

## КОМПАКТНЫЙ НАНОСЕКУНДНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР

© 2013 г. И. В. Лавринович, А. П. Артемов, Н. В. Жарова, В. Ф. Федущак,  
А. В. Федюнин, А. А. Эрфорт

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 27.03.2012 г.

Описана конструкция компактного сильноточного импульсного генератора с амплитудой тока через нагрузку до 140 кА при фронте нарастания тока не более 200 нс. Основной элемент конструкции импульсного генератора – конденсаторно-коммутаторная сборка НСЕІсар 100-0.2. Емкость конденсаторно-коммутаторной сборки 200 нФ, зарядное напряжение 100 кВ, энергозапас 1000 Дж, полная индуктивность 20 нГн. Размеры активной части конденсатора –  $\varnothing 80 \times \varnothing 160 \times 160$  мм. В качестве коммутатора применен многоззорный разрядник. Получена скорость нарастания тока через нагрузку (Х-пинч, 2 проволоки из молибдена  $\varnothing 25$  мкм) 1.3 кА/нс, длительность импульса мягкого рентгеновского излучения 2–3.5 нс.

DOI: 10.7868/S0032816213010230

### ВВЕДЕНИЕ

В 80-х годах был предложен способ получения высокотемпературной плотной плазмы с помощью электрического взрыва перекрещивающихся проволок [1]. Эксперименты показали, что в области перекрестия проволок формируется мощный источник излучения в мягком рентгеновском диапазоне (1–10 кэВ). Наносекундная длительность импульса излучения и микронные размеры источника, получившего название Х-пинч, открывают широкие перспективы его применения. Препятствием к применению Х-пинчей являлось то, что до последнего времени генераторы, использовавшиеся для их реализации, представляли собой громоздкие (весом  $>1$  т) экспериментальные установки, что определялось необходимостью обеспечения тока через нагрузку около 100 кА при скорости его нарастания не менее 1 кА/нс [2].

В настоящее время совершенствование малоиндуктивных импульсных конденсаторов [3, 4] позволило сконструировать малогабаритные генераторы с большим выходным током (на уровне нескольких сотен килоампер) и высокой скоростью вывода энергии из конденсаторной батареи. Такие генераторы являются перспективными источниками тока для Х-пинчей, на основе которых могут быть созданы системы для рентгенографии в мягком рентгеновском диапазоне с высоким пространственным и временным разрешением.

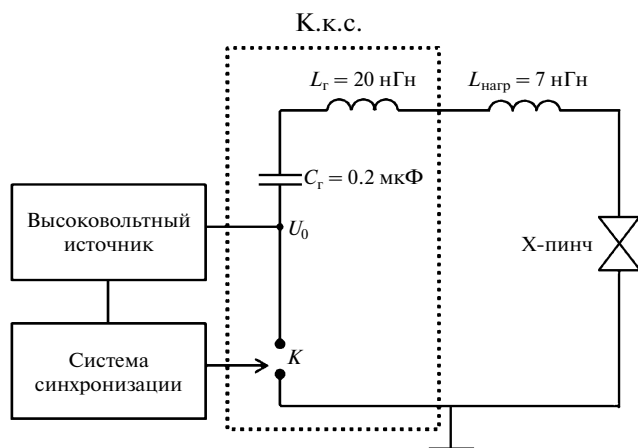
В частности, в ИСЭ СО РАН был разработан импульсный сильноточный генератор с амплитудой тока на короткозамкнутую нагрузку около 300 кА [5] и была продемонстрирована возможность его использования как источника тока для

Х-пинча [6]. В этом генераторе тока использовались четыре конденсаторно-коммутаторные сборки (к.к.с.) емкостью 0.25 мкФ каждая, соединенные параллельно и помещенные в общий бак с трансформаторным маслом. Энергозапас генератора составлял 1 кДж при зарядном напряжении 45 кВ. Благодаря использованию малоиндуктивных конденсаторов и быстрых разрядников генератор обеспечивал скорость нарастания тока выше критической величины 1 кА/нс при времени нарастания порядка 200 нс.

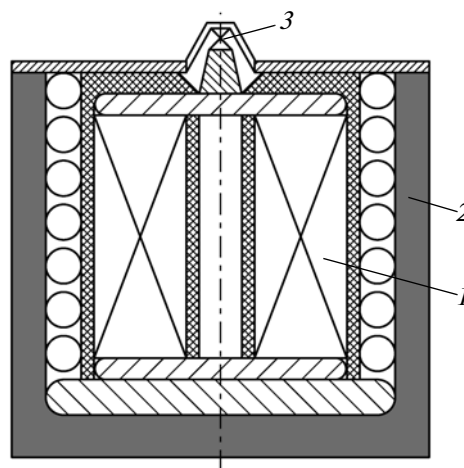
Конструкция импульсного генератора тока, описанного в данной работе, основана на тех принципах, что и конструкция генератора, описанного выше [5], т.е. на использовании конденсаторно-коммутаторных сборок. Однако в данном случае для увеличения надежности генератора в его конструкции используется не четыре, а одна к.к.с. с повышенным до 100 кВ зарядным напряжением. Основные параметры этого генератора (энергозапас, амплитуда тока, время нарастания тока) близки к параметрам генератора [5], но использование более высокого зарядного напряжения позволило увеличить в  $\sim 2$  раза внутреннее сопротивление генератора и улучшить его согласование с нагрузкой (Х-пинч).

### КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА

Генератор, принципиальная схема которого приведена на рис. 1, состоит из высоковольтного источника питания; системы высоковольтной синхронизации; конденсаторной батареи, состоящей из одной к.к.с.; передающей линии. Принцип действия импульсного генератора тока следующий: высоко-



**Рис. 1.** Принципиальная схема генератора.  $L_{Г}$  – индуктивность и  $C_{Г}$  – емкость генератора;  $L_{нагр}$  – индуктивность нагрузки; X-пинч – нагрузка;  $U_0$  – зарядное напряжение;  $K$  – многозачерный разрядник.



**Рис. 2.** Конденсаторно-коммутаторная сборка НСЕІсар 100-0.2. 1 – конденсатор НСЕІсар 100-0.2; 2 – многозачерный разрядник; 3 – нагрузка (X-пинч).

вольтовый источник питания заряжает конденсаторную батарею до рабочего напряжения 80–100 кВ, после срабатывания сильноточного коммутатора, запуск которого обеспечивает система синхронизации, импульс тока через формирующую линию передается на нагрузку.

Основным элементом конструкции импульсного генератора является конденсаторно-коммутаторная сборка НСЕІсар 100-0.2, состоящая из низкоиндуктивного импульсного конденсатора и сильноточного импульсного коммутатора тока. Схематически к.к.с. изображена на рис. 2. Прототипом данной сборки является к.к.с. НСЕІсар 100-0.1 с более низкими параметрами [7]. При разработке конструкции импульсного конденсатора основное внимание уделялось минимизации активного сопротивления и снижению токовой нагрузки на контакты. Сам конденсатор выполнен в виде полого цилиндра, на внешней поверхности которого расположен импульсный сильноточный коммутатор тока. Коммутатор служит устройством вывода энергии из конденсатора, последовательно с которым включается, и обеспечивает за счет минимизации индуктивности и активного сопротивления нужную скорость вывода энергии.

Конденсаторно-коммутаторная сборка НСЕІсар 100-0.2 имеет следующие параметры: общая индуктивность сборки 20 нГн; емкость конденсатора  $200 \text{ нФ} \pm 10\%$ ; напряжение 100 кВ; энергозапас конденсатора 1000 Дж; расчетный ток через коммутатор не более 250 кА.

Размеры активной части конденсатора  $\varnothing 80 \times \varnothing 160 \times 160 \text{ мм}$ , объем  $2.3 \text{ дм}^3$ , плотность энергии конденсатора составляет  $370 \text{ Дж/дм}^3$  при напряженности электрического поля  $E = 200 \text{ кВ/мм}$ .

По сравнению с прототипом к.к.с. НСЕІсар 100-0.1 [7] в конструкцию данной сборки внесены ряд изменений: увеличена длина активной части до 160 мм, уменьшен шаг смещения обкладок в секциях до 3 мм, использован другой, менее индуктивный, коммутатор. В качестве коммутатора применен многозачерный разрядник [8], который вынесен наружу конденсатора. Изменения привели к снижению индуктивности сборки до 20 нГн и повышению плотности энергии при той же напряженности электрического поля.

Особенностью к.к.с. НСЕІсар 100-0.2 является увеличение числа токосъемных контактов в каждом из 57 параллельно включенных конденсаторов от одного (как это было в 50-кВ конструкциях) до трех. Это служит для компенсации паразитной индуктивности, возникающей при многоканальной коммутации. Наконец, еще одной особенностью конструкции к.к.с. НСЕІсар 100-0.2 с наружной коммутацией [9] является динамика воздействия токов на обкладки, приводящая к их уплотнению, что со временем может привести к незначительному увеличению емкости (в пределах коэффициента запрессовки) и уменьшению газовыделения из-за улучшения контакта алюминиевых обкладок с токовыводными шинами.

Сборка НСЕІсар 100-0.2 была испытана в режиме короткого замыкания при зарядном напряжении 90 кВ. Осциллограмма тока, полученная при испытании сборки в данном режиме, представлена на рис. 3. Как видно из осциллограммы, сборка обеспечивает ток 180 кА при зарядном напряжении 90 кВ за 100 нс.

Генератор, разработанный на базе к.к.с. НСЕІсар 100-0.2, помимо элементов самой сборки содержит узел нагрузки, расположенный по центру сборки. Расположение нагрузки в непосредствен-

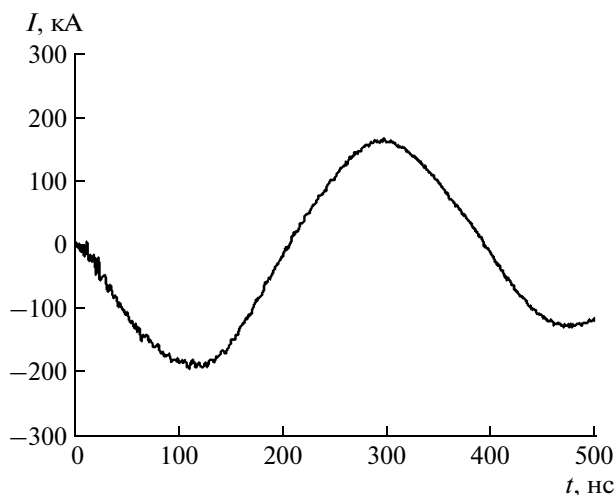


Рис. 3. Осциллограмма тока в режиме короткого замыкания при зарядном напряжении 90 кВ.

ной близости от к.к.с. обеспечивает малую индуктивность токоподводящих шин и, как следствие, увеличение амплитуды тока в нагрузке.

#### РАБОТА ГЕНЕРАТОРА НА НАГРУЗКУ

На разработанном компактном импульсном генераторе были отлажены схемы создания источников излучения на основе X-пинча. Для регистрации импульса тока в экспериментах использовалась индуктивная петля. Для уменьшения индуктивности узла нагрузки высоковольтный электрод и обратный токопровод были выполнены в виде конусов. Индуктивность нагрузки составляет 7 нГн, эффективность передачи энергии, запасенной в первичном накопителе, в индуктивность составляет 70%.

Были проведены эксперименты с нагрузкой в виде X-пинча, который состоял из двух молибденовых проволочек  $\varnothing 25$  мкм. Рентгеновское излучение в области от 4 до 6 кэВ регистрировалось алмазным диодом (PCD – Photoconductive diode) с алюминиевым катодом, расположенным за фильтром (Ni 6.4 мкм + Al 8 мкм).

Параметры X-пинча были следующими: расстояние между электродами составляло 8 мм, угол между проволочками  $74^\circ$ . Временные зависимости тока через X-пинч и импульса рентгеновского излучения представлены на рис. 4. Эксперименты показали, что импульс излучения X-пинча в большинстве выстрелов имеет два пика, амплитуда второго пика составляет <40% от амплитуды первого пика. Длительность первого пика (полная ширина на полувысоте) импульса рентгеновского излучения составляет 2–3.5 нс. Разброс момента максимума первого пика относительно момента начала тока составляет  $\pm 7$  нс в 80% выстрелов для данной конфигурации нагрузки.

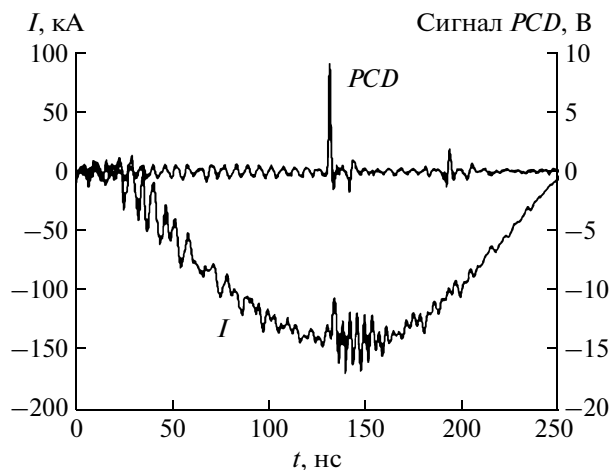


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы тока и алмазного рентгеновского диода.

В спектральном диапазоне (3–10 кэВ) были получены рентгенограммы мухи и клеща на пленке “Микрат-500”, которая располагалась над титановым фильтром толщиной 16 мкм. В области выше 10 кэВ рентгенограммы этих объектов зарегистрировать не удалось. В спектральном диапазоне >1 кэВ были получены изображения вольфрамовых проводников диаметром 6, 12 и 30 мкм на пленке “Микрат-500” (рис. 5). Исходя из полученных рентгенограмм, можно сделать оценку размера источника излучения: в спектральном диапазоне >1 кэВ размер источника составляет <5 мкм.

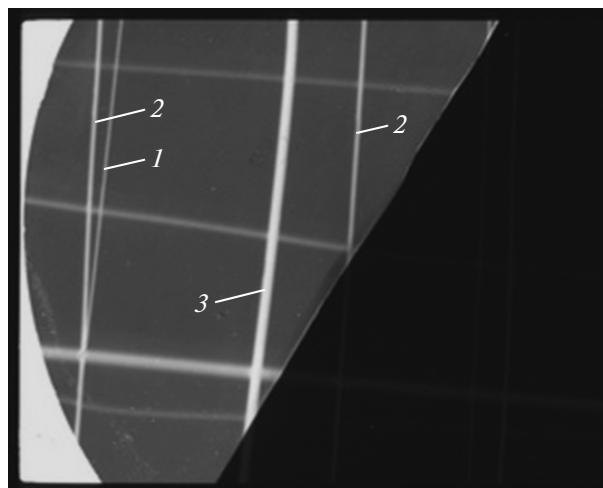


Рис. 5. Рентгенографическое изображение вольфрамовых проволочек диаметром 6 мкм (1), 12 мкм (2) и 30 мкм (3). Коэффициент увеличения 18, алюминиевый фильтр толщиной 8 мкм + 2 мкм алюминизированный поликарбонат, пленка “Микрат-500”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе конденсаторно-коммутаторной сборки НСЕІсар 100-0.2 разработан и испытан компактный наносекундный импульсный генератор. К.к.с. НСЕІсар 100-0.2 имеет следующие параметры: емкость 200 нФ; зарядное напряжение 100 кВ; энергозапас 1000 Дж; суммарная индуктивность импульсного конденсатора и многозазорного разрядника 20 нГн. В конструкцию к.к.с. внесен ряд изменений, которые привели к увеличению плотности энергии до 370 Дж/дм<sup>3</sup> при напряженности электрического поля 200 кВ/мм. Размеры активной части конденсатора к.к.с. НСЕІсар 100-0.2 – Ø80 × Ø160 × 160 мм, объем активной части 2.3 дм<sup>3</sup>. Генератор в режиме короткого замыкания позволяет развивать ток 180 кА при зарядном напряжении 90 кВ за 100 нс. Получена скорость нарастания тока на нагрузке X-пинч (две молибденовые проволоочки Ø25 мкм) 1.3 кА/нс, длительность импульса мягкого рентгеновского излучения 2–3.5 нс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А.* // Письма в ЖТФ. 1982. № 8(9). С. 1060.
2. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Douglass J.D.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34(5). P. 2336.
3. *Жарова Н.В., Ратахин Н.А., Саушкин А.В. и др.* // ПТЭ. 2006. № 3. С. 96.
4. *Жарова Н.В., Орешкин В.И., Седой В.С.* // Радиационная стойкость электронных систем. 2007. Вып. 10. С. 228.
5. *Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Эрфорт А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. Вып. 2. С. 87.
6. *Месяц Г.А., Шелковенко Т.А., Иваненков Г.В. и др.* // ЖЭТФ. 2010. Т. 138. Вып. 3(9). С. 411.
7. *Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Эрфорт А.А. и др.* // Материалы XIV Международной научной конференции “Физика импульсных разрядов в конденсированных средах”. Николаев, 2009. С. 140.
8. *Zherlitsyn A.A., Kovalchuk V.M., Kharlov A.V., Kumryak E.V.* // Proc. of 14th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, 2006. P. 287.
9. *Верховский В.С., Жарова Н.В., Лавринович И.В., Федущак В.Ф.* Пат. 75783 РФ. МПК H 01 G 4/00, H 01 T 2/02 // БИПМ. 2008. № 23(IV). С. 1036.