

# 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. Володченко, 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*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Представлены результаты испытания устройства на основе десятиэлементного дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ240 и взрывного размыкателя тока. При разрыве контура с током 18 МА в нагрузке 16 нГн, эквивалентной многопроволочной лайнерной сборке, получен ток 10 МА с характерным временем нарастания  $\sim 0,5$  мкс.

## Введение

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

В [2] приведены результаты первого эксперимента по исследованию возможности генерации коротких токовых импульсов с помощью 5-элементного дискового взрывомагнитного генератора с зарядами взрывчатого вещества (ВВ) диаметром 240 мм (ДВМГ240-5) и взрывного размыкателя тока (ВРТ). В нагрузке 6,8 нГн был получен импульс тока  $\sim 9$  МА с характерным временем фронта  $\sim 0,6$  мкс.

В докладе представлены результаты второго испытания подобного устройства. 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. Обсуждаются пути дальнейшего совершенствования взрывной системы импульсной мощности.

## Описание взрывной системы импульсной мощности

Объектом исследований являлось устройство на базе десятиэлементного дискового ВМГ с зарядами ВВ диаметром 240 мм и взрывного размыкателя тока диаметром 290 мм. Общий вид источника энергии с эквивалентной нагрузкой представлен на рис. 1.

Устройство включает в себя предусилитель – высокоиндуктивный спиральный ВМГ-240 (I) [3],

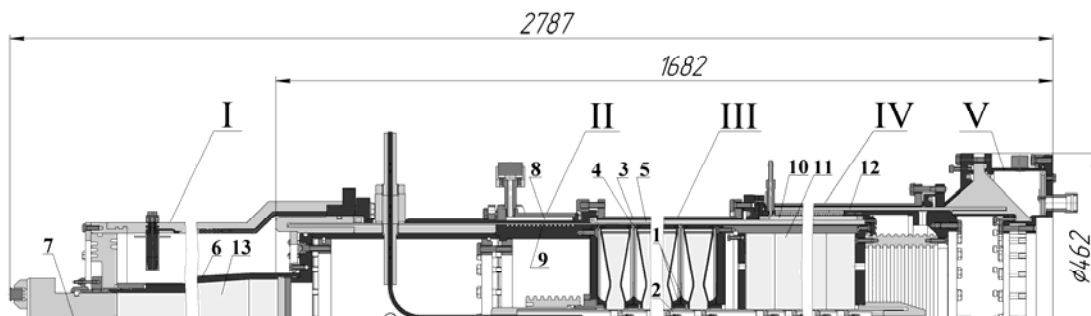


Рис. 1. Взрывной источник импульсной мощности. I – спиральный ВМГ; II – узел отключения предусилителя; III – дисковый ВМГ; IV – взрывной размыкатель тока; V – индуктивная нагрузка. 1 – конус; 2 – устройство инициирования; 3 – наружный корпус; 4, 5, 9, 12 – изоляторы; 6 – центральная труба; 7 – взрывная линия задержки; 8, 10, 11, 13 – заряды ВВ

узел отключения предусилителя (II), ДВМГ (III) с десятью профилированными дисковыми элементами и взрывной размыкатель тока (IV). Нагрузка устройства (V) эквивалентна по индуктивности многопроволочному лайнеру.

В ДВМГ дисковые элементы соединены между собой медными конусами 1. Инициирование дисковых зарядов ВВ на основе октогена производится устройством инициирования 2 с одновременностью  $\sim 0,1$  мкс. Оно содержит 10 торцевых электродетонаторов, соединенных электрически последовательно и расположенных вдоль оси устройства. При срабатывании ДВМГ сжимаемый магнитный поток вытесняется в нагрузку через зазор между дисковыми элементами и наружным корпусом 3 генератора, разделенными изолятором 4.

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

Внутренний диаметр спирали предусилителя составляет 240 мм с расширением на выходе до диаметра 290 мм. Длина спирали равна 800 мм, вся длина ВМГ  $\sim 1200$  мм. Центральная цилиндрически-коническая труба предусилителя 6 изготовлена из алюминия. Внутри трубы установлен цилиндрически-конический заряд ВВ 13. Инициирование заряда ВВ производится с торца ВМГ от взрывной линии задержки (ВЛЗ) 7. Интервал времени от подрыва ВЛЗ до замыкания электрического контура предусилителя составляет 44 мкс. Начальная индуктивность ВМГ равна 254 мкГн, активное сопротивление  $\sim 0,1$  Ом.

Расчетный интервал времени от замыкания электрического контура предусилителя до окончания вывода витков спирали составляет 116,3 мкс. Максимальное напряжение в компрессионной полости предусилителя при начальном магнитном потоке 1,7 Вб составляет  $\sim 35$  кВ. Электрическая прочность предусилителя обеспечивается пленочной изоляцией витков спирали и заполнением внутреннего объема газом  $SF_6$ .

Дисковый ВМГ и предусилитель имеют общий токовый контур. Отключение предусилителя производится в момент начала движения оболочек дисковых элементов. Для отключения предусилителя используется полый цилиндрический заряд ВВ 8, который разрушает изоля-

тор 9 передающей линии. Инициирование заряда ВВ узла отключения производится с помощью восьми электродетонаторов.

Разрушаемый проводник ВРТ выполнен из медной фольги толщиной 0,3 мм и длиной 360 мм, расположенной на диаметре 290 мм. Ребристая преграда ВРТ изготовлена из органического стекла с облицовкой ребер стальными кольцами. Разрывной заряда ВВ 10, изготовлен из пластического ВВ. Инициирование разрывного заряда производится под воздействием ударной волны от промежуточного заряда ВВ 11, проходящей через стальной корпус, медный токопровод и полиэтиленовый изолятор.

В качестве промежуточного заряда ВВ применяются диски из ВВ на основе октогена. Инициирование промежуточного заряда обеспечивается устройством осевого инициирования, содержащим электродетонаторы, соединенные электрически последовательно и расположенные вдоль оси устройства.

Изолятор 12 в передающей линии от ВРТ к нагрузке выполнен из полиэтилена высокой плотности. Электрическая прочность изолятора составляет не менее 150 кВ.

Собственная индуктивность ВРТ со стороны ДВМГ равна 8,5 нГн. Индуктивность контура нагрузки ВРТ определяется индуктивностью передающей линии с конусным изолятором (6,9 нГн), отделяющим в реальной конструкции вакуумную полость лайнерной камеры (8,8 нГн) от коаксиальной проводящей линии с твердотельным изолятором, идущим от ВРТ, и составляет 15,7 нГн.

### Взрывной эксперимент

Размещение сборки на испытательной площадке показано на рис. 2.

В эксперименте измерения производной тока в диапазоне  $10^9$ – $10^{13}$  А/с обеспечивались индукционными датчиками с различной чувствительностью. В предусилителе энергии устанавливались датчики Д1, в дисковом ВМГ – датчики Д2 и Д3, в нагрузке ВРТ – датчики Д4 и Д5. Для измерений тока в дисковом ВМГ и тока в нагрузке применялись также магнитооптические датчики (МО1 и МО2), работающие на основе эффекта Фарадея. Схема размещения датчиков в устройстве показана на рис. 3.

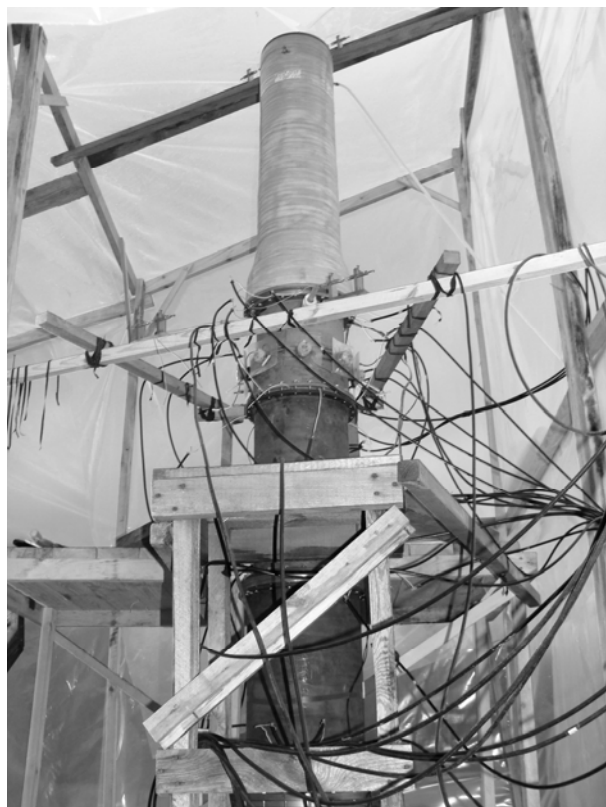


Рис. 2. Взрывное устройство на испытательной площадке

Регистрация сигналов производилась с помощью аналоговых осциллографов типа СУР и цифровых регистраторов типа *TDS*. Оптические датчики изготавливались из оптоволоконна типа *LB 600*. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер типа ЛПМ 655 СТ с длиной волны 0,655 мкм.

Осциллограммы производной тока и тока преусилителя, измеренные датчиками Д1 представлены на рис. 4 и рис. 5. Преусилитель энергии запитан током 6,8 кА, что соответствует магнитному потоку  $\sim 1,7$  Вб. К началу сжатия магнитного потока в ДВМГ по контуру протекал ток амплитудой 4,7 МА. Индуктивность контура составляла  $\sim 110$  нГн, в том числе – индуктивность невыведенной полости преусилителя 6,3 нГн, индуктивность передающей линии от преусилителя к ДВМГ 13,4 нГн, начальная индуктивность ДВМГ 76,1 нГн, индуктивность передающей линии от ДВМГ к ВРТ 6,8 нГн, а начальная индуктивность ВРТ 8,5 нГн. Характерное время нарастания тока в преусилителе равно  $\sim 15$  мкс. Энергия, запасенная преусилителем, составила  $\sim 1,2$  МДж. Коэффициент усиления энергии составляет  $\sim 210$ , коэффициент сохранения магнитного потока  $\sim 30\%$ . Максимальное значение производной тока в преусилителе составило  $\sim 2,7 \cdot 10^{11}$  А/с.

Сжатие магнитного потока в дисковом ВМГ началось в расчетный момент времени – через 5,6 мкс после поступления импульса тока на подрыв электродетонаторов. К началу срабатывания ВРТ в момент  $t = 437,7$  мкс (через 11,6 мкс после начала деформации полостей сжатия) индуктивность электрического контура ДВМГ составляла  $\sim 23$  нГн, а ток в контуре  $\sim 18$  МА.

Характерное время нарастания тока в ДВМГ равно  $\sim 3$  мкс, максимальное значение производной тока –  $4,4 \cdot 10^{12}$  А/с. Осциллограммы производной тока и тока в дисковом генераторе, измеренные датчиками Д2 и Д3, представлены на рис. 6 и рис. 7.

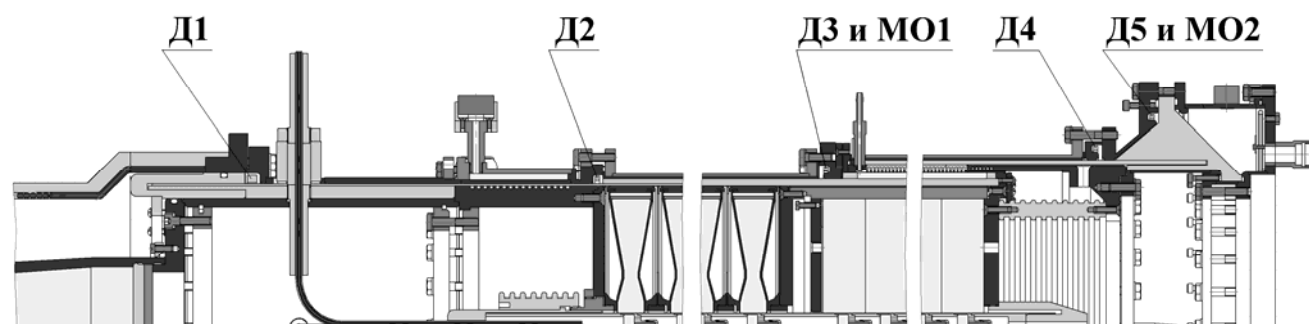


Рис. 3. Схема размещения измерительных датчиков. Д1–Д5 – индукционные датчики; МО1, МО2 – магнитооптические датчики

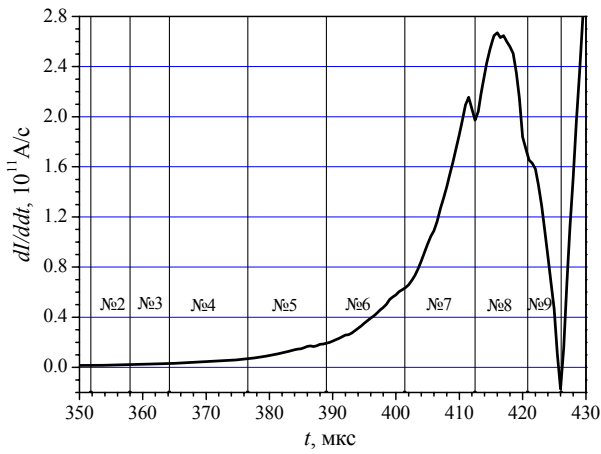


Рис. 4. Производная тока в предусилителе при выводе витков 2–9 секций спирали. Вертикальные линии – границы секций

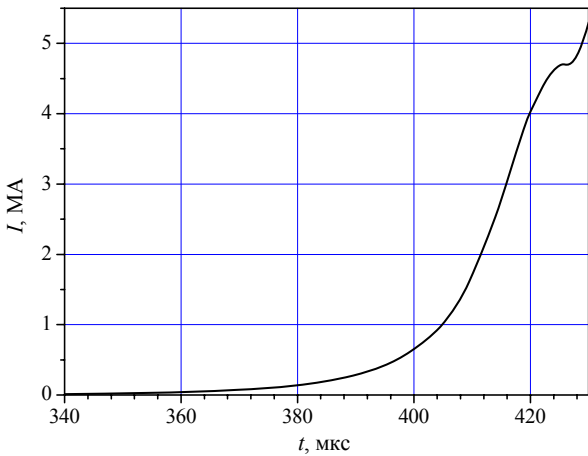


Рис. 5. Ток в контуре предусилителя энергии

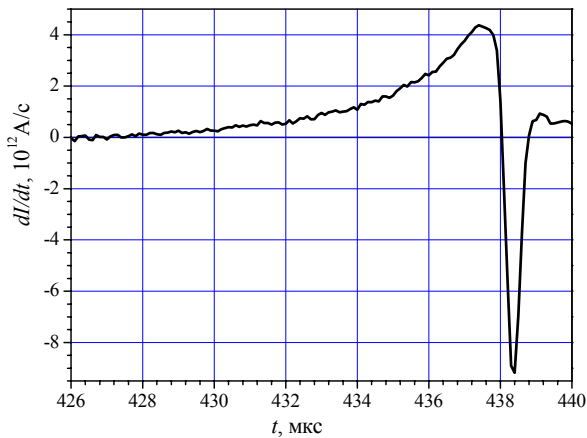


Рис. 6. Производная тока в ДВМГ

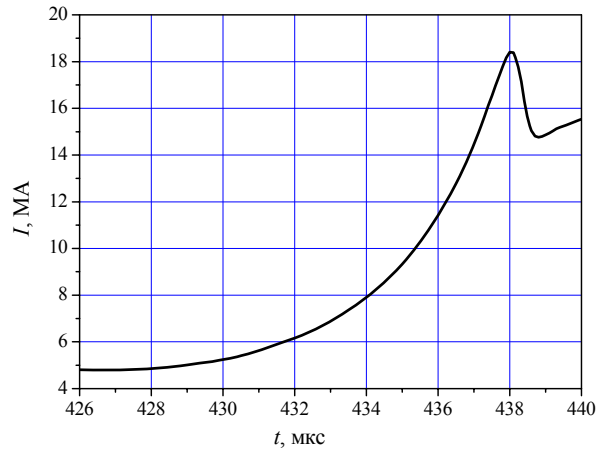


Рис. 7. Ток в контуре ДВМГ

На рис. 8 и рис. 9 приведены осциллограммы производной тока и тока в нагрузке, измеренные датчиками Д4, Д5 и МО. В нагрузке (15,7 нГн) сформирован импульс тока амплитудой  $\sim 10$  MA с полным временем нарастания 1,4 мкс. Характерное время нарастания тока между уровнями 0,1 и 0,9 от максимального значения составляет  $\sim 0,55$  мкс. Максимальная производная тока в нагрузке равна  $2 \cdot 10^{13}$  A/c, максимальное напряжение на разрушаемом проводнике ВРТ  $\sim 315$  кВ.

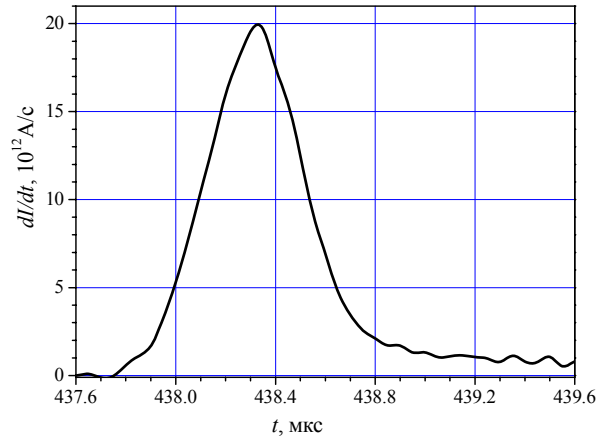


Рис. 8. Производная тока в нагрузке

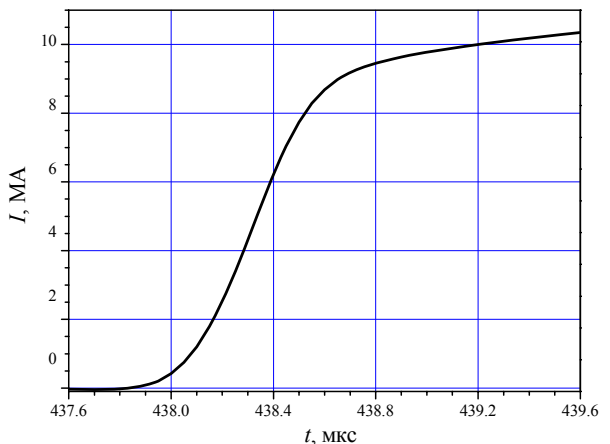


Рис. 9. Ток в нагрузке

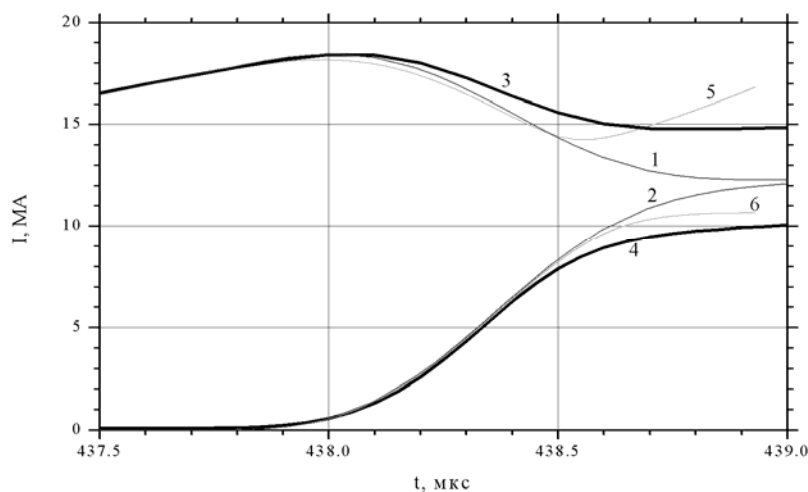


Рис. 10. Расчетные и экспериментальные значения тока ДВМГ и тока в нагрузке. 1, 2 – расчет соответственно для тока ДВМГ и тока в нагрузке без пробоя изолятора, 3, 4 – эксперимент, 5, 6 – расчет с учетом пробоя изолятора

На рис. 10 показаны расчетные для штатного режима работы и экспериментальные токи в контуре ДВМГ и в нагрузке  $\sim 16$  нГн. Отличие экспериментального тока от расчетного можно объяснить тем, что в процессе генерирования тока в нагрузке воздействие ударных волн от заряда внутри ВРТ на цилиндрический полиэтиленовый изолятор от ДВМГ приводит к его деформированию и частичному передавливанию тонкой стенки и, как следствие, к появлению проводимости и последующему пробую по толщине при напряжении  $\sim 200$  кВ в области входа ВРТ со стороны ДВМГ. Для данного случая на рис. 10 также приведены расчетные кривые (5, 6). Предполагалось, что со-

противление пробоя зависит от времени следующим образом: при  $t \leq t_p + \Delta t_b R_b(t) = R_{\max}$ ; при  $t > t_p + \Delta t_b R_b(t) = R_{\max} e^{-(t-(t_p+\Delta t_b))/\tau_b}$ , где  $R_{\max} = 100$  кОм,  $t_p = 437,7$  мкс,  $\Delta t_b = 0,4$  мкс,  $\tau_b = 0,03$  мкс.

На рис. 11 приведена зависимость сопротивления ВРТ от времени, полученная по экспериментальным данным (кривая 1). В расчете с учетом пробоя изолятора в ВРТ использовалась следующая зависимость сопротивления размыкателя от времени: при  $t \leq t_p R_p(t) = 0$ ; при  $t > t_p R_p(t) = A((t-t_p)/t_0)^2$ , где  $A = 75$  мОм,  $t_p = 437,7$  мкс,  $t_0 = 1$  мкс (кривая 2 на рис. 11).

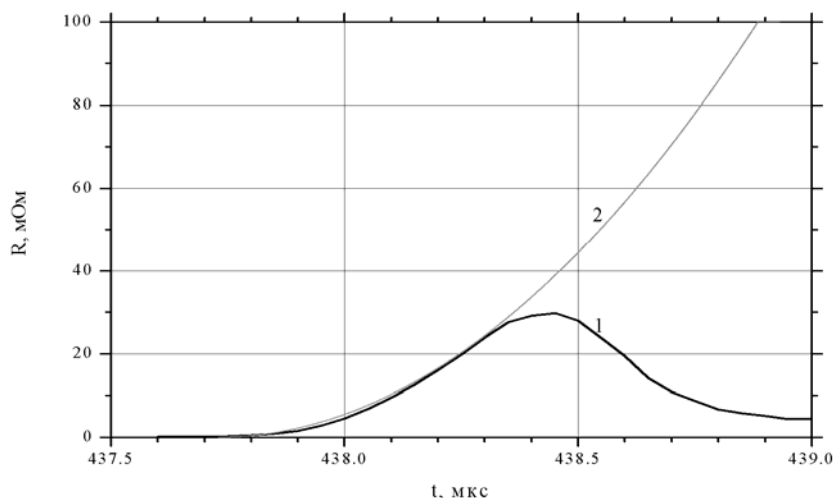
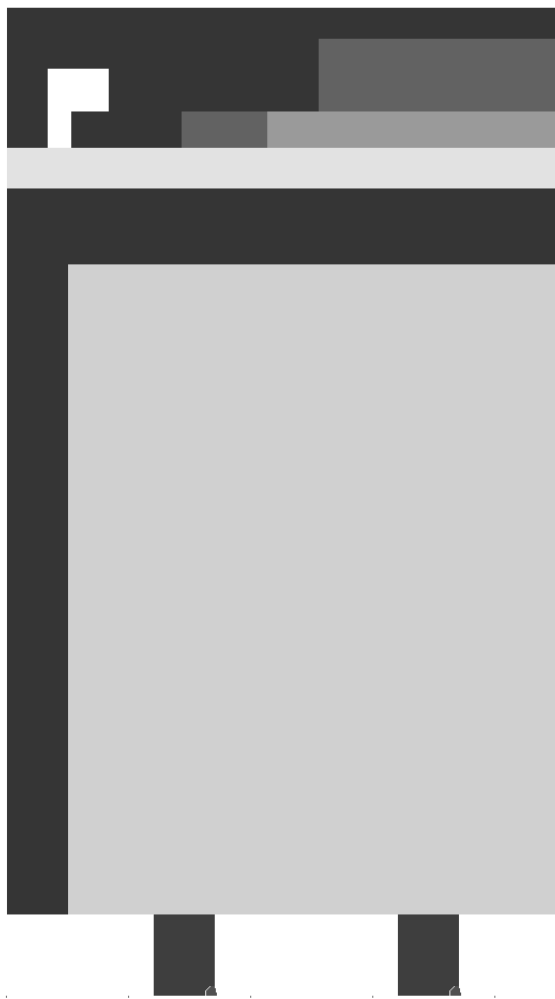


Рис. 11. Зависимость сопротивления ВРТ от времени. 1 – по экспериментальным данным, 2 – в расчете с учетом пробоя изолятора в ВРТ



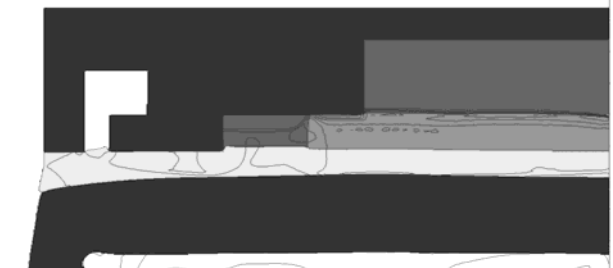
- - воздух
- - железо
- - ПД заряда 10
- - ПД заряда 11
- - изолятор
- - точки инициирования
- - оргстекло
- - заряд ВВ 10
- - заряд ВВ 11
- - заряд ВВ устройства инициирования
- — — - изолинии давления



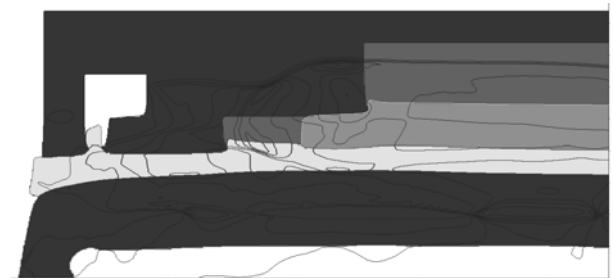
15,6 мкс. Выход ударной волны на внутреннюю поверхность изолятора



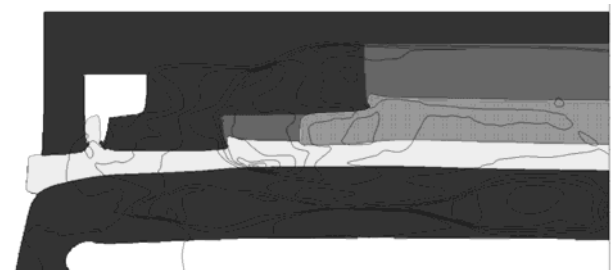
16,9 мкс. Выход ударной волны на наружную поверхность изолятора



17,8 мкс. Начало воздействия ПД на фольгу ВРТ

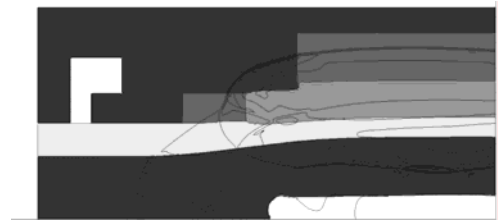


19,3 мкс. Через 1,5 мкс после начала воздействия ПД на фольгу. Появление тока в нагрузке

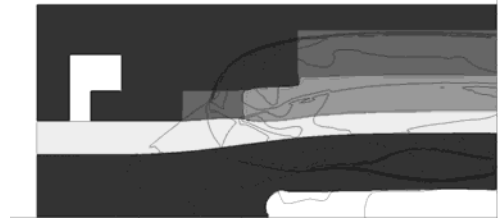


19,8 мкс. Через 2 мкс после начала воздействия ПД на фольгу. Максимум напряжения на ВРТ

Рис. 12. Результаты газодинамического расчета деформации цилиндрического изолятора продуктами детонации (ПД) в реальной конструкции



19,3 мкс. Через 1,5 мкс после начала воздействия ПД на фольгу. Появление тока в нагрузке



19,8 мкс. Через 2 мкс после начала воздействия ПД на фольгу. Максимум напряжения на ВРТ.

- - воздух
- - железо
- - ПД заряда 10
- - ПД заряда 11
- - изолятор
- - точки инициирования
- - оргстекло
- - заряд ВВ 10
- - заряд ВВ 11
- - заряд ВВ устройства инициирования
- — — - изолинии давления

Рис. 13. Результаты газодинамического расчета деформации цилиндрического изолятора продуктами детонации при смещении промежуточного заряда ВВ вправо на 40 мм

В работе [4] показано, что при воздействии давлением 300 кбар на полиэтилен плотностью  $0,92 \text{ г/см}^3$  удельное сопротивление его уменьшается до  $2 \cdot 10^3 \Omega\text{-см}$ , а для плотности  $0,96 \text{ г/см}^3$  удельное сопротивление его уменьшается до  $4,5 \cdot 10^4 \Omega\text{-см}$ . Тем самым их значения уменьшаются соответственно на 14–12 порядков. Как воздействует давление и происходит передавливание изолятора, расположенного на входе ВРТ, хорошо видно из приведенных на рис. 12 результатов газодинамического расчета по программе [5]. В расчете на момент максимума напряжения на ВРТ давление, воздействующее на изолятор в рассматриваемой зоне, составляет  $\sim 300$  кбар.

Время начала воздействия ударной волны на изолятор можно задержать и, тем самым, повысить его электропрочность, если сдвинуть вспомогательный заряд в сторону нагрузки на 40 мм. Результаты расчетов приведены на рис. 13.

## Заключение

Проведено испытание взрывного размыкателя тока с ребристой преградой при запитке его от десятиэлементного ДВМГ-240. 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  $\sim 23 \text{ нГн}$  зарегистрирован ток  $\sim 18 \text{ МА}$ . Характерное время нарастания тока в дисковом ВМГ составило  $\sim 3 \text{ мкс}$ , максимальная производная тока равна  $4,4 \cdot 10^{12} \text{ А/с}$ . Параметры импульса тока соответствуют уровню начальной запитки ДВМГ ( $I_0 = 4,7 \text{ МА}$ ).

Обеспечена работа взрывного размыкателя при линейной плотности тока через фольгу  $\sim 200 \text{ кА/см}$ . В контуре индуктивностью  $\sim 16 \text{ нГн}$ , включающем в себя эквивалент камеры с много-

проволочным 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. Максимальная производная тока в нагрузке равна  $2 \cdot 10^{13}$  А/с, максимальное напряжение – 315 кВ.

Некоторое отличие экспериментального тока в нагрузке от расчетного возможно связано с электрическим пробоем изолятора от ДВМГ к ВРТ в процессе коммутации энергии. Для повышения эффективности работы ВРТ необходимо ограничить воздействие ударных волн от промежуточного заряда ВВ на ту часть изолятора, которая расположена непосредственно перед ВРТ. Для этого требуется сдвинуть промежуточный заряд ВВ в сторону нагрузки на ~40 мм.

### Список литературы

1. Spielman R. B., Deeney C., Chandler G. A., Douglas M. R., Fehl D. L., Matzen M. K., McDaniel D. H., Nash T. J., Porter J. L., Sanford T. W. L., Seamen J. F., Stygar W. A., Struve K. W., Breeze S. P., McGurn J. S., Torres J. A., Zagar D. M., Gilliland T. L., Jobe D. O., McKenney J. L., Mock R. C., Vargas M., Wagoner T., and Peterson D. L. Tungsten wire-array

Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ // *Phys. Plasmas*. 1998. Vol.5, No 5. P. 2105–2111.

2. Demidov V. A., Boriskin A. S., Kazakov S. A., Shapovalov E. V., Romanov A. P., Yanenko V. A., Lashmanov Y. N., Vlasov Y. V., Golosov S. N., Kutumov S. V., Schetnikov E. I., Kazakova N. R., Pavlov S.E., Agapov A. A., Sevastyanov A. S. Disk Magneto-Cumulative generator with explosive current opening switch // *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*. 2010. V. 38, No 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 // In: *Megagauss and megampere pulsed technology and applications* / Ed. by V. K. Chernyshev, V. D. Selemir, and L. N. Plyashkevich. Sarov: VNIIEF. 1997. P. 241–247.

4. Champion A. R. Effect of shock compression on electrical resistivity of three polymers // *J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 43. No 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 // *ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов*. 1993. Вып. 4, С. 69–75.