

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Интеллектуальные энергетические системы  
(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Кварцевый генератор с изменяемой частотой

Обучающийся М.С. Холиков  
(Инициалы Фамилия) (личная подпись)

Руководитель к.т.н., доцент, А. В. Прядилов  
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант к.п.н., доцент, С.А. Гудкова  
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Аннотация

Объем 45 с., 23 рисунок, 2 табл., 31 источник

Кварцевый генератор, пьезоэлектрический двигатель.

Объект исследования: кварцевый генератор с изменяемой частотой.

Цель работы: разработка кварцевого генератора с изменяемой частотой.

Задачи работы:

1. Обзор состояния вопроса
2. Разработка структурной схемы устройства
3. Разработка электрической принципиальной схемы.
4. Расчет пьезоэлектрического двигателя
5. Разработка печатной платы и сборочного чертежа блока питания
6. Разработку печатной платы и сборочного чертежа усилителя

Данные задачи решены в 4 главах работы.

Степень внедрения: теоретически рассчитаны параметры системы, разработаны схемы и выбраны элементы, разработаны печатные платы и сборочные чертежи.

Для разработки печатной платы использовался пакет Sprint Layout. Для оформления чертежей Visio 2003 и КОМПАС-3D V13. Математические расчеты были проведены с использованием математического программного пакета MatchCad.

В процессе работы была создана принципиальная схема кварцевого резонатора, разработаны и трассированы схемы блока управления напряжением питания пьезоэлектрического двигателя и усилителя мощности выходной частоты кварцевого генератора, а так же рассчитана конструкция устройства.

## **Abstract**

The title of the bachelor's thesis is «Quartz oscillator with variable frequency».

The bachelor's thesis consists of an introduction, 4 parts, a conclusion, 23 picture, 2 tables, list of references including 5 foreign sources and the graphic part on 6 A1 sheets.

The object of research is quartz oscillator with variable frequency.

The aim of the bachelor's thesis is to develop of a quartz oscillator with variable frequency.

We start with the statement of the problem and then logically pass over to its possible solutions. We then analyze the literature concerning our problem.

We give a review of possible solutions and choose the most suitable ones, develop an electrical circuit diagram, carry out theoretical calculations and select elements.

The key issue of the bachelor's thesis is the possibility to adjust the frequency created

In conclusion we'd like to stress that the system parameters have been theoretically calculated, a circuit has been developed, elements have been selected and printed circuit boards have been developed.

This work is of interest to developers of quartz oscillators with variable frequency and other readers involved in electronics.

The field of application of the developed system is generators with variable frequency.

Nevertheless, more experimental data are required.

## Перечень сокращений и обозначений

БУНП – блок управления напряжением питания пьезоэлектрического двигателя

ИН – источник напряжения

ИО – исполнительный орган пьезоэлектрического двигателя

КГ – кварцевый генератор

КП – кварцевая пластина

КР – кварцевый резонатор

КП – кольцевая проточка

КЭ – компенсирующий элемент

ЛПД – пьезоэлектрический двигатель линейных перемещений

М. – микроклимат

ПД – пьезоэлектрический двигатель

ПП – пьезоэлектрическая пластина

ПЦ – пьезокерамический цилиндр

Пот. – потенциометр в схеме блока питания

РУ – регулятор упругости

Сх.У – схема усиления

СКЗ – средства коллективной защиты

СИЗ – средства индивидуальной защиты

ТД – термодатчик

ТС – тепловое состояние человека

ТЧХ – температурно-частотные характеристики

УЭ – управляющий электрод

УЭЛ - управляющий элемент

УТ – устройство термокомпенсации

УЗ – упругое звено

УКР – управляемый кварцевый резонатор

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты

ЦТС - цирконат-титанат свинца

ЭД – элемент давления

## Содержание

Введение.....	6
1 Состояние вопроса.....	7
1.1. Управляемые и частотно-модулированные кварцевые генераторы .....	7
1.2. Управления частотой кварцевых генераторов с помощью воздействия на кварцевый резонатор .....	10
1.3. Обзор патентной литературы .....	11
2. Разработка структурной схемы устройства. ....	14
3. Разработка электрической принципиальной схемы.....	19
3.1. Расчет кварцевого резонатора.....	19
3.2. Блок питания пьезодвигателя.....	25
3.3. Усилитель мощности выходной частоты кварцевого генератора.....	29
4. Конструктивная часть.....	32
4.1. Расчет пьезоэлектрического двигателя .....	32
4.2 Эскиз конструкции устройсва.....	34
4.3 Конструкция блока питания пьезодвигателя.....	37
4.4 Конструкция усилителя мощности выходной частоты .....	39
Заключение .....	42
Список используемой литературы .....	43

## Введение

«Базовыми элементами многих современных радиотехнических устройств, комплексов и систем являются генераторы гармонических колебаний. Основными требованиями, предъявляемыми к таким генераторам, являются все более жесткие требования по стабильности и эталонности частоты. В то же время в соответствии с тенденциями развития современной радиотехники и электроники генераторы должны иметь малые габариты и массу, быть высокочастотными, надежными, устойчивыми к механическим перегрузкам и вибрациям, технологичными в изготовлении,

Не менее важное значение для обеспечения надежности работы кварцевых резонаторов в аппаратуре имеют правильный выбор схемы и соблюдение условий и режимов применения, основанные на знании электрофизических свойств и особенностей работы резонаторов.

Наиболее широко в качестве источников стабильных высокочастотных колебаний в современных радиотехнических системах и устройствах используются кварцевые генераторы. Высокая стабильность частоты здесь обеспечивается большой добротностью (5000-2000000) и эталонностью применяемых в них кварцевых резонаторов.[8]

Применение кварцевых резонаторов позволяет получить сравнительно высокую стабильность частоты при простой конструкции возбудителей. Обычно кварцевые резонаторы используются на фиксированных частотах,, однако, в некоторых случаях (например, при непосредственной частотной модуляции кварцевых генераторов, при термокомпенсации частоты) производится в определенных пределах управление частотой кварцевых резонаторов.»[3,4,6,7]

# 1 Состояние вопроса

## 1.1. Управляемые и частотно-модулированные кварцевые генераторы

«Как известно из [5], относительное изменение частоты кварцевого резонатора (КР) при изменении реактивного сопротивления, включенного последовательно с резонатором:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2} m \frac{x_y \left\{ (1 - e_0)^2 - \frac{e_0}{x_{\Pi}} \left[ r - e_0 \left( 2 - \frac{1}{x_{\Pi}} \right) \right] \right\}}{1 - x_y \left\{ (1 - e_0) - \frac{1}{x_{\Pi}} \left[ r - e_0 \left( 2 - \frac{1}{x_{\Pi}} \right) \right] \right\}} \quad (1)$$

где  $x_y = \Delta X_y / |X_{co}|$  – приведенное к модулю сопротивления статической емкости резонатора изменение реактивного сопротивления, включенного последовательно с резонатором;

$x_{\Pi} = \Delta X_{\Pi} / |X_{co}|$  – приведенное к модулю сопротивления статической емкости резонатора реактивное сопротивление, параллельное резонатору.

Так, если перестраивать частоту предполагается изменением емкости конденсатора, то последовательно с ним необходимо включить катушку индуктивности с индуктивностью  $L = 1/\omega^2 C$ . Из (1) видно, что в общем случае зависимость  $\Delta f/f$  от  $x_y$  носит нелинейный характер. Зависимость на рисунке 1 приведена для случая работы генератора на частоте последовательного резонанса резонатора  $e_0 = 0$ , ниже (отрицательное значение  $e_0$ ) и выше (положительное значение  $e_0$ ) частоты последовательного резонанса резонатора (кривые 1, 2 и 3). Эта зависимость показана для  $X_{\Pi} = \infty$ , что характеризует собой отсутствие реактивного сопротивления, параллельного резонатору,  $m=4 \cdot 10^{-3}$  и  $C_0 = 5$  пФ»[2,5]

«При  $X_{\Pi} = \infty$  (1) преобразуется:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2}m \frac{x_y(1-e_0)^2}{1-x_y(1-e_0)}$$

Анализ (1) показывает, что зависимость  $\Delta f/f$  от  $X_y$  получается линейной лишь при:

$$(1-e_0) - \frac{1}{x_{\Pi}} = \left[ 1 - e_0 \left( 2 - \frac{1}{x_{\Pi}} \right) \right] = 0$$

т.е. при  $X_{\Pi} = 1$ . Это означает, что параллельно резонатору для обеспечения линейной зависимости  $\Delta f/f$  от  $X_y$  должна быть включена катушка с индуктивностью:

$$L_{\Pi} = 1/\omega^2 C \quad (2)$$

Когда параллельно резонатору включена катушка индуктивности (кривая 4) определенная из (2), (1) преобразуется:

$$\Delta f/f = -0,5m x_y \quad (3)$$

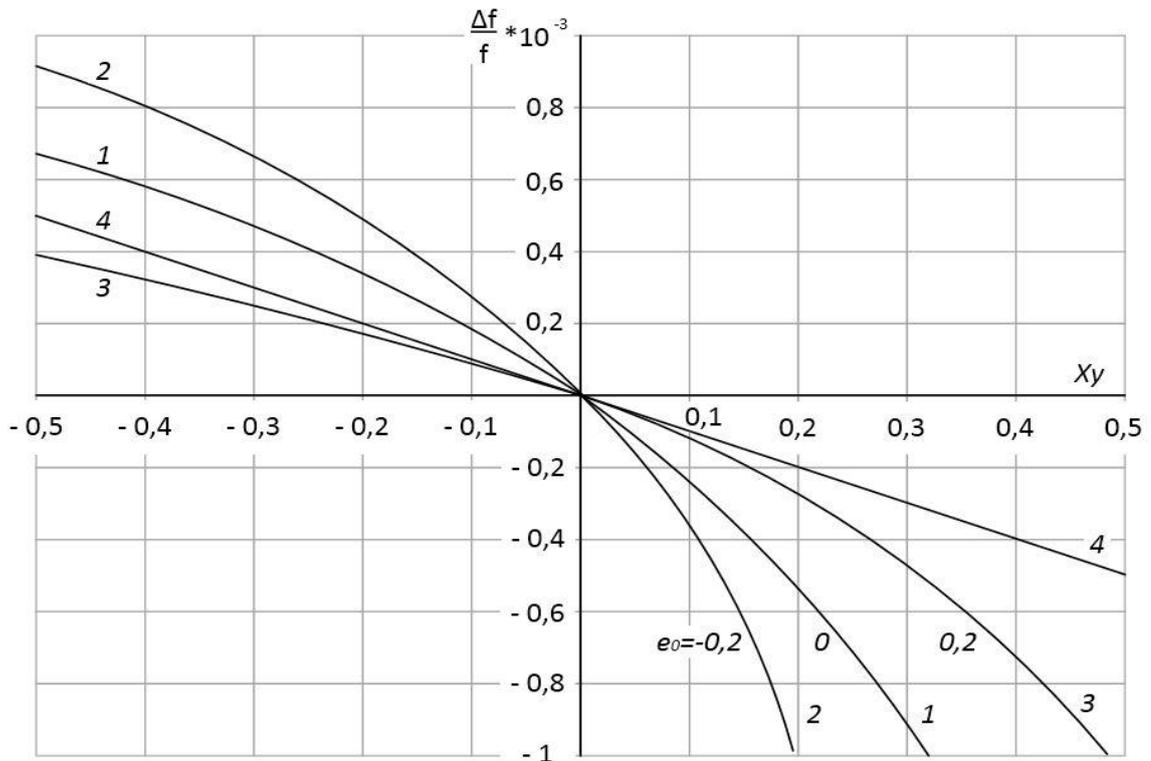


Рисунок 1 - Зависимость относительного изменения частоты кварцевого резонатора при изменении реактивного сопротивления, включенного последовательно с резонатором»[5]

«Относительное изменение частоты генератора при изменении напряжения смещения на варикапе»

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2}m \frac{x_{pH}[(1+u)^\gamma - 1] \left\{ (1-e_0)^2 + \frac{e_0}{x_{\Pi}} \left[ 2 - e_0 \left( 2 - \frac{1}{x_{\Pi}} \right) \right] \right\}}{\left( 1 + \frac{x_{pH}}{x_{pB}} \right) \left[ 1 + \frac{x_{pH}}{x_{pB}} (1+u)^\gamma \right] - x_{pH}[(1+u)^\gamma - 1] \left\{ (1-e_0) - \frac{1}{x_{\Pi}} \left[ r - e_0 \left( 2 - \frac{1}{x_{\Pi}} \right) \right] \right\}} \quad (4)$$

где  $x_{pH} = \Delta X_{\Pi B} / |X_{co}|$  – приведенное к модулю сопротивления статической емкости резонатора значение реактивного сопротивления резонатора, включенного параллельно варикапу.

На рисунке 2 приведена зависимость  $\Delta f/f$  для  $u$  и трех значений  $\gamma = 1/2$ ;  $x_{pH} = -0,5$ ;  $x_{pB}$  и  $x_{\Pi} = \infty$  и трех значений  $e_0$ .

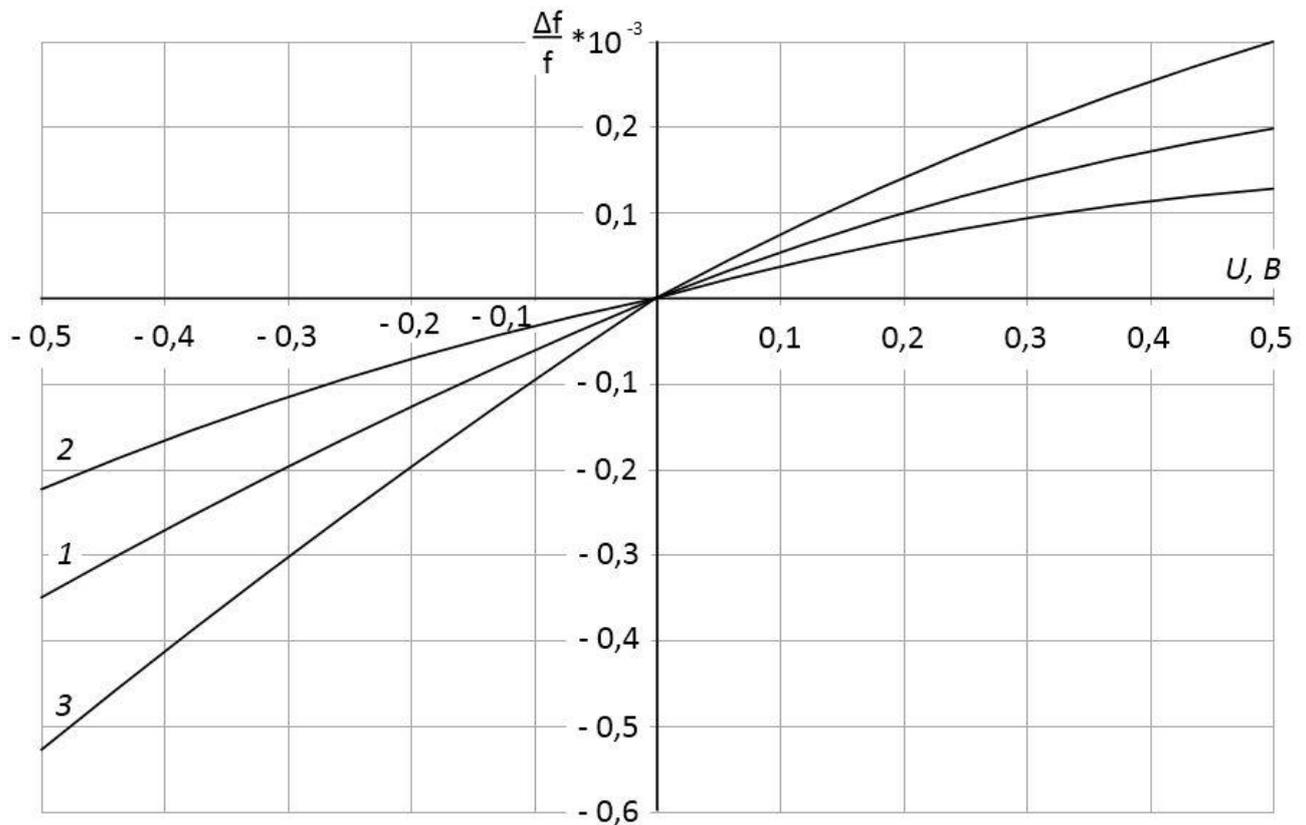


Рисунок 2 - Зависимость относительного изменения частоты КР от приведенного изменения напряжения на варикапе»[5]

«Приведенное изменение реактивного сопротивления в интервале температур

$$\Delta x = X \alpha_x \Delta t / |X_{c0}| \quad (5)$$

где  $X$  – реактивное сопротивление;

$\alpha_x$  – температурный коэффициент реактивного сопротивления;

$\Delta t$  – интервал рабочих температур.

Подставив  $\Delta x$  из (5) в (1), можно определить дополнительную составляющую нестабильности частоты, обусловленную изменением  $X$  в интервале температур.»[5]

## 1.2. Управления частотой кварцевых генераторов с помощью воздействия на кварцевый резонатор

В случае использования кварцевых резонаторов с зазором можно изменять частоту их изменением величины зазора. Такой резонатор состоит из неметаллизированной кварцевой пластины и кварцедержателя с двумя металлическими пластинами, которые служат электродами (рисунок 3а). Эквивалентная схема кварцевого резонатора с зазором между пластиной и электродами была показана на рисунке 3б.

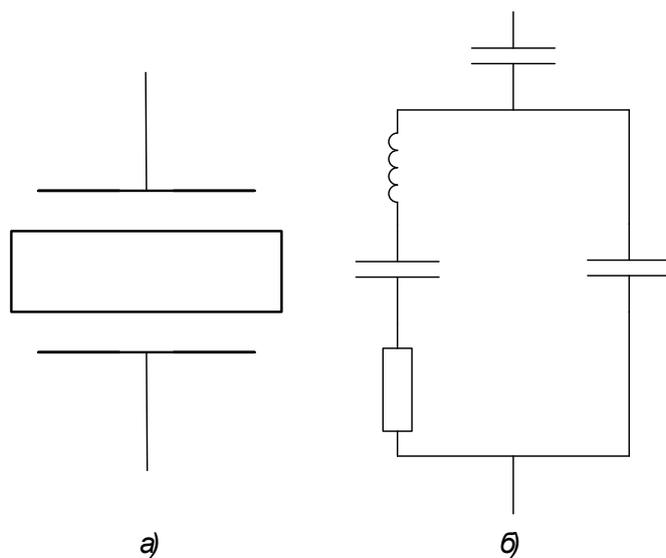


Рисунок 3 - Изображение и эквивалентная схема КР с зазором

«Резонансную частоту кварцевого резонатора с зазором можно найти из следующего выражения [7]:

$$\omega^\lambda = \omega_\gamma^\lambda \left[ 1 + \frac{m}{1 + \frac{d}{K_\Lambda \alpha_{заз}}} \right] \quad (6)$$

где  $\omega_\gamma$  – резонансная частота при отсутствии зазора;

$\alpha_{заз}$  – полная ширина зазора, равная сумме зазоров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . При определенных критических размерах зазоров ( $\alpha_{зазкр}$ ) возникают стоячие волны в слое воздуха, заполняющего зазор, которые резко увеличивают сопротивление кварцевого резонатора и уменьшают его добротность; при этом нарушается плавность зависимости частоты от величины зазора.»[7]

### 1.3. Обзор патентной литературы

При патентном поиске была найдена следующая конструкция, обладающая специальной термокомпенсацией (рисунок 4).

«В нем для создания термозависимого давления используют два специальных вкладыша, расположенных в пропилах кварцевого элемента.

Устройство содержит пьезоэлектрическую пластину (ПП), вставленную в кольцевую проточку (КП) пьезокерамического цилиндра (ПЦ), склеенного из нескольких частей, на его торцевые поверхности нанесены управляющие электроды (УЭ1) и (УЭ2), подключенные к выходу устройства термокомпенсации (УТ), которое содержит термодатчик (ТД), компенсирующий элемент (КЭ) и управляющий элемент (УЭЛ).

Влияние зазоров между пьезопластиной ПП и цилиндром ПЦ, а также индивидуальные особенности ТЧХ пьезопластины ПП могут быть учтены и записаны в память элемента КЭ. Форма ТЧХ резонатора может быть любой.»[1]

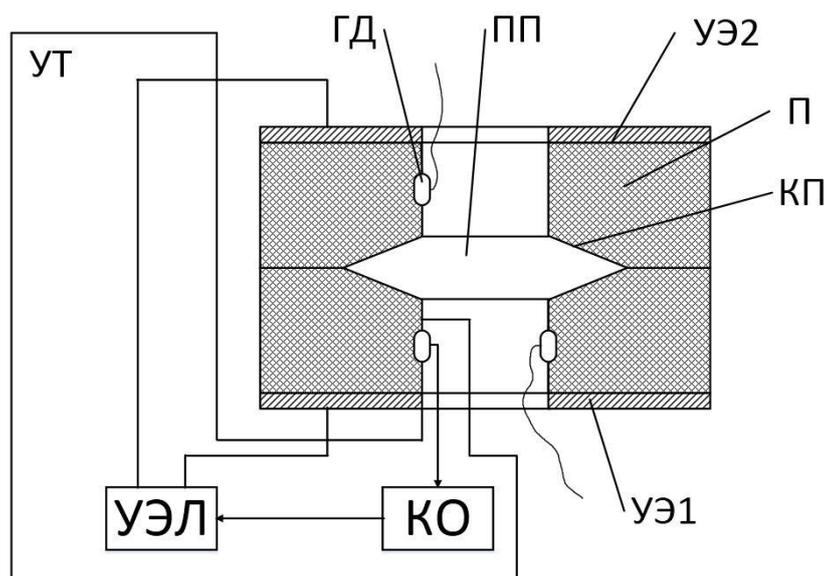


Рисунок 4 - Термокомпенсированный пьезоэлектрический резонатор

«Вкладыши, имеющие большие коэффициенты линейного расширения, чем кварцевая пластина, при повышении температуры увеличивают давление на боковые стенки пропилов, что приводит к изменению частоты. Вкладыши, имеющие меньшие, чем кварцевая пластина, коэффициенты линейного расширения, увеличивают давление на боковые стенки пропилов при понижении температуры (рисунок 5). Коэффициенты линейного расширения, их размеры и форма выбираются таким образом, чтобы скомпенсировать температурную нестабильность частоты кварцевого резонатора. На рисунке 5 схематически показана конструкция термокомпенсированного резонатора.»[1].

Характеристики его термокомпенсации приведены на рисунке 6.

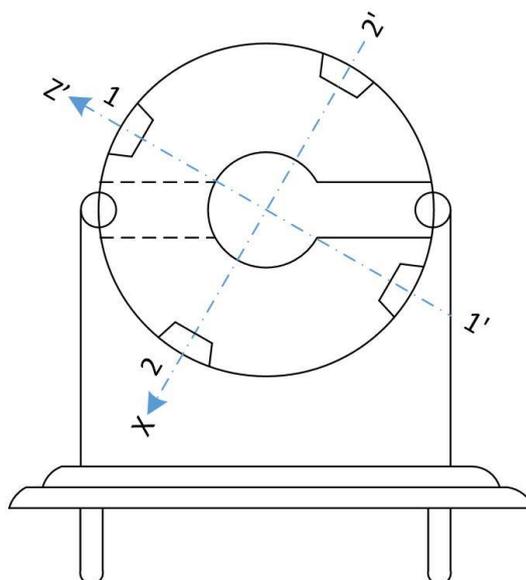
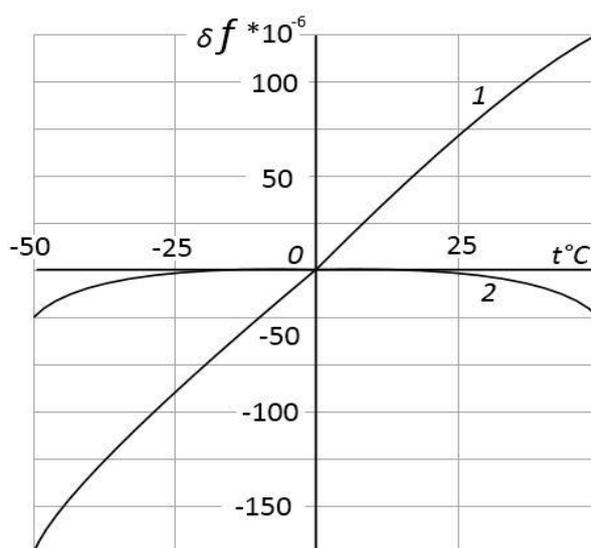


Рисунок 5 - Кварцевый резонатор с компенсирующими вкладышами



1 - до компенсации; 2 - после компенсации

Рисунок 6 - Температурно-частотные характеристики кварцевого резонатора с компенсирующими вкладышами

### Выводы

В первой главе проведен обзор состояния вопроса, рассмотрены способы термокомпенсации работы кварцевых генераторов колебаний.

## 2. Разработка структурной схемы устройства.

«Из приведенного в пункте 1 анализа способов управления частотой кварцевых генераторов наиболее выгодным является перестройка частоты с помощью пакетного пьезоэлектрического двигателя линейных перемещений, который осуществляет давление на кварцевую пластину, меняющую генерируемую частоту в зависимости от сжимающего усилия.

Давление на пластину происходит через элемент давления.

Сам пьезодвигатель линейных перемещений (рисунок 7) состоит из пьезостолба, набранного из пьезокерамических шайб ЦТС-19 или ЦТС-23 (например, 20...50 шт., в зависимости от величины давления на кварцевую пластину). ЛПД представляет собой набор пьезоэлектрических пластин (ПП) 4, изолированных от корпуса 1 диэлектрическими прокладками 2, соединенных посредством склеивания или спекания. Упругий элемент 3 предназначен для предварительного нагружения ПЭ.

Величина предварительного нагружения регулируется гайкой 7. В конструкцию, также, могут быть включены пьезоэлектрические датчики 6, изолированные от остальных ПЭ с помощью диэлектрической прокладки 5. С помощью таких датчиков можно получать информацию о перемещении ЛПД, производной перемещения по времени и некоторых других»[11].

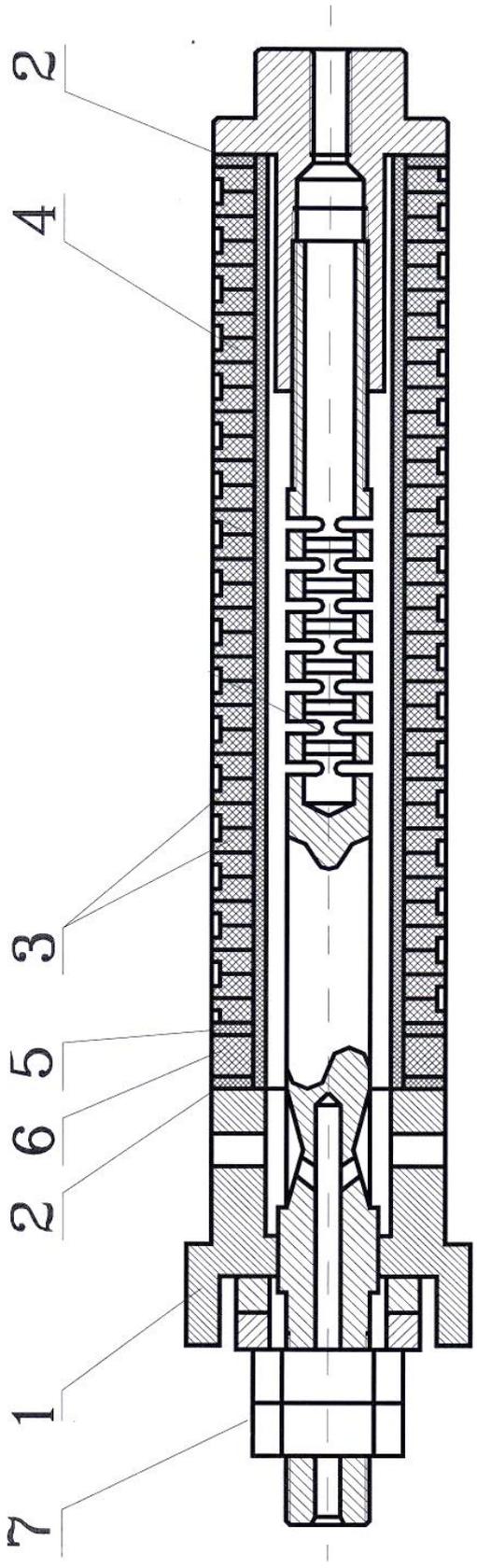


Рисунок 7 - Устройство пьезоэлектрического двигателя линейных перемещений

Структурная схема перестраиваемого кварцевого генератора представлена на рисунке 8.

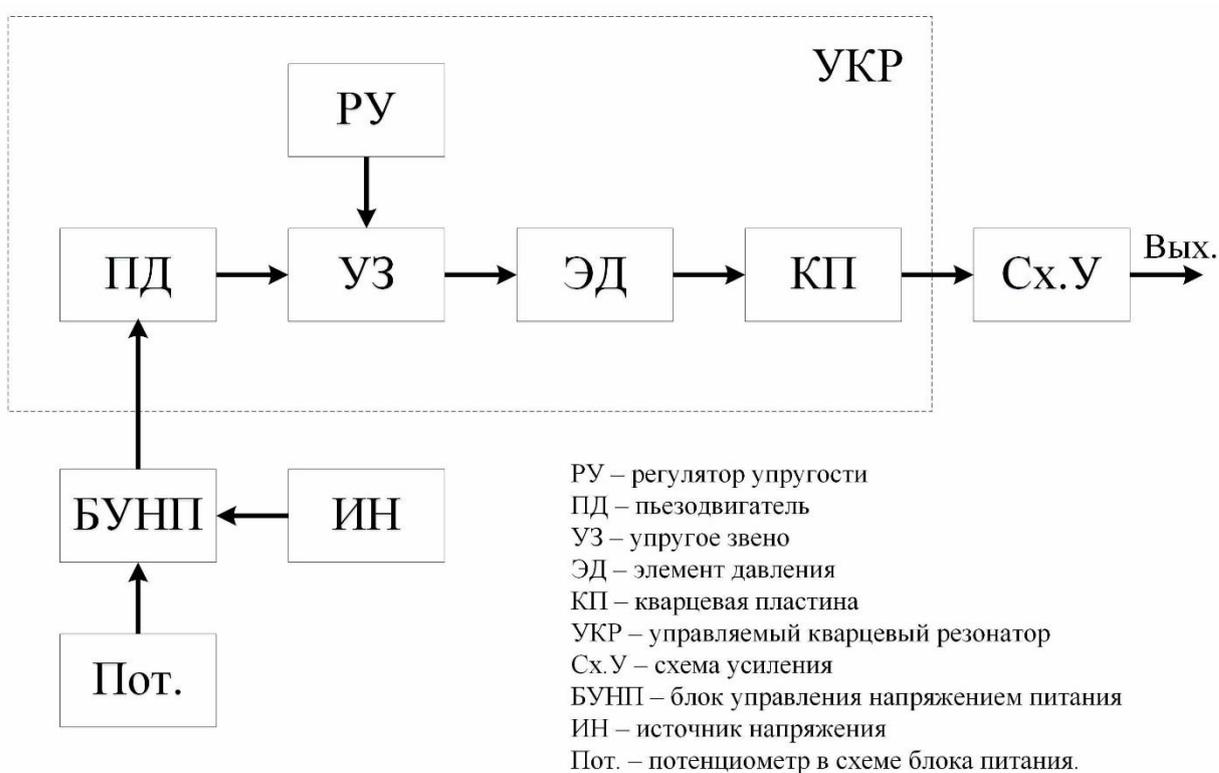
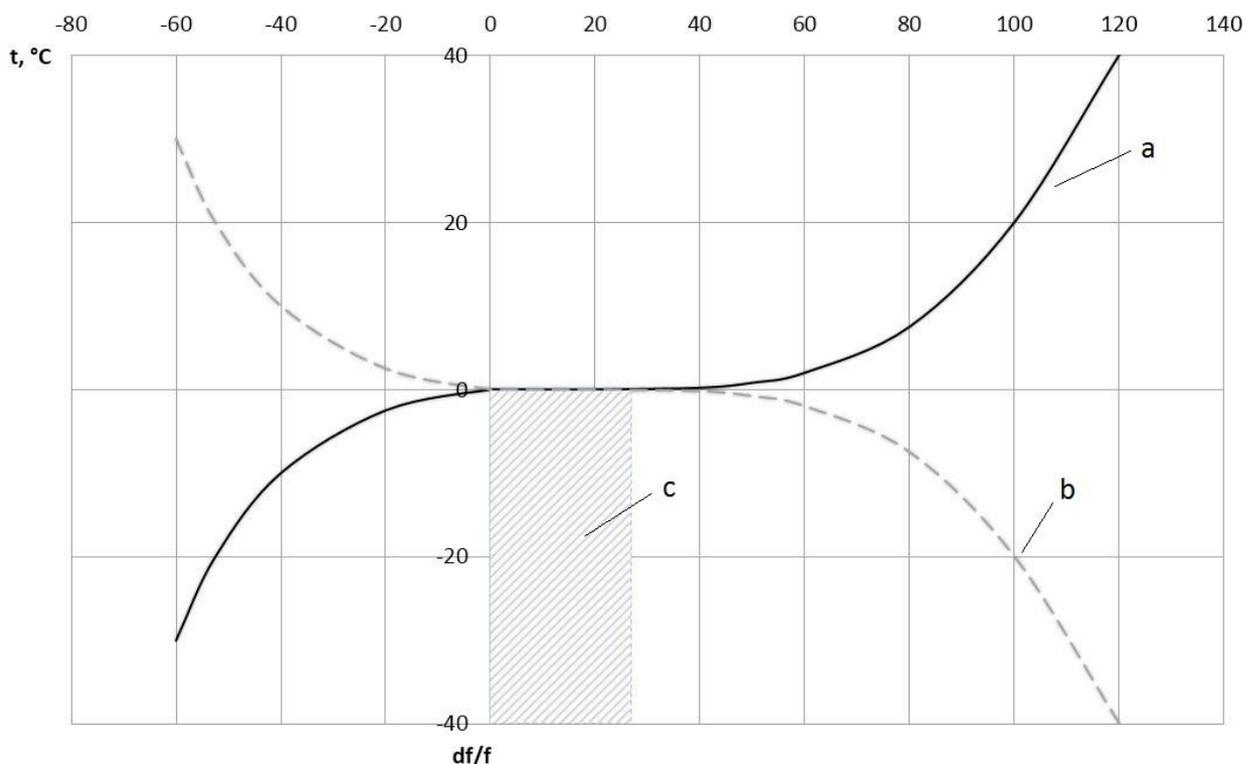


Рисунок 8 - Структурная схема кварцевого генератора

Термокомпенсированный режим работы перестраиваемого кварцевого генератора может быть представлен на базе термозависимого или цифрового потенциометра, сопротивление которого изменяется согласно определенному закону и выступающий в качестве компенсирующего элемента (КЭ). На рисунке 9 представлен пример графика температурно-частотной характеристики (ТЧХ) кварцевого резонатора (КР).



a – изменение частоты КР от действия температуры; b – изменение частоты КР от давления на пластину; c – область температур стабильной частоты.

Рисунок 9 - Температурно-частотные характеристики кварцевого резонатора АТ-среза

В этом случае устройство представляет собой термокомпенсированный кварцевый генератор. Более точному регулированию частоты КР данным режимом способствует тот факт, что характеристика изменения частоты от приложенного давления представляет собой линейную зависимость. Это существенно облегчает проектирование термокомпенсированного КГ.

Структурная схема термокомпенсированного КГ представлена на рисунке 10

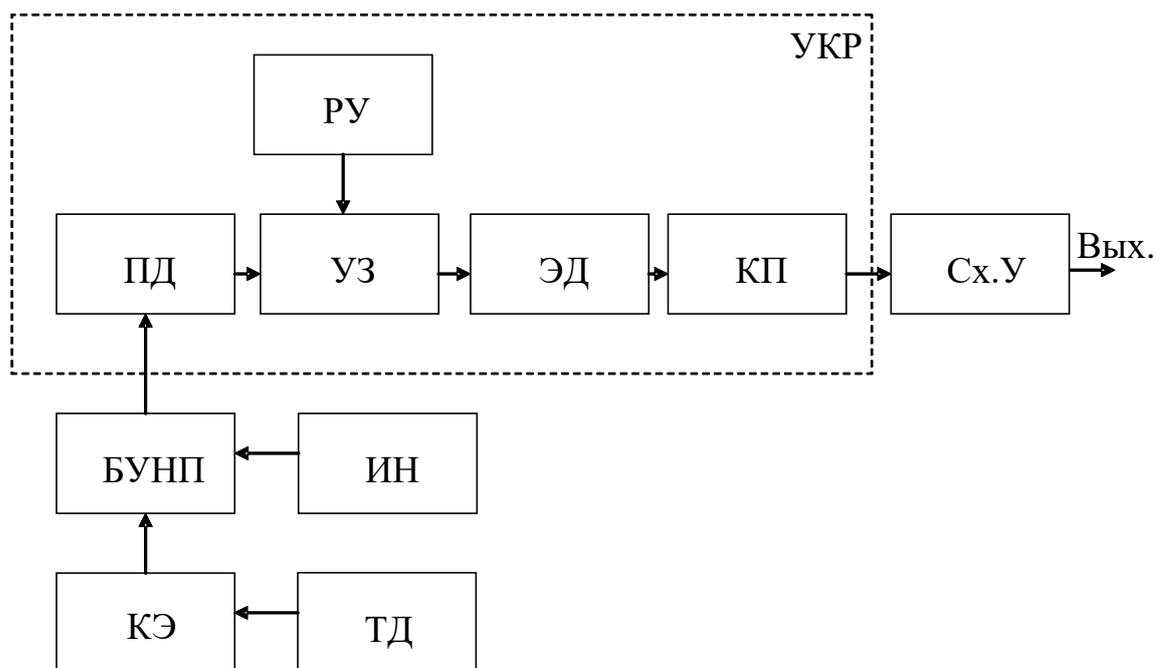


Рисунок 10 - Термокомпенсированный кварцевый генератор

Поскольку ТЧХ кварцевого резонатора имеет нелинейный характер, компенсирующий элемент формирует компенсирующий сигнал в каждой температурной точке.

Следует учитывать, что ТЧХ кварцевого резонатора может быть любой и может быть записана в память элемента. В данной работе термокомпенсированный вариант кварцевого генератора не рассматривается.

### Выводы

Во второй главе приведена схема кварцевого генератора и термокомпенсированного кварцевого генератора. Рассмотрены их температурно-частотные характеристики.

### 3. Разработка электрической принципиальной схемы

#### 3.1. Расчет кварцевого резонатора

При выборе схемы кварцевого генератора будем основываться на том, что исследования и разработка термостатирующих КГ, КГ с различными способами компенсации температурной нестабильности частоты, в том числе и с помощью давления на кварцевую пластину, с непосредственной частотной модуляцией и фазовой автоподстройки проводятся в диапазоне 1-30 МГц [3].

Наиболее широко в диапазоне средних частот применяется схема «емкостная трехточка» (рисунок 12), которая позволяет в отличие от других схем получить высокую стабильность частоты [16, 24, 30, 31].

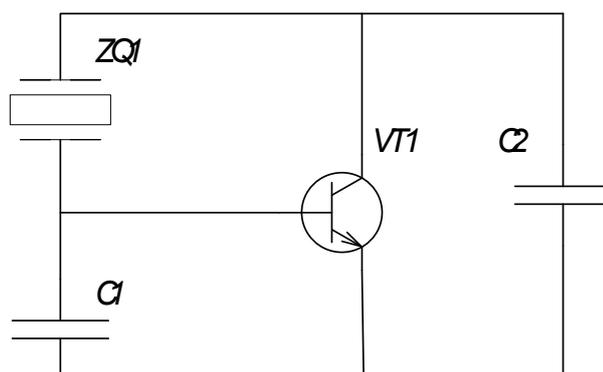


Рисунок 11 - Эквивалентная емкостная трехточечная схема

При расчете генераторов, эквивалентную схему резонатора представляют в виде последовательного соединения реактивного  $X_{кр}$  и активного  $R_{кр}$  сопротивлений и пользуются приведенными к модулю реактивного сопротивления емкости  $C_0$  значениями  $x_{кр}$  и  $r_{кр}$  (рисунок 12).

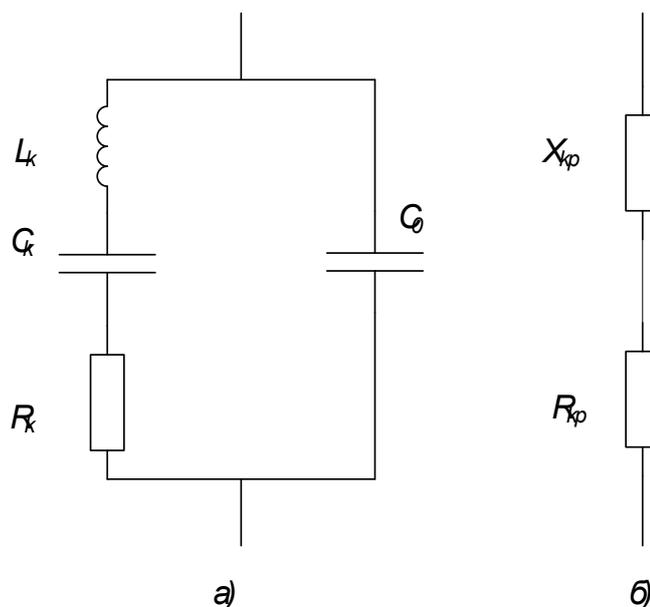


Рисунок 12 - Эквивалентные схемы кварцевого резонатора

В качестве резонатора выберем кварцевый резонатор АТ – среза с формой пьезоэлемента в виде плоского диска, параметры которого сведены в таблице 1.[25].

Таблица 1. - параметры кварцевого резонатора

Срез кварцевой пластины	$f_k$ МГц	$Q_k 10^6$ пФ	$C_k 10^3$ пФ	$C_0$ пФ	$P_{k0}$ мкВт	$\delta_{k0} 10^{-7}$	№ гармоники
АТ	5	2,5	0,29	6	100	3	5-я

В этой таблице  $\delta_{kp}$  - относительное изменение частоты кварцевого резонатора при рассеиваемой на нем мощности  $P_{k0}=100 \times 10^{-6}$  Вт.

$C_k/\omega C_3$  - резонансное сопротивление кварца, отнесенное к его зажимам, при емкости на зажимах  $C_3 = 100$  пФ.

$Q_k$  – добротность катушки индуктивности

Определим динамическое сопротивление кварцевого резонатора по формуле [3]:

$$R_k = \frac{1}{\omega Q_k C_k} = \frac{1}{2\pi \times 5 \times 10^6 \times 2,5 \times 10^6 \times 2,9 \times 10^{16}} = 43,9 \text{ Ом} \quad (7)$$

Найдем, также эквивалентную индуктивность  $L_k$  через отношения:

$$Q_k = \frac{\omega L_k}{R_k}$$

отсюда

$$L_k = \frac{Q_k R_k}{2\pi f} = \frac{2,5 \times 10^6 \times 43,9}{2\pi \cdot 5 \times 10^6} = 3,49 \text{ Гн} \quad (8)$$

Очень важным параметром резонатора для расчета КГ является емкостное отношение  $m$ , которое однозначно характеризует полосу частот между последовательным и параллельным резонансами. Его можно найти по формуле

$$m = \frac{C_k}{C_0} = \frac{2,9 \times 10^{-16}}{6 \times 10^{-12}} = 4,8 \times 10^{-3} \quad (9)$$

Частоту последовательного  $f_k$  и параллельного  $f_n$  резонансов кварцевого резонатора можно определить по формулам

$$f_k = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_k C_k}} = 5002745,7 \text{ Гц} \quad (10)$$

$$f_{\Pi} = f_k \left| 1 + \frac{C_k}{C_0} \right| = 5002865,7 \text{ Гц} \quad (11)$$

В качестве активного элемента в КГ, построенном по трехточечной схеме (рисунок 12), может использоваться транзистор, удовлетворяющий условию  $f_s > f_r$ . Важными параметрами транзистора, также являются крутизна характеристики, уровень шумов, значение и стабильность проводимостей, габариты и экономичность.

Наиболее подходящим является транзистор КТ315Б. Его основные

характеристики сведены в таблице 2.

Таблица 2 - основные характеристики транзистора КТ315Б

Транзистор	$h_{21э}$	$C_k$ пФ	$f_{21}$ МГц	$\tau_k$ нс	$I_{кввых}$ мА	$P_{кввых}$ мВт
КТ315Б	50-280	5	120	0,5	30	100

Элементы частотозадающей цепи КГ обычно рассчитываются, начиная с определения управляющего сопротивления

$$R_y = |Z_y| = \frac{1}{S \times \gamma(\Theta)}$$

где  $\gamma(\theta)$  характеризует запас по возбуждению КГ и выбирается равным 0,5-0,1, что соответствует коэффициенту запаса по возбуждению 2-10.

Выберем запас по возбуждению  $K_3 = S$ , а  $\gamma(\theta) = 0,3$ . Из [11] известно, что  $S = 50$  мА/В, тогда

$$R_y = 66,6 \text{ Ом}$$

Для емкостной трехточной

$$R_y = \frac{X1X2}{\sum R} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} X1 &= \frac{1}{\omega(C_2 + C_{вых})}; \\ X2 &= \frac{1}{\omega(C_1 + C_{вх})} \end{aligned} \quad (13)$$

$\sum R$  – суммарное сопротивление потерь в цепи резонатора.

Обычно  $C_1 \gg C_{вх}$  и  $C_2 \gg C_{вых}$  и в первом приближении можно считать  $\sum R \approx R$ . При определении  $X1$  и  $X2$  по формулам (13) не учитывались инерционные свойства транзистора и потери в элементах связи и управления,

что вполне допустимо для рассматриваемого диапазона частот.

Подставив в выражение (13)  $X_2 = K_0 X_1$  и решив его совместно с (12), найдем  $X_1$ :

$$X_1 = \sqrt{\frac{R_k}{S\gamma(\theta) \cdot K_0}}$$

где  $K_0 = 0,2-0,8$  – коэффициент обратной связи [3].

Выбирая  $K_0 = 0,5$ , получим:

$$X_1 = 76,5$$

Определив  $X_1 = 76,5$ , находим  $X_2 = K_0 X_1 = 0,5 \times 76,5 = 38,25$ .

По найденным значениям  $X_1$  и  $X_2$  находим емкости связи  $C_2$  и  $C_1$  соответственно:

$$C_2 = 416 \text{ пФ}$$

$$C_1 = 832 \text{ пФ}$$

Подставляя найденные значения  $X_1$  и  $X_2$  в (3.6), получим:

$$R_y = 66,65 \text{ Ом}$$

Частота КГ выше частоты последовательного резонанса резонатора на значение

$$\Delta f_0 = \frac{-0,5 m f_k x_{ob}}{1 - x_{ob}} \quad (14)$$

где  $x_{ob}$  - полное приведенное сопротивление генератора, равное:

$$x_{ob} = -C_0 \left( \frac{1}{C_1 + C_{ex}} + \frac{1}{C_2 + C_{b\theta x}} \right) \quad (15)$$

Вычислим по формуле (3.9)  $x_{ob} = -0,0216$

Подставляя полученные значения в (3.8), получим  $\Delta f_0 = 2,556$  Гц.

Из-за разброса параметров элементов отстройки частоты КГ относительно номинального значения:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2} m \frac{\Delta x (1 - e_0)^2}{1 - \Delta x (1 - e_0)^2} \quad (16)$$

где

$$x_{ob} = -\frac{1}{\left(\frac{2\pi f}{|X_{C0}|}\right)} \left( \frac{1}{C_{1\min} + C_{\text{вх}\min}} + \frac{1}{C_{2\min} + C_{\text{вых}\min}} - \frac{1}{C_{1\max} - C_{\text{вх}\max}} - \frac{1}{C_{2\max} + C_{\text{вых}\max}} \right)$$

$$e_0 = \frac{\Delta f_0}{0,5mf_k} - \text{начальная расстройка.}$$

Для нахождения  $\Delta f/f$  вычислим  $\Delta x$  и  $e_0$

$$e_0 = 0,02$$

$$|X_{C0}| = 5305,165$$

$$\Delta x = -49882,52$$

тогда

$$\Delta f/f = -2,36 \times 10^{-3}$$

Основные характеристики выбранного кварцевого генератора:

- «Напряжение питания 6-10 В
- Мощность, потребляемая от источника 5-20 мВт
- Нестабильность частоты при изменении напряжения питания на  $\pm 15\%$ , не более  $5 \times 10^{-7}$ .
- Дополнительная нестабильность частоты, обусловленная изменением параметров элементов схемы при изменении температуры от  $-50$  до  $70^\circ\text{C}$ , не более  $1,5 \times 10^{-6}$
- Выходное напряжение 150-500 мВ»[3]

### 3.2. Блок питания пьезодвигателя

Блок управления напряжением питания пьезодвигателя представляет собой усилитель на транзисторах изменяющий выходное напряжение сопротивлением потенциометра (рисунок 13).

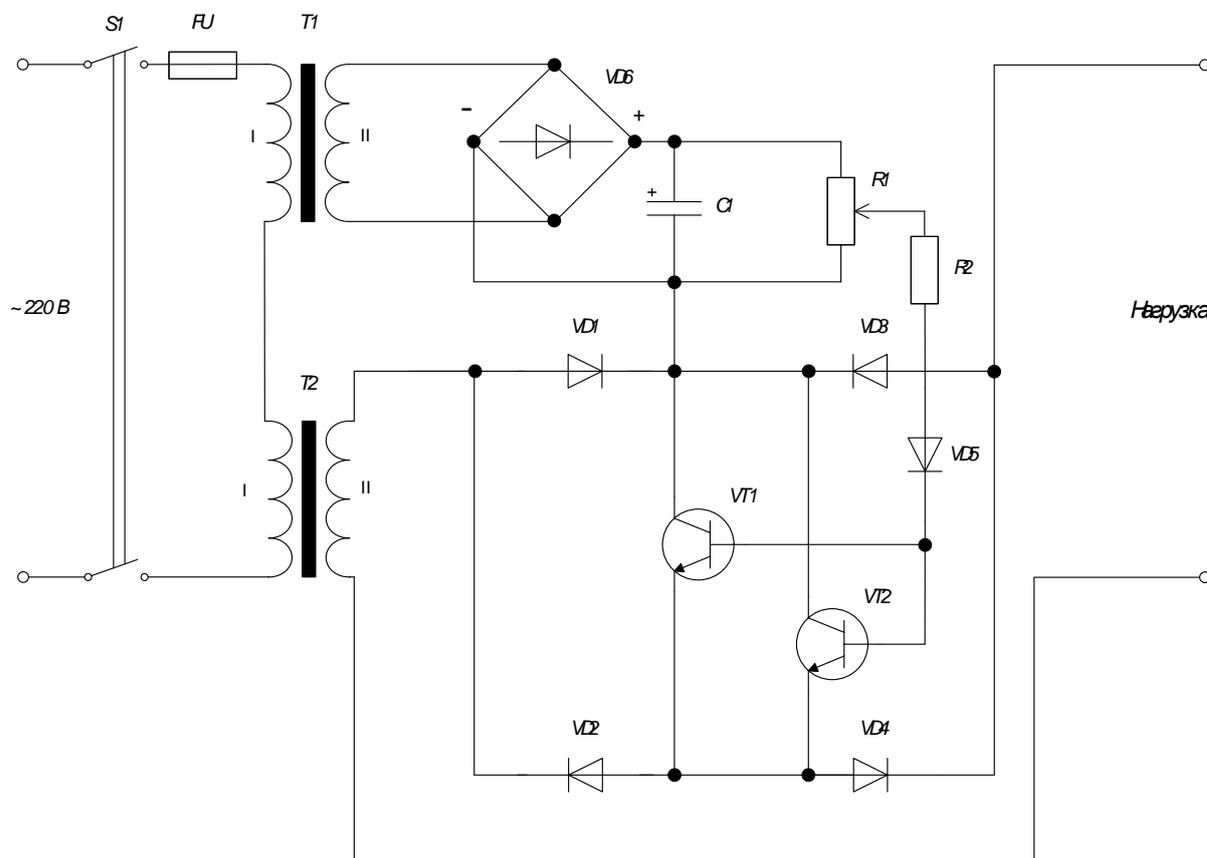


Рисунок 13 - Блок питания пьезодвигателя. Схема электрическая принципиальная

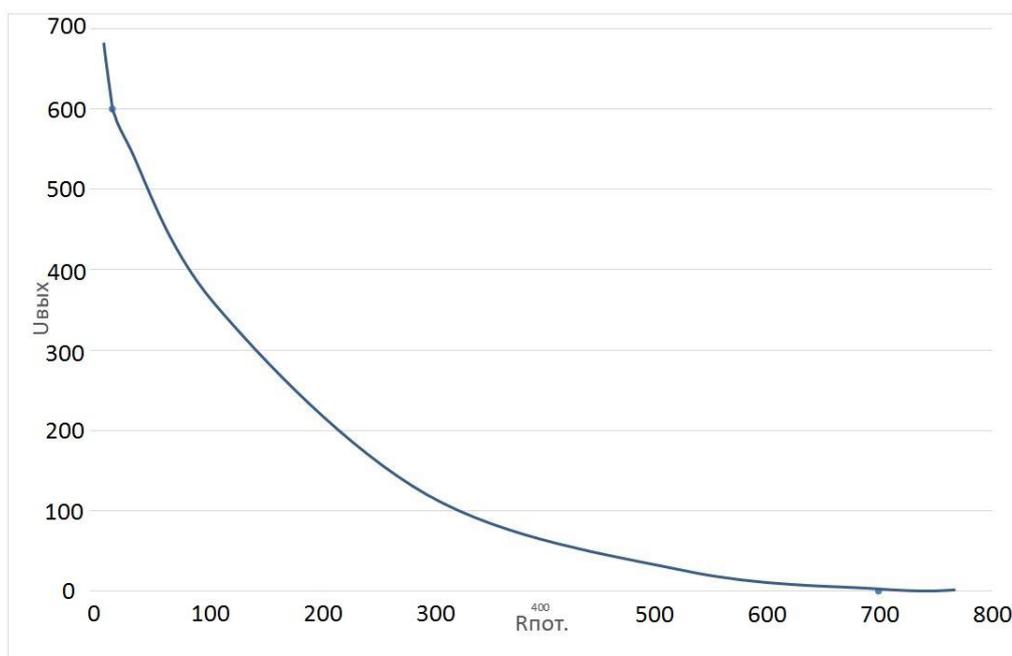
«Регулирующий элемент прибора – транзисторы VT1 и VT2. Диодный блок VD1...VD4 выпрямляет сетевое напряжение так, что к коллектору VT1, VT2 всегда приложено положительное напряжение. Трансформатор T1 понижает напряжение 220 В до 5...8 В, которое выпрямляется диодным мостом VD6 и сглаживается конденсатором C1.» [21]

«Потенциометр R1 служит для регулировки величины управляющего напряжения, а резистор R2 ограничивает ток базы транзистора. Диод VD5 защищает VT1 от попадания на его базу напряжения отрицательной полярности [9].

Регулятор действует следующим образом. После включения питания тумблером S1 сетевое напряжение поступает одновременно на диоды VD1, VD2 и первичную обмотку трансформаторов T1, T2. При этом выпрямитель, состоящий из диодного моста VD6, конденсатора C1 и переменного резистора R1, формирует управляющее напряжение, которое поступает на базу транзистора и открывает его. Если в момент включения регулятора в сети оказалось напряжение отрицательной полярности, ток нагрузки протекает по цепи VD2 – эмиттер-коллектор VT1...2, VD3. Если полярность сетевого напряжения положительная, ток протекает по цепи VD1 – коллектор-эмиттер VT1...2, VD4 [27].

Значения тока нагрузки будет тем больше, чем выше уровень управляющего напряжения на базе VT1, VT2 и наоборот. При крайнем правом по схеме положении движка потенциометра R1 транзисторы окажутся полностью открыты и величина электроэнергии, потребляемая нагрузкой будет соответствовать номинальной величине, выдаваемого напряжения трансформатором T2. Если движок R1 переместить в крайнее левое положение, VT1, VT2 окажутся запертыми и ток через нагрузку не потечет. Таким образом регулируется амплитуда переменного напряжения и тока, действующих в нагрузке. Транзисторы при этом работают в непрерывном режиме, благодаря чему такой регулятор лишен недостатков, свойственных тиристорным устройствам» [21]

Зависимость выходного напряжения от положения ручки потенциометра представлена на рисунке 14.



$U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение БП;  $R_{\text{пот.}}$  – сопротивление потенциометра  
 Рисунок 14. Зависимость выходного напряжения от положения ручки потенциометра.

Особенности данного блока питания:

- плавная регулировка напряжения питания от 0 до 600 В.
- лишен недостатков тиристорных блоков питания: помехи в электрической сети;
- простота устройства

Для повышения рабочего напряжения использован повышающий трансформатор Т2 с коэффициентом трансформации 3. Для того, чтобы мощность блока питания соответствовала максимальной мощности пьезоэлектрического двигателя использована схема параллельного включения транзисторов VT1, VT2 [23,29].

Перечень элементов приведена в таблице 3 [14, 22].

Таблица 3 - Перечень элементов блока питания пьезодвигателя.

Поз. обозн.	Наименование	Кол.
	<u>Трансформаторы</u>	
T1	ТПК-2 - 8В, 0.31А	
T2	220/600 В, К=2,72, 400 Вт	
	<u>Диоды</u>	
VD1, VD2, VD3, VD4	HER207-DO-15 - 2А, 800В	4
VD5	КД243А-1N4001 - 1А, 50В	1
VD6	КЦ412А – 1А, 50В	1
	<u>Транзисторы</u>	
VT1, VT2	2SC4288А-ТО3РВ-Toshiba – 200Вт, 600В	2
	<u>Потенциометр</u>	
R1	ППБ-15Г - 15 Вт, 680 Ом, 5-10%	1
	<u>Резистор</u>	
R2	CF-25 (C1-4) - 0.25 Вт, 20 Ом, 5%	1
	<u>Конденсатор</u>	
C	ЕСАР (К50-35)-В41828А3227М007- 220 мкФ, 10 В	1
	<u>Клеммник</u>	
ХТ	301-021-12 – 5 мм, 6 контактов	1
	<u>Предохранитель</u>	
FU	ВПБ6-10 - 2 А, 250 В, 5.2x20	1
	<u>Держатель для предохранителя</u>	
XF	FN-107 - 5.2x20	1
	<u>Тумблер</u>	
S1	ТЗ-1 – 6А, 220В	

Блок питания предполагается подсоединять к остальным частям устройства согласно рисунку 15.

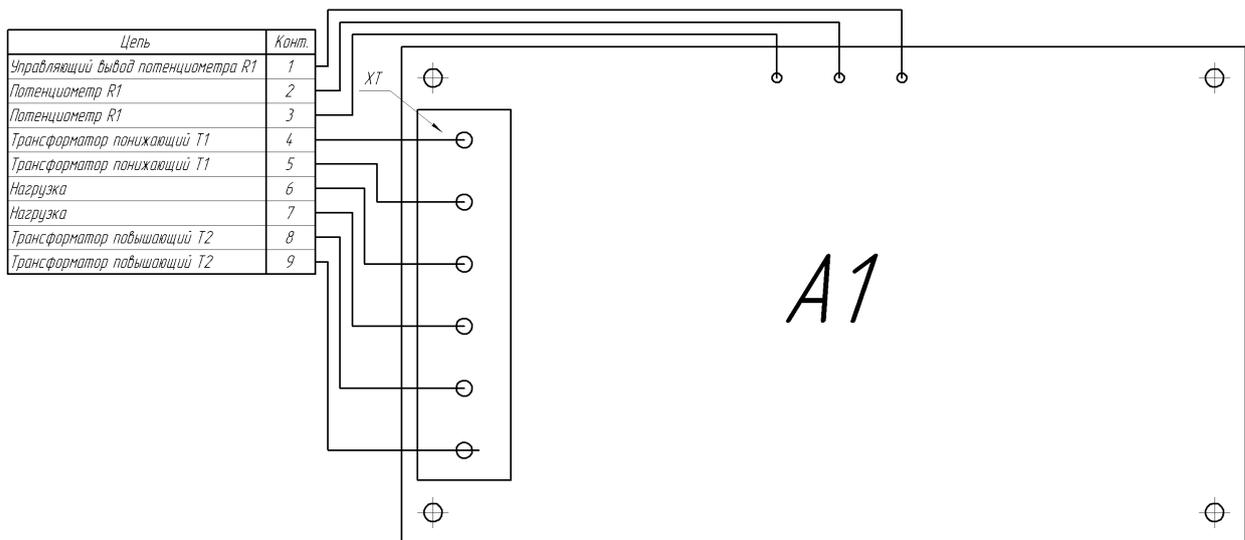


Рисунок 15 - Схема соединений блока питания

### 3.3. Усилитель мощности выходной частоты кварцевого генератора

Усилитель мощности выходной частоты КГ представляет собой двухкаскадный усилитель на биполярных транзисторах (рисунок 16).

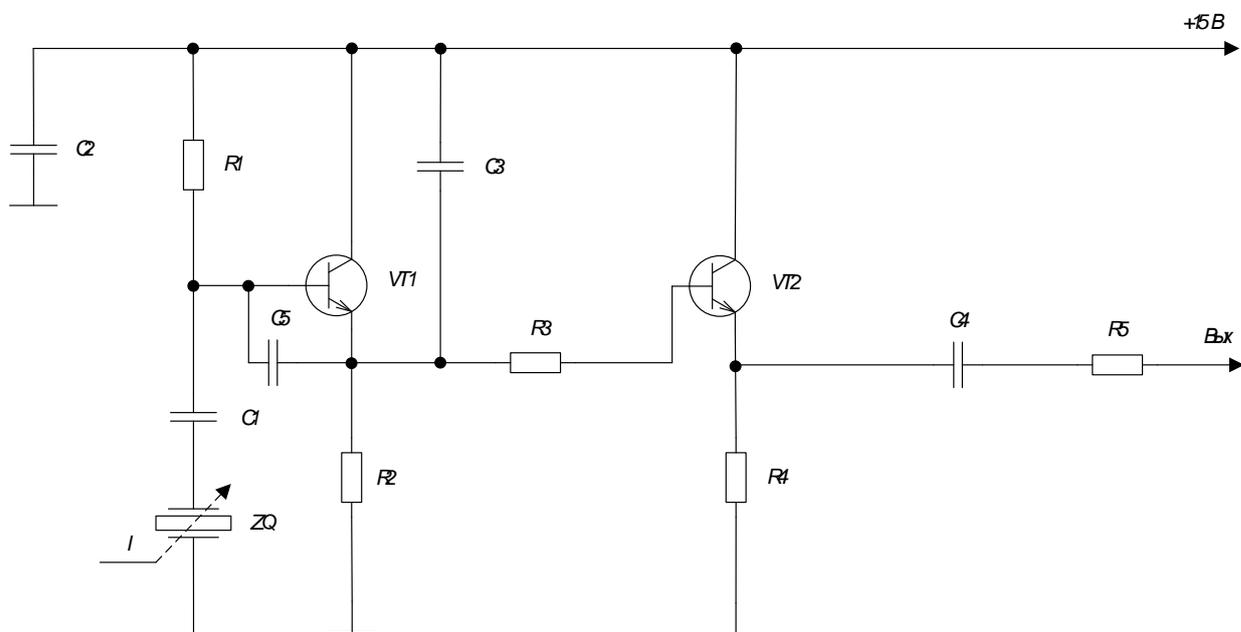


Рисунок 16 - Усилитель мощности выходной частоты. Схема электрическая принципиальная

Кварцевый генератор в схеме обозначен элементом ZQ, управляемый

по частоте. Схема работает следующим образом: выходная частота КГ прикладывается к базе транзистора VT1 через конденсатор C1, который фильтрует высокие частоты и не пускает источник постоянного питания усилителя +15 В в схему кварцевого генератора. Конденсатор C5, подключенный от базы к эмиттеру в обход транзистора VT1, фильтрует низкие частоты от КГ. Таким образом конденсаторы C1 и C5 задают диапазон рабочих частот усилителя. Далее с эмиттера транзистора VT1 через токоограничивающий резистор R3 напряжение прикладывается к базе транзистора VT2. На выходе усилителя стоят конденсатор C4, сглаживающий высокочастотную составляющую сигнала, и токоограничивающий резистор R5 [28].

Электролитический конденсатор C2 служит для стабилизации источника питания. Конденсатор C3 необходим для частотного согласования обоих каскадов схемы. R1 – нагрузка в цепи с общим коллектором транзистора VT1. R2, R4 – токоограничивающие резисторы на выходах каскадов. Перечень элементов приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Перечень элементов усилителя мощности выходной частоты.

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
	<u>Конденсаторы</u>		
C1	K10-17Б-ПЗ3-300 пФ ± 5% - 16 В ОЖО460.107ТУ	1	
C2	K10-17Б-ПЗ3-1 мкФ ± 5% - 16 В ОЖО460.107ТУ	1	
C3, C5	K10-17Б-ПЗ3-7500 пФ ± 5% - 16 В ОЖО460.107ТУ	2	
C4	K10-17Б-ПЗ3-100 пФ ± 5% - 16 В ОЖО460.107ТУ	1	
ZQ	Кварцевый резонатор 5 МГц	1	
	<u>Резисторы</u>		
R1	C2-23-0,125 Вт – 150 кОм ± 10% ОЖО.104 ТУ	1	
R2	C2-23-0,125 Вт – 2 кОм ± 10% ОЖО.104 ТУ	1	
R3	C2-23-0,125 Вт – 510 Ом ± 10% ОЖО.104 ТУ	1	

Продолжение таблицы 4

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
R4	C2-23-0,125 Вт – 1 кОм ± 10% ОЖО.104 ТУ	1	
R5	C2-23-0,125 Вт – 200 Ом ± 10% ОЖО.104 ТУ	1	
	<u>Транзисторы</u>		
VT1	КТ315Б ЩИ 3.365.008 ТУ		

Усилитель предполагается подсоединять к остальным частям устройства согласно рисунку 17.

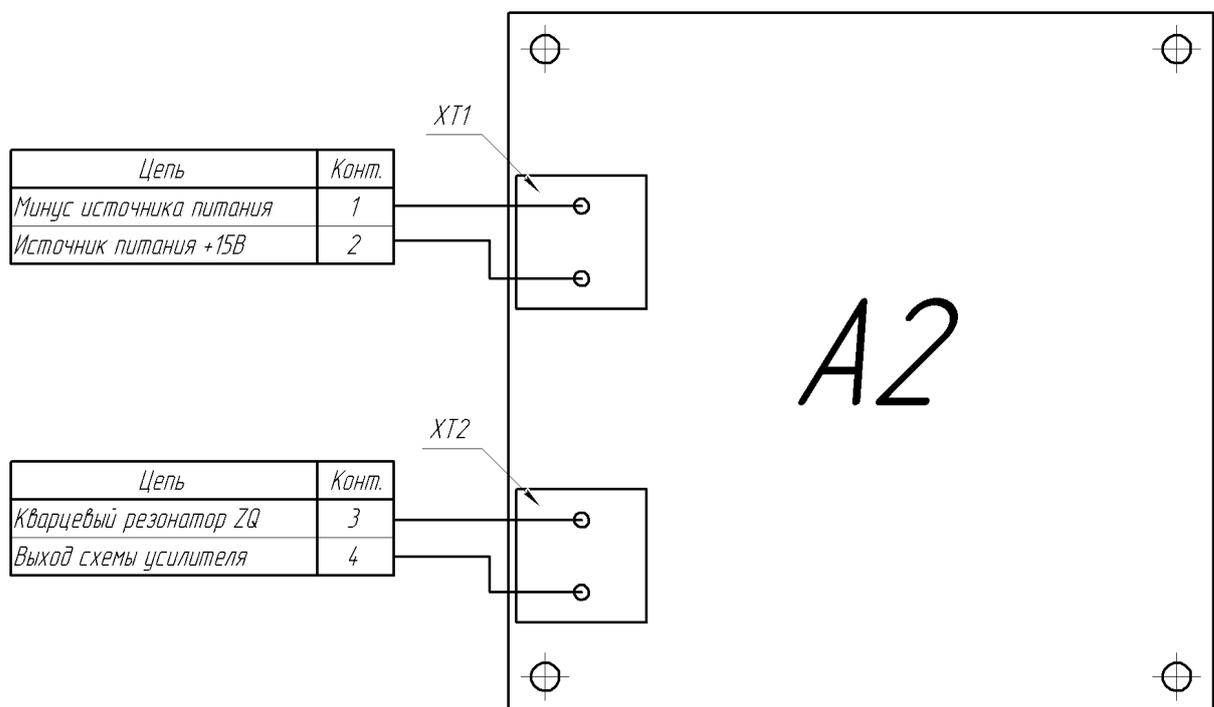


Рисунок 17 - Схема подсоединения усилителя мощности выходной частоты.

### Выводы

В третьей главе произведена разработка электрических принципиальных схем блока питания пьезодвигателя и усилителя мощности выходной частоты кварцевого генератора.

## 4. Конструктивная часть

### 4.1. Расчет пьезоэлектрического двигателя

Согласно методике расчета [19]:

«Для перемещения исполнительного органа (ИО) пьезодвигателя (ПД) на  $\Delta h_{nd}$  равную 1 мкм требуется подать напряжение  $U_{nd}$  — на пьезокерамический элемент толщиной 1 мм, величиной 1000В.

Исходя из этих данных, рассчитываем ПД, который бы имел величину перемещение  $\Delta h_{nd}$  равную 10 мкм, достаточную для воздействия на кварцевую пластину [11].

Зададимся габаритами ПД. Пусть высота пьезостолба  $L_{nd}$  равна 30 мм, толщина одного пьезоэлемента  $L_{пэ}$  равна 0,05 мм, тогда величина требуемого напряжения  $U_{nd}$  для перемещения  $\Delta h_{nd}$  на 10 мкм будет равна»[19]

$$U_{nd} = \frac{U_H \times \Delta h_{nd} \times b}{L_{nd} \times \Delta h_{nd}} \quad (17)$$

получим  $U_{nd} = 15 \text{ В}$

Зададимся величиной максимального расширения пьезодвигателя необходимого для максимального воздействия на кварцевую пластину  $\Delta h_{nd \max}$  равную 400 мкм и удовлетворяющего конструктивным ограничениям, расчет которых приведен ниже. Максимальное необходимое напряжение  $U_{пд \max}$ , подаваемое на ПД, в таком случае будет равно 600 В

Таким образом, для данного пьезодвигателя потребуется 600 шт. пьезокерамических дисковых элементов из пьезокерамики ЦТС-19.

Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – конструктивные характеристики ЛПД

$N_{шт}$ ПЭ	$L_{пэ}$ , (м)	$L_{пд}$ , (мм)	$\Delta h_{пд}$ при 15В, (мкм)	$\Delta h_{пд \max}$ , (мкм)	$U_{пд \max}$ , (В)
600	$5 \cdot 10^{-5}$	30	10	400	600

Рассчитываем общую емкость пьезостолба:

$$\Sigma C_{пз} = 0,8 \times 0,03 \times 162 \times 10^{-6} = 3,888 \times 10^{-6} \text{ Ф} = 3,888 \text{ мкФ}$$

Найдем емкостное сопротивление ПД:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f \Sigma C} = 819 \text{ Ом} \quad (20)$$

Тогда ток ПД будет:

$$I = \frac{U_{пд \max}}{X_c} = \frac{600}{1637} = 0,733 \text{ А} \quad (21)$$

Потребляемая емкостная мощность ПД будет составлять:

$$Q = U_{пд \max} \times I \times \sin\phi = 600 \times 0,733 \times (-0,894) = 393.11 \text{ Вар} \quad (22)$$

Требуемая рабочая частота привода:

$$T_y \leq \frac{1}{(3 \div 10) \times f_{пр}} \quad (26)$$

$$T_{пр} = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 > T_{исп} \text{ в } \sim 3 \text{ раза}$$

Второе ограничение объясняется тем, что ЛПД представляет собой, с точки зрения теории сопротивления материалов, стержень длиной  $l_{пд}$ , и моментом инерции поперечного сечения  $J_{мин}$ , работающий на сжатие. Если сила, сжимающая данный стержень превысит критическую  $F_{кр}$ , то произойдет потеря устойчивости. Критическая сила может быть рассчитана по формуле Эйлера :

$$F_{кр} = (\pi^2 \times E \times J_{мин}) / (\mu \times l_{пд})^2 \quad (27)$$

где  $E$  - модуль упругости материала стержня, равный  $5,5 \times 10^{10}$  Па;  $J_{мин}$  - минимальный момент инерции сечения, равный  $5,2 \times 10^{-6}$  м<sup>4</sup>;  $l_{пд}$  - длина стержня, 0,03 м;  $\mu$  - коэффициент, равный 133.

$$F_{кр} = (3,14^2 \times 5,5 \times 10^{10} \times 5,2 \times 10^{-6}) / (133 \times 0,03)^2 = 177300$$

Примем коэффициент запаса равным 0,5 [11].

Подставляя значения получим:

$$\Delta_l \leq \frac{0,028 \times 3,14}{133 \times 0,5} \times \sqrt{\frac{5,2 \times 10^{-6} \times 5,5 \times 10^{10}}{18 \times 10^6 \times 162 \times 10^{-6}}} = 13 * 10^{-3} \quad (28)$$

Полученные результаты приведены в таблице 5.

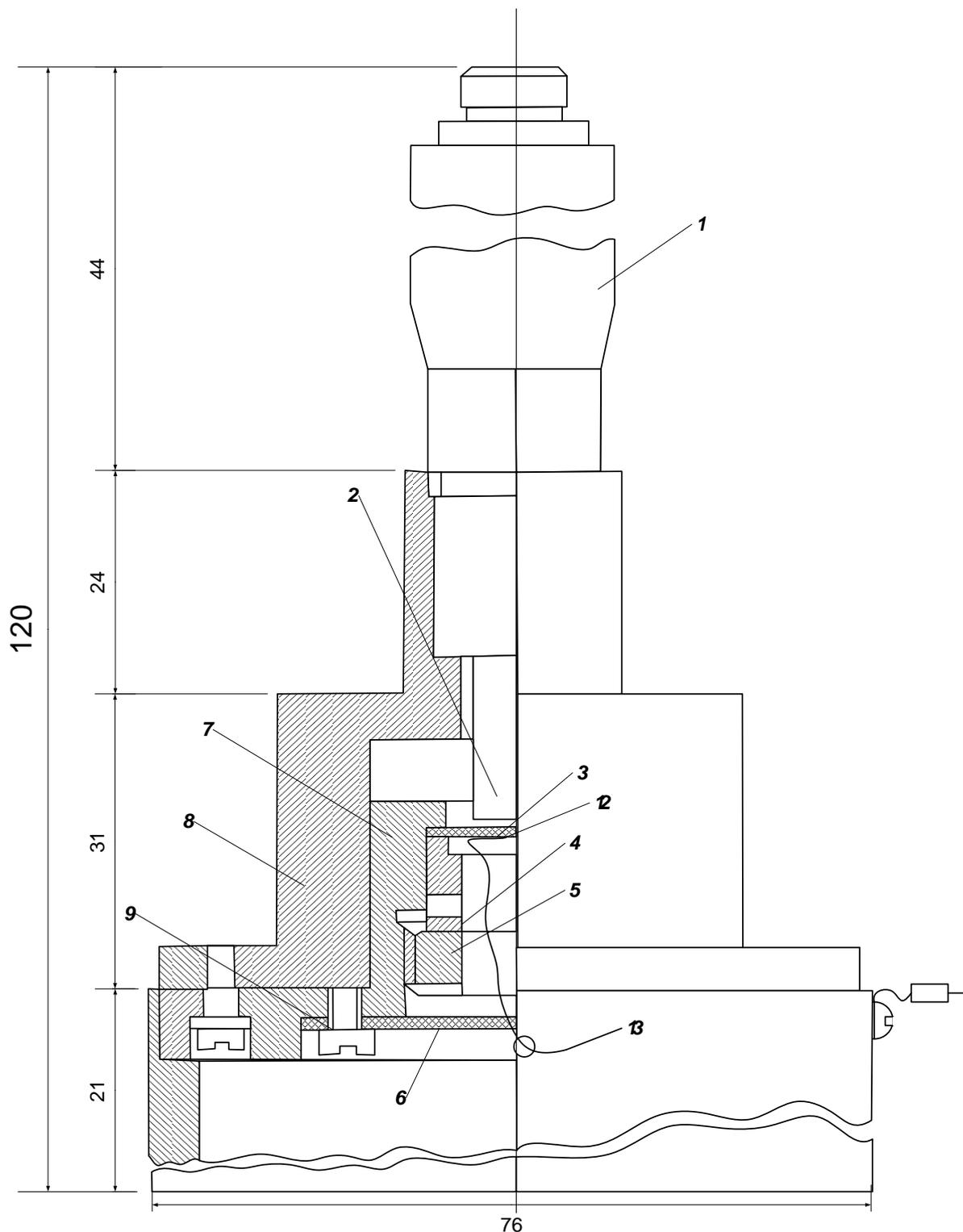
Таблица 5 – электрические характеристики ЛПД

$\Sigma C$ , (мкФ)	$S_{\text{пз}}$ , (м <sup>2</sup> )	f, (Гц)	$\Sigma X_c$ , (Ом)	I, (А)	Q, (Вар)	$R_y$ , (кОм)	$T_{\text{пр}}$	$T_y$ , $10^{-3}$
3,888	$162 \cdot 10^{-6}$	50	819	0,733	393,11	2	0,02	7,776

#### 4.2 Эскиз конструкции устройства

«Для создания давления на кварцевую пластину с помощью пьезодвигателя требуется элемент давления (ЭД) (см. структурную схему). Таким элементом давления может служить каркас из упругого материала с высокой температурной стабильностью в диапазоне температур от минус 30 до плюс 40 градусов С. Наиболее подходящими материалами для изготовления такого каркаса могут служить, например такие материалы как инвары и элинвары.»[12,13]

Эскиз конструкции приведен на рисунке 19. Конструкция состоит из элементов: 1 – Пьезодвигатель, 2 – Подвижный электрод, 3 – Полированный кристаллический элемент, 4 – Прижимная втулка, 5 – Гайка, 6 – Диэлектрическая крышка, 7 – Кварцедержатель, 8 – Корпус, 9 – Винт, 10 – Защитный стакан, 11 – Корпусной вывод, 12 – Пленочный электрод (неподвижный), 13 – Вывод неподвижного электрода.



1 – Пьезодвигатель, 2 – Подвижный электрод, 3 – Полированный кристаллический элемент, 4 – Прижимная втулка, 5 – Гайка, 6 – Диэлектрическая крышка, 7 – Кварцедержатель, 8 – Корпус, 9 – Винт, 10 – Защитный стакан, 11 – Корпусной вывод, 12 – Пленочный электрод (неподвижный), 13 – Вывод неподвижного электрода

Рисунок 19 - Эскиз устройства кварцевого резонатора.

«Используем каркас из латуни Л62, характеристики упругости которой приведены в наиболее полно удовлетворяют требованиям работы. Сечение примем равным 6х1,5 мм.

Толщина упругих стенок каркаса  $b_k$  выбирается исходя из того, что при воздействии пьезодвигателя на упругие стенки была линейная зависимость удлинения стенок от предела упругости металла (рисунок 2.1). Для того, чтобы вывести упругость стенок каркаса в зону абсолютно упругих деформаций может использоваться регулировочный винт.

Из приведенных выше соображений толщину упругих стенок каркаса найдем по формуле

$$C_k = \frac{C_{kn} \times b_{kn}}{2b_k} \quad (29)$$

где  $C_{kn} = 1,5$  мм – толщина упругой стенки исходного образца;

$b_{kn} = 6$  мм – ширина упругой стенки исходного образца;

$b_k$  – ширина упругих стенок каркаса.

Подставляя численные значения, получим

$$C_k = 1,25 \text{ мм}$$

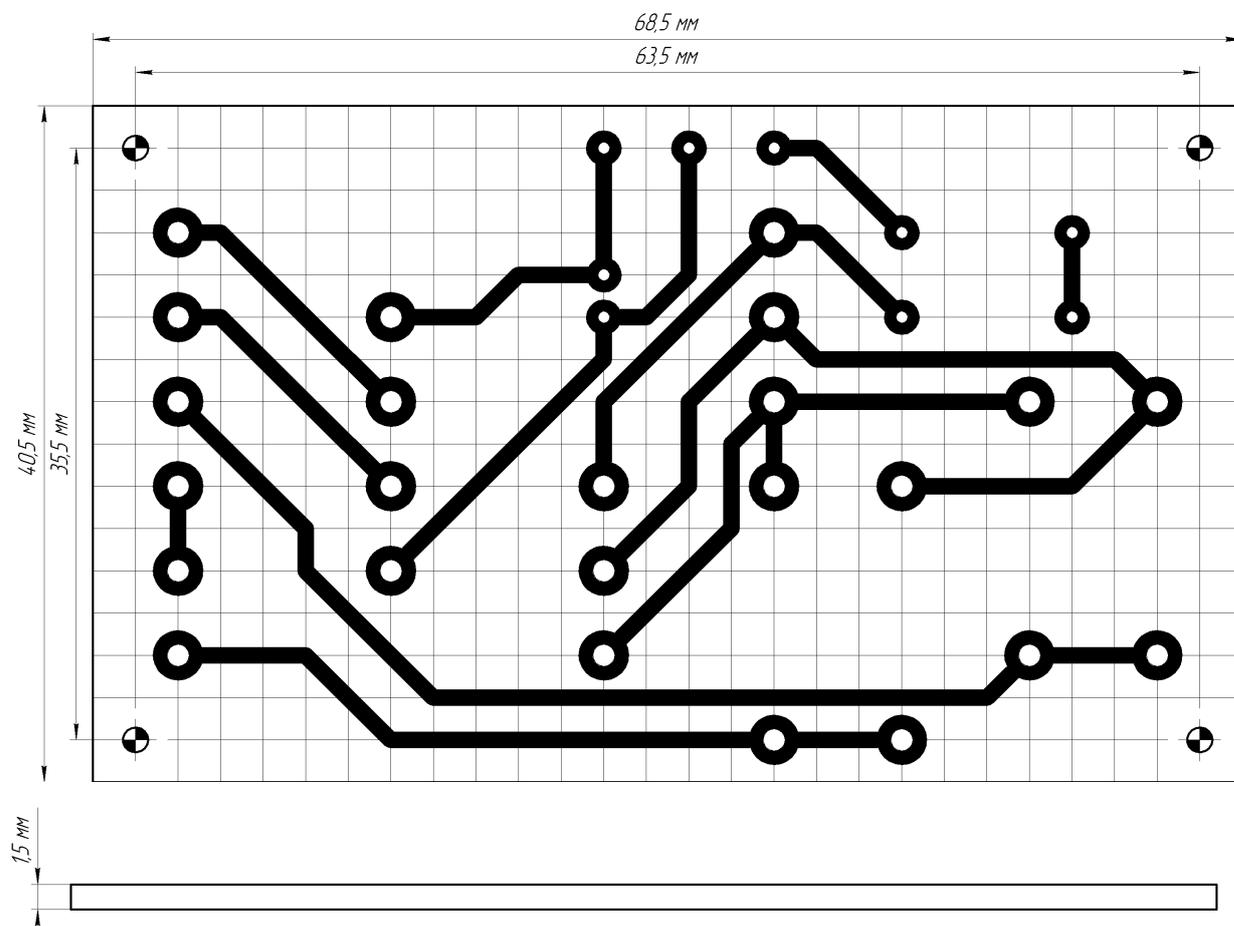
Каркас с пьезодвигателем, удерживают две стойки, выполненных также как и каркас из термостабильного сплава инвара 35НКТ.

Конструктивное исполнение арматуры (кварцедержателей) использовано от уже имеющейся готовой конструкции прецизионного кварцевого резонатора на частоту 5 МГц с АТ – срезом, которое обеспечивает достаточную жесткость и малые воздействия на кварцевую пластину.

Сжимающее воздействие на кварцевую пластину оказывают упоры, выполненные из инвара 35НКТ. Кварцевую пластину ориентируют таким образом, чтобы упоры оказывали давление по оси максимального изменения частоты.» [10].

### 4.3 Конструкция блока питания пьезодвигателя

Была разведена печатная плата блока питания (рисунок 20) и разработан ее сборочный чертеж (рисунок 21).



1. Ширина токопроводящих дорожек 1 мм.
2. Толщина печатной платы 1,5 мм.
3. Толщина трафаретной фольги 0,018 мм
4. Печатная плата должна соответствовать ГОСТ 23752-86.
5. Класс точности 3 в соответствии с ГОСТ 23751-86.
6. Шаг координатной сетки 2,54 мм.
7. Общие допуски по ГОСТ 30893.1: Н14, h14, ± IT14/2.
8. Маркировать дату изготовления краской МКЭ, черная по ОСТ 4ГО.054.205 УХЛ4.
9. Клеить краской МКЭ, черная по ОСТ 4ГО.054.205 УХЛ4.
10. Крепится шурупами М16 к корпусу блока

УГО	Диаметр отверстия, мм	Наличие металлизации	Диаметр контактных площадок, мм	Количество отверстий
	0,8	Нет	2	9
	1,5	Нет	-	4
	1,3	Нет	3	24

Рисунок 20 - Печатная плата блока питания

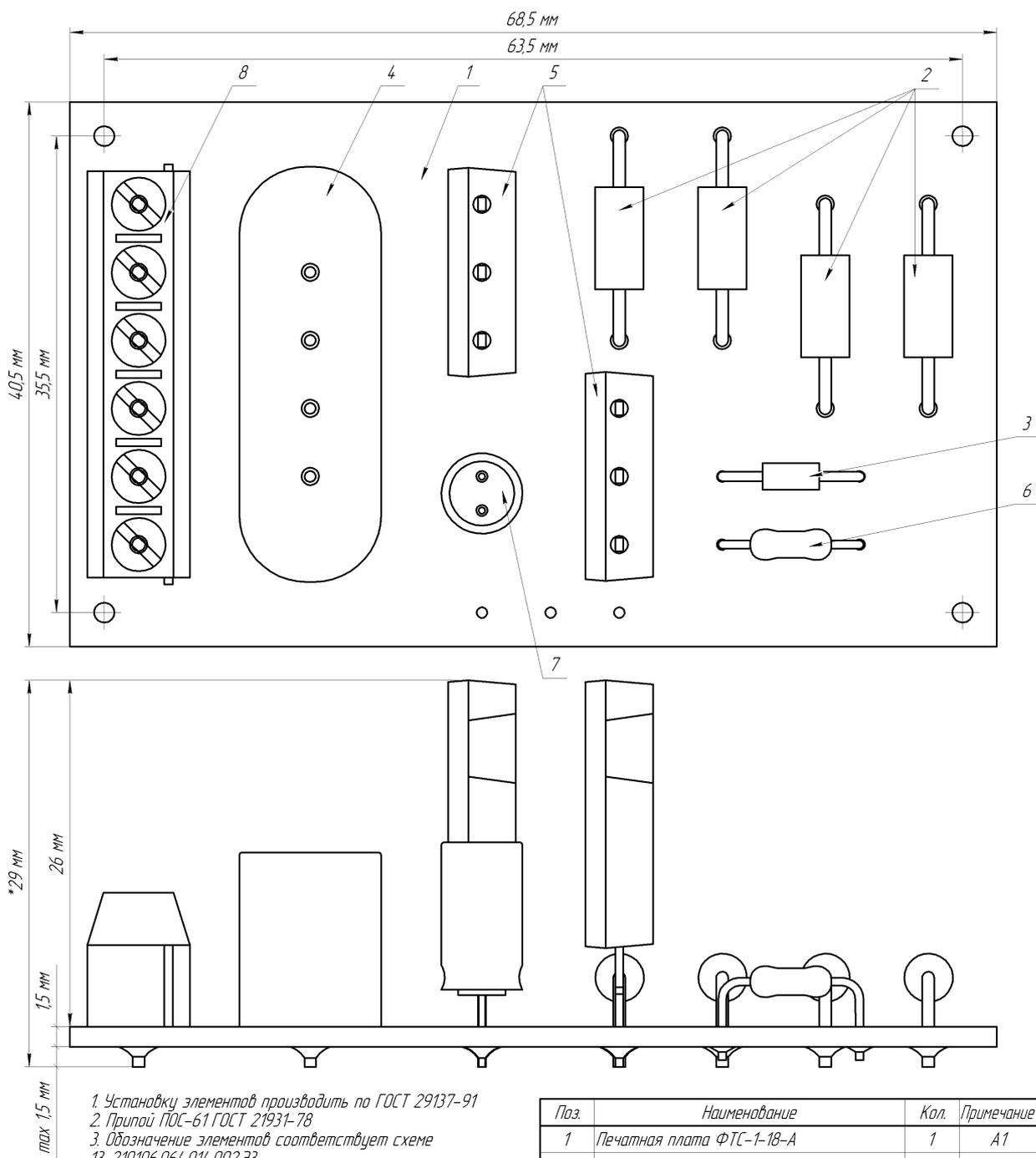


Рисунок 21 - Сборочный чертеж блока питания

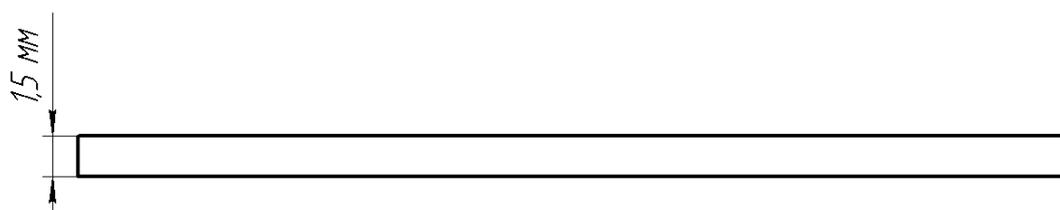
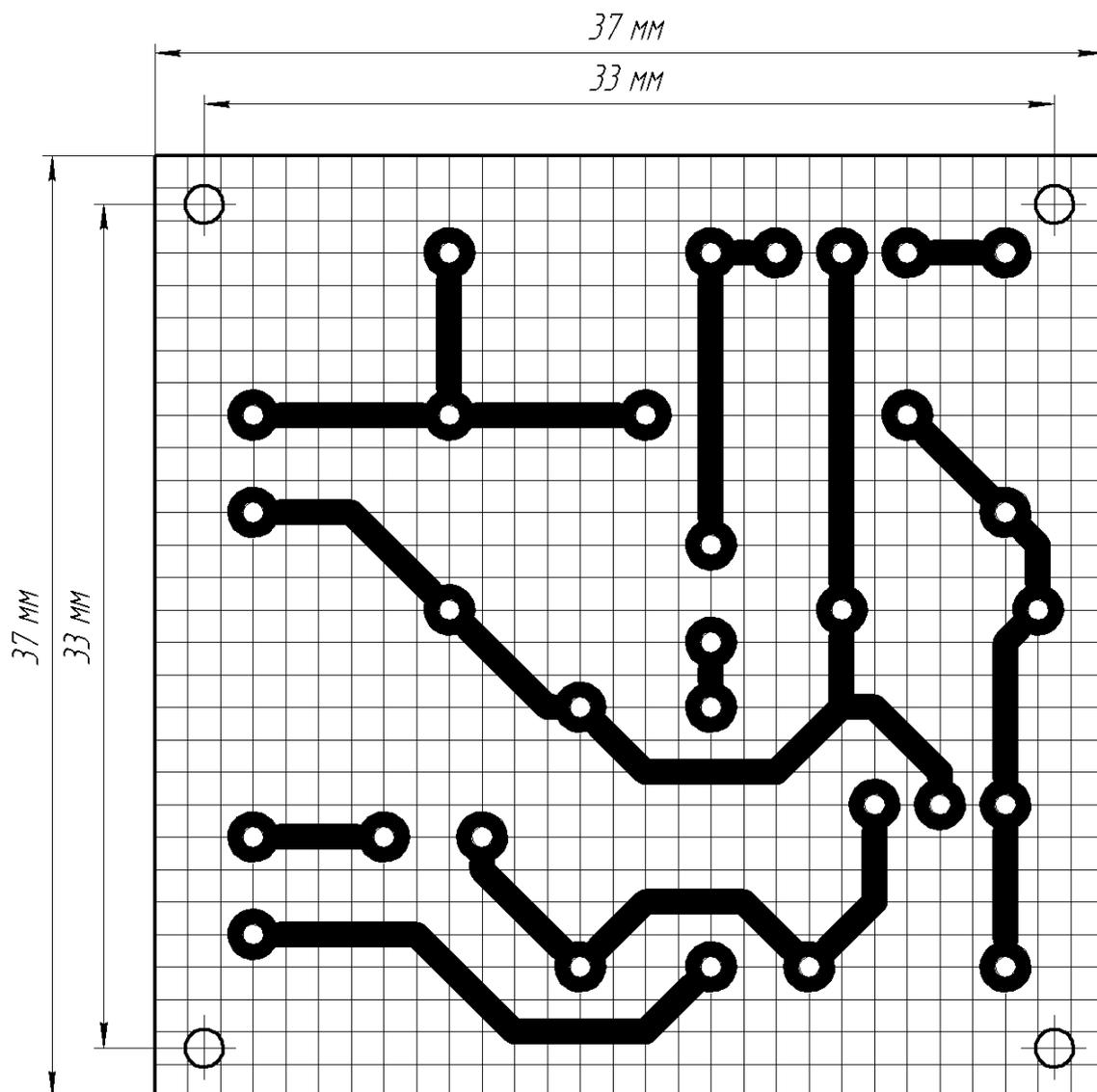
Элементы Устанавливаются на монтажной плате размером

68,58x40,64x1,27 мм (ДxШxТ) с шагом сетки 2.54 мм (одна десятая дюйма). Минимальное расстояние между корпусами элементов составляет 5 мм. Минимальное расстояние между контактами любого элемента схемы составляет два шага сетки. Монтажная плата крепится четырьмя шурупами М1.6 по краям платы к корпусу блока.

#### **4.4 Конструкция усилителя мощности выходной частоты**

Была разведена печатная плата усилителя частоты (рисунок 22) и разработан ее сборочный чертеж (рисунок 23).

Элементы схемы устанавливаются на монтажной плате размером 36,83x36,83x1,5 мм (ДxШxТ), с шагом сетки 1,27 мм (одна двадцатая дюйма). Минимальное расстояние между корпусами элементов составляет 0,9 мм. Минимальное расстояние между контактами любого элемента схема составляет два шага сетки. Монтажная плата крепится четырьмя шурупами М1.6 по краям платы к корпусу блока.



1. Ширина токопроводящих дорожек 1 мм.
2. Толщина печатной платы 1,5 мм.
3. Толщина травящейся фольги 0,018 мм
4. Печатная плата должна соответствовать ГОСТ 23752-86.
5. Класс точности 3 в соответствии с ГОСТ 23751-86.
6. Шаг координатной сетки 127 мм.
7. Общие допуски по ГОСТ 30893.1: Н14, h14, ± IT14/2.
8. Маркировать дату изготовления краской МКЭ, черная по ОСТ 4ГО.054.205 УХЛ4.
9. Клеить краской МКЭ, черная по ОСТ 4ГО.054.205 УХЛ4.
10. Крепится шурупами М1,6 к корпусу блока

УГО	Диаметр отверстия, мм	Наличие металлизации	Диаметр контактных площадок, мм	Количество отверстий
●	0,8	Нет	2	30
⊕	1,5	Нет	-	4

Рисунок 22 - Печатная плата усилителя частоты

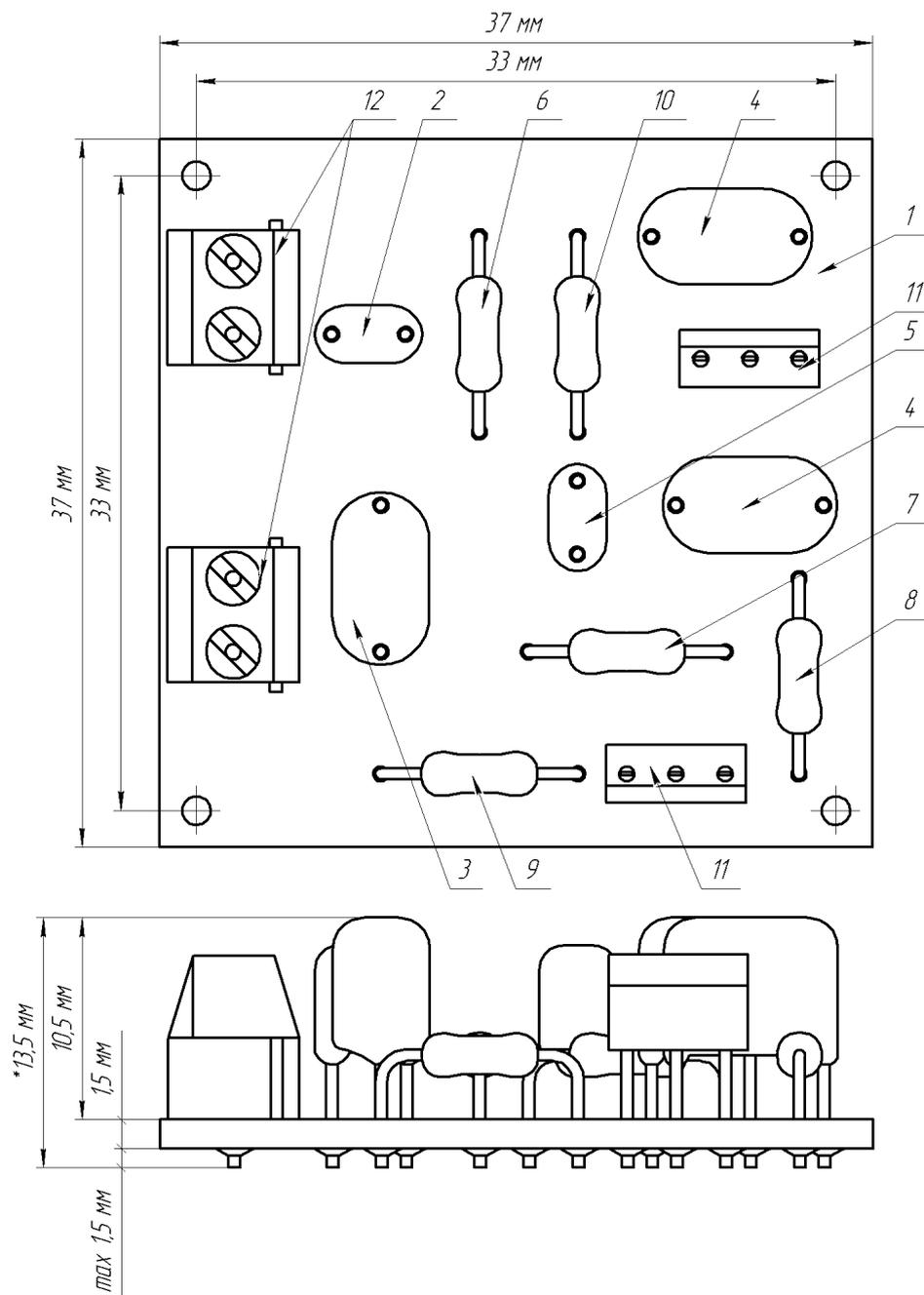


Рисунок 23 - Сборочный чертеж усилителя частоты

### Выводы

В четвертой главе по уже известным методикам проведен расчет пьезоэлектрического двигателя и приведен эскиз конструкции в целом. Разведены печатные платы блока питания и усилителя выходной частоты, изображены их сборочные чертежи.

## Заключение

В данной ВКР разработан кварцевый генератор с изменяемой частотой, работающий на основе пьезоэлектрического двигателя линейных перемещений.

В процессе работы были решены задачи:

1. Обзор состояния вопроса
2. Разработка структурной схемы устройства
3. Разработка электрической принципиальной схемы.
4. Расчет пьезоэлектрического двигателя
5. Разработка печатной платы и сборочного чертежа блока питания
6. Разработку печатной платы и сборочного чертежа усилителя

Разработанная электрическая часть устройства состоит из двух отдельно изготавливаемых блоков: блока питания для пьезодвигателя и усилителя мощности выходной частоты кварцевого генератора.

Регулировка частоты работы кварцевого генератора осуществляется за счет оказания физического давления на кварцевую пластину пьезодвигателем.

Разработанный кварцевый генератор может быть применен в области измерительной техники, в частности технике генерирования и формирования сигналов, в генераторах (задающих, гетеродинах, калибраторах, эталонных частот и других).

Применение пьезоэлектрического двигателя позволило при тех же параметрах уменьшить по сравнению с аналогом размер и структуру устройства.

Спроектированный перестраиваемый кварцевый генератор удовлетворяет требованиям технического задания.

В процессе оформления ВКР использовали литературу [15,17,18,26,]

## Список используемой литературы

1. А.с. 1073881 СССР. Термокомпенсированный пьезоэлектрический резонатор / А.В. Косых, А.Ф. Плонский, Ю.Г. Долгачев (СССР) № 3368327/18-23; Заявлено 16.12.81. Опубликовано 15.02.84. Бюл. № 6 2 с.
2. Альтшуллер Г.Б. Управление частотой кварцевых генераторов – М.: Связь. 1975. – 304 с
3. Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы: Справ. пособие. – М.: Радио и связь, 1984. – 232 с., ил.
4. Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Экономичные миниатюрные кварцевые генераторы. – М.: Связь, 1979. – 160 с.
5. Альтшуллер Г.В., Елфимов Н.Н. Особенности проектирования экономических термокомпенсированных кварцевых генераторов. – Техника средств связи. Сер. ТРС, 1976, вып. 7, с. 144
6. Глюкман Л.И. — Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы/ 3-е изд., перераб. и доп.. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
7. Грошковский Я. Генерирование высокочастотных колебаний и стабильность частоты. – М.: изд-во иностр. литературы, 1953. – 364 с
8. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь.-1983. – 136 с
9. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М: Высш. школа, 1982. -496 с.: ил.
10. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. – М.: Металлургия, 1986. – 496 с.
11. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели. – «Энергия» 1980. – 112 с.

12. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергия, 1978. – 248 с.
13. Мартынов В.Л., Райков П.И. Кварцевые резонаторы. – М.: Советское радио, 1976. – 64с.
14. Масленников М.Ю. Справочник разработчика и конструктора РЭА. –М.: Радио и связь, 1988.-300с.: ил.
15. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts\\_VInrE3Q/BKP\\_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Оформление ВКР (Дата обращения: 18.02.2021)
16. Плонский А.Ф., Медведев В.А., Якубец-Якубчик Л.Л. Транзисторные автогенераторы метровых волн, стабилизированные на механических гармониках кварца. – М.: Связь, 1969. – 208 с.
17. Положение о выпускной квалификационной работе: утв. решен. учен. совет. от 21.11.2019 решение №254 : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts\\_VInrE3Q/BKP\\_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Положение о ВКР (Дата обращения: 18.02.2021)
18. Порядок обеспечения самостоятельности выполнения письменных работ в ТГУ : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts\\_VInrE3Q/BKP\\_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Положение о Антиплагиате (Дата обращения: 18.02.2021)
19. Пьезотехника и акустоэлектроника.: Межвузовский сборник научных трудов / под.ред. А.Ф. Плонского. – Омск: ОмПИ, 1983. – 160 с.
20. Семиглазов А. М. Кварцевые Генераторы. – М.: Радио и связь, 1982. – 88с
21. Семьян А.П. 500 схем для радиолюбителей. Источники питания. – Спб.: Наука и техника 2005. – 408 с.

22. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, И. М. Фадин, В. Н. Сидоров. - СПб.: Энергоатомиздат 1992. —448 с: ил.
23. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник/Под ред. Б. Л. Перельмаиа. – М.: Радно и связь, 1981. – 656 с.
24. Шитиков Г.Т. Стабильные автогенераторы метровых и дециметровых волн. – М.: Радио и связь, 1983, – 256 с
25. Шитиков Г.Т., Цыганков П.Я., Орлов О.М. Высокостабильные кварцевые автогенераторы. – М.: Сов. радно. 1974. – 396 с
26. Электроника и наноэлектроника, управление в технических системах, электроэнергетика и электротехника. Выполнение бакалаврской работы / сост. Позднов М.В., Прядилов А.В. - Тольятти: ТГУ, 2019. - 41 с.
27. Diodes Incorporated [Электронный ресурс]. URL: <https://www.diodes.com> (дата обращения: 27.05.2023)
28. Electrical resistance and conductance [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistance\\_and\\_conductance](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance_and_conductance) (дата обращения: 17.05.2021)
29. Electronic Components Datasheets [Электронный ресурс] URL: <http://www.datasheets.ru> (дата обращения: 17.02.2023)
30. Rajendra P. Fundamentals of electrical engineering. - PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. P.1064
31. Sahdev S.K. Basic Electrical Engineering. Pearson India, 2015. P.768