——— ФИЗИКА =

УДК 537.84

ИСТОЧНИК МЕГААМПЕРНОГО ТОКА С ВРЕМЕНЕМ НАРАСТАНИЯ ~100 нс НА БАЗЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А. А. Базанов¹, Е. И. Бочков¹, академик РАН С. Г. Гаранин¹, П. В. Дудай¹, А. А. Зименков¹, А. В. Ивановский^{1,2,*}, К. Н. Климушкин¹, В. М. Комаров¹, А. И. Краев¹, В. Б. Куделькин¹, В. И. Мамышев¹, С. М. Полюшко¹, 3. С. Цибиков¹, Е. В. Шаповалов¹

Поступило 15.08.2019 г.

Для достижения порога термоядерного зажигания в схеме непрямого облучения рентгеновским излучением Z-пинча необходимо осуществить имплозию лайнера током амплитудой ≈65 MA 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 электровурывных размыкателей тока в виде "змейки". Реализацию взрывного источника тока с 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 MA за время ≈110 нс в индуктивной нагрузке ≈10 нГн.

Ключевые слова: взрывомагнитный генератор, термоядерное зажигание, электровзрывной размыкатель тока, индуктивная нагрузка.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0869-56524894355-357

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 ёмкостных накопителей энергии: установка Z (США); РТЅ (Китай); "Ангара", С-300 (Россия) и т.д. На самой мощной из них — установке Z реализована имплозия многопроволочного лайнера током ≈17 MA за время ≈120 нс, получен выход рентгеновского излучения (РИ) с энергией ≈ 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.

¹ Российский федеральный ядерный центр —

экспериментальной физики, Саров Нижегородской обл.

²Саровский физико-технический институт

Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"

**E*-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

Альтернативным путём для реализации РИ могут являться установки на базе взрывомагнитных генераторов (ВМГ). Современные дисковые ВМГ, оснащённые фольговыми электровзрывными размыкателями тока (ФЭРТ), создают в индуктивной нагрузке в десятки наногенри токи с амплитудой до сотни мегаампер с микросекундным временем нарастания [3]. Для реализации мощного РИ на этом пути необходимо решить проблему дальнейшего обострения импульса тока до ≈ 100 нс.

В [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 [6] показано, что с применением сверхмощных дисковых ВМГ в этой схеме возможна реализация имплозии Z-пинча за время ≈100 нс током ≈75 MA.

Реализацию взрывного источника тока с 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 $J_n \approx 100$ МА за время ≈ 100 нс необходимо напряжение $V_n \approx 10$ МВ. Фольговые электровзрывные размыкатели тока эффективно работают при напряжённости электрического поля 5–10 кВ/см. То есть длина фольги должна быть не менее l = 10 м.

Всероссийский научно-исследовательский институт



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.



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

Существующие технологии обеспечивают прочность изоляции над фольгой $\approx 100 \text{ кB/мм}$. То есть 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 $V_n \approx 10 \text{ MB}$ не менее L = 100 нГн.

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

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

Во втором эксперименте нагрузка с индуктивностью $L_n \approx 10$ нГн была развязана с ФЭРТ-разрядни-



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

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 489 № 4 2019



лискового ВМГ малого класса — аналог установки РТЅ (ток ≈10 MA), на базе дискового ВМГ среднего класса — аналог установки Z (ток ≈25 MA) 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.// Physics of Plasmas. 2007. V. 14. 056302 (13 p.).
- 2. Desjarlais M.P., Marder B.M. // Physics of Plasmas. 1999. V. 6. № 5. P. 2057–2064.
- 3. Чернышев В.К. В сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение / Под ред. В.К. Чернышева, В.Д. Селемира, Л.Н. Пляшкевича. Саров: ВНИИЭФ, 1997. С. 41-58.
- 4. Ivanovsky A.V. In: 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. In: Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Baltimore, Maryland, USA, 1997. P. 1208-1212.
- 6. Garanin S.G., Ivanovsky A.V., Mkhitariyan L.S. // Nuclear fusion. 2011. V. 51. № 10. 103010 (15 p).
- 7. Demidov V.A., Kraev F.I., Mamvshev V.I. et all. // In: Proc. Megagauss Field and Pulsed Power Systems / Ed. V.M. Titov, G.A. Shvetsov. 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. Bazanov¹, E. I. Bochkov¹, P. V. Duday¹, Academician of the RAS S. G. Garanin¹, A. V. Ivanovskiy^{1,2}, K. N. Klimushkin¹, V. M. Komarov¹, A. I. Krayev¹, V. B. Kudel'kin¹, V. I. Mamyshev¹, S. M. Polyushko¹, E. V. Shapovalov¹, Z. S. Tsibikov¹, A. A. Zimenkov¹

¹Russian Federal Nuclear Center — The All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhniy Novgorod Region, Russian Federation ²Sarov Physicotechnical Institute, National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Nizhniy Novgorod Region, Russian Federation

Received August 15, 2019

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-power disk explosive magnetic generators and a twostage current pulse sharpening system based on foil electrically exploded current opening switches in a 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 the current with the amplitude of 5 MA was produced on the basis of the helical explosive magnetic generator in the load of ≈ 10 nH for the time of ≈ 110 ns, are presented.

Keywords: explosive magnetic generators, thermonuclear ignition, electrically exploded current opening switch, inductive load.

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 489 № 4 2019



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

ком, напряжение пробоя которого было выставлено равным $V_{br} \approx 300$ кВ. На рис. 4 представлены прогнозируемые в расчётах зависимости токов от времени в цепи источника и нагрузки. Там же приведены зарегистрированные в опыте зависимости. Ток в нагрузке величиной ≈5 MA реализован за ранее недостижимое в экспериментах с ВМГ время ≈110 нс.

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

Успешное проведение экспериментов открывает возможность создания взрывных аналогов установок