

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОФИЗИКИ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
(полное название кафедры)

Утверждаю

Зав. кафедрой ТЭВН

Трофимов А.С.
(подпись, инициалы, фамилия)

«___» _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Шмакова Ильи Владимировича

(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

Разработка и изготовление генератора импульсных токов апериодической формы

(тема работы)

факультет энергетики

(полное название факультета)

Направление подготовки 13.03.02- Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки бакалавра)

**Руководитель
от НГТУ**

Мюльбаер А.А.

(фамилия, имя, отчество)

(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

**Автор выпускной
квалификационной работы**

Шмаков И.В.

(фамилия, имя, отчество)

ФЭН, ЭН1-64

(факультет, группа)

(подпись, дата)

Консультанты по разделам:

Экономический

(краткое наименование раздела)

Охрана труда

(краткое наименование раздела)

Кравченко А.В.

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

Парахин А.М.

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

Новосибирск 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОФИЗИКИ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Трофимов А.С.
(фамилия, имя, отчество)

(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРА**

студенту Шмакову Илье Владимировичу
(фамилия, имя, отчество)

Направление подготовки 13.03.02- Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

факультет энергетики
(полное название факультета)

Тема Разработка и изготовление генератора импульсных токов
(полное название темы выпускной квалификационной работы бакалавра)
апериодической формы

Исходные данные (или цель работы) Генератор импульсных токов предназначен для
проведения испытаний импульсной электрической нагрузкой по ГОСТ 30265-95
варисторов с классификационным напряжением от 200 до 1200 В, форма
испытательного импульса тока – апериодическая, амплитуда тока от 150 А до
10 кА, периодичность следования испытательных импульсов не реже одного раза в
минуту.

Структурные части работы 1 Введение

2 Обзор опыта проектирования генераторов импульсных токов

3 Определение параметров элементов генератора импульсных токов

4 Изготовление генератора импульсных токов

5 Меры по охране труда при проведении испытаний

6 Расчет себестоимости разработки и изготовления установки

7 Заключение

Задание согласовано и принято к исполнению.

**Руководитель
от НГТУ**

Мюльбаер А.А.

(фамилия, имя, отчество)

(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

Студент

Шмаков И.В.

(фамилия, имя, отчество)

ФЭН, ЭН1-64

(факультет, группа)

(подпись, дата)

Тема утверждена приказом по НГТУ № _____ от « ___ » _____ 2020 г.

изменена приказом по НГТУ № _____ от « ___ » _____ 2020 г.

ВКР сдана в ГЭК № _____, тема сверена с данными приказа

(подпись секретаря государственной экзаменационной комиссии по защите ВКР, дата)

(фамилия, имя, отчество секретаря государственной
экзаменационной комиссии по защите ВКР)

Консультанты по разделам:

Экономический

(краткое наименование раздела)

Охрана труда

(краткое наименование раздела)

Кравченко А.В.

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

Парахин А.М.

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

АННОТАЦИЯ

- 1 Название работы: «Разработка и изготовление генератора импульсных токов апериодической формы».
- 2 Ключевые слова: генератор импульсных токов, испытания варисторов, апериодическая форма импульса, измерение импульсных токов и напряжений.
- 3 Объем работы: 69 стр.
- 4 Количество иллюстраций: 43 ед., таблиц: 9 ед., источников литературы: 14 ед.
- 5 Цель научной работы: разработать и изготовить генератор импульсных токов апериодической формы импульса для испытания низковольтных варисторов на воздействие импульсной электрической нагрузкой.
- 6 Актуальность работы и научная новизна: в современной технике невозможно обойтись без полупроводниковых компонентов, коими являются, в том числе, и варисторы. Они предназначены для получения параметров, которых невозможно добиться прочими элементами или же иные схемы, в частности, они применяются в технике для защиты электроники от импульсных перенапряжений. Компания «НИИ «Гириконд» специализируется на производстве варисторов, они собираются расширять линейку выпускаемых варисторов и им требуется новый компактный генератор импульсных токов, который будет выдавать ток с длительностью импульса 8 мкс и длительностью фронта 20 мкс, диапазон требуемых амплитуд тока от 0,15 кА до 10 кА.
- 7 Методы исследования: метод математического моделирования, метод компьютерного моделирования.
- 8 Основные результаты, полученные в ходе работы: определены параметры основных элементов силовой и вторичной цепей, схемы измерений; спроектированы и изготовлены специзделия; выполнен монтаж и испытания генератора импульсных токов.
- 9 Список публикаций, входящих в перечень ВАК, по теме выпускной квалификационной работы:
Разработка генератора импульсных токов прямоугольной формы для испытания варисторов [Электронный ресурс] / А. А. Мюльбаер, Ю. В. Целебровский, Н. А. Черненко, С. С. Шевченко, Н. В. Щеглов, Д. А. Зыкова, В. А. Кравченко, И. В. Шмаков // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн. – 2020. – № 1. – С. 28–34.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Обзор опыта проектирования генераторов импульсных токов	6
1.1 Мировой опыт создания и применения генераторов импульсных токов	6
1.2 Виды накопителей энергии	7
1.3 Виды коммутаторов.....	10
1.4 Способы измерения импульсных токов и напряжений.....	13
2 Определение параметров элементов генератора импульсных токов	17
2.1 Расчет основных параметров силовой части генератора импульсных токов	17
2.1.1 Расчет первичных параметров силовой схемы	17
2.1.2 Проверка параметров на компьютерной модели	24
2.2 Проектирование подстроечного резистора.....	26
2.3 Расчет параметров шунта и разработка его конструкции	29
2.4 Расчет и разработка делителей напряжения	32
2.4.1 Резистивный делитель напряжения.....	32
2.4.2 Емкостной делитель напряжения	35
2.5 Зарядно-разрядный резистор.....	42
2.6 Разработка платы защиты измерений.....	39
3 Изготовление установки.....	43
3.1 Изготовка специзделий	43
3.2 Выбор комплектующих серийного производства.....	51
3.3 Сборка и наладка установки.....	52
4 Меры по охране труда при проведении испытаний.....	54
5 Расчет себестоимости разработки и изготовления установки	57
Заключение	61
Список литературы	62
Приложение А. Изображения установки и ее деталей на разных этапах сборки	64

ВВЕДЕНИЕ

При разработке и производстве варисторов требуется постоянный контроль их основных параметров. Одним из таких параметров является способность выдерживать воздействие импульсной электрической нагрузки. Согласно требованиям ГОСТ 30265-95 «Варисторы. Метод испытания импульсной электрической нагрузкой» [1] испытания проводятся при двух различных формах импульсов тока – аperiodической и прямоугольной. Для создания импульсов тока, заданной формы и амплитуды применяются специализированные испытательные установки, называемые – генераторы импульсных токов. Подобные генераторы являются уникальными электрофизическими установками и разрабатываются под конкретную задачу отдельно.

В данной работе ведется речь о создании генератора импульсных токов с аperiodической формой импульса для испытания импульсной электрической нагрузкой варисторов с классификационным напряжением от 200 В до 1200 В. Амплитуда испытательного импульса тока должна задаваться в пределах от 150 А до 10 кА, а форма соответствовать требованиям ГОСТ 30265-95 (длительность фронта – 8 мкс, длительность импульса на полувысоте – 20 мкс). Т. к. испытания варисторов могут проводиться серией импульсов, то генератор импульсных токов должен генерировать импульсы тока с частотой не реже 1 раза в минуту.

С целью разработки и изготовления генератора импульсных токов были поставлены и решены следующие задачи:

- 1 определение параметров элементов силовой цепи;
- 2 разработка и изготовление датчиков тока и напряжения;
- 3 разработка и изготовление специзделий, подбор комплектующих серийного производства;
- 4 обеспечение мер по охране труда при проведении испытаний;
- 5 расчет себестоимости изготовления генератора;
- 6 изготовление генератора.

1 ОБЗОР ОПЫТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

1.1 МИРОВОЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

В науке и технике возникают задачи, для решения которых необходимо создать ток большой величины на коротком промежутке времени. Это может быть необходимо для создания сильных магнитных полей. Импульсы тока применяются в промышленности: для металлообработки, магнитной штамповки, сепарации металлической стружки, на горно-обогатительных комбинатах при обогащении породы, контактной точечной сварке различных конструкций. В науке же применяются для создания мощных магнитных полей в ускорителях заряженных частиц и термоядерных реакторах.

В 1963 компания *General Atomic* создает установку *Magneform*. Она предназначена для обработки тонкостенных деталей магнитным полем, ее параметры составляли: 20 кДж, 20 кВ [5].

При строительстве используется электрогидравлический эффект. Он позволяет разрушать крупные камни и старые фундаменты и др. Импульсные емкостные накопители применялись магнитно-импульсной сварке кабелей. Они устанавливались на мобильное шасси, которое входило в состав ремонтных и строительных бригад. Было выпущено 1000 мобильных мастерских [5]. В авиации разрабатывались магнитные импульсные противо-оледенительные системы. Они должны были вызывать упругие деформации алюминиевой оболочки, что должно было скалывать лед. В 1991 году во ВНИИЭФ был введен комплекс «Искра-5», его энергия составляла 67,28 МДж, напряжением 50 кВ, и максимальным током одной ячейки 0,3 МА [5]. В 1994 году в СпбГТУ была создана установка для создания мощных магнитных полей с энергией в 1,6 МДж, напряжением 50 кВ и амплитудой тока 3 МА [5].

В данной работе рассматривается применение в качестве испытательного стенда для проверки варисторов на энергоемкость.

1.2 ВИДЫ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В импульсных установках применяются разнообразные накопители энергии. Они различаются по запасенной энергии, скорости ее отдачи, максимальным значениям отдаваемого тока, сроку хранения энергии без подпитки от источника энергии, механизму работы и связанным с этим особенностям. Существуют следующие типы накопителей: емкостные, индуктивные, магнитокумулятивные, ударные, униполярные и химические. Области их применения можно определить по рисунку 1.1.

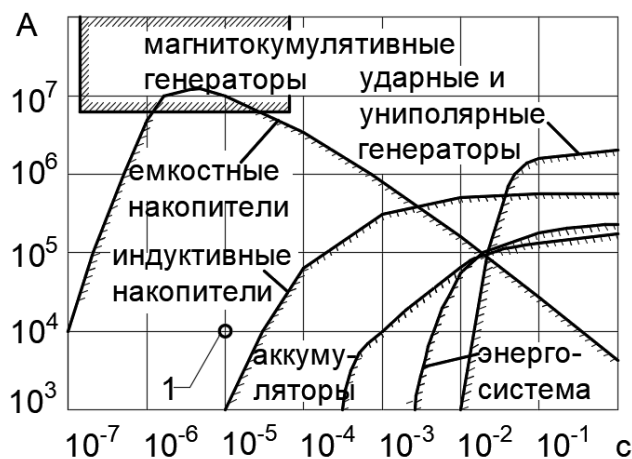


Рисунок 1.1– Максимальные значения и длительности импульсных токов, получаемых от различных накопителей энергии [3], точка 1 является рабочей для данного проекта

Емкостные накопители представляют из себя конденсаторы, которые были заряжены до определенного напряжения. Энергия запасается в виде электрического поля. Нужный запас энергии может сохраняться достаточно продолжительное время, хотя все же он расходуется в виде токов утечки в изоляции. Достигаемые значения энергии равны 10^6 – 10^7 Дж. Энергию, запасаемую в емкостном источнике, можно рассчитать по формуле (1.1):

$$W_M = \frac{C \cdot U_0^2}{2}; \quad (1.1)$$

где: C – емкость конденсатора, Ф; U_0 – зарядное напряжение, В.

Конденсаторы в сравнении с другими накопителями способны быстро отдавать накопленную энергию, что позволяет получать большие токи. В импульсных установках применяются специальные импульсные конденсаторы, которые имеют малую собственную индуктивность и активное сопротивление. К тому же они должны быть достаточно экономичными, то есть иметь достаточный ресурс, чтобы их приходилось менять не слишком часто, и высокую удельную энергию, которая влияет на занимаемое установкой пространство. Также необходимо иметь представление о режиме работы установки, о создаваемом импульсе (о спектре создаваемых частот), что тоже влияет на выбор конденсатора. Установки на основе емкостных накопителей применяются в промышленности для контактной сварки, очистке породы, магнитной штамповки.

Индуктивные накопитель энергии представляют из себя катушку индуктивности, на которую подается электрический ток и в момент коммутации энергия, запасенная на ней, отдается на объект испытаний. Энергия запасается в виде магнитного поля. При энергиях более 10^6 Дж индуктивные накопители более выгодные, чем емкостные. Энергия индуктивного накопителя рассчитывается по формуле (1.2):

$$W_M = \frac{L \cdot I_0^2}{2}; \quad (1.2)$$

где: L – индуктивность накопителя, Гн; I_0 – ток в накопителе, А.

У индуктивных накопителей энергии есть проблема, связанная с тем, что из-за активного сопротивления имеются большие потери энергии, которые могут быть сопоставимы с энергией подпитки. Для того чтобы решить данную проблему существуют индуктивные накопители, созданные на базе сверхпроводников, что позволяет добиться больших энергий отдачи (около 10^7 Дж – для не сверхпроводящей катушки, 10^9 Дж для сверхпроводящей катушки). У сверхпроводящих индуктивных накопителей есть специфичный способ коммутации на нагрузку: сверхпроводящая закоротка параллельно нагрузке в один момент выводится из сверхпроводящего состояния, и вся энергия идет на нагрузку.

Данные накопители нашли свое применение в ускорителях частиц и термоядерных реакторах для создания сильных магнитных полей.

Механические накопители имеют две основных разновидности: ударный генератор и униполярный генератор.

Ударный генератор представляет из себя генератор и привод. Привод раскручивает обесточенный ротор генератора до рабочих оборотов, после чего на статор подается ток возбуждения, при этом в статоре вырабатывается электрическая энергия, которая поступает на нагрузку. Генераторы обычно являются модифицированными турбогенераторами, у которых усилены обмотки. Накапливаемая энергия может достигать 10^9 Дж, а токи до 10^5 А.

Униполярный генератор имеет такой же алгоритм работы как и ударный, но вместо синхронного генератора у них модернизированный двигатель постоянного тока. Развиваемая энергия имеет значения $10^8 - 10^9$ Дж и ток до 10^6 А.

У этих типов генератора имеется ограничение по максимальному напряжению до нескольких десятков киловольт из-за сложности коммутации снимаемого тока с коллектора или контактных колец. Применяются такие генераторы для зарядки других импульсных источников и низкоомной нагрузки, например, при электроискровой обработке металлов.

Химические и комбинированные накопители. Химическими являются импульсные аккумуляторы. Хотя и могут применяться и обычные аккумуляторы, но только при больших длительностях импульса и с тем условием, что ресурс этих аккумуляторов не является чем-то решающим в конструкции или технологическом процессе. Импульсные аккумуляторы имеют специально доработанную конструкцию, рассчитанную на сверхтоки. Перспективные образцы могут иметь удельную энергию более 10^6 Дж/кг. Химические источники обладают высокой энергоемкостью в сравнении с другими накопителями, позволяют эксплуатировать их в передвижных установках, сложны в эксплуатации, имеют малый срок службы и медленное быстроедействие.

Взрывогенераторы или же магнитокумулятивные генераторы. Они имеют следующий принцип действия: на обмотку подается ток, после происходит подрыв взрывчатки, которая окружает обмотку, происходит обжатие обмотки, меняется ее геометрия, как следствие меняется магнитное поле, что ведет к появлению импульсных токов на выводах обмотки или если требуется появление мощных магнитных полей. Данный накопитель компактней остальных конструкций, но из-за того что есть необходимость взрыва, требуется тщательная подготовка к эксперименту, ведь по его окончанию накопитель разрушается полностью или же требует замены внутренних частей как в водородном много-разовом генераторе [3]. С помощью таких генераторов получают токи величиной около 200 – 300 МА.

1.3 ВИДЫ КОММУТАТОРОВ

В состав генератора помимо накопителя энергии входят и другие компоненты. Для того чтобы в цепи начали происходить процессы ее необходимо коммутировать, это выполняют коммутаторы.

В импульсной технике применяется несколько видов коммутаторов. Самым простым и надежным является разрядник. Разрядник состоит из двух одинаковых, как правило, электродов расстояние между которыми может быть заполнено газом, жидкостью, твердым диэлектриком, а также в качестве диэлектрика может быть использован вакуум.

В качестве газа может использоваться как атмосферный воздух, так и специальные газы с повышенным или пониженным давлением. Коммутационное напряжение в этих разрядниках регулируется изменением расстояния между электродами, а использование различных газов под различным давлением или вакуума позволяют менять рабочий диапазон и размеры самого коммутатора. С вакуумными или газовыми разрядниками могут быть проблемы при обслуживании, так как дуга при горении повреждает электроды их необходимо ремонтировать.

При использовании жидкостей в качестве диэлектрика можно добиться больших рабочих напряжений при аналогичных размерах по сравнению с вакуумными или газовыми разрядниками. После разряда нужно выждать некоторое время для того, чтобы в диэлектрике осели продукты распада жидкости или частицы электродов. Также стоит отметить, что перед использованием может потребоваться очистка жидкого диэлектрика от твердых примесей, вакуумирование от растворенных газов и дегидратация.

Разрядники с твердым диэлектриком приходится обслуживать каждый раз, как происходит его срабатывание из-за того, что требуется заменять изоляционный промежуток. В этот самый момент может быть проведено обслуживание электродов. Серьезным недостатком двухэлектродных разрядников является то, что невозможно точное управление моментом срабатывания.

Существуют управляемые разрядники. Самым простым примером является тригатрон. В его конструкции используются 3 электрода: 2 рабочих и 1 управляющий. На управляющий электрод подается потенциал, который позволяет произвести пуск. Регулирование рабочих зон также осуществляется сменой рабочей среды, увеличением расстояния между электродами и регулировкой давления.

Газоразрядные коммутаторы. Таковыми являются тиратроны и игнитроны.

В тиратронах используется три основных электрода: анод, катод, сетка, экранирующая анод от катода. Колба заполняется газом (например, водородом или ртутью) [3]. Дуговой разряд гаснет тогда, когда потенциал анода равен нулю. Недостатком можно назвать то, что при превышении рабочего напряжения газ-наполнитель может начать бомбардировать катод своими ионами, что в свою очередь приводит к его повреждению. Для решения данной проблемы применяется водород. Плюсы тиратронов в том, что они могут выдерживать большие перегрузки по току и напряжению, а также имеют высокую крутизну нарастания тока. Рабочие параметры могут быть следующими: 2 кА в импульсе и 30 кВ рабочего напряжения.

Игнитрон – колба с тремя электродами: катод, анод и запускающий электрод. Катод выполнен из ртути и вблизи от него расположен запускающий электрод. Анод выполняется из графита или из тугоплавкого металла. При запуске на запускающий электрод подается разряд, который инициирует появление искрового разряда, что в свою очередь приводит к появлению разряда между основными электродами. Рабочей областью является напряжение в несколько десятков киловольт и ток в несколько десятков килоампер. Примеры устройства газоразрядных коммутаторов можно увидеть на рисунке 1.2.

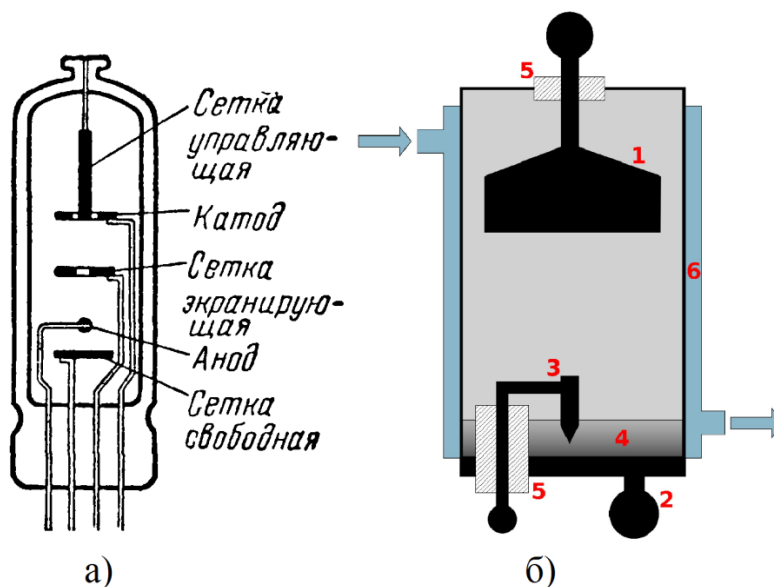


Рисунок 1.2 – структура внутреннего устройства тиратрона (а), структура внутреннего устройства игнитрона (б), где 1 – анод, 2 – катод, 3 – поджигающий электрод, 4 – ртуть, 5 – изоляторы, 6 – охлаждение

Стоит отметить, что при больших рабочих напряжениях игнитрон и тиратрон будут способны излучать рентгеновские лучи, об этом необходимо помнить и принимать меры по защите от них.

У всех перечисленных выше коммутаторов во время работы присутствует электрическая дуга, которая является источником помех, оказывающих влияние на измерительные цепи. Для решения этой проблемы можно максимально отдалить коммутатор и измерительные цепи или же экранировать ком-

мутатор и приборы измерения, также можно применить устройства, в которых при коммутации дуга не загорается.

Полупроводниковые коммутаторы все активнее применяются в испытательной технике. Применяются коммутаторы на основе тиристорov, симисторов, динисторов [5], фототиристорov, а также на основе мощных силовых транзисторов [4]. Основным преимуществом является контролируемый момент срабатывания, отсутствие горячей дуги, отсутствие необходимости обслуживания электродов. Недостатком тиристорov и фототиристорov можно выделить тот факт, что они имеют меньшую допустимую крутизну нарастания тока.

Отличием силовых транзисторов от вышеперечисленных элементов в том, что транзистор имеет контролируемый момент закрытия, чтобы он закрылся току не обязательно переходить через ноль. Это позволяет создавать установки с контролируемой длительностью импульса [4].

Основные параметры коммутаторов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры коммутаторов

Тип	Рабочий ток, $I_{\text{раб}}$, А	Рабочее напряжение, $U_{\text{раб}}$, В	Скорость нарастания тока, dI/dt , А/с	Ресурс устройства
Разрядник	$200 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	–	10^4
Управляемый разрядник	10^5	10^5	–	10^4
Полупроводниковый	$140 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^9$	10^5
Тиратрон	$100-150 \cdot 10^3$	$5000-100 \cdot 10^3$	10^{12}	10^6
Игнитрон	10^4	10^4	10^{10}	10^6

1.4 СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Мало коммутировать цепь, так же необходимо знать, что происходит в ней. Для этого нужны датчики, которые будут замерять ток и напряжение.

Для корректных измерений напряжения и тока требуется стабильность параметров измерительных датчиков. Это обеспечивается подбором используемых материалов, расчетом оптимальной конструкции на основе предполагаемых режимов работы. Измерения больших значений токов и напряжения на-

прямую вольтметром, амперметром или осциллографом невозможно, поэтому необходимо применять специальные датчики, которые позволят это сделать.

Резистивный делитель напряжения является самым простым способом измерения высокого напряжения. Состоит из нескольких последовательно соединённых резисторов и присоединяется параллельно объекту измерений. Полное сопротивление делителя должно быть многократно больше сопротивления объекта испытаний, чтобы вносить минимальную погрешность в измерения. Делитель имеет минимум два плеча: высокого и низкого напряжения. Измерения производят на одном из плеч, а потом, зная коэффициент деления, рассчитывают значение напряжения на исследуемом объекте. Выходное напряжение рассчитывается по формуле (1.3):

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}} \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad (1.3)$$

где: $U_{\text{ВХ}}$ – напряжение на объекте исследования; R_1 – сопротивление верхнего плеча; R_2 – сопротивление нижнего плеча.

Такие делители целесообразно применять для измерения постоянных или низкочастотных напряжений. Для измерения грозовых импульсных напряжений омические делители с высоким сопротивлением не подходят [6]. Примеры конструкций делителей приведены на рисунке 1.3.

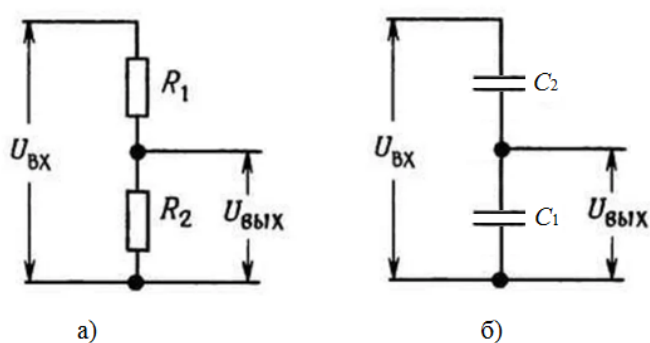


Рисунок 1.3 – Упрощенная схема резистивного делителя напряжения (а), упрощенная схема емкостного делителя напряжения (б)

Емкостной делитель напряжения по схеме исполнения похож на резистивный делитель напряжения, но вместо резисторов применяются конденсаторы. Выходное напряжение рассчитывается по формуле (1.4):

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot C_2}{C_1 + C_2}; \quad (1.4)$$

где: $U_{\text{вх}}$ – напряжение на объекте исследования; C_2 – емкость верхнего плеча; C_1 – емкость нижнего плеча.

Емкостной делитель хорошо себя показывает при измерении импульсных напряжений. Он позволяет измерять коммутационные, импульсные и переменные напряжения с учетом рабочего напряжения конденсатора [6]. Но не способен измерять постоянное напряжение.

Шунт позволяет измерять ток в цепи, измеряя пропорциональное падение напряжение на нем. Работает на постоянном токе, на переменном и способен измерять импульсный ток. Выходное измеряемое напряжение находится по формуле (1.5):

$$\Delta U = i \cdot R + L \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}; \quad (1.5)$$

где: i – ток, протекающий по шунту, А; r – активное сопротивление шунта, Ом; L – индуктивность шунта, Гн; M – взаимдукция с другими объектами, Гн; di/dt – скорость изменения тока в цепи, А/с.

При постоянном токе падение напряжения зависит от активного сопротивления, но при переменном и импульсном появляется индуктивная составляющая напряжения, которая зависит от скорости изменения тока и от индуктивности шунта. Индуктивность уже зависит от конструкции шунта. При проектировании ее стараются уменьшить. Этого можно добиться за счет коаксиальной конструкции или бифилярной намотки резистивного участка. Магнитный поток, создаваемый протекающим током, при таких типах конструкции взаимно вычитается и индуктивность шунта уменьшается. Также благодаря этому снижаются взаимные магнитные связи с другими объектами, что благоприятно влияет на измерения. При измерениях импульсных токов также стоит не забывать про такое явление как скин-эффект.

Пояс Роговского представляет из себя воздушный трансформатор тока. На сердечник из немагнитного материала наматывается вторичная обмотка,

первичной обмоткой чаще всего являются токоведущие шины. Ток, снимаемый со вторичной обмотки, должен соответствовать току в шине, а поэтому требуется внимательно отнестись к тому, как расположены рядом посторонние токоведущие части. Для пояса может потребоваться дополнительно интегрирующая цепь. Напряжение на поясе Роговского находится по формуле (1.6).

$$U_{\text{ВТТ}} = M \frac{di_1}{dt} \quad (1.6)$$

где: M – взаимная индуктивность между поясом и токоведущей шиной, Гн;
 di_1/dt – скорость изменения тока в первичной цепи, А/с.

Также из-за того, что может возникнуть потребность в измерении малых токов может, применяться многовитковая первичная обмотка. Вся вторичная обмотка образует виток, на который наводятся внешние поперечные поля, и чтобы их скомпенсировать добавляется экран из фольги, и если вторичная обмотка многослойная, то такой слой должен быть проложен в начале каждого слоя [7].

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

2.1 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

2.1.1 РАСЧЕТ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ СХЕМЫ

За основу генератора принята классическая схема генератора импульсных токов с емкостным накопителем энергии. Данная схема показана на рисунке 2.1.

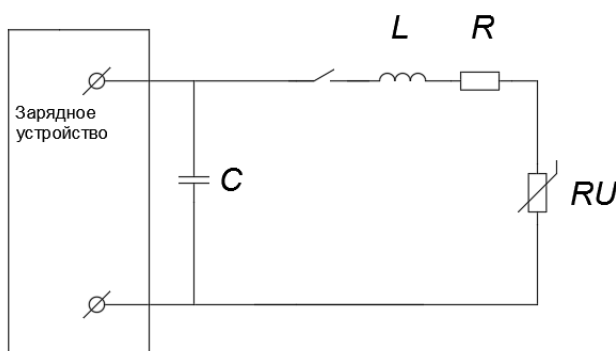


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема генератора

Для нахождения параметров схемы воспользуемся решением в нормированном виде [2]. Для того чтобы рассчитать характеристики разрядного контура нам необходимо знать 4 основных параметра: значение длительности фронта T_1 , значение длительности импульса T_2 , амплитудное значение тока I_m , напряжение U_0 на конденсаторе, при котором будет достигаться максимальное значение тока. Из исходных данных известно только три параметра: $T_1=8$ мкс, $T_2=20$ мкс, $I_m=10$ кА. Напряжение U_0 еще необходимо определить. Оно должно быть достаточно высоким, чтобы испытуемый варистор перешел в открытое состояние, и форма импульса не исказилась.

На данном этапе возможно рассчитать сопротивление силовой схемы, оно пригодится для определения зарядного напряжения U_0 .

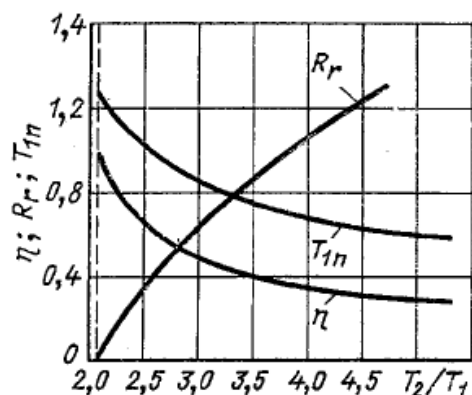


Рисунок 2.2 – зависимость η , R_{Γ} , T_{1n}

По графику на рисунке 2.2 найдем η , R_{Γ} , T_{1n} , для этого надо найти соотношение T_2/T_1 .

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{20}{8} = 2,5 \text{ о. е.}$$

Коэффициент использования по току:

$$\eta = 0,66 \text{ о. е.}$$

Суммарное сопротивление разрядного контура и динамического сопротивления варистора:

$$R_{\Gamma} = 0,36 \text{ Ом;}$$

Нормированная длительность фронта:

$$T_{1n} = 1,02 \text{ о. е.}$$

Рассчитаем зарядное напряжение с помощью замены нелинейного резистора эквивалентным линейным сопротивлением и ЭДС [8]. Для этого нам понадобится вольт-амперная характеристика варистора с классификационным напряжением 1200 В (см. рисунок 2.3).

Для расчета минимального напряжения воспользуемся формулой (2.1):

$$U_p = E_0 + I \cdot R_{\Gamma}; \quad (2.1)$$

где: E_0 – эквивалентная ЭДС, В; I – амплитудное значение тока, А.

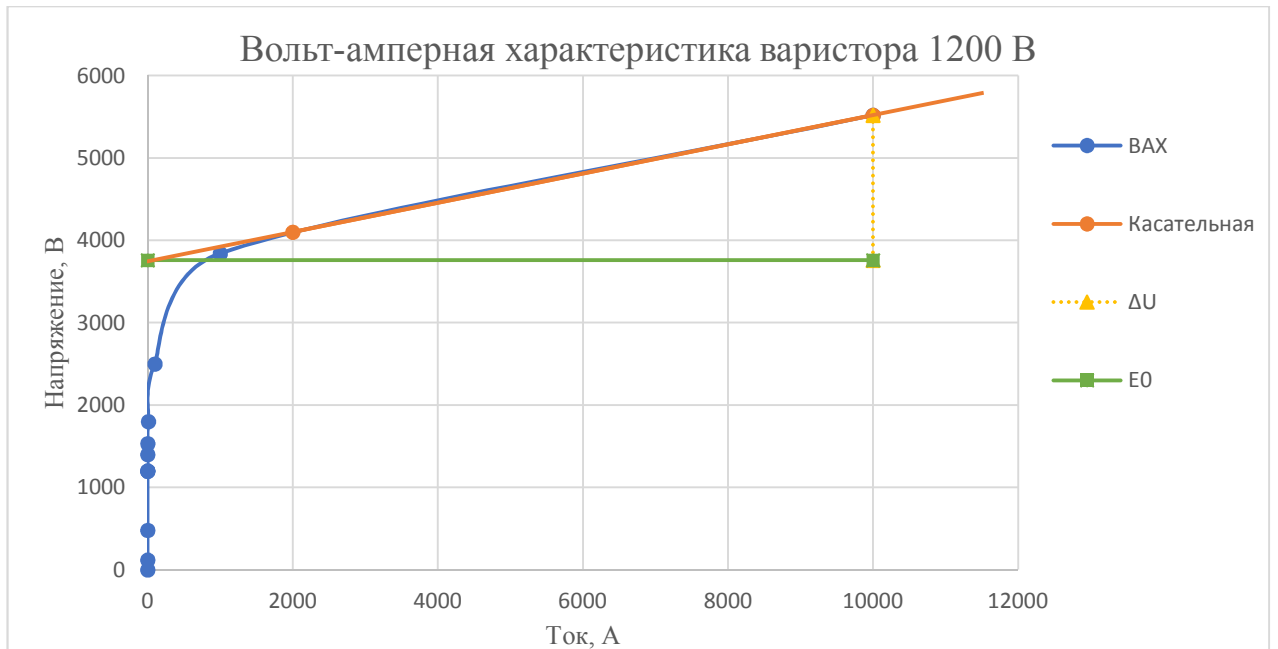


Рисунок 2.3 – ВАХ для варистора $U_{1MA}=1200$ В с построениями для нахождения U_0

Из рисунка 2.3 следует:

$$E_0 = 3760 \text{ В};$$

$$I = 10000 \text{ А};$$

$$U_p = 3760 + 0,36 \cdot 10000 = 7360 \text{ В}.$$

Зарядное напряжение конденсатора должно быть не ниже, чем расчетное напряжение. Поэтому примем $U_0=10000$ В.

При известных параметрах теперь возможно рассчитать основные параметры контура.

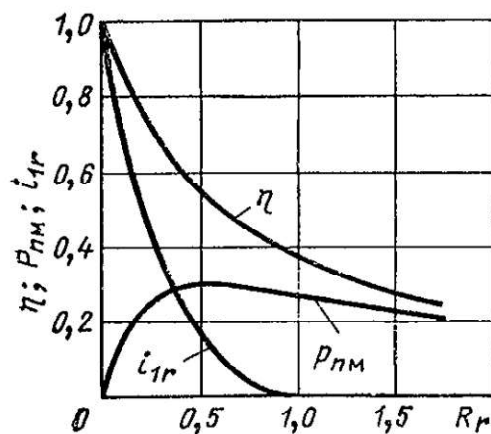


Рисунок 2.4 – Зависимость η , i_{1r} , $P_{нм}$ от $R_{Г}$

Далее зная R_{Γ} можно найти по рисунку 2.4 зависимости η , i_{1r} , $P_{нм}$.

Зная T_{1n} , T_1 найдем постоянную времени T по формуле (2.2):

$$T = \frac{T_1}{T_{1n}}; \quad (2.2)$$

$$T = \frac{8}{1,02} = 7.84 \text{ мкс.}$$

Далее рассчитаем I_{0M} по формуле (2.3):

$$I_{0M} = \frac{I_M}{\eta}, \quad (2.3)$$

$$I_{0M} = \frac{10000}{0,66} = 15151,52 \text{ А.}$$

Далее выразим характеристическое сопротивление контура по формуле (2.4):

$$Z = \frac{U_0}{I_{0M}}; \quad (2.4)$$

$$Z = \frac{10000}{15151,52} = 0,66 \text{ Ом.}$$

Из этого сопротивления, зная постоянную времени T , получим емкость конденсатора C по формуле (2.5):

$$C = \frac{T}{Z}, \quad (2.5)$$

$$C = \frac{7,84}{0,66} = 11,88 \text{ мкФ.}$$

Также находим индуктивность разрядного контура по формуле (2.6):

$$L = T \cdot Z, \quad (2.6)$$

$$L = 0,66 \cdot 7.84 = 5,18 \text{ мкГн.}$$

Основные рассчитанные параметры сведем в таблицу 2.1

Таблица 2.1 – Основные величины

Величина	U_0 , В	I , А	L , мкГн	C , мкФ	R_{Γ} , Ом
Значение	10000	10000	5,18	11,88	0,36

Определим характер переходного процесса в контуре. В случае колебательного процесса появится необходимость ограничивать ток обратной полярности, а также защищать конденсатор от перезаряда.

Согласно методике расчета основных параметров контура [2], при соблюдении неравенства переходной процесс будет колебательным согласно неравенству (2.7):

$$0 < R_{\Gamma} < 1; \quad (2.7)$$

$$0 < 0,36 < 1.$$

Для уточнения параметров контура необходимо рассчитать происходящий в нем переходной процесс. В данной цепи присутствует варистор, что усложнит расчет, его необходимо заменить. Выполним замену на эквивалентное динамическое сопротивление и ЭДС, в этом случае расчетная схема рис. 2.5.а преобразуется в схему, приведенную на рис. 2.5.б.

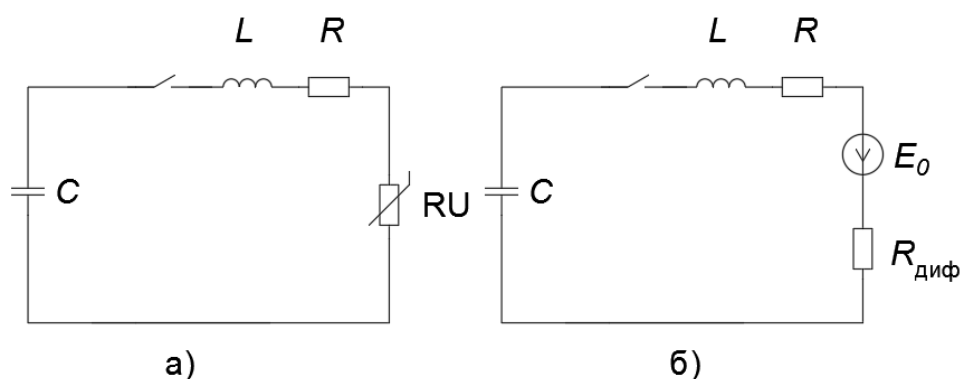


Рисунок 2.5 – схема замещения контура с варистором RU (а), схема замещения с эквивалентным динамическим сопротивлением и эквивалентной ЭДС (б)

Расчет переходного процесса будем производить классическим методом.

В докоммутационном режим ($t=0-$) напряжение на конденсаторе $U_0=10$ кВ, а $E_0=3,76$ кВ. Ток в это режиме $i_{\text{пол}}=0$ А.

В установившемся режим ($t=0+$) напряжение на конденсаторе $U_0=3,76$ кВ, а $E_0=3,76$ кВ. Ток в это режиме $i_{\text{пол}}=0$ А.

Известно, что переходной процесс колебательный, найдем корни характеристического уравнения (2.8) [8], где ω_0 – частота свободной составляющей, рад/с (2.10), δ – постоянная затухания свободной составляющей, с^{-1} (2.9):

$$p = -\delta \pm j \cdot \omega_0; \quad (2.8)$$

$$\delta = \frac{R_{\Gamma}}{2 \cdot L}; \quad (2.9)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C \cdot L} - \frac{R_{\Gamma}^2}{4 \cdot L^2}}. \quad (2.10)$$

Ток в цепи будет изменяться по выражению (2.11):

$$i_{\text{ПОЛ}}(t) = i_{\text{СВ}}(t) + i_{\text{ВЫН}}(t). \quad (2.11)$$

В цепи будет присутствовать только свободная составляющая. Свободная составляющая будет иметь выражение (2.12):

$$i_{\text{СВ}}(t) = \frac{U_0 - E_0}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\delta \cdot t} \sin(\omega_0 \cdot t); \quad (2.12)$$

По имеющимся формулам рассчитаем необходимые значения.

$$\delta = \frac{0,36}{2 \cdot 5,18 \cdot 10^{-6}} = 3,475 \cdot 10^4 \text{с}^{-1},$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{5,18 \cdot 10^{-6} \cdot 11,88 \cdot 10^{-6}} - \frac{0,36^2}{4 \cdot 5,18^2 \cdot 10^{-12}}} = 1,226 \cdot 10^5 \text{рад/с}$$

$$i_{\text{СВ}}(t) = 9,822 \cdot 10^4 \cdot e^{-3,475 \cdot 10^4 \cdot t} \sin(1,226 \cdot 10^5 \cdot t). \quad (2.13)$$

Выражение (2.13) описывает ток, который протекает в контуре, см. рисунок 2.6.

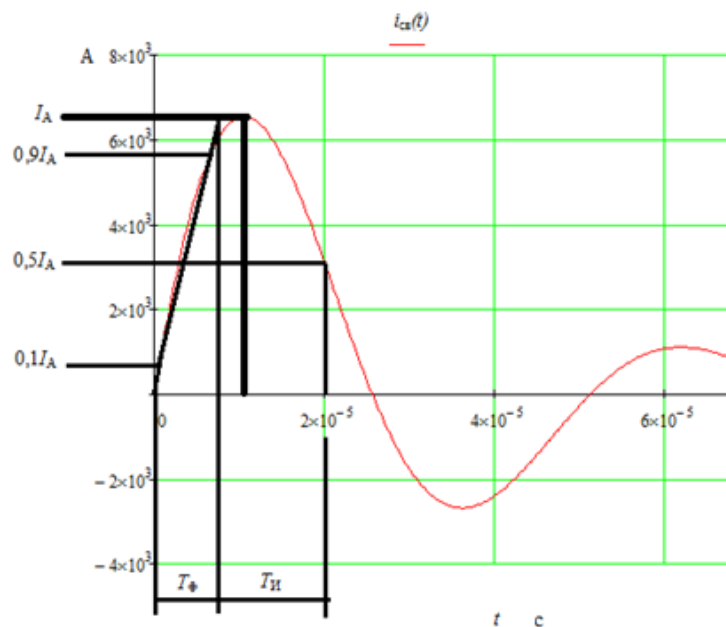


Рисунок 2.6 – Импульс тока в колебательном контуре

Первый полупериод кривой тока на рисунке 2.6 соответствует ГОСТ [1]. Однако обратная полярность превышает $0,2I_A$.

Для улучшения параметров длительности фронта и импульса изменим основные параметры контура: C, L, R_r .

Обновленные параметры приведены в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Новые параметры контура

Величина	L , мкГн	C , мкФ	R_r , Ом
Значение величины	5,1	12	0,4

Проверим их, пересчитав постоянную затухания, частоту колебаний свободной составляющей, построив новый график тока.

По имеющимся формулам рассчитаем необходимые значения:

$$\delta = \frac{0,4}{2 \cdot 5,1 \cdot 10^{-6}} = 3,922 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1},$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{5,1 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 10^{-6}} - \frac{0,4}{2 \cdot 5,1 \cdot 10^{-6}}} = 1,217 \cdot 10^5 \text{ рад/с.}$$

Функция тока в схеме с изменёнными параметрами (2.14):

$$i_{св}(t) = 1,006 \cdot 10^4 \cdot e^{-3,922 \cdot 10^4 \cdot t} \sin(1,217 \cdot 10^5 \cdot t). \quad (2.14)$$

Кривая тока в схеме с новыми параметрами показана на рисунке 2.7.

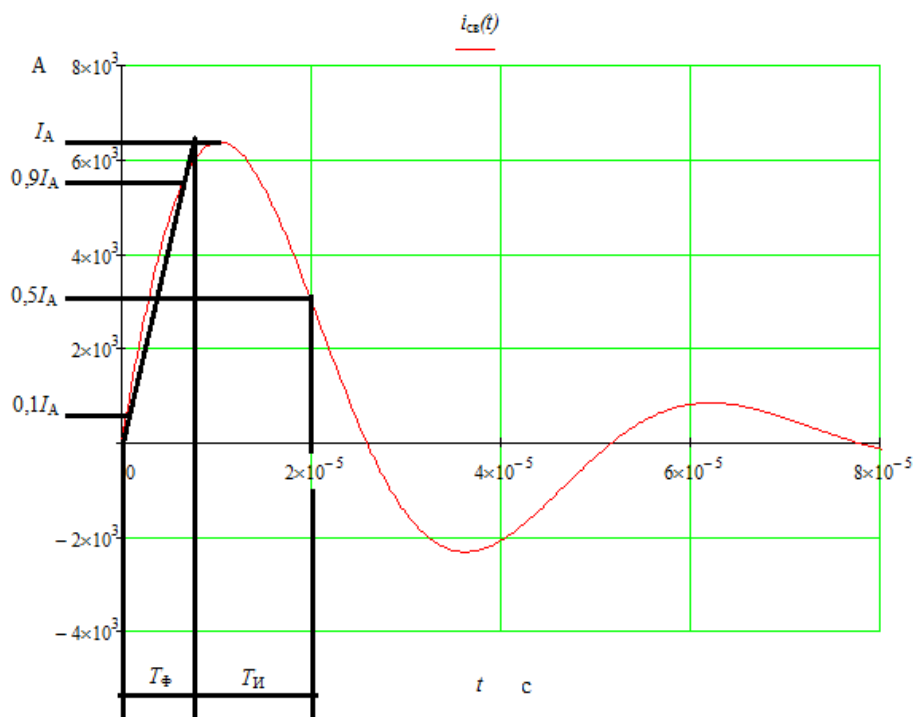


Рисунок 2.7 – Новая форма импульса тока в колебательном контуре

По графику видно, что колебательная составляющая тока слишком большая, она превышает 20% от амплитудного значения, поэтому ее требуется уменьшить. Для этого могут потребоваться импульсные кробоарные диоды, которые будут устанавливаться параллельно конденсатору таким образом, чтобы в прямом направлении по ним не протекал ток.

2.1.2 ПРОВЕРКА ПАРАМЕТРОВ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Дальнейшие работы будем производить в среде моделирования переходных процессов «OrCad». Моделирование будет вестись для напряжения 12 кВ, сделано это для того, чтобы в будущем можно было проводить испытания на больших значениях тока. Расчетное сопротивление состоит из сопротивления контура и динамического сопротивления варистора. Полное сопротивление описывается по формуле (2.15):

$$R_{\Gamma} = R_{\text{к}} + R_{\text{дин}}; \quad (2.15)$$

где: $R_{\text{к}}$ – сопротивление контура без варистора, $R_{\text{дин}}$ – динамическое сопротивление варистора. Для составления модели требуется $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{дин}}$.

$R_{\text{дин}}$ можно рассчитать по формуле (2.16):

$$R_{\text{дин}} = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta U}{\Delta I}; \quad (2.16)$$

где: ΔU , ΔI – рассчитываются по рисунку 2.3. Динамическое сопротивление $R_{\text{дин}}=0,176$ Ом. Сопротивление контура $R_{\text{к}}=0,224$ Ом.

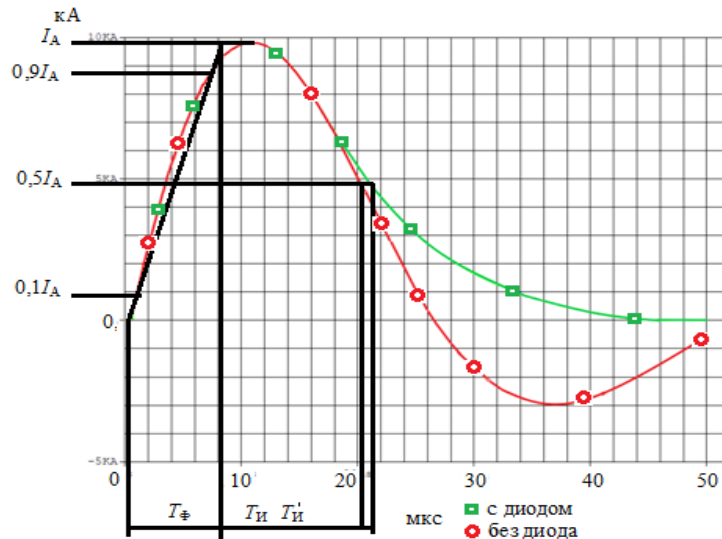


Рисунок 2.8 – Ток в варисторе с кроубарным диодом и без него

По рисунку 2.8 видно, что добавление в схему диода, который будет шунтировать конденсатор в обратном направлении, устраняет проблему обратной полярности тока и искажает форму импульса, но в пределах допустимого.

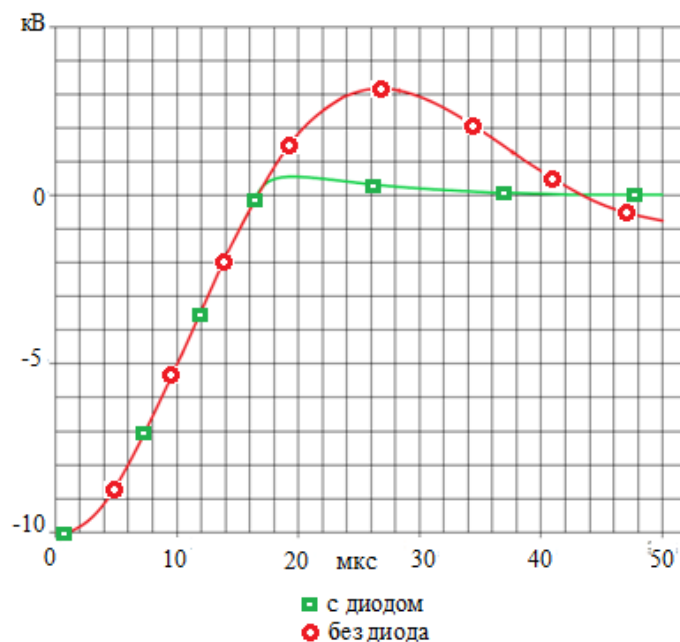


Рисунок 2.9 – Напряжения на конденсаторе с кроубарным диодом и без диода

Напряжение обратной полярности конденсатора становится значительно меньше, что видно из рисунка 2.9. Номинальное обратное напряжение диодов может быть сильно меньше зарядного напряжения конденсатора, а это требует использования нескольких последовательно соединенных диодов.

2.2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДСТРОЕЧНОГО РЕЗИСТОРА

Для формирования нужного импульса тока необходимо чтобы схема имела подходящее активное сопротивление и индуктивность. Часть этих параметров можно получить от соединительных шин. Они обладают своим собственным сопротивлением и индуктивностью. Компактность установки является одним из ключевых условий, а поэтому соединительные шины могут иметь недостаточные значения индуктивности и активного сопротивления для формирования правильного импульса из-за своей малой протяженности. Для этого требуется включить в разрядную цепь дополнительно подстроечное сопротивление.

Подстроечное сопротивление должно иметь: активное сопротивление – 0,3 Ом, индуктивность – 4 мкГн, хорошее охлаждение и малый температурный коэффициент сопротивления.

В качестве материала резистивной части желательно использовать манганиновую проволоку. Его применяют в промышленности в качестве резистивной части прецизионных резисторов или в качестве шунтов в измерительных приборах. Манганин после специальной термообработки имеет высокую стабильность параметров во времени. Удельное сопротивление от 0,47 до 0,5 мкОм·м зависит от типа сплава. Температурный коэффициент сопротивления изменяется у этих сплавов от $0,1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [9].

При разработке в качестве резистивной части была выбрана проволока диаметром 2 мм, ее диаметр позволяет создать элемент с приемлемыми размерами. Для лучшего охлаждения желательно сделать конструкцию продуваемой, то есть большое межвитковое расстояние, а также нужно обеспечить большой диаметр витков. Примем диаметр витка 16,5 см, а расстояние между витками 27

мм, шаг спирали составляет 30 мм. Примерное число витков 6, чтобы высота катушки не превышала 30 см. Исходя из этого, рассчитаем необходимое количество проволоки для намотки.

Катушка выполняется в виде спирали, рассчитаем длину проволоки по формуле 2.17:

$$L_m = \pi \cdot A \cdot N; \quad (2.17)$$

где: N – число витков в катушке, A – расстояние между противоположными центрами в витке, мм.

По формуле 2.17 рассчитаем A :

$$A = \sqrt{(D + d)^2 + p^2}; \quad (2.18)$$

где: D – диаметр витка, мм, d – диаметр проволоки, мм, p – шаг спирали, мм.

Отсюда получаем:

$$A = \sqrt{(168 + 2)^2 + 30^2} = 172,6 \text{ мм},$$

$$L_m = \pi \cdot 172,6 \cdot 6 = 3253,9 \text{ мм}.$$

Далее по формуле (2.19) можно рассчитать активное сопротивление такой катушки:

$$R = \rho \cdot \frac{L_m}{S}; \quad (2.19)$$

где: ρ – удельное сопротивление материала, Ом·м, L – длина используемой проволоки мм, S – площадь поперечного сечения проводника рассчитывается по формуле (2.20), мм²:

$$S = \pi \cdot r^2; \quad (2.20)$$

где: r – радиус проволоки, мм.

$$S = \pi \cdot 1^2 = 3,14 \text{ мм}^2,$$

$$R = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3253,9}{3,14} = 0,487 \text{ Ом}.$$

Так как это максимальное сопротивление этого резистора, то оно является удовлетворительным.

Рассчитаем индуктивность данной катушки. Ее можно получить из формулы 2.21 [10]:

$$L = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot N^2 \cdot D \cdot \Phi; \quad (2.21)$$

где: Φ – является табличным значением [10]. Определяется оно для отношения a/D [10].

$$\alpha = \frac{a}{D}; \quad (2.22)$$

где a – длина спирали, рассчитывается по формуле 2.23:

$$\alpha = N \cdot p; \quad (2.23)$$

$$\alpha = 6 \cdot 30 = 180 \text{ мм};$$

$$\alpha = \frac{180}{168} = 1,071.$$

По таблице [10] для значения $\alpha=1,071$ соответствует значение $\Phi=6,46$.

Отсюда получаем значение индуктивности:

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{4 \cdot \pi} \cdot 6^2 \cdot 180 \cdot 6,46 = 4,19 \text{ мкГн}.$$

Конструкция резистора будет позволять регулировать сопротивление и индуктивность. Для изготовления каркаса будет использоваться стеклотекстолит. Он имеет высокую прочность, хорошо обрабатывается. Параметры резистора сведены в таблицу 2.3

Таблица 2.3 –Итоговая таблица параметров для резистора

Параметр	Значение	Единица измерения
N (число витков)	6	о.е.
a (высота спирали)	180	мм
S (сечение проводника)	3.14	мм ²
d (диаметр проводника)	2	мм
D (диаметр спирали)	168	мм
L (индуктивность)	4,19	мкГн

Окончание таблицы 2.3

Параметр	Значение	Единица измерения
R (сопротивление проводника)	0,487	Ом
p (шаг спирали)	30	мм
L_m (длина проводника)	3253.9	мм

2.3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШУНТА И РАЗРАБОТКА ЕГО КОНСТРУКЦИИ

В качестве датчика тока в данной установке будет применяться коаксиальный безиндуктивный шунт.

Шунт работает в диапазоне токов от 0,15 кА до 10 кА. Он предназначен для снятия стандартного грозового импульса. Максимальное выходное напряжение 10 В. Для снятия показаний будет использоваться осциллограф, для этого шунт должен иметь *BNC*-разъем. Также потребуется согласующее сопротивление, которое будет последовательно подключено к разъему. Применяются резисторы с сопротивлением равным волновому сопротивлению измерительного кабеля – 50 Ом.

Необходимо также обеспечить постоянство активного сопротивления во времени. Для этого резистивную часть надо выполнить из манганина.

Необходимо обеспечить минимум индуктивного сопротивления в резистивной части. Для этого она изготавливается в виде цилиндра, который располагается внутри другого проводящего цилиндра, как на рисунке 2.10.

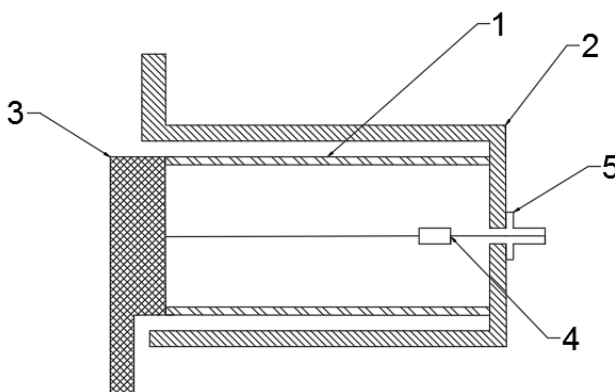


Рисунок 2.10 – Конструкция безиндуктивного коаксиального шунта

На рисунке 2.10 цифрами обозначены: 1 – резистивная часть из манганиновой фольги; 2 – медный цилиндр с выводом под присоединение токоведущей шины; 3 – медное основание с выводом под присоединение к токоведущей шине; 4 – является согласующее сопротивление; 5 – BNC-разъем. В действительности полоса пропускания шунта ограничивается скин-эффектом.

Сопротивление шунта известно, сопротивление медных частей много меньше резистивной части в виду сильно меньшего удельного сопротивления и гораздо большего сечения, поэтому можно принять сопротивление резистивной части сопротивлению шунта 1 мОм.

Предварительный расчет будет вестись для манганиновой фольги толщиной 0,075 мм. Марка манганина МНМЦАЖ 3-12-0,3-0,3, удельное сопротивление 0,47 мкОм·м [9].

Рассчитаем толщину поверхностного слоя. Ее можно получить исходя из формулы (2.24) [11]:

$$\Delta \leq \pi \sqrt{\frac{0,1 \cdot t \cdot \rho}{\mu_0 \cdot \mu}}; \quad (2.24)$$

где: t – время нарастания фронта импульса, Δ – удельное сопротивление материала, μ – магнитная проницаемость материала.

$$\Delta \leq \pi \sqrt{\frac{0,1 \cdot 8 \cdot 0,47 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 1,68 \text{ мм.}$$

Итого, используемый материал по толщине подходит.

Для того чтобы рассчитать длину и ширину резистивной части надо определить ее объем. Для этого рассчитаем энергию, выделившуюся в ней.

Энергию, выделившуюся в цепи, можно вычислить по формуле (2.25)

$$W_{\text{ш}} = \int_0^T i(t)^2 \cdot R_{\text{ш}} \cdot dt; \quad (2.25)$$

где: $i(t)$ – функция тока в цепи, T – время, которое ток протекает в цепи, $R_{\text{ш}}$ – сопротивление шунта.

Функцию тока можно взять из (2.16), так как в цепи присутствует кроубарный диод, то расчет можно произвести для первого полупериода. Амплитуда тока 10 кА.

$$W_{\text{ш}} = \int_0^{28 \cdot 10^{-6}} 10^4 \cdot e^{-3,922 \cdot 10^4 \cdot t} \sin(1,217 \cdot 10^5 \cdot t)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot dt = 0,502 \text{ Дж}$$

Далее вычислим по формуле (2.26) объем резистивной части.

$$V = \frac{W_{\text{ш}}}{(c \cdot \gamma \cdot \theta)}; \quad (2.26)$$

где: c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), γ – плотность материала, θ – превышение температуры токовой цепи над температурой окружающей среды К.

Для манганина γ – соответствует 8400 кг/ м³, c – 405,85 Дж кг⁻¹ К⁻¹ [9], θ – температура, выбирается около 0,2–1 К.

$$V = \frac{0,502}{(405,85 \cdot 8400 \cdot 0,51)} = 288 \text{ мм}^3.$$

После нахождения объема резистивной части можно выразить площадь сечения (2.27) и длину резистивной части (2.28):

$$S_R = \sqrt{\frac{V \cdot \rho}{R_{\text{ш}}}}; \quad (2.27)$$

$$L_R = R_{\text{ш}} \cdot \frac{S_R}{\rho}; \quad (2.28)$$

$$S_R = \sqrt{\frac{288 \cdot 10^{-9} \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-3}}} = 1,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

$$L_R = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,12 \cdot 10^{-5}}{0,45 \cdot 10^{-6}} = 0,025 \text{ м}.$$

Из-за малой толщины используемого материала можно предположить, что разность между внешним радиусом и внутренним пренебрежимо мала, а поэтому для расчета длины используемого материала можно воспользоваться формулой площади прямоугольника (2.29):

$$L_M = \frac{S_R}{\Delta}; \quad (2.29)$$

где: L_M – длина материала, необходимая для изготовления резистивной части шунта,

$$L_M = \frac{1,12 \cdot 10^{-5}}{0,075 \cdot 10^{-3}} = 0,15 \text{ м.}$$

Далее рассчитаем диаметр резистивной части (2.30):

$$D_R = \frac{L_M}{\pi}; \tag{2.30}$$

$$D_R = \frac{0,15}{\pi} = 0,047 \text{ м.}$$

Исходя из размеров резистивной части, определим размеры для остальных частей шунта.

Резистивная часть будет припаиваться к двум кругам из меди, диаметр посадочного места известен, от нее будут выбираться остальные размеры. Основные параметры приведены в таблице 2.4

Таблица 2.4– Основные параметры шунта

Параметр	Значение	Размерность
R	1	МОм
Резистивная часть	150×25×0,075	мм
R (согласующее сопротивление)	50	Ом
d (электродов)	50	мм
D (внешнего цилиндра)	60	мм

2.4 РАСЧЕТ И РАЗРАБОТКА ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

2.4.1 РЕЗИСТИВНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

Делитель напряжения предназначен для понижения высокого напряжения до тех величин, которые будет удобно измерять.

В этой установке нам необходимо замерять значение напряжения на конденсаторе, чтобы контролировать уровень заряда, и получать осциллограммы напряжения на испытуемых варисторах. Для измерения зарядного напряжения

можно применить делитель на основе резисторов, так как он не будет измерять импульсное напряжение. Требования к делителю: входное сопротивление измерительного прибора 1 МОм, а следовательно сопротивление нижнего плеча должно быть на несколько порядков меньше, диапазон измерения напряжения от 0,25 кВ до 12 кВ, максимальное выходное напряжение 3 В, так как для измерения будет использоваться плата сбора данных. Зарядка до максимального рабочего значения напряжения занимает 1 минуту согласно техническому заданию, то индуктивными и емкостными составляющими можно пренебречь.

Рассчитаем минимально допустимый коэффициент деления по формуле (2.31).

$$K_d = \frac{U_1}{U_2}; \quad (2.31)$$

$$K_d = \frac{12000}{3} = 4000 \text{ о. е.}$$

Согласно рекомендациям, ток протекающий по делителю, не должен превышать 1 мА [12], поэтому сопротивление делителя должно составлять более 12 МОм. Исходя из этих рекомендаций, будем разрабатывать конструкцию делителя.

При приложении к делителю номинального напряжения по закону Ома (2.32) ток будет 1 мА, и это в случае, если измерительное оборудование не подключено к нему:

$$I_d = \frac{U_1}{R_d}; \quad (2.32)$$

$$I_d = \frac{12000}{12 \cdot 10^6} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мА.}$$

Также из-за того, что он будет постоянно подключен к конденсатору, то он будет постоянно разряжаться на делитель. Следует посчитать постоянную времени разряда (2.33):

$$T_d = R_d \cdot C; \quad (2.33)$$

где: R_d – сопротивление делителя без нагрузки

$$T_d = 12 \cdot 10^6 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 144 \text{ с}$$

Следовательно, сопротивление надо увеличить. Для того чтобы уменьшить влияние делителя стоит увеличить активное сопротивление в 4 раза. Тогда сопротивление составит 48 МОм. Для изготовления применим резисторы с номиналом 2 МОм марки С2-23 2 Вт. Их максимальная рассеиваемая мощность 2 Вт, а напряжение 500 В. Нижнее плечо выполняется из резистора марки С2-29 0,25 Вт с сопротивлением 9200 Ом.

Итого, общее сопротивление получается 48,0092 МОм, и без нагрузки ток в нем будет 0,25 мА, а постоянная времени 576 с позволяет дольше простаивать установке без работы с зарядом и меньше влияет на измерения. Число штук резисторов будет 24 в верхнем плече и 1 в нижнем.

Реальный коэффициент деления найдем по формуле (2.34):

$$K_d = \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \quad (2.34)$$

где: R_1 – сопротивление верхнего плеча, R_2 – сопротивление нижнего плеча.

$$K_d = \frac{48 \cdot 10^6 + 9200}{9200} = 5218 \text{ о. е.};$$

$$I_d = \frac{12000}{48,0092 \cdot 10^6} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$T_d = 12 \cdot 10^6 \cdot 48,0092 \cdot 10^{-6} = 576 \text{ с.}$$

Таблица 2.5 – Основные параметры резистивного делителя

Параметр	Значение	Размерность
K_d	5218	о.е.
R_1 (Сопротивление верхнего плеча)	48	МОм
R_2 (Сопротивление нижнего плеча)	9200	Ом
n_1 (число резисторов в верхнем плече)	24	о.е.

Окончание таблицы 2.5

Параметр	Значение	Размерность
n_2 (число резисторов в нижнем плече)	1	о.е.
Размеры	145×155×6	мм
R_{1n} (Сопротивление одного резистора верхнего плеча)	2	МОм
Число перемычек	24	о.е.

2.4.2 ЕМКОСТНОЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

Для измерения импульсных напряжений лучше подходит емкостной делитель [12]. Требования к делителю: два *BNC*-разъема с разными коэффициентами деления: 4000 и 200 для измерения остаточного напряжения с помощью платы сбора данных и осциллографом, входное сопротивление измерительных приборов около 1 МОм, поэтому сопротивление нижнего плеча должно быть на порядок ниже чем у измерительного прибора.

Для расчета емкости нижнего плеча с большим коэффициентом деления надо знать главную частоту напряжения на варисторе. Для этого в программе «*OrCad*» разложим сигнал в ряд Фурье. Разложение в спектр показано на рисунке 2.11.

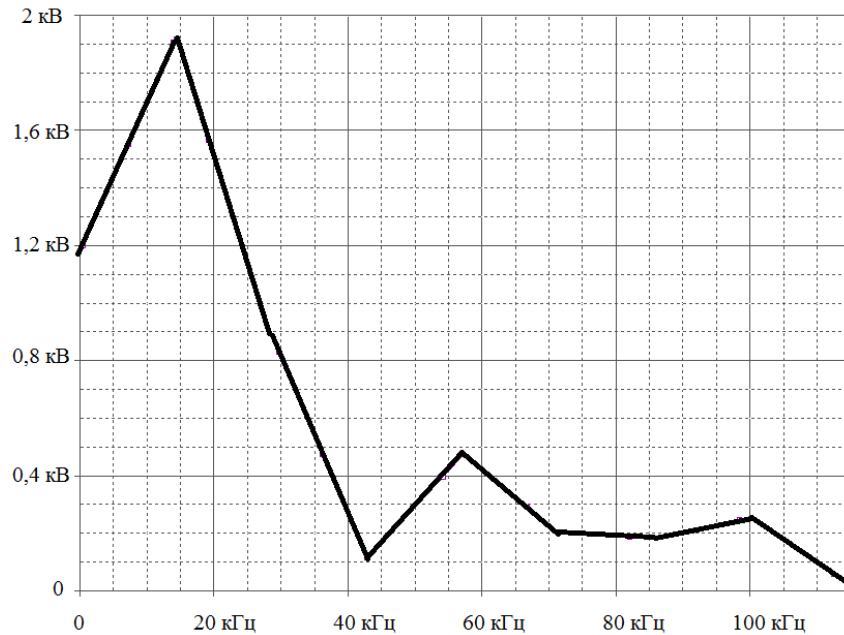


Рисунок 2.11 – Спектр импульса напряжения на варисторе

Ориентировочная емкость нижнего плеча рассчитывается по формуле (2.35):

$$C_{ор} \geq \frac{1}{Z \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{мин}}; \quad (2.35)$$

где: $C_{ор}$ – ориентировочная емкость плеча, $Z \approx 1$ МОм, сопротивление измерительного прибора, поэтому для расчета сопротивление будет $0,1 \cdot Z$, $f_{мин}$ – минимальная частота спектра, и по рисунку 2.11 она равна 14 кГц.

$$C_{ор} \geq \frac{1}{10^5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 14 \cdot 10^3} = 0,114 \text{ нФ.}$$

Для расчета емкостей делителя составим систему уравнений (2.36), в которой будут задействованы коэффициент деления и общая емкость делителя:

$$\begin{cases} \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_3}} = K_1; \\ \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = K_2; \\ \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{C_{ор}}; \end{cases} \quad (2.36)$$

где: C_1 – емкость верхнего плеча, C_2 – емкость среднего плеча, C_3 – емкость нижнего плеча K_1 и K_2 – коэффициент деления одной из комбинаций плеч.

Произведем во втором уравнении системы замену. Получается уравнение с одной неизвестной под номером (2.37):

$$\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{\text{оп}}}\right) \cdot C_{\text{оп}} = K_2. \quad (2.37)$$

Далее из уравнения (2.37) выражается неизвестная емкость C_1 через выражение (2.38):

$$C_1 = \frac{C_{\text{оп}}}{K_2 - 1}. \quad (2.38)$$

Произведем замены переменных в первом уравнении системы (2.36). Получим уравнение (2.39):

$$\left(\frac{K_2 - 1}{C_{\text{оп}}} + \frac{1}{C_{\text{оп}}}\right) \cdot C_3 = K_1. \quad (2.39)$$

Из выражения (2.39) найдем значение емкости C_3 по формуле (2.40):

$$C_3 = \frac{C_{\text{оп}} \cdot K_1}{K_2}. \quad (2.40)$$

Значение емкости C_2 получаем по выражению (2.41), преобразовав нижнее уравнение системы (2.36):

$$C_2 = \frac{C_{\text{оп}} \cdot C_3}{C_{\text{оп}} - C_3}. \quad (2.41)$$

Из выражения (2.38) получаем емкость верхнего плеча:

$$C_1 = \frac{0,114 \cdot 10^{-9}}{200 - 1} = 0,5729 \text{ пФ.}$$

Из выражения (2.40) получаем емкость нижнего плеча:

$$C_3 = \frac{0,114 \cdot 10^{-9} \cdot 4000}{200} = 2,28 \text{ нФ.}$$

Из выражения (2.41) получаем емкость среднего конденсатора делителя:

$$C_2 = \frac{0,114 \cdot 10^{-9} \cdot 2,28 \cdot 10^{-9}}{0,114 \cdot 10^{-9} - 2,28 \cdot 10^{-9}} = 0,109 \text{ нФ.}$$

Подберем подходящие по характеристикам конденсаторы. Для делителя будут использоваться конденсаторы формата *SMD*. Верхнее плечо состоит из 4 конденсаторов емкостью 100 пФ и напряжением 3150 В, средний конденсатор емкостью 4,7 нФ напряжением на 250 В, конденсатор нижнего плеча будет 0,1 мкФ и напряжением 250 В, подходящими параметрами обладают конденсаторы фирмы *Murata*. Для термостабильности параметров применяются конденсаторы с одинаковым диэлектриком типа *U2J*.

Емкость нижнего и среднего плеча выше минимально допустимого значения: $C_2'=4,5$ нФ – среднее плечо, $C_2=0,1$ мкФ – нижнее плечо, $C_{op}=0,114$ нФ – расчетное минимально допустимое

Коэффициенты деления в этом случае получаются по формуле (2.42) следующими:

$$K_D = \frac{C_B + C_H}{C_B}; \quad (2.42)$$

где: C_H – емкость нижнего плеча, C_B – емкость верхнего плеча.

$$K_{D1} = 181 \text{ о. е.},$$

$$K_{D2} = 4178 \text{ о. е.}$$

Располагаться конденсаторы будут на каркасе из стеклотекстолита, для изоляции от корпуса будет применяться электроизоляционный компаунд АДВ 69/50. Корпус выполнен из медной трубы, с одной из сторон выведены *VNC*-разъемы и заземляющий контакт, а с другой высоковольтный ввод. Характеристики делителя сведены в таблицу 2.6

Таблица 2.6 – Основные параметры емкостного делителя

Параметр	Значение	Размерность
K_{D1}	181	о.е.
K_{D2}	4168	о.е.
C_1 (емкость верхнего плеча)	25	пФ
C_2 (емкость среднего плеча для K_{D1})	4,7	нФ
C_3 (емкость нижнего плеча для K_{D1})	0,1	мкФ
n_1 (число конденсаторов в верхнем плече)	4	о.е.

Окончание таблицы 2.6

Параметр	Значение	Размерность
n_2 (число конденсаторов в среднем плече)	1	о.е.
n_3 (число конденсаторов в нижнем плече)	1	о.е.
Размеры	89×44	мм
C_{1n} (Емкость одного конденсатора верхнего плеча)	100	пФ

Для измерения тока в контуре с помощью платы сбора данных для шунта нужен делитель напряжения. Требования: входное напряжение 10 В, выходное напряжение 3 В, сопротивление измерительных приборов ≈ 1 МОм, два разъема для измерения с осциллографа и платы сбора данных. Этот делитель будет емкостным, как и делитель напряжения на варисторе.

Также как и для делителя напряжения на варисторе емкость нижнего плеча должна быть выше 1,14 нФ. Для делителя используются два конденсатора емкостью 47 нФ и 220 нФ, конденсаторы фирмы Epcos. Расположены они на подложке из стеклотекстолита и располагается внутри алюминиевого корпуса, который выполняет роль электромагнитного экрана.

Коэффициент деления рассчитывается по формуле 2.42:

$$K_d = \frac{47 + 220}{47} = 5,7 \text{ о. е.}$$

В ходе испытаний в измерительных цепях могут возникнуть из-за работы силовой цепи импульсы тока и напряжения, которые могут причинить вред плате сбора данных, также могут возникнуть синфазные помехи. Для того чтобы их устранить между измерительными датчиками и платой сбора данных добавим плату защиты измерений.

2.6 РАЗРАБОТКА ПЛАТЫ ЗАЩИТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Плата защиты измерений предназначена для защиты платы сбора данных от перенапряжений и для фильтрации синфазных помех.

Для защиты от синфазных помех будет применяться инструментальный усилитель с коэффициентом усиления $K_y=1$. Инструментальный усилитель – это дифференциальный усилитель с повышенными эксплуатационными характеристиками для измерительной техники.

Для наших целей подходит инструментальный усилитель марки *INA 128P* фирмы *Texas Instruments*. Данный усилитель имеет один канал, 8 контактов и выполнен в *DIP*-корпусе. Входное сопротивление делителя 10^{10} Ом, максимально допустимое напряжение 40 В.

Согласно рисунку 2.12 коэффициент усиления регулируется изменением сопротивления R_G . По формуле (2.43) сопротивление R_G должно быть бесконечным, поэтому контакты 1 и 8 остаются разомкнутыми:

$$G = 1 + \frac{50000}{R_G}. \quad (2.43)$$

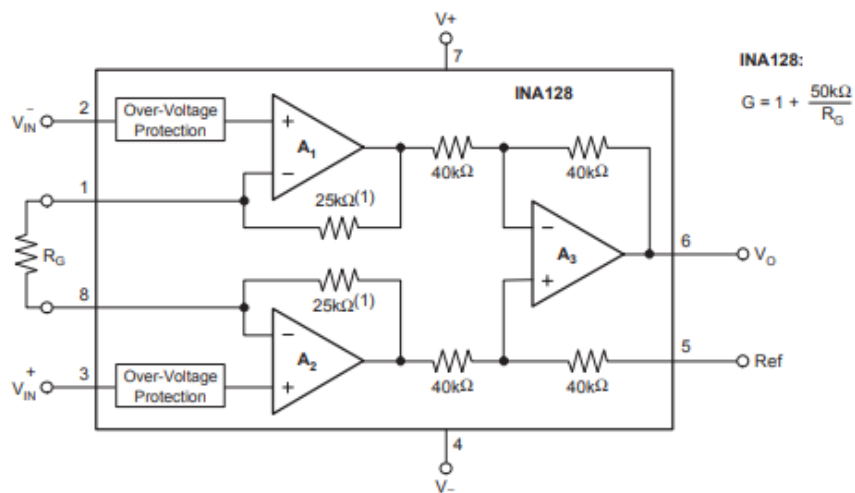


Рисунок 2.12 – Схема инструментального усилителя *INA 128P*

Входное напряжение аналогового входа платы сбора данных модели E20-10 составляет 3 В, что позволяет определить параметры схемы более конкретно.

Для защиты от импульсов напряжения применим на входе импульсные *SMD*-диоды марки *US1008FL* с рабочим током в 1 А, которые будут подключены к источникам постоянного напряжения, см. рисунок 2.13. В этом случае, если пойдет превышение по напряжению, то его поглотят эти источники напряжения, что конечно может привести к их поломке, но они должны стоять

меньше чем плата сбора данных. Для защиты диодов от больших значений тока, которые могут возникнуть от работы силовой части и внешних электроприборов стоит добавить токоограничивающие резисторы. Для снижения электромагнитных помех в измерительных цепях необходимо вход инструментального усилителя зашунтировать сопротивлением 1 МОм.

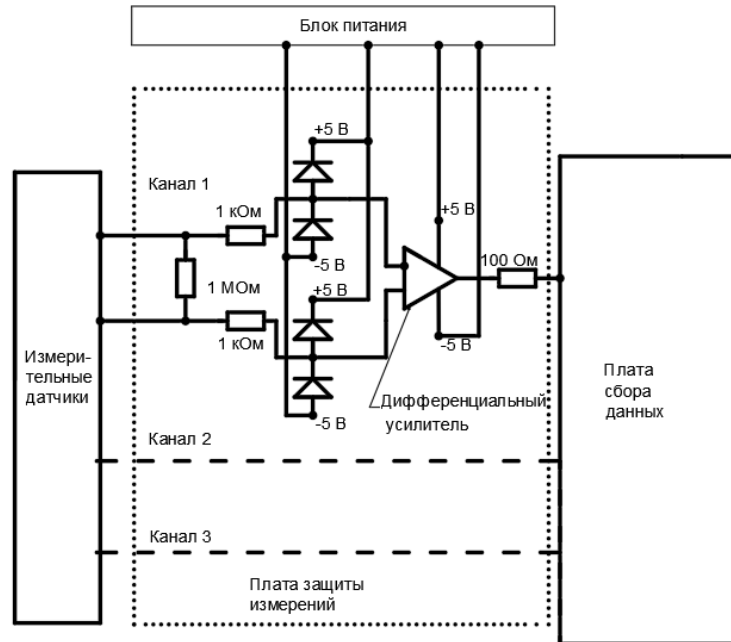


Рисунок 2.13 – Схема платы защиты измерений

Плата защиты измерений имеет 4 канала, три из которых являются рабочими, а один запасной. Для подключения к датчикам тока и напряжения плата будет иметь *BNC*-разъемы, и выводы с штекерами под *BNC*-разъемы для подключения к плате сбора данных.

Основные параметры платы защиты измерений приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Основные параметры платы защиты измерений

Параметр	Значение	Размерность
K (коэффициент усиления)	1	о.е.
Питающее напряжение	± 5	В
Входное сопротивление	1	МОм
Диапазон ограничения перенапряжений	± 5	В

Окончание таблицы 2.7

Параметр	Значение	Размерность
Число каналов	4	о.е.
Размеры	70×90	мм

2.5 ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫЙ РЕЗИСТОР

Зарядно-разрядный резистор должен за несколько секунд рассеять на себе накопленную энергию конденсатора и не получить повреждений. При условии, что конденсатор считается разряженным при прохождении пяти постоянных времени. По условию безопасности конденсатор должен разрядиться максимально быстро, ориентировочно за 0,5 секунды. Исходя из ориентировочного времени рассеивания и емкости рассчитаем значение сопротивления по формуле (2.44):

$$R_{зр} = \frac{T_{р0}}{C}; \quad (2.44)$$

где: $T_{р0}$ – постоянная времени разрядки конденсатора.

$$R_{зр} = \frac{0,1}{12 \cdot 10^{-6}} = 8,3 \text{ кОм}$$

Для того чтобы узнать максимальную выделившуюся мощность рассчитаем ее по формуле (2.45):

$$P(t) = \frac{U(t)^2}{R_{зр}}; \quad (2.45)$$

где: $U(t)$ – напряжение на конденсаторе которое изменяется по формуле (2.46):

$$U(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{T_{р0}}}. \quad (2.46)$$

Наибольшее значение напряжения будет в начальный момент времени.

$$P(0) = \frac{12000^2}{8300} = 17,4 \text{ кВт}$$

Выделившая энергия – 864 Дж.

3 ИЗГОТОВЛЕНИЕ УСТАНОВКИ

3.1 ИЗГОТОВКА СПЕЦИЗДЕЛИЙ

Коаксиальный шунт изготавливается из следующих деталей: верхний электрод, нижний электрод, текстолитовая втулка, манганиновая фольга, наружный цилиндр, контактная площадка наружного цилиндра, согласующий резистор, *BNC*-разъем, уплотнительное кольцо. Чертежи шунта приведены на рисунках 3.1, 3.2, 3.3.

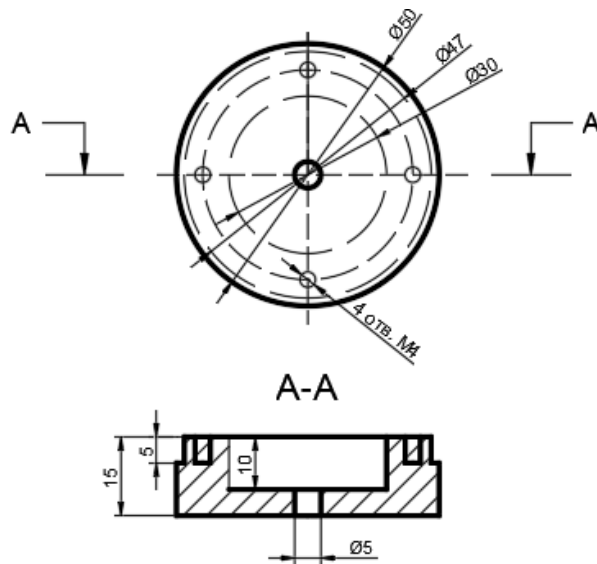


Рисунок 3.1 – Эскиз верхнего электрода

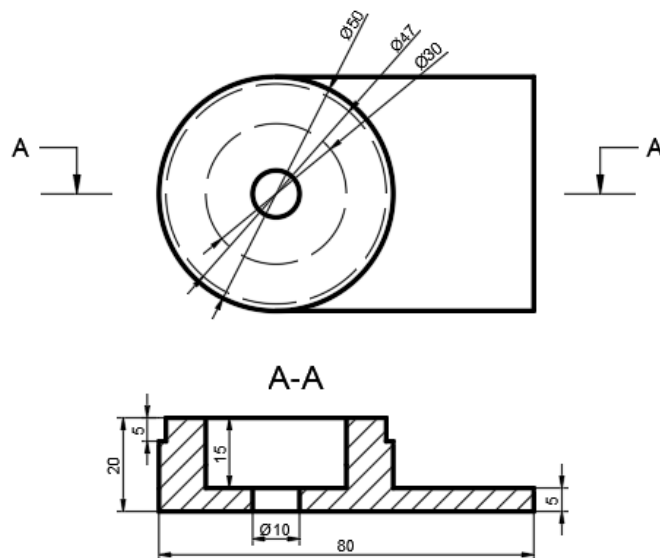


Рисунок 3.2 – Эскиз нижнего электрода

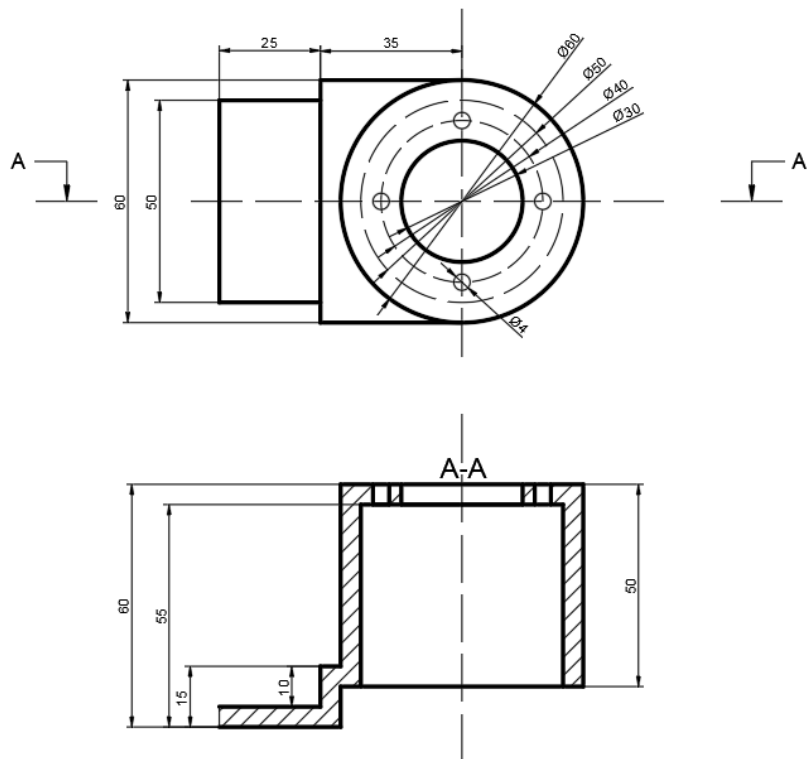


Рисунок 3.3 – Эскиз внешнего цилиндра

Контактная площадка, наружный цилиндр и электроды изготавливают из меди методом фрезеровки. Текстолитовая втулка обрабатывается на токарном станке. Детали шунта показаны на рисунке 3.4.

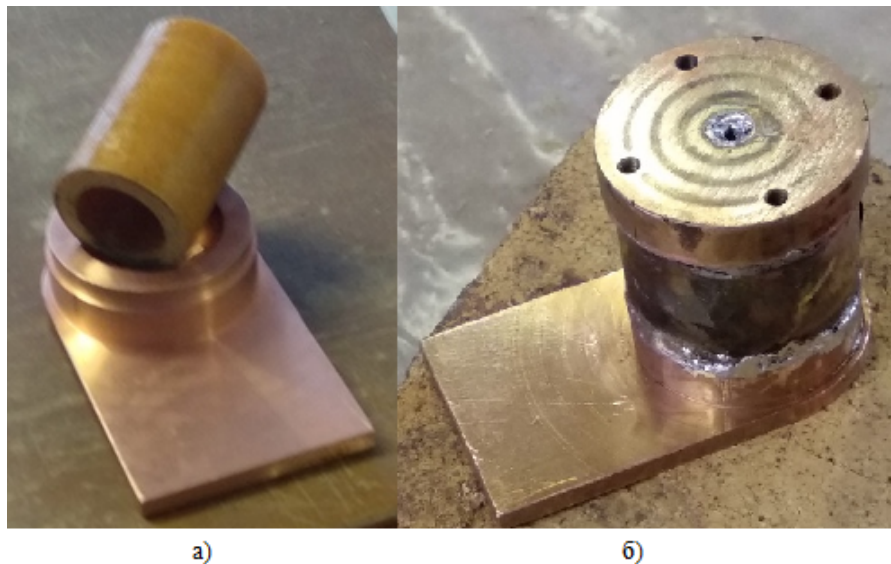


Рисунок 3.4 – Нижний электрод с контактной площадкой и текстолитовая втулка(а), вид в сборе (б)

Соединение манганиновой фольги и электродов выполнено свинцово-оловянным припоем. Согласующий резистор также припаян к *BNC*-разъему и верхнему электроду. Вид шунта в сборе показан на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Коаксиальный шунт в сборе

Для подтверждения расчетных параметров шунта была снята АЧХ. Измерения производились с помощью источника тока на значениях 1 А и 2 А в диапазоне частот от 10 Гц до 12000 Гц. АЧХ приведена на рисунке 3.6.

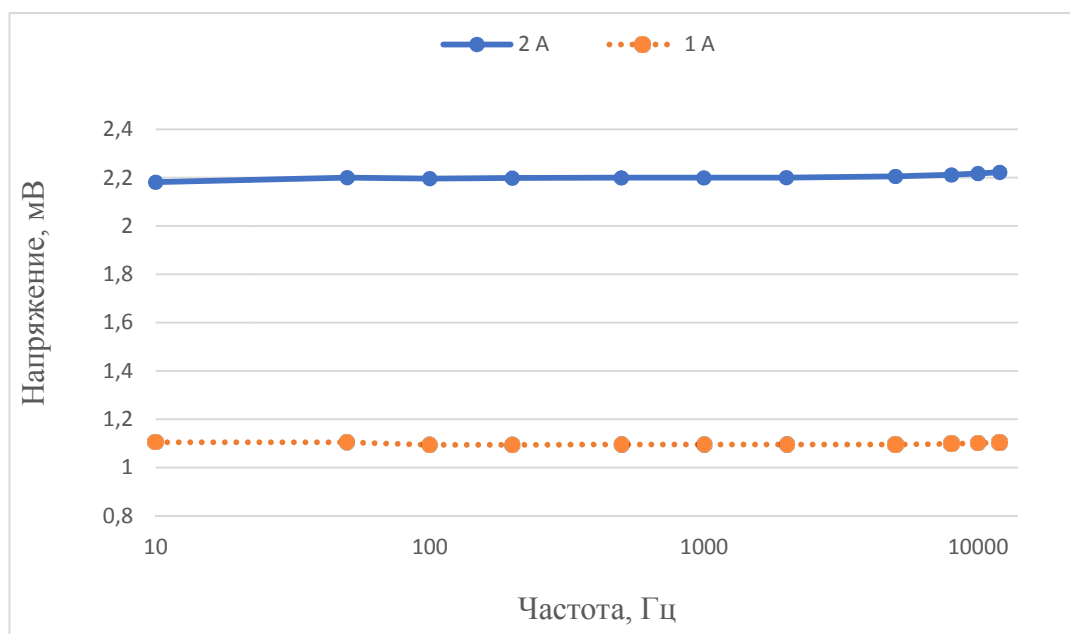


Рисунок 3.6 – АЧХ коаксиального шунта

Из рисунка 3.6 видно, что шунт имеет стабильные параметры сопротивления на диапазоне частот от 10 Гц до 12000 Гц. А его сопротивление составляет 1,1 мОм, что совпадает с расчетными параметрами.

Резистивный делитель напряжения состоит из стеклопластикового каркаса, резисторов верхнего и нижнего плеча, перемычек из оргстекла, *BNC*-разъема, крепления высоковольтного ввода и крепления к корпусу установки. Чертеж делителя приведен на рисунке 3.7.

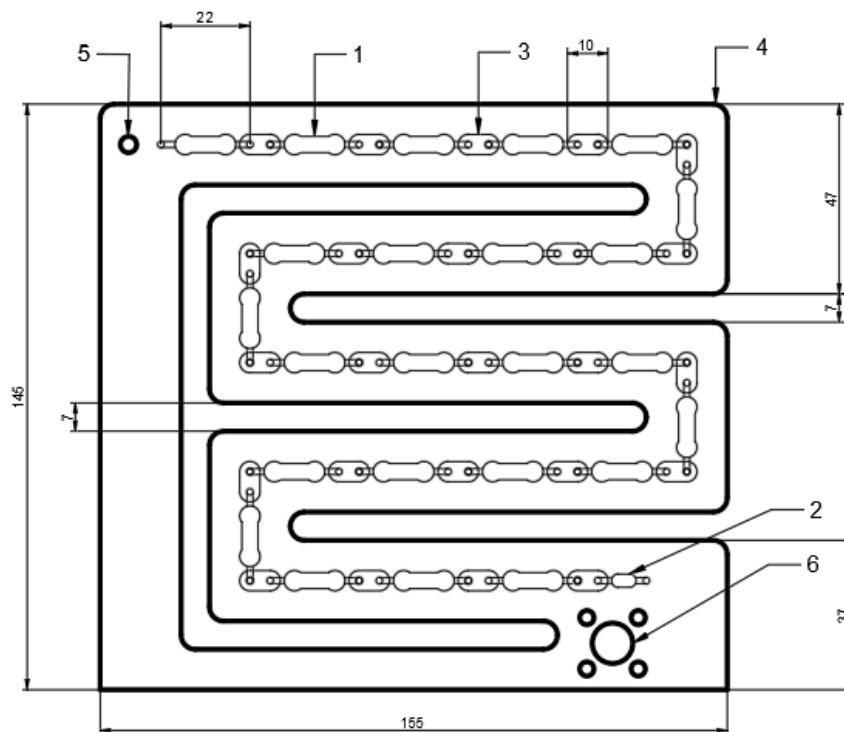


Рисунок 3.7 – Делитель напряжения для измерения напряжения на конденсаторе

Под цифрами на рисунке 3.7 показаны: 1 – резисторы верхнего плеча, 2 – резистор нижнего плеча, 3 – перемычка, препятствующая соприкосновению резисторов верхнего плеча с стеклопластиковым каркасом, 4 – диэлектрический каркас, 5 – высоковольтный ввод, 6 – *BNC*-разъем.

Из листа стеклотекстолита вырезается на ЧПУ-станке каркас данного делителя, сверлятся отверстия под монтаж резисторов *BNC*-разъема и высоковольтного ввода.

Резисторы устанавливаются на каркас через перемычки, выводы резисторов спаиваются свинцово-оловянным припоем между собой. К нижнему плечу припаивается вывод *BNC*-разъема, другой вывод разъема и резистора нижнего плеча заземляется. С помощью винтов и металлических уголков он крепится внутри установки. Делитель в сборе показан на рисунке 3.8.

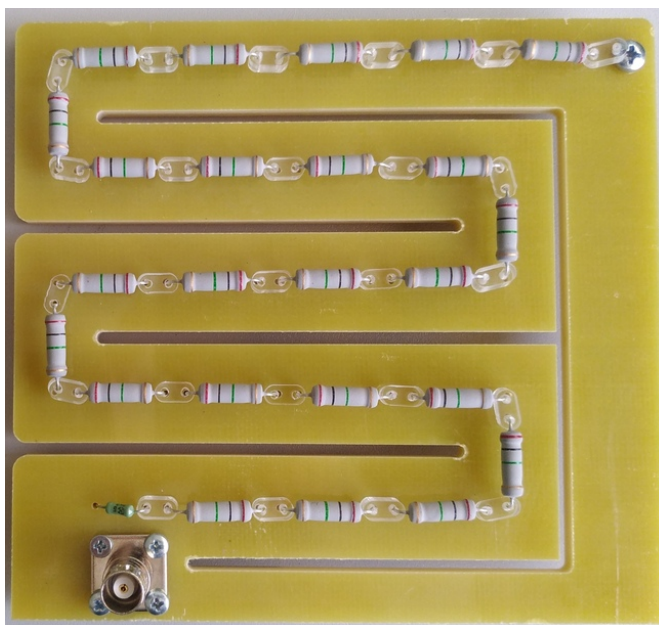


Рисунок 3.8 – Резистивный делитель в сборе

Емкостной делитель напряжения состоит из платы, на которой располагаются части делителя, конденсаторы верхнего, нижнего и среднего плеч, цилиндрический корпус, основание, два *BNC*-разъема и высоковольтный ввод штыревого типа.

Чертеж емкостного делителя показан на рисунке 3.9. На плате размещаются все основные компоненты, в местах расположения конденсаторов проделываются отверстия, для того чтобы электроизоляционный компаунд окружал со всех сторон конденсаторы. Выводы *BNC*-разъемов, заземляются на корпус, как и нижнее плечо. Основание припаивается свинцово-оловянным припоем к корпусу. Плата со смонтированными компонентами устанавливается в специально отведенное место и заливается компаундом марки АДВ69/50. После заливки делителя, до застывания компаунда, производится вакуумирование для

удаления газов из компаунда. Емкостной делитель в сборе изображен на рисунке 3.10.

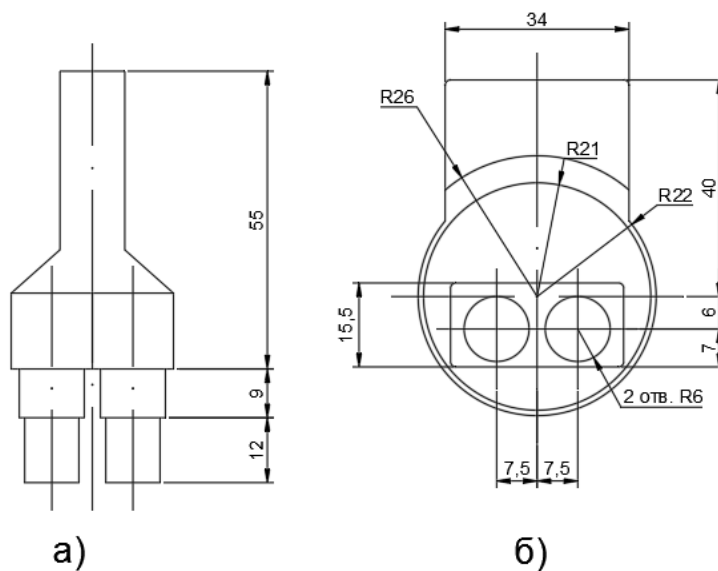


Рисунок 3.9 – Эскиз каркаса делителя (а), эскиз нижней крышки делителя (б)



Рисунок 3.10 – Емкостной делитель напряжения в сборе

Емкостной делитель напряжения шунта состоит из платы, на которой располагаются части делителя, конденсаторы верхнего и нижнего плеча, алюминиевого корпуса и трех *BNC*-разъемов. Конденсаторы располагаются на плате вместе с разъемами и имеют заземление на корпус, корпус прикрепляется винтами к установке, корпус заземляется. Была измерена зависимость погрешности делителя от частоты, показана она на рисунке 3.11, видно, что погрешность составляет не более 1%.

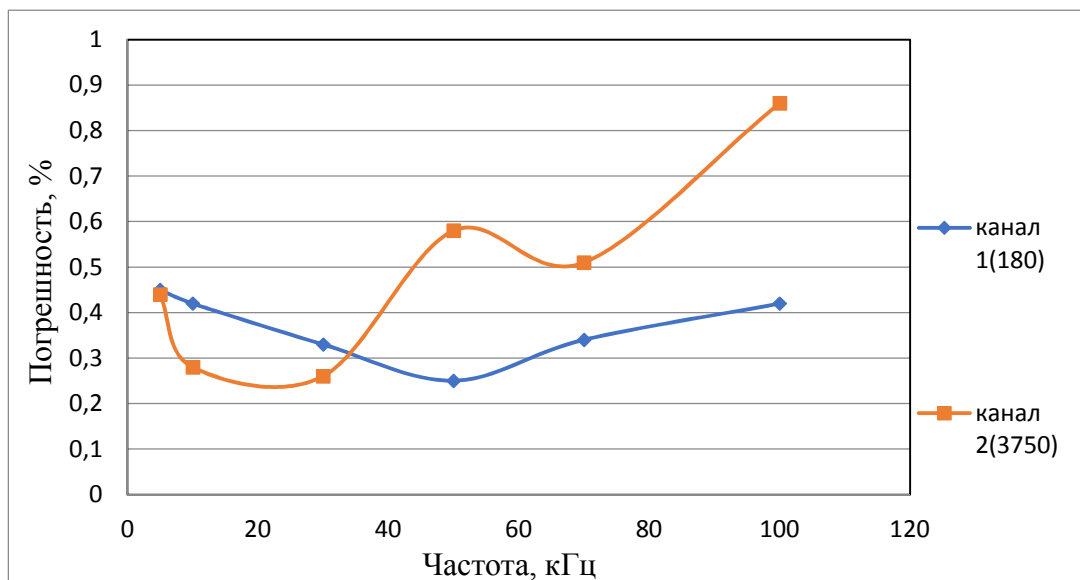


Рисунок 3.11 – АЧХ первого и второго канала емкостного делителя напряжения

Подстроечный резистор сделан из диэлектрического каркаса, на которой намотана манганиновая проволока.

Каркас изготовлен из стеклотекстолита и капролона. Вертикальные пластины делаются из стеклотекстолита. Элементы каркаса были изготовлены на фрезерном ЧПУ-станке. Фиксация пластин осуществляется капролоновой шпилькой. Основные части каркаса можно увидеть на рисунке 3.12.

Конструкция резистора позволяет изменять сопротивление и индуктивность контура. В сборе резистор можно увидеть на рисунке 3.13.

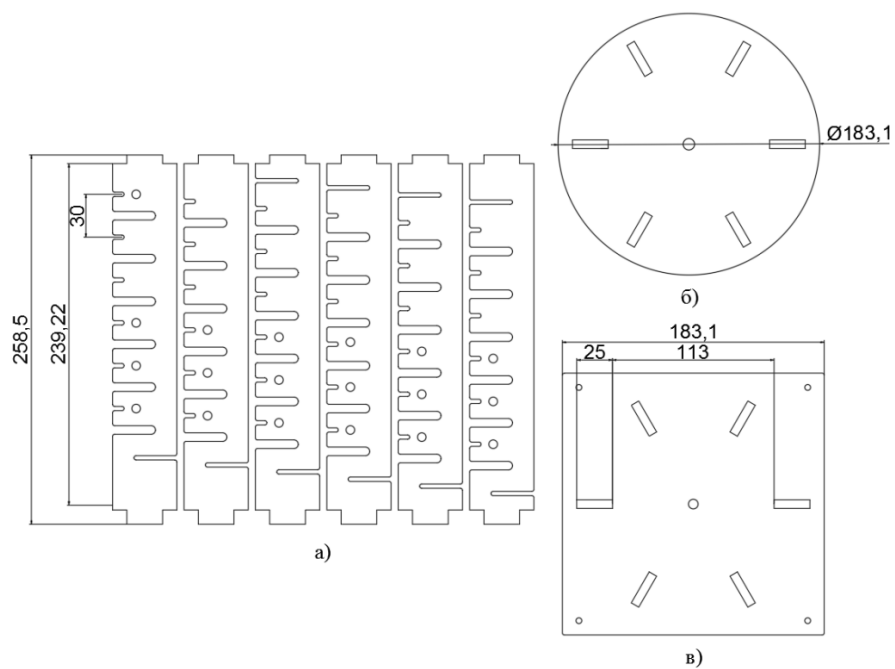


Рисунок 3.12 – Основные части каркаса подстроечного резистора, вертикальные пластины (а), верхняя пластина (б), нижняя пластина (в)

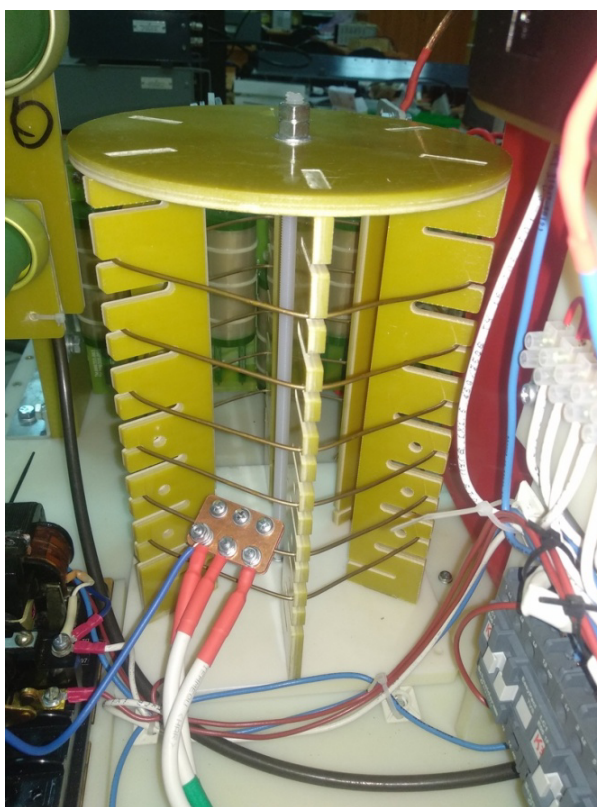


Рисунок 3.13 – Подстроечный резистор в сборе

3.2 ВЫБОР КОМПЛЕКТУЮЩИХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для полноценной установки требуется коммутатор, накопитель энергии – импульсный конденсатор, шунтирующее емкость варистора сопротивление, зарядно-разрядно сопротивление, плата сбора данных.

Конденсатор требуется емкостью 12 мкФ и рабочим напряжением 12 кВ. Для работы установки требуется импульсный конденсатор. Он должен иметь номинальное напряжение выше напряжения высоковольтного зарядного устройства, низкую индуктивность, большой ресурс испытаний и высокую удельную энергию. Подобными параметрами обладает конденсатор КПИ1-19-12. Он обладает следующими параметрами: номинальное напряжение 19 кВ; номинальная емкость 12 мкФ $\pm 5\%$, индуктивность не более 60 нГн, ресурс 60000 циклов; размеры 160×160×360 мм.

В качестве коммутатора используется тиристорная сборка со снабберной цепью и кроубарными диодами. БК6ТИ6ДЛ-12500-12,0-Е имеет рабочее напряжение в закрытом состоянии 12 кВ, номинальный ток 12,5 кА, скорость нарастания тока 2400 А/мкс. Размеры блока 550×255×245 мм.

В качестве зарядно-разрядного сопротивления используем резистор С5-40В сопротивлением 5100 Ом и мощностью 500 Вт. Данный резистор проволочный и способен выдерживать большие перегрузки [13], выдерживаемое импульсное напряжение 35 кВ, габариты 390×80 мм.

У варистора есть своя собственная емкость, с которой требуется снимать остаточное напряжение. Подходящим будет резистор С5-40В. Сопротивление 510 Ом, мощность 100 Вт, выдерживаемое импульсное напряжение 25 кВ. Габариты резистора 260×47 мм.

Плата сбора данных E20-10. Она имеет 4 аналоговых *BNC* входа, 16 цифровых входов, 4,5 Вт питания, разъем *USB 2.0*.

3.3 СБОРКА И НАЛАДКА УСТАНОВКИ

Общая схема расположения узлов установки приведены на рисунке 3.14.

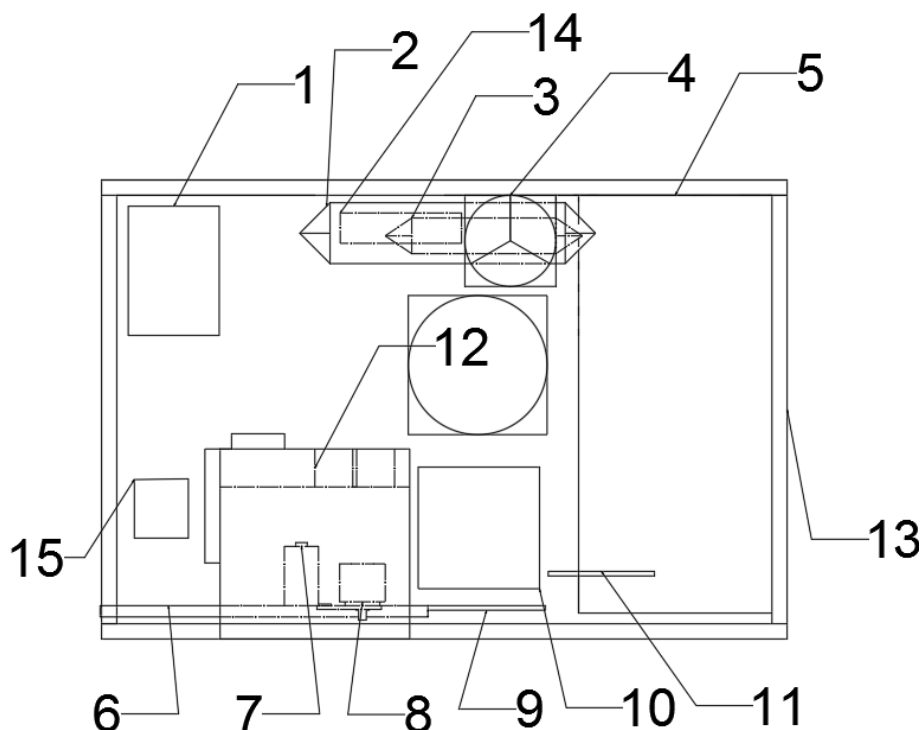


Рисунок 3.14 – Общая схема расположения органов установки

На схеме показанной на рисунке 3.14 продемонстрированы места размещения основных частей установки и их названия: 1 – высоковольтное зарядное устройство, 2 – зарядно-разрядный резистор, 3 – шунтирующий резистор, 4 – вентилятор охлаждения, 5 – коммутатор, 6 – шина заземления, 7 – емкостной делитель напряжения, 8 – коаксиальный шунт, 9 – резистивный делитель напряжения, 10 – конденсатор, 11 – токоограничивающий резистор крорбарного диода, 12 – автоматические выключатели и пускатели, 13 – каркас установки, 14 – заземляющие ножи, 15 – емкостной делитель напряжения шунта.

Из-за близости силовых и измерительных цепей для защиты последних от индуктивного воздействия было сделано экранирование. Соединительные кабели были закрыты от внешнего воздействия ферромагнитной фольгой.

Корпус закрывается листами металла серого цвета. Боковые и задняя стенки не имеют отверстий, верхняя пластина имеет отверстия по вентиляции.

Передняя стенка имеет отверстия по органы управления, на ней нанесены трафаретом обозначения органов управления.

На рисунке 3.15 показаны органы управления установкой.

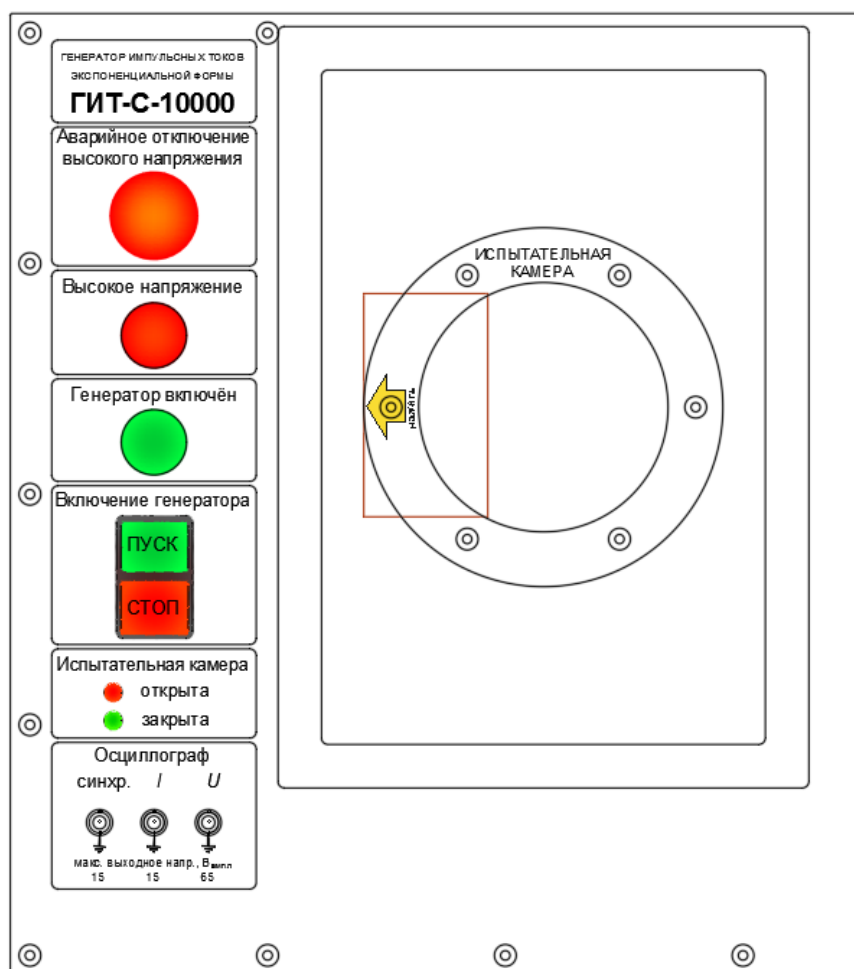


Рисунок 3.15 – Передняя панель установки с органами управления

После проверки работоспособности отдельных узлов установки и ее сборки были произведены испытания. Они установили, что импульс тока в цепи соответствует ГОСТ 30265-95 [1]. Готовая собранная установка показана в приложении на рисунке А.10.

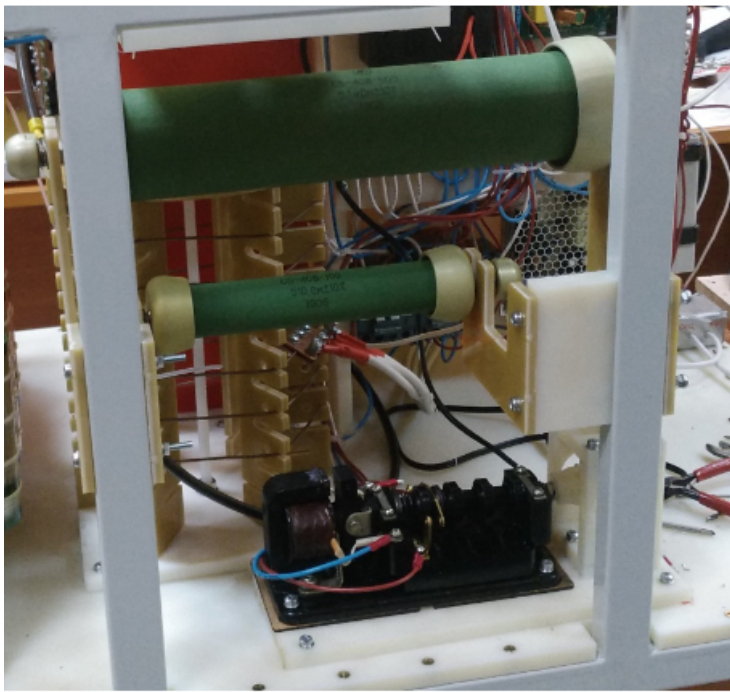
4 МЕРЫ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ

Данная установка предназначена для работы с высоким напряжением и это требует повышенных мер безопасности. Был принят список мер по обеспечению безопасности проведения работ на разрабатываемой установке.

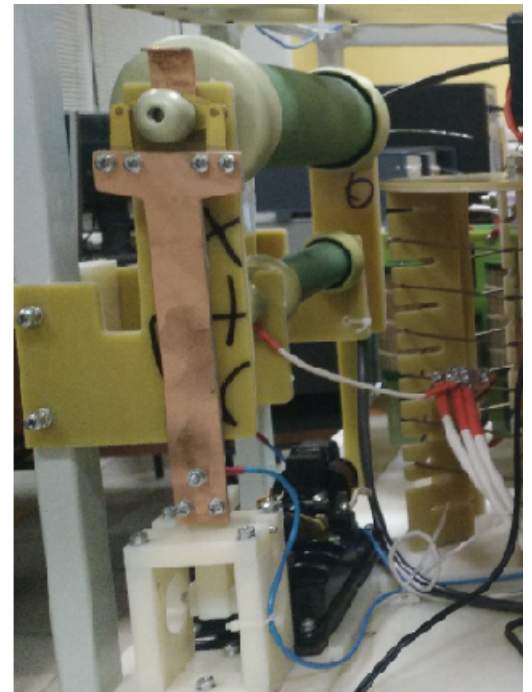
До работы с установкой допускаются работники с III группой по электробезопасности не моложе 18 лет. Они должны ознакомиться с инструкцией по эксплуатации установки, и пройти инструктаж по технике безопасности. Запрещается эксплуатировать незаземленную установку, а также установку со снятыми крышками корпуса.

Установка должна соответствовать пунктам 39.6, 39.13, 39.14, 39.20 Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок [14].

Согласно пункту 39.6 установка имеет закрытый корпус, который не позволяет прикасаться к токоведущим частям установки. Согласно этому же пункту имеется световая и звуковая сигнализация при подаче высокого напряжения. Световая сигнализация показывает: работает ли установка, наличие высокого напряжения, а также открыта или закрыта дверь испытательной камеры. Индикация открытых дверей зависит от положения концевого выключателя двери испытательной камеры. Они располагаются на передней панели и имеют подписи, показаны они на рисунке 3.15. Также на кнопочном poste имеется световая индикация того, что установка включена в сеть. Имеется блокировка управления установкой при открытии испытательной камеры, также в этом случае снимается напряжение с силовой схемы, отключается высоковольтное зарядное устройство. Снятие напряжения обеспечивается заземляющими ножами, которые сделаны на основе промежуточного реле и специально изготовленной конструкции из капролона и фольгированного стеклотекстолита. Эти ножи разряжают конденсатор на зарядно-разрядное сопротивление, увидеть его можно на рисунке 4.1. В отключенном состоянии ножи закорачивают конденсатор, а при подаче напряжения на соленоид реле происходит разрыв разрядной цепи и конденсатор можно заряжать.



а)



б)

Рисунок 4.1 – Вид на заземляющие ножи и зарядно-разрядный резистор сбоку (а), вид спереди на заземляющие ножи и зарядно-разрядный резистор (б)

Согласно пункту 39.13 установка имеет защитное и рабочее заземление. В комплекте с установкой имеется заземляющий медный гибкий проводник. Для него на корпусе имеется крепление.

Согласно пункту 39.14 провод питания имеет штепсельную вилку, с ее помощью также создается видимый разрыв в цепи питания. Кнопка штатного включения утоплена в корпусе кнопочного поста и не позволяет случайно нажать на нее, она расположена на передней панели и входит в состав кнопочного поста. Вторая кнопка отвечает за штатное отключение установки. Между ними расположен световой индикатор, показывающий включение в сеть установки. Располагается кнопочный пост на передней панели и имеет соответствующую подпись, его расположение показано на рисунке 3.15. Провод питания имеет автоматический выключатель.

Согласно пункту 39.20 установка оборудована кнопкой штатного отключения. Установка обладает большой рабочей емкостью и чтобы после окончания испытаний заземляющие ножи разряжают остаточный заряд на зарядно-

разрядное сопротивление. При простое конденсатор установки хранится замкнутым на зарядно-разрядное сопротивление.

Для экстренного отключения высокого напряжения установки предусмотрена на передней панели соответствующая кнопка, рисунок 3.15. Кнопка аварийной остановки имеет 2 положения, в нормальном положении она замыкает цепь питания соленоида заземляющих ножей, а при экстренном отключении она отключает питание и фиксирует свое положение, что после требует повторного нажатия.

5 РАСЧЕТ СЕБЕСТОИМОСТИ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ

Бюджет данной работы состоит из трех крупных статей: затраты на разработку, затраты на изготовление деталей и установки, затраты на закупку комплектующих и расходных материалов. В работе принимали участие 3 категории работников: программисты, инженеры, научные сотрудники. У программистов и инженеров заработная плата в час составляет 203,7 руб/час, у научных сотрудников 407,4 руб/час.

Затраты на разработку включают в себя следующие пункты: разработка технического предложения, разработка конструкторской документации, написание программного обеспечения, разработка эксплуатационной документации. Эти пункты включают в себя: расчет силовой схемы, проектирование специзделий, проектирование цепей управления, создание дизайна установки, создание программного обеспечения и технической документации для работы с установкой.

При проведении разработки основных частей установки были потрачены 200 человеко-часов инженеров и 80 человеко-часов научных работников. При разработке конструкторской документации затраты человеко-часов инженеров составили 350 часов и затраты научных сотрудников составили 50 человеко-часов. При разработке программного обеспечения потрачено 300 человеко-часов программистов. Для создания эксплуатационной документации потребовалось 200 человеко-часов инженеров и 100 человеко-часов программистов.

Затраты на изготовление. Изготовление установки подразумевает под собой изготовление всех необходимых специзделий, такие как: измерительные приборы, корпус, испытательная камера, подстроечное сопротивление, плата защиты измерений, высоковольтное зарядное устройство, вторичные управляющие цепи, заземляющие ножи, оснастка для установки резисторов и сама сборка установки. На проведение данных работ было затрачено 500 человеко-часов инженеров. После изготовления установки была проведена наладка уста-

новки: доводка формы импульса до ГОСТа, дополнительная экранировка измерительных цепей, проверка работоспособности всех систем. На проведение данного типа работ было затрачено 250 человеко-часов инженеров, 100 человеко-часов программистов, 50 человеко-часов научных сотрудников. После следует аттестация установки, она производилась силами научных сотрудников и потребовало 120 человеко-часов работы.

Итогом подсчетов всех этапов работы является таблица 5.1. В ней представлены основные этапы и затраченные временные и денежные ресурсы. Также в затратах учтен страховой взнос заработной платы

Таблица 5.1 – Данные по трудозатратам

Этап работы	Инженер		Программист		Научный сотрудник		Итого за этап	
	чел. час	Зар. плата, руб	чел. час	Зар. плата, руб	чел. час	Зар. плата, руб	чел. час	Зар. плата, руб
Разработка технического предложения	200	40 740	0	0	80	32 592	280	73 332
Разработка конструкторской документации	350	71 295	0	0	50	20 370	400	91 665
Изготовление установки	500	101 850	0	0	0	0	500	101 850
Написание программного обеспечения	0	0	300	61 110	0	0	300	61 110
Пуско-наладочные работы	250	50 925	100	20 370	50	20 370	400	91 665
Разработка эксплуатационной документации	200	40 740	100	20 370	0	0	300	61 110
Аттестация установки	0	0	0	0	120	48 888	120	48 888
Итого чел. час.							2300	
Итого, руб								529 620
Страховые взносы, 30,2 %								159 945
Итого на оплату труда, руб (без НДС)								689 565
Итого на оплату труда, руб (с НДС)								827 478

Затраты на приобретение компонентов, материалов и расходных материалов приведены в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Расходы на покупку компонентов установки

Наименование	количество	стоимость
Конденсатор КПИ1-19-12	1 шт.	60 000
Коммутатор БК6ТИ6ДЛ-12500-12,0-Е	1 шт.	320 000
Плата сбора данных E20-10-D-1-I	1 шт.	38 392
Ноутбук	1 шт.	30 000
Крепежные расходные материалы	5,2 кг	2 100
Капролон	10 кг	7 400
Реле ЭП-41В-33	1 шт.	2 400
Компаунд полиуретановый АДВ-69	3,4 кг	943
Ручка бугельная	2 шт.	1 283
Удлинитель USB 2.0 тип В, с планкой, 50 см	1 шт.	94
15.6" Ноутбук Acer Aspire 3 (A315-55KG-31E4)(FHD) i3 7020U/8192/SSD 256/NV MX130 2Gb/Win10/Black	1 шт.	36 999
УФ-печать на металлической крышке	3 шт.	1000
Провод ПуВ (ПВ-1) 2,5 син.	200 м	3 425
Люк белый металлический нажимной с защёлкой 20*30	1 шт.	670
Трубы электросварные, прямоугольные	7 м	855
Стеклотекстолит СТЭК 6 мм	3,5 кг	775
Камера высоковольтная, испытательная с комплектом зажимов	1 шт.	20 250
Зарядное устройство 12 кВ	1 шт.	42 500
Нанесение полимерного покрытия на мет.изделия RAL7035 панели	5 м ²	1 120
Резистор С5-40 500 Вт ОТК 5,1 кОм 10%	1 шт.	2 924
Электронные компоненты	-	23 834
Детали корпуса	-	3 850
Итого (без НДС)		600 814
Итого (с НДС)		720 976

Итого, для реализации данного проекта потребовалось 1 548 455 рублей. В связи с тем, что в устройства для проведения испытаний варисторов являются штучными изделиями, не имеют серийного производства и являются индивидуальными техническими решениями компаний-производителей варисторов по которым нет информации в открытом доступе сравнение с ними по экономическим затратам и техническим параметрам не возможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были достигнуты следующие результаты.

1 Рассчитаны параметры элементов силовой цепи испытательной установки, способной выдавать импульс тока амплитудой от 0,15 кА до 10 кА и апериодической формой в соответствии с ГОСТ 30265-95.

2 Разработаны и созданы измерительные датчики: делители напряжения, коаксиальный шунт. После создания они прошли испытания, в ходе которых были подтверждены расчетные характеристики.

3 Разработаны и изготовлены специзделия: подстроечное сопротивление, плата защиты измерений, заземляющие ножи для зарядно-разрядного сопротивления и др. Проведен подбор серийно выпускаемых элементов: импульсного конденсатора, коммутационного аппарата и др.

4 Приняты меры по обеспечению безопасной эксплуатации испытательной установки.

5 Рассчитана себестоимость генератора импульсных токов.

6 Изготовлена испытательная установка, соответствующая заданным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30265-95. Варисторы. Метод испытания импульсной электрической нагрузкой. – Введ. 1996–07–01. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М. : Изд-во стандартов, 1996. – 6 с
2. Щеглов Н.В. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007-244 с.
3. Авруцкий В. А., Кужекин И. П., Чернов Е. Н. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента: учебное пособие. Под ред. И. П. Кужекина.– М.: МЭИ, 1983.–264 с.
4. Разработка генератора импульсных токов прямоугольной формы для испытания варисторов [Электронный ресурс] / А. А. Мюльбаер, Ю. В. Целебровский, Н. А. Черненко, С. С. Шевченко, Н. В. Щеглов, Д. А. Зыкова, В. А. Кравченко, И. В. Шмаков // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн. – 2020. – № 1. – С. 28–34.
5. Серебров Р. А. Исследование и разработка полупроводниковых коммутаторов для емкостных накопителей энергии. Диссертация на соискателя степени кандидата технических наук: 01.04.13: Спб. 2017–149 с.
6. **Техника** высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: пер. с нем. / М. Бейлер, В. Бёк, В. Цаенгль / под ред. В.П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. **Щеглов Н.В.** Испытательные установки высокого напряжения. Ч. 4. Измерения на высоком напряжении: учеб. пособие. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2007.– 112 с.
8. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 1-е изд.– М.: Гардарики, 2000 – 638с.:ил.
9. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 3 / под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат; Ленингр. отд-ние, 1988.

10. Расчет индуктивностей: Справочная книга. –3-е изд., перераб. И доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1986.– 488 с.: ил.
11. Испытательные установки высокого напряжения. Ч. 4. Измерения на высоком напряжении : учеб. пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. – 112 с.
12. Щеглов Н.В. Измерения на высоком напряжении: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 122 с.
13. Андронников Д. Особенности выбора и применения резистора в силовой электронике // Силовая электроника , под ред/ П. Правосудов.– Спб., 2007.– С. 4–7.
14. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2013 – с. 94

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ИЗОБРАЖЕНИЯ УСТАНОВКИ И ЕЕ ДЕТАЛЕЙ
НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ СБОРКИ

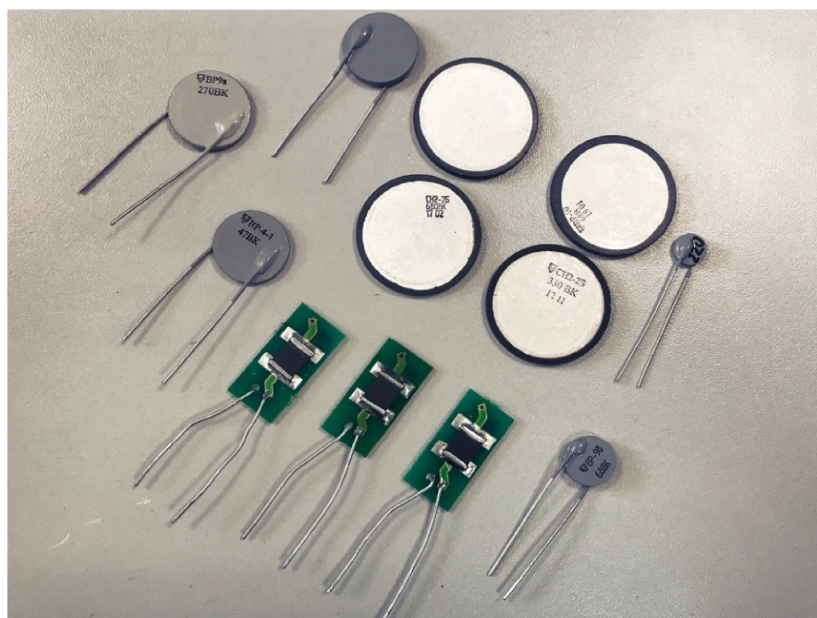


Рисунок А.1 – Испытуемые на установке варисторы

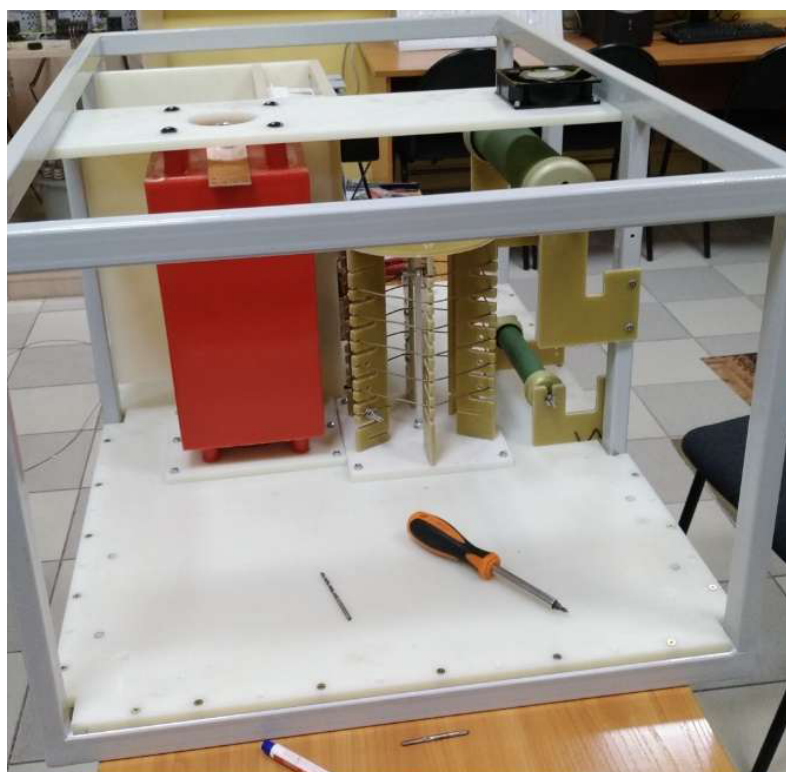


Рисунок А.2 – Установка на начальном этапе сборки



Рисунок А.3 – Установка на начальном этапе сборки, вид спереди

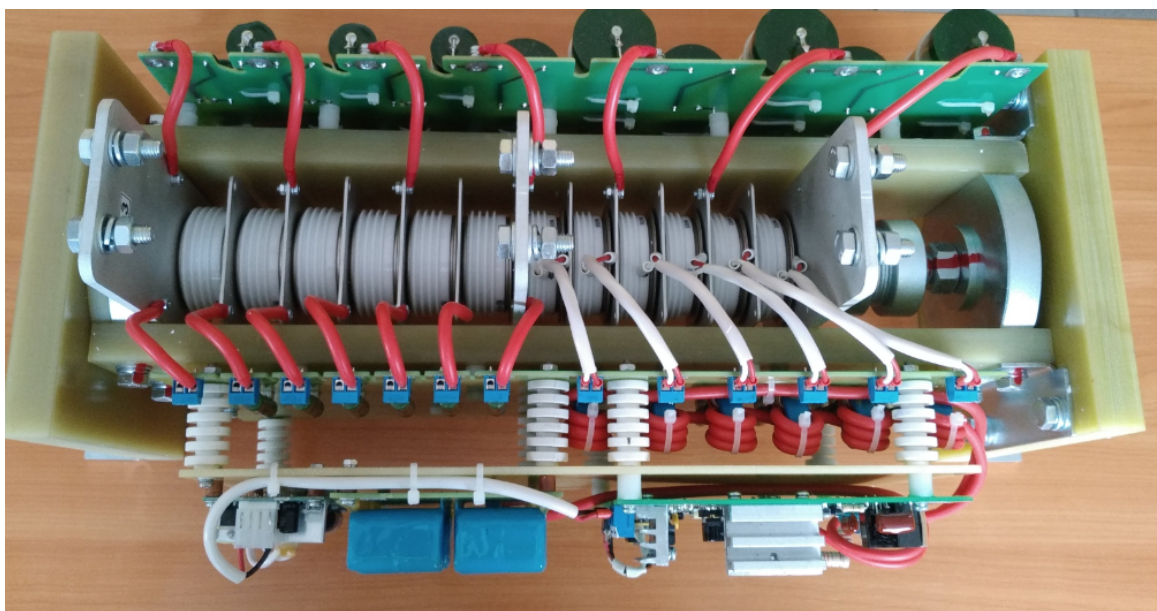


Рисунок А.4 – Тиристорный коммутатор с блоками защиты и управления

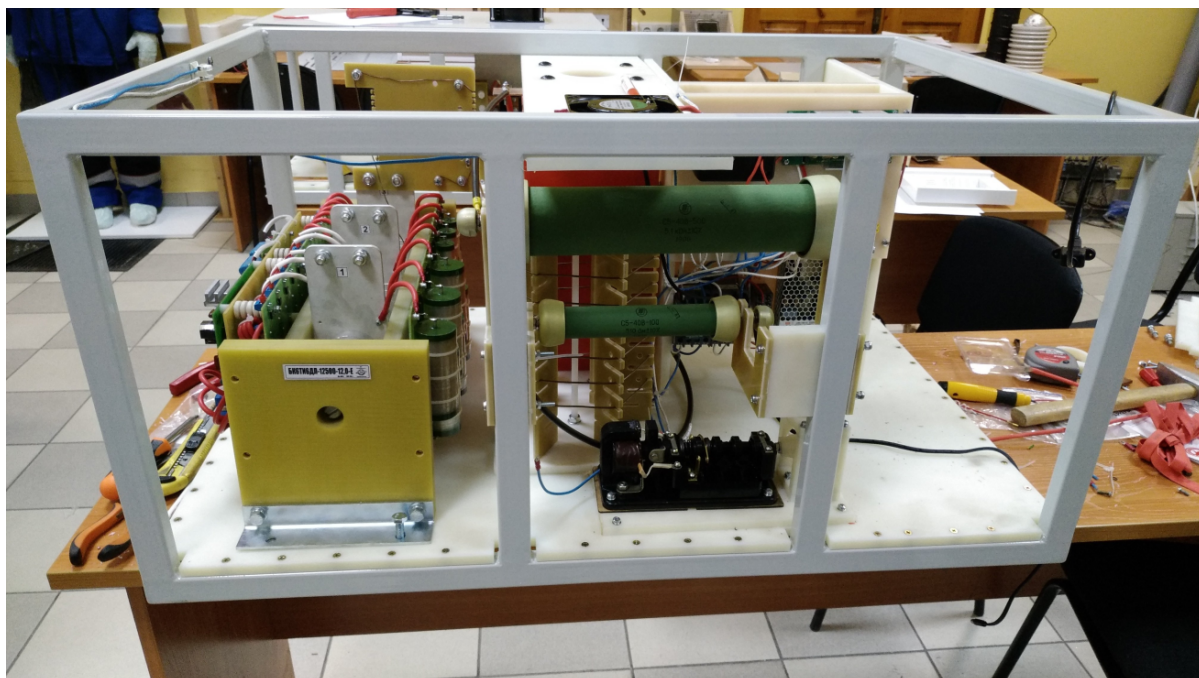


Рисунок А.5 – Установка на промежуточном этапе сборки

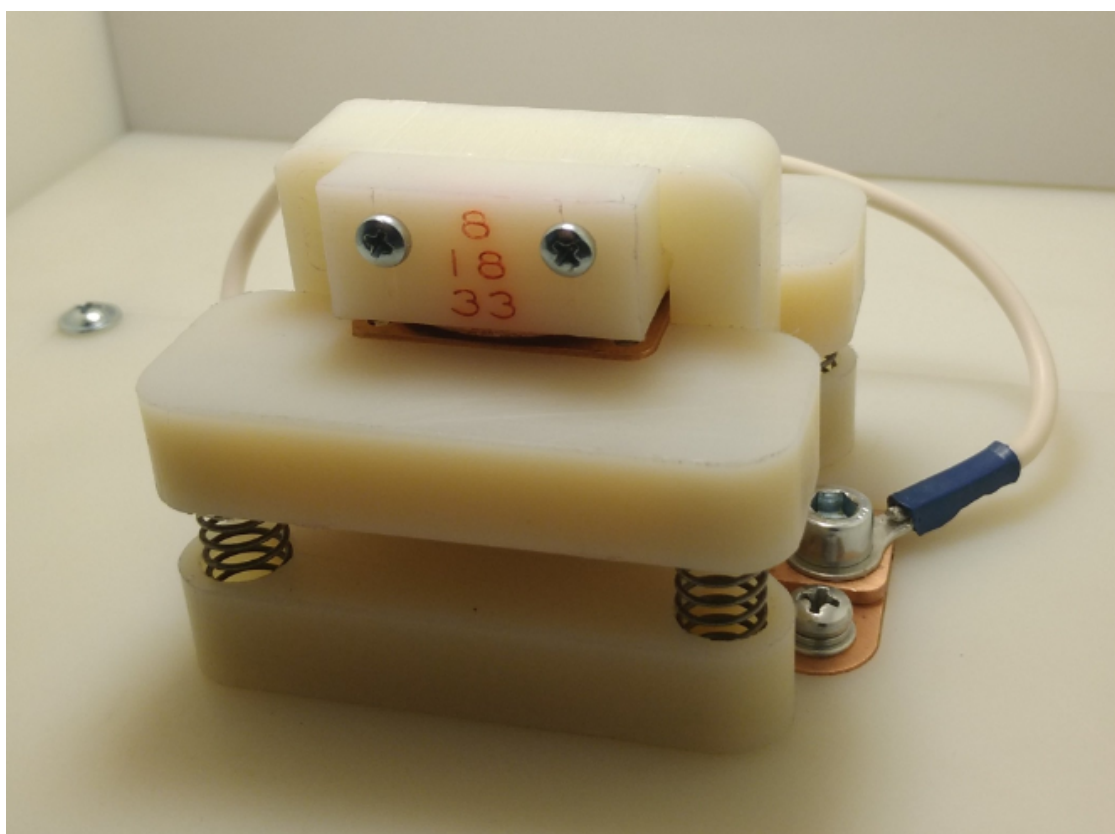


Рисунок А.6 – Сменное крепление под безвыводные варисторы

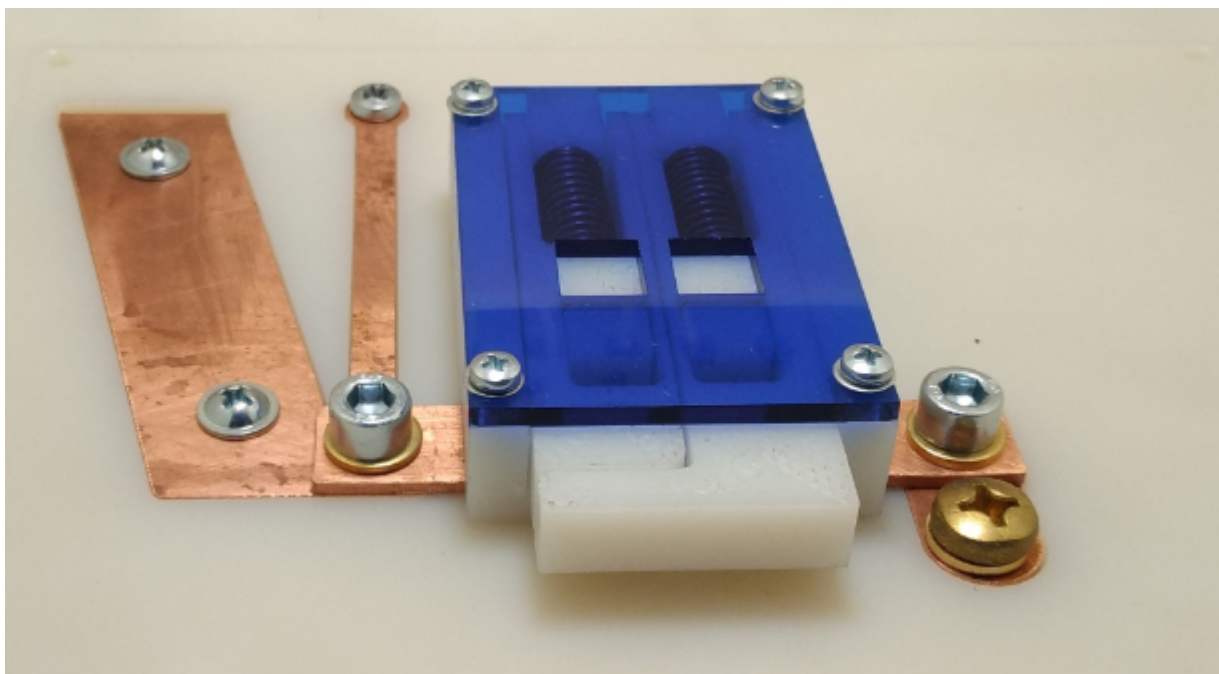


Рисунок А.7 – Сменное крепление под варисторы с выводами для установки на печатные платы



а)

б)

Рисунок А.8 – Ящик хранения сменных зажимов (а), внутреннее содержимое этого ящика: набор сменных переходников для безвыводных варисторов и крепления для варисторов с выводами (б)



Рисунок А.9 – Один из разрушенных варисторов в ходе предварительной настройки установки



Рисунок А.10 – Установка в сборе



Рисунок А.11 – Установка в транспортировочной упаковке перед отправкой заказчику