

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond  
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Erik Proškin

## **Neuroliides**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: dotsent Mihhail Pikkov

Tallinn 2015

## Autorideklaratsioon

*Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel on kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidatud.*

Kuupäev:

Autor: Erik Proškin

.....

/allkiri/

## **Neuroliides**

### **Annotatsioon**

Selles bakalaaurusetöös arendatakse kahekanalist neuroliides.

Töös on arendatud elektroonilise skeem seadmest. Sellega seotud teoreetilised arvutus kinnitatud simulatsiooniga. Töös viimase osas nagu töö tulemus demonstreeritakse trükkplaadi seadet.

Töö on kirjutatud vene keeles ja koosneb 30 leheküljest

## **Нейроинтерфейс**

### Аннотация

В данной бакалаврской работе разрабатывается двухканальный нейроинтерфейс. В работе разработана электронная схема устройства. Связанные с ней теоретические расчёты подтверждены симуляцией. В последней части работы как результат разработки демонстрируется печатная плата устройства.

Данная работа написана на русском и состоит из 30 страниц.

## **Neural interface**

### Annotation

This bachelor thesis describes the development of two-channel neural interface. In this work electrical schematic was developed. Related theoretical calculations confirmed by simulation. The last part of the work demonstrates a device printed circuit board as a result of development.

This work is written in Russian and consists of 30 pages.

## **Содержание**

<b>ПЕРЕЧЕНЬ РИСУНКОВ/СХЕМ</b>	<b>7</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>8</b>
<b>1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА</b>	<b>9</b>
1.1.1 Электроэнцефалография	9
1.1.2 Мю-ритм	9
1.1.3 Принцип работы нейроинтерфейса	10
1.2 Техническое задание	10
<b>2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА</b>	<b>11</b>
<b>3. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА</b>	<b>12</b>
3.1 Расчёты схемы	14
3.1.1 Расчёты триггера Шмитта (U8)	14
3.2 Расчёты фильтров (U1, U4)	14
3.3 Расчёты усилителей (U3, U6)	14
3.4 Расчёты усилителей (U2, U5)	15
3.5 Расчёт дифференциального усилителя (U7)	15
<b>4. СИМУЛЯЦИЯ СХЕМЫ</b>	<b>16</b>
4.1 Проверка расчётов фильтра (U1, U4)	16
4.2 Проверка расчётов усилителей (U3, U6)	18
4.3 Проверка расчётов усилителей U2, U5	19
4.4 Проверка расчётов дифференциального усилителя (U7)	20
4.5 Проверка расчётов триггера Шмитта (U8)	22
<b>5. ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА</b>	<b>23</b>
<b>6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b>	<b>28</b>
<b>7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>29</b>
<b>ССЫЛКИ</b>	<b>30</b>

## Перечень рисунков/схем

Рисунок 1.1 Пример электроэнцефалограммы головного мозга человека .....	9
Рисунок 1.2 Пример мю-ритма человека.....	9
Рисунок 2.1 Структурная схема регистратора .....	11
Рисунок 3.1 Схема устройства.....	12
Рисунок 4.1 Симуляция амплитудно-частотной характеристики фильтра.....	16
рисунок 4.2 Симуляция максимального выходного напряжения с узкополосного фильтра U1, U4.....	17
Рисунок 4.3 Симуляция минимального выходного напряжения с усилителя U1, U4 .....	17
Рисунок 4.4 Симуляция максимального выходного напряжения с усилителя U3, U6.....	18
Рисунок 4.5 Симуляция минимального выходного напряжения с усилителя U3, U6 .....	18
Рисунок 4.6 Симуляция максимального выходного напряжения с усилителя U3, U6....	19
Рисунок 4.7 Симуляция минимального выходного напряжения с усилителя U3, U6 .....	19
Рисунок 4.8 Симуляция максимального выходного напряжения с дифференциального усилителя U7 .....	20
Рисунок 4.9 Симуляция минимального выходного напряжения с дифференциального усилителя U7 .....	21
Рисунок 4.10 Симуляция выходного напряжения с триггера Шмитта U8.....	22
Рисунок 5.1 Плата со стороны компонентов.....	23
Рисунок 5.2 Плата со стороны дорожек .....	24
Рисунок 5.3 Отверстия в плате .....	25
Рисунок 5.4 Наименование компонентов на плате.....	26
Рисунок 5.5 Общий вид платы.....	27

## **Введение**

Основная часть пользователей нейроинтерфейсов — люди с ограниченными возможностями, таких причин как параличи, врождённые недостатки или полученные травмы. [1]

Как устройство, нейроинтерфейс позволяет пользователю управлять внешним устройством напрямую при помощи мозга, минуя органы чувств и конечности, тем самым позволяя людям более активно участвовать в жизни общества, несмотря на их физические ограничения. Одна из наиболее важных областей разработки и применения нейроинтерфеса это нейропротезирование. Имея достаточно развитый нейроинтерфейс появляется возможность не только применять протез конечностей как полноценную замену природным конечностям, так и восстановить чувствительность различных органов чувств, таких как слух и зрение. [1]

Основная техническая проблема нейроинтерфейсов — это получение чёткого сигнала, который можно использовать для управления внешним устройством. Относительная слабость сигналов нейронов, сильные источники шумов в окружающей среде и теле человека, плохая пропускная способность черепа являются основными причинами сложностей. [1]

Для успешной разработки требуется решить проблему с получением достаточно сильного сигнала для передачи на управляемое устройство и предотвращение его искажения внешними и внутренними источниками шумов.

Данная работа посвящена разработке двухканального нейроинтерфейса.

# 1. Краткое описание работы нейроинтерфейса

## 1.1.1 Электроэнцефалография

Электроэнцефалограмма представляет из себя измерение интенсивности электрической активности головного мозга. Измерение происходит благодаря закреплённым электродам на голове пациента.

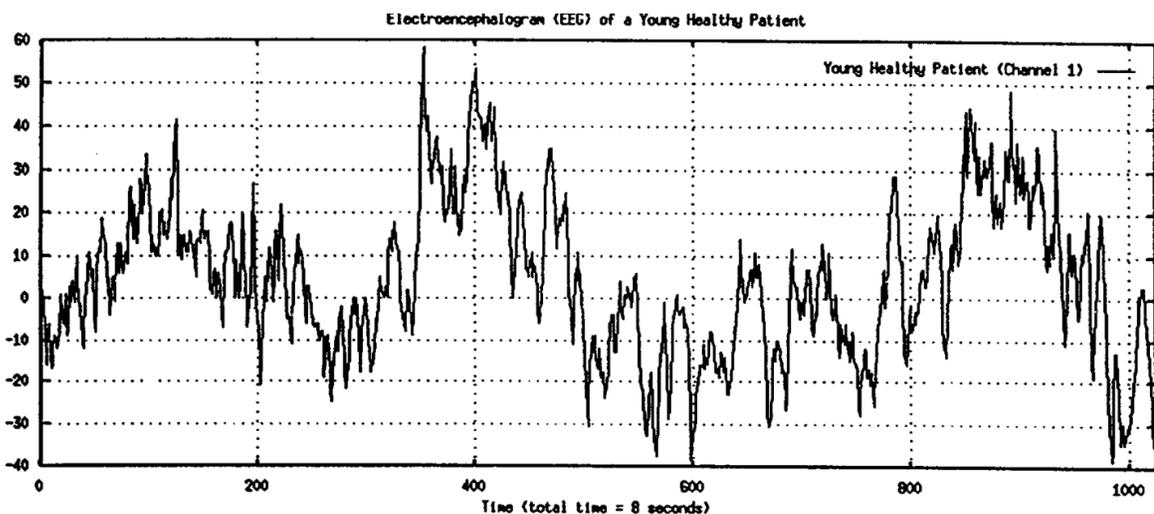


Рисунок 1.1 Пример электроэнцефалограммы головного мозга человека

Для выявления интересных частей применяется выделение по частоте. В зависимости от частоты и места обнаружения сигнала различают различные ритмы мозговой активности, такие как альфа-, бета-, дельта-, гамма-ритмы.

## 1.1.2 Мю-ритм

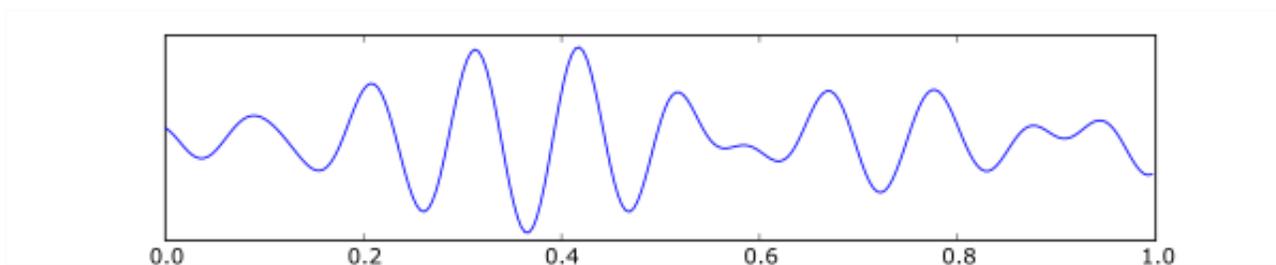


Рисунок 1.2 Пример мю-ритма человека

Мю-ритм представляет из себя электронный сигнал в полосе частот от 8 до 13 Гц, с минимальной амплитудой в 50 мкВ и максимальной в 100 мкВ, характерный для области мозга, отвечающей за сознательные движения. [2]

Большинство коммерческих нейроинтерфейсов базируются на анализе мю- и альфа-ритмов из-за простоты генерации сигнала с чётко отслеживаемой интенсивностью и возможностью его получения без хирургического вмешательства. Поскольку альфа- и мю-ритм отличаются только местоположением и причиной возникновения, это позволяет использовать их без сильного удорожания устройства. В таких случаях альфа-ритм играет роль переключателя, когда мю-ритмы исполняют командные функции. [3]

Из-за независимости полушарий при генерации мю-ритма, можно добиться сознательного получения мю-ритма в нужном полушарии и с нужной интенсивностью. В электронике такое присутствие или исчезновение каждого мю-ритма может быть преобразовано в состояние «включено/выключено», которое может быть использовано для управления компьютером.

### 1.1.3 Принцип работы нейроинтерфейса

Нейроинтерфейс соединяет центральную нервную систему с каким-либо внешним устройством. Они применяются для восстановления утраченного слуха, зрения, двигательных функций или возможности общения. Также они позволяют получить более быстрый метод управления каким-то внешним устройством. [1]

Нейроинтерфейсы можно разделить на три группы:

- 1) Инвазийные — устройство соединено напрямую с серым веществом.
- 2) Частично инвазийные — устройство размещено внутри черепа, но находится вне серого вещества.
- 3) Не инвазийные — устройство размещено вне черепа. [1] Устройство, разрабатываемое в этой работе, входит в данную категорию.

Научные и/или медицинские нейроинтерфейсы обычно подключаются к нейронам напрямую, так как это обеспечивает большую чёткость сигнала и меньшие шумы.

## 1.2 Техническое задание

В данной работе необходимо разработать двухканальный нейроинтерфейс, использующий мю-ритм для управления внешним устройством.

Исходя из этого, входной сигнал является синусоидальным с частотой в 10 Гц, с минимальной амплитудой в 50 мкВ и максимальной в 100 мкВ. Из него требуется получить цифровой выходной сигнал со значением +/- 5 В. Необходимо обеспечить чёткое различие между положительным и отрицательным выходным сигналом схемы и уменьшить возможные помехи от сети.

## 2. Разработка структурной схемы устройства

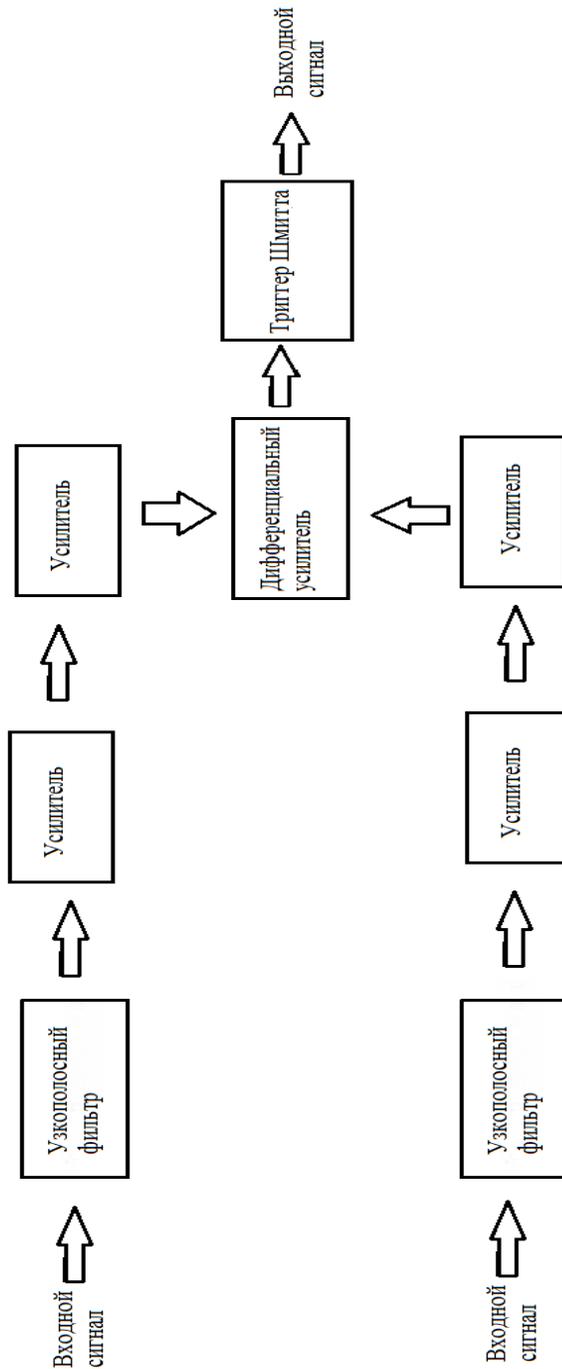


Рисунок 2.1 Структурная схема регистратора

Устройство включает в себя два полностью идентичных канала, состоящих из фильтра и усилителей. Фильтр является узкополосным для отсеивания шумов, последовательно включённые усилители позволяют получить более сильный сигнал. Выходные сигналы с обоих каналов поступают на дифференциальный усилитель, где делается вычитание их амплитуд. После этого сигнал поступает на триггер Шмитта, где и происходит формирование окончательного выходного сигнала схемы.

### 3. Разработка электронной схемы устройства

Электронная схема устройства демонстрируется на рисунке 3.1

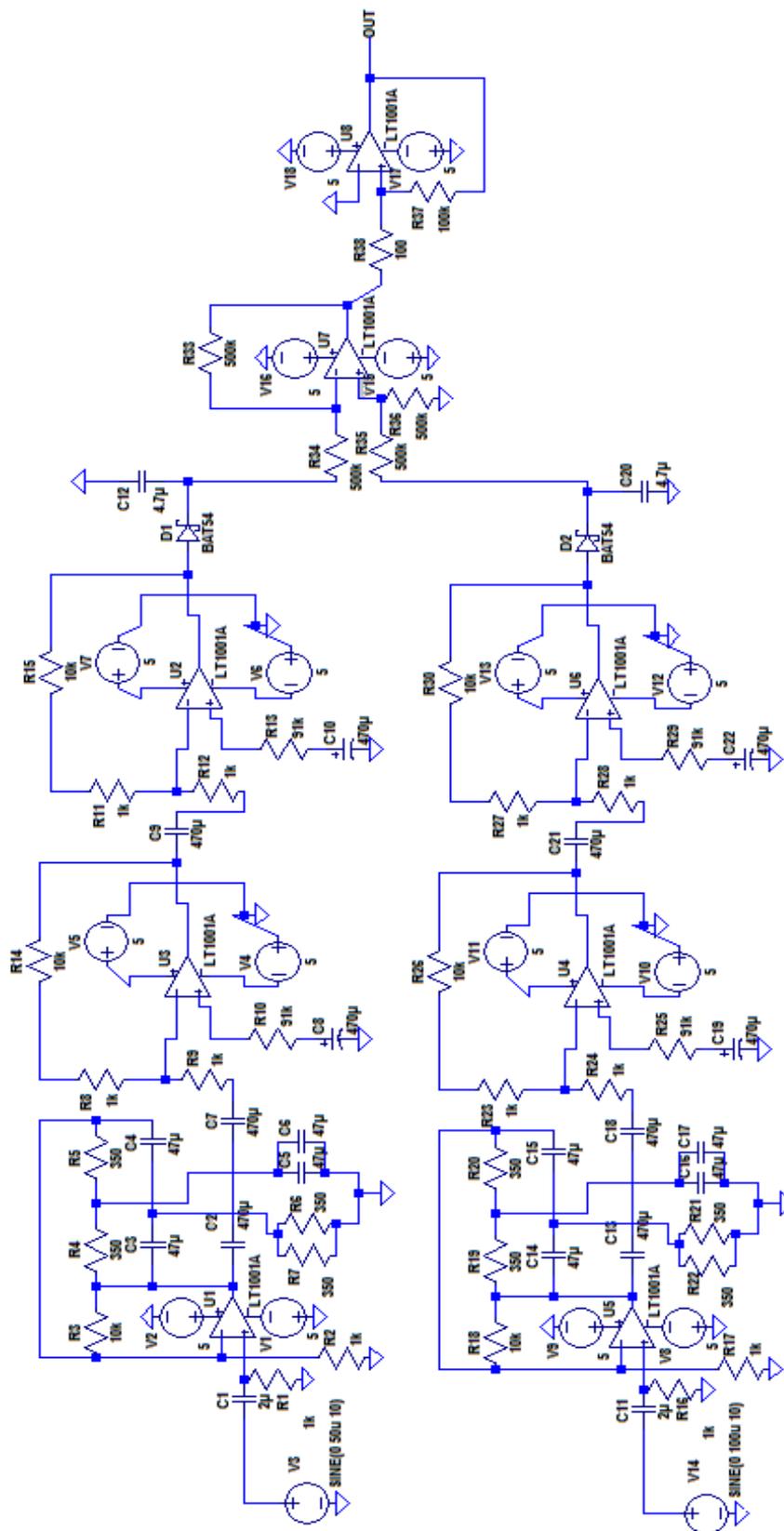


Рисунок 3.1 Схема устройства

Фильтр является узкополосным на базе двойного Т-образного моста. После фильтрации сигнал поступает на два последовательно соединённых инвентирующих усилителя. Это необходимо для получения положительного сигнала после выпрямления. Для выпрямления после усиления используется диод Шотки, по одному на каждый канал. После выпрямления сигналы поступают на дифференциальный усилитель. Поскольку сигналы с обоих каналов положительны, а один из входов дифференциального усилителя инвентирующий, происходит вычитание и сигнал с наибольшей амплитудой определяет полярность выхода дифференциального усилителя. Таким образом определяется в каком полушарии мозга активность наибольшая. Для получения выхода схемы, сигнал после дифференциального усилителя поступает на триггер Шмитта, который в зависимости от полярности и амплитуды входного сигнала выдаёт дискретный сигнал

### 3.1 Расчёты схемы

#### 3.1.1 Расчёты триггера Шмитта (U8)

Поскольку выходное напряжение схемы определено заданием, то нужно определить необходимый вход триггера Шмитта для переключения.

Переключение триггера происходит при

$$V_{in} = -R1/R2 \times V_s$$

При  $R1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R2 = 100 \text{ кОм}$  и  $V_s = 5 \text{ В}$

$$V_{in} = +/-100/10^5 \times 5 = +/-5 \text{ мВ}$$

$$K_{um} = 1 + 10^5/100$$

$$K_{um} = 1001$$

$$V_{out} = V_{in} \times K_{um}$$

$$V_{out} = +/- 5 \text{ В}$$

### 3.2 Расчёты фильтров (U1, U4)

Усиление по напряжению

$$K_{um} = 1 + 10^3/1000$$

$$K_{um} = 11$$

$$V_{out} = V_{in} \times K_{um}$$

При максимальном  $V_{in} = 100 \text{ мкВ}$

$$V_{out} = 100 \times 10^{-6} \times 11$$

$$V_{out} = 1,1 \text{ мВ}$$

При минимальном  $V_{in} = 50 \text{ мкВ}$

$$V_{out} = 50 \times 10^{-6} \times 11$$

$$V_{out} = 0,55 \text{ мВ}$$

Частота квазирезонанса узкополосного фильтра

Частота квазирезонанса фильтра должна равняться 10 Гц при использовании конденсатора ёмкостью в 47 микроФ, которые были выбраны из расчёта на небольшое сопротивление резисторов.

$$f_0 = 1/2\pi \times 1/RC$$

$$R = 339 \text{ Ом}$$

### 3.3 Расчёты усилителей (U3, U6)

Усиление по напряжению

$$K_{um} = 1 + 10^3/1000$$

$$K_{um} = 11$$

$$V_{out} = V_{in} \times K_{um}$$

При максимальном  $V_{in} = 1,1 \text{ мВ}$

$$V_{out} = 1,1 \times 10^{-3} \times 11$$

$$V_{out} = 12,1 \text{ мВ}$$

При минимальном  $V_{in} = 0,55 \text{ мВ}$

$$V_{out} = 0,55 \times 10^{-3} \times 11$$

$$V_{out} = 6,05 \text{ mV}$$

### 3.4 Расчёты усилителей (U2, U5)

Усиление по напряжению

$$K_{um} = 1 + 10^3/1000$$

$$K_{um} = 11$$

$$V_{out} = V_{in} \times K_{um}$$

При максимальном  $V_{in} = 12,1 \text{ мВ}$

$$V_{out} = 12,1 \times 10^{-3} \times 11$$

$$V_{out} = 130 \text{ мВ}$$

При минимальном  $V_{in} = 6,05 \text{ мВ}$

$$V_{out} = 6,05 \times 10^{-6} \times 11$$

$$V_{out} = 67 \text{ мВ}$$

	Усилители U3, U6	Усилители (U2, U5)
$K_{um}$	11	
При максимальных значениях		
$V_{in}$	1,1 мВ	12,1 мВ
$V_{out}$	12,1 мВ	130 мВ
При минимальных значениях		
$V_{in}$	0,55 мВ	6,05 мВ
$V_{out}$	6,05 мВ	67 мВ

### 3.5 Расчёт дифференциального усилителя (U7)

$$V_{out} = +/-5\text{mV}$$

$$V_{out} = (V2-V1) \times R2/R1$$

Поскольку все резисторы, подключённые к U7, одинаковые, то

$$V_{out} = V2 - V1$$

При  $V1 = 130 \text{ мВ}$  и  $V2 = 67 \text{ мВ}$

$$V_{out} = 63 \text{ мВ}$$

Минимальная разница между входными напряжения (100 мкВ и 93 мкВ) на входах схемы, при которых происходит переключение триггера Шмитта:

$$V1 = 130 \text{ мВ}$$

$$V2 = 124 \text{ мВ}$$

$$V_{out} = 6 \text{ мВ}$$

#### 4. Симуляция схемы

Для симуляции схемы использовалась программа Ltspice IV. Эта программа была выбрана из-за своего бесплатного распространения. Симуляция проводится для контроля правильности расчётов и работоспособности схемы.

##### 4.1 Проверка расчётов фильтра (U1, U4)

Частота квазирезонанса фильтра должна равняться 10 Гц по условию задания:

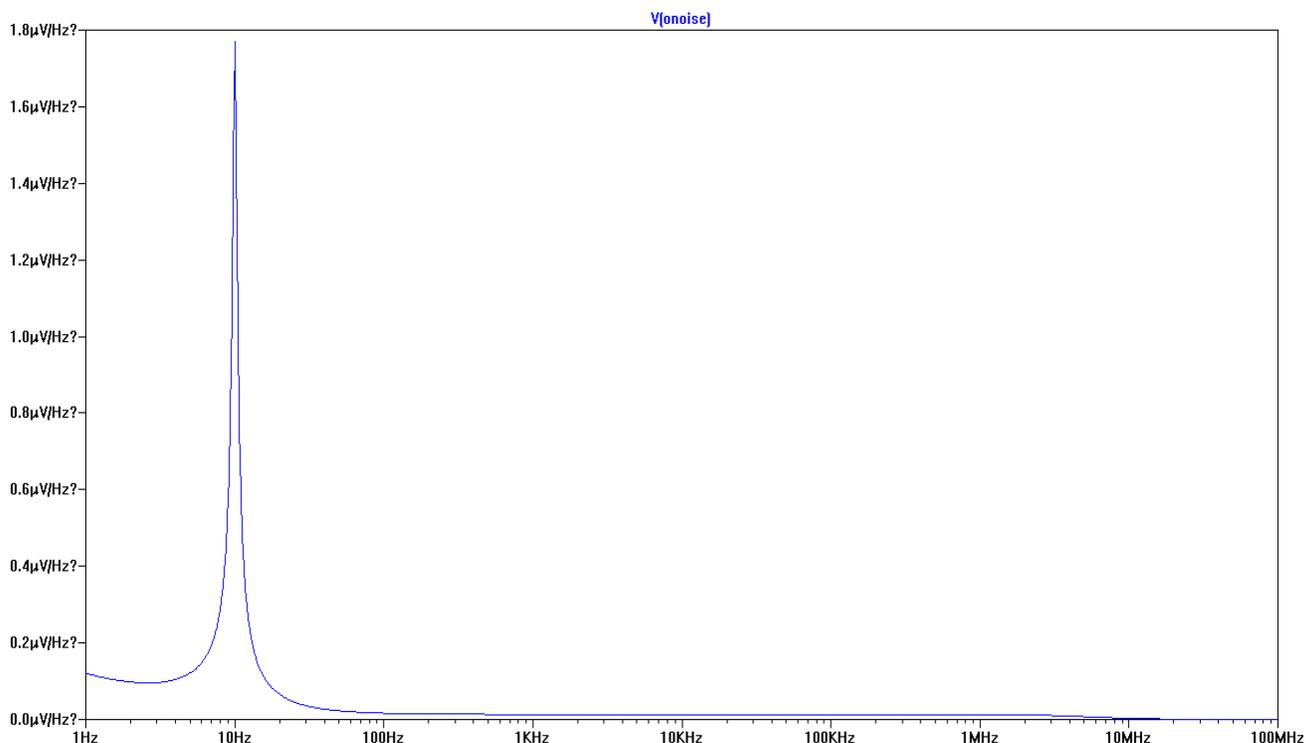
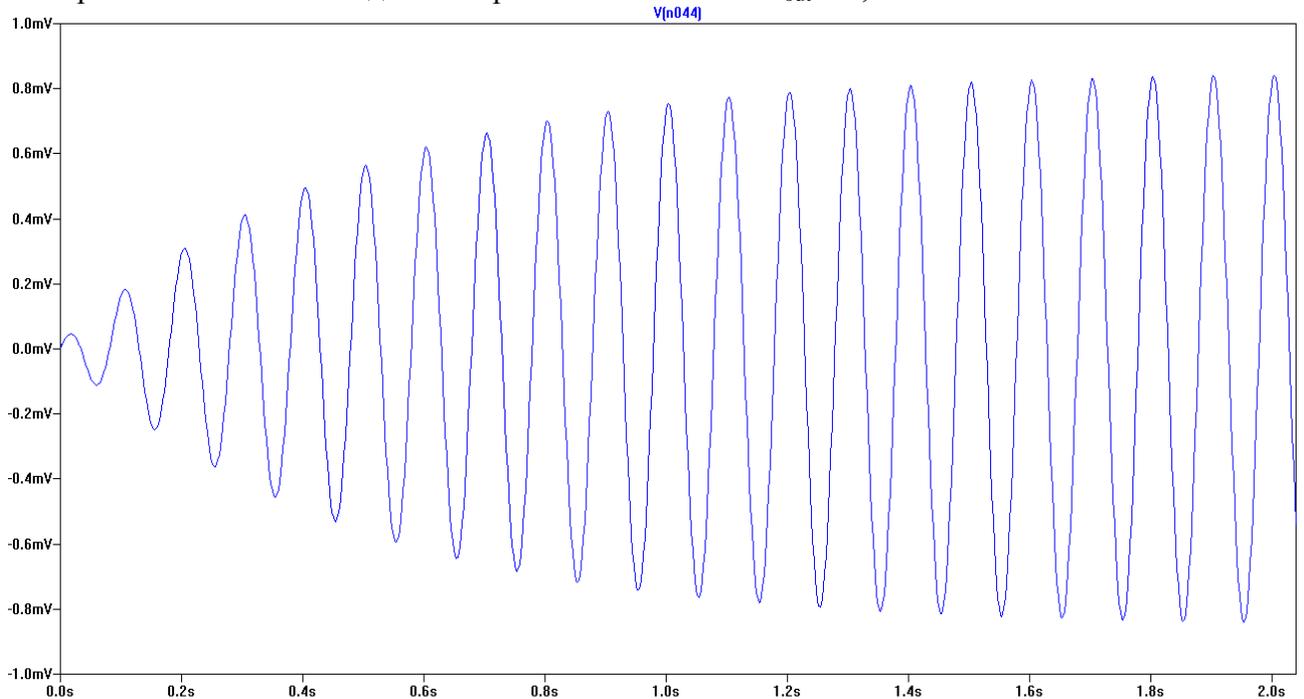


Рисунок 4.1 Симуляция амплитудно-частотной характеристики фильтра

По симуляции АЧХ фильтра (рисунок 4.1), можно увидеть, что наибольшее усиление достигается на частоте 10 Гц, что означает соответствие симуляции расчётам и задаче фильтра.

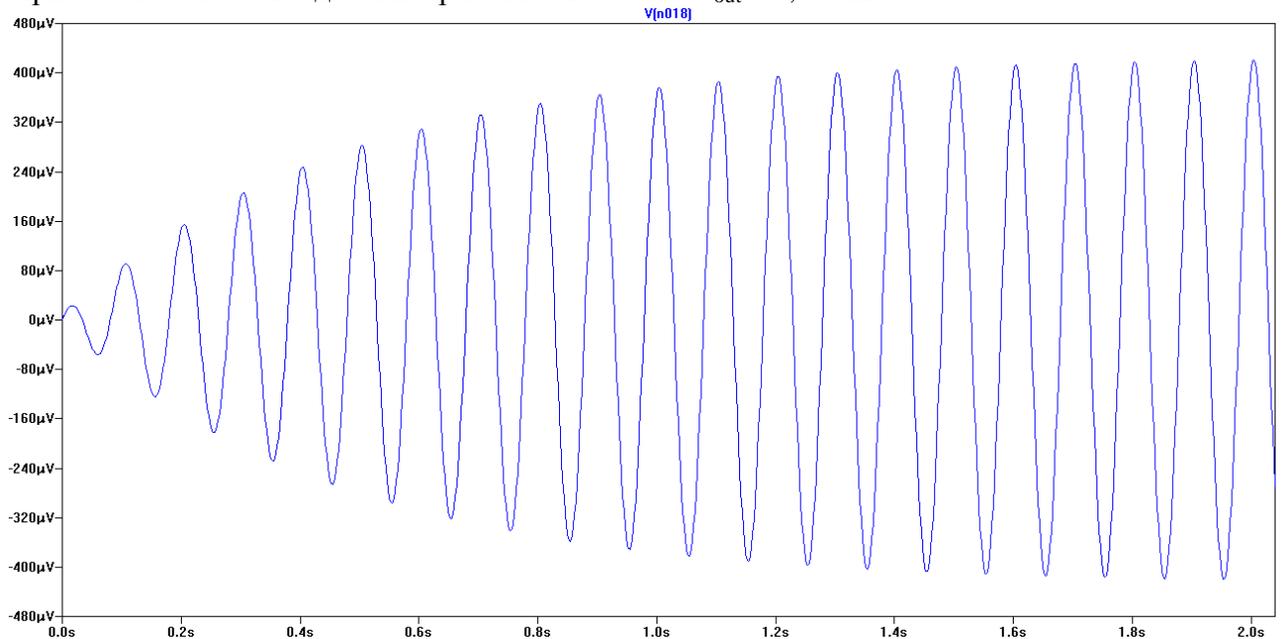
При максимальном входном напряжении в 100 мкВ  $V_{out} = 1,1$  мВ



**Рисунок 4.2** Симуляция максимального выходного напряжения с узкополосного фильтра U1, U4

По итогам симуляции (Рисунок 4.2)  $V_{out} = 0,85$  мВ, что немного ниже расчётных, но это ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов.

При минимальном входном напряжении в 50 мкВ  $V_{out} = 0,55$  мВ

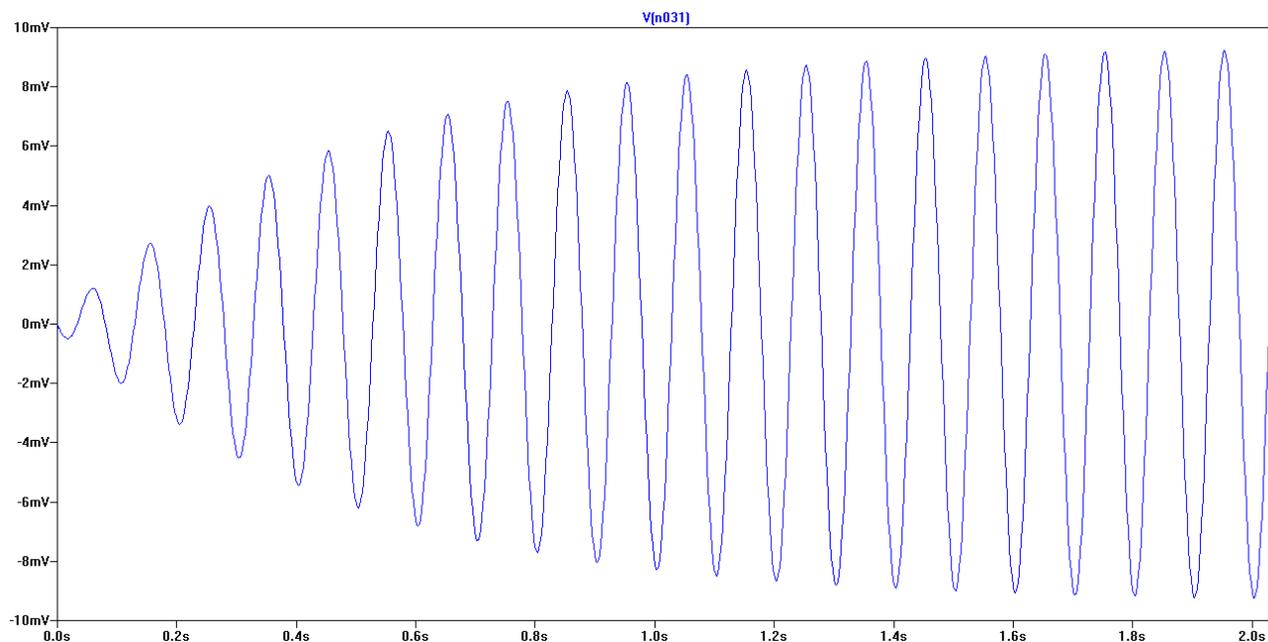


**Рисунок 4.3** Симуляция минимального выходного напряжения с усилителя U1, U4

По итогам симуляции (Рисунок 4.3)  $V_{out} = 0,43$  мВ, что немного ниже расчётных, но это ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов.

## 4.2 Проверка расчётов усилителей (U3, U6)

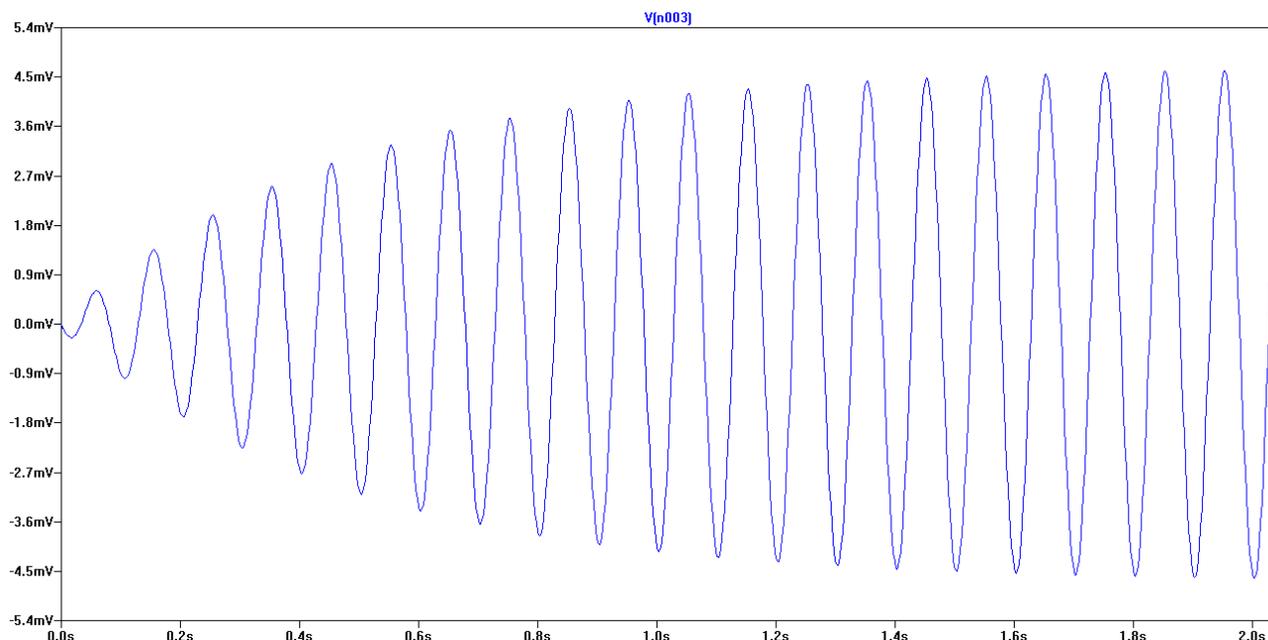
При максимальном входном напряжении в 1,1 мВ  $V_{out} = 12,1$  мВ



**Рисунок 4.4** Симуляция максимального выходного напряжения с усилителя U3, U6

По итогам симуляции (Рисунок 4.4)  $V_{out} = 9,4$  мВ, что немного ниже расчётных, но это ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов и меньшего входного напряжения, чем расчётное.

При минимальном входном напряжении в 0,55 мВ  $V_{out} = 6,05$  мВ

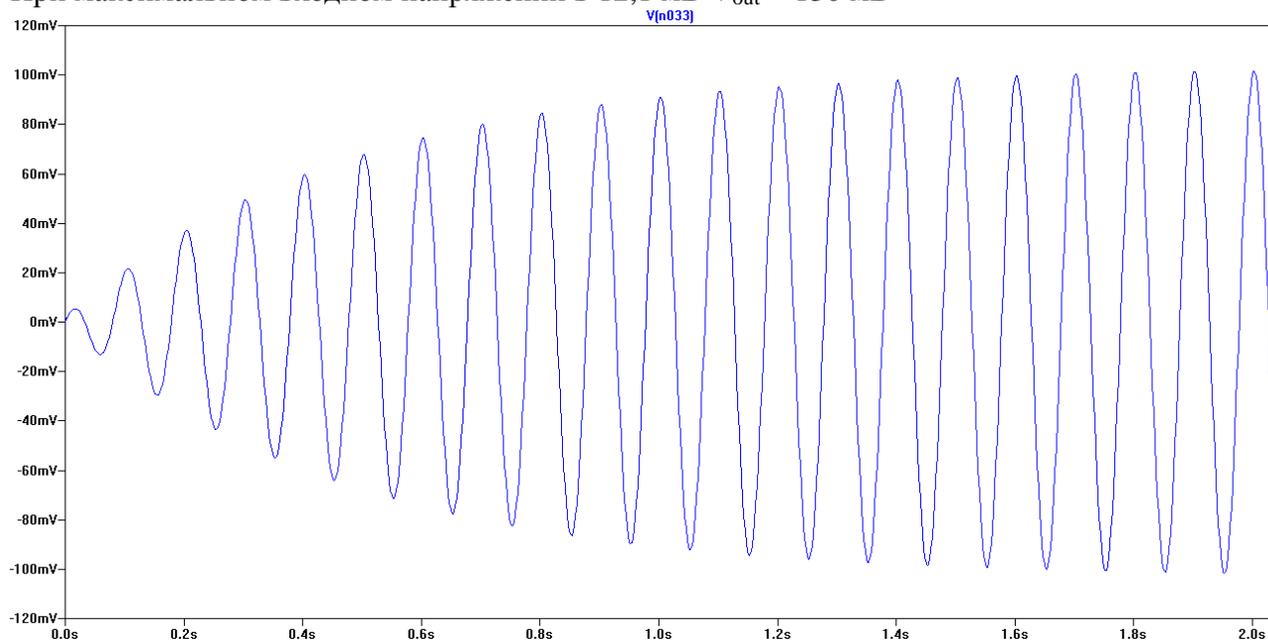


**Рисунок 4.5** Симуляция минимального выходного напряжения с усилителя U3, U6

По итогам симуляции (Рисунок 4.5)  $V_{out} = 5,4$  мВ, что немного ниже расчётных, но это ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов и меньшего входного напряжения, чем расчётное.

### 4.3 Проверка расчётов усилителей (U2, U5)

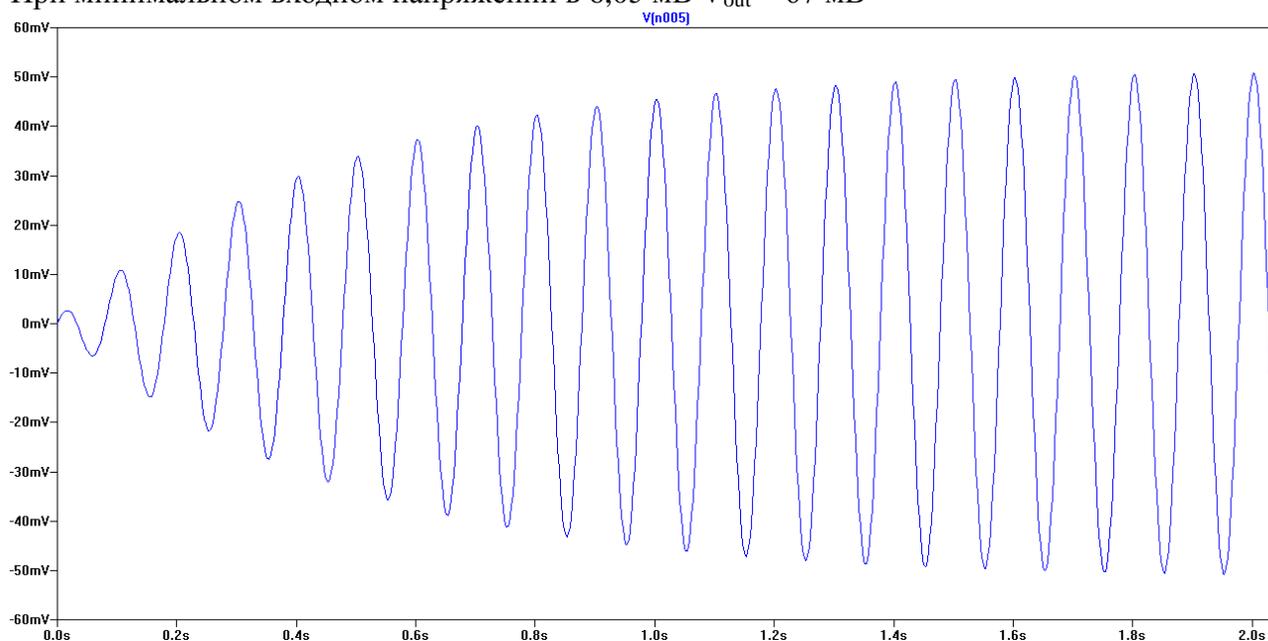
При максимальном входном напряжении в 12,1 мВ  $V_{out} = 130$  мВ



**Рисунок 4.6** Симуляция максимального выходного напряжения с усилителя U3, U6

По итогам симуляции (Рисунок 4.6)  $V_{out} = 102$  мВ, что немного ниже расчётных, но это ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов и меньшего входного напряжения, чем расчётное.

При минимальном входном напряжении в 6,05 мВ  $V_{out} = 67$  мВ

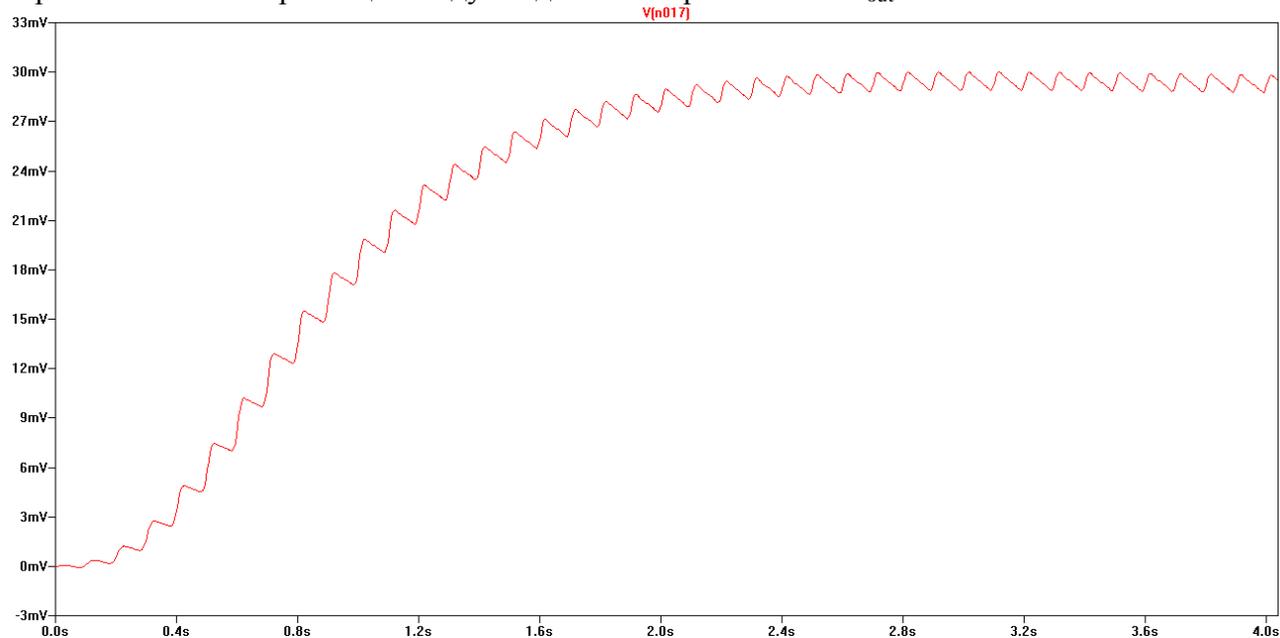


**Рисунок 4.7** Симуляция минимального выходного напряжения с усилителя U3, U6

По итогам симуляции (Рисунок 4.7)  $V_{out} = 50$  мВ, что немного ниже расчётных, но это ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов и меньшего входного напряжения, чем расчётное.

#### 4.4 Проверка расчётов дифференциального усилителя (U7)

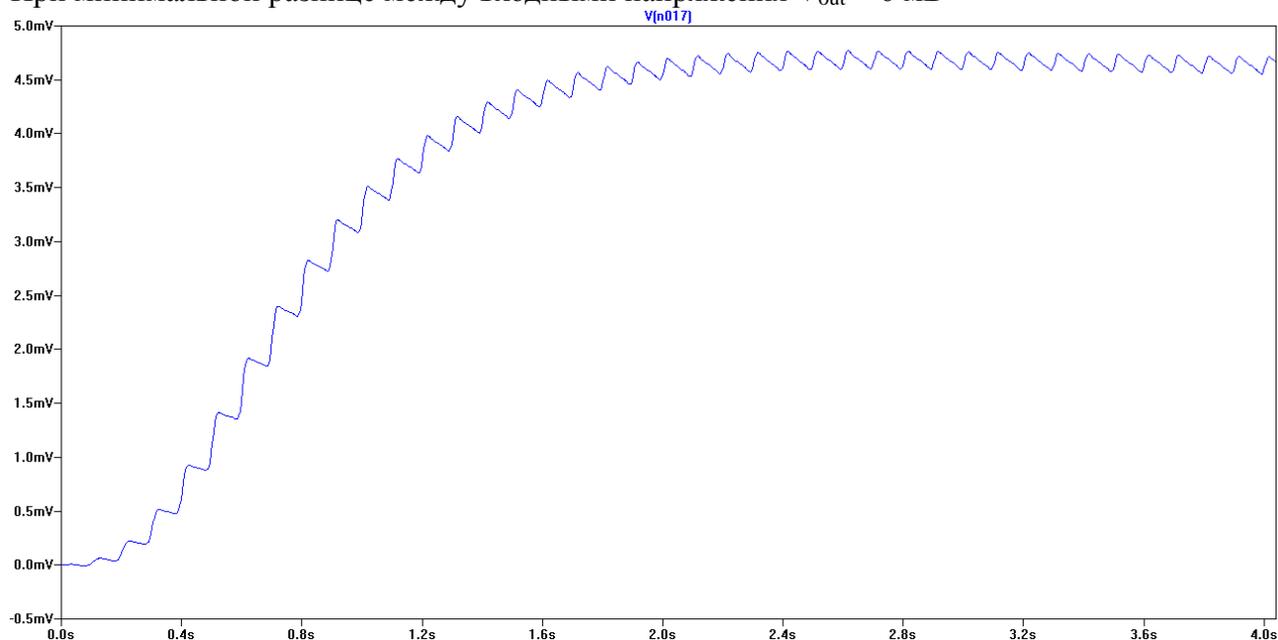
При максимальной разнице между входными напряжениями  $V_{out} = 63 \text{ мВ}$



**Рисунок 4.8** Симуляция максимального выходного напряжения с дифференциального усилителя U7

По итогам симуляции (Рисунок 4.8)  $V_{out} = 34 \text{ мВ}$ , что в половину ниже расчётных, но это ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов и меньшего входного напряжения, чем расчётное. Несмотря на это, это выше напряжения переключения триггера Шмитта, тем самым получен нужный результат.

При минимальной разнице между входными напряжения  $V_{out} = 6 \text{ мВ}$

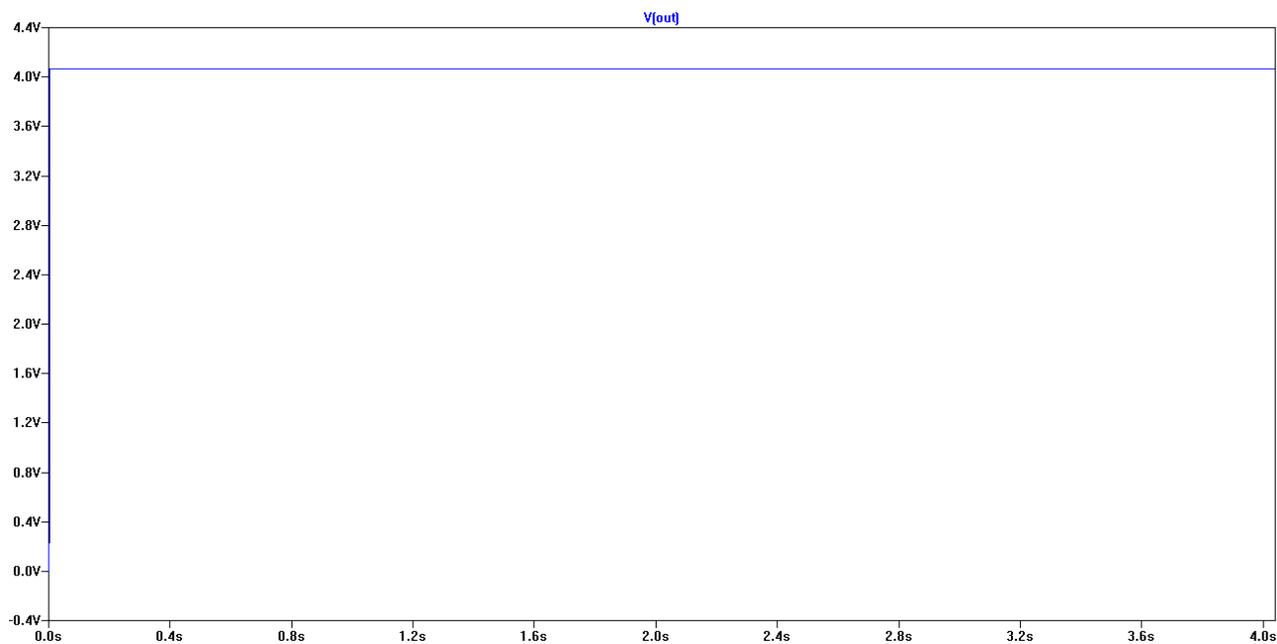


**Рисунок 4.9** Симуляция минимального выходного напряжения с дифференциального усилителя U7

По итогам симуляции (Рисунок 4.9)  $V_{out} = 4.77 \text{ мВ}$ , что немного ниже расчётных, но ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов и меньшего входного напряжения, чем расчётное. Поскольку триггер Шмитта переключается только при входном напряжении  $= \pm 5 \text{ мВ}$ , то для его переключения минимальная разница входных напряжений схемы должна быть больше, чем  $7 \text{ мкВ}$ .

## 4.5 Проверка расчётов триггера Шмитта (U8)

Выходное напряжение триггера Шмитта должно равняться +/- 5 В



**Рисунок 4.10** Симуляция выходного напряжения с триггера Шмитта U8

По итогам симуляции (Рисунок 4.10)  $V_{out} = 4.05$  В, что немного ниже расчётных, но ожидаемо из-за использования неидеальных компонентов и меньшего входного напряжения, чем расчётное.

Поскольку выходной сигнал триггера Шмитта чётко различим,  $V_{out} = +/- 4.05$  В, то можно считать разработку платы успешно выполненной.

## 5. Печатная плата

В этой части находится информация о печатной плате устройства. Для создания платы использовалась программа Eagle 6.1. Эта программа была выбрана из-за ознакомления с ней в ходе университетского обучения. Плата сделана с использованием только SMD компонентов.

Размеры печатной платы: 53 мм на 56 мм, ширина дорожек 0.254 мм, диаметр крепёжных отверстий 1.7 мм, диаметр VIA 0.6 мм

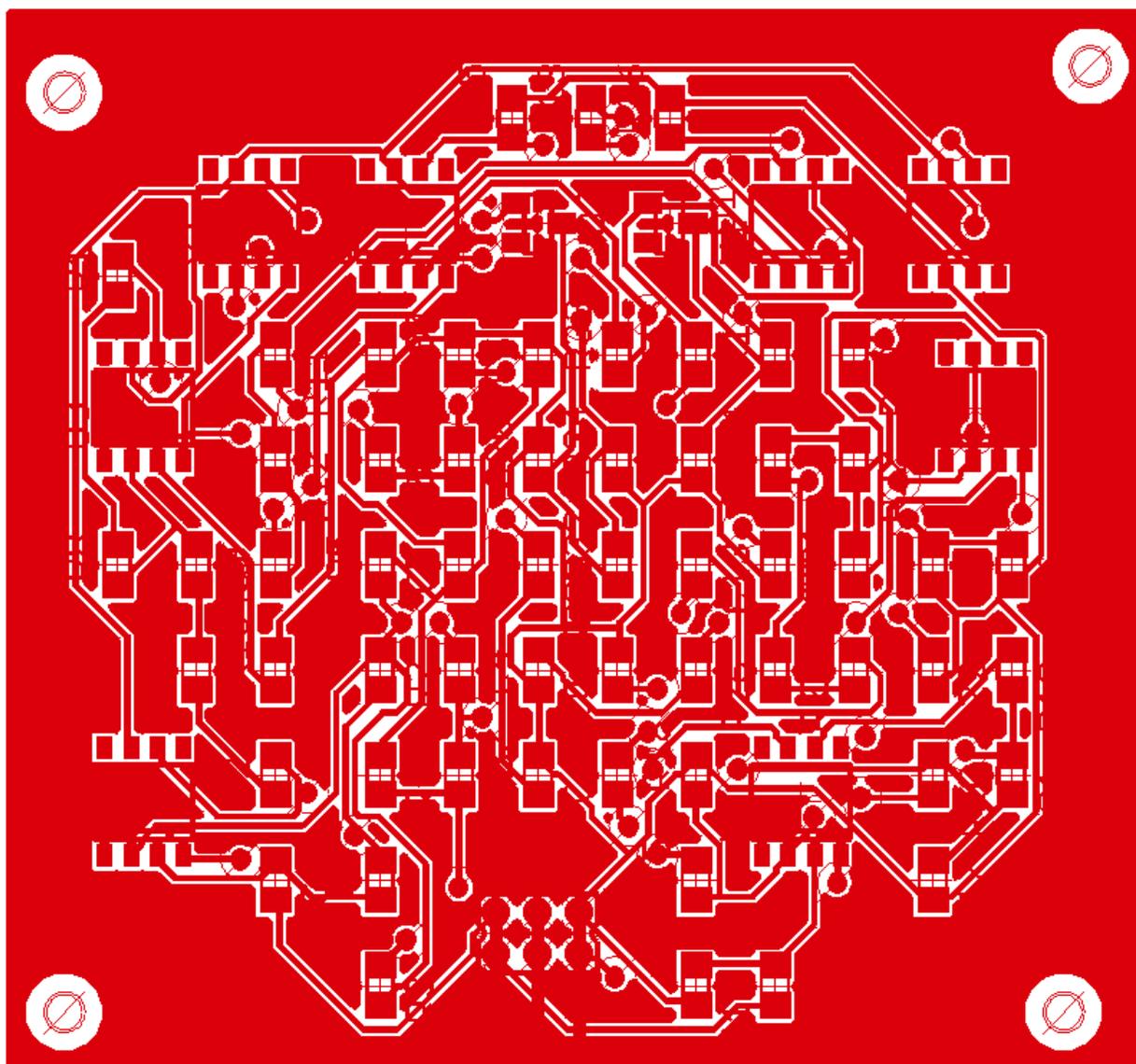
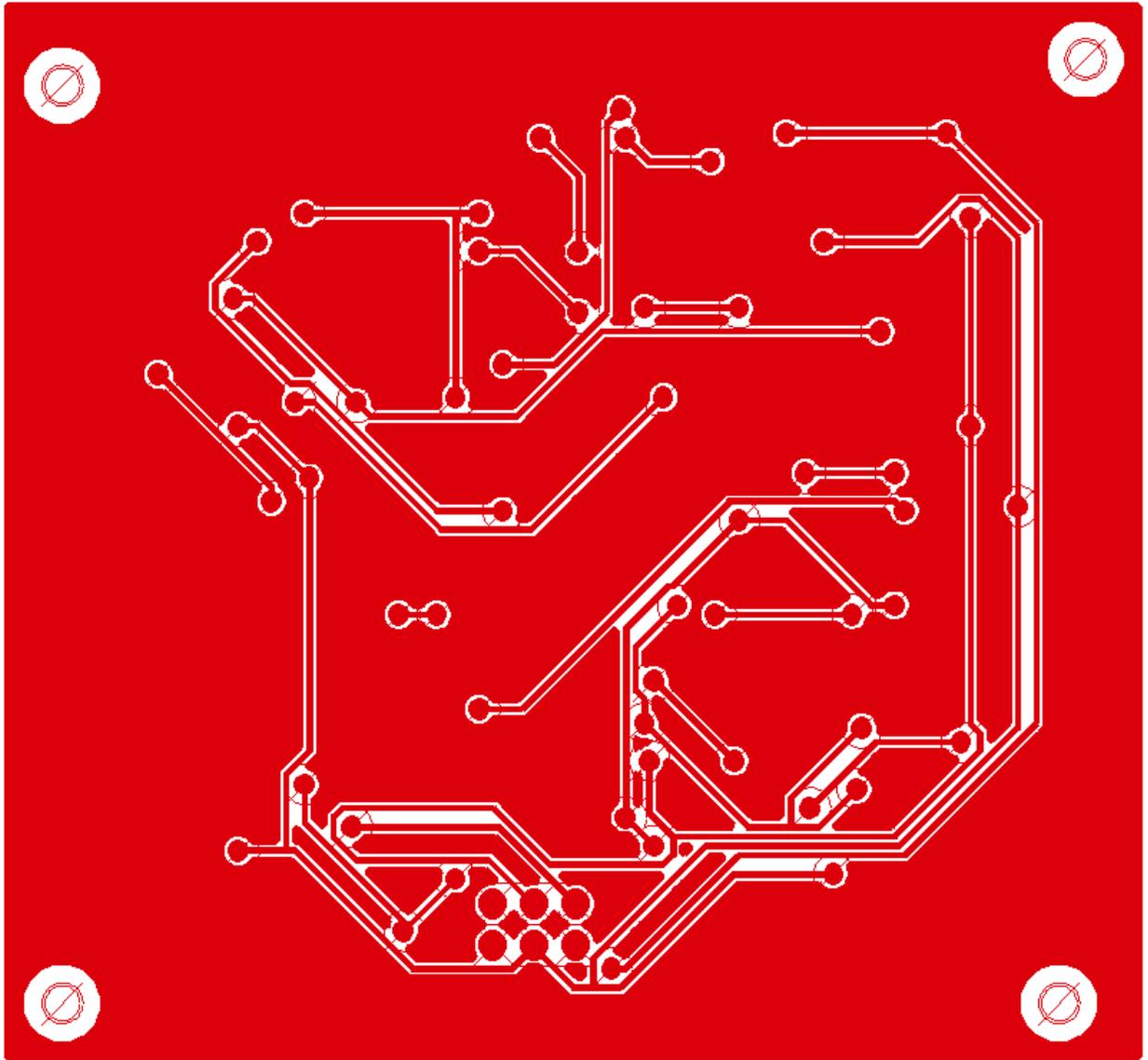
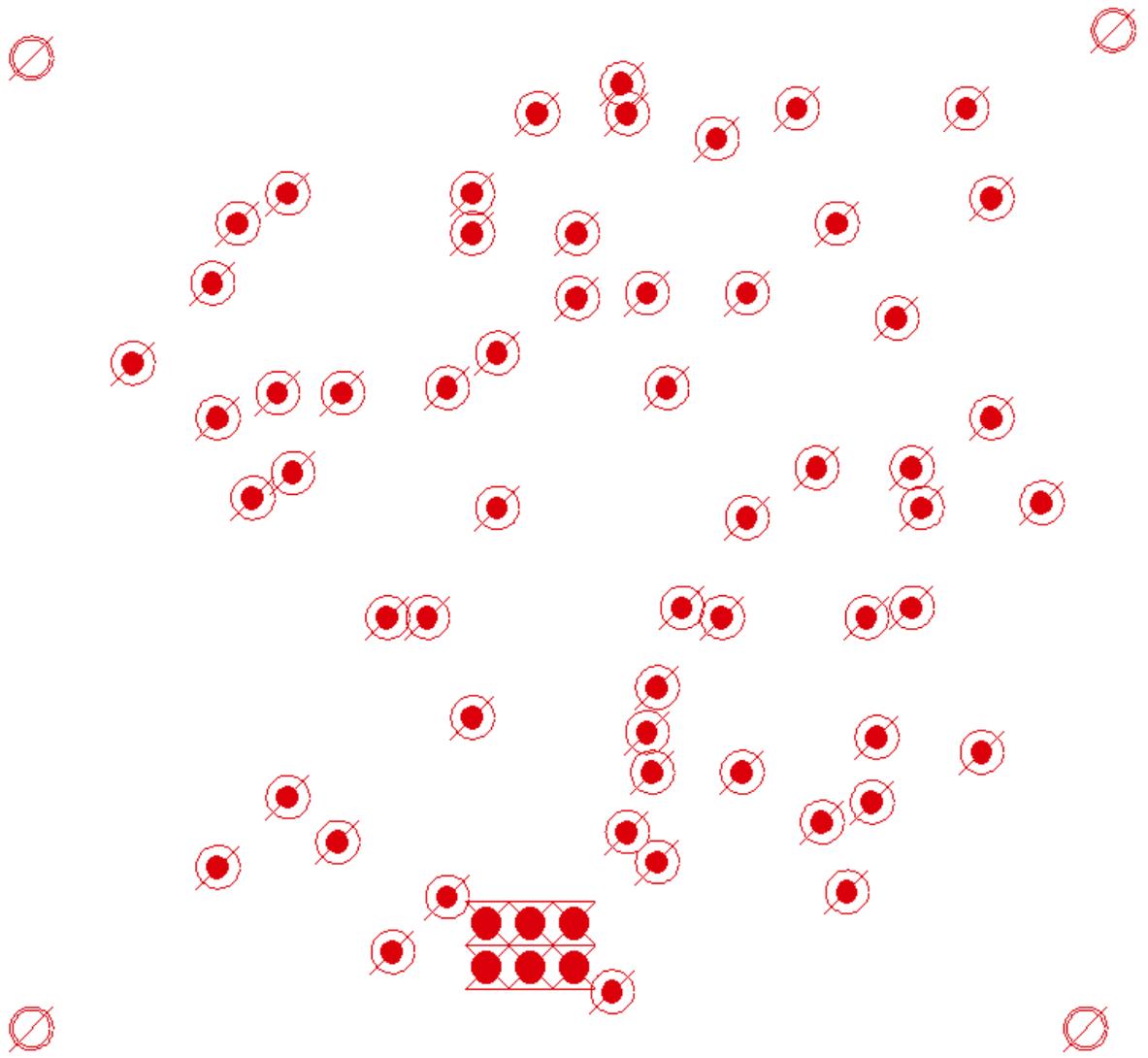


Рисунок 5.1 Плата со стороны компонентов



**Рисунок 5.2 Плата со стороны дорожек**



**Рисунок 5.3** Отверстия в плате

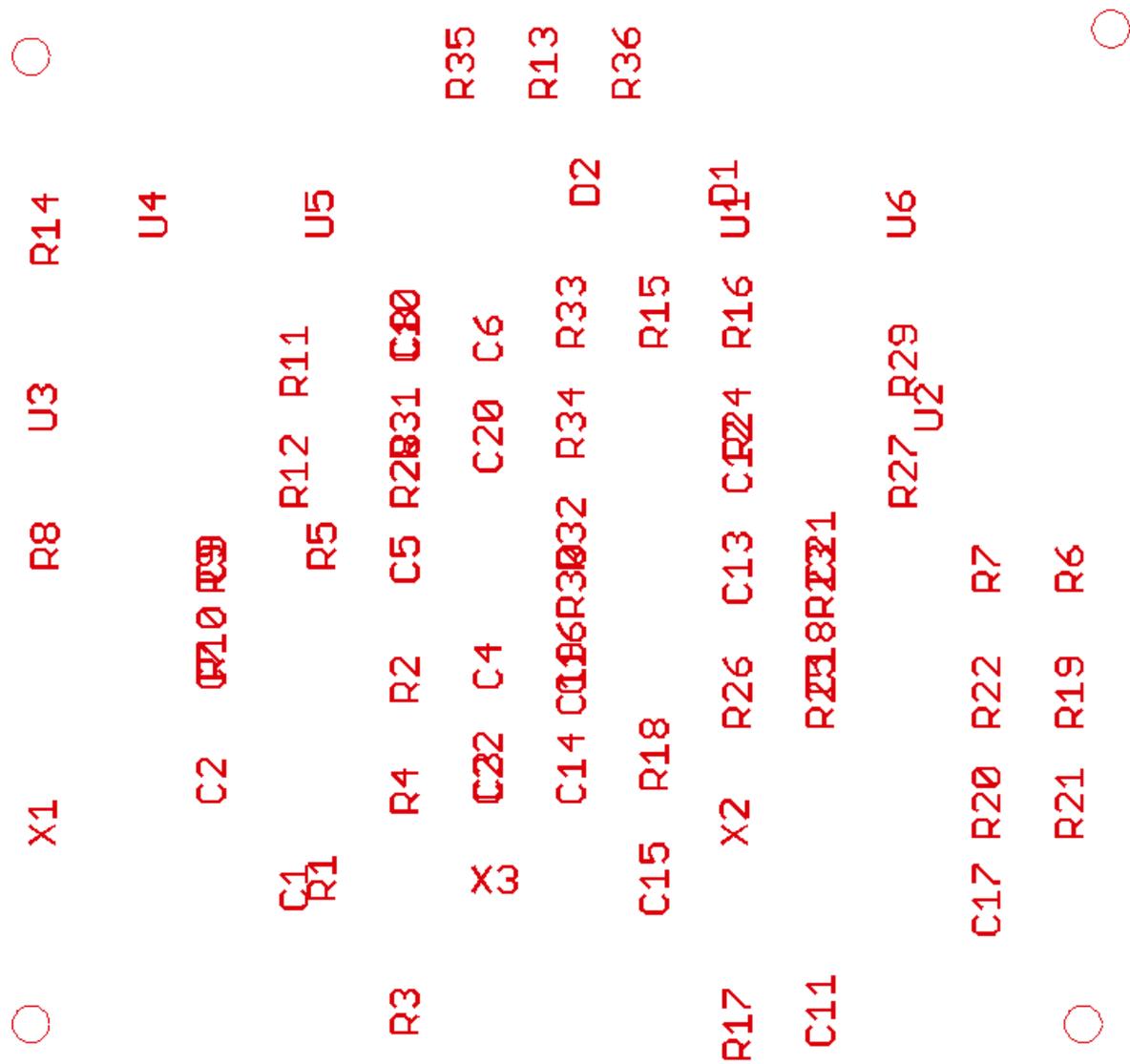
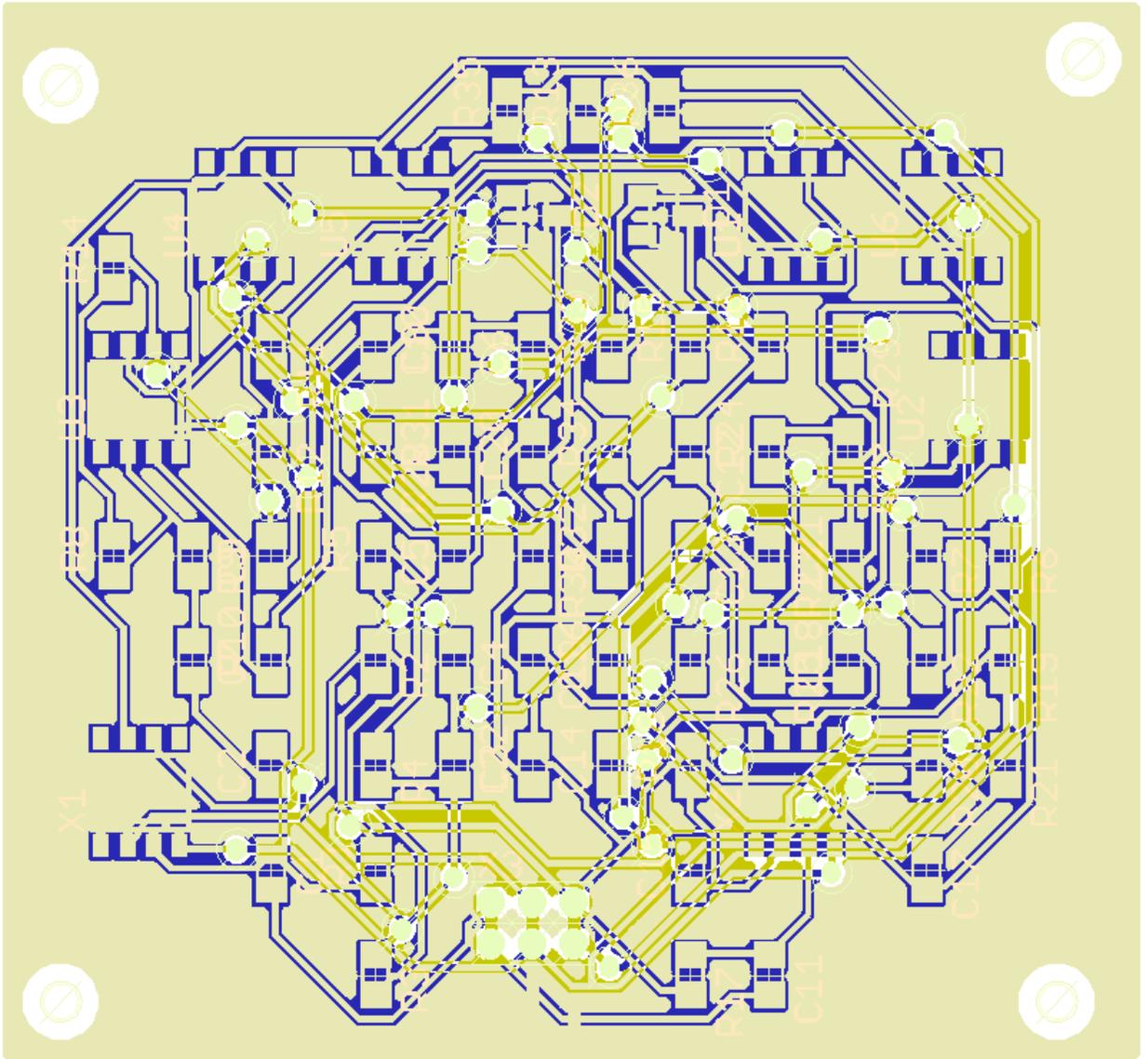


Рисунок 5.4 Наименование компонентов на плате



**Рисунок 5.5** Общий вид платы

## 6. Экономическая часть

Поскольку серийное производство устройства не планируется, считаю возможным ограничиться только учётом затрат на приобретение электронных компонентов. Стоимость проверялась в интернет магазине Oomipood.ee (25.05)

Наименование	Количество	Стоимость 1 шт в евро
Резистор 100 Ом	1	0.05
Резистор 350 Ом	8	0.05
Резистор 1 кОм	12	0.05
Резистор 10 кОм	6	0.05
Резистор 91 кОм	4	0.05
Резистор 0,1 МОм	1	0.05
Резистор 0,5 МОм	4	0.05
Конденсатор 2μФ	2	0.1
Конденсатор 4.7μФ	2	0.1
Конденсатор 47μФ	8	0.1
Конденсатор 470μФ	10	0.1
Диод Шотки, СМД	2	0.12
ОУ LT1001A	8	12.1

Общая стоимость покупаемых деталей —101.2 евро.

## 7. Заключение

Целью данной бакалаврской работы было разработать двухканальной нейроинтерфейс, использующего мю-ритм для управления внешним устройством.

Для этого требовалось из входного синусоидального сигнала с частотой в 10 Гц, с минимальной амплитудой в 50 мкВ и максимальной в 100 мкВ получить цифровой выход сигнал со значением +/- 5 В.

Это было достигнуто благодаря использованию триггера Шмитта для дискретизации выходного сигнала.

В работу включены: структурная и электронная схема устройства, связанные с электронной схемой математические расчёты и их симуляция, а также печатная плата устройства и экономическая часть.

В ходе симуляции электронной схемы выяснилось, что выходные напряжения ОУ ниже расчётных, но на общее функционирование схемы это не сказалось.

В заключении хотелось бы отметить возможное добавление дополнительных каналов для схемы для увеличения количества доступных команд, передаваемых разработанным устройством.

Одной из первых явных модификаций стоит добавления канала для получения альфа-ритма, который можно использовать как переключатель, таким образом количество команд будет удвоено.

## **Ссылки**

[1] - [http://en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer\\_interface](http://en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer_interface) (30.05)

[2] - <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%8E-%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC> (30.05)

[3] - <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC> (30.05)