

Компактный импульсный генератор для питания плазменных пушек

*А.П. Артёмов**, *А.В. Федюнин*, *Н.В. Жарова*, *А.Д. Ленский*, *А.Г. Русских*,
Д.В. Рыбка, *В.И. Орешкин*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**artyomov@ovpe.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В работе описан новый компактный импульсный генератор тока для питания плазменных пушек, созданный на основе компактной конденсаторно-коммутаторной сборки (ККС) производства ИСЭ СО РАН. Генератор тока апробирован в ходе проведения экспериментов по исследованию молибденовых PZ-пинчей. Энергия импульса рентгеновского излучения молибденового PZ-пинча в спектральном диапазоне $h\nu = 2-5$ кэВ достигала 0.7 Дж, а размер излучающей области не превышал 10 мкм. Показано, что параметры импульса тока генератора плазмы полностью удовлетворяют требованиям необходимым для работы в составе импульсного радиографа на базе малогабаритного генератора тока XPG-3.

Ключевые слова: импульсный сильноточный генератор, Z-пинч, X-пинч, PZ-пинч.

1. Введение

Десять лет назад в Институте сильноточной электроники СО РАН в Томске в качестве альтернативы X-пинчу был предложен новый метод формирования многоразового точечного источника мягкого рентгеновского излучения. Этот метод получил название PZ-пинч (Point Z-pinch) [1, 2]. В отличие от X-пинча, в котором плазменная перетяжка формируется при взрыве металлических проводников, в случае PZ-пинча плазменная среда создается предварительно при горении сильноточного дугового разряда и затем инжектируется в высоковольтный промежуток основного импульсного генератора тока. Таким образом, экспериментальная установка состоит из двух частей: генератора тока плазменной пушки, питающего дуговой разряд, и сильноточного генератора XPG-3 [2, 3] (амплитуда тока 200 кА, время нарастания тока 180 нс), питающего PZ-пинч.

Ранее для питания дугового разряда мы использовали импульсный генератор на основе конденсатора ИК-50-3 емкостью 3 мкФ, который в тот момент был в наличии в ИСЭ СО РАН и был наиболее доступен. При напряжении зарядки 20 кВ, конденсатор ИК-50-3 обеспечивал импульс тока амплитудой 70 кА с временем нарастания тока 1 мкс при работе на дугу [2]. Несмотря на то, что конденсатор ИК-50-3 достаточно надежен в эксплуатации, этот конденсатор имеет внушительные массогабаритные параметры (315x315x800 мм) даже в сравнении с габаритами основного сильноточного генератора тока XPG-3, используемого нами в экспериментах. Кроме того, энергетический потенциал конденсатора ИК-50-3 является избыточным для плазменных пушек, которые мы используем для формирования плазмы PZ-пинча, что сказывается на ресурсе электродов и инжекторов плазменной пушки.

За последние 15 лет нами наработаны компетенции в области разработки и создания компактных конденсаторов серии НСЕIсар [3–5] для сильноточной импульсной техники. Ключевой особенностью данных конденсаторов является коаксиальная конструкция, внутри которой располагается коммутирующий разрядник. Такой подход позволил создать компактную конденсаторно-коммутаторную сборку (ККС), обладающую низкой индуктивностью не более 40 нГн. На базе данных ККС были построены малогабаритные импульсные генераторы тока для работы с X- и PZ-пинчами [3]. Целью данной работы было создание и апробирование в эксперименте компактного импульсного генератора тока на основе ККС для питания плазменной пушки.

2. Экспериментальная установка

Компактный импульсный генератор для питания плазменной пушки представляет собой одну конденсаторно-коммутаторную сборку (ККС) НСЕІсар 30-1.0 на основе конденсатора емкостью 1 мкФ (Рис.1). ККС размещена в баке, заполненном трансформаторным маслом. Внешний вид генератора показан на Рис.2. Размеры импульсного генератора составляют $\text{Ø}300 \times 300$ мм. На Рис. 3 показана принципиальная электрическая схема импульсного генератора плазмы PZ-пинча.



Рис.1. Конденсатор НСЕІсар 30-1.0.



Рис.2. Внешний вид компактного импульсного генератора для питания плазменной пушки.

Принцип действия импульсного генератора плазмы заключается в следующем. Высоковольтный источник питания заряжает конденсатор C через сопротивление R_1 до напряжения $U_{ch} = 15\text{--}25$ кВ. Противоположная обкладка конденсатора соединена с жилами кабелей передающей линии и заземлена через сопротивление R_2 . После срабатывания газового коммутатора FV (Тригатрон) через нагрузку генератора начинает протекать импульс тока, обеспечивающего горение дугового разряда, который испаряет вещество электродов и инжектирует его в высоковольтный промежуток генератора XPG-3.

В эксперименте величины тока дугового разряда и PZ-пинча измерялись с помощью поясов Роговского. Импульс рентгеновского излучения регистрировался с помощью алмазного фотодетектора PCD, закрытого от видимой и УФ областей спектра фильтром из титановой фольги толщиной 2 мкм. Полученные сигналы PCD были использованы для оценки энергии импульса рентгеновского излучения PZ-пинча.

На Рис.4 показаны сравнительные осциллограммы импульсов тока генераторов на основе конденсаторов ИК-50-3 и НСЕІсар 30-1.0 в режиме работы на короткозамкнутую нагрузку при зарядном напряжении 20 кВ.

Для конденсатора ИК-50-3 индуктивность и сопротивление контура, включающего в себя конденсатор, коммутатор и кабельную передающую линию, составили 130 нГн и 46 мОм соответственно. Для генератора на основе НСЕІсар 30-1.0 эти же величины составили уже 52 нГн и 31 мОм соответственно.

3. Результаты экспериментов

Импульсный генератор плазмы был апробирован в ходе серии экспериментов с молибденовым PZ-пинчем. На Рис.5 показано сравнение токов дугового разряда плазменной

пушки для конденсаторов НСЕIсар 30-1.0 и ИК-50-3. Следует отметить, что зарядное напряжение конденсатора НСЕIсар 30-1.0 при работе с плазменной пушкой в наших экспериментах составляло 25 кВ. В этом случае заряд, накапливаемый в конденсаторе, составлял 0.025 Кл, что приблизительно в два раза меньше по сравнению с рабочим режимом конденсатора ИК-50-3. Однако, амплитуда тока при работе на плазменную пушку в обоих случаях составляла 70 кА, а время нарастания тока при использовании конденсатора НСЕIсар 30-1.0 сократилось более чем в 2 раза.

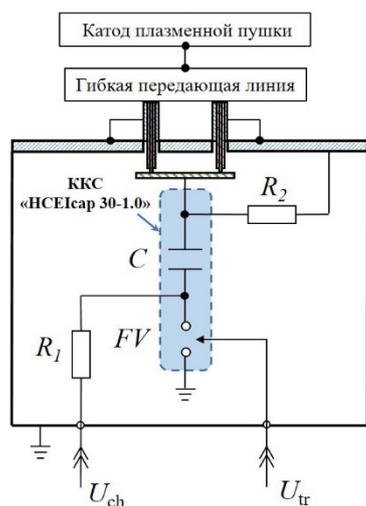


Рис.3. Принципиальная электрическая схема компактного импульсного генератора плазмы PZ-пинча.

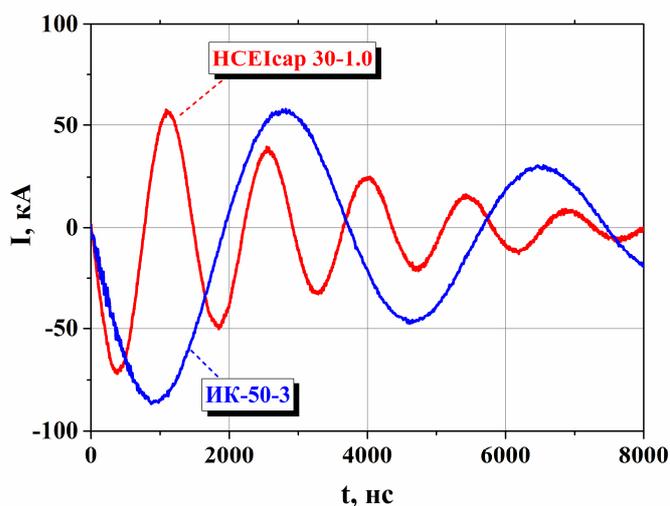


Рис.4. Осциллограммы импульсов тока генераторов на базе конденсаторов ИК-50-3 и НСЕIсар 30-1.0 в режиме работы на короткозамкнутую нагрузку.

На Рис.6 показаны осциллограмма тока генератора XPG-3 и значения энергии импульса W рентгеновского излучения молибденового PZ-пинча, построенные в зависимости от времени появления импульса излучения. Красными точками показаны энергии импульса, полученные в экспериментах с генератором НСЕIсар 30-1.0, а синими точками – с генератором ИК-50-3. Также на Рис.5 приведены зависимости времени генерации импульса рентгеновского излучения PZ-пинча от задержки включения генератора XPG-3 относительно начала тока дуги. Задержка включения генератора XPG-3 определяет начальную линейную массу PZ-пинча, а от массы зависит время, необходимое для сжатия пинча и формирования излучающей точки.

Как можно видеть из Рис.5 и 6, в обоих случаях наблюдаемый рост времени от начала тока генератора XPG-3 до момента появления импульса рентгеновского излучения находится в одном и том же диапазоне значений. Также наблюдается хорошее согласие между зависимостями энергии импульса рентгеновского излучения от времени появления импульса, а, следовательно, от начальной линейной массы PZ-пинча.

Отметим, что наибольшее время до момента генерации импульса рентгеновского излучения совпадало с максимумом импульса тока PZ-пинча (Рис.6). В экспериментах с генератором плазмы на базе конденсатора ИК-50-3 при дальнейшем увеличении задержки включения генератора XPG-3 (линейной массы) излучающая точка не формировалась. В данном случае диапазон возможных линейных масс PZ-пинча при использовании конденсатора ИК-50-3 оказался существенно шире, чем это было необходимо исходя из формы импульса тока генератора XPG-3. С другой стороны, в этих экспериментах был

определен рабочий диапазон линейных масс молибденового PZ-пинча для используемого нами малогабаритного генератора тока XPG-3.

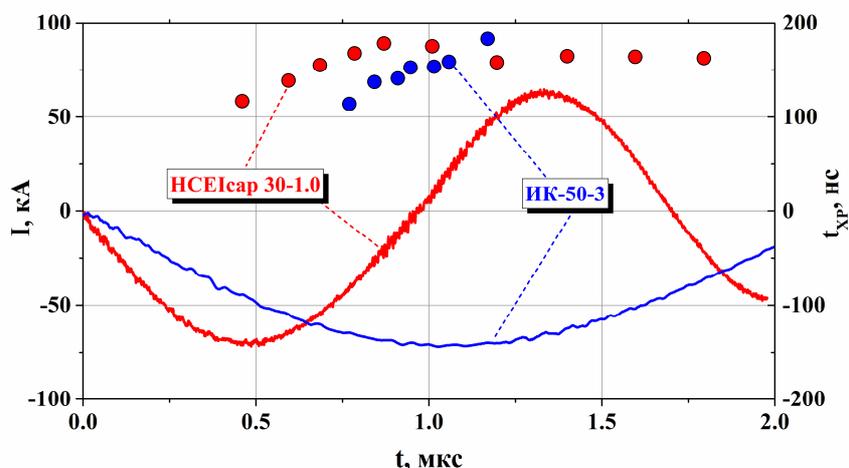


Рис.5. Осциллограммы импульсов тока генераторов на базе конденсаторов ИК-50-3 и HCEIcap 30-1.0 в режиме работы на плазменную пушку.

Вместе с тем, эксперименты с генератором на основе конденсатора HCEIcap 30-1.0 показали, что длительности первого полупериода импульса тока дуги достаточно, чтобы работать во всем рабочем диапазоне линейных масс PZ-пинча. Также отметим, что после смены полярности импульса тока плазменной пушки рост линейной массы испаренного вещества прекращался.

На Рис.7 показан радиографический снимок тест-объекта, полученный в ходе серии экспериментов с молибденовым PZ-пинчем, выполненных в ходе испытаний компактного импульсного генератора тока, питающего плазменную пушку. Тест-объект представлял собой сетку из вольфрамовых проволочек диаметром 7.5 и 25 мкм. Снимок получен в спектральном диапазоне $h\nu = 2-5$ кэВ. Размер источника составил 4-10 мкм, что полностью соответствует результатам, полученным ранее при использовании генератора на основе конденсатора ИК-50-3 для питания плазменной пушки.

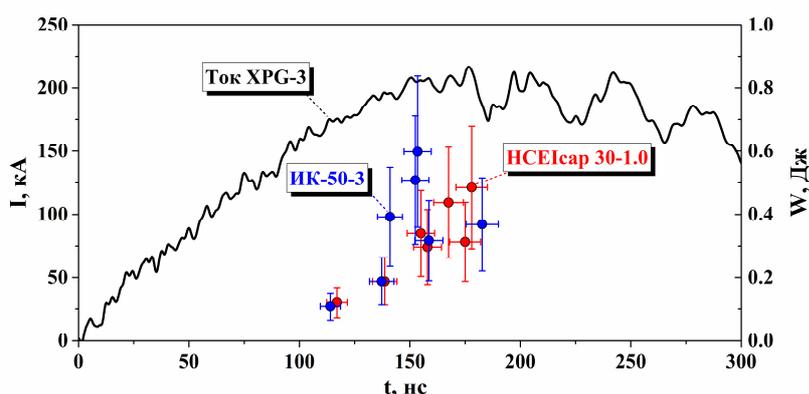


Рис.6. Импульс тока генератора XPG-3 и энергия импульса мягкого рентгеновского излучения в зависимости от времени его генерации.

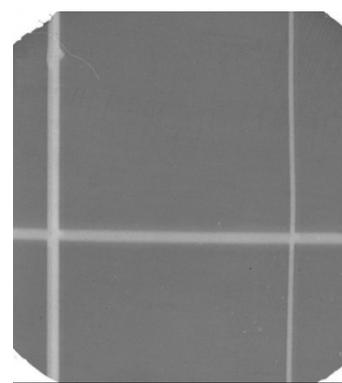


Рис.7. Радиографический снимок тест-объекта.

4. Заключение

Создан компактный импульсный генератор тока для питания плазменных пушек с амплитудой тока 70 кА и временем нарастания тока 480 нс. В основе генератора лежит конденсаторно-коммутаторная сборка HCEIcap 30-0.1 производства ИСЭ СО РАН. Емкость

конденсатора составляет 1 мкФ, а рабочее напряжение, использованное в данных экспериментах, не превышало 25 кВ. Показано, что созданный генератор позволяет работать во всем диапазоне линейных масс PZ-пинча, требуемом исходя из параметров тока малогабаритного импульсного генератора XPG-3. При этом выход рентгеновского излучения и размеры излучающей области PZ-пинча полностью соответствуют результатам, полученным ранее при использовании более мощного накопителя энергии. Внедрение нового импульсного генератора тока для питания плазменных пушек позволило существенно уменьшить габариты всей импульсной радиографической установки на основе PZ-пинча, а также существенно повысить ресурс электродов дугового разряда за счет снижения величины заряда, протекающего в его цепи при каждом отдельном срабатывании.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-48-700017).

5. Литература

- [1] Rousskikh A.G., Shishlov A.V., Zhigalin A.S., Oreshkin V.I., Chaikovskii S.A., Baksht R.B., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **20**, 035011, 2011; doi: 10.1088/0963-0252/20/3/035011
- [2] Artyomov A.P., Chaikovsky S.A., Rousskikh A.G., Fedunin A.V., *Journ. of Phys.: Conf. Series*, **1556**, 012083, 2020; doi: 10.1088/1742-6596/1556/1/012083
- [3] Chaikovsky S.A., et al., *Russ. Phys. J.*, **60**(8), 1408, 2017; doi: 10.1007/s11182-017-1229-x
- [4] Zharova N.V., Ratakhin N.A., Saushkin A.V., Fedushchak V.F., Erfort A.A., *Instrum. Exp. Tech.*, **49**, 384, 2006; doi: 10.1134/S0020441206030134
- [5] Molchanov D.V., Rybka D.V., Lavrinovich I.V., Artyomov A.P., *Proc. 20th Int. Conf. on High Current Electronics (ISHCE)*, Tomsk, Russia, 209, 2018; doi: 10.1109/ISHCE.2018.8521212