

УДК 537.84

DOI 10.53403/9785951505163_2021_26_1_312

Источник мегаамперного тока со временем нарастания ~ 100 нс на базе взрывомагнитных генераторов

**А. А. Базанов, Е. И. Бочков, С. Г. Гаранин,
П. В. Дудай, А. А. Зименков,
А. В. Ивановский, К. Н. Климушкин,
В. М. Комаров, А. И. Краев, В. Б. Куделькин,
В. И. Мамышев, С. М. Полюшко,
З. С. Цибигов, Е. В. Шаповалов**

Для достижения порога термоядерного зажигания в схеме непрямого облучения рентгеновским излучением Z-пинча необходимо осуществить имплозию лайнера током амплитудой ~ 65 МА за время ~ 100 нс. Токи с такими параметрами могут быть созданы с применением сверхмощных дисковых взрывомагнитных генераторов и двухкаскадной системы обострения импульса тока на основе фольговых электро-взрывных размыкателей тока в виде «змейки». Реализацию взрывного источника тока со временем нарастания ~ 100 нс целесообразно проводить поэтапно, наращивая величину тока. В работе представлены результаты экспериментов первого этапа, в которых на базе спирального взрывомагнитного генератора реализован ток амплитудой в 5 МА за время ~ 120 нс в индуктивной нагрузке ~ 10 нГн.

Для достижения порога термоядерного зажигания в схеме непрямого облучения рентгеновским излучением Z-пинча необходимо осуществить имплозию лайнера током амплитудой ~ 65 МА за время ~ 100 нс [1]. Традиционно для реализации таких токов создают лабораторные установки на базе емкостных накопителей энергии: Z (США); PTS (Китай); Ангара, С-300 (Россия), и т. д. На самой мощной из них – установке Z – реализована имплозия многопроволочного лайнера током ~ 17 МА за время ~ 120 нс, получен выход рентгеновского излучения (РИ) с энергией $\sim 1,8$ МДж за время ~ 5 нс [2]. К сожалению, нам неизвестны новые данные по выходу РИ после модернизации установки Z, в процессе которой энергия конденсаторной батареи (КБ) была увеличена в два раза. По-видимому, продвижение в сторону больших токов (энергий РИ) на данном пути связано с техническими сложностями, хотя проекты более мощных установок на основе КБ существуют как в США и Китае, так и в России.

Альтернативным путем для реализации РИ могут являться установки на базе взрывомагнитных генераторов (ВМГ). Современные дисковые ВМГ, оснащенные фольговыми электро-взрывными размыкателями тока (ФЭРТ), создают в индуктивной нагрузке в десятки наногенри токи с амплитудой до сотни мегаампер с микросекундным временем нарастания [3]. Для реализа-

ции мощного РИ на этом пути необходимо решить проблему дальнейшего обострения импульса тока до ~ 100 нс.

В работе [4] для сокращения фронта нарастания тока ВМГ до ~ 100 нс предложено использовать малоиндуктивный ФЭРТ в виде «змейки» [5] и разрядник для развязки контура ВМГ и нагрузки на стадии электровзрыва фольги. В работе [6] показано, что с применением сверхмощных дисковых ВМГ в этой схеме возможна реализация имплозии Z-пинча за время ~ 100 нс током ~ 75 МА.

Реализацию взрывного источника тока со временем нарастания ~ 100 нс целесообразно проводить, поэтапно наращивая величину тока.

Схемы ФЭРТ, классическая [3] и в виде «змейки» [5], приведены на рис. 1. Для получения в нагрузке ~ 10 нГн тока с амплитудой $J_n \sim 100$ МА за время ~ 100 нс необходимо напряжение $V_n \sim 10$ МВ. ФЭРТ эффективно работают при напряженности электрического поля $5\text{--}10$ кВ/см. То есть длина фольги должна быть не менее $l = 10$ м.

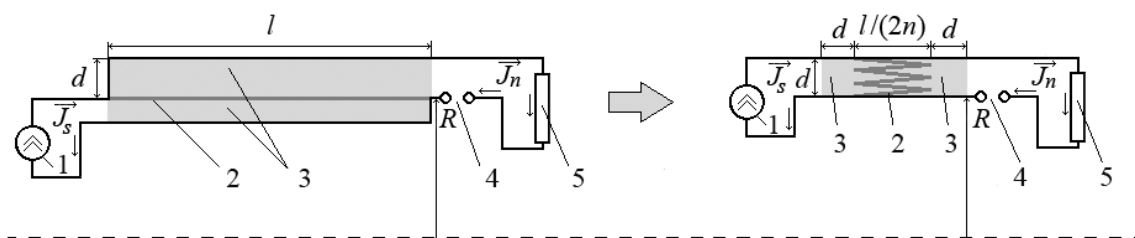


Рис. 1. Схемы ФЭРТ, классическая (слева) и в виде «змейки» (справа): 1 – источник тока; 2 – медная фольга; 3 – диэлектрик; 4 – разрядник или взрывной ключ; 5 – нагрузка

Существующие технологии обеспечивают прочность изоляции над фольгой ~ 100 кВ/мм, т. е. необходима толщина диэлектрика не менее $d = 10$ см. Отсюда следует, что индуктивность подвода энергии к нагрузке в случае классического ФЭРТ при радиусе размещения фольги $R = 2$ м и напряжении $V_n \sim 10$ МВ не менее $L = 100$ нГн.

Начальная индуктивность 15-элементного сверхмощного ДВМГ $L_0 = 360$ нГн. При усилении энергии K_E в 15 раз с сохранением $\eta \sim 73\%$ от начального потока [7], конечная индуктивность оценивается: $L_k \sim \eta^2 L_0 / K_E \sim 13$ нГн.

В силу $L \gg L_k$ применение классической схемы ФЭРТ малоэффективно и, фактически, бессмысленно.

В случае ФЭРТ в виде «змейки» индуктивность над фольгой при тех же параметрах $l = 10$ м, $d = 10$ см, $R = 2$ м и числе звеньев «змейки» $n = 20$ составит $L = 2,2$ нГн.

Для проверки работоспособности схемы было проведено два эксперимента, в которых обострялся ток источника на основе спирального ВМГ и взрывного размыкателя тока [3], нарастающий за время ~ 1 мкс до амплитуды ~ 10 МА. Параметры фольги в обоих опытах были одинаковы: высота $l = 60$ см; толщина $\delta = 15$ мкм; ширина $h = 80$ см (53 полосы по 1,5 см), число звеньев $n = 10$. В опытах измерялись производные токов по времени и токи в цепях источника и нагрузки индуктивными датчиками, а также токи – методикой Фарадея. Внешний вид экспериментального устройства и ФЭРТ в виде «змейки» представлены на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид экспериментального устройства (максимальный диаметр 0,63 м; длина – 3,5 м) и ФЭРТ в виде «змейки»

Целью первого эксперимента являлось определение максимального напряжения, возникающего при электровзрыве фольги. Для этого индуктивность нагрузки была выбрана большой $L_n = 50$ нГн, разрядник отсутствовал (см. рис. 1). На рис. 3 представлены расчетный прогноз напряжения на ФЭРТ и зависимость напряжения $V = L_n dJ_n / dt$ от времени, зарегистрированная в опыте. Амплитуда напряжения достигла рекордной величины ~ 600 кВ. В схемах с классическим ФЭРТ максимум реализованного напряжения ~ 420 кВ [8].

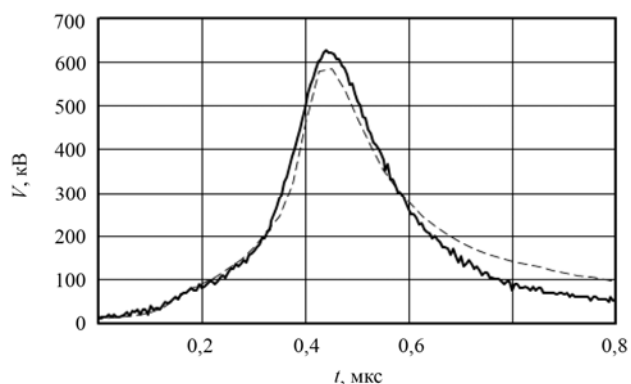


Рис. 3. Зависимости от времени напряжения на ФЭРТ: расчетный прогноз – пунктирная кривая; эксперимент – сплошная кривая

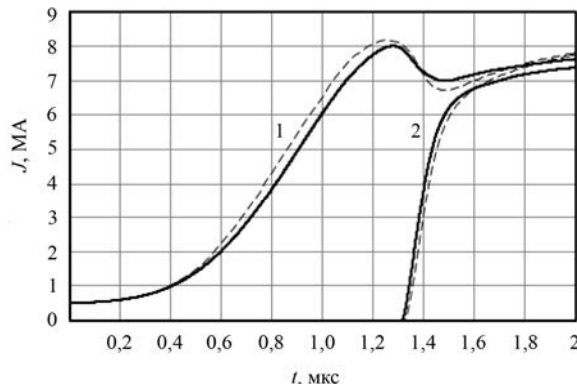


Рис. 4. Зависимости от времени токов в цепи источника (1) и нагрузки (2): расчетный прогноз – пунктирная кривая; эксперимент – сплошная кривая

Во втором эксперименте нагрузка с индуктивностью $L_n \sim 10$ нГн была развязана с ФЭРТ разрядником, напряжение пробоя которого было выставлено равным $V_{br} \sim 300$ кВ. На рис. 4 представлены прогнозируемые в расчетах зависимости токов от времени в цепи источника и нагрузки. Там же приведены зарегистрированные в опыте зависимости. Ток в нагрузке величиной ~ 5 МА реализован за ранее недостижимое в экспериментах с ВМГ время ~ 120 нс.

Созданный взрывной источник тока по возможностям имплозии Z-пинчей близок к российским установкам Ангара, С-300.

Успешное проведение экспериментов открывает возможность реализации взрывных аналогов установок со временем нарастания тока ~ 100 нс [6]:

- на базе дискового ВМГ малого класса – установки PTS (ток ~ 10 МА);
- на базе дискового ВМГ среднего класса – установки Z (ток ~ 25 МА) и в перспективе установки для достижения термоядерного зажигания на базе сверхмощного дискового ВМГ.

Список литературы

1. Vesey R. A., Herrmann M. C., Lemke R. W. et al. Target design for high fusion yield with the double Z-pinch-driven hohlraum // *Physics of Plasmas*. 2007. Vol. 14, 056302. P. 13.
2. Desjarlais M. P., Marder B. M. Theory of wire number scaling in wire-array Z-pinch // *Ibid.* 1999. Vol. 6, N 5. P. 2057–2064.
3. Чернышев В. К. Сверхмощные взрывомагнитные источники энергии для термоядерных и физических исследований // Сб. докл. «Мегагаусная и мегаамперная импульсная технология и применение» / Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. С. 41–58.
4. Ivanovsky A. V. Explosive PW-power current source – myth or reality? // *Proc. XIII Int. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relation Topics*. Suzhou. 2010. P. 32–43.
5. Chernyshev V. K., Kucherov A. I., Mezhevov A. I., Vakhrushev V. V. Electroexplosive Foil 500 kV Current Opening Switch Characteristics Research // *Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf.* Baltimore, Maryland, USA. 1997. P. 1208–1212.
6. Garanin S. G., Ivanovsky A. V., Mkhitarayan L. S. An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator // *Nuclear fusion*. 2011. Vol. 51, N 10, 103010. P. 15.
7. Demidov V. A., Kraev A. I., Mamyshev V. I. et al. Three-module disc explosive magnetic generator // *Proc. Megagauss Field and Pulsed Power Systems*. N. Y.: Nova Science Publishers. 1990. P. 351–354.
8. Петрухин А. А., Голубев В. В., Данов В. М. и др. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. М.: Наука, 1984. С. 384–387.

Source of Megaampere Current with the Rise Time ~ 100 ns on the Basis of Explosive Magnetic Generator

A. A. Bazanov, E. I. Bochkov, S. G. Garanin, P. V. Duday, A. A. Zimenkov, A. V. Ivanovskiy, K. N. Klimushkin, V. M. Komarov, A. I. Krayev, V. B. Kudel'kin, V. I. Mamyshev, S. M. Polyushko, Z. S. Tsibikov, E. V. Shapovalov

To achieve a thermonuclear ignition threshold in the scheme of indirect irradiation of Z-pinch by X-radiation, it is necessary to implode the liner by the current with the amplitude ~65 MA for the time ~100 ns. The currents with such parameters can be achieved with the use of super-powerful disk explosive magnetic generators and a two-stage current pulse sharpening system based on foil electrically exploded current opening switches in the form of a «serpentine». The implementation of the explosive current source with a rise time of ~100 ns is advisable to be carried out in stages by increasing the magnitude of current. The results of the first-stage experiments, in which on the basis of the helical explosive magnetic generator the current with the amplitude of 5 MA was produced in the load ~10 nH for the time of ~120 ns.