

## Токовый усилитель

Релаксационной спектроскопии глубоких уровней

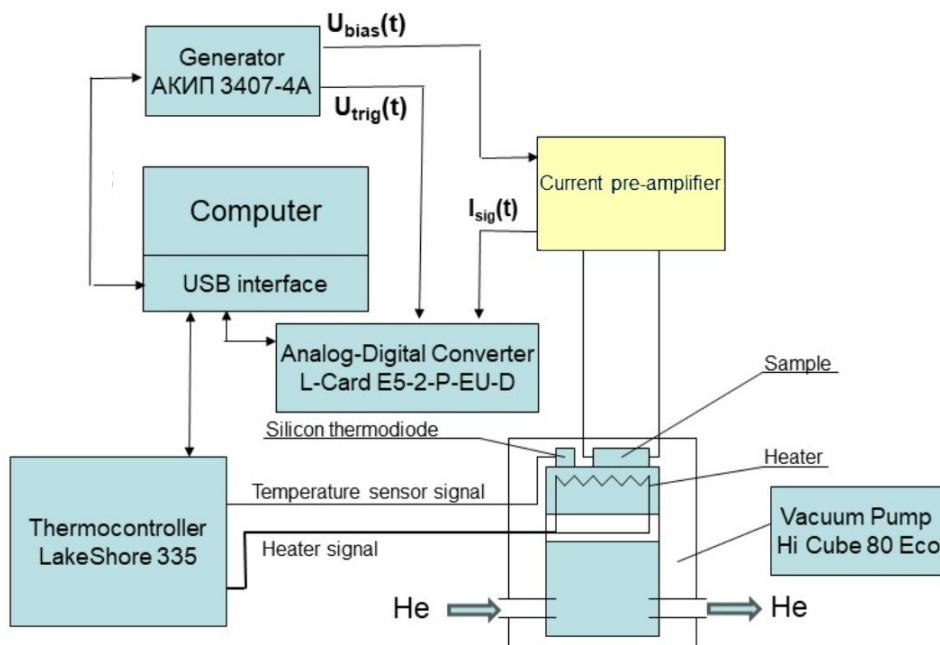
[github.com/gans-spb/DTLS-TIA](https://github.com/gans-spb/DTLS-TIA)

Введение	2
Метод спектроскопии	2
Технические требования к изделию	2
Реализация	3
Принятые технические решения	3
Компонентная база	4
Характеристики устройства	4
Электрическая схема	5
Блок схема	6
Напряжение питания	6
Органы управления	7
Входы-выходы	7
Коммутация входных сигналов	8
Смещение средней точки	9
Этапы	10
Прототип 1	10
Прототип 2	12
Прототип 3 - установочная	15
Вариант 4 - серия	18
Вариант 5 - серия исправленная	21
Компоновочный чертёж корпуса	22
Вариант большого BNC корпуса	24
Измерения	26
Приложения	32
Краткая инструкция	32
Затраты	33
Себестоимость одной штуки	34
Лист компонентов	35
Характеристики операционных усилителей	36

# Введение

## Метод спектроскопии

Метод основан на изучении температурной зависимости постоянной времени релаксации барьерной емкости полупроводниковой диодной структуры при воздействии на нее импульсным напряжением смещения. При этом происходит периодическая перезарядка глубоких центров или дефектов, создающих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводников, что приводит к релаксации по экспоненциальному закону барьерной емкости, электрического тока и заряда, проходящего через образец. Блок схема установки показана на следующем рисунке.



Данный отчёт описывает создание токового усилителя, указанного на схеме как «Current Preamp», на рисунке выделен жёлтым. Введение генератора накачки в разрыв входного сигнала является особенностью подключения усилителя.

## Технические требования к изделию

- Коэффициент усиления тока - 10КОм ... 10МОм, ступенями (100uA/V...100nA/V)
- Коэффициент усиления напряжения - x1/x10, две ступени
- Точность установки коэффициентов - не хуже 5%
- Входное напряжение – не менее 10V
- Полоса частот – ОУ не менее 5MHz GBW
- Фильтрация сигнала - отсутствует

# Реализация

## Принятые технические решения

N	Решение	Обоснование
1.	Двухкаскадная схема с двумя ОУ: первый – токовый, второй – усилитель напряжения.	Простая понятная схема, хорошо интерпретируемые результаты, надёжно себя зарекомендовала. Возможность использования сдвоенного ОУ в одном корпусе. Малая длина трассы сигнальных дорожек платы.
2.	Линейка шагов усиления тока от 10К до 10МОм, напряжения x1 и x10.	Требование заказчика от 10К. Верхний предел для наноамперной схемы - 10М, возможно испытать 50М и 100М. По напряжению требование заказчика x1 и x10. Второй предел удобен при смещении средней точки.
3.	Антивозбуждение с одним С в ОС.	Сложный Т фильтр излишний и усиливает напряжение. Хватает разводки платы для одной ёмкости в ОС.
4.	Прецизионность ОУ не нужна	Усиление по напряжению первой схемы равно единице, поэтому прецизионные ОУ не обязательны, важно малое смещение тока.
5.	Твердотельный тип ключей резисторов ОС	Твердотельные колючи показали себя хорошо, имеют большое сопротивление закрытия, небольшие ёмкости, хорошо работают вnano-токах и микро-вольтах, у них малые габариты и малые длины дорожек сигналов, держат большие напряжения. Эти ключи использованы в приборе SR570m. Механические реле очень габаритные, требуют минимальные ток и напряжения коммутации, их характеристики плавят со временем, требуют большого тока обмотки.
6.	Однополярное питание до 12–15В	Большинство современных ОУ работают на малых напряжениях 5-15V, это касается фемто-амперных ОУ и ключей. Высоковольтные ОУ на 36В достаточно древние, и им потребуются ключи на реле т.к. твердотельные ключи работают до 15V.
7.	Пассивная средняя точка на резисторах	Средняя точка на резистивном делителе достаточна для целей задач, упрощает схему, позволяет смещать точку. Позволяет использовать один внешний БП .
8.	Коммутация входных сигналов на разъёмах, входной тракт на двух разъёмах.	Нет необходимости ставить реле или ключи во входные цепи, поставим несколько разъёмов. Образец внутри криостата стоит далеко, каждый провод отдельно экранирован, поэтому два разъёма на вход и один на генератор накачки в разрыв сигнала образца.
9.	Защиты: вход малотечными диодами, выход – ESD диодом, питание – TVS диодами.	На входе ставятся два диода с малыми утечками на шины питания, сбрасывающими перенапряжение. На выходе ставится ESD диод. По питанию ставится мощный TVS последовательно с предохранителем, для ограничения напряжение питания от БП.
10.	Цифровая часть на CMOS логике.	CMOS серии CD40xx питается от 15V что удобно, мало потребляет, не шумит. Недостаток – слабые выходы, поэтому все индикаторные светодиоды - сверхяркие, с ограничением тока до 1-3mA.

## Компонентная база

ОУ:

Сдвоенный, корпус SO8, с сверхмалыми токами смещения, с питанием не ниже 12-15V, желательно Rail-to-rail по выходу, желательно прецизионный. Кандидаты их доступных, с вендором, с характеристиками typ/max (ток смещения, напряжение смещения, шум, категория, год, цена поштучно):

LMC6062 100KHz, 0.01pA 100μV 83nV Prec. 1994 [узкая полоса]

OPA2140 11MHz ±0.5pA ±30μV 8nV Hi-prec 2010 [дорогой]

OPA2810 105MHz 2pA 0.1mV 21nV High-speed SiGe BiCMOS 2017

AD8034 80MHz 1pA 1mV 11nV, Low Cost FastFET 2002

AD8066 145MHz 2pA 0.4mV 7nV High Performance 2002 [видео]

Логика управления:

CD4066 – счетверённый билатеральный аналоговый MOSFET ключ, 15V max

CD4017 – декадный счётчик-декодифратор

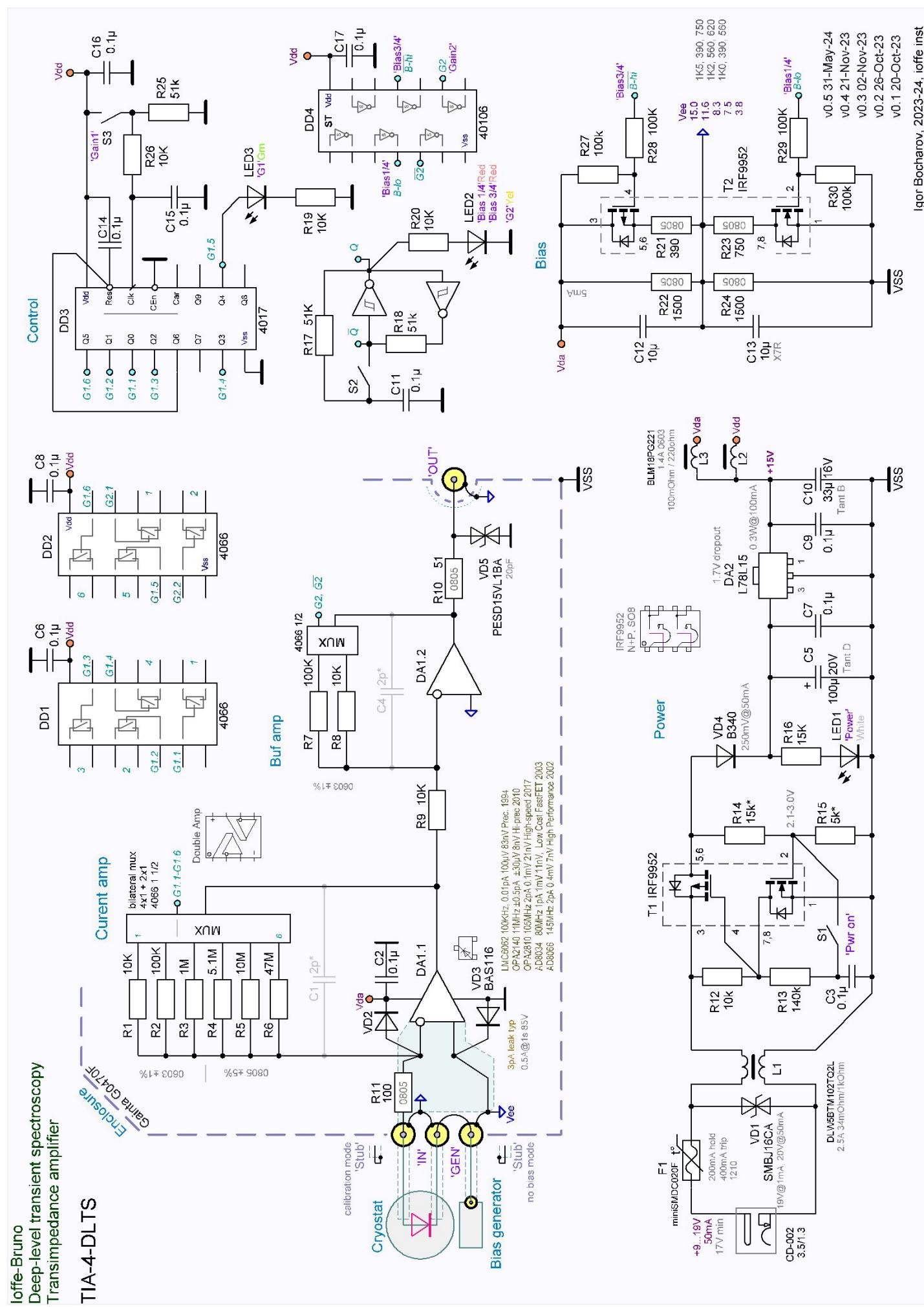
CD40106 – шесть инверторов для формирования трёх триггеров-защёлок

L78L15, ST	– LDO в корпусе SOT-89, 100mA [занижает до 14.95]
IRF9952, IRF	– комплементарная пара MOSFET в корпусе SO8, 30V, 2+3A, 0.1Ohm
FYLS-0805P	– сверхяркие светодиоды 500-700mcd @ 20mA, работают при 1mA
B340A, DD	– выпрямительный диод с малым падением напряжения 270mV@100mA
BAS116, NXP	– выпрямительный диод со сверхмальным током утечки 3pA/5nA (или Infeneon)
SMBJ16CA, LF	– двуполярный TVS диод 800W пиковых, срабатывание Utrip=19V@5mA
PESD15VL1	– двуполярный ESD TVS диод с ёмкостью 20pF typ
miniSMDC020, LF	– полифьюз 200mA SMD 1820 LittleFuze оригинал
DLW5BTM102, MUR	– SMD катушка Murata синхронного подавления помех
DC-002A-1.3	– круглый разъём питания 3.5x1.3мм
IT-1102W-9	– тактовая кнопка 6x6мм, штифт 8-10мм

## Характеристики устройства

- Коэффициенты усиления тока - 10K, 100K, 1M, 5.1M, 10M, 47M
- Коэффициент усиления напряжения - x1/x10
- Точность установки коэффициентов усиления - 1%
- Полоса частот – до 10MHz(-3dB) при G=2 на диапазоне 10K
- Смещение средней точки - 1/4, 1/2, 3/4 от напряжения питания
- Входное напряжение накачки – до ±10V
- Напряжение питания - 8...19V, 50mA max (18V БП, 15V LDO)

## Электрическая схема



## Блок схема

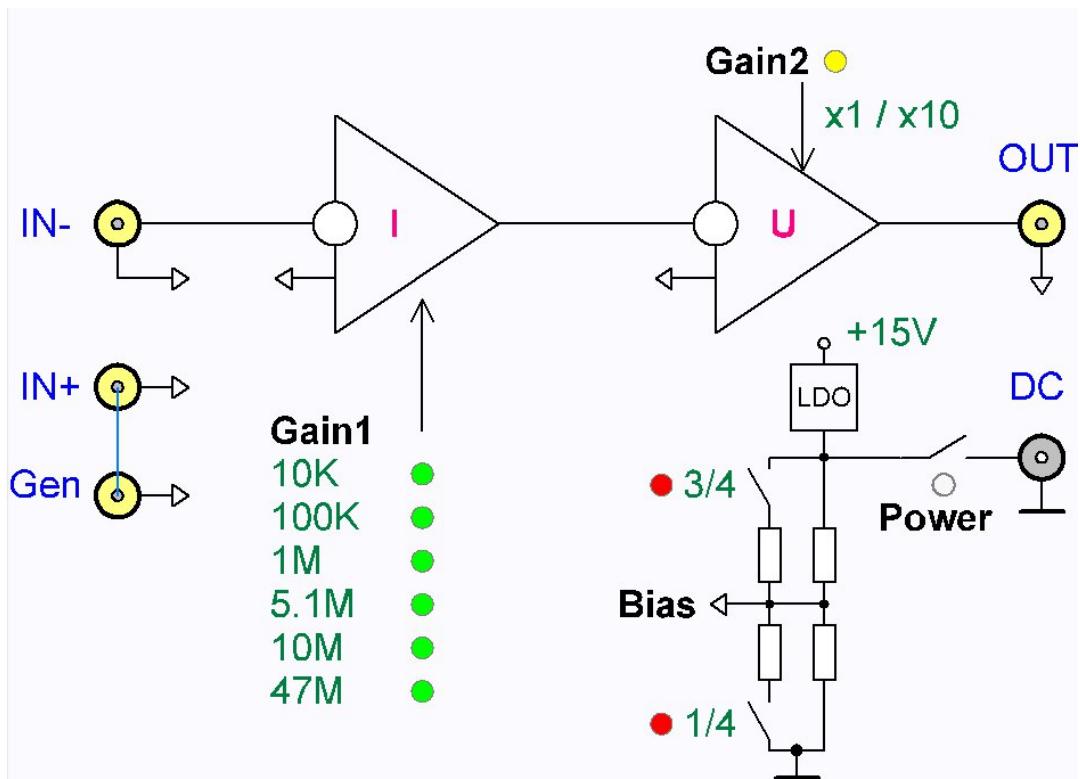


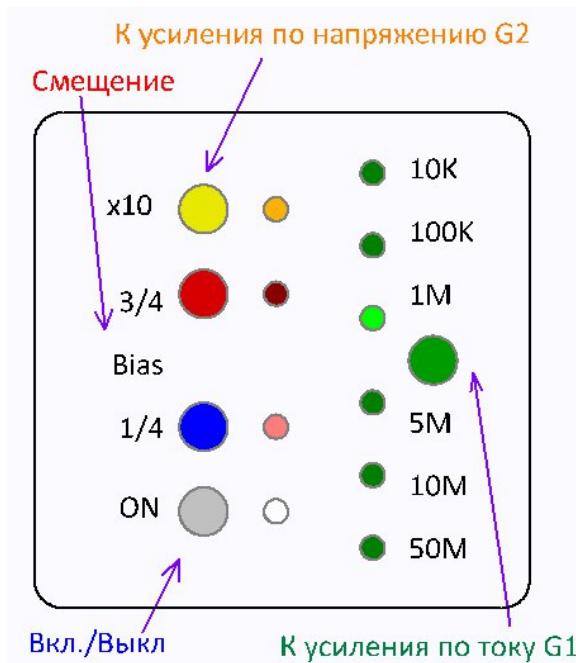
Схема содержит два каскада усиления, оба выполнены по классической схеме. Первый каскад – инвертирующий токовый (трансимпедансный) усилитель со ступенчато изменяемым коэффициентом усиления по току от 10К до 50М. Второй каскад – инвертирующий усилитель напряжения с изменяемым коэффициентом усиления  $x1$  или  $x10$ . Средняя точка 1/2 от напряжения питания формируется простым резистивным делителем и может изменяться двумя ступеньками до  $1/4$  или  $3/4$ . Внутренний линейный стабилизатор напряжения выдаёт 15V. Схема переключения коэффициентов сделана на дискретных логических элементах и двунаправленных полевых ключах. Схема включения питания выполнена на защёлке из двух полевых транзисторов.

## Напряжение питания

Усилитель спроектирован для внешнего импульсного блока питания +18V. Ток потребления не превышает 50mA, а в среднем равен 20mA, что позволяет использовать батарейное питание. Устройство работоспособно при напряжении питания в диапазоне 8...19V. При питании ниже 17V внутренний стабилизатор перестаёт работать и необходимо подавать *стабилизированное* питание. При повышении напряжения питания выше 19V начинает срабатывать защитный многоразовый предохранитель и разрывает цепь питания. При остывании предохранитель восстанавливается.

**Внимание!** Некоторые ОУ ухудшают свои характеристики при смещении средней точки. Например у OPA2140 при смещении средней точки ближе чем 3V к верхнему питанию начинает значительно расти напряжение смещения на выходе. Поэтому желательно использовать блок питания 18V, который гарантирует внутреннее стабилизированное 15V.

## Органы управления



**G1** – коэффициент усиления первого (токового) усилителя, выраженного в единицах сопротивления ОС. Шесть уровней усиления, зелёные светодиоды, перебор кнопкой снизу вверх, с малого до большого усиления. При включении выбирается максимальное (такова топология платы).

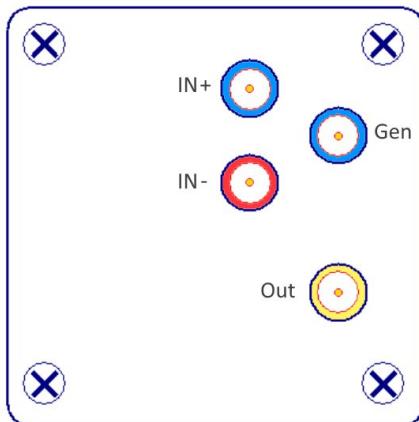
**G2** - коэффициент усиления второго усилителя (напряжение), жёлтый светодиод, одна кнопка. Не горит K=1, горит K=10. При включении выбирается минимальное x1.

**Bias** – смещение средней точки, красные светодиоды, две кнопки. При включении смещение 1/2. Кнопка 3/4 – смещение верх, кнопка 1/4 – смещение вниз от напряжения питания. Две одновременно – суммарное смещение.

**Power** – вкл./выкл. питания, белый светодиод, одна кнопка.

## Входы-выходы

### SMA версия



**Корпус** прибора металлический и присоединён на общий ("минус") блока питания. Т.о. имеет  $-U_{bias}$  потенциал относительно средней точки.

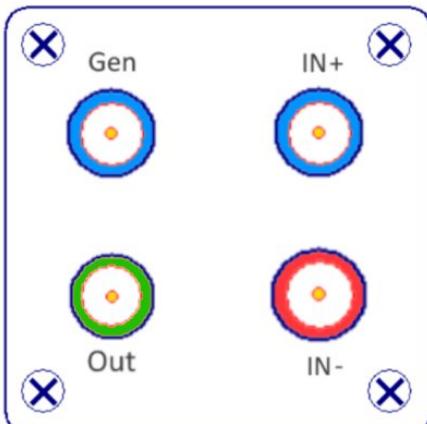
**Экраны** всех четырёх разъёмов идут на среднюю точку с потенциалом  $U_{bias}$ . При включении потенциал равен половине напряжения питания, но может равняться 1/4 или 3/4 от этой величины.

**IN-** – отрицательный вход, основной вход усилителя, идёт на инвертирующий вход первого (токового) ОУ. Сюда можно подключается источник сигнала.

**Out** - выход усиленного сигнала.

**IN+ и Gen** – отдельные разъёмы соединённые перемычкой, служат для коммутации генератора накачки.

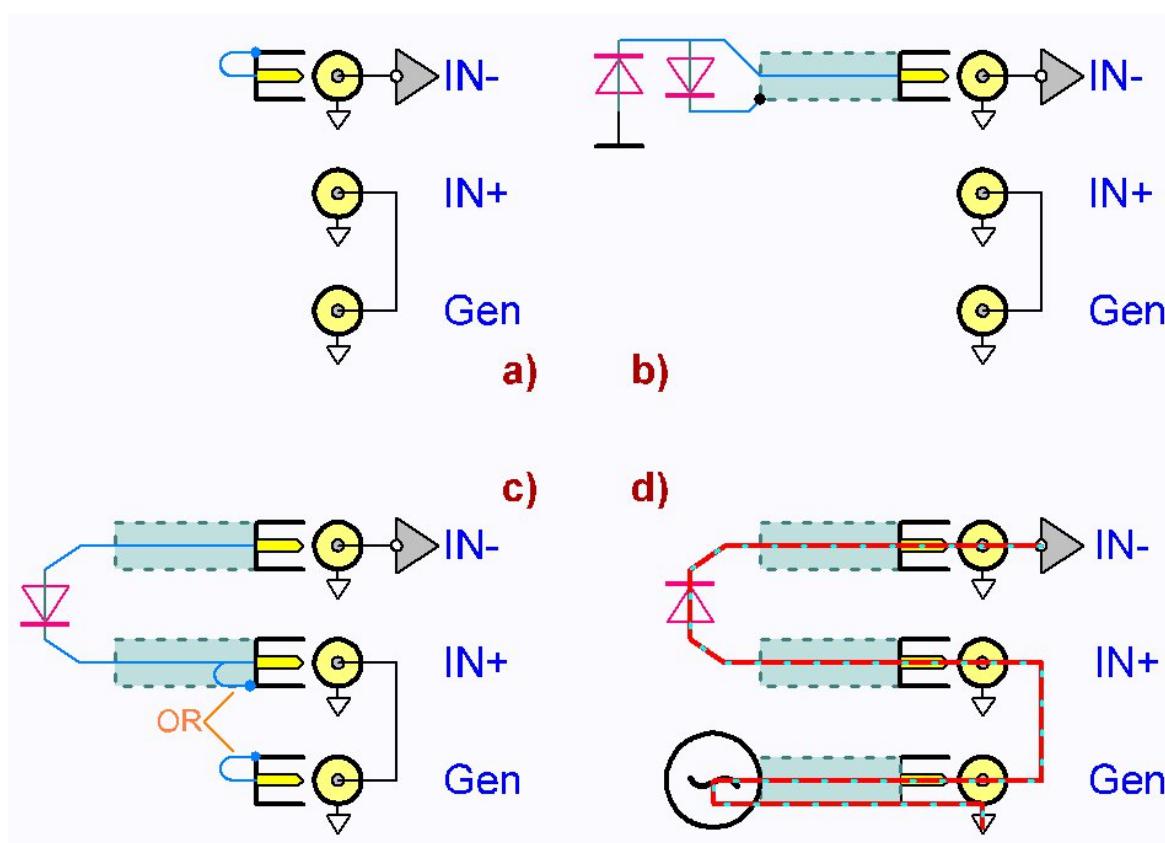
### BNC версия



## Коммутация входных сигналов

Варианты коммутации входов.

- a) заглушка на вход для калибровки и измерения шума - перемычка входа на среднюю точку
- b) однопроводное подключение: датчик вторым концом подключается катодом на экран разъёма для прямого (фотоэлектрического) режима, или анодом на корпус прибора для обратного (фотопроводящего) режима со смещением.
- c) двухпроводное подключение: датчик вторым коаксиальным проводом идёт на отдельный разъём, при этом его необходимо соединить с экраном разъёма непосредственно в разъёме или перемычкой на входе накачки, такое подключение реализованное в криостате.
- d) двухпроводное с генератором накачки: в разрыв второго провода подключается сигнал генератора, основной режим, штриховой показан контур прохождения сигнала.



**Внимание!** Корпус прибора находится под напряжением  $-U_{bias}$  относительно экранов разъёмов, поэтому разъёмы изолированы относительно корпуса. Замыкание корпуса на экран разъёма (напрямую, через коммутацию шнурков, через внешние приборы, иным способом) замыкает среднюю точку на землю и прекращает усиление. Ток средней точки ограничен на уровне 5mA поэтому замыкание не фатально.

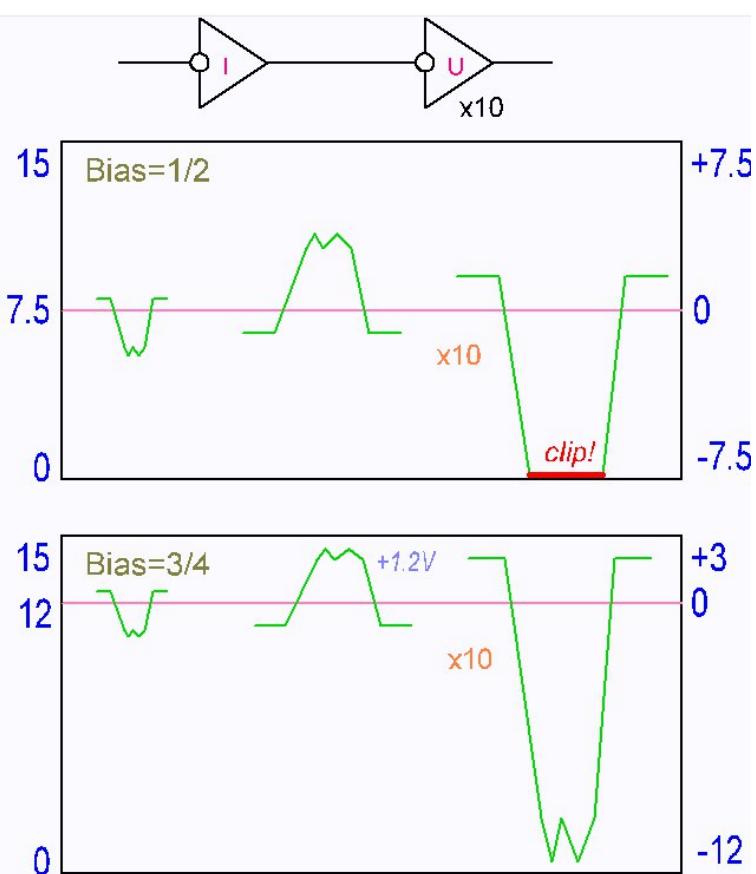
## Смещение средней точки

Смещение даёт возможность увеличить динамический диапазон для односторонних сигналов. Для этого необходимо  $\times 10$  усиление по напряжению второго ОУ, и величина сигнала после первого ОУ около 1V. Смещение  $3/4$  смещает вверх и работает для отрицательных сигналов;  $1/4$  смещает вниз и работает для положительных сигналов.

Режим смещения выбирается коммутацией дополнительных резисторов делителя средней точки с помощью двух кнопок "Bias". Для внутреннего питания 15V смещение средней точки в зависимости от нажатых кнопок показано в таблице.

Bias3/4	Bias1/4	Ubias
On	Off	12.0
On	On	9.3
Off	Off	7.5
Off	On	4.5

На графиках ниже показаны два варианта выбора средней точки для отрицательного сигнала: обычный и повышение до  $3/4$  от питания. На графике: первая кривая - сигнал отрицательной полярности на входе; вторая – после токового усилителя; третья – на выходе усилителя напряжения, в режиме усиления  $\times 10$ .



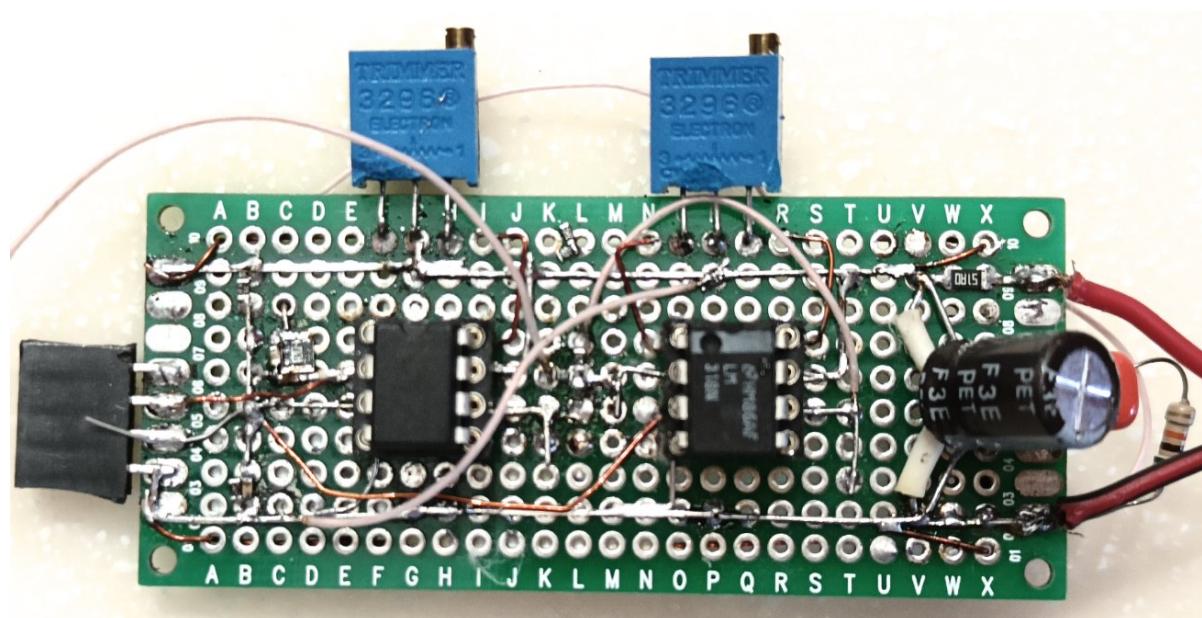
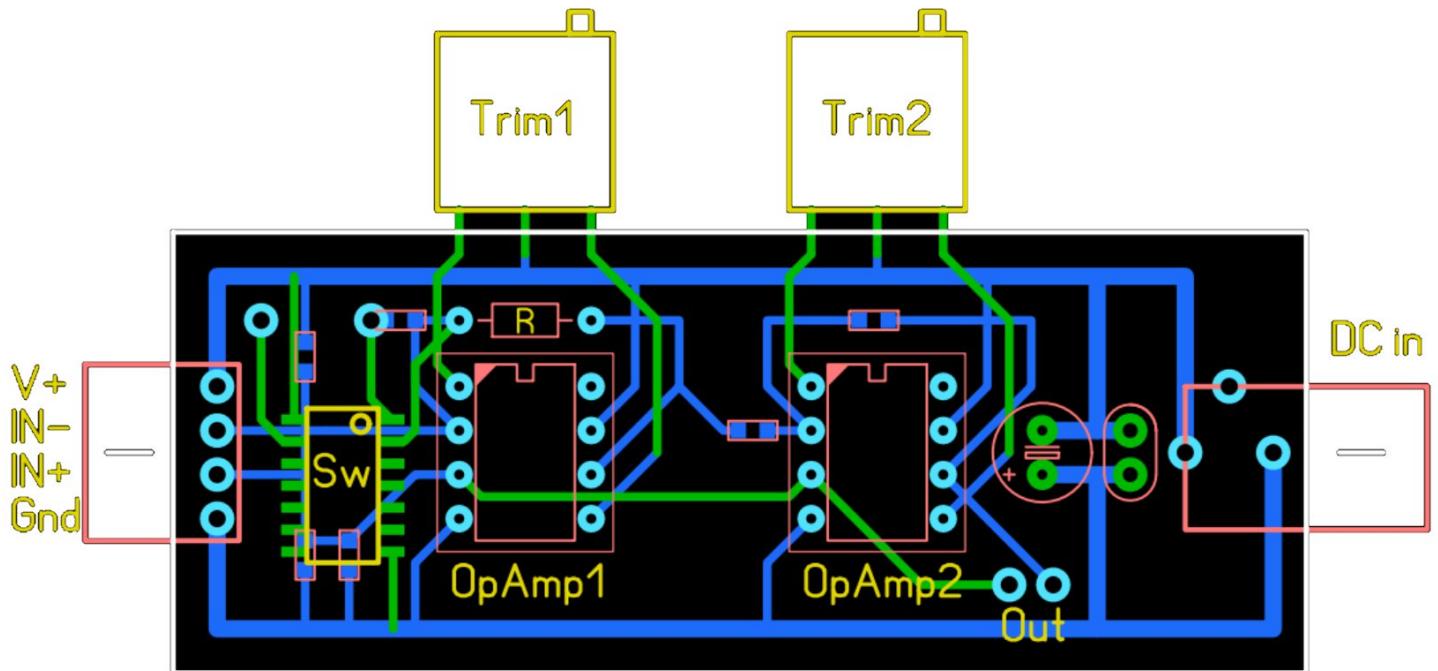
- В первом варианте сигнал на выходе обрезается по низу на уровне -7.5V, это максимальный размах выхода для Rail-To-Rail ОУ при питании ОУ 15V.
- Во втором варианте средняя точка поднимается до +12V. При этом, если после токового усилителя сигнал не превышает  $1/10$  от размаха выхода (т.е.  $\sim 1.2V$ ), то появляется возможность оперировать сигналами в диапазоне выхода 0-12V без клиппирования сигнала. Этот вариант удобен для дальнейшей подачи сигнала на ADC с размахом оцифровки 10V.

**Внимание!** Второй усилитель должен быть в усилении  $\times 10$ , напряжение на входе второго усилителя порядка 1V, на выходе получается размах соответственно около 10V, что соответствует полной шкале АЦП.

# Этапы

## Прототип 1

- 70x30мм, 2 слоя FR4, 1.5 толщина, макетная плата, шаг отверстий 2.54
- Дорожка – поверхностный монтаж. Две стороны.
- ОУ в корпусах DIP8, моно-вариант (один ОУ в одном корпусе), оба ОУ с тримом
- ОУ: OP07, LM318, TL071, (AD8656)
- Ключ CD4066 в SO8 на обратной стороне



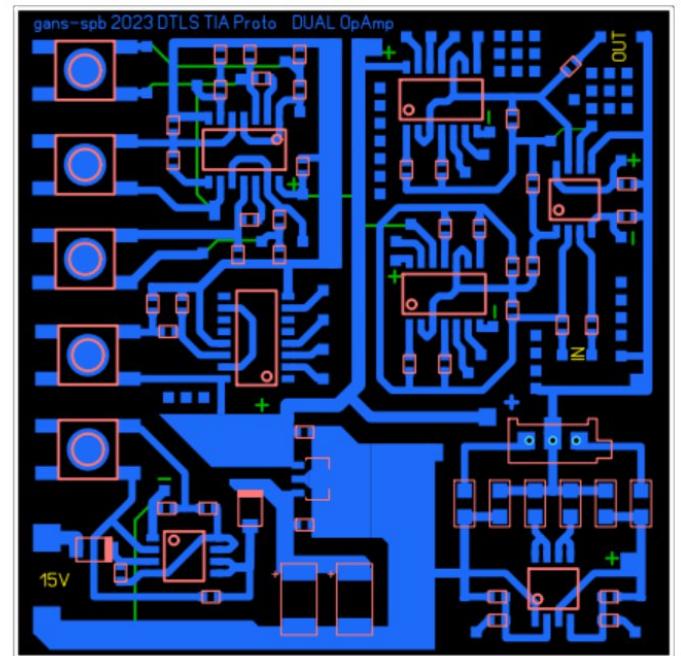
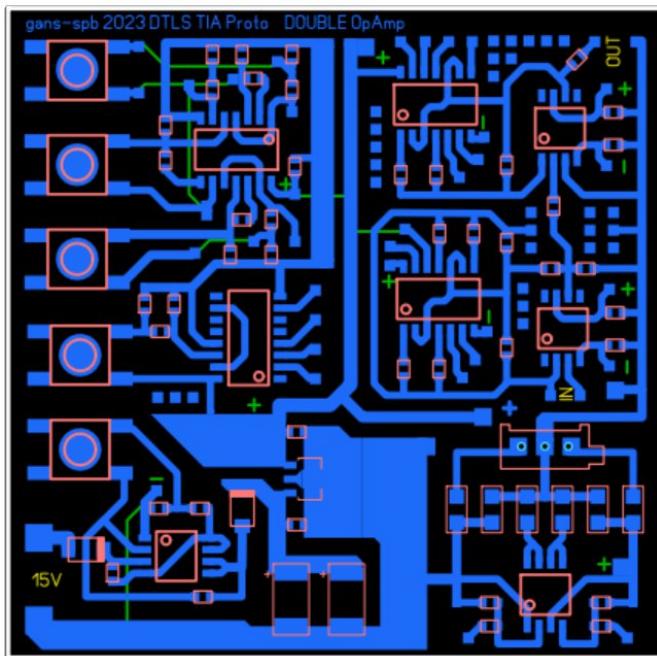
## Список работ

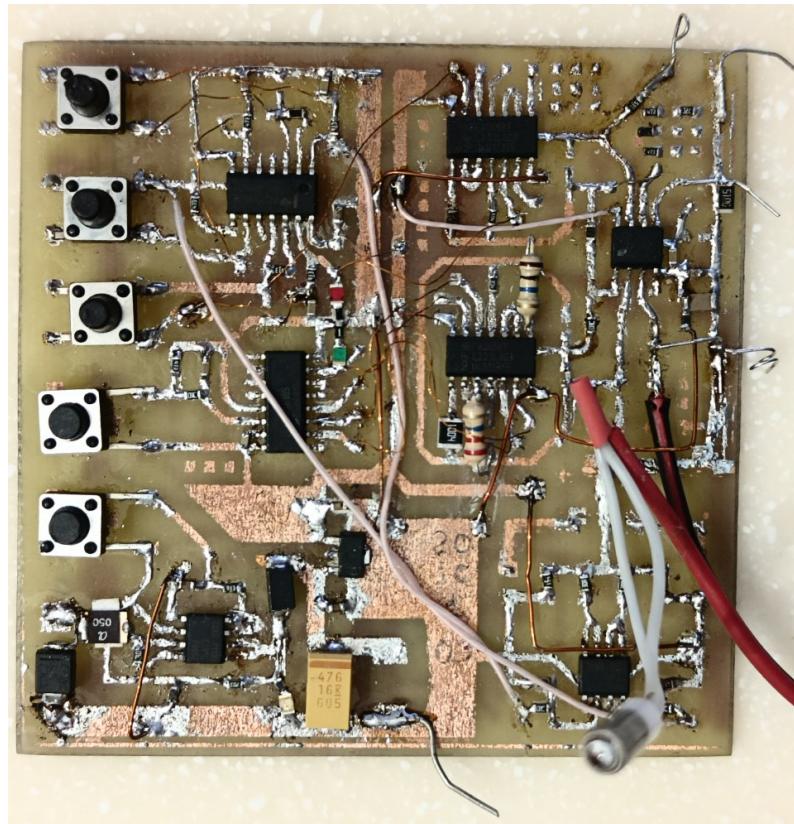
1	Проверка работоспособности и основных характеристик простого двухкаскадного токового усилителя	Схема работает ровно как и ожидалось. Артефактов нет.	Отлично, применять
2	Проверка "виртуальной" средней точки	Средняя точка на резисторном делителе неотличима по работе с отдельным двуполярным источником питания.	Отлично, применять
3	Проверка диапазона питания	Размах по выходу (swing) сигнала старых ОУ не дотягивает до рельс питания порядка 1.5В, желательно организовать питание ОУ от 12В, и ставить RR(I)O ОУ.	Найти Rail-to-Rail ОУ и питание >12V
4	Проверка необходимости отстройки trim	Уход нуля незначительный, эффект от регулировки низкий, в современных ОУ трима уже нет. Отказать.	Отказать.
5	Проверка билатерального аналогового твердотельного ключа.	Проверен до диапазона 1МОм, помех не вносит, работает стабильно, артефактов нет.	Отлично, применять

## Прототип 2

- 70x70мм, 1 слой FR4, 1.0 толщина, ЛУТ
- Два варианта разводки аналоговой части, для mono и dual Opamp (один/два ОУ в одном корпусе)
- Дорожка/зазор 0.8/0.6, без переходных отверстий, один слой.
- ОУ в корпусах SO8: OP07, LM318, TL082
- Два ключа CD4066 в SO8
- Логика управления на CD4066 и CD40106
- Схема включения и подачи питания, схема LDO
- Блок формирования смещения средней точки
- Кнопки, индикация
- Защита по питанию и выходу

Версия для двух корпусов и для одного сдвоенного





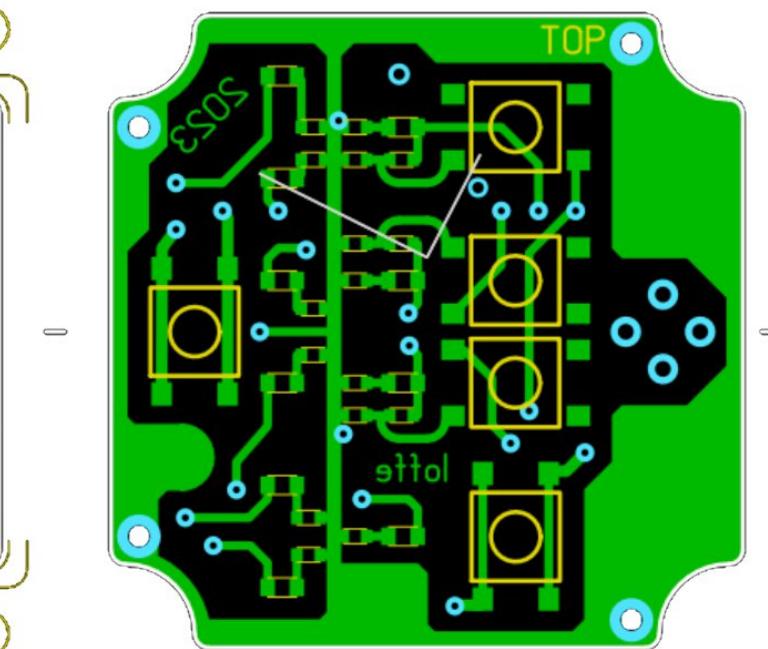
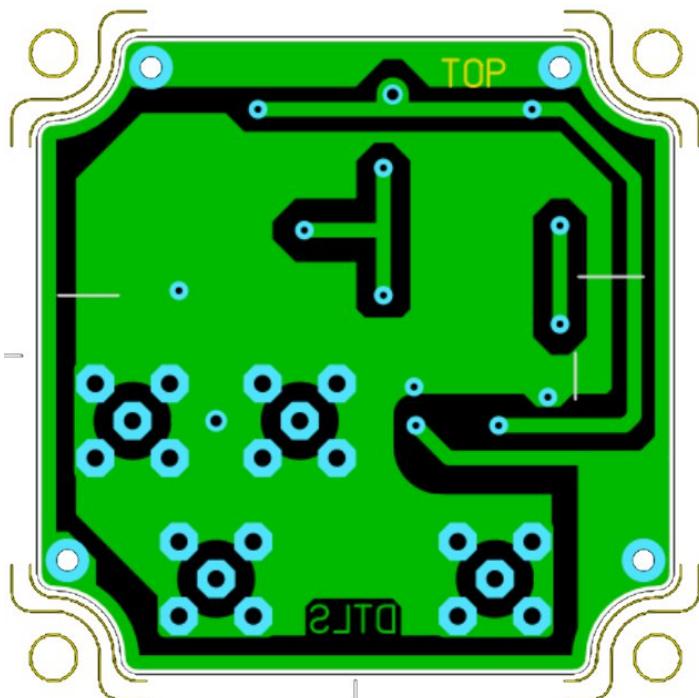
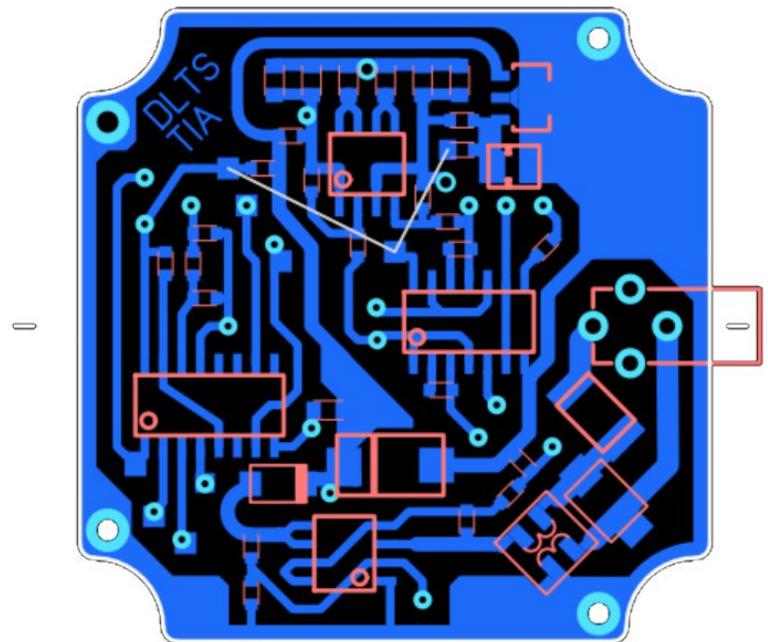
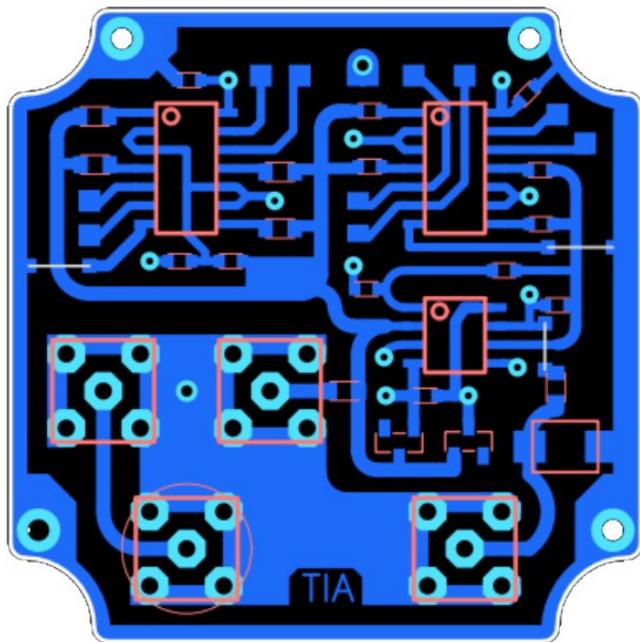
## Список работ

1	Проверка работы сдвоенных ОУ	Характеристики усилителя на сдвоенном ОУ не хуже характеристик на отдельных ОУ. Стоимость прецизионных высокая, поэтому применяем сдвоенные.	Хорошо, применять
2	Проверка мегомных резисторов в ОС на твердотельных ключах	После промывки платы от флюса ключ в ОС нормально отработал 10МОм резистор. Длина трассы петли ОС не влияет.	Хорошо, применять
3	Проверка генерации и необходимости Т фильтра в ОС	При $R_{OC}=10\text{МОм}$ генерация не появлялась, Т-цепь не понадобилась, кроме того она поднимает шум согласно $K_u$ по напряжению. Для запаса поставлен $C=2\text{pf}$ в цепь ОС.	Нет необходимости, не применять, но отставить дорожки
4	Проверка схемы смещения на компланарных полевых ключах	Работает как ожидалось, с большим запасом по мощности, стабильно. Помнить что верхний ключ управляет инверсным сигналом.	Хорошо, применять, возможно подстроить верхний ключ.
5	Проверка, отладка и настройка схемы включения питания на компланарных полевых ключах с самозаштёлкой	После настройки уровней затворов схема стала удовлетворительно работать на выбранном диапазоне входных напряжений и выходных нагрузок. Обязательно отвязать от ёмкости диодом и ещё раз подогнать на конкретном конденсаторе и нагрузке схемы.	Удовлетворительно, применять с настройкой.
6	Проверка защиты по входу	Полифьюз работает как и ожидалось, срабатывает в пределах нескольких секунд. Двусторонний TVS диод – подобрать под trip порог	Хорошо, подобрать trip порог

		требуемый входной диапазон напряжений, чтобы в trip уходил пораньше. Переполюсовку выдержал на полном токе.	TVS.
7	Проверка LDO	K LDO замечаний нет, работает как надо, выдаёт слегка меньший Vout, по тепловой и токовой мощности корпуса SOT-89 хватает, шум в норме на обвеске 20uF + 0.1uF.	Хорошо
8	Отработка и настройка самозашёлки на инверторах	Hex-Schmitt триггер даёт возможность сделать три flip-flop защёлки. Схема отработана, но капризна и чувствительна к нагрузкам и подтяжкам. Иногда статистически неоднозначна при включении и нестабильна на вкл/выкл.	Удовлетворительно, применять с настройкой, LED на низкий ток.
9	Отработка и настройка схемы перебора на декадном пятикаскадном счётчике-десифраторе джонсона	Работает как задумано. Обязательно сбрасывать по включению питания, иначе стартует в рандом позиции. Чистить дребезг кнопки. Давать низкий ток нагрузки, иначе не дотягивает до верхней рельсы питания и недооткрывает ключ.	Хорошо
10	Тест с генератором накачки	Сработало, ОУ выдержал накачку по входу в разрыв сигнального потенциала до 20V.	Отлично
11	Тест на пробой	Токовой петлёй от приборов пробились по выходу все цепочки CMOS логики, ОУ и MOSFET ключи, надо защищать входы-выходы. Выход ставим на TVS - будет ёмкость но это не критично по схеме. Вход на диоды, найти без утечек.	Плохо!

### Прототип 3 - установочная

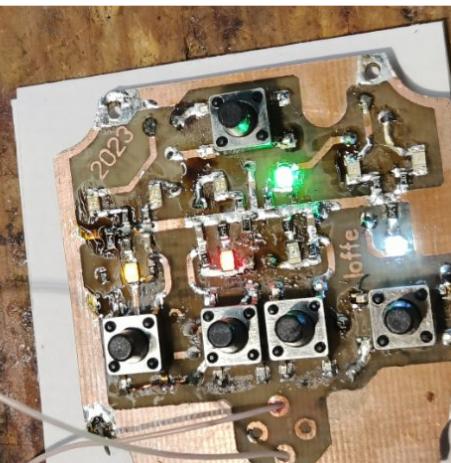
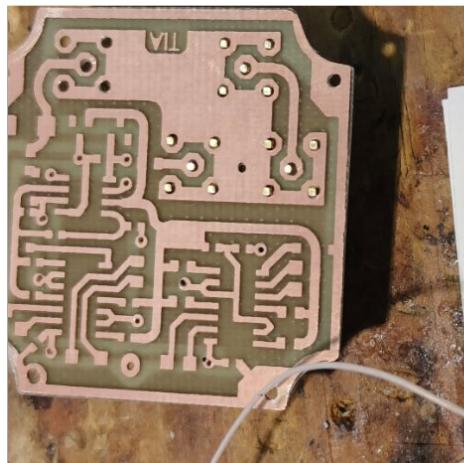
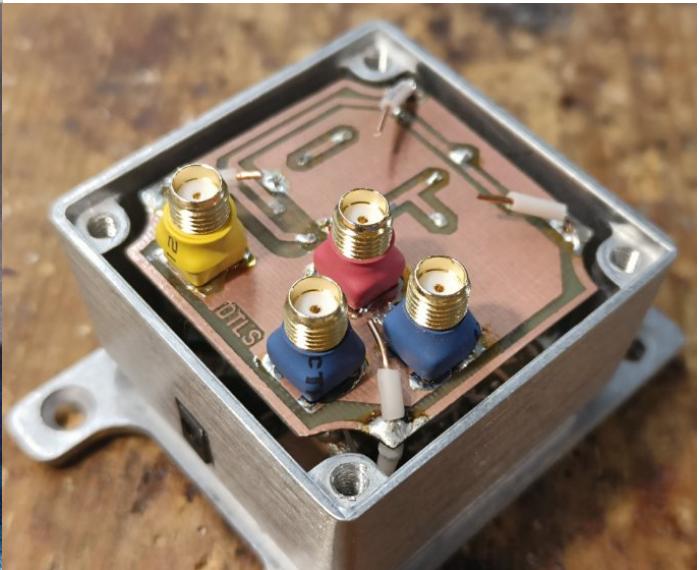
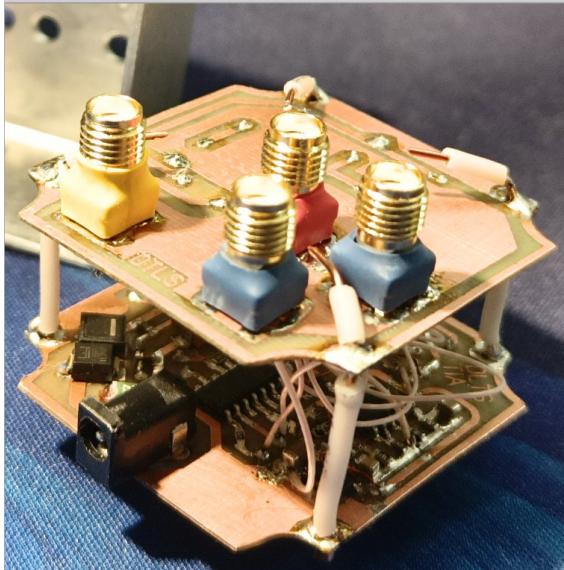
- Корпус Gainta G0470F
- 42x42мм, мезонин из двух плат, 2 слоя FR4, 0.5мм толщина (ограничение хим. лаб.), ЛУТ
- Мезонин на стойках из провода 1.5мм, пайка и подбор высоты, межплатные провода МГТФ
- Дорожка/зазор 0.6/0.6, без переходных отверстий, наплатные перемычки и провода меж плат
- Верхняя плата с питанием и дискретной логикой коммутатора, нижняя – аналоговый усилитель
- Механика: кнопки - SMD 6x6, LED – SMD 0805, ввод питания – DC 3.5/1.3
- СВЧ разъёмы – SMA, вертикальные, наплатные, 14мм



## Список работ

1	Убрать всё в микро-корпус	Влезло в решении с бутербродом 2x плат. Далее проработать межплатное соединение на шлейфе. Убрать глубже DC разъём чтобы легче вынималось. Сделать более надёжное подпружинивание земли на корпус.	Хорошо, минус бал за сложность пайки и сборки
2	Проверка удобства разъёмов SMA по корпусу, проблема контакта разъёма и корпуса	В целом всё влезло, но надо очень точно сверловать корпус, снимать фаску, точно попадать в плату разъём, и надо найти более высокие разъёмы что бы гайка ответной части точно не достала до корпуса. Есть вариант BNC.	Пока удовлетворительно, но будет хорошо.
3	Проверка механики кнопок и подсветки	Вполне возможно сделать кнопки с зазором +0.3мм по кругу – это эстетично. Светодиоды даже со световодами – засвечивают друг друга, продумать экран.	Хорошо
4	Проверка DC разъёма	Хорошо и эстетично встал сбоку по форме, размеру и цвету. На заводской плате можно будет ещё уменьшить зазор. Надёжность соединения хорошая, запас по длине разъёма есть, хорошая изоляция от корпуса.	Отлично
5	Отработка стабильности дискретной логики управления	Пришлось долго подбирать уровни делителей для включателя питания и для триггера верхнего ключа делителя питания. Верхний ключ подтягивает триггер, так и остался не всегда стабилен.	Удовлетворительно, т.к. подбор
6	Увеличение напряжения питания для расширения диапазона сигнала входа и выхода	Поставлен LDO 15V, это предел для современных ОУ и ключей. RRIO ОУ работает вплоть до обоих рельс питания с зазором всего 100mV - отличный результат. Также подобран TVS диод на 16V, у него trip при 19V@5mA, значит можно ставить tantal конденсатор на 20V, не опасаясь перенапряжения. В корпусе Tant-D есть 100uF 20V, это очень много и хорошо для подавления шума питания. БП ставить на 18V.	Отлично
7	Подбор напряжений смещения делителя средней точки	Исходя из традиционного включения фотодиода, смещение вверх сделано больше, что бы дать большой диапазон сигнала до 12V вниз, это хорошо согласуется с диапазоном АЦП 10V. Кроме того появился ещё один – четвёртый диапазон точки.	Отлично
8	Проверка фильтровых элементов	Синфазная катушка Murata впаялась и работает, BLM бусины для дискретной и аналоговой части аналогично. Подозреваю, они полезные.	Хорошо
9	Проверка 100МОм диапазона	Работает, но по шуму малоиспользуемый диапазон. Отработал ключ 4016, отличный ключ! Также он отработал с учётом что для первого ОУ часть ключей в одном корпусе, а часть в другом - никаких кросс-артефактов.	Удовлетворительно, заменить на 51 МОм
10	Проверка входных защитных диодов	Особые диоды BAS116 с документированным типичным током утечки 3пА, после установки сдвига сигнала не обнаружено. Работоспособны до 75V.	Отлично, ставим
11	Контроль нагрева корпуса и элементов – LDO, LED и Fuze.	Ток потребления до 50mA@18V, это менее ватта. Нагрев до ~30 градусов, нормально, стабильнее параметры будут.	Хорошо

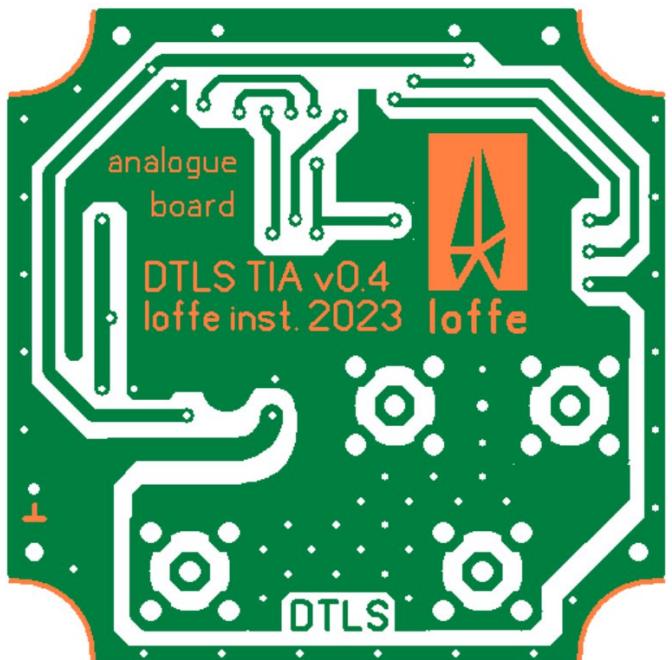
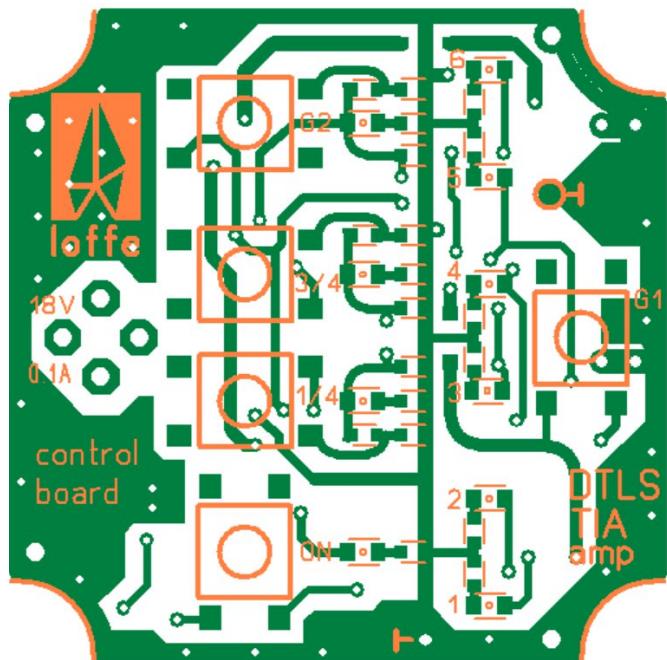
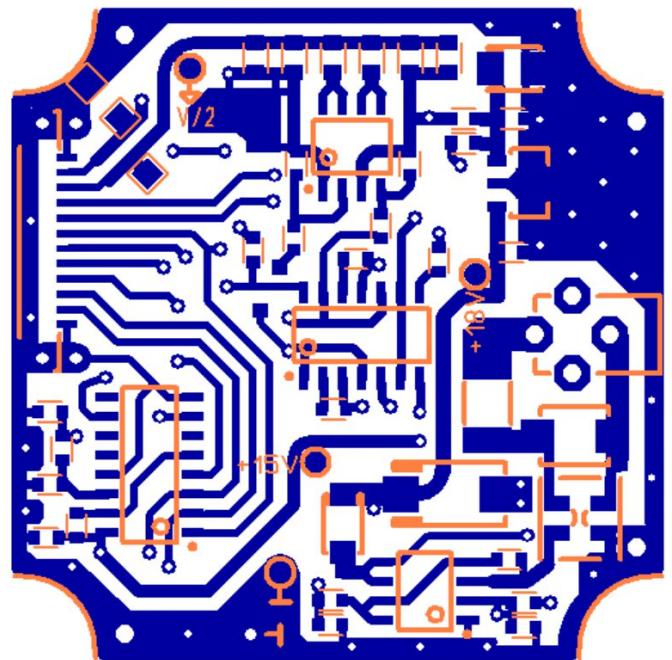
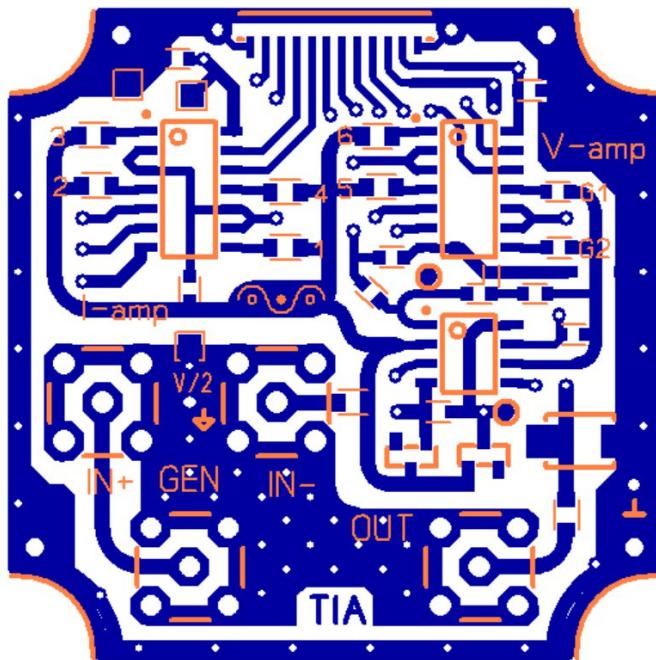
## Внешний вид прибора



## Вариант 4 - серия

- SMA и BNC варианты - корпус Gainta G0470F
- BNC вариант - корпус Gainta G0124F
- Плата одна на оба варианта 42x42мм, мезонин, 2 слоя FR4 1.5мм, заводское изготовление
- Дорожка/зазор 0.5/0.6, переходные
- Мезонин на стойках моно-проводах 1мм, межплатные соединения на шлейфе
- SMA разъёмы паяются на плату, BNC изолированные в панель, пайка навесным к плате

### Плата

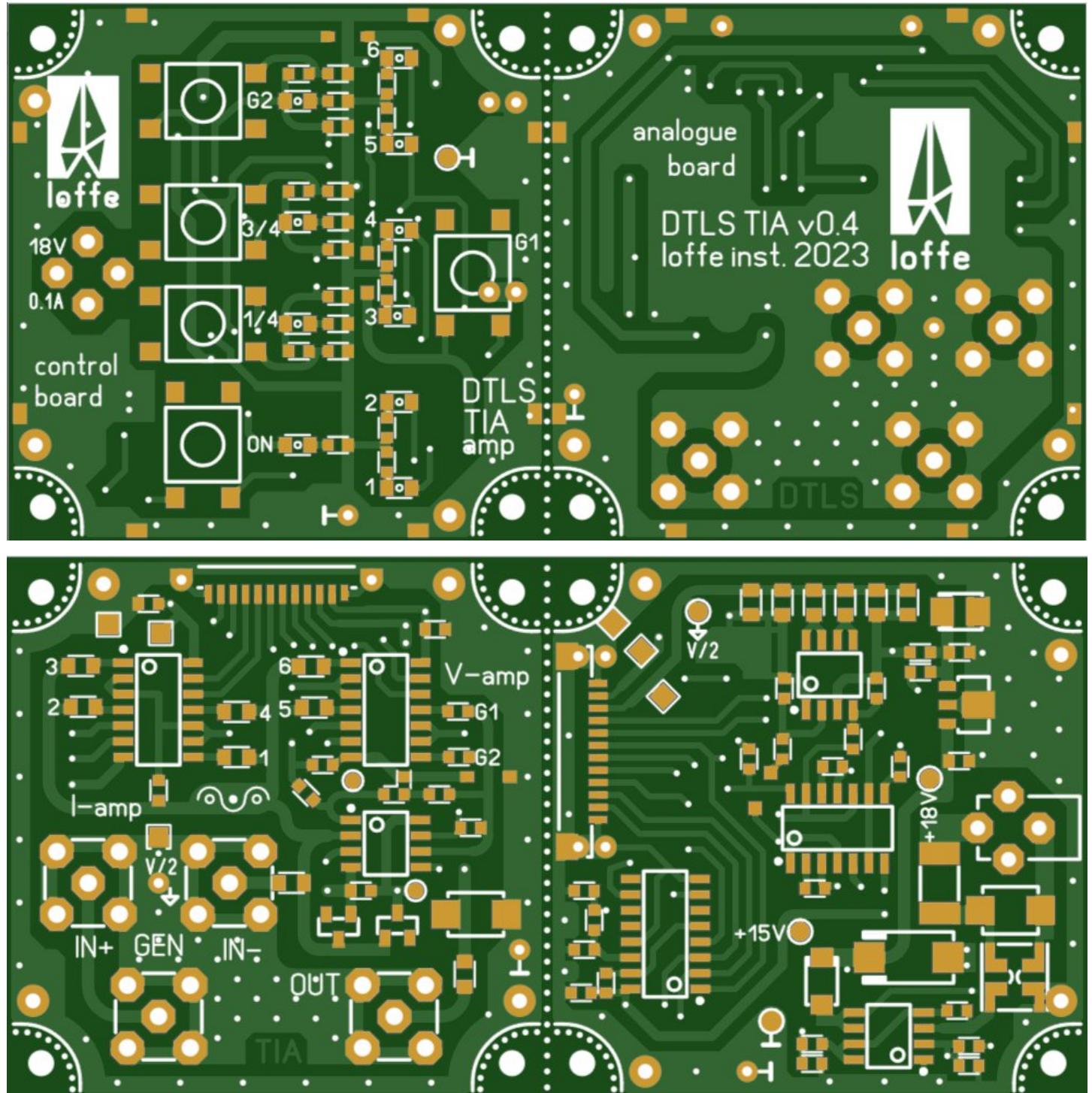


## Список работ

1.	Пром плата	Плата заказная на Aliexpress, микро серия 10 плат по 2шт на заготовке, разделённая сверловкой, т.к. скрайбирование дороже.	Отлично
2.	Вариант с BNC	Изолированные BNC типа Amphenol 31-10. Мезонин стягивается до 10мм, снизу остаётся место для навесного монтажа хвостовиков BNC. Всё убирается в малый корпус G0470.	Отлично
3.	T-фильтр и антизвон Cap	Не понадобились, не звенит, Cap в ОС можно оставить.	Убираем
4.	Провода питания для связывания мезонинов	Не понадобились, очень маленькие токи. Проводы-стяжки мезонинов сечением 1мм хорошо заземляют обе платы и корпус.	Убираем
5.	Ток делителя уменьшить	Номиналы делителя можно уменьшить до тока 1-5mA без ущерба всем характеристикам ОУ, ставим 1.5K	Отлично
6.	Верхние 3/4 смещения	Выяснилось, что для OPA2140 зазор между средней точкой и верхним питанием не менее 3.0V, иначе растёт смещение выхода. Делаем 3/4=11.5 для 15V.	Удовлетворительно
7.	Неравномерность свечения LED	Визуально сильно заметно super-bright свечение, надо искать и ставить все особо-яркие, и надо убрать боковую засветку световодов. Сделано через термоклей и термотрубки как оптовод.	Хорошо
8.	Стабильность включения выключения устройства	Требуется тщательный подбор всех номиналов сопротивления и ёмкости для стабильной работы ключа питания на диапазоне 9-20V. Подобрано.	Хорошо
9.	Стабильность переключения bias	Верхний ключ управляет от триггера на логике и влияет на бистабильность при переключении и подаче напряжения, увеличить номиналы в затворах до 100к	Хорошо
10.	Ёмкость TVS по выходу	Не все ОУ могут работать на ёмкостную нагрузку уровня 1000pF, заменить на ESD защиту с малой емкостью порядка 10pF, и забрасываем его за 50 Ом.	Меняем
11.	Заземление корпуса	Бронзовые пружинки с края платы на корпус внутри, провод-стяжка мезонинов.	Отлично
12.	Скорость ОУ	LMC6062 крайне медленный, всего 100KHz: выбрать, найти, купить и испытать несколько других быстрых вариантов: OPA2810, AD8034, AD8066, TL082.	Отлично

## Внешний вид прибора

Групповая заготовка платы

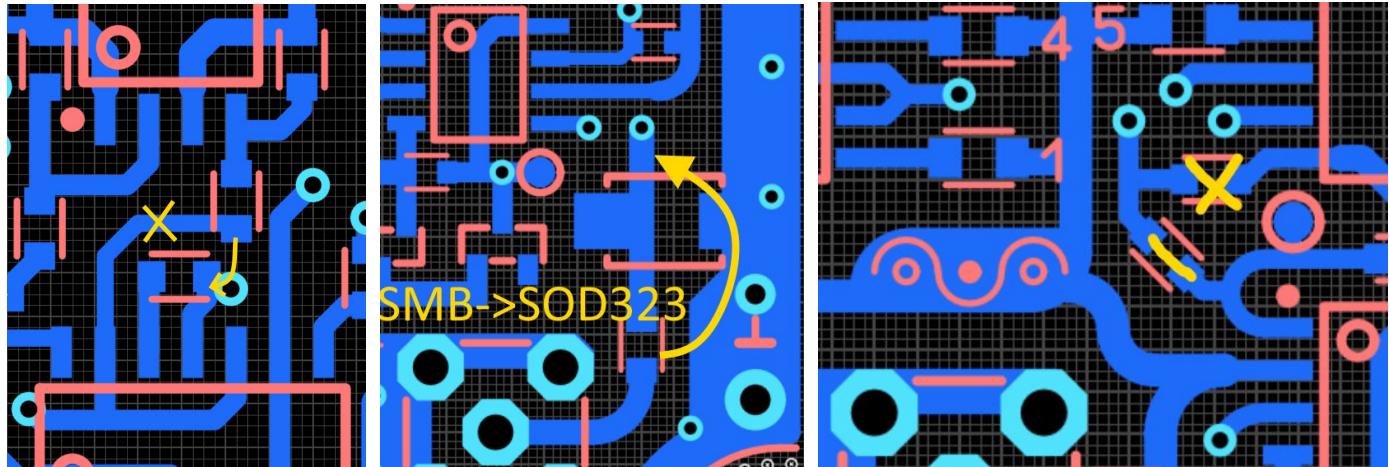


## Вариант 5 - серия исправленная

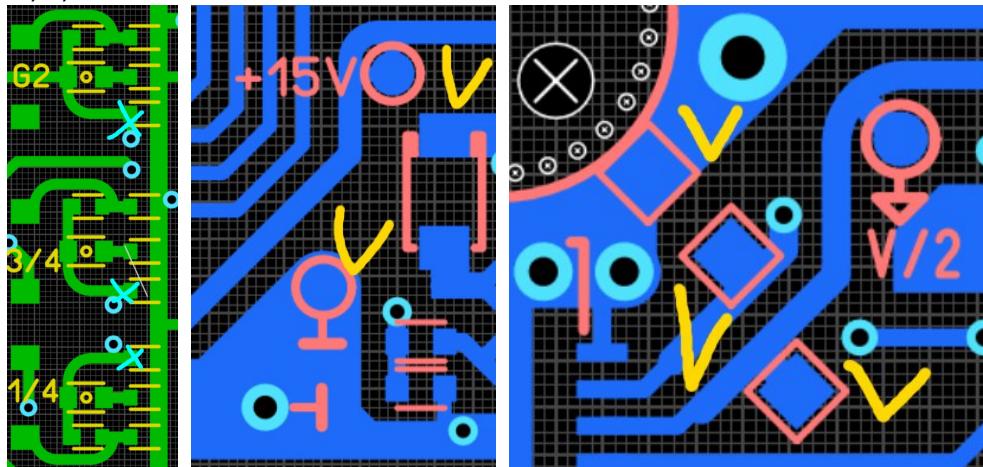
Список работ (не планируется):

1. Перекинуть Bias3/4 на верх триггера, было неверно
2. Выходной TVS в SMB заменить на ESD в SOD323, перекинуть за резистор 50 Ом на выход
3. Убрать Т фильтр, оставить антизвонный Сар и отладочный 0-резистор между ОУ
4. Убрать балансировочные резисторы с выходов триггеров
5. Все тестовые точки сделать с отверстием 0.8мм, удобно для щупа и доступ с обеих сторон
6. Убрать полигоны для подпайки проводов питания между мезонинами, хватило FPC
7. Продумать вариант для наплатных BNC и SMA одновременно
8. "Положить" на плату FPC разъёмы, место есть
9. Плотно расположенные элементы проредить
10. Переместить все элементы аналоговой платы на обратную сторону, удобнее доступ.

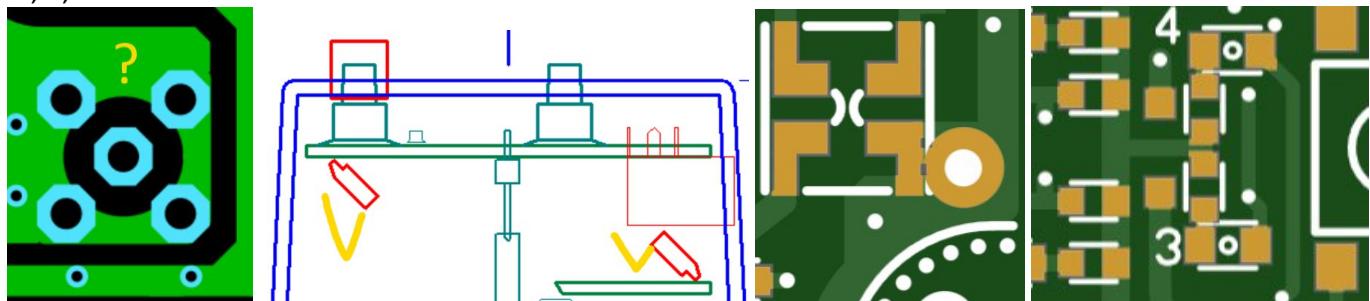
1, 2, 3



4, 5, 6



7, 8, 9



## Компоновочный чертёж корпуса

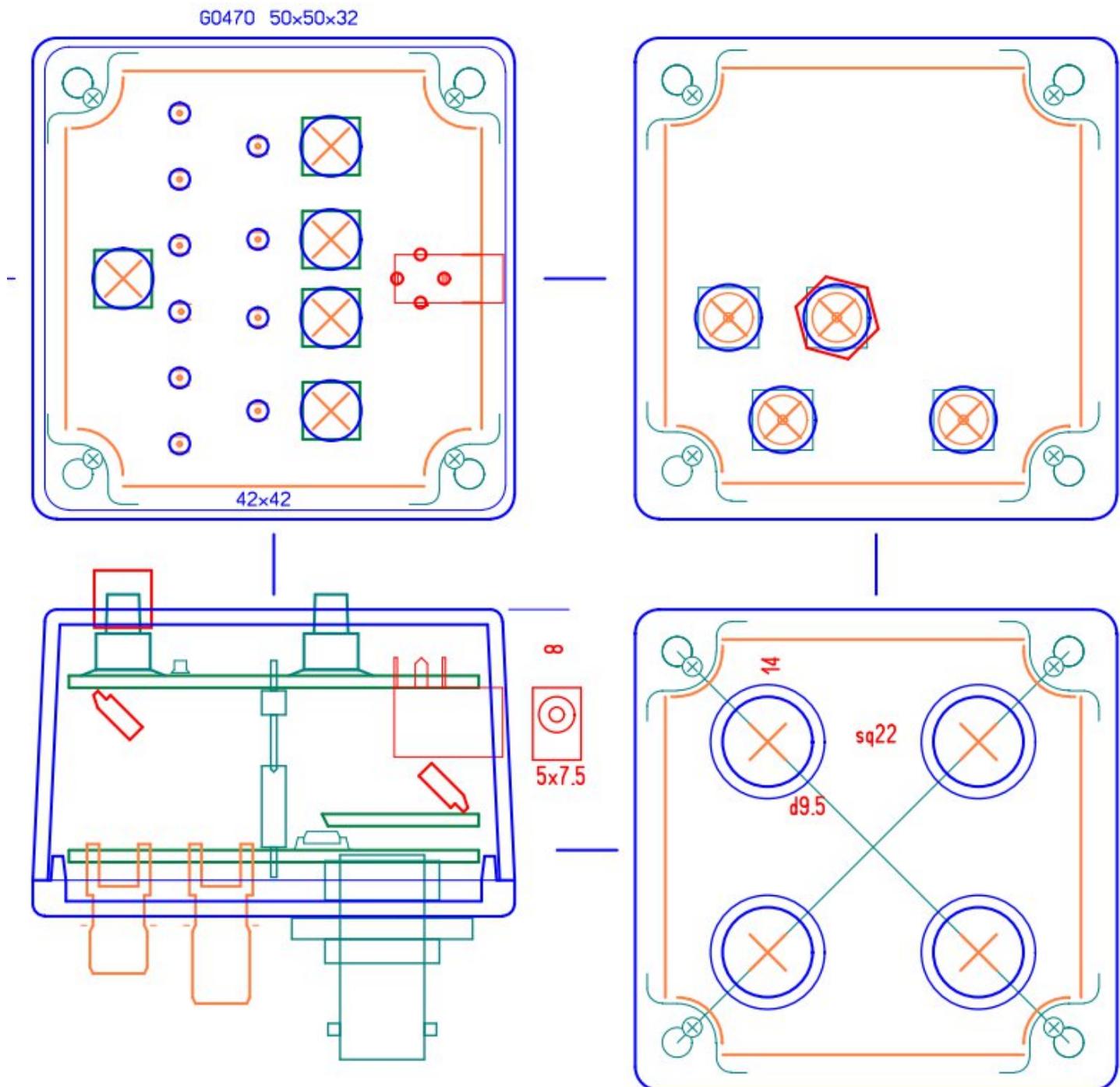
[Gainta G0470F](#), алюминиевый корпус с фланцами, 51x51x32мм, стенка 2мм.

Негерметичный корпус без прокладки, экранированный, есть версия без фланцев - дороже.

Две версии: с малогабаритными SMA разъёмами и с BNC разъёмами

SMA версия "родная" по плате, BNC требует ручной подпайки проводов

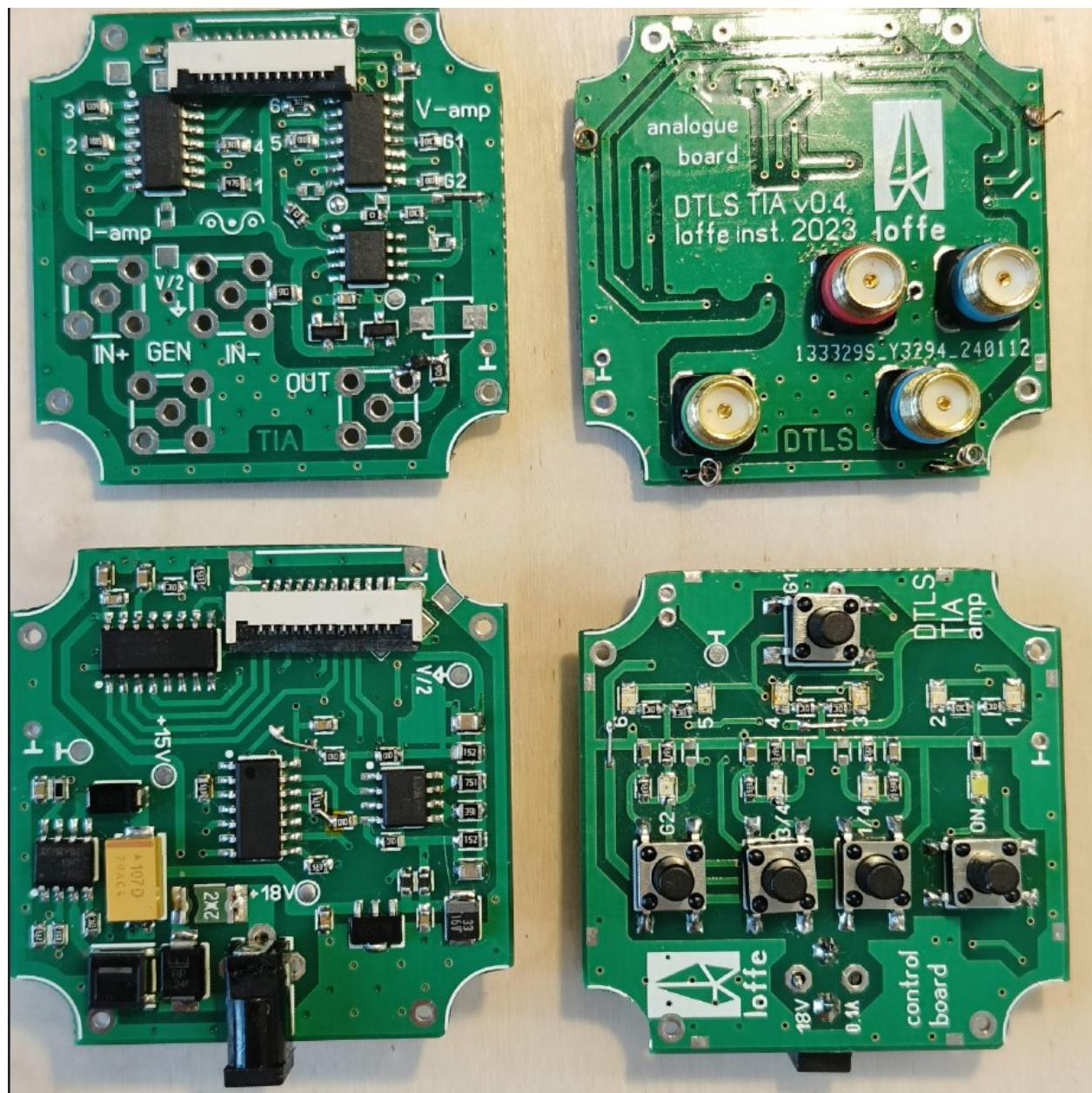
Две платы, мезонином друг на друге, соединение плат на шлейфе



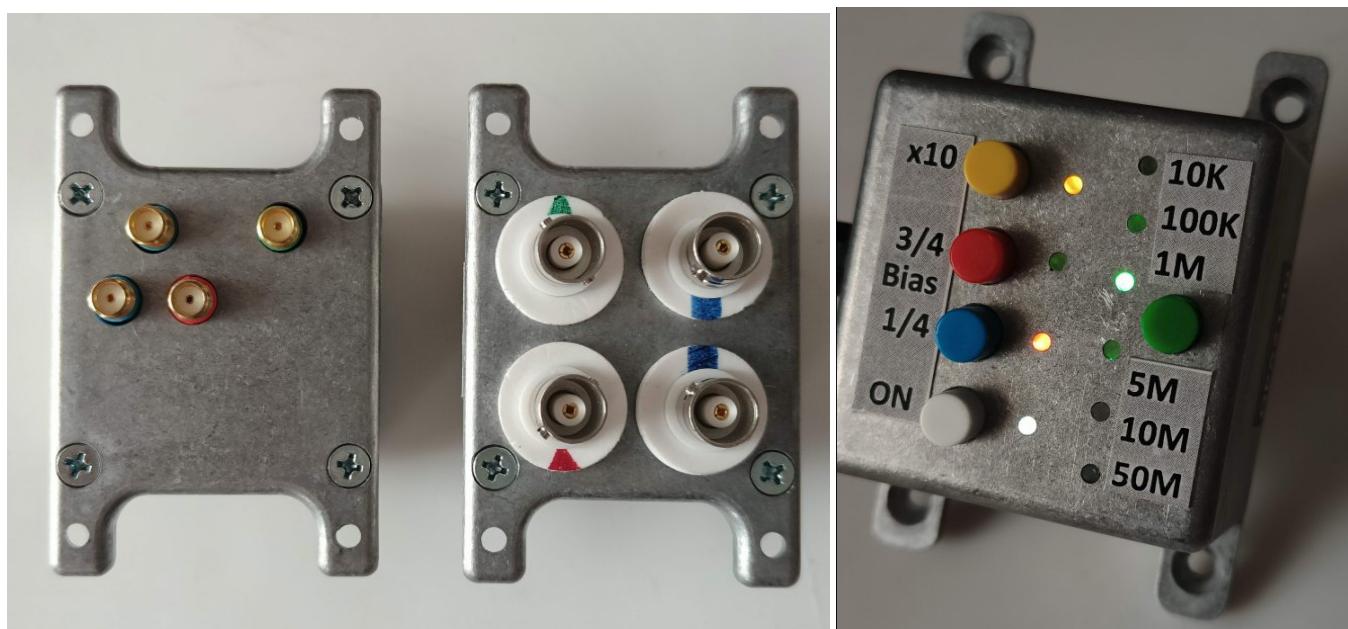
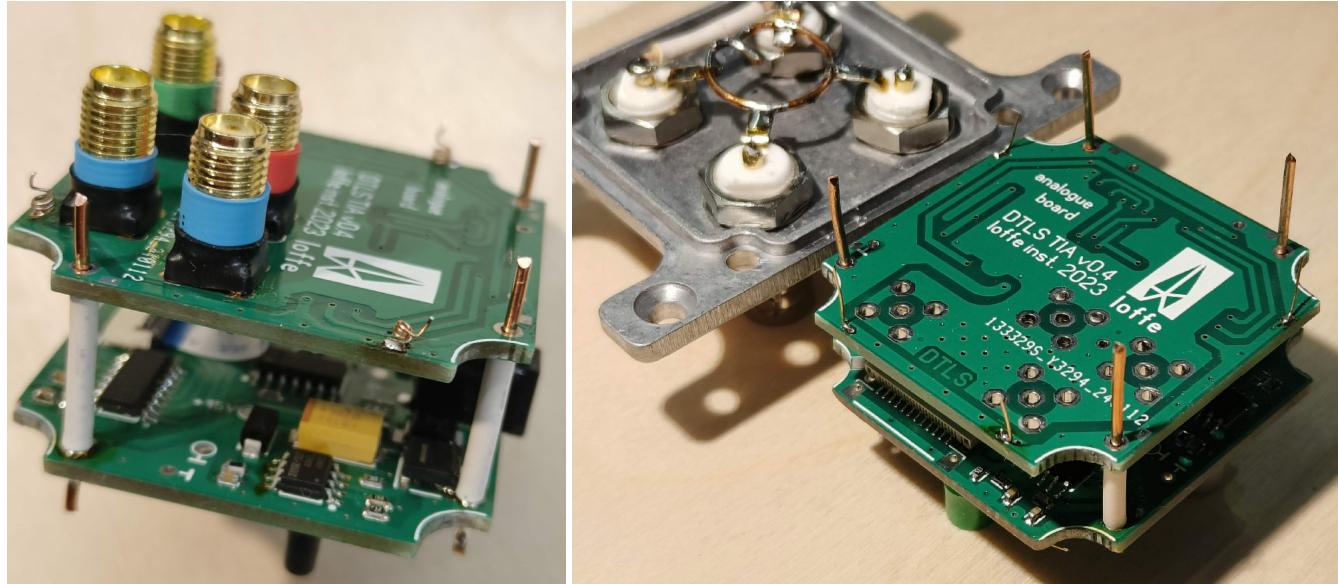
## Корпус Gainta G0470F



## Печатная плата



## Готовые устройства в версии SMA и BNC



## Вариант большого BNC корпуса

Вариант прибора в увеличенном корпусе с BNC разъемами

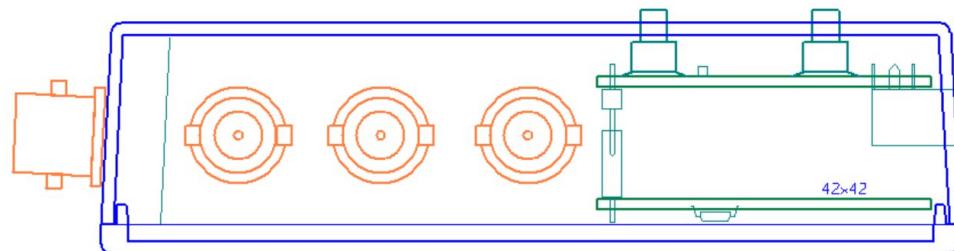
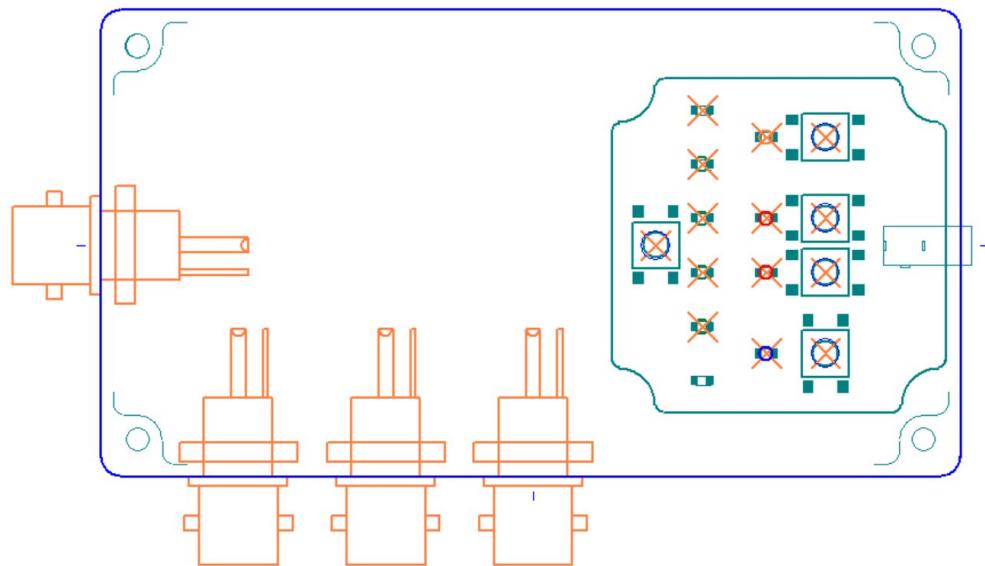
[не пошёл в серию - получилось уместить BNC в малый корпус]

Плата от варианта SMA G0470.

Gainta G0124F, алюминиевый корпус с фланцем, 111x60x30мм, стенка 2мм.

Негерметичный корпус без прокладки, но экранированный, есть версия без фланцев.

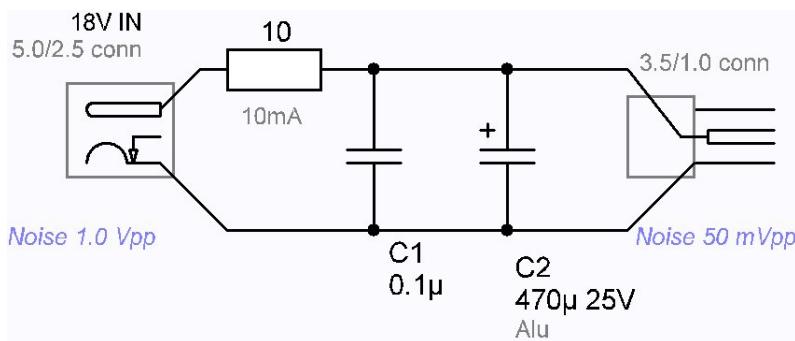
G0124 111x60x30



## Измерения

### Питание

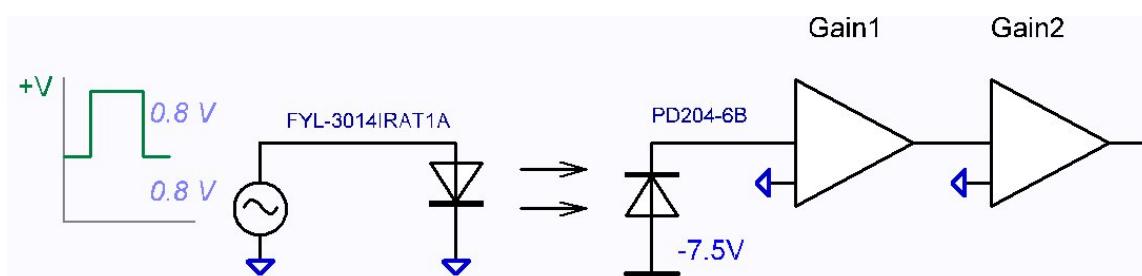
Два варианта питания. Батарейное питание 18V. Или внешний импульсный БП 18V, переходник с разъёма 5/2.5мм на 3.5/1 мм. В переходник впаян фильтр-предохранитель из последовательного резистора 10 Ом и ёмкостей. Подавление пульсаций с 1Vpp до 50mV. Защита по току на уровне 100mA. Удлинение шнура до 3 м, вынос БП далеко от точки измерения.



### Схема испытания

Прямое измерение – через подачу сигнала с генератора на вход напрямую через резистор, фактически перевод первого каскада в усилитель напряжения. Использован для съёма АЧХ.

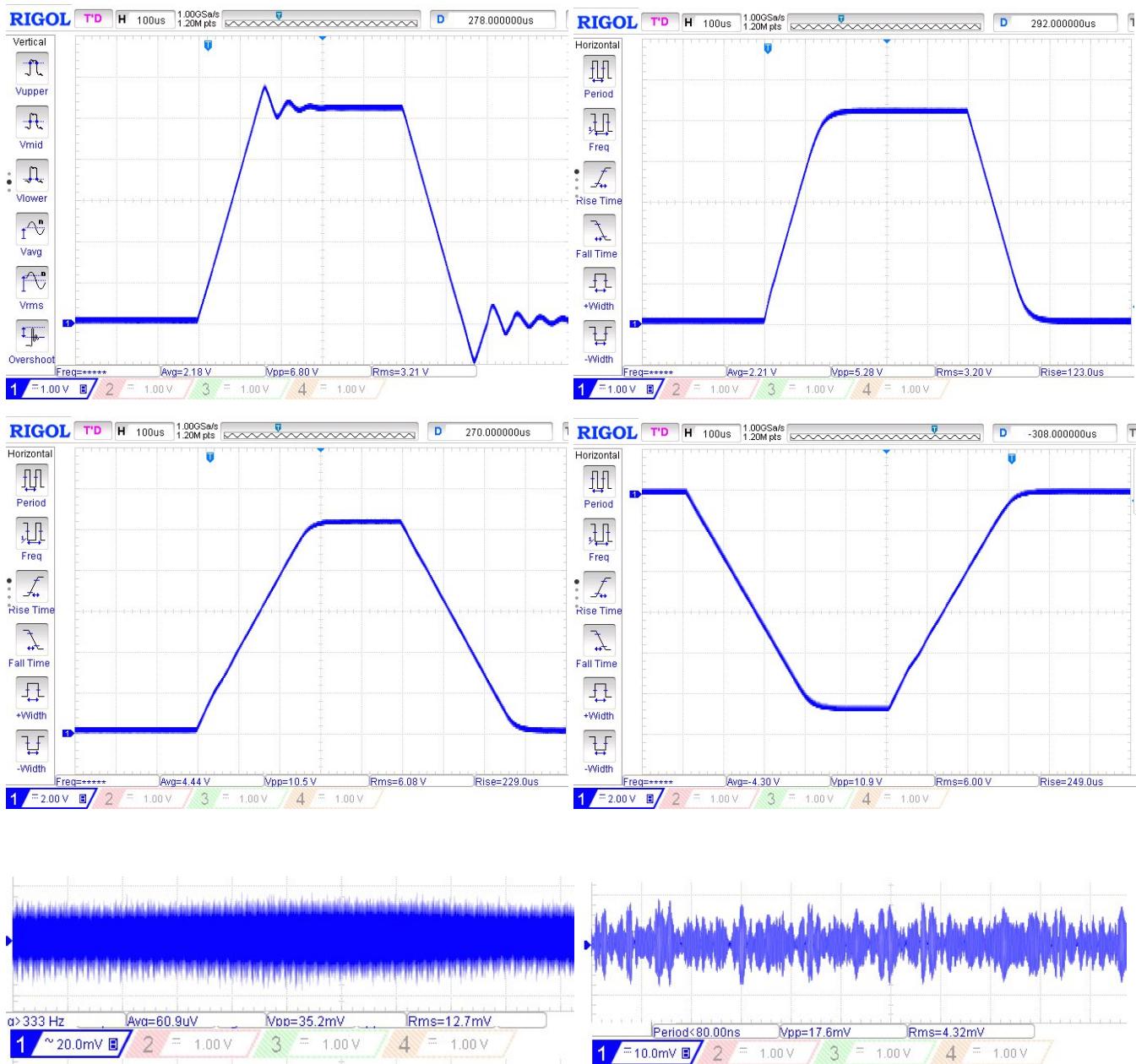
Косвенное измерение характеристик усилителя - через оптопару. Подача оптического сигнала на ИК фотодиод ([PD204-6B](#), 6nS rise time, 5pF, 3uA/10nA), подключенный прямо или обратно (со смещением на корпус -7.5V) на вход токового усилителя. Сигнал генератора 800mV на ИК светодиод ([FYL-3014IRAT1A](#), 1.3V 50/800mA) смешён вверх на +800mV. Частоты – единицы и десятки KHz, 25-50% duty. Также был симулирован псевдо-синусоидальный сигнал с фотодиода для съёма предела полосы с фотодиодом на входе. Основной режим усилителя G1=100K, G2=10, Bias=3/4, сильносигнальный режим с размахом выхода 10-12V. Основные характеристики ОУ с графиками находятся в приложении.



**LMC6062**

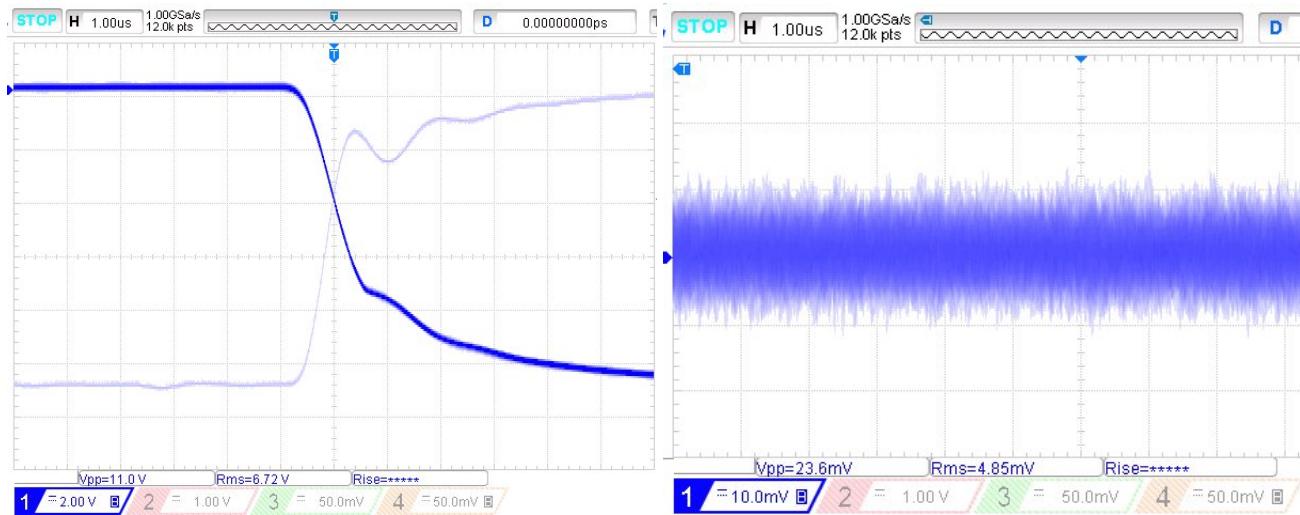
a) усиление 1M/1 (G1/G2), видны переходные процессы, в соответствии с даташитом b) усиление 100K/10, переходных процессов нет c) сдвиг среднего вниз до 1/4, 10.5V размах сигнала d) обратное включение фотодиода, смещение 3/4, 11V размах сигнала e) шумовая дорожка 12mV RMS на импульсном БП f) шум 4mVrms на батарейном питании.

Выводы: очень медленный усилитель со скоростью 4V/100uS, 1KHz меандр и 5KHz полосой, но чётко нулевое смещение, низкий шум, очень чистый сигнал.



**OPA2140**

a) усиление 100K/10, смещение 1/4 b) шумовая полоса (25 mVpp/5mV RMS). Выводы: очень малошумный, средне скоростной усилитель с средней скоростью Slew Rate порядка 5V/uS, около 1MHz полоса. На сильносигнальном 11V режиме есть неприятные переходные процессы в области 3/4 подъёма и спада сигнала.

**AD8034, AD8066**

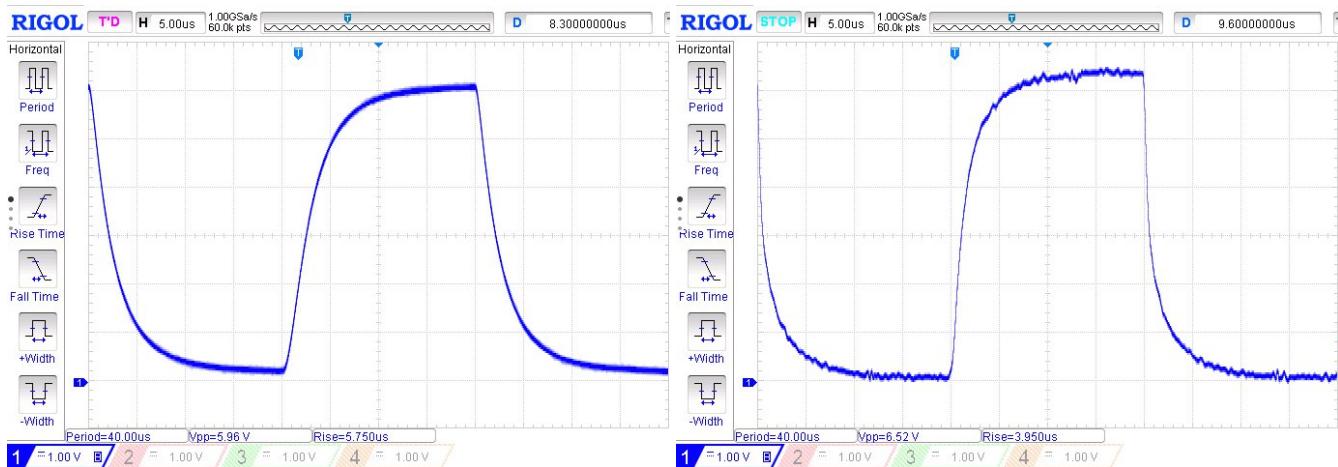
AD8034 a) усиление 1M/1 b) усиление 100K/10, на импульсном БП

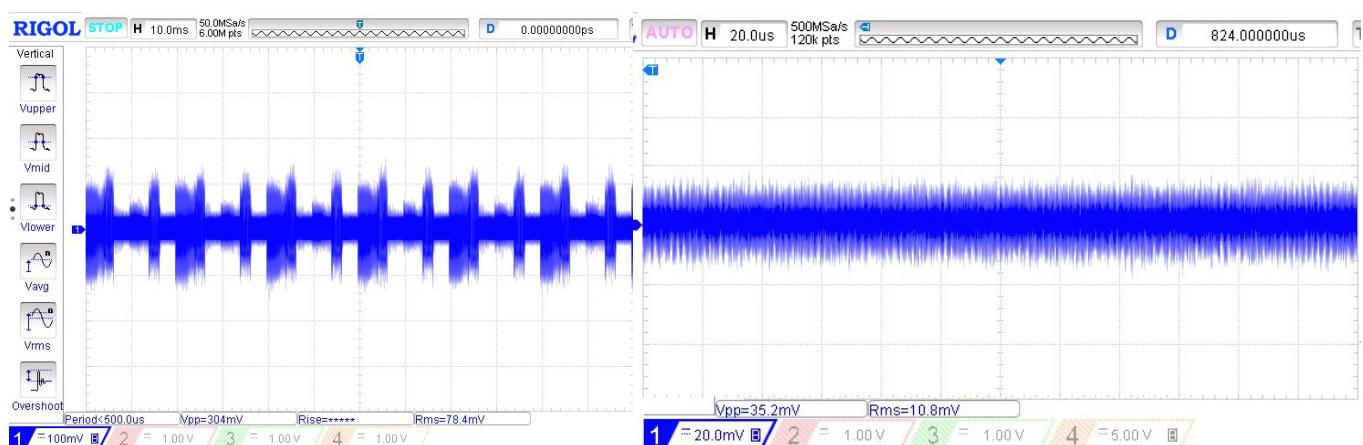
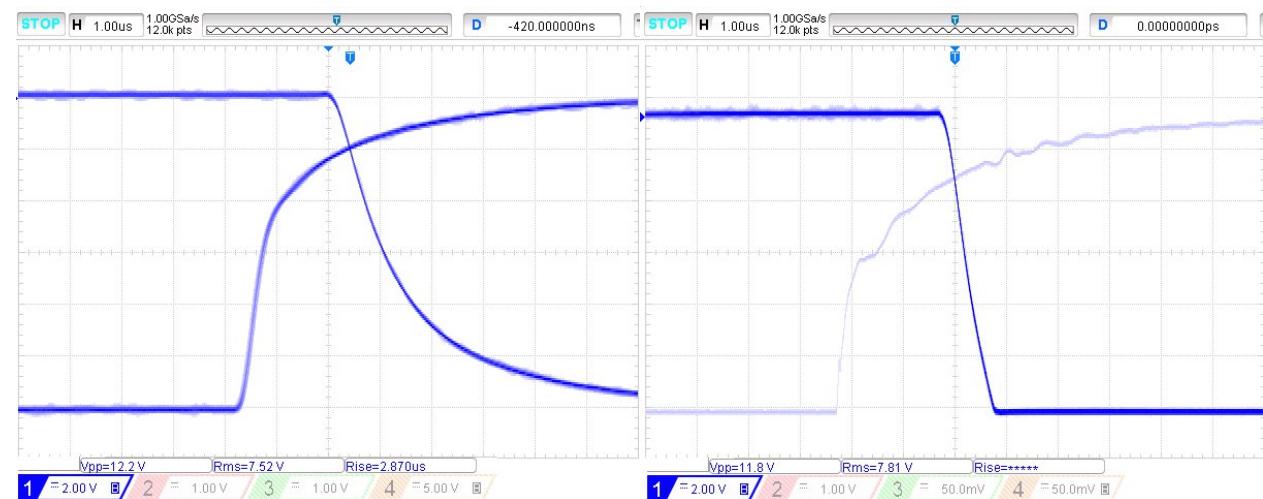
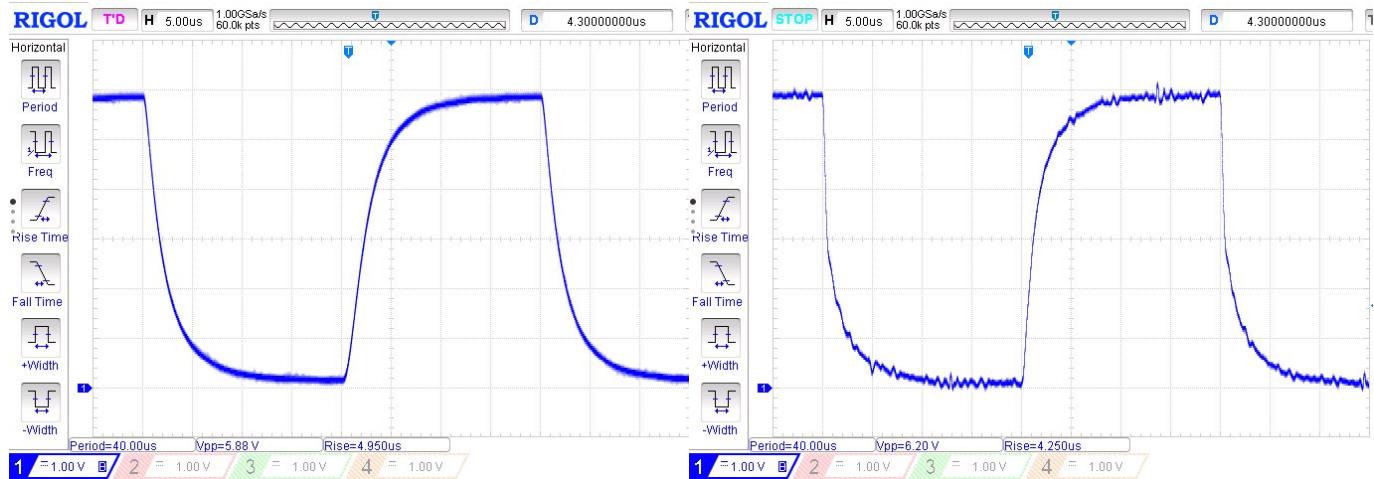
AD8066 c) усиление 1M/1 d) усиление 100K/10, на импульсном БП

e) f) фронты сигналов AD8034, AD8066

g) h) шум AD8066 на импульсном БП и на батарее

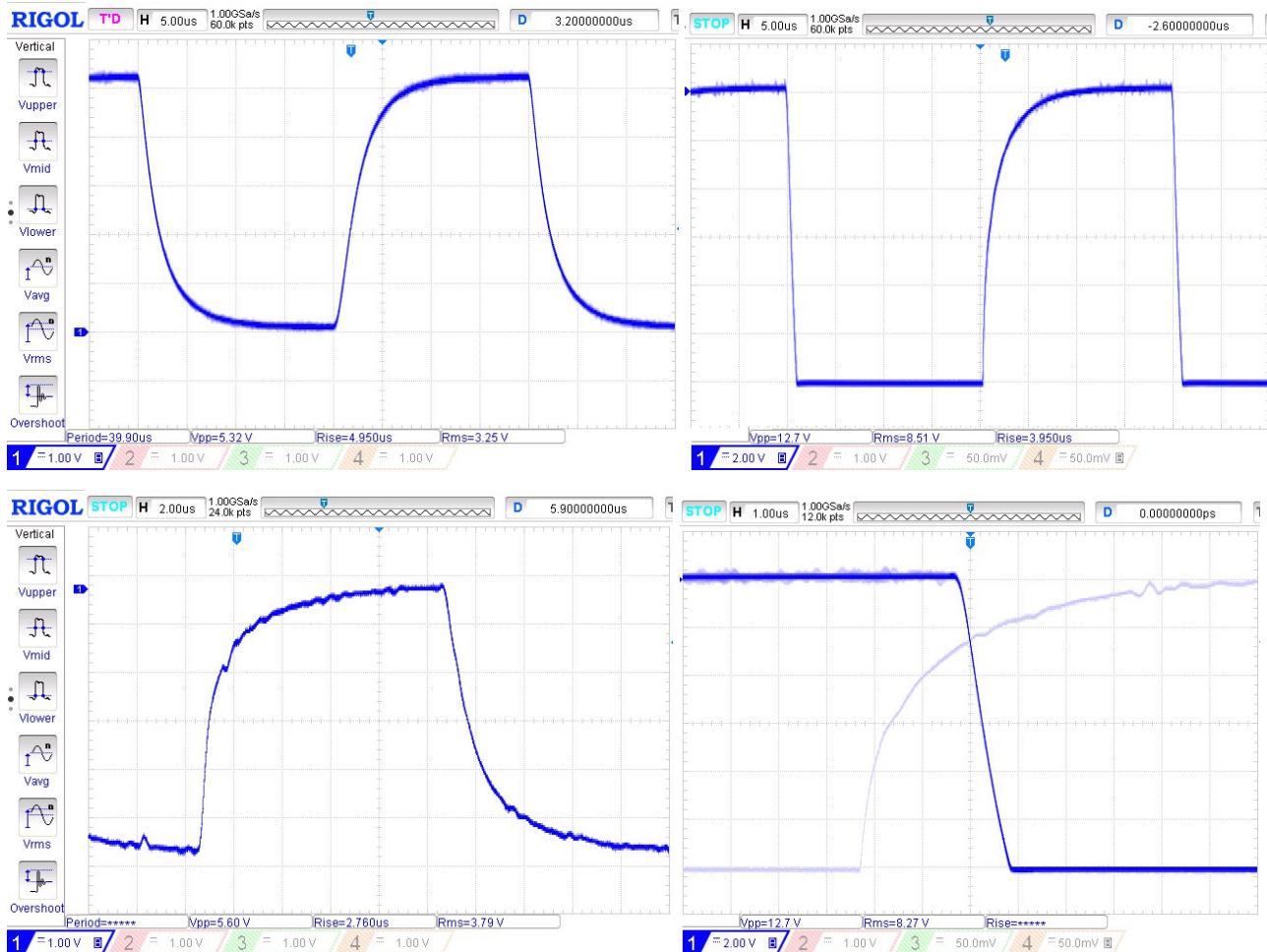
Выводы: быстрые усилители со скоростью до 10V/uS, 1.5 MHz полоса на 1M усиении, небольшое смещение, но шумные. Оба усилителя примерно одинаковы, 8066 несколько быстрее и бывают неравномерные фронты.





**OPA2810**

a) усиление 1M/1 b) усиление 100K/10 (появляется шум) c) сигнал 25KHz d) фронты сигналов. Выводы: быстрый усилитель с большой скоростью до 12V/uS в полном размахе 12V и полосой 10MHz, небольшое смещение, но шумный 10mVrms. Усилитель похож на AD8034/8066.

**AЧХ**

Первые три колонки - прямой съём АЧХ (MHz) на трёх разных Ku, далее предельная частота (KHz) через фотодиод в псевдо-синусоидальном сигнале при 100K/10, последняя колонка - шум при отключённом входе "в воздухе" mVpp/mVrms.

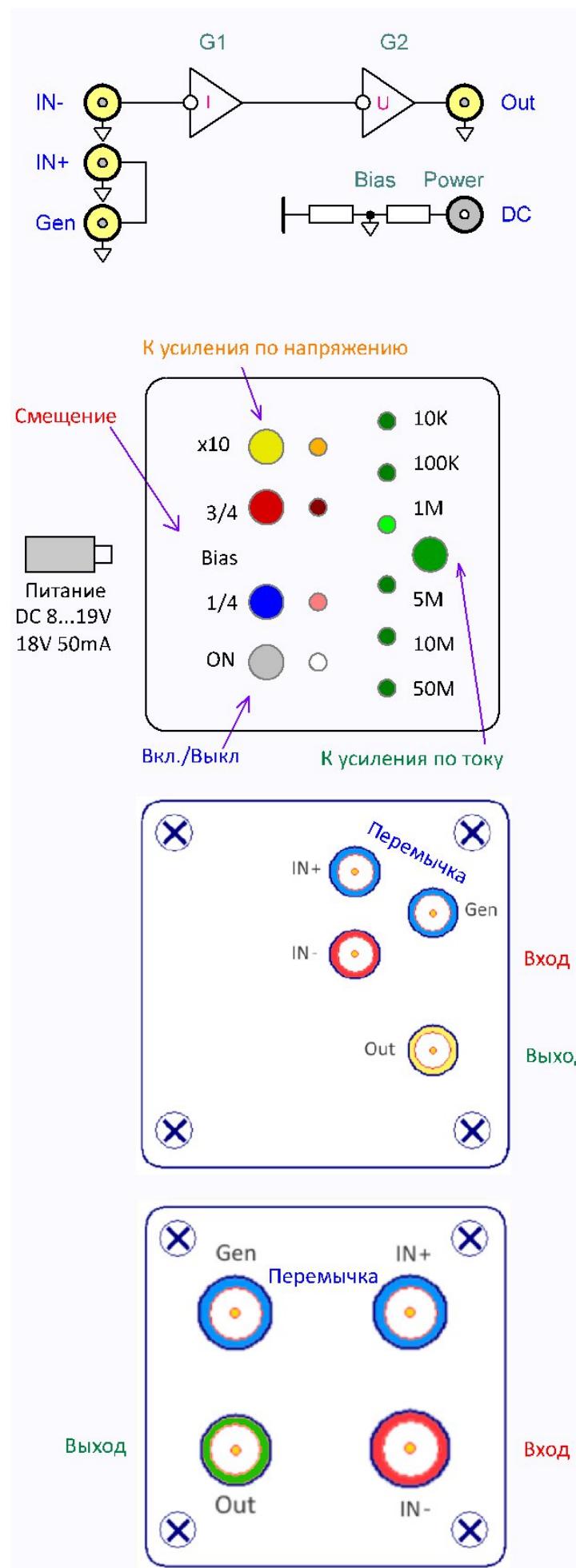
OpAmp	1M	100K	10K	100K/10	V <sub>noise</sub> PP/RMS
LMC6062	-	5KHz	-	2.5	18/4
OPA2140	1.0	1.3	2.3	125	10/7
OPA2810	0.8	2.5	11	125	35/9
AD8034	1.6	2.0	8.5	125	25/8
AD8066	1.5	2.35	10	125	35/11

**Выводы по испытаниям:**

1. Разработанное устройство работает с запланированными характеристиками, имеет компактные габариты и удобное управление, позволяет оперативно заменять ОУ в стандартном корпусе SO-8.
2. Устройство имеет оптимальный по скорости и шуму сигнал при усилениях 100K/x10 и смещении средней точки 1/4 или 3/4 для последующей точной оцифровки сигнала в полном диапазоне АЦП 10V без потери младших значащих разрядов.
3. При полном размахе сигнала и усилии 100K скорость фронтов доходит до 10V/uS, что позволяет работать с прямоугольным сигналом до 25 KHz и имеет полосу по -3Db до 2MHz.
4. Предельная полоса при самом низком усилии 10K/1 составляет 10MHz по -3Db в среднем по силе сигнале 5Vpp, что очень достойно для измерительного усилителя с нулевым токовым смещением.
5. АЧХ быстродействующих усилителей имеет подъём ближе к концу диапазона.
6. Ощутимое смещение сигнала на всех диапазонах измерений не обнаружено.
7. Звон самовозбуждения также не обнаружен.
8. Шум в пределах 10mV RMS и ниже на всех диапазонах.
9. ОУ LMC6062 имеет особо чистый сигнал, предельно малое смещение, но очень малую скорость, может работать в меандре до 1KHz.
10. ОУ OPA2140 имеет самый малый шум, но в некоторых режимах есть искажение фронтов сигналов.
11. ОУ AD8034, AD8066 и OPA2810 имеют сходные характеристики и являются наиболее быстродействующими из существующих ОУ с малым токовым смещением.
12. Для уменьшения шума рекомендуется батарейное питание.

# Приложения

## Краткая инструкция



## Затраты

31-May-24

Закупки, токовый усилитель DTLS

N	Дата	Где	Что	Сумма	Этап	В серию
1	22.09.23	Roboparts	Провода МГТФ, ПВГА	431	Proto1	
2	29.09.23	Roboparts	Прецизионные ОУ LM318, OP07	297	Proto1	
3	14.10.23	Тec	Прецизионные ОУ: AD8656 (prec, 5V), OP07, источники фототока ФД256, FY15012, ключи "светлана" КН2	595	Proto1	
4	14.10.23	Тec	Подбор усиления - резисторы 1 - 20 MOM, TL071	279	Proto1	
5	17.10.23	Тec	Замена выгоревшего: 78L12, 4017, 4066, 40106	260	Proto2	78L12 x10
6	23.10.23	Roboparts	Prec OpAmp AD8210, AD712, Polifuze, TVS, RecDiode, TactButton, Cap Tant	683	Proto2 PreProd3	B340A x10
7	25.10.23	Тec	Switch 4066x10, IRF9952, TL082x5	380	Prod4	IRF9952 HEF4066BT
8	28.10.23	Ozon	Измерительное: генератор UNI-T UTG962E	11,700	Equipment	*
9	29.10.23	Ozon	Измерительное: мультиметр UNI-T UT60s	3,100	Equipment	*
10	31.10.23	ChipDip	LED 0805, накладная от 12.11.23	400	PreProd3 Prod4	* FLYS0805 x32,20,20
11	31.10.23	Platan	Основной заказ: OPA2140x1, LMC6062x5, 4066 (ti) x16, набор МОМ резисторов, TVS 16V, BAS116, LED	5,268	Prod4	весь заказ
12	02.11.23	ChipDip	Корпуса Gainta: BK035, BK035BLK, G0470F	1,000	no	не пошло
13	14.11.23	Platan	SMA разъёмы, DC разъёмы	1,634	Prod4	весь заказ
14	17.11.23	Ozon	БП 18V 2A, 2шт	796	Prod4	* весь заказ
15	19.11.23	ChipDip	Корпуса Gainta G0470F x2, FR4 100x150 x2, DC002	780	Proto3 Prod4	G0470Fx2
16	24.11.23	Тec	4017 x5, 40106 x5, irf9952 x10	590	Prod4	весь заказ
17	03.12.23	Aliexpress	Большие разъёмы BNC isolated x10	651	Prod4	весь заказ
18	03.12.23	Aliexpress	SMA разъёмы удлинённые 16.5мм, тактовые кнопки 6x6 удлинённые 10mm 20pcs	531	Prod4	весь заказ
19	03.12.23	Aliexpress	Шлейфы FFC и разъёмы FPC 12pin 10pcs, переход SMA-BNC, колпачки на тактовые кнопки	720	Prod4	весь заказ
20	03.01.24	Aliexpress	Свёrla для платы 0.6 10pcs, 0.6-1.0 10pcs	516	Prod4	весь заказ
21	03.01.24	Aliexpress	Плата сигнального генератора ICL8038	462	Equipment	*
22	03.01.24	Aliexpress	Набор выводных резисторов E24 300pcs, переменные резисторы 10k 100k	459	PreProd3	весь заказ
23	06.01.24	Aliexpress	Изготовление платы 43x86mm FR2 2 side, 10pcs	1,696	Prod4	весь заказ
24	15.01.24	Aliexpress	Жала паяльные T12, держатель жала Hakko FX-950	1,161	Equipment	*
25	23.01.24	Aliexpress	Большие разъёмы BNC isolated x4, переход SMA-BNC, модульные БП 1W 2pcs	369	Prod4	весь заказ
26	23.01.24	Aliexpress	Резисторы увеличенные 0805 500pcs, шунт 6R 24W	303	Prod4	весь заказ
27	23.01.24	Ozon	Припой ПОС-61 1мм 100гр, флюс ФКСп 0.5	1,148	Equipment	*
28	26.04.24	ChipDip	Корпус G0124F 1pcs, Tant 33uFx16V	635	no	не пошло
29	26.04.24	Tec	Mosfet IRF9952 x10	300	Prod5	весь заказ
30	03.05.24	Ozon	БП 18V 1A 2шт, R0805 500pcs set, шайбы под BNC	1,505	Prod5	весь заказ*
31	15.05.24	ChipDip	Корпуса Gainta G0470F x3	930	Prod5	весь заказ
32	20.05.24	Aliexpress	Кнопки, колпачки, fpc разъёмы и шлейфы, pliers	929	Prod5	весь заказ*
33	21.05.24	Tec	4017x10, 40106x10, irf9952 x10	350	Prod5	весь заказ
34	21.05.24	ChipDip	G0470F, Led0805, Pesd15V, Tant 22ux16	950	Prod5	весь заказ
35	30.05.24	Aliexpress	Большие разъёмы BNC isolated x8, DC разъёмы	811	Prod5	весь заказ*
36	31.05.24	Platan	AD8066, AD8034, OPA2810, Led0805, Tand 100ux20	2,334	Prod5	весь заказ

Sep-Oct23	28,193	* - e-чек
Dec23-Jan24	8,016	
Apr-May24	8,744	
<b>ИТОГО</b>	<b>44,953</b>	

## Себестоимость одной штуки

Этап			Component	Price
Proto1	Первый прототип на макетной плате	1,602	LMC6062	125
Proto2	Второй прототип на ЛУТ плате	943	CD40xx x4	100
Proto3	Предсерийный прототип в корпусе	1,459	100uF Tant	70
Prod4	Серия 5 штук	15,093	LED x10	80
Equip	Измерительное оборудование, паяльная химия	15,948	DLW5	50
		35,045	L78L LDO	20
			BAS116 x2	30
			SMBJ16CA x2	30
	<b>Состав на штуку в партии 5 шт</b>		LF-SMD	15
	Компоненты	600	DC conn	35
	Плата	170	R, C, SMD x45	15
	Корпус	300		
		<b>1,070</b>		<b>570</b>
	без БП 18V	400		
	кабели	500		

## Основная стоимость

- Блок питания 400
- ОУ 200-400
- Корпус 300
- Разъёмы 200
- Плата 170
- Тантал 130
- Логика 100

**ЛИСТ КОМПОНЕНТОВ**

--- DTLS TIA BOM May24 ---

OpAmp	OPA2140	SO-8	11MHz $\pm 0.5\mu A$ $\pm 30\mu V$ 8nV Hi-prec 2010	platan!	ti	560p	1x
OpAmp	OPA2810	SO-8	105MHz 2pA 0.1mV 21nV High-speed 2017	platan	ti	321p	2x
OpAmp	LMC6062	SO-8	100KHz 0.01pA 100 $\mu V$ 83nV Prec. 1994	platan!	ti	126p	5x
OpAmp	AD8066	SO-8	145MHz 2pA 0.4mV 7nV High Perf 2002	platan	ad	321p	2x
OpAmp	AD8034	SO-8	80MHz 1pA 1mV 11nV LowCost FastFET 2003	platan	ad	310p	1x
IClogic	CD4066BM/HEF	SO-14	Quad bilateral switch tec	NXP	25p	25x	
IClogic	CD4017BM/HEF	SO-16	Decade counter/demux	tec	NXP	25p	15x
IClogic	CD40106BM	SO-14	Hex schmitt-trig invert	tec	ti	20p	15x
LED	FYLS-0805PGC	0805	Grn 3.0V 550mcd	c-d/plt	foyard	14p	30x+67x
LED	FYLS-0805UBC	0805	Blu 3.0V 145mcd	c-d	foyard	14p	20x
LED	FYLS-0805UWC	0805	Wht 3.1V 750mcd	c-d	foyard	10p	20x
LED	FYLS-0805BPURC	0805	Red 2.0V 300mcd	platan	foyard	5p	80x
LED	FYLS-0805UYC	0805	Yel 2.0V 150mcd	c-d	foyard	9p	20x
LED	KP-2012SURCK	0805	Hyper Red 2.0 150mcd	platan	kingbr	8p	40x
LED	KP-2012SYCK	0805	SupBr Yellow 2.0 120mcd	platan	kingbr	9p	41x
LDO	L78L15ABUTR	SOT-89	12V 0.2A	platan	ST	10p	10x
MOSFET	IRF9952	SO-8	N+P 30V 2+3A 0.1ohm	tec	IRF	25p	30x
DiodRec	B340A-13-F	SMA	3A 40V 0.27V@0.1A	rbp	Diodes	9p	10x
DiodRec	BAS116E6327	SOT23	1pA reverse current	platan!	Infneon	15p	25x
DiodTVS	SMBJ16CA	SMB	17.8-19.7V 2000pf	platan	littlef	14p	26x
DiodESD	PEASD15VL1BA	SOD323	15-16.7V 20pf	c-d	UMW	6p	10x
ChokeC	DLW5BTM102SQ2L	2020	2.5A 34mOhm/1kOhm	platan!	muRata	48p	10x
BeadFer	BLM18PG221SN1	0603	1.4A 100mOhm/220ohm	platan	muRata	2p	20x
PTCfuze	miniSMDC020F-2	1812	0.2/0.4A 30V	platan	littlef	12p	32x
CapTant	TAJD107K020RN	Tant-D	20V 100uF	platan!	avx	67p	10x
CapTant	TECAP33/16VB10%	Tant-B	16V 33uF	platan!	noname	20p	10x
Res	RC0805JR-07100ML	0805	100M 5%	platan!	yageo	1p	100x
Res	RC0805JR-0747ML	0805	47M 5%	platan!	yageo	1p	100x
Res	RC0805FR-0710ML	0805	10M 1%	platan!	yageo	1p	100x
Res	RC0805FR-075M1L	0805	5.1M 1%	platan!	yageo	1p	100x
Res	RC0603FR-071ML	0603	1M 1%	platan	yageo	1p	500x
Res	RC0603FR-07100KL	0603	100K 1%	platan	yageo	1p	500x
Res	RC0603FR-0710KL	0603	100K 1%	platan	yageo	1p	500x
Conn	KLS1-SMA001	SMA	PCB top	platan	KLS	50p	8x
Conn	KLS1-SMA005	SMA	Cable RG-174	platan	KLS	64p	8x
Conn	KLS1-DC-002A-1.3	3.5x1.3	PCB DC power ring	platan	KLS	9p	20x
Conn	KLS1-DCP-01-1.3A	3.5x1.3	Cable DC power ring	platan	KLS	22p	10x
Conn	BNC isolated (Amphenol 31-10)			Aliexpress		43p	12x
Button	IT-1102W-9	6x6	Tact button SMD h9mm	robo	noname	12p	
Gainta G0470F	Case alu	51x51x32mm		c-d	Gainta	290p	8x
c-d tec rbp !	ChipAndDeep tec.org.ru roboparts preorder 3 week						

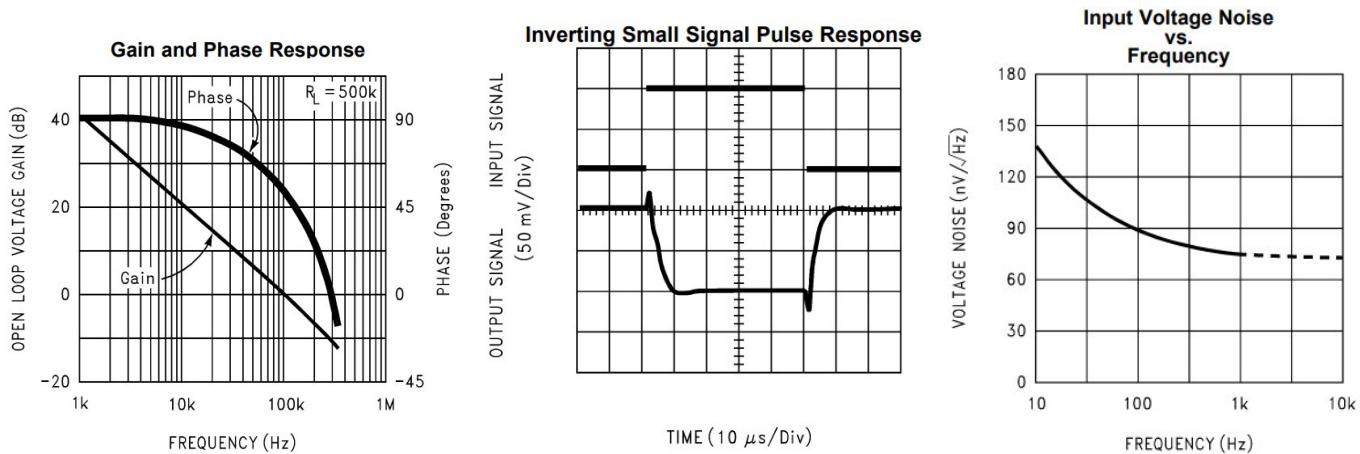
## Характеристики операционных усилителей

V<sub>s</sub>=15V, typical

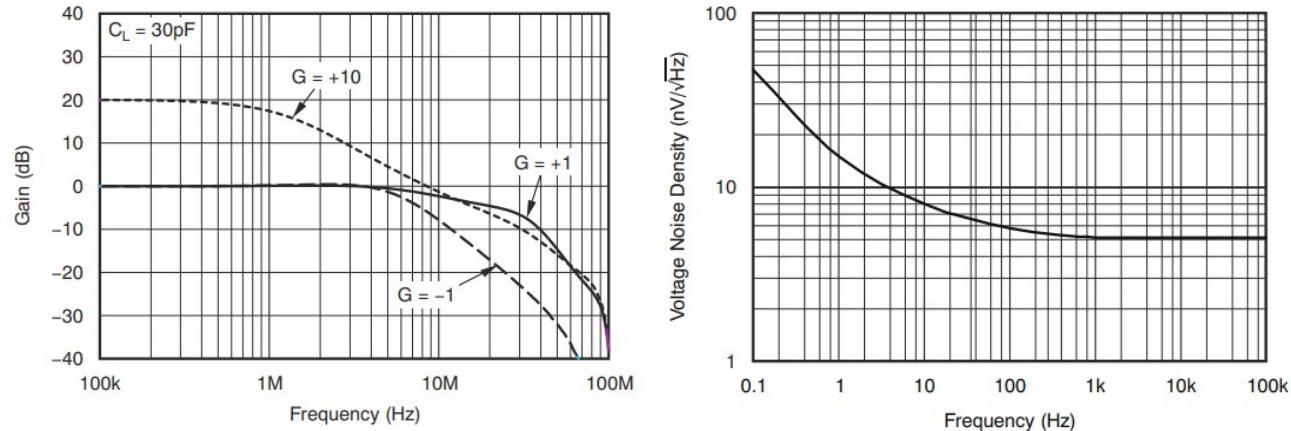
Name	GBW	I <sub>bias</sub>	V <sub>offset</sub>	V <sub>noise</sub>	Desc	Year	Price
<b>LMC6062</b>	100 KHz 35 V/mS	10fA typ >10 Tera Ω	100μV	83nV 500Hz 135@10Hz	Femtoamp Precision	1994	\$3.6-\$2.4 \$1.0@1ku
<b>OPA2140</b>	11 MHz 20 V/μs	±0.5pA	±30μV ±0.35μV/°C	8nV 10Hz 5.8nV 100Hz	Hi-prec	2010	\$6.3-\$3.4 \$3.1@1ku
<b>OPA2810</b>	105 MHz 20mV 26 MHz 4Vpp 190V/μs	2pA	100μV	6nV 500Hz 45nV 10Hz	High-speed	2017	\$4.5-\$3.0 \$2.3@1ku
<b>AD8034</b>	80 MHz 200mV 21 MHz 2Vpp 80 V/μs	1pA	1.0mV 4μV/°C	11nV 100KHz 180nV@10Hz	Low Cost FastFET	2002	\$6.5-\$3.2 \$2.3@1ku
<b>AD8066</b>	145 MHz 200mV 42 MHz 2Vpp 180V/μs	2pA	0.4mV	7nV 10KHz 110nV@10Hz	High Perf	2002	\$7.4-\$4.3 \$3.0@1ku

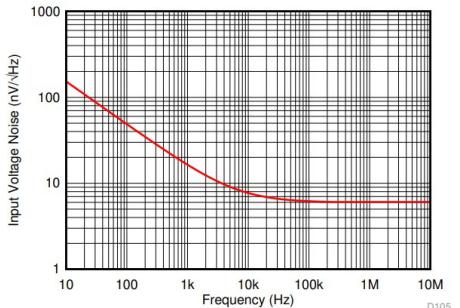
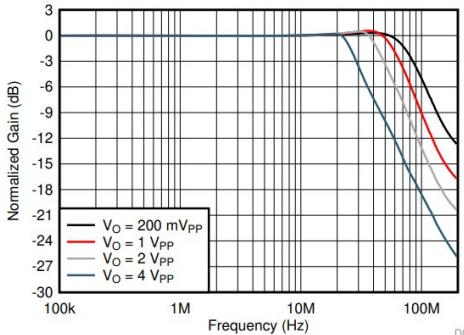
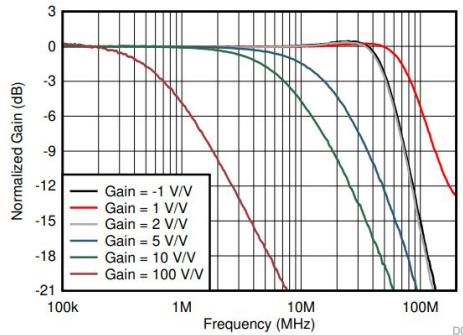
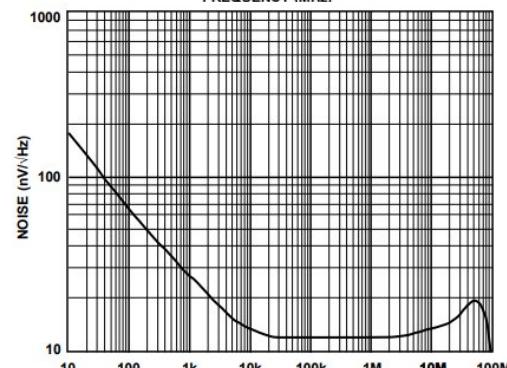
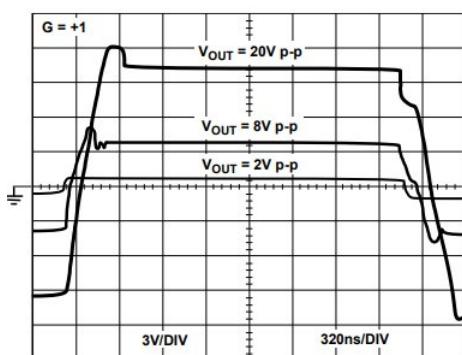
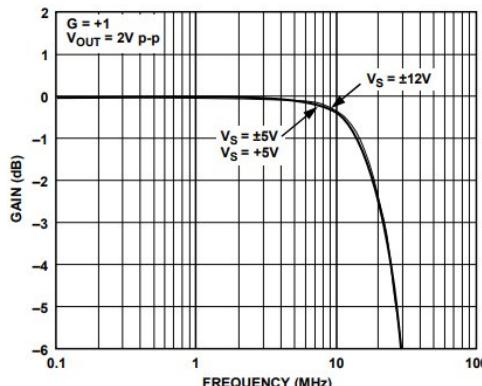
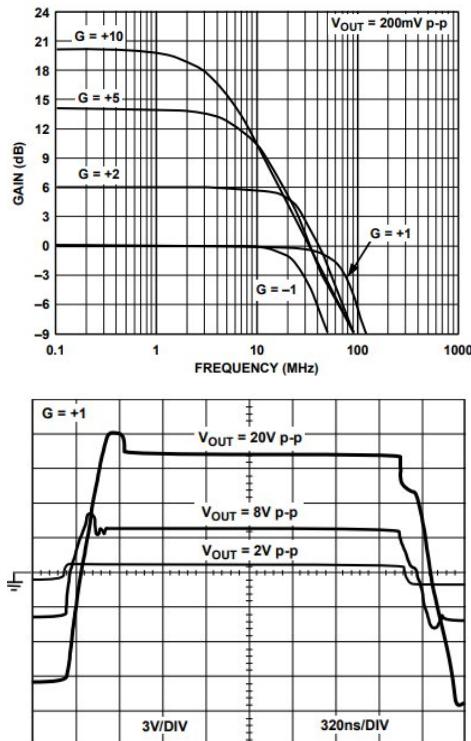
Выборочные графики ОУ из даташитов

### LMC6062



### OPA2140



**OPA2810****AD8034****AD8066**