

ИСПЫТАНИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ДИСКОВОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ДВМГ480 С ВЗРЫВНЫМ РАЗМЫКАТЕЛЕМ ТОКА

TEST OF DEVICE BASED ON DISK MAGNETO-CUMULATIVE GENERATOR DMCG480 WITH EXPLOSIVE CURRENT OPENING SWITCH

С. Н. Голосов, В. А. Демидов, А. С. Борискин, С. А. Казаков, О. М. Таценко, Ю. В. Власов, А. П. Романов, А. В. Филиппов, Е. А. Бычкова, А. Н. Моисеенко, Е. И. Щетников, В. А. Яненко, С. В. Кутумов, Н. Р. Казакова, С. И. Володченков, Р. М. Гарипов, Р. Р. Юсупов, А. С. Севастьянов, В. В. Костин

S. N. Golosov, V. A. Demidov, A. S. Boriskin, S. A. Kazakov, O. M. Tatsenko, Yu. V. Vlasov, A. P. Romanov, A. V. Filippov, E. A. Bychkova, A. N. Moiseenko, E. I. Schetnikov, V. A. Yanenko, S. V. Kutumov, N. R. Kazakova, S. I. Volodchenkov, R. M. Garipov, R. R. Yusupov, A. S. Sevastyanov, V. V. Kostin

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental
Physics

Одним из перспективных направлений в физике высоких плотностей энергии является создание мощных электрофизических установок, способных формировать мегаамперные импульсы тока с крутым фронтом. Представлены результаты испытания устройства на основе 5-элементного дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ480 и взрывного размыкателя тока. При разрыве контура с током 32 МА в нагрузке 17 нГн, эквивалентной многопроволочной лайнерной сборке, получен импульс тока 15 МА с характерным временем нарастания $\sim 0,8$ мкс.

One of the perspective directions in high energy density physics is the creation of powerful electro physical facilities capable to form megampere current pulses with short front. This paper presents test results of the device based on 5-element disk magneto-cumulative generator DMCG480 and explosive current opening switch. The current pulse of 15 MA with characteristic rise time of $0.8 \mu\text{s}$ was obtained in the equivalent multi-wire array load of 17 nH at circuit breaking with the current of 32 MA.

Введение

Для получения высоких плотностей энергии в лайнерных экспериментах по генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения необходимы токи в десятки мегаампер с временем нарастания менее 0,5 мкс [1].

В [2] приведены результаты первого эксперимента по исследованию возможности формирования коротких токовых импульсов с помощью пятиэлементного дискового взрывомагнитного генератора (ДВМГ) с зарядами взрывчатого вещества (ВВ) диаметром 240 мм (ДВМГ240-5) и взрывного размыкателя тока (ВРТ). В нагрузке 6,8 нГн был получен импульс тока ~ 9 МА с характерным временем фронта

$\sim 0,6$ мкс. Генератор ДВМГ240 – это уменьшенная в 2 раза модель генератора ДВМГ480, который является энергетической основой взрывного комплекса ЭМИР [3]. Результаты испытаний ДВМГ480-5 на индуктивную нагрузку ~ 10 нГн представлены в [4, 5].

В [6] представлены результаты второго испытания устройства на основе ДВМГ240 и ВРТ. В отличие от [2] здесь количество элементов ДВМГ было увеличено в два раза, длина разрушаемой фольги в ВРТ – в 1,5 раза, и индуктивность нагрузки – в 2,3 раза. В контуре индуктивностью ~ 16 нГн, включающем в себя эквивалент камеры с многопроволочным лайнером индуктивностью 8,8 нГн, взрывным размыкателем сформирован импульс тока амплитудой

~10 МА с характерным временем нарастания тока между уровнями 0,1 и 0,9 от максимального значения ~0,55 мкс.

В докладе представлены результаты первого испытания устройства на основе 5-элементного ДВМГ480 и взрывного размыкателя тока с фольгой, расположенной на диаметре 560 мм (ДВМГ480-5 – ВРТ560). В отличие от [2], здесь линейные размеры элементов ДВМГ увеличены в два раза, длина разрушаемой фольги в ВРТ – в 2,9 раза, и индуктивность нагрузки – в 2,5 раза.

Описание устройства

Устройство включает в себя предусилитель – высокоиндуктивный спиральный ВМГ-240 [7], узел отключения предусилителя, ДВМГ с пятью профилированными дисковыми элементами и ВРТ. Нагрузка устройства эквивалентна по индуктивности многопроволочному лайнеру. В конструкции устройства применены технические решения, защищенные авторскими свидетельствами [8, 9] и патентами РФ [10, 11, 12]. Эскиз устройства ДВМГ480-5 – ВРТ560 представлен на рис. 1. Предусилитель и узел отключения предусилителя рис. 1 не показаны.

Внутренний диаметр соленоида предусилителя составляет 240 мм, его длина – 1200 мм. Медная центральная труба ВМГ – цилиндрически-коническая. Внутри центральной трубы установлен заряд ВВ массой ~22 кг. Инициро-

вание заряда ВВ производится с торца ВМГ. Начальная индуктивность спирального ВМГ равна 110 мкГн, начальное сопротивление – 0,06 Ом. Расчетный интервал времени от замыкания электрического контура предусилителя до начала сжатия магнитного потока в ДВМГ составляет 155 мкс. Конечная индуктивность предусилителя равна 119 нГн.

Дисковый ВМГ состоит из 5 секций с зарядами ВВ диаметром 480 мм общей массой ~80 кг. Иницирование зарядов ВВ в ДВМГ обеспечивается устройством осевого иницирования, содержащим 10 электродетонаторов (по два на каждый заряд ВВ), соединенных электрически последовательно и расположенных вдоль оси устройства с шагом 50 мм. Собственная индуктивность пяти полостей сжатия дискового генератора 89 нГн. Начальная индуктивность генератора равняется 108 нГн.

Индуктивность конечного контура ДВМГ определяется индуктивностью полостей между дисками в момент срабатывания ВРТ, индуктивностью передающей линии между ДВМГ и ВРТ (2,6 нГн), индуктивностью полостей под датчики (0,06 нГн), и собственной индуктивностью ВРТ (15,9 нГн). В передающей линии между ДВМГ и ВРТ применяется проходной многослойный изолятор толщиной 4,5 мм из полиэтилентерефталатной пленки.

Ребристая преграда изготовлена из ПММА с облицовкой ребер стальными кольцами толщиной 1 мм. Ширина ребер преграды 1,5 мм, ши-

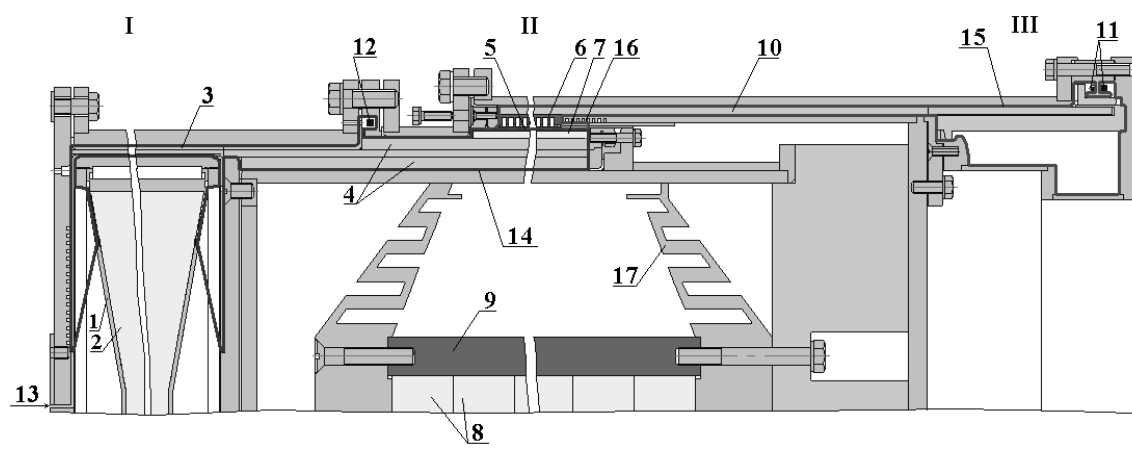


Рис. 1. Эскиз устройства ДВМГ480-5 – ВРТ560. I – ДВМГ, II – ВРТ, III – нагрузка, 1 – дисковая оболочка, 2 – дисковый заряд ВВ, 3 – проходной изолятор передающей линии между ДВМГ и ВРТ, 4 – изолятор ВРТ, 5 – фольга ВРТ, 6 – ребристая преграда, 7 – разрывной заряд ВВ ВРТ, 8 – промежуточный заряд ВВ ВРТ, 9 – алюминиевая оболочка, 10 – изолятор передающей линии к нагрузке, 11 – индукционные датчики ДЗ и магнитооптический датчик МО-Н в контуре нагрузки, 12 – индукционные датчики Д2 и магнитооптический датчик МО-Д в контуре ДВМГ, 13 – выход предусилителя, 14 – контур ДВМГ в момент начала коммутации тока, 15 – контур нагрузки, 16 – замыкающий ключ, 17 – опора

рина пазов 3 мм, глубина пазов 7 мм. Разрушаемый проводник выполнен из медной фольги толщиной 0,38 мм, шириной 1758 мм и длиной 700 мм, расположенной на диаметре 560 мм.

Толщина разрывного заряда из пластического ВВ составляет 5,5 мм. Разрывной заряд инициируется ударной волной, приходящей на его внутреннюю поверхность. Для формирования ударной волны применяется промежуточный заряд ВВ. В качестве промежуточного заряда ВВ используются 22 плоских диска диаметром 240 мм и толщиной 40 мм с центральным отверстием диаметром 27 мм. Инициирование промежуточного заряда обеспечивается устройством осевого инициирования, содержащим 22 электродетонатора, соединенных электрически последовательно и расположенных вдоль оси устройства с шагом 40 мм. Продукты детонации промежуточного заряда разгоняют алюминиевую оболочку толщиной 12,5 мм. Алюминиевой оболочка, ускоренная продуктами детонации ВВ, воздействует на стальной корпус с толщиной стенки 8,5 мм и медный токопровод толщиной 1,5 мм. Затем ударная волна проходит через многослойный изолятор толщиной 7 мм из полиэтилентерефталатной пленки и полиэтиленовый изолятор толщиной 7 мм. Для устранения преждевременного разрушения изолятора ВРТ при воздействии ударной волны от промежуточного заряда ВВ, которая распространяется по опорам с опережением относительно разлета алюминиевой оболочки, использованы опоры ребристой формы.

Индуктивность контура нагрузки ВРТ определяется индуктивностью передающей линии от ВРТ (8 нГн) и индуктивностью, эквивалентной многопроволочному лайнеру (9 нГн) и составляет 17 нГн. Внутренняя полость нагрузки заполнена трансформаторным маслом. Конструкция входного изолятора нагрузки идентична входному изолятору лайнерной камеры.

Расчетно показано, что для получения в индуктивной нагрузке ~ 17 нГн импульса амплитудой 14-17 МА (при линейной плотности тока в размыкателе ~ 200 кА/см) разрыв контура с фольгой толщиной 0,38 мм нужно производить через ~ 25 мкс после начала работы ДВМГ. При этом необходимо обеспечивать запитку дискового генератора током 6-6,5 МА, то есть начальный магнитный поток в предусилителе должен быть 2,1-2,2 Вб, а ток в дисковом генераторе ~ 30 МА. Максимальное расчетное напряжение, формируемое при срабатывании ВРТ, составляет ~ 450 кВ.

Результаты испытания

В эксперименте измерения производной тока в диапазоне 10^9 – 10^{13} А/с обеспечивались индукционными датчиками с различной чувствительностью. Датчики устанавливались равномерно по окружности: в предусилителе энергии в сечении Д1, в дисковом ВМГ – Д2, в нагрузке ВРТ – Д3 (см. рис. 1). Для измерений тока в дисковом ВМГ и тока в нагрузке применялись также магнитооптические датчики (МО-Д и МО-Н), работающие на основе эффекта Фарадея. Оптические датчики изготавливались из оптоволокна. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 655 нм. Регистрация сигналов производилась с помощью осциллографов.

В эксперименте зарегистрированы сигналы со всех индукционных датчиков. Включение установок на подрыв электродетонаторов соответствует заданным временным значениям. Усредненные зависимости производных тока, токов и сопротивления ВРТ от времени, построенные в результате обработки экспериментальных данных представлены на рис. 2.

Предусилитель энергии с начальной индуктивностью 110 мкГн запитан током 20 кА, что соответствует магнитному потоку $\sim 2,2$ Вб. К началу работы ДВМГ максимальный ток в предусилителе составил $\sim 6,6$ МА при характерном времени нарастания ~ 34 мкс. Энергия, запасенная предусилителем, составила $\sim 2,6$ МДж.

Сжатие магнитного потока в дисковом ВМГ началось в расчетный момент времени – через 5,6 мкс после подачи импульса тока на подрыв электродетонаторов. Работа ДВМГ происходила в расчетном режиме (рис. 3). Индуктивность контура ДВМГ к началу его разрыва составляла ~ 22 нГн, ток ~ 32 МА. Характерное время нарастания тока $\sim 9,6$ мкс. Максимальное значение производной тока ДВМГ $\sim 3,8 \cdot 10^{12}$ А/с. Время работы ДВМГ от начала движения дисков до максимального значения тока в генераторе составило 25,5 мкс.

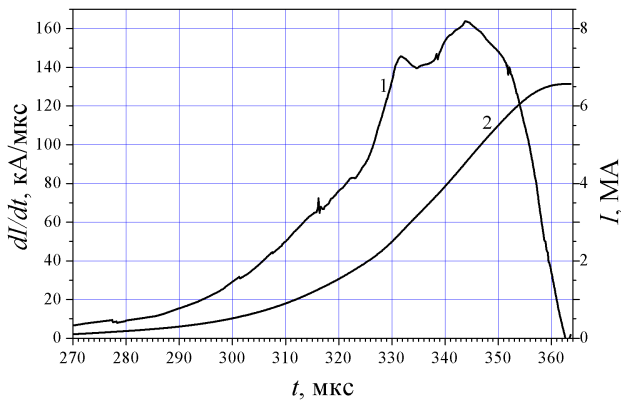
Ускорение фольги ВРТ в пазах ребристой преграды происходило в течение $\sim 0,5$ мкс. Максимальная линейная плотность тока через фольгу ВРТ составила 185 кА/см.

После разрыва фольги началось быстрое нарастание производной тока в нагрузке. В нагрузке индуктивностью 17 нГн сформирован импульс тока ~ 15 МА за время 1,5 мкс. Погрешность измерений по оптической и индукционной методикам составляет $\pm 0,8$ МА. Характерное время нарастания тока в нагрузке (между уров-

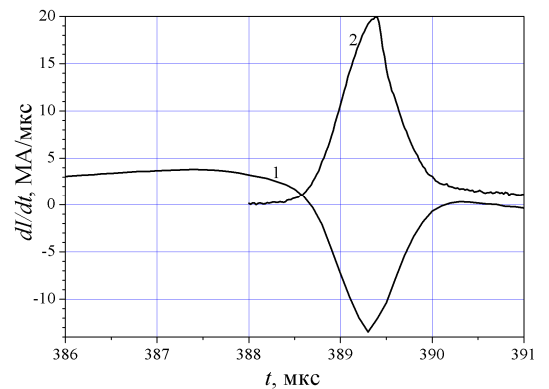
нями 0,1 и 0,9 амплитуды) составляет 0,8 мкс. Максимальная производная тока в нагрузке равна $2 \cdot 10^{13}$ А/с, что соответствует напряжению на ВРТ ~ 330 кВ.

Обращает на себя внимание характерный спад производной тока в нагрузке, зарегистрированный индукционными датчиками ДЗ по истечении времени $\sim 0,9$ мкс от начала размыкания (см. рис. 2б). В этот же момент началось расхождение в показаниях индукционной и оптической методик (рис. 4). По-видимому, индукционные датчики, обладающие большей чувствительностью, чем магнитооптические, отметили увеличение проводимости по продуктам взрыва вдоль ребристой преграды, выразившееся в спаде сопротивления ВРТ и появлении разности в ~ 8 МА между установившимися значениями тока ДВМГ и тока в нагрузке (рис. 5).

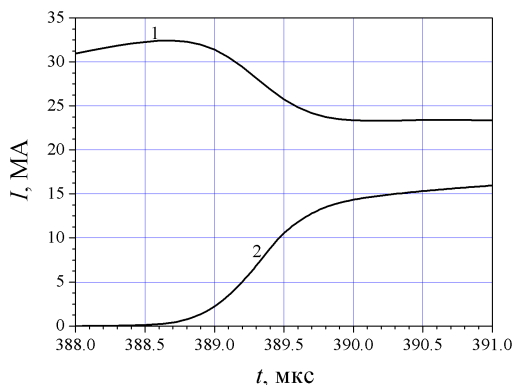
Появление проводимости по продуктам взрыва можно объяснить, если допустить предположение о том, что из-за повышения разновременности выхода ударной волны на поверхность фольги (а такая разновременность могла реализоваться из-за большой ($\sim 1,2$ м²) площади иницирования и за счет применения системы иницирования с шагом расположения электродетонаторов 40 мм) тепловая энергия в разрушаемом проводнике выделяется неравномерно. Это приводит к достижению в разных точках разрушаемой фольги удельной тепловой мощности выше критического значения ($1,5$ ГВт/см²) [13], возрастанию в этих точках температуры плазмы и, соответственно, росту ее проводимости. Следовательно, при разработке крупногабаритных ВРТ необходимо особое внимание уделять снижению разновременности срабатывания системы иницирования разрывного заряда.



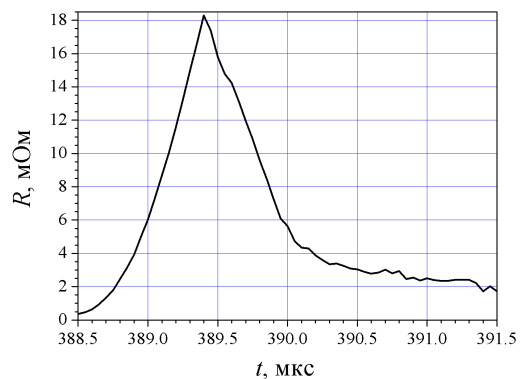
а – производная тока (1) и ток (2) в предусилителе



б – производная тока в ДВМГ (1) и в нагрузке (2)



в – Средний ток в ДВМГ (1) и в нагрузке (2)



г – сопротивление ВРТ

Рис. 2. Результаты испытания ДВМГ480-5 с ВРТ560 на индуктивную нагрузку

Заключение

Проведено испытание взрывного размыкателя тока с ребристой преградой при его запитке от пятиэлементного ДВМГ480. Результаты измерений электрических характеристик устройства, проведенных с применением индукционных и магнитооптических датчиков, хорошо согласуются между собой.

К началу срабатывания взрывного размыкателя в электрическом контуре дискового генератора индуктивностью ~ 22 нГн зарегистрирован ток ~ 32 МА. Характерное время нарастания тока в дисковом ВМГ составило $\sim 9,6$ мкс, максимальная производная тока равна $3,8 \cdot 10^{12}$ А/с. Параметры импульса тока соответствуют уровню начальной запитки ДВМГ ($I_0 = 6,6$ МА).

Исследована работа взрывного размыкателя при линейной плотности тока через фольгу ~ 200 кА/см. В контуре индуктивностью ~ 17 нГн взрывным размыкателем сформирован импульс тока амплитудой ~ 15 МА с характерным временем нарастания тока между уровнями 0,1 и 0,9 от максимального значения $\sim 0,8$ мкс. Максимальная производная тока в нагрузке равна $2 \cdot 10^{13}$ А/с, максимальное напряжение – 330 кВ.

Показана возможность обострения импульса тока дискового ВМГ размыкателем взрывного типа с инициированием разрывного заряда ударной волной, формируемой при разгоне цилиндрического лайнера продуктами взрыва заряда ВВ. Некоторое отличие экспериментального тока в нагрузке от расчетного, возможно, связано с увеличением проводимости по продуктам взрыва вдоль ребристой преграды из-за повышения разновременности выхода ударной волны на поверхность фольги, выразившееся в спаде сопротивления ВРТ и появлении разности в ~ 8 МА между установившимися значениями тока ДВМГ и тока в нагрузке. Отмечено, что при разработке крупногабаритных ВРТ необходимо особое внимание уделять снижению разновременности срабатывания системы инициирования разрывного заряда.

Список литературы

1. Spielman R. B., Deeney C., Chandler G. A., et al. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ // Phys. Plasmas. 1998. Vol.5, N 5. P. 2105–2111.
2. Demidov V. A., Boriskin A. S, Kazakov S. A., et al. Disk Magneto-Cumulative generator with explo-

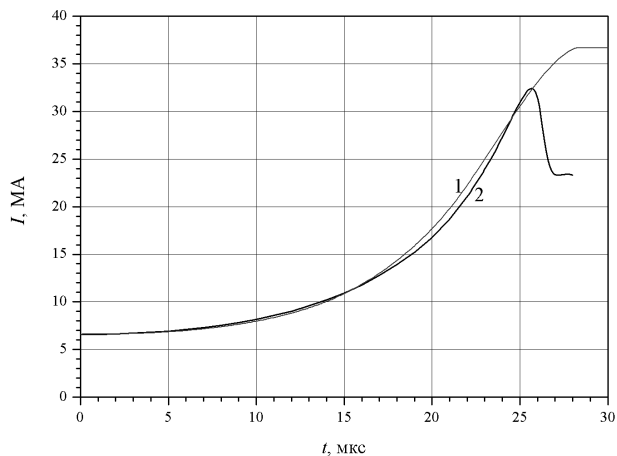


Рис. 3. Расчетный (при работе на нагрузку индуктивностью 18,6 нГн) (1) и экспериментальный (2) ток ДВМГ

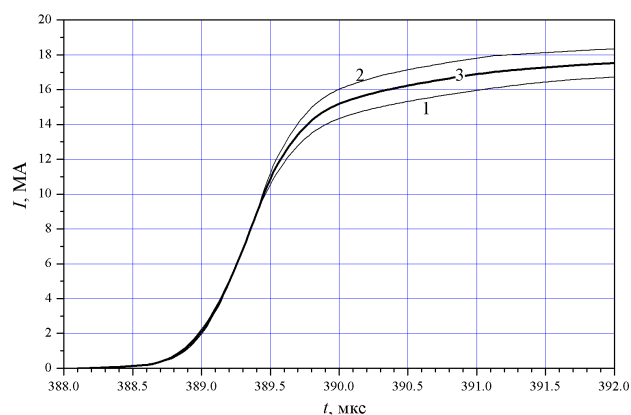


Рис. 4. Ток в нагрузке, измеренный индукционной (1) и оптической методикой (2). 3 – среднее значение

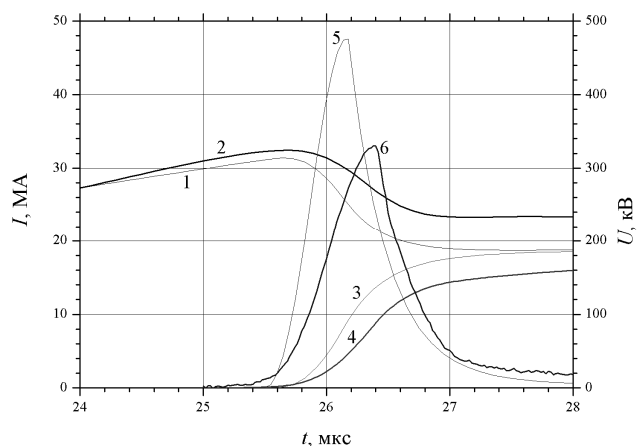


Рис. 5. Сравнение с расчетом при условиях, реализовавшихся в эксперименте. 1, 2 – ток ДВМГ, 3, 4 – ток в нагрузке, 5, 6 – напряжение на ВРТ. Нечетные кривые – расчет, четные – эксперимент

sive current opening switch // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, N 8. P. 1768-1772.

3. Selemir V. D., Demidov V. A., Repin P. B. Explosive Electrophysical Complex EMIR: Current State and Perspectives // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, N 8. P. 1754-1757.

4. Selemir V. D., Demidov V. A., Boriskin A. S. et al. Disk Magnetocumulative Generator of 480 mm Diameter for Explosive EMIR Facility // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, N 8. P. 1762-1767.

5. Demidov V. A., Selemir V. D., Boriskin A. S., et al. Test of disk magneto-cumulative generator of diameter 480 mm at increased powering // Proceedings of the 13-th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Suzhou, 6-10 July 2010 / Ed. by Sun Chengwei and Liu Changli. China Academy of Engineering Physics Institute of Fluid Physics, CAEP. 2010. P. 323-330.

6. Демидов В. А., Борискин А. С., Казаков С. А. и др. Дисковый взрывомагнитный генератор с взрывным размыкателем тока // ПМТФ. 2015, № 1, С. 24-30.

7. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2012. Том 1. 439 С.

8. А. с. 1409087 МКИ H02N 11/00. Взрывомагнитный генератор / В. Н. Веселов,

В. А. Демидов, И. К. Фетисов, В. К. Чернышев // Открытия. Изобретения. 2000. № 13.

9. А. с. 1484253 МКИ H02N 11/00. Многозаходная спираль взрывомагнитного генератора / В. А. Демидов, Е. И. Жаринов, С. А. Казаков, В. К. Чернышев // Открытия. Изобретения. 2000. № 13.

10. Пат. РФ RU 2 347 312 C1 МПК H02N 11/00. Система импульсной мощности / А. С. Борискин, В. А. Демидов, С. А. Казаков, Е. В. Шаповалов // Открытия. Изобретения. 2009. № 6.

11. Пат. РФ RU 2 396 630 C1 МПК H01H 39/00. Взрывной формирователь импульса тока / А. С. Борискин, В. А. Демидов, С. А. Казаков, Е. В. Шаповалов // Открытия. Изобретения. 2010. № 22.

12. Пат. РФ RU 2 399 111 C1 МПК H01H 39/00. Взрывной формирователь импульса тока / А. С. Борискин, Ю. В. Власов, В. А. Демидов, С. А. Казаков, Е. В. Шаповалов // Открытия. Изобретения. 2010. № 25.

13. Boriskin A. S., Golosov S. N., Demidov V. A., et al. Pulsed high-current power suppliers based on helical explosive magnetic generators with explosive current opening switches // Megagauss XI. I. R. Smith and V. M. Novac, Eds. London. 2007. P. 199-203.