

УДК 534.222.2:621.3

ДИСКОВЫЙ ВЗРЫВОМАГНИТНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ВЗРЫВНЫМ РАЗМЫКАТЕЛЕМ ТОКА

В. А. Демидов, А. С. Борискин, С. А. Казаков, О. М. Таценко,
Ю. В. Власов, Е. В. Шаповалов, А. П. Романов, А. В. Филиппов,
С. Н. Голосов, А. Н. Моисеенко, Е. И. Щетников, В. А. Яненко,
С. В. Кутумов, Н. Р. Казакова, С. И. Володченков, В. В. Грушко,
Н. И. Николаев, Р. Р. Юсупов, С. В. Галанова, А. С. Севастьянов,
В. В. Костин, А. С. Пикарь, П. В. Королев, В. А. Кручинин,
А. Д. Парфенов, Т. А. Торопова

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия

E-mails: demidov@ntc.vniief.ru, AISBoriskin@vniief.ru, SAKazakov@vniief.ru,
OMTatsenko@vniief.ru, YVVlasov@vniief.ru, EVShapovalov@vniief.ru,
APRomanov@vniief.ru, AVFilippov@vniief.ru, SNGolosov@vniief.ru,
ANMoiseenko@vniief.ru, EISchetnikov@vniief.ru, VAYanenko@vniief.ru,
SVKutumov@vniief.ru, NRKazakova@vniief.ru, SIVolodchenkov@vniief.ru,
VVGrushko@vniief.ru, NINikolaev@vniief.ru, RRYusupov@vniief.ru,
SVGalanova@vniief.ru, ASSevastyanov@vniief.ru, VVKostin@vniief.ru,
ASPikar@vniief.ru, PVKorolev@vniief.ru, VAKruchinin@vniief.ru,
ADParfenov@vniief.ru, TAToropova@vniief.ru

Представлены результаты испытания устройства на основе 10-элементного дискового взрывомагнитного генератора и взрывного размыкателя тока. При разрыве контура с током 18,5 МА в нагрузке с индуктивностью 16 нГн, эквивалентной индуктивности камеры с многопроволочным лайнером, получен ток 10 МА с характерным временем нарастания $\approx 0,5$ мкс.

Ключевые слова: предусилитель, дисковый взрывомагнитный генератор, взрывной размыкатель тока, ребристая преграда, характерное время нарастания тока.

Введение. Для получения высоких плотностей энергии в лайнерных экспериментах по генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения необходимы токи порядка 10 МА с временем нарастания менее 0,5 мкс [1].

В [2] приведены результаты первого эксперимента, в котором исследовалась возможность формирования быстронарастающих токовых импульсов с помощью пятиэлементного

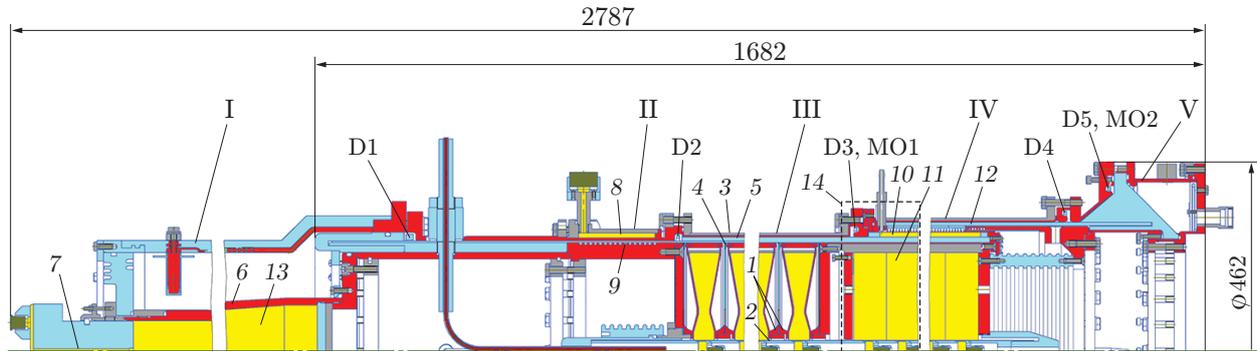


Рис. 1. Взрывной источник импульсной мощности:

I — спиральный ВМГ, II — узел отключения предусилителя, III — дисковый ВМГ, IV — взрывной размыкатель тока, V — индуктивная нагрузка; 1 — конус, 2 — устройство иницирования, 3 — корпус, 4, 5, 9, 12 — изоляторы, 6 — центральная труба, 7 — взрывная линия задержки, 8, 10, 11, 13 — заряды ВВ, 14 — расчетная область; D1–D5 — группы индукционных датчиков, MO1, MO2 — магнитооптические датчики

дискового взрывомагнитного генератора (ДВМГ) с зарядами взрывчатого вещества (ВВ) диаметром 240 мм (ДВМГ240-5) и взрывного размыкателя тока (ВРТ). В нагрузке с индуктивностью 6,8 нГн получен импульс тока ≈ 9 МА с характерным временем нарастания $\approx 0,6$ мкс.

В настоящей работе представлены результаты испытания подобного устройства. В отличие от [2] в данном эксперименте количество элементов ДВМГ было увеличено в два раза, длина разрушаемой фольги в ВРТ — в 1,5 раза, индуктивность нагрузки — в 2,3 раза. Обсуждаются направления дальнейшего совершенствования взрывной системы импульсной мощности.

Описание взрывной системы импульсной мощности. На рис. 1 представлена схема источника энергии на базе 10-элементного ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 240 мм и ВРТ диаметром 290 мм с индуктивной нагрузкой. Устройство включает предусилитель — высокоиндуктивный спиральный ВМГ-240 I [3], узел отключения предусилителя II, ДВМГ III с 10 профилированными дисковыми элементами и взрывной размыкатель тока IV. Индуктивность нагрузки устройства V эквивалентна индуктивности многопроволочного лайнера.

В ДВМГ дисковые элементы соединены медными конусами 1. Иницирование дисковых зарядов ВВ на основе октогена осуществляется устройством иницирования 2 с разновременностью $\approx 0,1$ мкс. Устройство иницирования содержит 10 торцевых детонаторов, соединенных последовательно и расположенных вдоль оси устройства. При срабатывании ДВМГ сжимаемый магнитный поток вытесняется в нагрузку через зазор между дисковыми элементами и корпусом 3 генератора, разделенными изолятором 4.

Начальная индуктивность 10 полостей сжатия дискового генератора равна 76,1 нГн. Изолятор 5 линии, передающей ток от ДВМГ к ВРТ, выполнен из полиэтилена. Индуктивность контура ДВМГ в момент начала работы ВРТ определяется индуктивностью полостей между дисками в момент начала его работы, индуктивностью линии, передающей ток от ДВМГ к ВРТ, и собственной индуктивностью ВРТ.

Внутренний диаметр спирали предусилителя, составляющий 240 мм, на выходе увеличивается до 290 мм. Длина спирали равна 800 мм, общая длина ВМГ ≈ 1200 мм. Центральная цилиндрическая труба предусилителя 6 с коническим расширением на конце изготовлена из алюминия. Внутри трубы установлен заряд ВВ 13, иницируемый с торца ВМГ, на котором находится взрывная линия задержки 7. Интервал времени с момента подрыва взрывной линии задержки до момента замыкания электрического контура пред-

усилителя составляет 44 мкс. Начальная индуктивность ВМГ равна 255 мкГн, активное сопротивление $\approx 0,1$ Ом.

Расчетный интервал времени с момента замыкания электрического контура предусилителя до момента окончания его работы составляет 116 мкс. При начальном магнитном потоке 1,7 Вб максимальное напряжение в компрессионной полости предусилителя составляет ≈ 35 кВ. Электрическая прочность предусилителя обеспечивается пленочной изоляцией витков спирали и заполнением внутреннего объема газом SF₆.

Дисковый ВМГ и предусилитель имеют общий токовый контур. Предусилитель отключается в момент начала движения оболочек дисковых элементов. Для отключения предусилителя используется полый цилиндрический заряд ВВ 8, разрушающий изолятор 9 передающей линии. Иницирование заряда ВВ узла отключения осуществляется с помощью электродетонаторов.

Разрушаемый проводник ВРТ выполнен в виде цилиндра диаметром 290 мм и длиной 360 мм из медной фольги толщиной $\approx 0,3$ мм. Ребристая преграда ВРТ изготовлена из органического стекла с облицовкой ребер стальными кольцами. Иницирование разрывного заряда 10, изготовленного из ВВ на основе октогена, осуществляется ударной волной, возникающей в результате взрыва промежуточного заряда ВВ 11. Эта ударная волна проходит через стальной корпус, медный токопровод и полиэтиленовый изолятор.

Промежуточный заряд ВВ, в качестве которого используются диски из ВВ на основе октогена, инициируется устройством осевого инициирования, содержащим электродетонаторы, соединенные последовательно и расположенные вдоль оси ВРТ.

Изолятор 12 линии, передающей ток от ВРТ к нагрузке, выполнен из полиэтилена высокой плотности. Как показали предварительные испытания, электрическая прочность изолятора составляет более 150 кВ.

Индуктивность контура ВРТ, который запитывается ДВМГ, равна 8,5 нГн. Индуктивность контура нагрузки ВРТ определяется индуктивностью передающей линии, состоящей из разделенных коническим изолятором коаксиальной полости с твердотельным изолятором (6,9 нГн) и полости лайнерной камеры с вакуумной изоляцией (8,8 нГн), и составляет 15,7 нГн. Напряжение на границе между твердотельным изолятором и лайнерной камерой $U_{ЛК} \approx 0,56U_{ВРТ}$ ($U_{ВРТ}$ — напряжение на ВРТ).

Взрывной эксперимент. В эксперименте с помощью индукционных датчиков с различной чувствительностью проводились измерения производной тока в диапазоне $10^9 \div 10^{13}$ А/с. На одних и тех же расстояниях друг от друга по окружности (в шести сечениях) устанавливались датчики (петли на каркасе): в предусилителе энергии — датчики D1, в ДВМГ — датчики D2, D3, в нагрузке ВРТ — датчики D4, D5 (см. рис. 1). Для измерения тока в ДВМГ и тока в нагрузке использовались также магнитооптические датчики (МО1, МО2), принцип работы которых основан на эффекте Фарадея.

Сигналы регистрировались с помощью аналоговых осциллографов СУР и цифровых регистраторов TDS. Оптические датчики изготавливались из оптоволокна LB 600. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер ЛПМ 655 СТ с длиной волны 0,655 мкм.

Предусилитель энергии запитан током 6,8 кА, что соответствует магнитному потоку $\approx 1,7$ Вб. В момент начала сжатия магнитного потока в ДВМГ по контуру протекал ток с амплитудой 4,7 МА. Индуктивность контура составляла ≈ 110 нГн, остаточная индуктивность полости предусилителя — 6,3 нГн, индуктивность линии, передающей ток от предусилителя к ДВМГ, — 13,4 нГн, начальная индуктивность ДВМГ — 76,1 нГн, индуктивность линии, передающей ток от ДВМГ к ВРТ, — 6,8 нГн, начальная индуктивность ВРТ — 8,5 нГн. Характерное время нарастания тока в предусилителе (в e раз на конечной стадии его работы) ≈ 15 мкс. Энергия, запасенная предусилителем, составляла

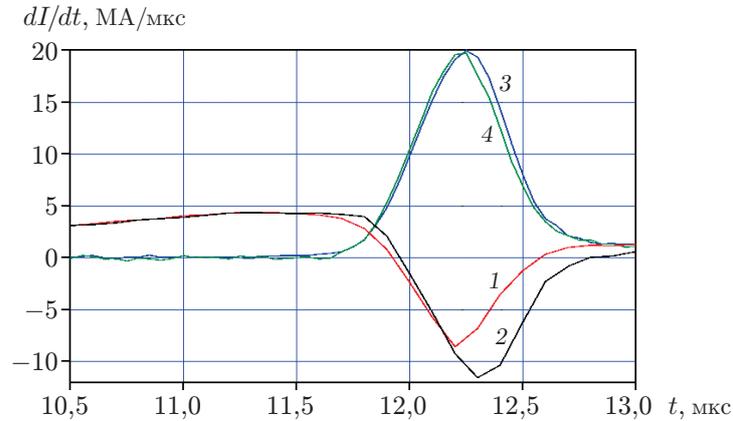


Рис. 2. Зависимости производной тока в ДВМГ (1, 2) и нагрузке (3, 4) от времени, осредненные по показаниям каждой группы датчиков:

1 — группа датчиков D2, 2 — группа датчиков D3, 3 — группа датчиков D4, 4 — группа датчиков D5

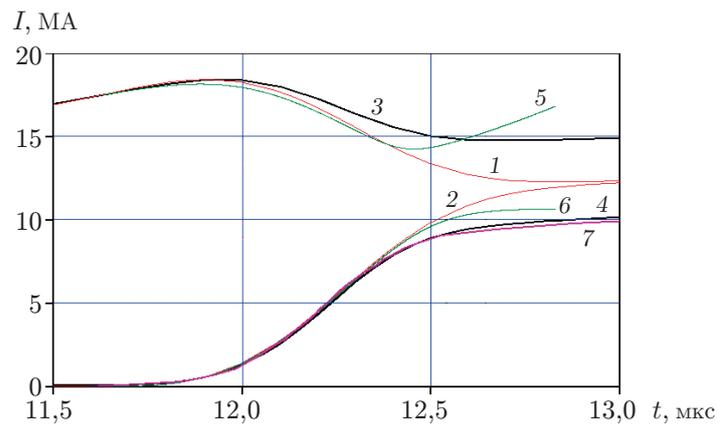


Рис. 3. Зависимость тока от времени:

1 — расчетная зависимость для ДВМГ, 2 — расчетная зависимость для нагрузки, 3 — экспериментальная зависимость для ДВМГ, 4 — экспериментальная зависимость для нагрузки, 5 — расчетная зависимость с учетом пробоя изолятора для ДВМГ, 6 — расчетная зависимость с учетом пробоя изолятора нагрузки, 7 — экспериментальная зависимость для нагрузки, зарегистрированная датчиком МО2

$\approx 1,2$ МДж. Коэффициент усиления энергии ≈ 210 , коэффициент сохранения магнитного потока $\approx 30\%$, максимальное значение производной тока в предусилителе $\approx 2,7 \cdot 10^{11}$ А/с.

На рис. 2 приведены зависимости от времени производной тока в ДВМГ и нагрузке, осредненные по показаниям каждой группы датчиков, на рис. 3 — зависимости тока в ДВМГ и нагрузке от времени, полученные в результате осреднения производных тока по показаниям групп датчиков D2, D3 и D4, D5 соответственно и интегрирования осредненных зависимостей. На рис. 3 представлена также зависимость тока в нагрузке от времени, зарегистрированная датчиком МО2. На рис. 2, 3 время отсчитывается с момента начала сжатия магнитного потока в ДВМГ.

Сжатие магнитного потока в ДВМГ началось через 5,6 мкс после срабатывания электродетонаторов. В момент начала работы ВРТ (через 11,6 мкс после начала сжатия магнитного потока в ДВМГ) индуктивность электрического контура ДВМГ составля-

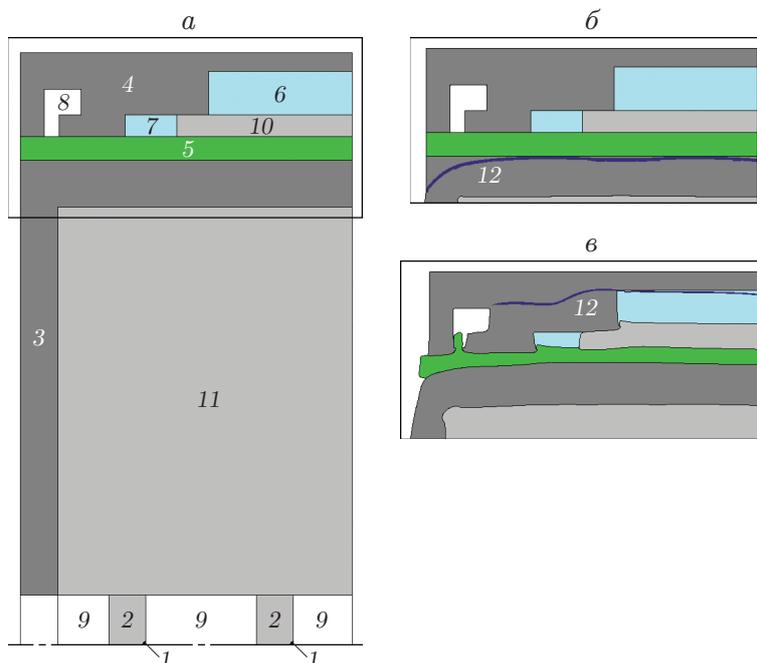


Рис. 4. Расчетная область (а) и результаты газодинамического расчета деформации цилиндрического изолятора продуктами детонации в реальной конструкции в момент 15,6 мкс (момент выхода ударной волны на внутреннюю поверхность изолятора 5) (б) и в момент 19,8 мкс (момент достижения максимума напряжения на ВРТ через 2 мкс после начала воздействия продуктов детонации на фольгу) (в):

1 — точки, в которых происходило инициирование зарядов ВВ, 2, 10, 11 — заряды ВВ, 3, 4 — проводники, 6, 7 — изоляторы, 8, 9 — воздушные полости, 12 — фронт ударной волны

ла ≈ 23 нГн, а ток в контуре ≈ 18 МА. Характерное время нарастания тока в ДВМГ (в e раз на конечной стадии его работы) ≈ 3 мкс, максимальное значение производной тока — $4,4 \cdot 10^{12}$ А/с.

В момент окончания работы ВРТ в нагрузке с индуктивностью 15,7 нГн формируется импульс тока с амплитудой ≈ 10 МА и временем нарастания 1,4 мкс. Характерное время нарастания тока (от 0,1 до 0,9 максимального значения) составляет $\approx 0,55$ мкс. Максимальная производная тока в нагрузке равна $2 \cdot 10^{13}$ А/с, максимальное напряжение на разрушаемом проводнике ВРТ $U_{\text{ВРТ}} = 320$ кВ, а напряжение на границе между твердотельным изолятором и лайнерной камерой $U_{\text{ЛК}} = 180$ кВ. Погрешности измерения производной тока равны: для ДВМГ $\pm 4\%$, для нагрузки $\pm 7\%$.

Из рис. 2 следует, что зависимости производной тока ДВМГ от времени, зарегистрированные датчиками D2 и D3, через 0,6 мкс после срабатывания ВРТ существенно различаются. Различие зависимостей производной тока от времени, зарегистрированных датчиками D4 и D5, является незначительным. На рис. 3 видно, что при заданном соотношении индуктивностей разрываемого контура и нагрузки конечный ток в нагрузке существенно меньше расчетного. Расчетные значения тока в ДВМГ и нагрузке (кривые 1, 2 на рис. 3) получены в результате решения уравнений эквивалентной электротехнической схемы коммутации тока. При этом зависимости индуктивности и сопротивления ДВМГ от времени, а также зависимость сопротивления ВРТ от времени считались известными и были получены ранее расчетным путем и на основе экспериментальных данных.

Различие экспериментальных и расчетных значений тока можно объяснить тем, что в процессе генерирования тока в нагрузке воздействие ударных волн, инициированных

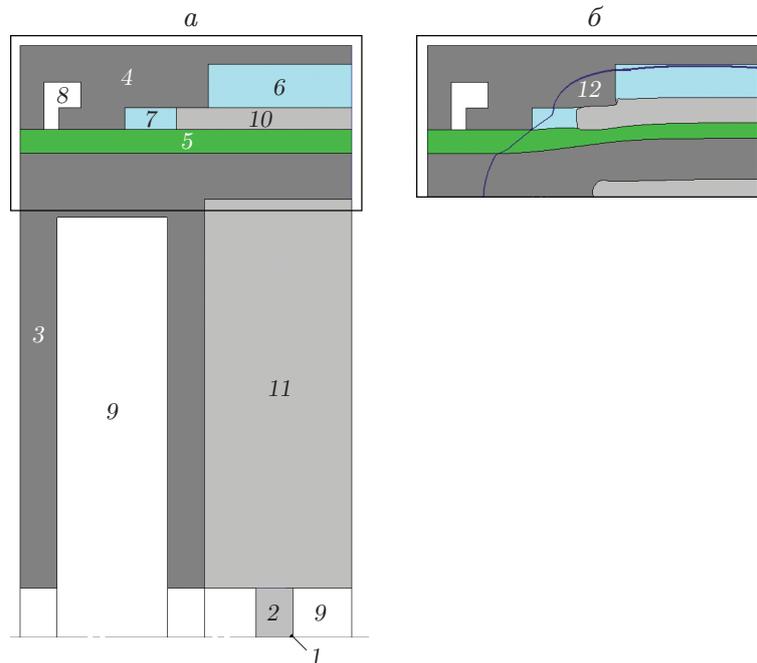


Рис. 5. Расчетная область (а) и результаты газодинамического расчета деформации цилиндрического изолятора продуктами детонации при смещении промежуточного заряда ВВ вправо на расстояние, равное 40 мм, в момент 19,8 мкс (момент достижения максимума напряжения на ВРТ через 2 мкс после начала воздействия продуктов детонации на фольгу) (б) (обозначения те же, что на рис. 4)

зарядом внутри ВРТ, на цилиндрический полиэтиленовый изолятор, отделяющий ВРТ от ДВМГ, приводит к деформации изолятора, частичному передавливанию тонкой стенки и как следствие к появлению проводимости с последующим пробоем по толщине при напряжении ≈ 200 кВ на входе в ВРТ. Данному случаю на рис. 3 соответствуют кривые 5, 6, полученные в результате решения уравнений схемы коммутации тока, в которой контур ДВМГ разделен на два контура, так чтобы значения индуктивностей этих контуров соответствовали пробоем в предполагаемой области. Между этими контурами включено дополнительное сопротивление, моделирующее пробой. Предполагается, что начиная с заданного момента времени это сопротивление уменьшается по экспоненциальному закону $R \sim e^{-t/\tau}$. Константа τ , характеризующая скорость уменьшения сопротивления, подбирается таким образом, чтобы различие расчетных и экспериментальных данных было наименьшим. Из рис. 3 следует, что с использованием такой модели можно получить лишь качественное описание процесса пробоя, тем не менее она может применяться при анализе результатов экспериментов.

В работе [4] показано, что при воздействии давлением 30 ГПа на полиэтилен с плотностью $0,92 \text{ г/см}^3$ удельное сопротивление полиэтилена уменьшается до $2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а при плотности $0,96 \text{ г/см}^3$ оно уменьшается до $4,5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Таким образом, эти значения уменьшаются на 14 и 12 порядков соответственно. Воздействие давления и процесс передавливания изолятора, расположенного на входе в ВРТ, показаны на рис. 4. На рис. 4, б, в представлены результаты газодинамического расчета, выполненного с помощью комплекса программ, приведенных в [5]. Инициирование зарядов ВВ происходило в точках 1 на оси симметрии. Прямоугольником выделена часть расчетной области, для которой приведены результаты расчета. Время отсчитывается с момента инициирования зарядов ВВ. В рас-

чете в момент достижения максимума напряжения на ВРТ давление, воздействующее на изолятор в рассматриваемой зоне, составляет ≈ 30 ГПа.

Можно уменьшить интенсивность воздействия ударной волны на изолятор и тем самым увеличить его электропрочность, сместив вспомогательный заряд по направлению к нагрузке на расстояние, равное 40 мм. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Заключение. Проведено испытание взрывного размыкателя тока с ребристой преградой при его запитке от 10-элементного ДВМГ240. Показано, что результаты измерений электрических характеристик устройства с использованием индукционных и магнитооптических датчиков хорошо согласуются.

В момент начала срабатывания взрывного размыкателя в электрическом контуре дискового генератора с индуктивностью ≈ 23 нГн зарегистрирован ток ≈ 18 МА. Характерное время нарастания тока в ДВМГ составило ≈ 3 мкс, максимальная производная тока равна $4,4 \cdot 10^{12}$ А/с. Параметры импульса тока соответствуют параметрам тока при начальной запитке ДВМГ ($I_0 = 4,7$ МА).

Обеспечена работа взрывного размыкателя при линейной плотности тока через фольгу ≈ 200 кА/см. В контуре с индуктивностью ≈ 16 нГн, эквивалентной индуктивности камеры с многопроволочным лайнером, взрывным размыкателем сформирован импульс тока с амплитудой ≈ 10 МА и характерным временем его нарастания $\approx 0,55$ мкс. Максимальная производная тока в нагрузке равна $2 \cdot 10^{13}$ А/с, максимальное напряжение — 320 кВ, напряжение на границе между твердотельным изолятором и лайнерной камерой ≈ 180 кВ.

Некоторое различие экспериментальных и расчетных значений тока в нагрузке может быть обусловлено электрическим пробоем изолятора в линии, передающей ток от ДВМГ к ВРТ, в процессе коммутации энергии. Для повышения эффективности работы ВРТ необходимо ограничить воздействие ударных волн, инициируемых промежуточным зарядом ВВ, на участок изолятора, расположенный на входе в ВРТ. Для этого требуется сместить промежуточный заряд ВВ по направлению к нагрузке на расстояние ≈ 40 мм.

ЛИТЕРАТУРА

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. V. 5, N 5. P. 2105–2111.
2. **Demidov V. A., Boriskin A. S., Kazakov S. A., et al.** Disk magneto-cumulative generator with explosive current opening switch // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. V. 38, N 8. P. 1768–1772.
3. **Selemir V. D., Demidov V. A., Plyashkevich L. N., et al.** High-current (30 MA and more) energy pulses for powering inductive and active loads // *Proc. of the 7th Intern. conf. on megagauss and megampere pulsed technology and applications, Sarov, 5–10 Aug. 1996. Sarov: VNIIEF, 1997.* P. 241–247.
4. **Champion A. R.** Effect of shock compression on electrical resistivity of three polymers // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43, N 5. P. 2216–2219.
5. **Янилкин Ю. В., Шанин А. А., Ковалев Н. П. и др.** Комплекс программ ЭГАК для расчетов двумерных течений многокомпонентной среды // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов.* 1993. Вып. 4. С. 69–75.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.