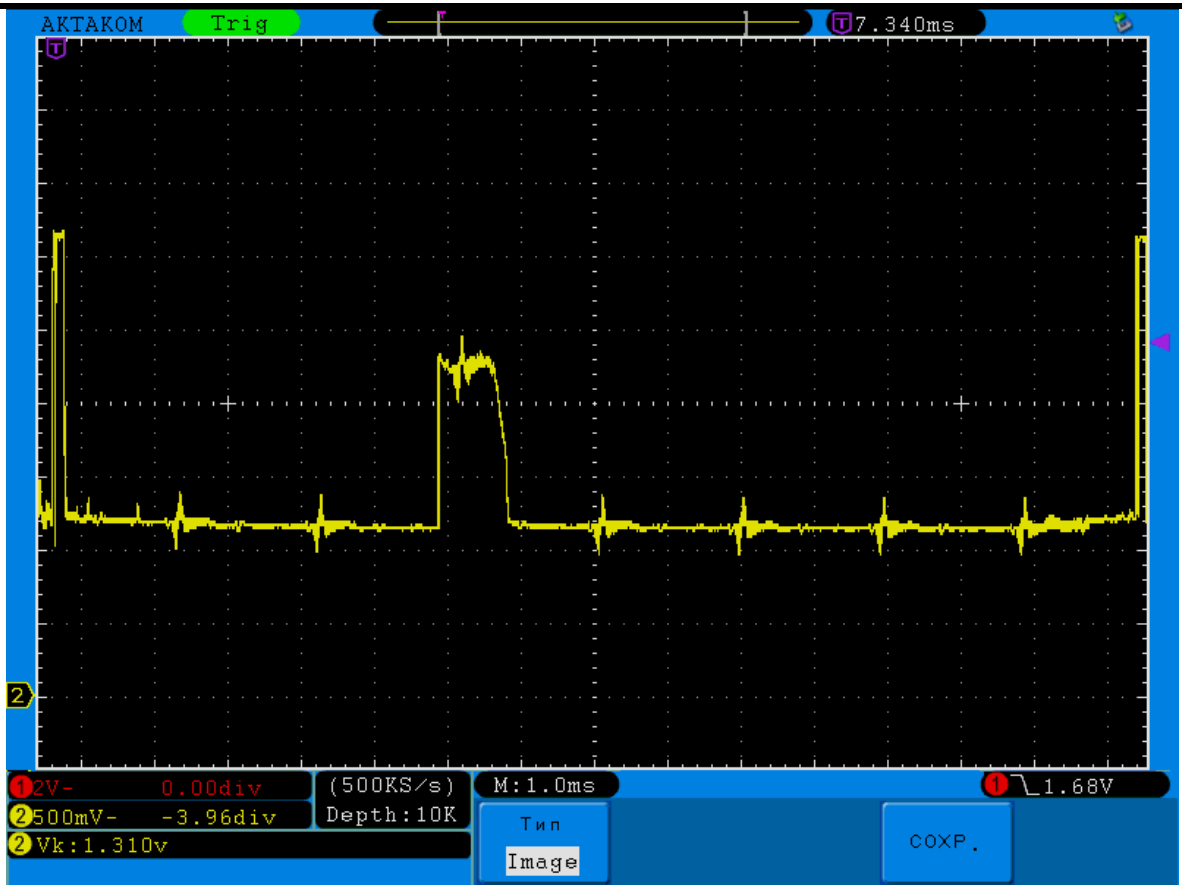


Рисунок 38 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и прозрачным филаментом 24,2 мм

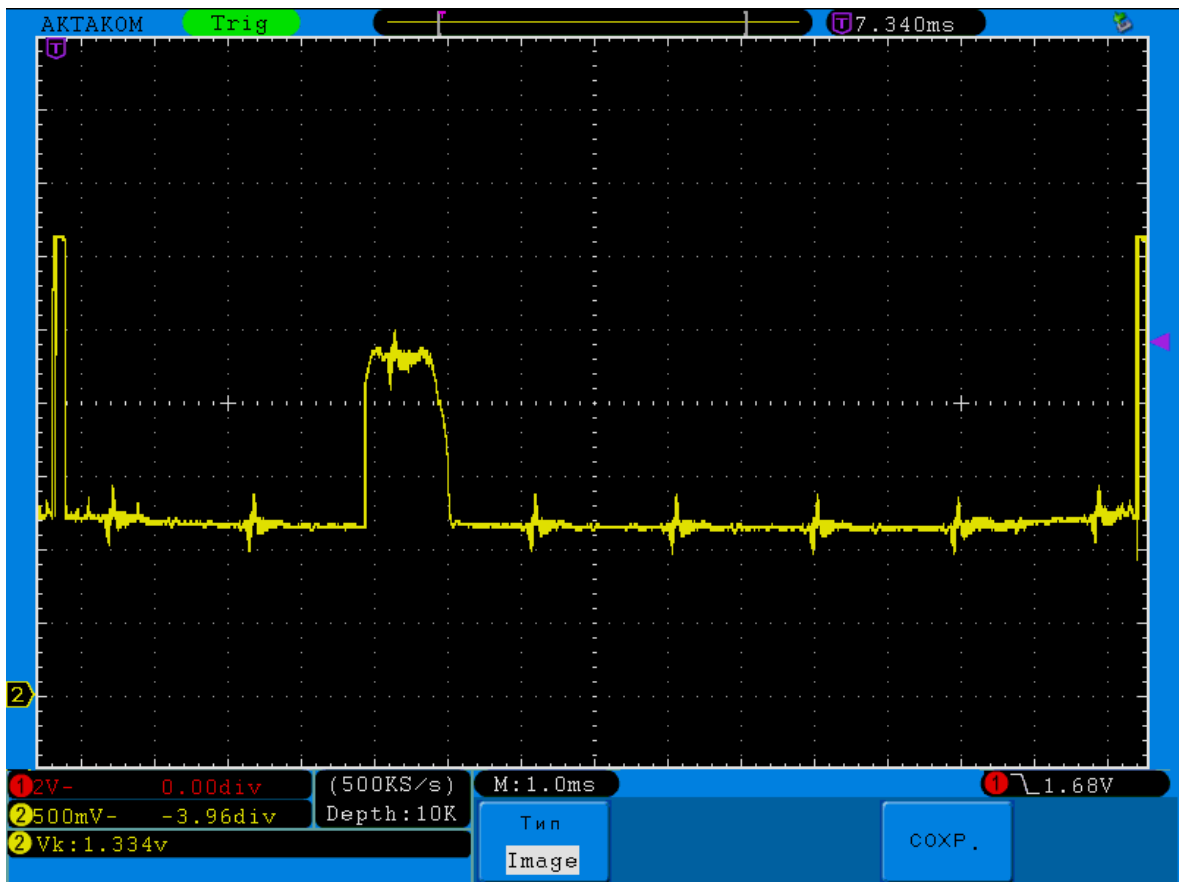


Рисунок 39 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и прозрачным филаментом 22 мм



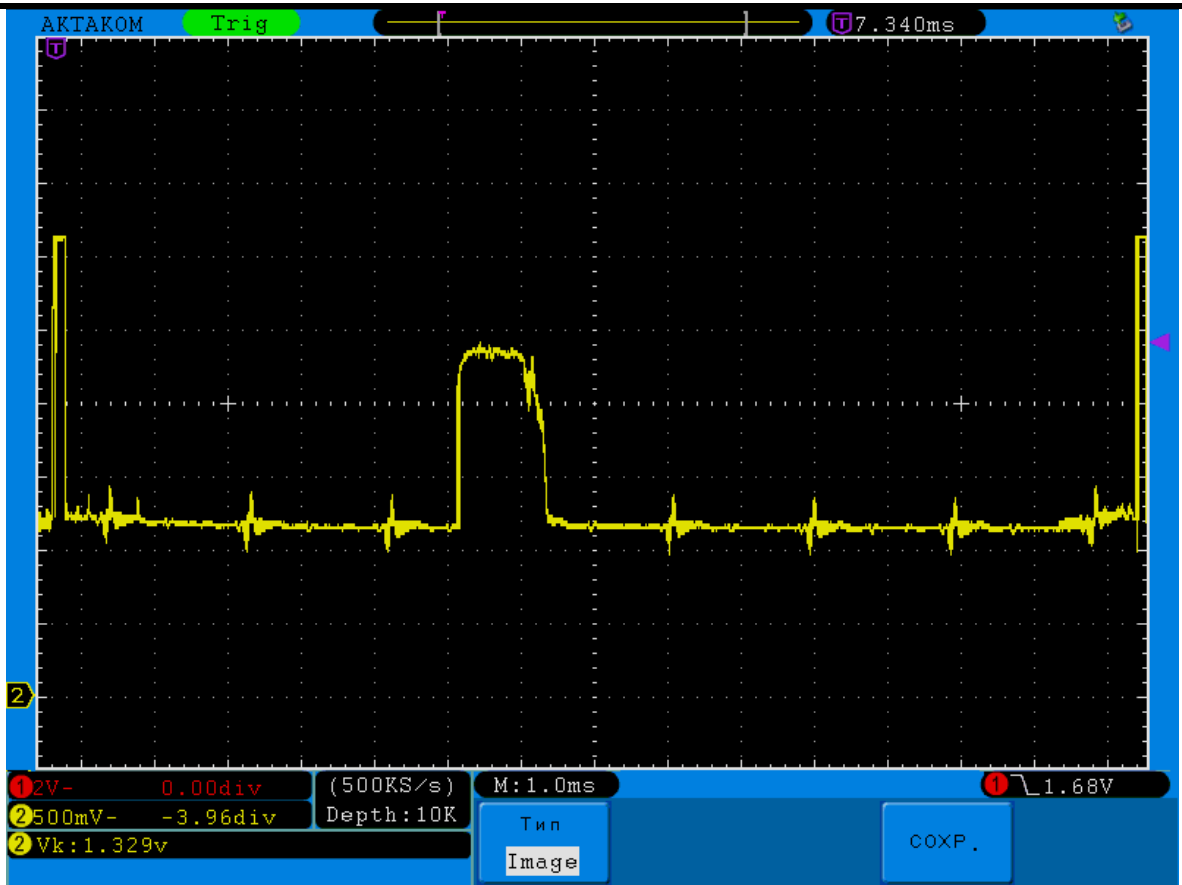


Рисунок 40 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и прозрачным филаментом 19,8 мм

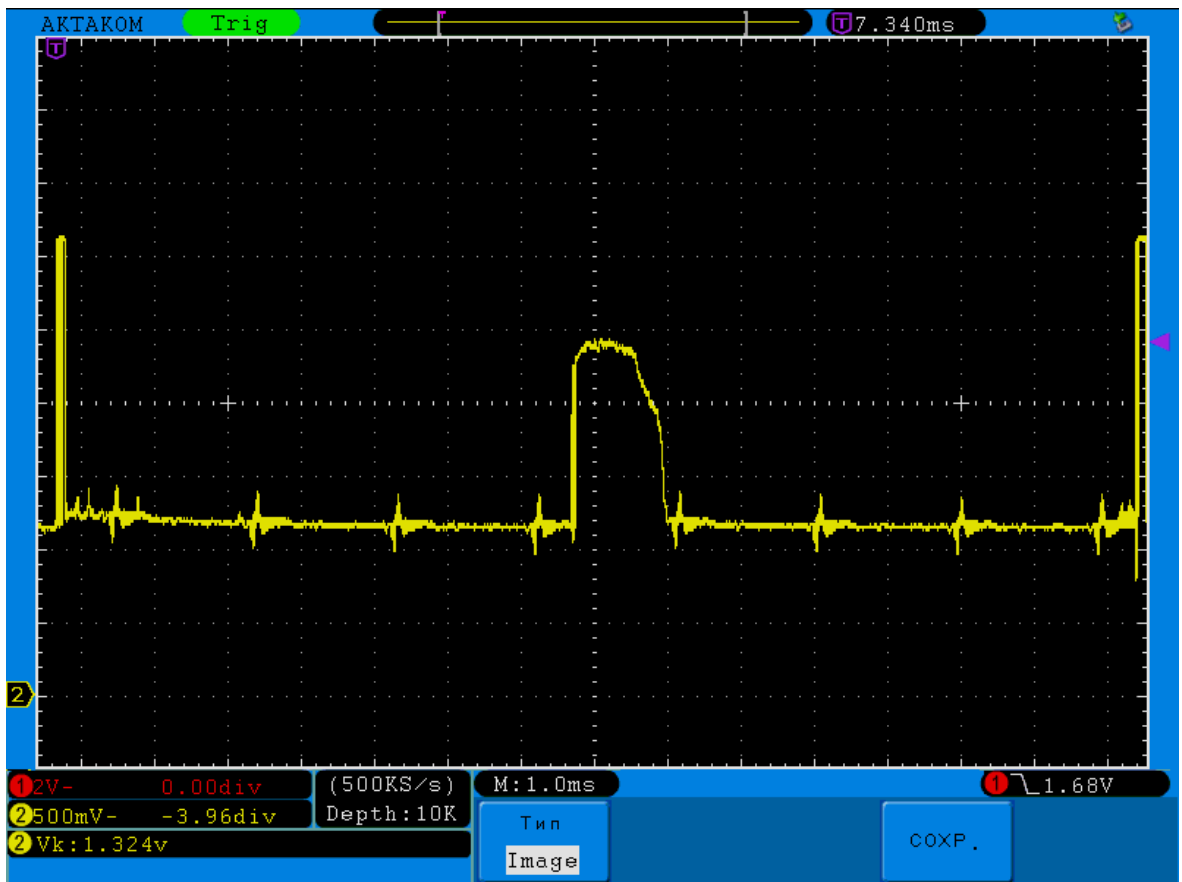


Рисунок 41 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и прозрачным филаментом 17,6 мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

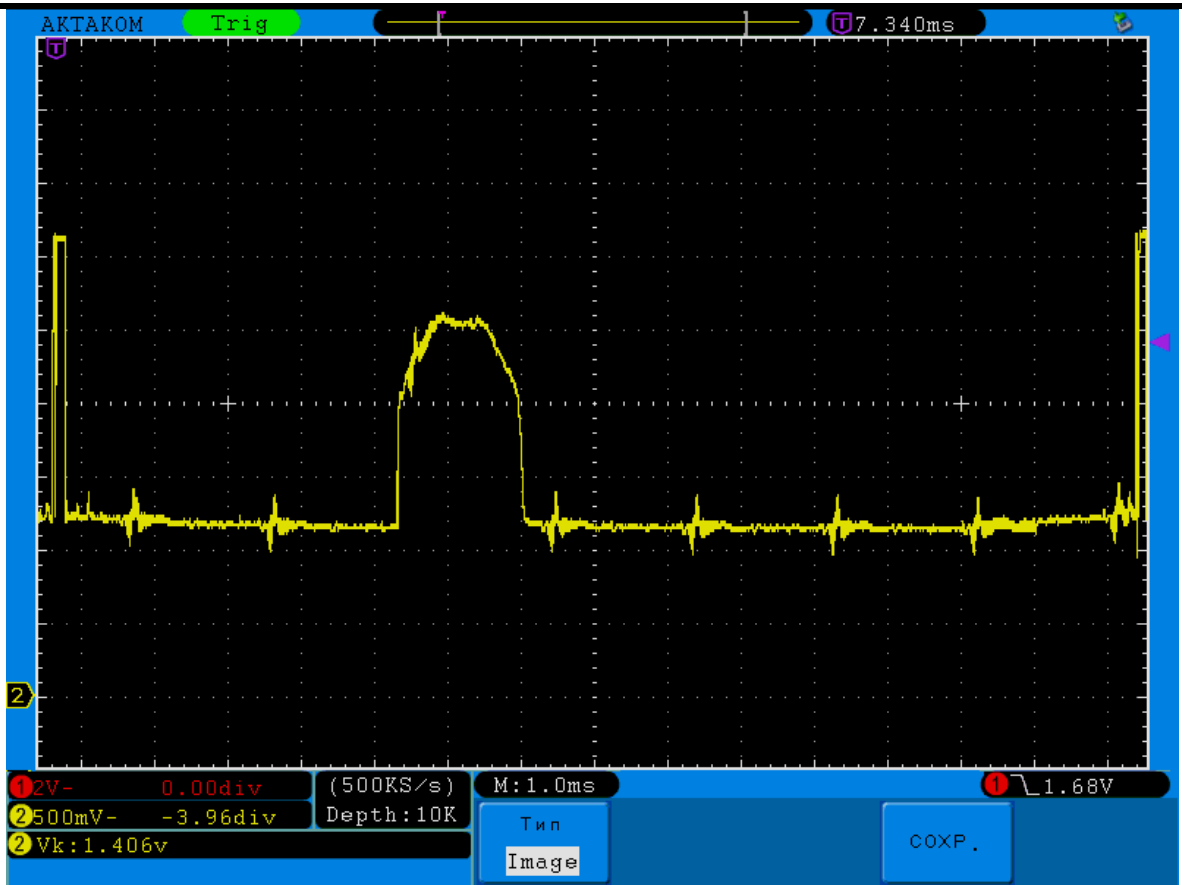


Рисунок 42 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и прозрачным филаментом 15,4 мм

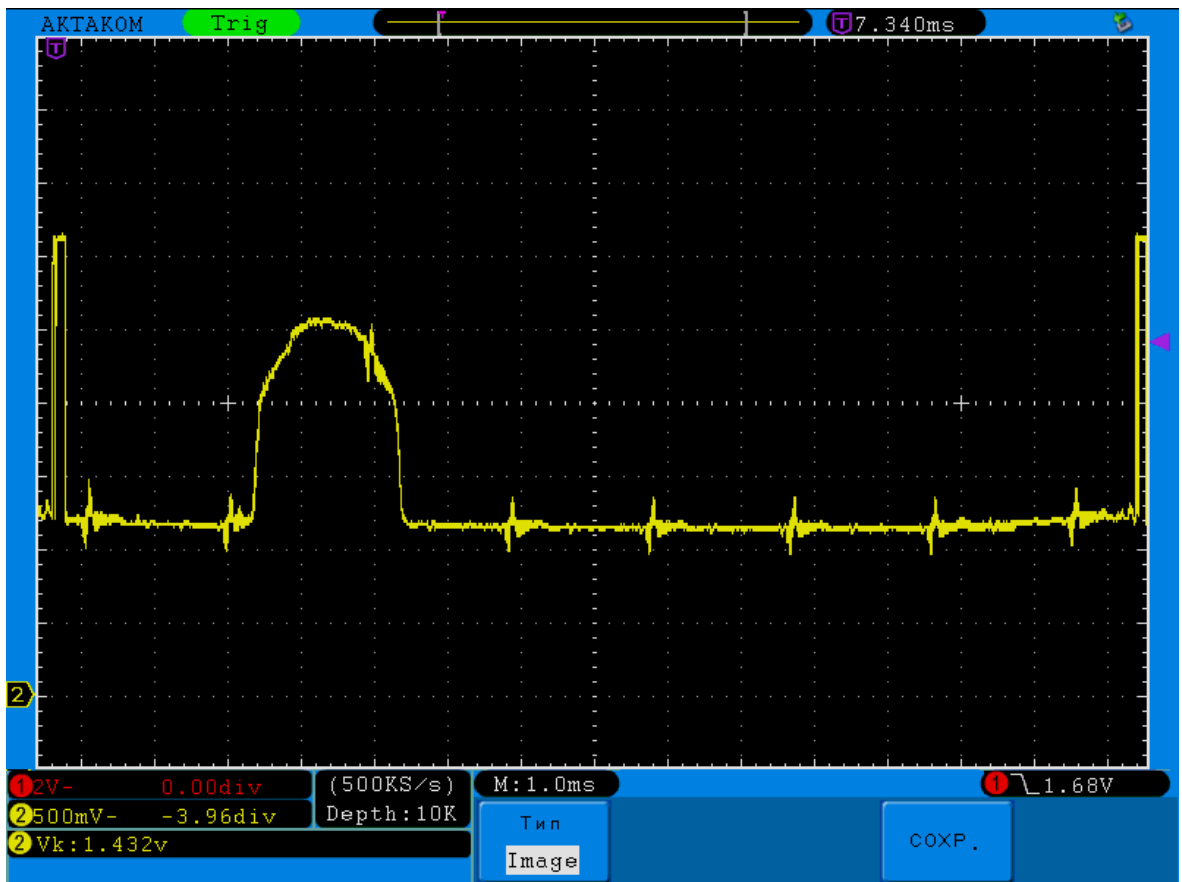


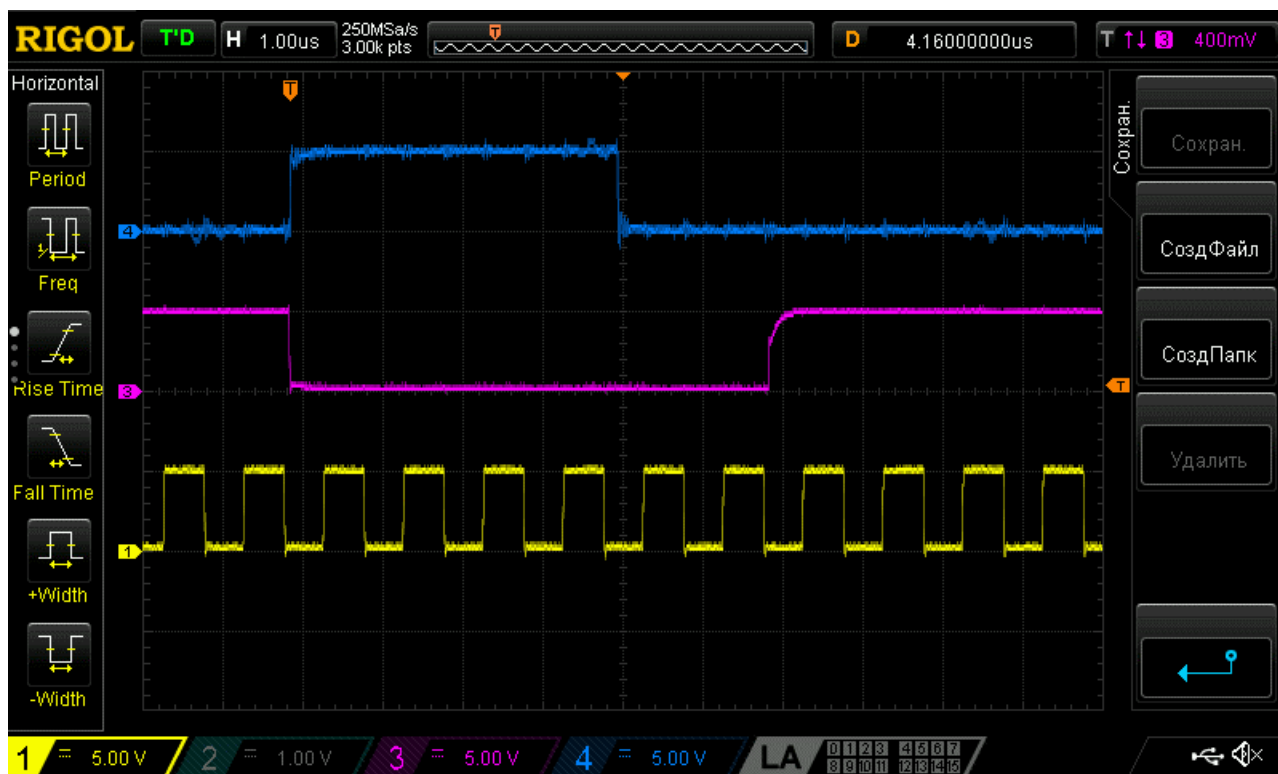
Рисунок 43 - Сигнал от МФПЛ при расстоянии S между светодиодом и прозрачным филаментом 13,2 мм (филамент на таком же расстоянии от МФПЛ)

Полученные осциллограммы совершенно аналогичны таковым из первого эксперимента. Разница, как и предполагалось в амплитуде сигнала – максимальное напряжение выдаваемое МФПЛ от тени прозрачного филамента на 0,5...0,7 В меньше, чем для непрозрачного. Сравнивая рисунки 43 и 35, можно заметить, что тень от прозрачного филамента менее резкая, потому порог напряжения, при котором оценивается длина тени, следует взять ниже – в районе 1,3...1,5 В.

Таким образом, проведя ряд опытов, было установлено, что исключить коллимирующую линзу и диафрагму из оптического канала можно. Причём для обработки сигнала допустимо использовать способ обработки сигнала на основе компаратора. Для этого требуется установить необходимый порог его срабатывания 1,3...1,5 В. При этом вне зависимости от прозрачности пластика реально выполнить поставленные задачи, а именно – вычисление диаметра филамента и определение степени эллиптичности его сечения.

### 4.3 Исследование управляющих сигналов

В ходе проведения экспериментальных исследований макета устройства были сняты осциллограммы управляющих сигналов, подаваемых на МФПЛ. Сигналы отображены на рисунке 44.



Верхний – SH, средний – ICG, нижний - øM.

Рисунок 44 – Сигналы, управляющие работой МФПЛ.

Как и говорилось, задержка сигнала SH относительно ICG на минимальные 100 нс не выполняется – перепады возникают практически одновременно. Однако, это не мешает работе устройства, а снятые осциллограммы подтверждают правильность работы схем формирования управляющих сигналов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы проведён обзор по теме «Узел подключения многоэлементный фотоприёмных линеек (МФПЛ)». Теневой метод был оптимизирован под решение поставленной задачи – измерение диаметра и координаты пластикового прутка с помощью фотоприёмной линейки. Была изучена спецификация на МФПЛ TCD1304DG, на основе которой были рассмотрены различные схмотехнические решения, отвечающие за управление данной фотоприёмной линейкой - с помощью микроконтроллера, ПЛИС и дискретной логики; отвечающие за обработку её выходного сигнала – с помощью АЦП и компаратора. Также произведён анализ методов передачи информации с МФПЛ на персональный компьютер (ПК) посредством различных интерфейсов – RS-485, USB, Ethernet и Wi-Fi.

На основании проделанного обзора была разработана схема электрическая структурная узла подключения МФПЛ. Разработаны методы управления фотоприёмной линейкой с помощью микроконтроллера AT91SAM7S64 и обработки выходного сигнала с неё. Предложен способ управления яркостью светодиодов, проработан алгоритм авторегуляции оптической мощности, излучаемой ими, на основе обработки сигнала с МФПЛ. В ходе разработки структурной схемы также были выведены формулы для расчёта диаметра и координаты контролируемого объекта. Обоснованы и определены требования ко всем сигналам в схеме.

После составления структурной схемы и определения требований к её основным компонентам была рассчитана схема электрическая принципиальная. В ходе разработки принципиальной схемы изучены схемы включения МФПЛ TCD1304DG и микроконтроллера AT91SAM7S64. Получены знания о расчёте гистерезиса для компаратора. Также построены схема укорочения импульса и схема генератора на основе Т-триггеров. Было уделено внимание согласованию логических уровней микроконтроллера и МФПЛ, а также реализованы интерфейсы обмена данными RS-485 для передачи показаний устройства на ПК и JTAG для прошивки микроконтроллера.

На основании составленной принципиальной схемы был разработан сборочный чертёж печатного узла с МФПЛ.

Также были систематизированы экспериментальные результаты исследований собранного макета устройства, которые подтверждают правильность выбранных технических решений.

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТУ 22.29.29-001-40266883-2016 Нить полимерная для 3D печати – ABS [Электронный ресурс]. – URL: <https://всероссийская-база-ту.рф/tehnicheskie-usloviya-tu-na-nit-polimernuyu-dlya-3d-pechati> (дата обращения: 24.05.2020).
2. Черепанов, А. Н. Построение теневого датчика для контроля геометрических параметров изделий / А.Н. Черепанов, А.С. Тыщенко, М.А. Попова, Д.О. Вахнин // ИННОВАЦИИ И ИВЕСТИЦИИ. – 2016. – №9. – С. 173 – 177.
3. Каштанов, Н.В. ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ФОТОПРИЕМНОЙ ЛИНЕЙКИ В ДАТЧИКЕ ТОЛЩИНЫ ПЛАСТИКОВОЙ НИТИ / Н.В. Каштанов, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 54-й научно-техн. конференции - Ульяновск: УлГТУ, 2020 (в печати).
4. TCD1304DG [Электронный ресурс]. – URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/137658/TOSHIBA/TCD1304DG.html> (дата обращения: 24.05.2020).
5. Черторийский, А.А. Применение многоэлементной фотоприемной линейки в датчике линейных перемещений / А.А. Черторийский, А.М. Низаметдинов, Ю.С. Борисов // Вузовская наука в современных условиях: Сборник материалов 52-й научно-технической конференции (29 января – 3 февраля 2018 года). Ч.2. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. – С.32-35.
6. Ethernet [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ethernet> (дата обращения: 24.05.2020).
7. Бугров, В.Е. Оптоэлектроника светодиодов. Учебное пособие / В.Е. Бугров, К.А. Виноградова. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.
8. Светодиодная лампа с регулировкой яркости / Хабр. [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/post/110270/> (дата обращения: 25.05.2020).
9. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.
10. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл - Изд. 2-е. - М.: Издательство БИНОМ. - 2014. - 704 с., ил.
11. Черепанов, А. Н. Оптоэлектронный датчик профиля поверхности / А.Н. Черепанов, А.С. Тыщенко, М.А. Попова, Д.О. Вахнин, Ю. В. Бочкарёв, С. Н. Пестерев // СОВРЕМЕННАЯ НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ. СЕРИЯ: ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. – 2017. – №5. – С. 36 – 40.
12. Семёнов А. В. Импульсный датчик перемещения: Магистерская диссертация по специальности 11.04.04. – Тольятти, ТГУ, 2018. – 71 с.
13. ПЗС линейка: с чем её едят / Хабр. [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/post/457762/> (дата обращения: 03.06.2020).

14. Редькин П. П. 32/16-битные микроконтроллеры ARM7 семейства AT91SAM7 фирмы Atmel. Руководство пользователя (CD+). – М.: Издательский дом «Додэка - XXI», 2008. – 704 с.: ил. (Серия «Программируемые системы»).

15. BC856/857/858/859/860 [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/160/DOC000160226.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

16. 2SA1015 [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/637/DOC005637778.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

17. LM111, LM211, LM311 [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/222/DOC000222396.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

18. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. 12-е изд. Том I: Пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.: ил.

19. LM2596 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1841989.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

20. NCP1117, NCV1117 [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/092/DOC001092286.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

21. 74НС74 [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/225/DOC000225307.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

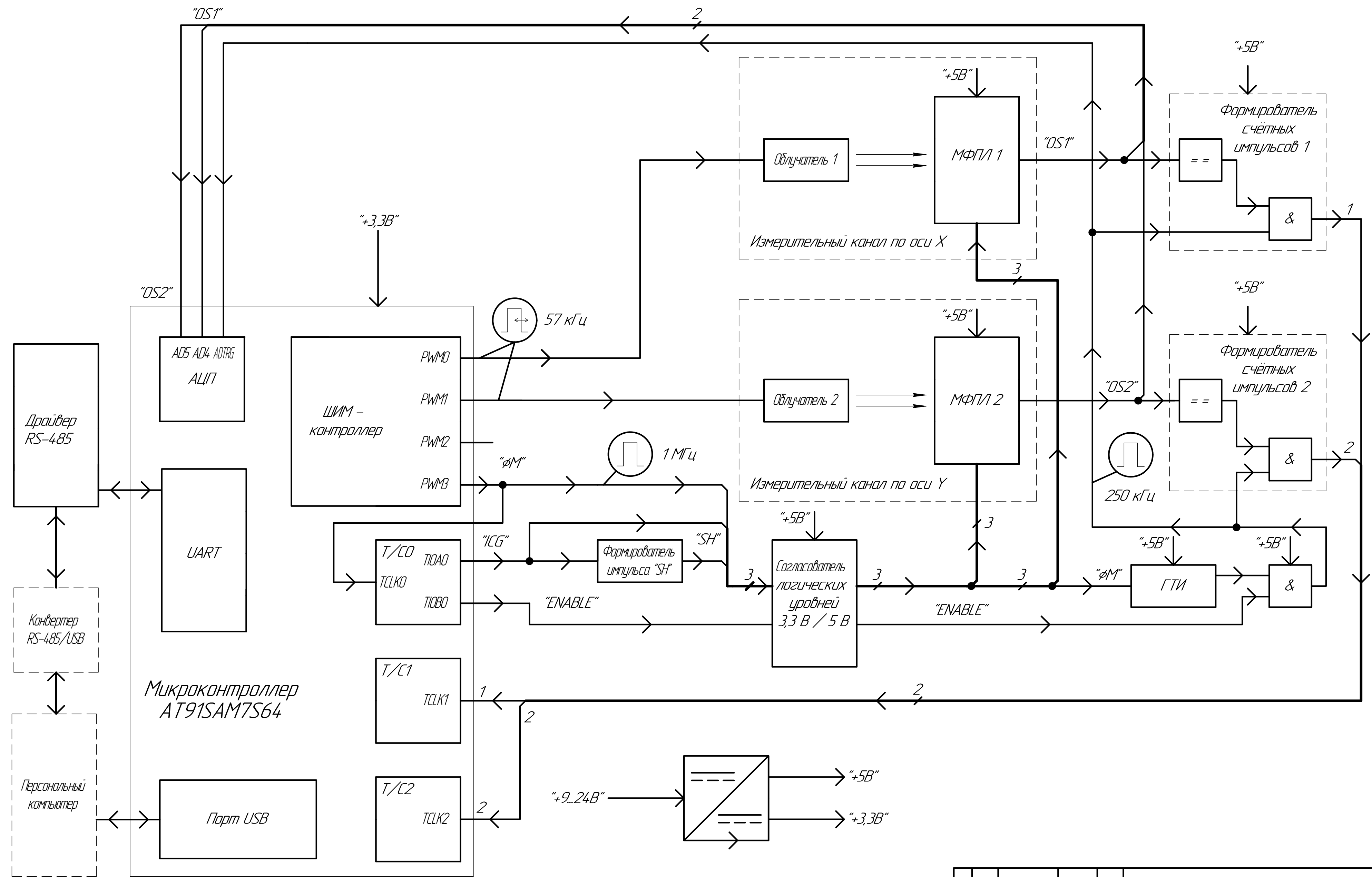
22. 74НС08 [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/428/DOC005428545.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

23. 74НС14 [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/223/DOC000223080.pdf> (дата обращения: 03.06.2020).

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Схема электрическая структурная узла подключения МФПЛ

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64



Инд. № подл. Взам. инв. № Инв. № дубл. Подл. и дата. Справ. №. Перв. примен.

ВКР-2069378-1103.01-09-20 31				Лит.	Масса	Масштаб
Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Узел подключения МФП/Л		
Разраб.	Каштанов Н.В.	Лис	8.6.2020	у		
Проб.	Черепицкий А.А.	Лис	9.6.2020	Схема электрическая структурная		
Т.контр.				Лист	1	Листов
Н.контр.	Дулов О.А.		13.6.2020	РТ88-41 УлГТУ		
Утв.	Ташлинский А.Г.		16.6.2020	Копировал		
				Формат А2		

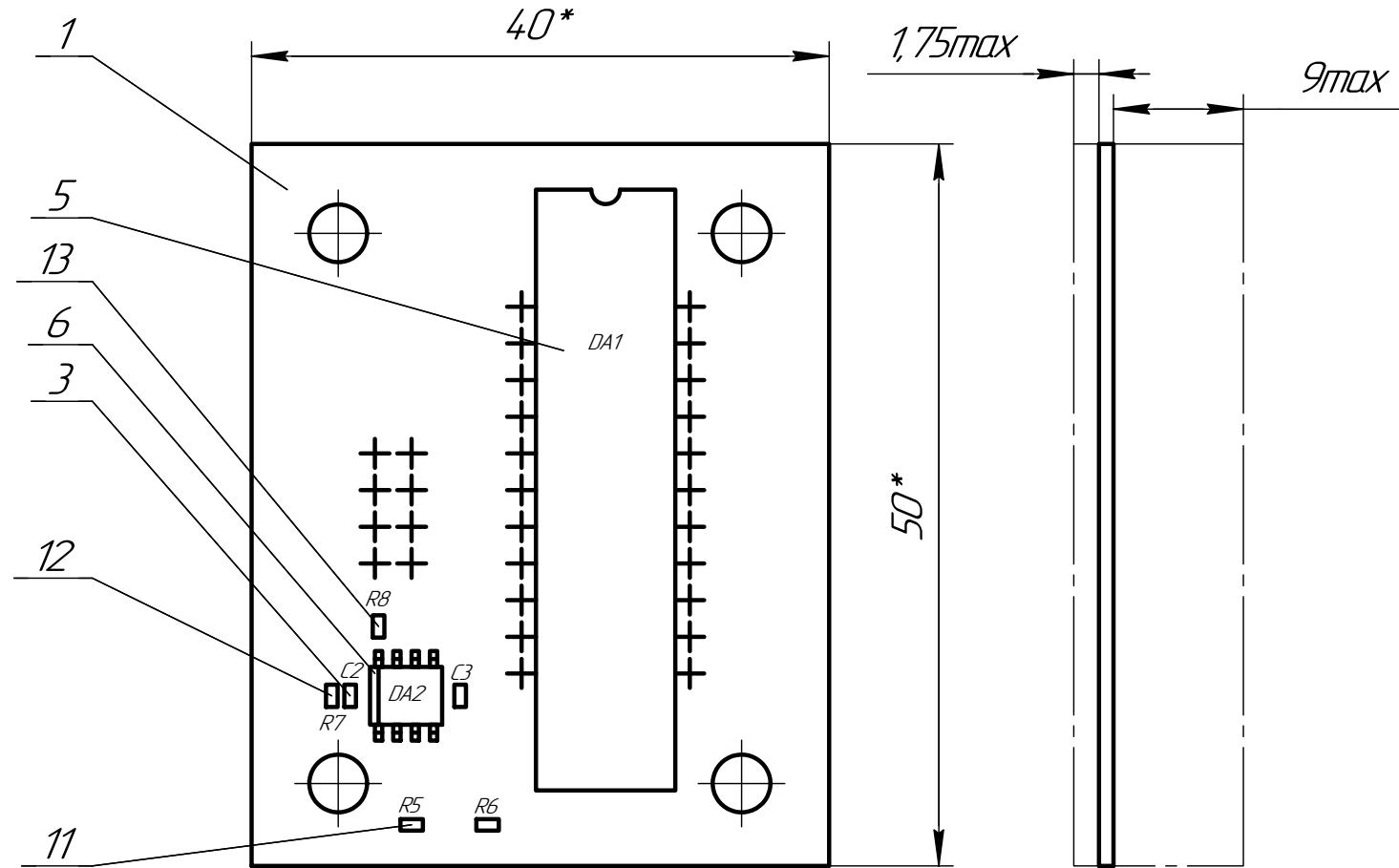


**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

**Сборочный чертёж блока МФПЛ**

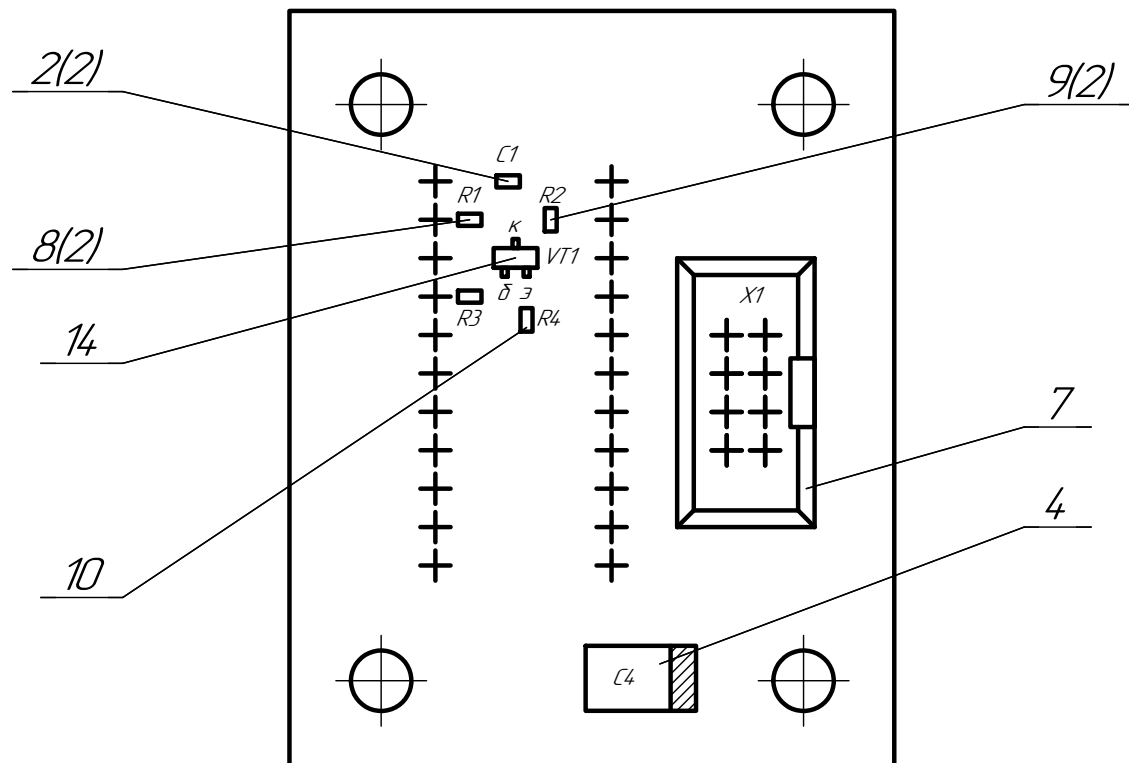
					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

Вид со стороны установки навесных элементов









1. \* размеры для справок.
2. Электромонтаж выполнять согласно ВКР-2069378-11.03.01-09-20 ЭЗ "Схема блоков А4 и А5"
3. Установку ИЭТ поз. 5 и 7 проводить согласно ГОСТ 29137-91 вариант 351.000.00.00.00.
4. Анод конденсатора поз. 4 условно заштрихован.
5. Маркировка элементов показана условно.
6. Паять припоем ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
7. Выступающие концы выводов подрезать до 1 мм.

Вид со стороны печатного монтажа



				<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20 СБ</b>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Узел подключения МФПЛ. Блок с МФПЛ Сборочный чертёж	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Каштанов Н. В.			8.6.2020		У		2:1
Пров.	Черторийский А. А.			9.6.2020		Лист 1	Листов 1	
Т.контр.								
Н.контр.	Дулов О. А.			13.6.2020				
Утв.	Ташлинский А. Г.			16.6.2020				
						<b>РТ88-41 УЛГТУ</b>		

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание																																	
							Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата																												
<u>Документация</u>																																							
*1			ВКР-2069378-11.03.01-09-20 ЭЗ	Узел подключения МФПЛ		A3, A2																																	
A3			ВКР-2069378-11.03.01-09-20 СБ	Блок с МФПЛ																																			
<u>Детали</u>																																							
		1		Печатная плата	1																																		
<u>Прочие изделия</u>																																							
<u>Конденсаторы</u>																																							
		2		100 нФ ± 5%, 16 В, SMD типоразмер 0603	2	С1, С3																																	
		3		12 нФ ± 5%, 50 В, SMD типоразмер 0603	1	С2																																	
		4		ECASD40J106M055K00, серия ECAS, производитель "Murata Manufacturing"	1	С4																																	
<u>Микросхемы</u>																																							
		5		TCD1304DG, производитель "Toshiba"	1	DA1																																	
		6		LM311MX/NOPB [SOIC-8], производитель "Texas Instruments"	1	DA2																																	
		7		Разъём IDC8 male	1	XP1																																	
<u>Резисторы</u>																																							
		8		150 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	2	R1, R3																																	
		9		2,2 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	2	R2, R6																																	
		10		750 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	R4																																	
		11		5,6 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	R5																																	
		12		33 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	R7																																	
		13		1 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	R8																																	
<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Изм.</td> <td style="width: 15%;">Лист</td> <td style="width: 15%;">№ докум.</td> <td style="width: 15%;">Подп.</td> <td style="width: 15%;">Дата</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Разраб.</td> <td></td> <td>Каштанов Н. В.</td> <td></td> <td>8.6.2020</td> <td style="width: 15%;">Лит.</td> <td style="width: 15%;">Лист</td> </tr> <tr> <td>Пров.</td> <td></td> <td>Черторицкий А. А.</td> <td></td> <td>9.6.2020</td> <td>У</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Н.контр.</td> <td></td> <td>Дулов О. А.</td> <td></td> <td>13.6.2020</td> <td colspan="2" rowspan="2" style="text-align: center; vertical-align: middle;"><b>РТДД-41 УЛГТУ</b></td> </tr> <tr> <td>Утв.</td> <td></td> <td>Ташлинский А. Г.</td> <td></td> <td>16.6.2020</td> </tr> </table>							Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			Разраб.		Каштанов Н. В.		8.6.2020	Лит.	Лист	Пров.		Черторицкий А. А.		9.6.2020	У	1	Н.контр.		Дулов О. А.		13.6.2020	<b>РТДД-41 УЛГТУ</b>		Утв.		Ташлинский А. Г.		16.6.2020
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата																																			
Разраб.		Каштанов Н. В.		8.6.2020	Лит.	Лист																																	
Пров.		Черторицкий А. А.		9.6.2020	У	1																																	
Н.контр.		Дулов О. А.		13.6.2020	<b>РТДД-41 УЛГТУ</b>																																		
Утв.		Ташлинский А. Г.		16.6.2020																																			
Узел подключения МФПЛ																																							
Блок МФПЛ																																							
Копировал _____ Формат А4																																							



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Схема электрическая принципиальная узла подключения  
МФПЛ и перечень элементов к ней

					<i>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

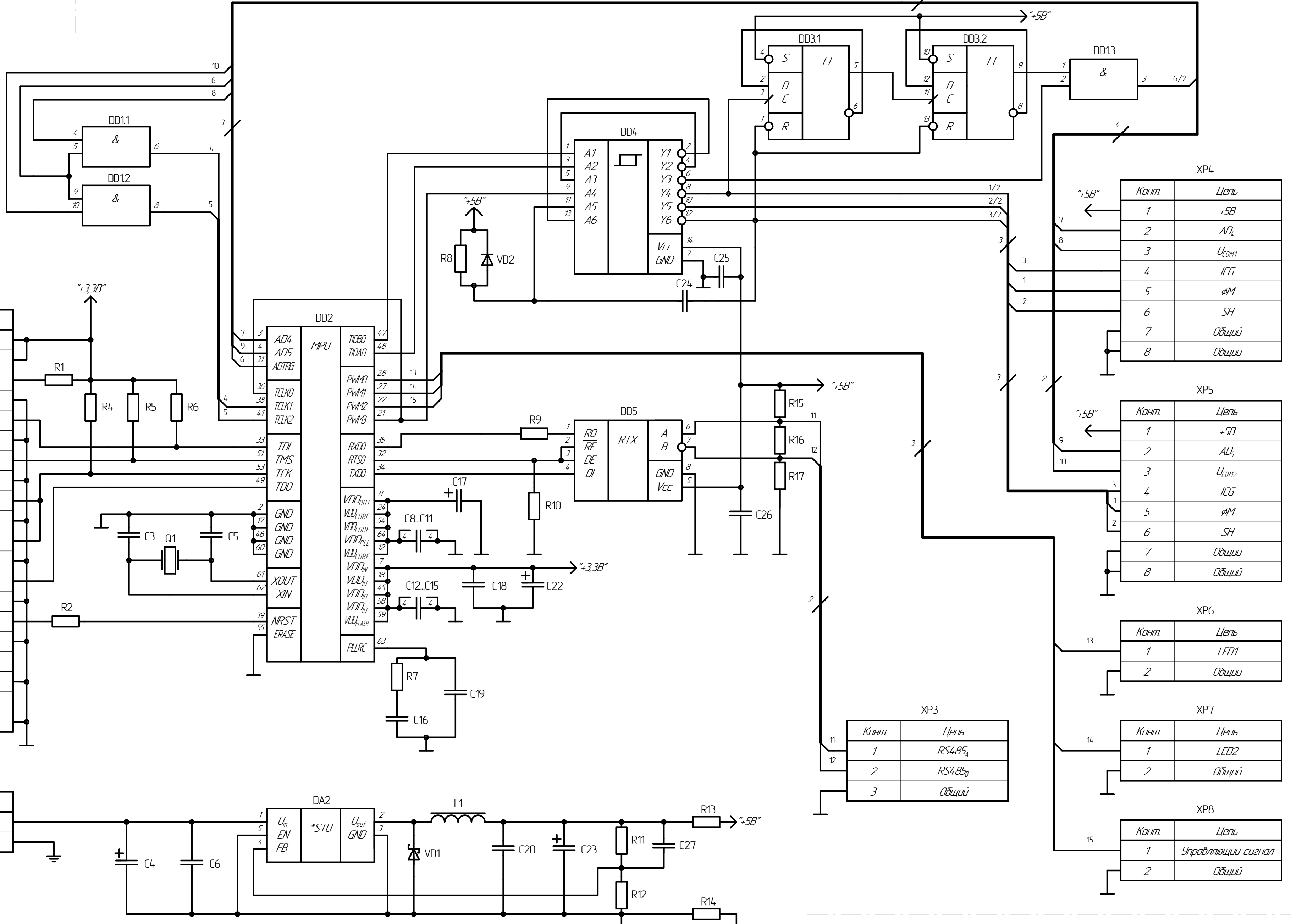
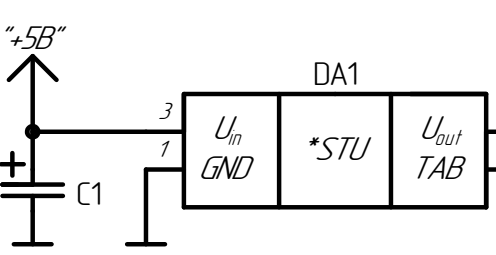
"Схема блока А1"

XP1

Цель	Конт.
+3.3 В	1
+3.3 В	2
+3.3 В	3
GND <sub>JTAG</sub>	4
JTAG <sub>TDI</sub>	5
GND <sub>JTAG</sub>	6
JTAG <sub>TMS</sub>	7
GND <sub>JTAG</sub>	8
JTAG <sub>TCK</sub>	9
GND <sub>JTAG</sub>	10
JTAG <sub>TCK</sub>	11
GND <sub>JTAG</sub>	12
JTAG <sub>TDO</sub>	13
GND <sub>JTAG</sub>	14
RESET	15
GND <sub>JTAG</sub>	16
GND <sub>JTAG</sub>	17
GND <sub>JTAG</sub>	18
GND <sub>JTAG</sub>	19
GND <sub>JTAG</sub>	20

XP2

Цель	Конт.
9...24 В	1
GND	2



XP4

Конт.	Цель
1	+5В
2	AD <sub>i</sub>
3	U <sub>COM1</sub>
4	ICG
5	AM
6	SH
7	Общий
8	Общий

XP5

Конт.	Цель
1	+5В
2	AD <sub>s</sub>
3	U <sub>COM2</sub>
4	ICG
5	AM
6	SH
7	Общий
8	Общий

XP6

Конт.	Цель
1	LED1
2	Общий

XP3

Конт.	Цель
1	RS485 <sub>A</sub>
2	RS485 <sub>B</sub>
3	Общий

XP7

Конт.	Цель
1	LED2
2	Общий

XP8

Конт.	Цель
1	Управляющий сигнал
2	Общий

ВКР-2069378-1103.01-09-20 33

Узел подключения МФПЛ

Схема электрическая принципиальная

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
					У		
Разраб.	Каштанов Н.В.			8.6.2020	Лист	1	Листов
Проб.	Черепицкий А.А.			9.6.2020			2
Т.контр.							
Н.контр.	Дулов О.А.			13.6.2020			
Утв.	Ташинский А.Г.			16.6.2020			

РТД-41 УлГТУ

Копирован Формат А2

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

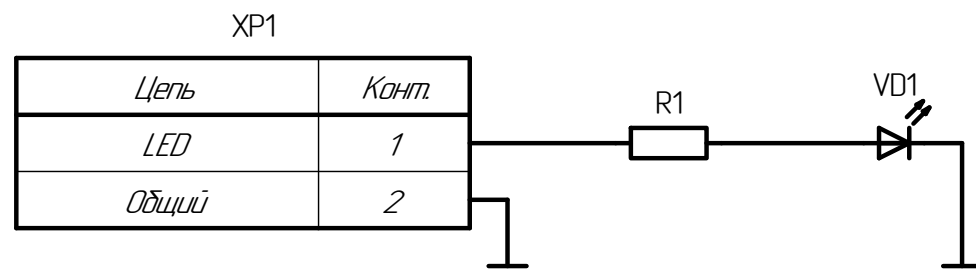
Изм. № эл.д.

Взам. инв. №

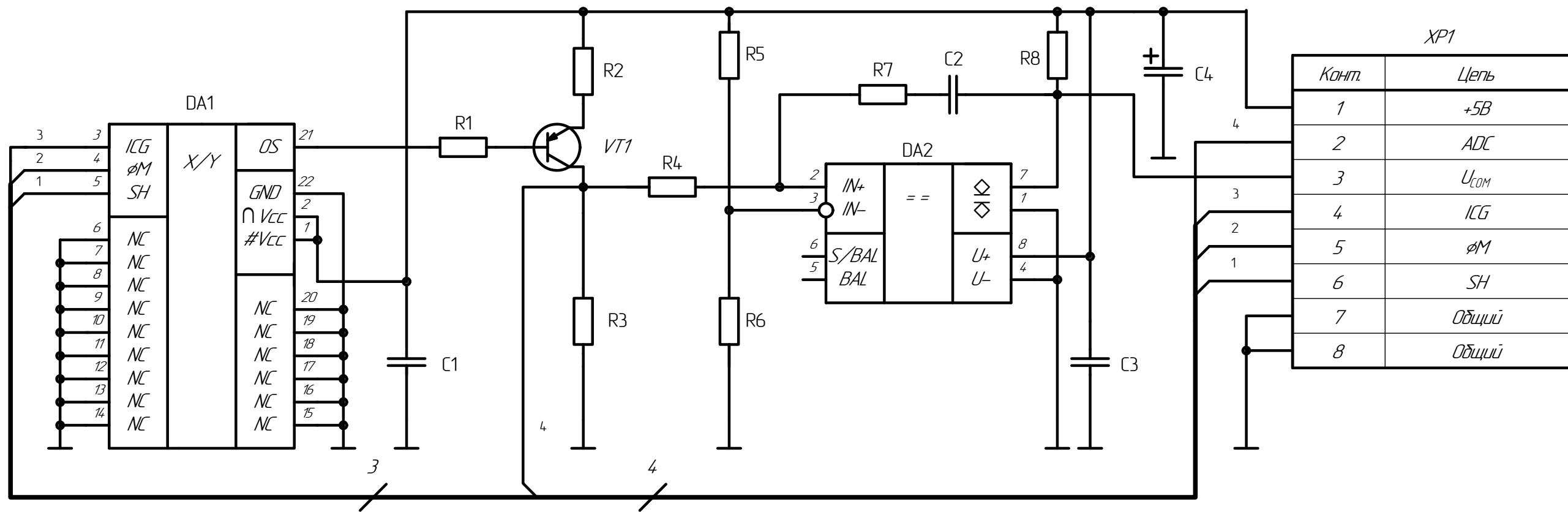
Подп. и дата

Изм. № подл.

"Схема блоков А2 и А3"



"Схема блоков А4 и А5"



Изм. №	№ подл.	Дата
Взам. инв. №	Инд. № дораб.	Подп. и дата

Перв. примен.	Поз. обозначение	Наименование		Кол.	Примечание
Справ. №	A1	Блок микроконтроллера		1	
		Конденсаторы			
	C1, C17, C22	ECASD40J106M055K00, серия ECAS, производитель "Murata Manufacturing"		3	10 мкФ, 6,3 В
	C2, C23	ECASD90J227M010K00, серия ECAS, производитель "Murata Manufacturing"		2	220 мкФ, 6,3 В
	C3, C5	12 нФ ± 5%, 50 В, SMD типоразмер 0603		2	
	C4	B41851F7108M000, МЭК 60384-4, производитель Epcos		1	1000 мкФ, 35 В
	C6-C15	100 нФ ± 5%, 16 В, SMD типоразмер 0603		15	
	C18, C20, C21				
	C25, C26				
	C16	10 нФ ± 5%, 50 В, SMD типоразмер 0603		1	
	C19	1 нФ ± 5%, 50 В, SMD типоразмер 0603		1	
	C24	270 нФ ± 5%, 50 В, SMD типоразмер 0603		1	
	C27	3,3 нФ ± 5%, 50 В, SMD типоразмер 0603		1	
		Микросхемы			
	Подп. и дата	DA1	NCP1117ST33T3G, производитель "ON Semiconductor", [SOT-223]		1
DA2		LM2596T-5.0/NOPB, производитель "Texas Instruments", [TO-220-5L]		1	
DD1		SN74HC08D, производитель "Texas Instruments", [SOIC-14]		1	
DD2		AT91SAM7S64, производитель "Atmel", [LQFP-64]		1	
DD3		SN74HC74D, производитель "Texas Instruments", [SOIC-14]		1	
Инв. № дубл.	DD4	SN74HC14D, производитель "Texas Instruments", [SOIC-14]		1	
	DD5	SN75176BD, производитель "Texas Instruments", [SOIC-8]		1	
Взам. инв. №	HL1	Светодиод красный, SMD типоразмер 1608		1	
Подп. и дата	L1	Индуктивность SMD, CDRH8D43NP-330NC, производитель "Sumida"		1	33 мкГн, 14 А
	Q1	Резонатор кварцевый 18.432 МГц, [HC-49S]			
<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>					
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
	Разраб.	Каштанов Н. В.			8.6.2020
	Пров.	Черторицкий А. А.			9.6.2020
	Н.контр.	Дулов О. А.			13.6.2020
	Утв.	Ташлинский А. Г.			16.6.2020
Узел подключения МФП/					
Перечень элементов					
			Лит.	Лист	Листов
			У	1	3
<b>РТДд-41 УЛГТУ</b>					



Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<u>Резисторы</u>			
R1, R4-R6	100 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	4	
R2	330 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
R3, R11	1,2 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	2	
R7	1,5 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
R8	5,6 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
R9, R16	120 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	2	
R10, R15, R17	680 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	3	
R12	390 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
R13, R14	0 Ом, SMD типоразмер 0805	2	
<u>Приборы полупроводниковые</u>			
VD1	Диод Шоттки SS54, производитель "Multicomp"	1	
VD2	Диод DL4148, производитель "Micro Commercial Components", [DL-35]	1	
<u>Соединения контактные</u>			
XP1	IDC20 male	1	
XP2, XP6-XP8	WF2 male	4	
XP3	WF3 male	1	
XP4, XP5	IDC8 male	2	
A2, A3	<u>Блок излучателя</u>	2	
R1	Резистор 1,5 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
VD1	Светодиод синий, SMD типоразмер 0603	1	
XP1	Разъем WF2 male	1	
A4, A5	<u>Блок МФП/Л</u>	2	
<u>Конденсаторы</u>			

Инд. № подл.	Подп. и дата
	Инд. № докл.
Инд. № подл.	Взам. инв. №
	Подп. и дата
Инд. № подл.	Изм.
	Лист

ВКР-2069378-11.03.01-09-20

Лист  
2

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
C1, C3	100 нФ ± 5%, 16 В, SMD типоразмер 0603	2	
C2	12 нФ ± 5%, 50 В, SMD типоразмер 0603	1	
C4	ECASD40J106M055K00, серия ECAS, производитель "Murata Manufacturing"	1	10 мкФ, 6,3 В
<u>Микросхемы</u>			
DA1	TCO1304DG, производитель "Toshiba"	1	
DA2	LM311MX/NOPB, производитель "Texas Instruments", [SOIC-8]	1	
<u>Резисторы</u>			
R1, R3	150 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	2	
R2, R6	2,2 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	2	
R4	750 Ом ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
R5	5,6 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
R7	33 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
R8	1 кОм ± 1%, SMD типоразмер 0805	1	
VT1	Транзистор BC860C, Производитель "Nexperia", [SOT-23]	1	
XP1	Разъем IDC8 male	1	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

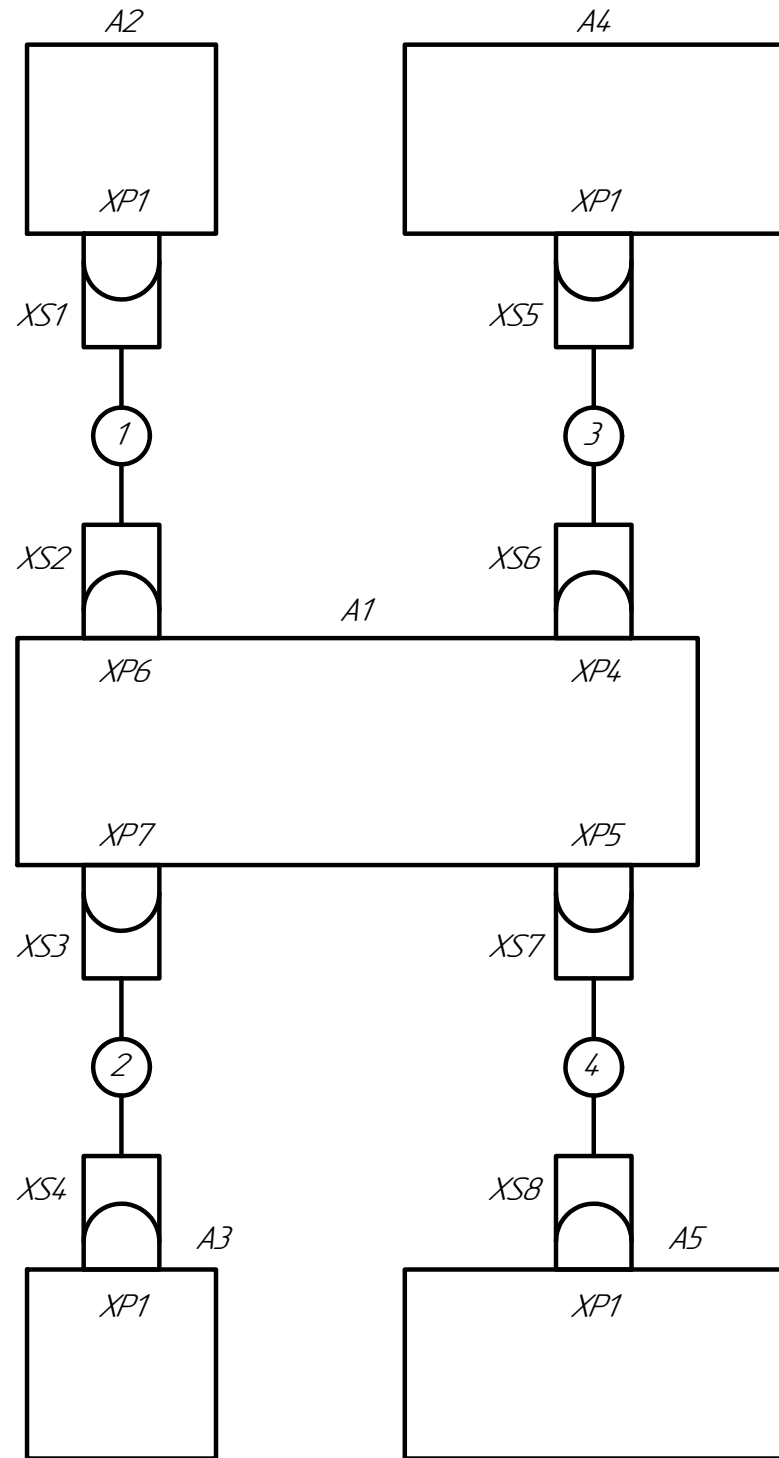
ВКР-2069378-11.03.01-09-20

# ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Схема электрическая соединений узла подключения МФПЛ

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

ВКР-2069378-11.03.01-09-20 34



Обозначение провода	Откуда идёт	Куда поступает	Данные провода	Примечание
		Кабели		
1	= A1 - XP6	= A2 - XP1		
2	= A1 - XP7	= A3 - XP1		
3	= A1 - XP4	= A4 - XP1		
4	= A1 - XP5	= A5 - XP1		

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	Соединения контактные		
XS1..XS4	WF2 female	4	
XS5..XS8	IDC-08 female	4	

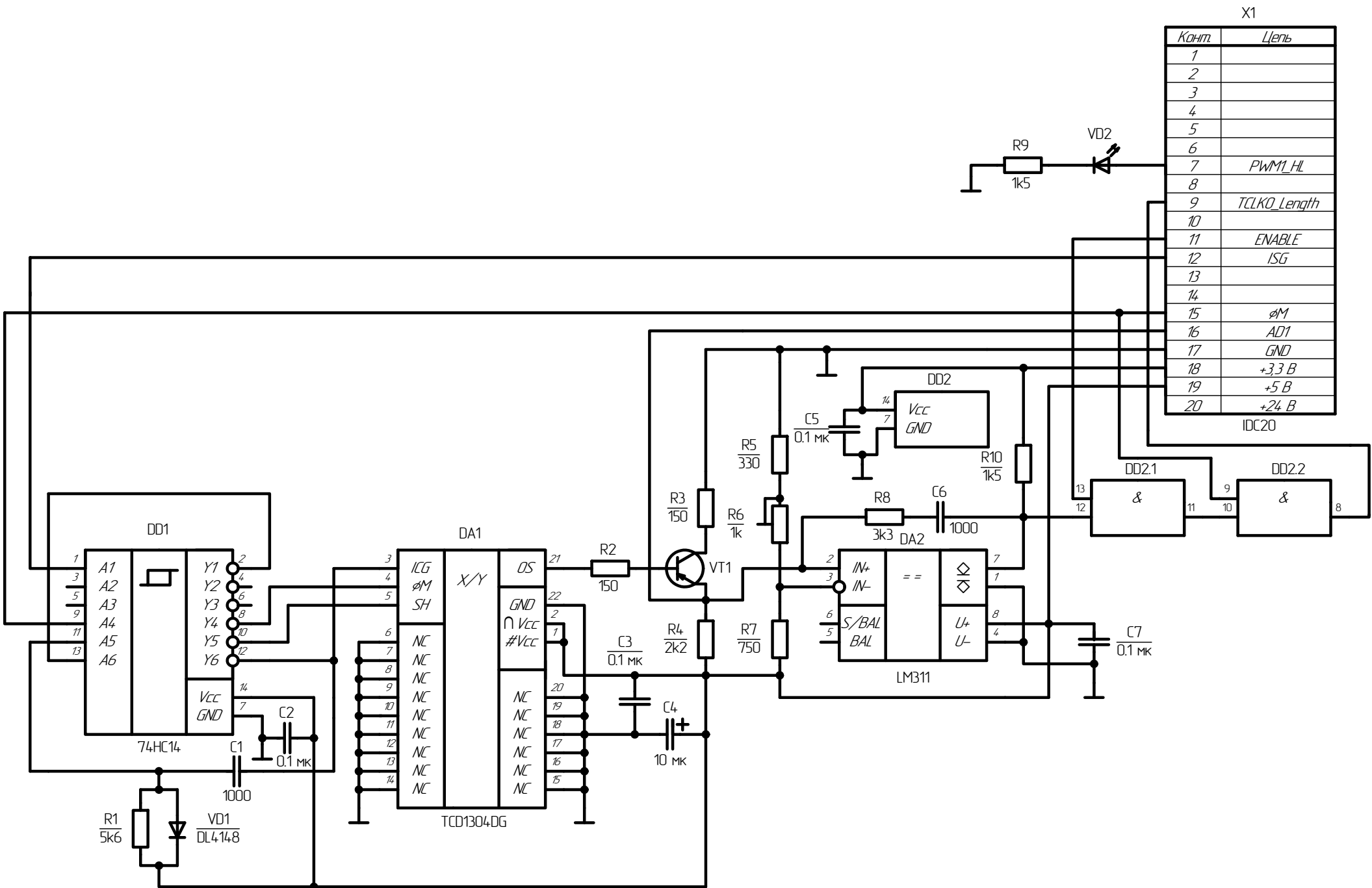
Перв. примен.  
Справ. №  
Подп. и дата  
Изм. № дораб.  
Взам. инв. №  
Подп. и дата  
Изм. № подл.

ВКР-2069378-11.03.01-09-20 34			
Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Каштанов Н. В.	<i>[Signature]</i>	8.6.2020
Пров.	Черторийский А. А.	<i>[Signature]</i>	9.6.2020
Т.контр.			
И.контр.	Дулов О. А.		13.6.2020
Утв.	Ташлинский А. Г.		16.6.2020
Узел подключения МФПЛ			Лит. Масса Масштаб
Схема электрическая соединений			У
			Лист 1 Листов 1
			РТ88-41 УЛГТУ

# ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Схема электрическая принципиальная макета

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78



X1

Конт.	Цель
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	PWM_HL
8	
9	TCLKO_Length
10	
11	ENABLE
12	ISG
13	
14	
15	φM
16	AD1
17	GND
18	+3.3 B
19	+5 B
20	+24 B

IDC20

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Программа работы микроконтроллера AT91SAM7X256 на языке C

```
//#include "C:\AT91SAM7X256_projects\project.h"
#include <math.h>

#define PWM_Period_M 24 // Число, определяющее частоту ШИМ, как
MCK/(X*PWM_Period), где X - делитель частоты тактирования PWMC
#define PWM_Period_ADC PWM_Period_M*4
#define PWM_Period_HL 10000
#define PWM_Delta_DC 10 // шаг регулировки скважности
#define Duty_Cycle_0 1000 // Постоянная составляющая Duty Cycle
#define Discret 1000 // Дискретизация массива значений синусоиды за один период
//#define White_level 0.9881 // Скважность уровня белого (засветка)
//#define Black_level 0.9626 // Скважность уровня чёрного (оптимальная освещённость)
#define Number_of_pixels 3694 // Количество пикселей в линейке
#define Setting_light_length 50 // Количество пикселей, отводимых на подстройку
уровня чёрного

#define ENABLE_vaule 280 // количество тактовых импульсов ШИМ0, во время
которых после начала кадра или до его конца импульс ENABLE неактивен (128 импульсов по
идее, остальное - прозапас)

#define ADVREF 3300 // Напряжение АЦП в мВ
#define White_level_ref 1200 // Эталонный уровень белого в мВ
#define Number_missing_frames 300 // количество начальных кадров, которое
пропускается контроллером при подстройке уровня белого

#define Number_average 100 // количество усредняемых значений
#define true 1
#define false 0

//Дополнительные действия для совместимости с IAR7.5
#include <board.h>
//#define AT91B_MCK 48054857 // тактовая частота микроконтроллера
//-----
/* Переферийные функции прерываний
/*-----
/* \Функция AT91F_AIC_ConfigureIt
/* \Инициализация прерываний
/*-----
```

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

```

int AT91F_AIC_ConfigureIt (
    AT91PS_AIC pAic, //\arg pointer to the AIC registers
    unsigned int irq_id, //\arg interrupt number to initialize
    unsigned int priority, //\arg priority to give to the interrupt
    unsigned int src_type, //\arg activation and sense of activation
    void (*newHandler) () )//\arg address of the interrupt handler
{
    unsigned int oldHandler;
    unsigned int mask ;

    oldHandler = pAic->AIC_SVR[irq_id];

    mask = 0x1 << irq_id ;
    /* Disable the interrupt on the interrupt controller
    pAic->AIC_IDCR = mask ;
    /* Save the interrupt handler routine pointer and the interrupt priority
    pAic->AIC_SVR[irq_id] = (unsigned int) newHandler ;
    /* Store the Source Mode Register
    pAic->AIC_SMR[irq_id] = src_type | priority ;
    /* Clear the interrupt on the interrupt controller
    pAic->AIC_ICCR = mask ;

    return oldHandler;
}

/*-----
/* \Функция AT91F_AIC_EnableIt
/* \ разрешение обработки прерывания\brieff Enable corresponding IT number
/*-----

void AT91F_AIC_EnableIt (
    AT91PS_AIC pAic, //\arg pointer to the AIC registers
    unsigned int irq_id ) //\arg interrupt number to initialize
{
    /* Enable the interrupt on the interrupt controller
    pAic->AIC_IECR = 0x1 << irq_id ;
}

//-----

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**



```

long double sinus[1000]; // массив значений синусоиды за один период
unsigned char pixel_values [Setting_light_length]; // массив значений ADC за один кадр
unsigned int ADC_average [Number_average]; // массив усреднённых значений ADC
примерно за Number_average кадров

unsigned int DTY_HL=PWM_Period_HL; // изначальная скважность равна нулю
unsigned int n=0; // счётчик средних значений АЦП
unsigned int u = 0; // счётчик импульсов для АЦП
unsigned int s = 0; // счётчик средних значений длины
unsigned int L[Number_average]; // длины в мкм
unsigned int L_average=0; // средняя длина за Number_average кадров в мкм
unsigned int White_level=0; // уровень белого, обновляемый каждый кадр
unsigned int White_level_average=0; //уровень белого, обновляемый каждые
Number_average кадров
unsigned int h=0; // первые циклы установления уровня белого пропускаем (счётчик -
само кол-во пропущенных в константе)
unsigned char fragmented_average_values[4];
unsigned int equilibrium_level=false; // флаг завершения первичной регулировки
unsigned int END_frame = false; // флаг конца/начала кадра
unsigned int ADC_average_FULLL = false; // флаг заполненности массива
unsigned int Length_average_FULLL = false; // флаг заполненности массива
unsigned int Length_average_calculated = false; // флаг завершения расчёта среднего
значения длины
unsigned int White_average_calculated = false; // флаг завершения расчёта среднего
значения уровня белого

void PLL_con (); // Задание МСК=48,054857 МГц
void I_O_con (); // Конфигурация PIO
void delay (); // задержка в виде зависания в цикле ~2 с
void PWM_con(); // конфигурация ШИМ
void TC0_con (); // конфигурация Т/С 0
void TC1_con (); // конфигурация Т/С 1
void AIC_con (); // кофигурация котроллера прерываний
void sin_con (); // заполнение массива значений синусоиды за один период

```

```

void ADC_con(); // конфигурация ADC
void USART_con(); // конфигурация USART
void UDP_con(); // конфигурация USB-порта

void US0_irq_handler()
{
unsigned int A;
A=*AT91C_US0_CSR;
A=A;

Length_average_calculated=false;
White_average_calculated=false;
}

void timer0_c_irq_handler()
{
unsigned int A;
A =*AT91C_TC0_SR;
A = A; //чтобы не генерировалось замечание о неиспольз переменной

if(END_frame&equilibrium_level&(Length_average_FULL == false)) //подсчитываем
длину , если конец кадра и уровень белого установлен
{
// считаем длину
L[s]=(*AT91C_TC1_CV/4)*8;// длина в мкм
*AT91C_TC1_CCR|= (1 << 2); // сбрасываем и считаем по-новой
END_frame=false;
s++;
if (s>=Number_average)
{
s=0;
Length_average_FULL = true;
}
}
else // иначе это начало кадра
{

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

```

END_frame=true;
*AT91C_PWMC_ENA|= (1<<2); // разрешить выход ШИМ-сигнала по каналу 2
if (White_average_calculated&Length_average_calculated) //если рассчитали и разбили
данные
{
*AT91C_US0_PTCR = (1 << 9); //запрещаем DMA для USART0
*AT91C_US0_TCR = 4; // количество передаваемых перемещений, которые будут
выполнены, соответствует 4 посылкам по 7 бит (2 для длины, 2 для уровня белого)
*AT91C_US0_TPR=(unsigned int) fragmented_average_values; // область памяти -
массив - откуда PDC будет класть значения в USART
*AT91C_US0_PTCR = (1 << 8); // Разрешение передатчику PDC запроса на
передачу данных в USART

Length_average_calculated=false;
White_average_calculated=false;
}
}
}

void PWMC_c_irq_handler()
{
unsigned int A;
A=*AT91C_PWMC_ISR;
A=A;
u++;
if (u>=Setting_light_length)
{
u=0;
/*AT91C_PWMC_CH2_CUPDR=PWM_Period_ADC;
*AT91C_PWMC_DIS|= (1<<2); // запретить подачу ШИМ-сигнала на канал 2
}
}

void ADC_c_irq_handler ()
{
/*AT91C_ADC_PTCR=2; // запрет на перемещение данных

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

Лист

84

```

unsigned int A;
A=*AT91C_ADC_SR;
A=A;

White_level=0;
for (int i=0; i<Setting_light_length;i++) White_level+=pixel_values[i];
White_level/=Setting_light_length; // среднее значение с пикселей
White_level=White_level*ADVREF/256; // нормируем к милливольтам

if((equilibrium_level==true)&(ADC_average_FULL==false)) // если первичная настройка
завершена и массив незаполнен
{
ADC_average[n]=White_level;
n++;
if (n>=Number_average)
{
n=0; // обнуляем счётчик
ADC_average_FULL=true; // объявляем массив заполненным
}
}

// первичный регулятор яркости светодиода
if (h>Number_missing_frames) // зайдет в тело, когда пропустит Number_missing_frames
кадров линейки
{
if ((White_level>White_level_ref)&(equilibrium_level==false)) // если текущий уровень
белого больше требуемого и он еще не установлен
{
DTY_HL--; // увеличиваем
*AT91C_PWMC_CH1_CUPDR=DTY_HL; // скважность
}
else equilibrium_level=true; // когда текущий уровень белого чуть ниже требуемого,
ставим защёлку и до следующего включения больше не трогаем
}
else h++;

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

```

*AT91C_ADC_RPR=(unsigned int)pixel_values; // область памяти - массив - куда PDC
будет класть значения АЦП
*AT91C_ADC_RCR=Setting_light_length; // количество прёмных перемещений,
которые будут выполнены, соответствует количеству пикселей, отвёденных на регулировку
уровня чёрного
*AT91C_ADC_PTCR=1; // Разрешение приёмнику PDC запроса на перемещение
данных
//
}

int main()
{
PLL_con ();
I_O_con ();
AIC_con ();
ADC_con();
PWM_con();
TC0_con ();
TC1_con ();
USART_con();
UDP_con();
*AT91C_TCB_BCR=1; // синхронизация запуска T/C1 и T/C0
while (1)
{
asm ("nop");
// считаем длину
if ((equilibrium_level==true)&(Length_average_FULL ==
true)&(Length_average_calculated==false)) // если первичная настройка завершена и массив
заполнен и UASRT передал прежние данные
{

L_average=0;
Length_average_FULL = false;
for (int i=0;i<Number_average;i++) L_average+=L[i];
L_average/=Number_average; // средняя длина за Number_average кадров в мкм

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

```

fragmented_average_values[0]=L_average & (0xFF); // младшие 8 бит длины
fragmented_average_values[1]=L_average & (0xFF00); // старшие 8 бит длины
Length_average_calculated=true; // объявляем, что рассчитали

}

// считаем средний уровень белого
if
((equilibrium_level==true)&(ADC_average_FULL==true)&(White_average_calculated==false)) //
если первичная настройка завершена и массив заполнен и UASRT передал прежние данные
{
White_level_average=0;
for (int i=0; i<Number_average;i++) White_level_average+=ADC_average[i];
ADC_average_FULL=false; // объявляем массив незаполненным, т. к. завершили его
обработку
White_level_average/=Number_average; // среднее значение уровня белого за
Number_average кадров
fragmented_average_values[2]=White_level_average & (0xFF); // младшие 8 бит уровня
белого
fragmented_average_values[3]=White_level_average & (0xFF00); // старшие 8 бит
уровня белого
White_average_calculated=true; // объявляем, что рассчитали

if (White_level_average>White_level_ref)
{
DTY_HL--; // увеличиваем
*AT91C_PWMC_CH1_CUPDR=DTY_HL; // скважность
}
else if (White_level_average<White_level_ref)
{
DTY_HL++; // уменьшаем
*AT91C_PWMC_CH1_CUPDR=DTY_HL; // скважность
}
}
return 0;
}

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

```

void PLL_con ()
{
    *AT91C_CKGR_MOR=0x00000701; // разрешение основного генератора, время
запуска ггенератора = OSCOUNT*8=56 медленных циклов
    while(!(*AT91C_PMC_SR & 1)); // ждём запуска генератора
    *AT91C_CKGR_PLLR=0x10483F0E; // ФАПЧ: кол-во медленных тактовых импульсоа
до флага готовности = 63, делитель = 14, умножение = 73, Fusb=Fpll/2
    while(!(*AT91C_PMC_SR&(1<<2))); // ждём запуска ФАПЧ
    *AT91C_PMC_MCKR|=(1 << 2); // делим текущую тактовую частоту на 2
    while(!(*AT91C_PMC_SR&(1<<3))); // ждём завершения смены делителя
    *AT91C_PMC_MCKR|=3; // переводим тактирование МК на ФАПЧ
    while(!(*AT91C_PMC_SR&(1<<3))); // ждём завершения перехода тактирования МК
на ФАПЧ
    *AT91C_PMC_SCER|=(1 << 7); // разрешение тактирования USB
}

```

```

void I_O_con ()
{
    *AT91C_PMC_PCER|=(1 << AT91C_ID_PIOB); // разрешить тактирование порта В
    *AT91C_PMC_PCER|=(1 << AT91C_ID_PIOA); // разрешить тактирование порта А

    *AT91C_PIOB_PER|=(1 << 30); // разрешить PIO для 30 пина
    *AT91C_PIOB_OER|=(1 << 30); // разрешить выход для 30 пина
    *AT91C_PIOB_PPUDR|=(1 << 30); // запретить подтягивающий резистор к 30 пину
    *AT91C_PIOB_CODR|=(1 << 30); // сбросить пин 30

    *AT91C_PIOB_PDR|=(1 << 20); // запретить PIO для 20 пина (PWM1)
    *AT91C_PIOB_PPUER|=(1 << 20); // разрешить подтягивающий резистор к 20 пину
    *AT91C_PIOB_ASR|= (1 << 20); // мультиплексировать выход PWM1 с 20 пином

    *AT91C_PIOB_PDR|=(1 << 27); // запретить PIO для 27 пина (PWM0)
    *AT91C_PIOB_PPUER|=(1 << 27); // разрешить подтягивающий резистор к 27 пину
    *AT91C_PIOB_BSR|= (1 << 27); // мультиплексировать выход PWM0 с 27 пином

    *AT91C_PIOB_PDR|=(1 << 21); // запретить PIO для 21 пина (PWM2)
}

```

```

*AT91C_PIOB_PPUER|=(1 << 21); // разрешить подтягивающий резистор к 21 пину
*AT91C_PIOB_ASR|= (1 << 21); // мультиплексировать выход PWM2 с 21 пином

*AT91C_PIOB_PDR|=(1 << 23)|(1 << 19)|(1 << 24)|(1 << 25)|(1 << 12); // запретить PIO
для 23, 24, 25, 19 и 12 пинов (TIOA0, TIOB0, TIOA1, TCLK1 и TCLK0 соответственно)
*AT91C_PIOB_PPUER|=(1 << 23)|(1 << 24)|(1 << 25); // разрешить подтягивающий
резистор к 23...25 пинам
*AT91C_PIOB_ASR|= (1 << 23)|(1 << 24)|(1 << 25); // мультиплексировать выходы
TIOA0 с 23 пином, TIOB0 с 24 пином, TIOA1 с 25 пином
*AT91C_PIOB_BSR|=(1 << 19)|(1 << 12);// мультиплексировать входы TCLK1 с 19
пином, TCLK0 с 12 пином

*AT91C_PIOB_PDR|=(1 << 18); // запретить PIO для 18 пина (ADTRG)
*AT91C_PIOB_PPUER|=(1 << 18); // разрешить подтягивающий резистор к 18 пину
*AT91C_PIOB_BSR|= (1 << 18); // мультиплексировать вход ADTRG с 18 пином

/**AT91C_PIOA_PER|=(1 << 23)|(1 << 24); // разрешить PIO для 23 и 24 пинов
/**AT91C_PIOA_ODR|=(1 << 23)|(1 << 24); // запретить выход для 23 и 24 пинов
/**AT91C_PIOA_IFER|=(1 << 23)|(1 << 24); // разрешить фильтра входных помех для 24
и 24 пинов
/**AT91C_PIOA_PPUER|=(1 << 23)|(1 << 24); // разрешить подтягивающий резистор
к 23 и 24 пинам
/**AT91C_PIOA_IER|=(1 << 23)|(1 << 24); // разрешить прерывание со стороны PIO от
переключения состояния на входе 23 и 24 пинов

*AT91C_PIOA_PDR|= (1 << 0)|(1 << 1)|(1 << 3); //запретить PIOA (USART0)
*AT91C_PIOA_ASR|= (1 << 0)|(1 << 1)|(1 << 3); //мультиплексировать выводы
USART0 с 0, 1 и 3 пинами

*AT91C_PIOA_PER|=(1 << 16); // разрешить PIO для 16 пина
*AT91C_PIOA_CODR|=(1 << 16); // сбросить пин 16

}

void USART_con()
{

```





```

*AT91C_PWMC_ENA|= (1<<1); // разрешить выход ШИМ-сигнала по каналу 1

*AT91C_PWMC_DIS|= (1<<2); // на время настройки запретить подачу ШИМ-сигнала
на канал 2
*AT91C_PWMC_CH2_CMCR=0x1; //- MCK/X (X=2), CUPD - Duty Cycle
*AT91C_PWMC_CH2_CPRDR = PWM_Period_ADC; // частота ШИМ-сигнала
250,285714 кГц
*AT91C_PWMC_CH2_CDTYR = PWM_Period_ADC/2;// Duty Cycle
*AT91C_PWMC_IER|=(1 << 2);// разрешить прерывание в конце каждого периода
канала 2

}

void TC0_con ()
{
*AT91C_PMC_PCER|=(1 << AT91C_ID_TC0); // Разрешить тактирование TC0 со
стороны PMC
*AT91C_TC0_CCR|= (1 << 1); // запрещаем тактирование таймера
*AT91C_TC0_IDR=0xFFFFFFFF; // запрещаем все прерывания от таймера
*AT91C_TCB_BMR|=0; // сигнал, связанный с XC1 - TCLK1
*AT91C_TC0_CMCR=0x303E806; // тактовая частота таймера XC1, равная частоте
ШИМО (выход ШИМ на самой схеме соединён с TCLK1),инкремент по положительному
фронту, UP-DOWN с триггером RC, и счёт по-новой, режим формирования,
//разрешаем эффект на выходе ПИОА0 от совпадения с RA в виде переключения
состояния, разрешаем эффект на выходе ПИОВ0 от совпадения с RB в виде переключения
состояния, чтобы настроить ПИОВ0 как выход, внешнее событие от X1
*AT91C_TC0_RC=Number_of_pixels*2; // таймер тикает до этого значения и считает
обратно
*AT91C_TC0_RB=3; //импульс ICG для МФЛ 3
*AT91C_TC0_RA=ENABLE_vaule; //ENABLE - разрешающий импульс для
компоратора
*AT91C_TC0_IER|=(1 << 2); // разрешаем прерывания со стороны таймера по событию
совпадения RA
*AT91C_TC0_CCR=1; // разрешаем тактирование со стороны таймера
}

void TC1_con ()

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

Лист
91

```

{
    *AT91C_PMC_PCER|=(1 << AT91C_ID_TC1); // Разрешить тактирование TC1 со
стороны PMC
    *AT91C_TC1_CCR|= (1 << 1) ; // запрещаем тактирование таймера
    *AT91C_TC1_IDR=0xFFFFFFFF; // запрещаем все прерывания от таймера
    *AT91C_TC1_CMR=0xD; // тактовая частота таймера XC0, равная частоте ШИМ0
(выход ШИМ на самой схеме соединён с TCLK0 - ШИМ подаётся только когда компаратор
фиксирует тень),инкремент по отрицательному фронту, счёт до значения 0xFFFF, сброс и
больше не считаем- режим формирования,
    //нет эффектов на выходе
    *AT91C_TC1_CCR=1; // разрешаем тактирование со стороны таймера
}

void AIC_con ()
{
    *AT91C_AIC_IDCR|= (1 << AT91C_ID_TC0); // запрещаем прерывания на время
настройки
    AT91C_AIC_SVR[AT91C_ID_TC0]=(unsigned int)timer0_c_irq_handler; //
Векторизируем прерывание от TC0
    AT91C_AIC_SMR[AT91C_ID_TC0]=27; // приоритет прерывания - 7,
чувствительность к внутренним источникам прерываний по перепаду
    *AT91C_AIC_ICCR|= (1 << AT91C_ID_TC0); // сбрасываем прерывание
    *AT91C_AIC_IECR|= (1 << AT91C_ID_TC0); // разрешаем прерывание от таймера со
стороны AIC

    *AT91C_AIC_IDCR|= (1 << AT91C_ID_PWMC); // запрещаем прерывания на время
настройки
    AT91C_AIC_SVR[AT91C_ID_PWMC]=(unsigned int)PWMC_c_irq_handler; //
Векторизируем прерывание от PWMC
    AT91C_AIC_SMR[AT91C_ID_PWMC]=36; // приоритет прерывания - 6,
чувствительность к внутренним источникам прерываний по полож. перепаду
    *AT91C_AIC_ICCR|= (1 << AT91C_ID_PWMC); // сбрасываем прерывание
    *AT91C_AIC_IECR|= (1 << AT91C_ID_PWMC); // разрешаем прерывание от PWMC
со стороны AIC

    *AT91C_AIC_IDCR|= (1 << AT91C_ID_ADC); // запрещаем прерывания на время
настройки

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

Лист  
92

```

AT91C_AIC_SVR[AT91C_ID_ADC]=(unsigned int)ADC_c_irq_handler; //
Векторизируем прерывание от ADC
AT91C_AIC_SMR[AT91C_ID_ADC]=35; // приоритет прерывания - 5,
чувствительность к внутренним источникам прерываний по полож. перепаду
*AT91C_AIC_ICCR|=(1 << AT91C_ID_ADC); // сбрасываем прерывание
*AT91C_AIC_IECR|=(1 << AT91C_ID_ADC); // разрешаем прерывание от ADC со
стороны AIC

*AT91C_AIC_IDCR|=(1 << AT91C_ID_US0); // запрещаем прерывания на время
настройки
AT91C_AIC_SVR[AT91C_ID_US0]=(unsigned int)US0_irq_handler; // Векторизируем
прерывание от USART0
AT91C_AIC_SMR[AT91C_ID_US0]=34; // приоритет прерывания - 4,
чувствительность к внутренним источникам прерываний по полож. перепаду
*AT91C_AIC_ICCR|=(1 << AT91C_ID_US0); // сбрасываем прерывание
*AT91C_AIC_IECR|=(1 << AT91C_ID_US0); // разрешаем прерывание от USART0 со
стороны AIC

}

void ADC_con()
{
*AT91C_ADC_MR=0x400021D; // аппаратный триггер по входу ADTRG, 8- бит,
нормальный режим, ADCClock= ~8 МГц (время преобразования согласно TX 1,25 мкс), Startup
Time = 1 мкс, Sample&Hold Time = 600 нс
*AT91C_ADC_CHER|=(1 << 1); // разрешаем канал 1
*AT91C_ADC_CHDR|=(1 << 2)|(1 << 3)|(1 << 0); // запрещаем каналы 0, 2 и 3
*AT91C_ADC_IER|=(1 << 18); // разрешаем прерывание по достижении счётчика RCR
0

*AT91C_ADC_RPR=(unsigned int)pixel_values; // область памяти - массив - куда PDC
будет класть значения АЦП
*AT91C_ADC_RCR=Setting_light_length; // количество прёмных перемещений,
которые будут выполнены, соответствует количеству пикселей, отведённых на регулировку
уровня чёрного
*AT91C_ADC_PTCR=1; // Разрешение приёмнику PDC запроса на перемещение
данных

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**ВКР-2069378-11.03.01-09-20**

Лист  
93

```

}
void sin_con ()
{
    for (int i=0; i<Discret; i++) sinus[i]=sin(2*3.1415*i/Discret);
}

void UDP_con()
{
    *AT91C_PMC_PCER|=(1 << AT91C_ID_UDP); // подаём питание на UDP
    *AT91C_UDP_TXVC &= !(1 << 8); // разрешаем приёмопередатчик USB
    while (!(AT91C_UDP_CSR[0]&(1 << 2)));
}
}

```

					<b>ВКР-2069378-11.03.01-09-20</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94