

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:
«Стенд для испытаний высоковольтных разрядников
с напряжением до 1 МВ»

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (специальность):
1.3.13 Электрофизика, электрофизические установки

Аспирант



Вагайцев Семен Александрович

Научный руководитель:
Ратахин Николай Александрович
академик РАН,
доктор физико-математических наук

Томск – 2024

Актуальность работы

Исследования в области управляемого термоядерного синтеза, а также развитие ускорительной и лазерной техники, электроразрядных и пучковых технологий стимулируют создание импульсных источников энергии на напряжение от нескольких киловольт до нескольких мегавольт, с импульсными токами от нескольких ампер до десятков мегаампер. Длительность импульса таких источников может варьироваться от нескольких наносекунд до долей миллисекунд, а частота повторения импульса может составлять как единицы Герц, так и тысячи Герц. Импульсные источники напряжений включают в себя, как правило, первичный накопитель энергии, систему трансформации (умножения) напряжения, систему коммутации и систему управления. В качестве первичного накопителя энергии чаще всего используются емкостные накопители энергии, реже индуктивные накопители. Умножение напряжения может достигаться разными способами: во-первых, переключением элементов накопителя с параллельного на последовательное соединение (генератор Аркадьева-Маркса); во-вторых, применением импульсного трансформатора напряжения; в-третьих, с помощью резкого обрыва зарядного тока индуктивного накопителя; и наконец, использованием различных способов соединения и конструктивного исполнения формирующих линий. В качестве коммутаторов, которые являются ключевыми компонентами импульсных генераторов, используются полупроводниковые коммутаторы, тиратроны, газоразрядные лампы и искровые разрядники. [1]. На сегодняшний день наиболее распространенными являются искровые газовые разрядники, которые имеют относительно простую конструкцию, высокую надежность, простоту в обслуживании и ремонте. В качестве рабочей среды в искровых разрядниках импульсных генераторов используются высокопрочные газы, находящиеся под высоким давлением, такие как азот, элегаз и их смеси.

Формирующие линии часто используют для генерирования и трансформации импульсов напряжения и тока. Зарядив формирующую линию от генератора высокого напряжения, необходимо скоммутировать её за время меньшее чем время пробега электромагнитной волны по этой формирующей линии. Время коммутации формирующей линии определяет время нарастания генерируемого на нагрузке импульса. Параметры искровых коммутаторов зависят от их назначения в различных генераторах. К временным параметрам относятся:

время коммутации t_k (10^{-10} – 10^{-8} с)

время задержки срабатывания t_z (10^{-9} – 10^{-7} с)

разброс времени задержки срабатывания Δt_z (10^{-10} – 10^{-8} с)

длительность импульса на полувывсоте

Параметры, касающиеся тока и напряжения. Токи, коммутируемые одним разрядником, составляют 10^2 – 10^6 А, а напряжения 10^3 – 10^7 В.

Также важными параметрами коммутатора является его сопротивление и индуктивность. Причем если первый параметр определяется физическими свойствами плазмы разряда в промежутке, то второй – также геометрией и конструкцией элементов коммутатора. [2].

ОВПЭ Института сильноточной электроники СО РАН занимается разработкой и конструированием высоковольтных генераторов с напряжениями порядка единиц Мегавольт и токами от единиц до сотен килоампер. Для таких генераторов необходимы высоковольтные разрядники с различными параметрами. Сборка всего генератора, как правило, осуществляется ближе к концу завершения проекта. К этому времени все ключевые узлы, такие как высоковольтный разрядник, должны быть испытаны и настроены для работы в составе генератора.

Стенд создавался для исследования характеристик и испытания изготовленных высоковольтных газовых разрядников с напряжением до 1 МВ и длительностью прикладываемого напряжения порядка 1 мкс, которые

востребованы в ряде работ в отделе высоких плотностей энергии (ОВПЭ). Созданный стенд имеет многофункциональное применение, в частности, он может быть использован в качестве прототипа генератора высоковольтных импульсов для получения электронного и тормозного рентгеновского излучения

Целью работы является разработка и создание компактного стенда для исследования характеристик и испытаний высоковольтных газовых разрядников до 1 МВ, и длительностью прикладываемого напряжения порядка 1 мкс и исследование возможности получения многоканального режима работы высоковольтного газового разрядника с напряжением 750 кВ и длительностью прикладываемого напряжения порядка 1 мкс для уменьшения его индуктивности.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Обзор литературы, посвященной методам умножения напряжения и выбору схемных решений для данного стенда.
2. Расчет параметров стенда с напряжением до 1 МВ и длительностью прикладываемого напряжения порядка 1 мкс.
3. Разработка и изготовление исследовательского стенда с автоматизированной системой управления и регистрации сигналов.
4. Исследование высоковольтного разрядника с использованием стенда.

Методы исследования

Основным методом исследования в данной работе является физический эксперимент, в ходе которого измерялись амплитудные и временные характеристики токов и напряжений в ключевых узлах стенда.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

1. Разработан, изготовлен и запущен стенд для испытания высоковольтных газовых разрядников с напряжением до 1 МВ и длительностью прикладываемого напряжения порядка 1 мкс с автоматизированной системой управления и регистрации сигналов.

2. Разработан, изготовлен и испытан многоискровой малоиндуктивный газовый разрядник с напряжением 750 кВ и длительностью прикладываемого напряжения порядка 1 мкс.

Осуществлена синхронная коммутация четырех параллельных многоискровых разрядников, коммутирующих формирующие линии с волновыми сопротивлениями по 3.7 Ом. При этом среднеквадратическое отклонение времени срабатывания разрядника составляет 6 нс, разница времени запаздывания срабатывания отдельных разрядников составляет не более 10 нс.

3. Увеличение времени нарастания импульса напряжения генератора, запускающего высоковольтные разрядники, с 10 до 20 нс привело к увеличению среднеквадратического отклонения времени срабатывания разрядника с 4 до 6 нс.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием стандартных методик измерения амплитудных и временных характеристик токов и напряжений, воспроизводимостью результатов, полученных при испытаниях.

Научная новизна

Описанный в работе многоискровой малоиндуктивный газовый разрядник на напряжение 750 кВ и током через разрядник до 200 кА разработан на основе предложенного в [3] разрядника для коммутации формирующей линии с волновым сопротивлением 60 Ом. Использован более простой, в отличие от предложенного в [3], способ управления разрядником. Впервые осуществлена синхронная коммутация четырех параллельных многоискровых разрядников, коммутирующих формирующие линии с волновыми сопротивлениями по 3.7 Ом. При этом среднеквадратическое отклонение времени срабатывания разрядника составляет 6 нс, разница времени запаздывания срабатывания отдельных разрядников составила не более 10 нс.

Практическая значимость

Разработан и изготовлен испытательный стенд с генератором запуска высоковольтных разрядников, позволяющий проводить высоковольтные и ресурсные испытания газовых управляемых разрядников до 1 МВ и длительностью прикладываемого напряжения порядка 1 мкс.

Разработанный исследовательский стенд был использован для испытаний и исследований высоковольтных газовых разрядников, разработанных в нашем отделе. Также стенд использовался в качестве составная часть генератора высоковольтных импульсов с напряжением 850 кВ и длительностью импульса напряжения на полувысоте 16 нс для испытания других объектов.

Публикации результатов исследования

Направлены тезисы доклада на конференцию EFRE 2024.

Личный вклад аспиранта

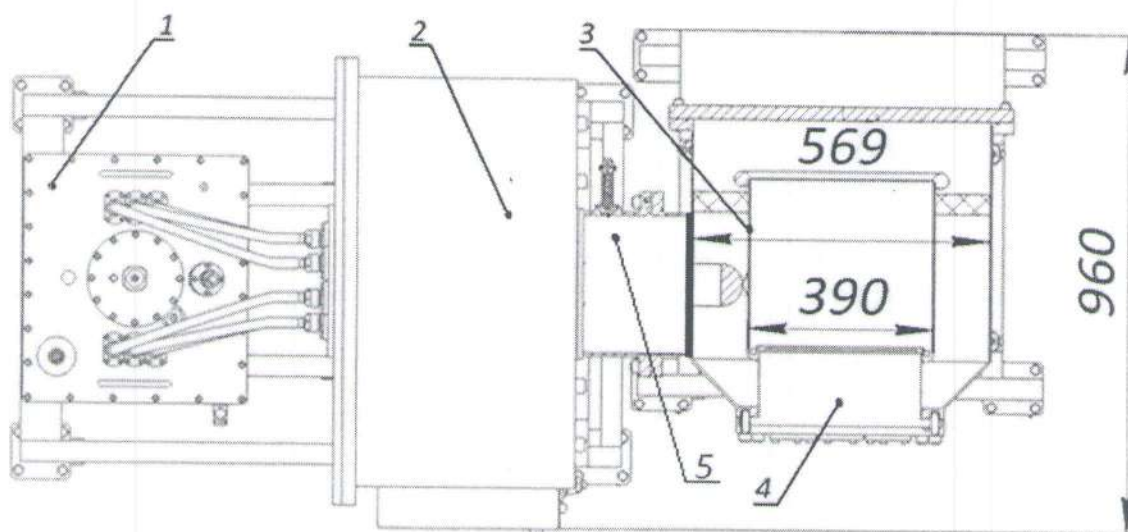
Представленная в работе конструкция стенда разработана коллективом: Н.А. Ратахин, В. К. Петин, А.А. Качалков, А. А. Эрфорт, В. В. Подковырова при активном участии С. А. Вагайцева во всех работах по разработке, изготовлению и испытанию стенда. Аспирантом проводился расчет электростатических полей стенда, расчет и изготовление датчиков напряжения и тока, разработка отдельных узлов конструкции стенда, сборка и запуск испытательного стенда, проведение высоковольтных испытаний. Аспирантом осуществлена разработка конструкции разрядников, сборка разрядников, их испытания и исследование параметров разрядников, а также формулирование выводов, на основе полученных данных.

Основное содержание работы

1. Описание стенда для испытания высоковольтных разрядников

Стенд для испытания высоковольтных газовых разрядников состоит из импульсного трансформатора с первичным накопителем энергии описанного в [4], формирующей линии или коаксиального высоковольтного конденсатора, генератора запуска высоковольтного разрядника с амплитудой 120 кВ, разработанного по конструкции, описанной в [5],

исследуемого высоковольтного разрядника. Конструкция стенда для испытания высоковольтных газовых разрядников с коаксиальным высоковольтным конденсатором приведена на рисунке 1.



1-первичный накопитель энергии; 2-импульсный трансформатор;
3-коаксиальный высоковольтный конденсатор; 4- исследуемый разрядник;
5-высоковольтный вывод импульсного трансформатора.

Рисунок 1. Конструкция стенда для испытания высоковольтных разрядников. Вид сверху.

Стенд работает по следующему алгоритму.

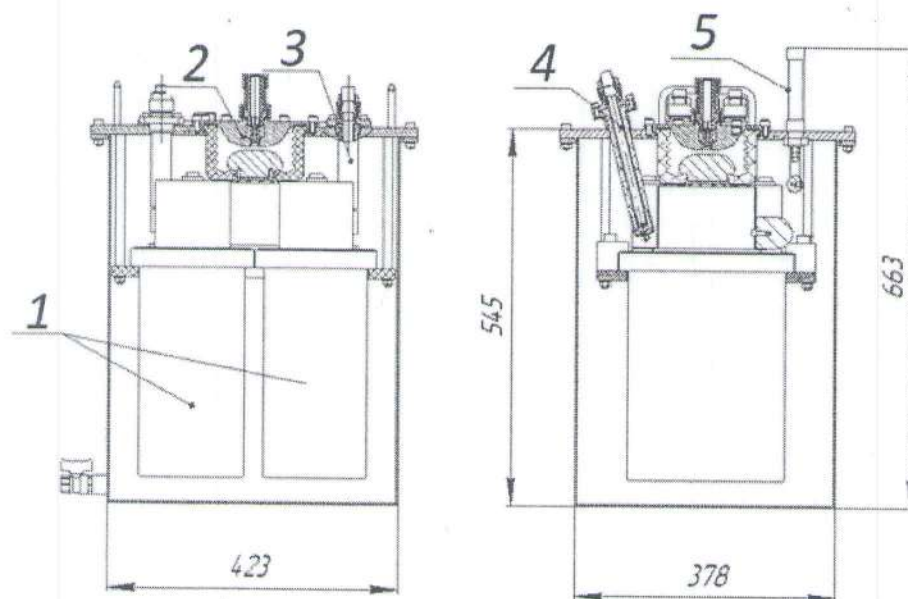
По команде оператора с пульта управления, в автоматическом режиме, происходит подача необходимых давлений в разрядник первичного накопителя, разрядники запускающего генератора, исследуемый разрядник и заземляющее устройство (пневмоцилиндры). Далее происходит зарядка емкостей первичного накопителя, конденсаторов в блоках перемагничивания, блоке запуска первичного накопителя, блоке запуска запускающего генератора (ГИН), конденсаторов ГИН. Система готова к запуску.

По команде оператора происходит запуск блока подмагничивания сердечника трансформатора, в максимуме тока, через 100 мкс, запускается импульсный трансформатор. Емкость формирующей линии (коаксиального конденсатора) заряжается за время 1.3 мкс до уровня 0.95 от максимума и

срабатывает запускающий генератор (ГИН), коммутирующий исследуемый разрядник. Запуск блока подмагничивания, первичного накопителя и запускающего генератора обеспечивается системой синхронизации.

Импульсный трансформатор с первичным накопителем изготовлены на основе предложенного в [4].

На рисунке 2 изображен первичный накопитель энергии 1 для импульсного трансформатора напряжения.



1-конденсаторы ИЭПМ-100-0.4; 2-коммутирующий разрядник;
3-выводы высокого напряжения; 4- высоковольтный ввод;
5- заземляющее устройство с пневматическим приводом

Рисунок 2. Первичный накопитель энергии для импульсного трансформатора напряжения.

Бак первичного накопителя заполнен трансформаторным маслом. Конденсаторы ИЭПМ-100-0,4 с суммарной емкостью 724.6 нФ заряжаются через высоковольтный ввод 4 от 30 до 80 кВ от внешнего источника высокого напряжения. С помощью управляемого разрядника тригatronного типа 2, емкостной накопитель 1 разряжается на первичную обмотку

импульсного трансформатора шестью отрезками кабеля КВИМ длиной 1 м через выводы высокого напряжения 3. Заземляющее устройство 5 служит для снятия остаточного напряжения в конденсаторах первичного накопителя. Искровой промежуток в управляемом разряднике 2 равен 7.65 мм с точностью 0.05 мм (погрешность измерения штангенциркуля).

Ток на выходе первичного накопителя $I_{\text{первич}}$ измеряется поясом Роговского. Пояс Роговского охватывает весь коммутирующий разрядник и располагается на среднем диаметре 199.8 мм. Ток в нагрузке $I_{\text{п.н.}}$ измеряется поясом Роговского в режиме трансформатора тока и определяется как:

$$I_{\text{п.н.}} = K_I \cdot K_{\text{осл}} \cdot U_{\text{осц}} / R_{\text{п}}, \quad (1)$$

где K_I – чувствительность пояса Роговского ($K_{\text{первич}} = 293,8 \text{ А/В}$),

$K_{\text{осл}}$ – коэффициент деления ослабителя ($K_{\text{осл}} = 6$), $U_{\text{осц}}$ – сигнал с осциллографа в вольтах.

$$K_I = L/M, \quad (2)$$

$$M = \mu * \mu_0 * \frac{N}{l} * S, \quad (3)$$

где L – индуктивность пояса Роговского, M – коэффициент взаимной индукции μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$; N – количество витков в поясе Роговского (230); l – длина пояса Роговского; S – площадь сечения витка (34.51 мм^2);

Индуктивность пояса, измеренная с помощью измерителя RLC E7-8 составляет 5.2 мкГн; коэффициент взаимной индукции $M = 17.7 \text{ нГн}$ рассчитан по формуле 3; $K_I = 293.8$ (формула 2).

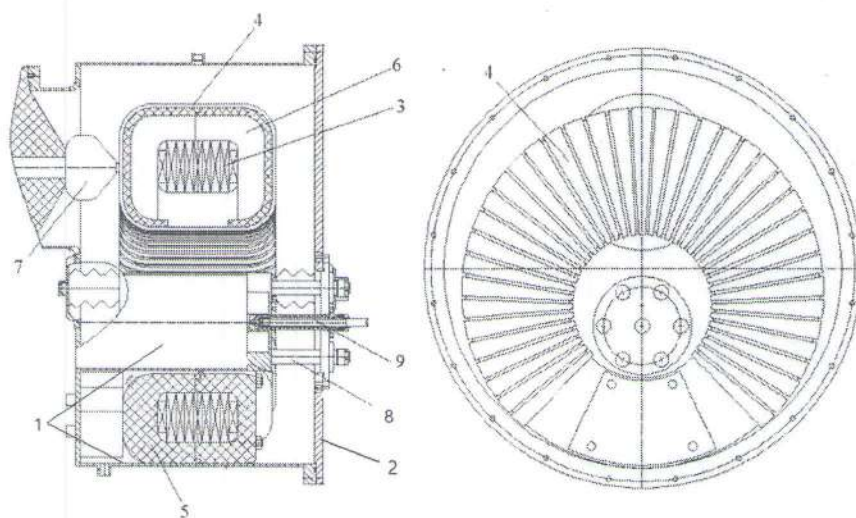
Напряжение на выходе первичного накопителя измеряется резистивным делителем напряжения и определяется

$$U_{\text{первич}} = K_{U_{\text{первич}}} \cdot K_{\text{осл}} \cdot U_{\text{осц}}, \quad (4)$$

где $K_{U_{\text{первич}}}$ – коэффициент деления делителя напряжения ($K_{U_{\text{первич}}} = 330,12$), $K_{\text{осл}}$ – коэффициент деления ослабителя ($K_{\text{осл}} = 6$), $U_{\text{осц}}$ – сигнал с осциллографа в вольтах.

Для зарядки формирующей линии до рабочего напряжения 1 МВ применён импульсный трансформатор (рисунок 3). Главная задача при разработке высоковольтного импульсного трансформатора – реализация надёжной работы без пробоя изоляционных промежутков в трансформаторе (между первичной обмоткой и вторичной обмоткой, между вторичной обмоткой и сердечником, между витками вторичной обмотки) при паразитной индуктивности трансформатора, достаточно небольшой для зарядки линии за сравнительно короткое время, что приводит к необходимости уменьшения изоляционных промежутков. При расчёте электрической прочности изоляционных промежутков использовалась программа Elcut для расчёта электростатических полей.

Трансформатор размещён в металлическом корпусе 1 с габаритными размерами: длина – 611 мм, ширина – 854 мм, высота – 1475 мм, герметично закрытом крышкой 2.



1-Корпус трансформатора; 2-крышка трансформатора; 3-Сердечник трансформатора; 4-витки трансформатора; 5-Каркас из полиэтилена; 6-Полость для масляной изоляции; 7-Ввод к формирующей линии; 8-Высоковольтные вводы; 9-Ввод подмагничивания;

Рисунок 3. Конструкция импульсного трансформатора

Трансформатор выполнен на замкнутом тороидальном сердечнике.

Сердечник 3 трансформатора набран из отдельных сердечников, сердечники намотаны лентой из электротехнической стали Э-3425 шириной 18 мм и толщиной 50 мкм, суммарное поперечное сечение сердечника трансформатора по «железу» составляет 100 см^2 . Максимальный перепад индукции стали Э-3425 составляет около 4 Тл, удельная проводимость стали $5 \cdot 10^6 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$. Витки из электротехнической стали в сердечниках изолированы друг от друга лавсановой пленкой толщиной 10 мкм. Сердечник размещён в каркасе 5 из полиэтилена. В местах с максимальной напряженностью электрического поля в каркасе выбрана полость 6 для обеспечения масляной изоляции.

На каркасе смонтированы две соединенные параллельно вторичные обмотки из 20 витков каждая. Витки 4 изготовлены из дюралюминиевой полосы толщиной 8 мм, профилированной по ширине для обеспечения одинаковых зазоров между витками на разных диаметрах магнитопровода. Два рядом находящихся конца обмоток соединены друг с другом и пружинным контактом соединены с вводом к формирующей линии 7. Два других конца вторичных обмоток заземлены. Четвертый виток одной из обмоток соединен с сердечниками магнитопровода. Сердечник с вторичными обмотками монтируется в корпус 1.

Первичная обмотка трансформатора имеет один виток, который образован высоковольтными вводами 8 для подвода электрической энергии от накопителя первичного и корпусом трансформатора 1.

Герметичный металлический корпус импульсного трансформатора заполнен трансформаторным маслом с пробивным напряжением 50 – 70 кВ на стандартный промежуток прибора АИМ-90 (2,5 мм).

Для использования полного перепада магнитной индукции и стабилизации параметров формируемых импульсов используется подмагничивание сердечника 9.

Приведённая к вторичной обмотке суммарная индуктивность первичного накопителя и паразитная индуктивность трансформатора

составляет примерно 78 мкГн, ёмкость первичного накопителя «в ударе» составляет 1.8 нФ.

$$C_{уд} = C_{п.н.}/n^2, \quad (5)$$

где $C_{п.н.}$ – ёмкость первичного накопителя, n – количество витков в трансформаторе.

Для оценочных расчетов процесса заряда ёмкости формирующей линии без учета потерь энергии в первичном накопителе энергии достаточно схема замещения из последовательно соединенных ёмкости трансформатора в «ударе» $C_{уд}$, суммарной индуктивностью первичного накопителя, приведенной к вторичному витку, и паразитной индуктивности первичного накопителя энергии $L'_{сум}$ и ёмкости формирующей линии $C_{ф}$. Напряжение на ёмкости формирующей линии $U_{ф}$ определяется формулой 6:

$$U_{ф} = U_{уд} \frac{C_{уд}}{C_{уд} + C_{ф}} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right); T = 2\pi \sqrt{L'_{сум} * \frac{C_{уд} * C_{ф}}{C_{уд} + C_{ф}}}, \quad (6)$$

где $U_{уд}$ – напряжение трансформатора в «ударе»; t – время.

Формирующая линия

Волновое сопротивление формирующей линии, определяется как:

$$\rho = \frac{60 * \ln \frac{D}{d}}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (7)$$

где D – внутренний диаметр внешнего электрода формирующей линии, d – наружный диаметр среднего электрода формирующей линии, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

Время распространения электромагнитной волны по формирующей линии определяется как

$$t = \frac{l * \sqrt{\epsilon}}{c}, \quad (8)$$

где l —длина формирующей линии, м; ε —относительная диэлектрическая проницаемость; c —скорость света в вакууме.

Волновое сопротивление формирующей линии стенда с диаметром $D=568$ мм, $d=390$ мм и глицериновой изоляцией ($\varepsilon=42$) согласно формуле 7 равно 3.5 Ом. Длина формирующей линии стенда равна 0.4 м, время распространения электромагнитной волны по формирующей линии согласно формуле 8 равно 8.7 нс.

Для расчета индуктивности формирующей линии воспользуемся выражением:

$$L = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{d} l, \quad (9)$$

где D —внутренний диаметр внешнего электрода формирующей линии, d — наружный диаметр среднего электрода формирующей линии, μ —относительная магнитная проницаемость, μ_0 —магнитная постоянная, l —длина формирующей линии в метрах. При длине формирующей линии стенда 0.4 м, индуктивность формирующей линии согласно формуле 9 равна 30.2 нГн.

Для расчета емкости формирующей линии воспользуемся выражением:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln \frac{D}{d}} l, \quad (10)$$

где D —внутренний диаметр внешнего электрода формирующей линии, d — наружный диаметр среднего электрода формирующей линии, ε —относительная диэлектрическая проницаемость, l —длина формирующей линии в метрах.

Емкость формирующей линии стенда равна 2.48 нФ (формула 10), Суммарная емкость формирующей линии, с учетом торца, составила 3 нФ.

Напряжение на наружной линии U_{ϕ} измеряется двухступенчатым ёмкостно-резистивным делителем (рисунок 4). Делитель расположен в высоковольтном выводе импульсного трансформатора (рисунок 1), заполненного трансформаторным маслом.

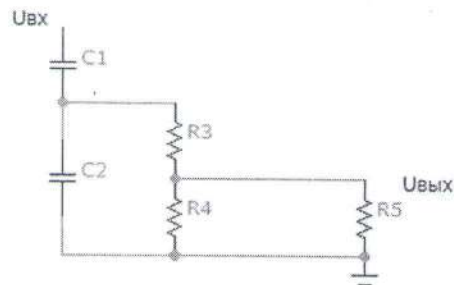


Рисунок 4. Схема электрическая принципиальная двухступенчатого делителя напряжения

Ёмкостная часть делителя образована двумя коаксиальными ёмкостями ФЛ определяется по формуле:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{\phi_2}{\phi_1}} * l_{\text{сектора}} / \pi \phi_2, \quad (11)$$

где $l_{\text{сектора}}$ -неполная длина окружности ёмкостного делителя,

ϕ_2 -наружный диаметр ФЛ с учетом толщины фольгированного текстолита, ϕ_1 -внутренний диаметр ФЛ, $\epsilon=2.2$ —относительная диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла. Ёмкость $C_1=8$ пФ (формула 11).

Ёмкость C_2 изготовлена из двухстороннего фольгированного текстолита толщиной 0.41мм, с обкладками 0.472 мм, размером 0.109 м на 0.5 м. Ёмкость C_2 измерена на измерителе RLC E7-8 и составляет 5.402 нФ.

Коэффициент деления K_C рассчитывается по формуле 12:

$$K_C = (C_1 + C_2) / C_1 \quad (12)$$

Коэффициент деления ёмкостного делителя равен $K_C=767.25$ (формула 12).

Запускающий генератор

Для получения необходимого времени нарастания импульса напряжения для синхронного запуска до 4^х каналов разработан, на основе предложенного в [5], запускающий трехступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН), схема которого представлена на рисунке 5.

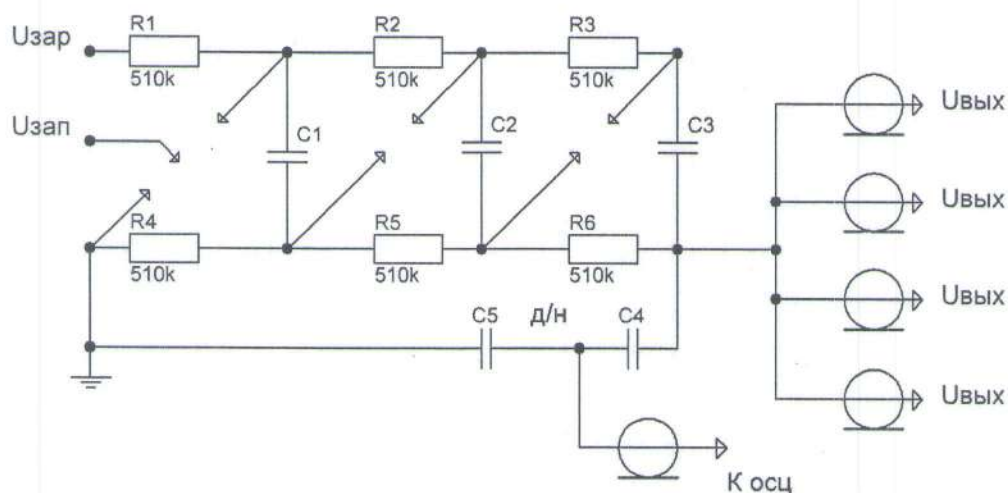


Рисунок 5. Схема электрическая принципиальная запускающего ГИН

Основные технические характеристики ГИН:

- зарядное напряжение	40 – 45 кВ;
- полярность зарядного напряжения	положительная;
- амплитуда выходного напряжения	120 – 135 кВ;
- полярность выходного напряжения	отрицательная;
- длительность фронта импульса выходного напряжения	8 – 10 нс;
- амплитуда импульса запуска	15 – 20 кВ;
- полярность импульса запуска	отрицательная.
- рабочее давление	до 6 ати.
- ударная емкость	3,96 нФ

Конструкция запускающего ГИН представлена на рисунке 6.

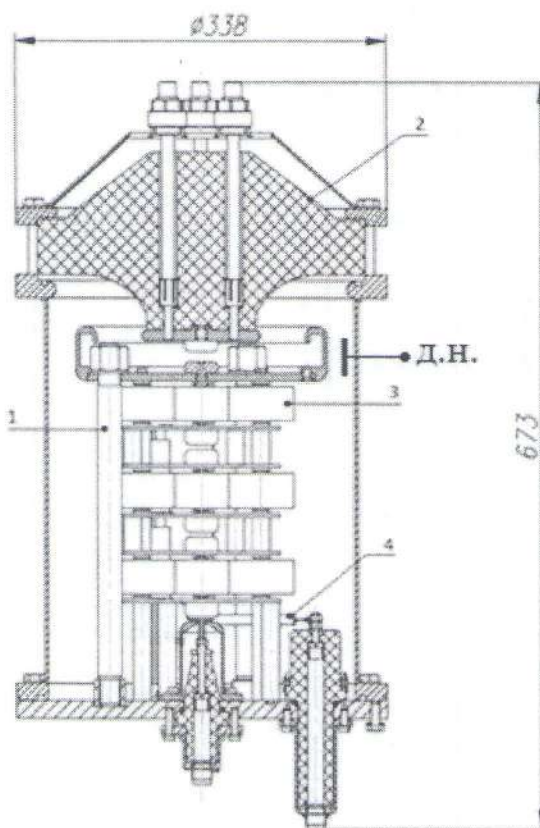


Рисунок 6. Конструкция запускающего ГИН

Каждая ступень 3 состоит из семи конденсаторов TDK-50kV-1,7n (50кВ, 1,7 нФ), соединенных параллельно. Зарядка ступеней осуществляется через зарядные резисторы 4 ТВО-5 сопротивлением $R=510$ КОм. Между ступенями конденсаторов расположены разрядники, первый из которых выполнен управляемым. Ступени генератора стянуты шпильками 1 из капролона. Все элементы ГИН расположены в герметичном металлическом корпусе, заполненном сухим воздухом при повышенном давлении. Вывод напряжения осуществляется через изолятор 2 из полиэтилена четырьмя кабелями КВИ-120 длиной по 6 м, подключаемых к разрядникам формирующих линий. Параметры кабеля КВИ-120:

$C_{\text{каб}}=100$ пФ/м, $R_{\text{каб}}=50$ Ом, тогда $R_{\text{нагр ГИН}}=12,5$ Ом, $C_{\text{нагр ГИН}}=2,4$ нФ.

С использованием одного кабеля в виде нагрузки получено время нарастания импульса напряжения менее 10 нс, при подключении четырех кабелей время нарастания импульса напряжения увеличилось до 20 нс.

2 Многоискровой газовый разрядник высокого давления

Разрядник предназначен для коммутации формирующей линии на «землю» с минимальными потерями энергии и минимальными искажениями формируемого импульса.

Основные требования к разряднику – минимальные активное сопротивление и индуктивность разрядника при большом ресурсе срабатываний. Активное сопротивление разрядника определяется длиной и количеством искровых каналов при срабатывании разрядника, током через искровые каналы и видом используемого газа. Индуктивность разрядника определяется длиной и количеством искровых каналов, а также конструкцией (длиной и диаметром) разрядника. Длина разрядника определяется электрической прочностью поверхности изолятора разрядника. В конечном счёте активное сопротивление и индуктивность разрядника определяются электрической прочностью искрового промежутка и электрической прочностью поверхности изолятора при заданном давлении и роде газа [6].

Описанный в работе многоискровой малоиндуктивный газовый разрядник на напряжение 750 кВ и током через разрядник до 200 кА разработан на основе предложенного в [3] разрядника для коммутации формирующей линии с волновым сопротивлением 60 Ом. В нашей работе было необходимо синхронно запускать четыре разрядника, поэтому в отличие от предложенного в [3], был использован более простой способ управления разрядником. На рисунке 7 приведена конструкция высоковольтного сильноточного управляемого многоискрового газового разрядника, разработанного на напряжение 750 кВ.

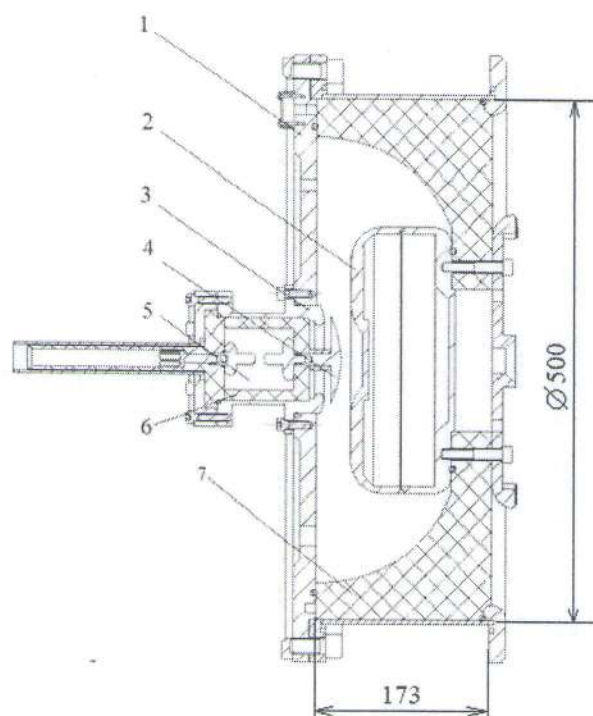


Рисунок 7. Конструкция управляемого разрядника

Вся конструкция (корпус 1, основные 2, 3 и управляющий 4 электроды) выполнена из нержавеющей стали. Изоляторы 6, 7 изготовлены из капролона. Развязывающий разрядник 5 и основной разрядник заполняются сухим воздухом под давлением до 15 атмосфер с точкой росы до -60°C .

Многоискровой малоиндуктивный газовый разрядник предназначен для коммутации «формирующей линии» с волновым сопротивлением $\rho=3,7 \text{ Ом}$. Высоковольтный электрод заряжается до напряжения $U_{\text{зар}}=750 \text{ кВ}$. Запускающий электрод, выполненный в виде диска с острой кромкой диаметром 8 см. Зазор между пусковым и высоковольтным электродами 26 мм. Потенциал электрода равен потенциалу пространства без его учета, поэтому электрическое поле на его кромке не усиливается. При подаче на пусковой электрод поджигающего импульса величиной 120 кВ отрицательной полярности происходит усиление поля на острой кромке и многоканальный пробой разрядного промежутка. Для того чтобы

пусковая цепь не оказывала влияния на потенциал поджигающего электрода, определяемый емкостным делением основного напряжения, между поджигающим электродом и пусковой цепью устанавливается развязывающий разрядник 5.

Обеспечение многоканальности и малого разброса времени срабатывания разрядника обусловлено коротким временем нарастания импульса запуска, порядка 10 нс, и амплитудой импульса запускающего генератора, не менее 10% от зарядного напряжения [2].

Испытание осуществлялось на стенде с емкостью нагрузки $C=3$ нФ и исследуемым высоковольтным многоканальным разрядником. Волновое сопротивление формирующей линии $\rho=3,5$ Ом (формула 7), время пробега электромагнитной волны $t=8,7$ нс (формула 8). Формирующая линия заряжалась до напряжения 750 кВ за 1,3 мкс. Испытания разрядника проводились в режиме короткого замыкания. Период колебаний контура при срабатывании разрядника без управления (самопробой) $T_1=120$ нс, при этом индуктивность разрядного контура составляла $L=121,6$ нГн. Период колебаний контура при внешнем запуске разрядника равен $T_2=105$ нс, при этом индуктивность разрядного контура составила 93,1 нГн.

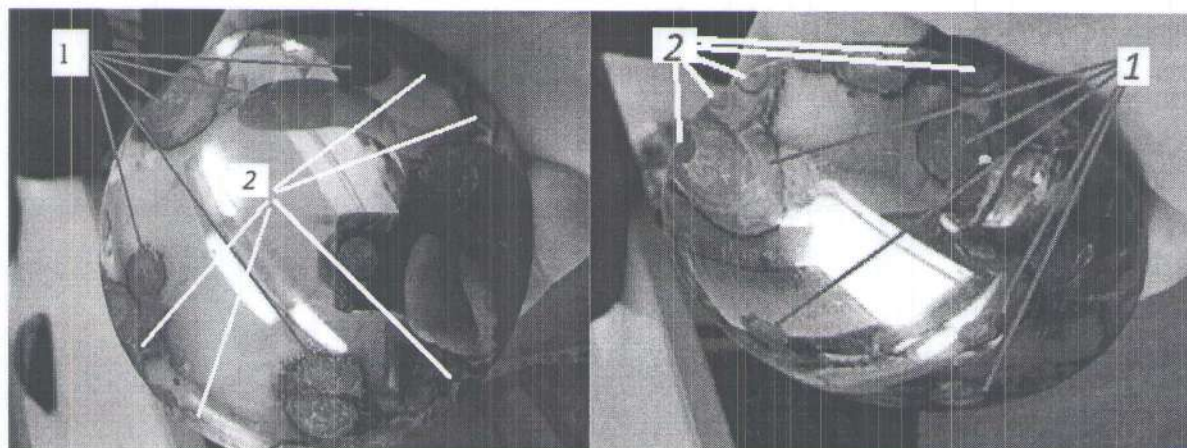
Так как период разряда контура $T=105$ нс, а время пробега электромагнитной волны по формирующей линии равно 8,7 нс, то её нужно рассматривать как коаксиальный конденсатор. Расчетная индуктивность контура без разрядника $L=43,8$ нГн. Таким образом при работе разрядника без управления индуктивность разрядника составила 75,2 нГн и при работе разрядника с внешним запуском индуктивность разрядника составила 49,3 нГн.

При работе разрядника без управления имело место увеличение индуктивности разрядника, пробой происходил по одному каналу и разряд смещался к центру управляющего электрода (рисунок 8). При запуске разрядника от запускающего генератора наблюдался многоканальный пробой по краю запускающего электрода с количеством каналов $n=(4-6)$.

Разрядник запускался импульсом напряжения с амплитудой $U=120$ кВ и временем нарастания менее 10нс.

При времени нарастания запускающего импульса напряжения генератора равном 10 нс (работал на один канал запуска) среднеквадратическое отклонение времени срабатывания разрядника составляет 4 нс. Стабильное управление разрядника было получено при давлении свыше 10 атмосфер. При меньшем давлении наблюдались самопробои разрядного промежутка и увеличение индуктивности разрядника.

На рисунке 8 приведены следы эрозии на запускающем электроде от искрового разряда.



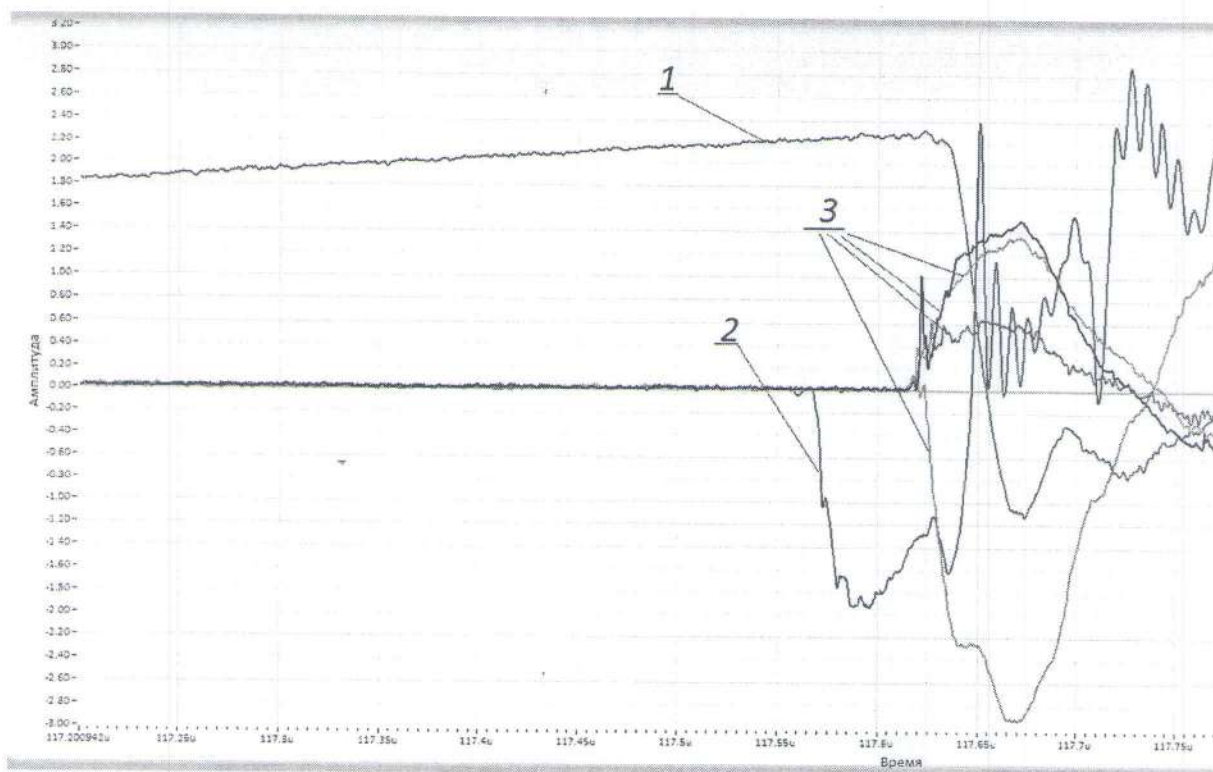
1- одиночные разряды (самопробои); 2- при многоканальном режиме (запуск от ГИН)

Рисунок 8. Следы эрозии на запускающем электроде

При работе на электрофизической установке четыре формирующих линии синхронно коммутировались на землю, каждая своим разрядником. При времени нарастания импульса напряжения генератора, запускающего разрядники, равном 20 нс среднеквадратическое отклонение времени срабатывания разрядника составляет 6 нс.

Впервые осуществлена синхронная коммутация 4 параллельных формирующих линий с волновым сопротивлением 3.7 Ом четырьмя исследованными искровыми разрядниками. При этом

среднеквадратическое отклонение времени срабатывания разрядника составляет 6 нс. На рисунке 9 приведены осциллограммы синхронного запуска четырех формирующих линий.



1-напряжение на выходе импульсного трансформатора, заряжающего формирующие линии; 2- импульс напряжения запускающего генератора; 3- токи разрядников формирующих линий.

Рисунок 9. Осциллограммы синхронного запуска четырех формирующих линий

Формирующие линии заряжались до напряжения 750 кВ за время 2,3 мкс. При синхронном срабатывании 4х разрядников, ток разряда в каждом разряднике (измерялся поясами Роговского) составлял порядка 200 кА. Время нарастания импульса тока составило 50 нс. При времени зарядки формирующих линий более 2.3 мкс в некоторых запусках наблюдались самопробои одного из четырех разрядников до прихода импульса запуска.

3 Заключение

1. Разработанный исследовательский стенд с автоматизированной системой управления и регистрации сигналов является важным инструментом для исследования высоковольтных газовых разрядников с напряжением до 1 МВ и временем прикладываемого напряжения порядка 1 мкс.

Разработанный исследовательский стенд был использован для испытаний и исследований высоковольтных газовых разрядников, разработанных в нашем отделе. Также стенд использовался в качестве составная часть генератора высоковольтных импульсов с напряжением 850 кВ и длительностью импульса напряжения на полувывоте 16 нс для испытания других объектов.

2. Был разработан, изготовлен и испытан многоискровой малоиндуктивный газовый разрядник с напряжением 750 кВ.

Осуществлена синхронная коммутация четырех параллельных формирующих линий с волновым сопротивлением 3.7 Ом четырьмя разрядниками. При этом среднеквадратическое отклонение времени срабатывания разрядника составляет 6 нс, разница времени запаздывания срабатывания отдельных разрядников составляет не более 10 нс.

В ходе экспериментов было установлено, что данный разрядник работает при напряжении 750 кВ с временем зарядки формирующих линий до 2.3 мкс. При этом в некоторых пусках, при зарядке формирующих линий за время более 2.3 мкс, наблюдались самопробои одного из четырех разрядников.

3. Увеличение времени нарастания импульса напряжения запускающего генератора с 10 до 20 нс привело к увеличению среднеквадратического отклонения времени срабатывания разрядника с 4 до 6 нс.

Список цитируемой литературы

1. Пичугина М.Т. / Мощная импульсная энергетика //Томск. Издательство ТПУ, 2005. 98 с.
2. Месяц Г. А. / Импульсная энергетика и электроника // Москва. Наука, 2004. 704 с.
3. У. Бостик, В. Нарди, О. Цукер/ Накопление и коммутация энергии больших плотностей // Издательство МИР Москва. 1979. 471 с.
4. К. Ю. Васильев, А. А. Качалков, В. К. Петин, Н. А. Ратахин, М. Е. Серебрянников, А. А. Эрфорт / Импульсный ускоритель электронных пучков // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2019. - Т.62. - №10. С.122-128.
5. Капишников Н.К., Муратов В. М., Потапов В. С. /Высоковольтный импульсный генератор // ПТЭ. 1984. №5. С.98.
6. Ю. Ф. Поталицын. Импульсный разряд в сжатом газе при мегавольтных напряжениях. Импульсный разряд в диэлектриках. Новосибирск: Наука, 1985. С. 55-83.