

Д. Ч. Ким, А. С. Семёнов, Ю. В. Бебихов, П. С. Татаринов

Применение импульсного тиратрона для коммутации гатчинского разряда

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,

Политехнический институт (филиал), г. Мирный, Россия

E-mail: dc.kim@s-vfu.ru

E-mail: sash-alex@yandex.ru

E-mail: bebikhov.yura@mail.ru

E-mail: paveltatarinov@mail.ru

Аннотация. В настоящее время достигнут значительный прогресс в генерации шаровых плазмоедов с помощью гатчинского разряда, которые, как считают многие ученые, могут являться аналогами шаровой молнии. Такие плазмоеды, генерируемые высоковольтным разрядом над водной поверхностью, обладают автономной фазой, происхождение которой и лежащие в её основе процессы являются предметом современных исследований. Стоит отметить, что в России к вопросам о шаровой молнии проявляли интерес в том числе и нобелевские лауреаты В. Л. Гинзбург и П. Л. Капица. Наиболее часто для коммутации гатчинского разряда применяются газовые разрядники, неспособные обеспечить экспериментальное исследование влияния скорости нарастания напряжения и тока на долгоживущие шаровые плазмоеды. В данной работе решается задача коммутации гатчинского разряда с помощью другого устройства – импульсного тиратрона с водородным наполнением. Целью данной работы является создание высоковольтного коммутатора накопительной емкости гатчинского разряда импульсным тиратроном, а также испытания спроектированной и изготовленной установки. В основной части исследования описана высоковольтная установка, содержащая генератор плазмоедов, блок коммутации накопительной емкости импульсным тиратроном, блок формирования импульсов поджига тиратрона с помощью импульсного трансформатора. Разработанный высоковольтный емкостный накопитель энергии выполнен по схеме параллельного соединения конденсаторов. Энергия запасается в конденсаторной батарее, которая заряжается до заданного высокого напряжения с помощью зарядного устройства и разряжается на нагрузку через систему коммутации, состоящую из коммутатора и устройства управления им. В работе представлены электрические схемы высоковольтного зарядного устройства, блока коммутации накопительной емкости импульсным тиратроном и блока формирования импульса напряжения запуска тиратрона. Также показаны рисунки отдельных частей изготовленной установки. В качестве результатов исследования представлены первые результаты испытаний разработанной установки. Оценены импульсы напряжения и тока на тиратроне и на конденсаторе. Получены качественно новые результаты генерации шаровых плазмоедов с помощью тиратрона, а именно переход плазмоеда из шаровой формы в тороидальную в одном разряде. В заключении по результатам исследований даны некоторые практические советы для использования тиратрона в качестве коммутатора.

Ключевые слова: шаровой плазмоед, гатчинский разряд, импульсный тиратрон, конденсатор, трансформатор, тиристор, осциллограммы напряжения и тока.

Для цитирования: Ким Д. Ч., Семёнов А. С., Бебихов Ю. В., Татаринов П. С. Применение импульсного тиратрона для коммутации гатчинского разряда // Вестник СВФУ. 2022, №3(89). С.27–38. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.41.78.003>

Авторы выражают глубокую благодарность ведущему научному сотруднику В. Н. Ищенко и старшему научному сотруднику С. А. Кочубею (ИФП СО РАН) за предоставление высоковольтного оборудования в безвозмездное пользование и обсуждение полученных результатов.

D. Ch. Kim, A. S. Semenov, Yu. V. Bebikhov, P. S. Tatarinov

Application of a pulsed thyatron for switching the Gatchina discharge

M.K. Ammosov NEFU, Polytechnic Institute (branch), Mirny, Russia

E-mail: dc.kim@s-vfu.ru

E-mail: sash-alex@yandex.ru

E-mail: bebikhov.yura@mail.ru

E-mail: paveltatarinov@mail.ru

Abstract. At present, significant progress has been made in the generation of spherical plasmoids using the Gatchina discharge, which, according to many scientists, can be analogues of ball lightning. Such plasmoids, generated by a high-voltage discharge above the water surface, have an autonomous phase, the origin of which and the underlying processes are the subject of modern research. It should be noted that in Russia the questions about ball lightning showed interest, including Nobel laureates V. L. Ginzburg and P. L. Kapitsa. Most often, for switching the Gatchina discharge, gas dischargers are used, which are unable to provide an experimental study of the effect of the rate of increase in voltage and current on long-lived spherical plasmoids. In this paper, we solve the problem of switching the Gatchina discharge using another device, a hydrogen-filled pulsed thyatron. The purpose of this work is to create a high-voltage switch of the storage capacitance of the Gatchina discharge by a pulsed thyatron, as well as to test the designed and manufactured installation. The main part of the study describes a high-voltage installation containing a plasmoid generator, a storage capacitance switching unit with a pulsed thyatron, and a thyatron ignition pulse generation unit using a pulsed transformer. The developed high-voltage capacitive energy storage is made according to the scheme of parallel connection of capacitors. Energy is stored in a capacitor bank, which is charged to a predetermined high voltage using a charger and discharged to the load through a switching system consisting of a switch and its control device. The paper presents the electrical circuits of a high-voltage charger, a switching unit for a storage capacity by a pulsed thyatron, and a unit for generating a thyatron start-up voltage pulse. Also shown are drawings of individual parts of the manufactured installation. As the results of the study, the first test results of the developed installation are presented. The voltage and current pulses on the thyatron and on the capacitor are estimated. Qualitatively new results are obtained for the generation of spherical plasmoids using a thyatron, namely, the transition of a plasmoid from a spherical shape to a toroidal one in one discharge. In conclusion, based on the results of the research, some practical advice is given for using the thyatron as a switch.

Keywords: spherical plasmoid, Gatchina discharge, pulsed thyatron, capacitor, transformer, thyristor, voltage and current oscillograms.

For citation: *Kim D. Ch., Semenov A. S., Bebikhov Yu. V., Tatarinov P. S. Application of a pulsed thyatron for switching the Gatchina discharge // Vestnik of NEFU. 2022, No. 3(89). Pp. 27–38. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.41.78.003>*

Authors express profound gratitude to Leading Research Associate V.N. Ischenko and Senior Research Associate S.A. Kochubei of the A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS for provision of high voltage equipment at no cost and discussion of findings.

Введение

Атмосферные плазмоды, генерируемые высоковольтным разрядом над водной поверхностью, обладают автономной фазой, происхождение которой и лежащие в её основе процессы являются предметом современных исследований [1]. Получение долгоживущих плазменных образований как в установках, так и в свободной атмосфере представляет большой научный и прикладной интерес [2].

В настоящее время достигнут значительный прогресс в генерации шаровых плазмодов (ШП) с помощью гатчинского разряда, укажем лишь последние принципиально новые работы [3, 4], в которых можно найти ссылки на другие работы. Отличительной особенностью всех этих исследований является то, что для коммутации разряда применяются газовые разрядники [5]. Неуправляемые газовые разрядники не могут обеспечить экспериментальное исследование влияния скорости нарастания напряжения и тока на долгоживущие ШП, образующиеся в гатчинском разряде.

В данной работе решается задача коммутации гатчинского разряда с помощью другого устройства – импульсного тиратрона с водородным наполнением. Настоящая работа является продолжением работ [6, 7], где исследовалась задача создания и изучения свойств ШП гатчинского разряда, способного существовать после прекращения подвода энергии извне относительно длительное время.

Целью данной работы является создание высоковольтного коммутатора накопительной емкости гатчинского разряда импульсным тиратроном, а также испытания спроектированной и изготовленной установки.

Постановка задачи

Разрабатывается высоковольтный емкостной накопитель энергии (ЕНЭ), выполненный по схеме параллельного соединения конденсаторов (генератор импульсного тока (ГИТ)) для гатчинского разряда. Энергия запасается в конденсаторной батарее C_0 , которая заряжается до заданного высокого напряжения с помощью зарядного устройства (ЗУ) и разряжается на нагрузку через систему коммутации (СК), состоящую из коммутатора и устройства управления им. Учитывая недостатки обычно используемого газоразрядного коммутатора, возникает необходимость его замены на более совершенные коммутирующие устройства. Поставлена задача разработать и испытать ГИТ для гатчинского разряда с коммутатором на импульсном тиратроне.

Результаты исследования

Описание экспериментальной установки

Согласно поставленной цели для генерации ШП при атмосферном давлении первоначальная установка гатчинского разряда [6] подверглась существенной модернизации. Особенно это относится к высоковольтному оборудованию. Для обеспечения максимально точного описания модернизации ниже будут описаны ключевые разработанные компоненты новой установки.

Реактор шаровых плазмодов

В отличие от [6] был изменён подвод высокого напряжения к центральному графитовому электроду, находящемуся на оси реактора. Теперь высокое напряжение подается через отверстие в центре дна банки, через которое вводится высоковольтный кабель. Банка стоит на каркасе из поликарбоната, вырезанного на станке ЧПУ. В собранном виде реактор показан на рис. 1.

Оба электрода реактора находятся в полипропиленовой банке со следующими параметрами: диаметр дна – 185 мм, верхний диаметр – 206 мм, глубина – 186 мм. Банка заполняется чистой водопроводной водой при комнатной температуре.

Электрод-катод, который используется во всех экспериментах в данной работе, представляет собой твердый графитовый стержень диаметром 8 мм и длиной 60 мм. Катод изолирован от воды с помощью лазерной кварцевой трубки с внутренним



Рис. 1. Реактор шаровых плазмоидов на подставке (вид сбоку)

Pic. 1. Spherical plasmoid reactor on the support stand (side view)

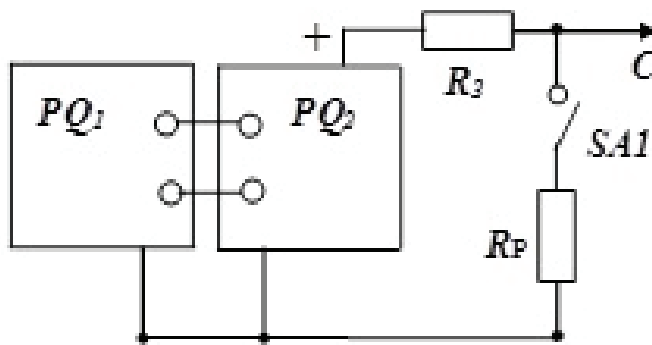


Рис. 2. Высоковольтное зарядное устройство

Pic. 2. High voltage charging apparatus

диаметром 8 мм и наружным диаметром 12 мм. Кончик катода на 2 мм не доходит до верхнего края трубки, а верхний край трубки выступает над поверхностью воды примерно на 1-3 мм.

Прямая кварцевая трубка с катодом крепится в двух точках, для чего просверлены отверстия в центре крестовины, помещаемой на поверхности воды, и на дне банки. Крестовина изготовлена из поликарбоната на станке ЧПУ. Высокое отрицательное напряжение подводится к катоду с помощью кабеля марки РК-50 (высоковольтный (ВВ) кабель на рис. 3).

Анодом является заземленное медное кольцо с диаметром, равным диаметру дна банки. Расположение кольца-анода симметрично и перпендикулярно центральному графитовому катоду, т. е. плоскость анода параллельна дну банки. Этот медный анодный электрод находится в воде на глубине примерно 160 мм ниже поверхности воды.

Высоковольтное оборудование с тиратроном в качестве коммутатора

Электрическая схема высоковольтного зарядного устройства соответствует схеме в работе [7] и приведена на рис. 2. При зарядке переключатель SA1 отсоединяет разрядное сопротивление R_p от конденсатора.

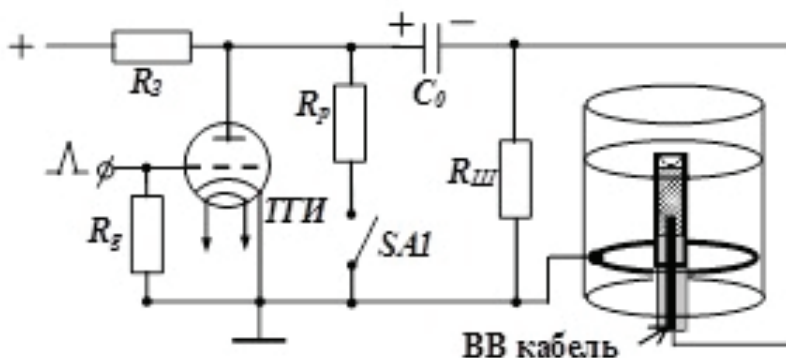


Рис. 3. Блок коммутации накопительной емкости гатчинского разряда импульсным тиратроном
Pic. 3. Storage capacitor bank switching unit for the Gatchina discharge pulsed thyatron

Источник высокого напряжения PQ_2 состоит из повышающего однофазного трансформатора и высоковольтного выпрямителя. Высоковольтный трансформатор намотан на ферритовом кольцевом сердечнике. Высоковольтный выпрямитель собран по схеме диодного моста.

Регулирование выпрямленного напряжения в установках с полупроводниковыми диодами возможно только на стороне входного переменного тока. Для этого собран специальный регулировочный блок PQ₁ с автотрансформатором на напряжение 230 В мощностью 500 Вт. Регулировать выпрямленное напряжение можно в пределах 0÷20 кВ.

Принципиальная схема блока коммутации накопительной емкости C_0 гатчинского разряда импульсным тиратроном показана на рис. 3.

Накопительная емкость набрана из 8 конденсаторов марки К41И-7 напряжением 5 кВ с емкостью 100 мкФ. Образуя две пары по три конденсатора в параллель и соединив получившиеся пары между собой последовательно, будем иметь емкость $C_0=150$ мкФ на напряжение 10 кВ. Если в каждой паре будет по четыре конденсатора, то получим емкость $C_0=200$ мкФ и аналогичное напряжение.

Нами выбран импульсный водородный тиратрон типа ТГИ1-500/16. Заземленный катод подогревается постоянным током 13÷17 А при напряжении 6,3 В. Накопительные конденсаторы C_0 соединяются одним концом к аноду тиратрона, вторым концом через сопротивление шунта $R_{ш}$ к общему потенциалу, как показано на схеме рис. 3.

Блок формирования импульсов напряжения для запуска тиратрона

Согласно паспортным данным для тиратрона ТГИ1-500/16 рекомендуется импульс запуска с параметрами: амплитуда до 400 В и длительность от 3÷7 мкс. Известно, что использование импульса запуска тиратрона в виде «сеточного пика» позволяет сократить время отпирания тиратрона и существенно уменьшить джиттер (колебания задержки) тиратрона. Принципиальная схема устройства формирования импульса запуска в виде «сеточного пика» представлена на рис. 4.

Схема состоит из двух основных частей. Первая часть схемы формирует импульс напряжения для запуска тиратрона. Она содержит сопротивление R_1 , диод VD_1 , конденсатор C_1 и импульсный трансформатор ИТ. К конденсатору параллельно присоединяется первичная обмотка ИТ с тиристором SV_1 (или механическая кнопка).

В первоначальном варианте импульсы запуска генерируются нажатием на кнопку, включенной последовательно с первичной обмоткой ИТ.

В последствии из-за известных недостатков кнопки (искренние и связанные с этим помехи) от неё отказались в пользу тиристора SV₁ марки 2У202Н и аналогичных ему.

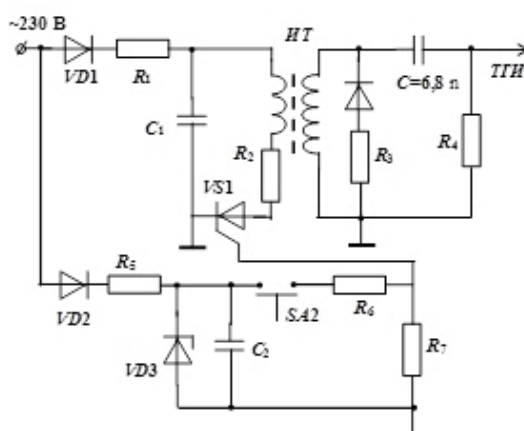


Рис. 4. Принципиальная схема блока формирования импульса напряжения запуска тиратрона (блок управления)

Pic. 4. Schematic layout of the thyristron start-up voltage pulse generation assembly (control assembly)

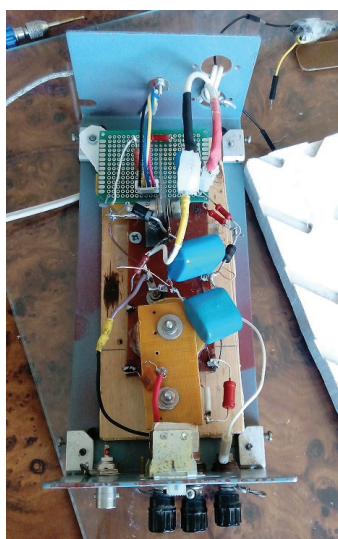


Рис. 5. Блок формирования импульса запуска тиратрона

Pic. 5. Thyristron start-up pulse generation assembly

От одной фазы сети переменного напряжения 230 В через диод VD_1 марки HER 202 и резистор R_1 осуществляется заряд конденсатора C_1 . ИТ намотан на ферритовом кольце марки M1500НМ. Импульсные трансформаторы нашли широкое применение в установках экспериментальной физики, квантовой электроники, импульсных радио технических устройствах и т. д. Расчет импульсного трансформатора описан в [8].

Для сглаживания формируемого импульса запуска экспериментально подбирались сопротивления R_2 и R_3 в пределах $2 \div 10$ Ом.

Вторая часть схемы служит для генерирования низковольтного импульса напряжения для отпирания тиристора. От той же фазы сети через диод VD_2 и сопротивление R_5 заряжается емкость C_2 , к которой параллельно соединен стабилитрон марки КС215Ж. Нажатием кнопки SA_2 подается положительный импульс напряжения с резистора R_7 для отпирания тиристора. Собранный на плате схема управления помещается в металлическую коробку, как показано на рис. 5.



Рис. 6. Коммутатор импульсный тиратрон ТГИ1-500/16 и
плата управления тиратроном в собранном виде

Pic. 6. TGI1-500/16 impulse modulator thyatron and the control board, assembled

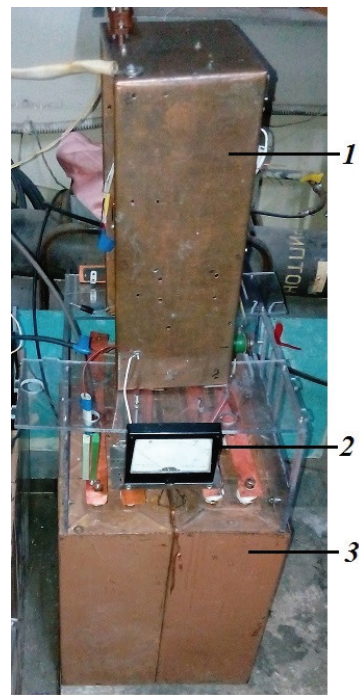


Рис. 7. Изготовленная новая высоковольтная установка
Pic. 7. Complete novel high voltage device

В собранном виде коммутатор-тиратрон с блоком питания и плата управления тиратроном помещаются в медную коробку (рис. 6).

В окончательном виде вся собранная установка показана на рис. 7, где 1 – коммутатор импульсный тиратрон ТГИ1-500/16 и плата управления тиратроном, 2 – микроамперметр, показывающий напряжение на заряжаемом конденсаторе, 3 – накопительная емкость.

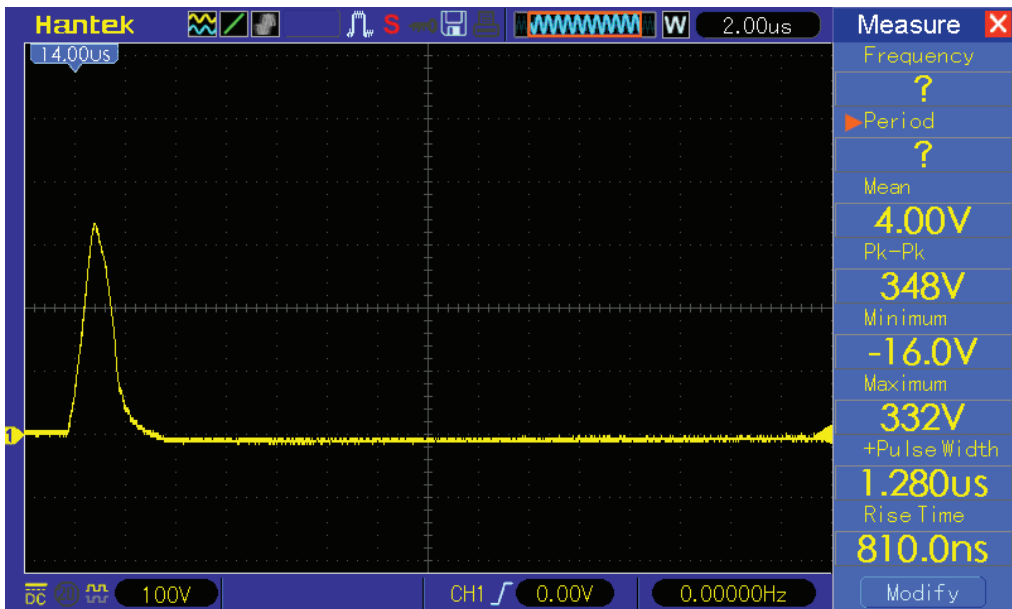


Рис. 8. Осциллограмма импульса напряжения сформированного импульса запуска

Pic. 8. Voltage pulse oscillograph chart of a formed start-up pulse

Датчики тока и высоковольтного напряжения

Ток в цепи разряда измеряли косвенно, по напряжению на токовом шунте $R_{ш}=0,2$ Ом с рассеиваемой мощностью 20 Вт, включенного последовательно с разрядной камерой с низковольтной стороны. Форма тока в цепи определяется развитием электрического пробоя, а его максимальное значение в основном ограничено сопротивлением водяной банки.

Для измерения высоковольтного напряжения на накопительной емкости в работе [6] применялся резистивно-емкостной делитель напряжения. В данной работе используется простой омический делитель из двух сопротивлений. Показания обоих датчиков напряжения отличаются в пределах $\pm 20\%$.

Результаты экспериментов

Импульсы напряжения регистрируются на осциллографе DSO-5102P Hantek.

Проверка устройства формирования импульса запуска

Типичные формируемые блоком импульсы напряжения для запуска тиратрона на выходе блока формирования импульса (схема рис. 4 с тиристором) показаны на осциллограмме рис. 8. Значение амплитуды напряжения в максимуме $\approx 320 \div 340$ В, длительность на полувысоте $\approx 1,6$ мкс.

Здесь измеряемое напряжение равно 332 В, что меньше и короче по длительности, чем рекомендуемые по паспорту тиратрона, однако тиратрон безотказно пробивается.

После 5÷10 минутного прогрева тиратрона этот импульс был подан на сетку тиратрона, как показано выше на схеме рис. 3 слева.

Типичные осциллограммы напряжения на сетке прогретого тиратрона приведены на рис. 9. На осциллограмме можно выделить три этапа работы тиратрона. Первый этап – сеточный пик, характеризующий заряд обострительной емкости от тиратрона, напряжение в котором достигает до 100 В и более. Второй этап – ровный сеточный ток между сеткой и катодом тиратрона. Третий этап – обратный задний выброс напряжения при окончании импульса запуска.

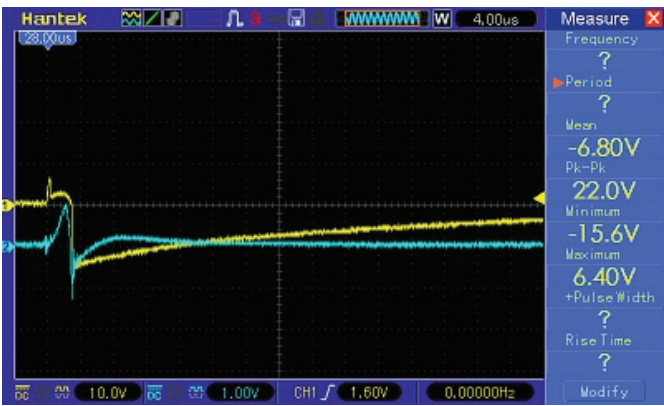


Рис. 9. Осциллограмма импульса напряжения на сетке прогретого тиратрона (канал CH1 желтый луч) и импульса тока (канал CH2 синий луч) в анодной цепи
Pic. 9. Oscillograph charts of the grid voltage pulse on the warmed-up thyatron – CH1 (yellow chart) and current pulse on the anode circuit – CH2 (blue chart)

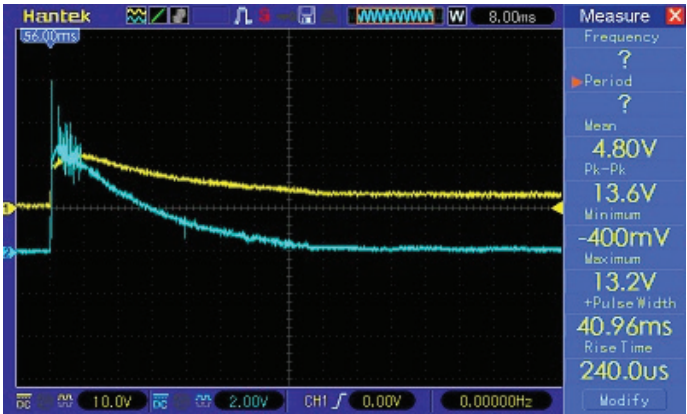


Рис. 10. $C_0=150$ мкФ. Осциллограммы импульсов напряжения и тока на конденсаторе: напряжение (сигнал инвертирован) – CH1 (желтый луч), ток – CH2 (синий луч)
Pic. 10. $C_0=150$ μ F. Oscillograph charts of voltage surge and current on the capacitor: voltage (signal inverted) – CH1 (yellow chart), current – CH2 (blue chart)

Хотя напряжение на анод тиратрона не подается, незначительный анодный ток регистрируется.

Ток в контуре разряда и напряжение на емкости

Эволюция напряжения на емкости и тока в контуре при $C_0=150$ мкФ и $U_0=5$ кВ показаны на рис. 10.

На осциллограмме тока (синий луч) заметна непродолжительная высокочастотная наводка на максимуме тока. Характерная длительность разряда конденсатора $\tau=R \cdot C_0$ равна ≈ 64 мс.

Замечено, что временная форма тока и напряжения на накопительной емкости C_0 практически незаметно отличается от задаваемого первоначального напряжения емкости U_0 .

Представляет интерес сравнить длительность разряда конденсаторов при разных значениях накопительной емкости заряженных до одинакового начального напряжения, например, $U_0=5$ кВ. Первое значение $C_0=150$ мкФ (рис. 10), а второе – $C_0=600$ мкФ как в работе [7].

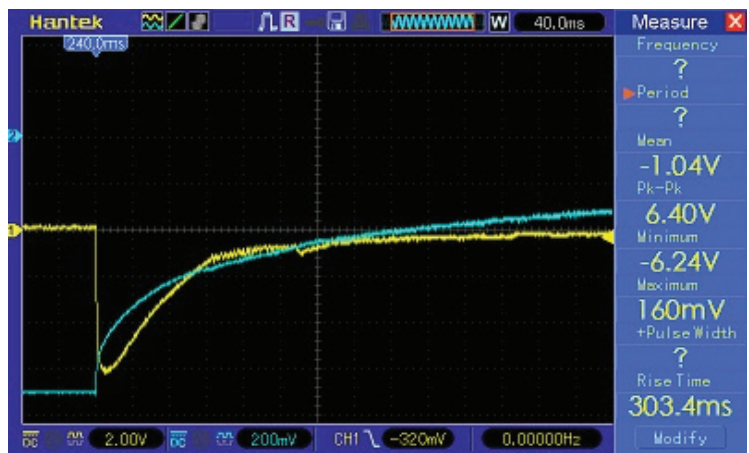


Рис. 11. $C_0=600$ мкФ. Осциллограммы импульсов напряжения и тока на конденсаторе: напряжение – CH1 (желтый луч), ток – CH2 (синий луч)

Pic. 11. $C_0=600$ мкФ. Oscillograph charts of voltage and current on the capacitor: voltage – CH1 (yellow chart), current – CH2 (blue chart)



Рис. 12. Переход плазмоида из шаровой формы (а) в тороидальную (б) в одном разряде
Pic. 12. Transition of a plasmoid from a spherical shape (a) into a toroidal shape (b) in a single discharge

Осциллограмма тока и напряжения для $C_0=600$ мкФ, заряженного до $U_0=5$ кВ, показана на рис. 11. Характерное время разряда конденсатора τ равно ≈ 250 мкс.

Сравнение этих характерных времен $\tau=R \cdot C_0$ показывает, что они близки к отношению емкостей. Сопротивление разряда R конденсатора, по-видимому, определяемого в основном электрическим сопротивлением цепи, мало зависит от величины начальной накопительной емкости.

Приведем для иллюстрации применение разработанного здесь высоковольтного оборудования для создания гатчинских плазмоедов. Новые результаты не заставили себя ждать. Удалось снять видео (фрагменты показаны на рис. 12), как образовавшийся шаровой плазмоед (а) переходит в торообразный плазмоед (б). При этом параметры разряда: $C_0=200$ мкФ, $U_0=5,5$ кВ.

Обсуждение результатов

Несмотря на простоту и доступность механических кнопок, их применение для коммутации электрических цепей в цепи первичной обмотки ИТ нежелательно. Замена кнопки тиристором 2У202Н в первичной обмотке ИТ избавляет от многих проблем. Хотя 2У202Н отлично подходит по параметрам, в процессе эксплуатации наблюдались случаи их выхода из строя (пробоя), в связи с чем рекомендуется для надежности применять более высоковольтные тиристоры, например, Т122-20-12.

Также можно отказаться от схемы генерирования низковольтного импульса напряжения для отпирания тиристора, содержащую механическую кнопку SA_2 (см. рис. 4). Заменить эту часть схемы можно, например, на моноимпульсный вибратор, собранный на микросхеме таймера NE555.

Заключение

Изготовлен и испытан ГИТ с импульсным тиратроном в качестве коммутатора для лабораторного изучения гатчинских шаровых плазмOIDов.

Представленные предварительные результаты по применению высоковольтных сильноточных коммутаторов на основе импульсного тиратрона ТГИ1-500/16 указывают на их перспективность для генерации шаровых плазмOIDов гатчинского разряда.

На следующем этапе наших исследований намечено проведение подробного анализа ШП, полученных при коммутации импульсным тиратроном, измерение свечения ШП с помощью фотодиодов.

Л и т е р а т у р а

1. Volodin, L. Y. Electric discharge generator of long-lived plasma formations in atmospheric pressure air // L. Y. Volodin, A. S. Kamrukov / Journal of Physics : Conference Series. – 2022. – V. 2270. – Is. 1. – No. 012059.
2. Chernoglazov, A. Dynamic Alignment and Plasmoid Formation in Relativistic Magnetohydrodynamic Turbulence // A. Chernoglazov, B. Ripperda, A. Philippov / Astrophysical Journal Letters. – 2021. – V. 923. – Is. 1. – No. L13.
3. Zhao, Sh. Исследование динамики формирования плазмOIDов в гатчинском разряде // Sh. Zhao, Ch. Yuan, A. A. Кудрявцев и др. / Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – № 7. – С. 1108–1123.
4. Zhao, Sh. Влияние магнитных и электрических полей на динамику образования плазмOIDов в гатчинском разряде // Sh. Zhao, Ch. Yuan, A. A. Кудрявцев и др. / Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – № 3. – С. 366–385.
5. Shabanov, G. D. On the possibility of making natural ball lightning using a new pulse discharge type in the laboratory // G. D. Shabanov / Physics-Uspekhi. – 2019. – V. 62. – Is. 1. – P. 92–107.
6. Ким, Д. Ч. Разработка и испытание установки для изучения лабораторного аналога шаровой молнии // Д. Ч. Ким, А. С. Семенов, Ю. В. Бебихов и др. / Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2020. – № 6 (80). – С. 34–47.
7. Kim, D. C. Installation for Studying the Laboratory Analog of Ball Lightning // D. C. Kim, A. S. Semenov, V. A. Efimov et al. / 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2020). – 2020. – No. 9271597. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271597.
8. Матханов, П. Н. Расчет импульсных трансформаторов // П. Н. Матханов, Л. З. Голицын. – Ленинград : Энергия. Ленингр. отделение, 1980. – 112 с.

References

1. Volodin L. Y., Kamrukov A. S. Electric discharge generator of long-lived plasma formations in atmospheric pressure air // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – V. 2270. – Is. 1. – No. 012059.
2. Chernoglazov A., Ripperda B., Philippov A. Dynamic Alignment and Plasmoid Formation in Relativistic Magnetohydrodynamic Turbulence // Astrophysical Journal Letters. – 2021. – V. 923. – Is. 1. – No. L13.
3. Zhao Sh., Yuan Ch., Kudryavtsev A.A., Zhrebtsov O.M., Shabanov G.D. Examination of the dynamics of plasmoid formation in the Gatchina discharge // Technical Physics. – 2021. – V. 91. – Is. 7. – pp. 1108-1123.
4. Zhao Sh., Yuan Ch., Kudryavtsev A.A., Yao J., Shabanov G.D. Influence of magnetic and electric fields on dynamics of plasmoid formation in Gatchina discharge // Technical Physics. – 2022. – V. 92. – Is. 3. – pp. 366-385.
5. Shabanov G.D. On the possibility of making natural ball lightning using a new pulse discharge type in the laboratory // Physics-Uspekhi. – 2019. – V. 62. – Is. 1. – pp. 92-107.
6. Kim D.C., Semenov A.S., Bebikhov Y.V., Yefimov V.A., Spiridonov V.M., Tatarinov P.S. Development and Testing of an Installation for Studying the Laboratory Analog of Ball Lightning // Vestnik of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. – 2020. – Is. 6 (80). – pp. 34-47.
7. Kim D.C., Semenov A.S., Efimov V.A., Bebikhov Y.V. Installation for Studying the Laboratory Analog of Ball Lightning // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2020). – 2020. – No. 9271597. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271597.
8. Matkhanov P.N., Golitsyn L.Z. Calculation of Pulse Transformers. – Leningrad: Energiya Publishing. Leningrad Branch, 1980. – 112 p.

КИМ Дин Чер – к. ф.-м. н., доцент, Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова, доцент кафедры ЭиАПП.

E-mail: dc.kim@s-vfu.ru

KIM Din Cher – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department of Electrification and Automation of Industrial Production, Polytechnic Institute (branch) of the M.K. Ammosov NEFU.

СЕМЕНОВ Александр Сергеевич – к. ф.-м. н., доцент, Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова, директор.

E-mail: sash-alex@yandex.ru

SEME NOV Alexander Sergeevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Director of the Polytechnic Institute (branch) of the M.K. Ammosov NEFU.

БЕБИХОВ Юрий Владимирович – к. ф.-м. н., Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова, доцент кафедры ЭиАПП.

E-mail: bebikhov.yura@mail.ru

БЕБИХОВ Yuriy Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department of Electrification and Automation of Industrial Production, Polytechnic Institute (branch) of the M.K. Ammosov NEFU.

ТАТАРИНОВ Павел Семенович – старший преподаватель кафедры ЭиАПП, Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: paveltatarinov@mail.ru

TATARINOV Pavel Semenovich – Senior Lecturer of the Department of Electrification and Automation of Industrial Production, Polytechnic Institute (branch) of the M.K. Ammosov NEFU.