

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОММУТАЦИИ ТОКА ВЗРЫВНЫМИ РАЗМЫКАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Ю. В. Власов

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

Для магнитогиродинамического моделирования процесса коммутации мегаамперного тока взрывным размыкателем использовалась двумерная эйлерова методика МЭГ-2D. Представлено сравнение результатов моделирования коммутации тока спирального ВМГ взрывными размыкателями различных типов при одинаковых параметрах схемы коммутации, толщине разрываемого проводника из медной фольги, разрываемом токе и количестве элементов размыкателя. Приведены также результаты моделирования коммутации тока взрывным размыкателем с ребристой преградой при различной толщине разрываемого проводника из медной фольги. Предполагалось, что ребристая преграда со стальными вставками на ребрах имеет параметры, оптимизированные для фольги толщиной 0,3 мм. Показано, что при толщине фольги менее 0,2 мм можно уменьшить глубину паза преграды без ухудшения быстродействия размыкателя. Осуществление эффективного разрыва контура при толщине фольги более 0,4 мм потребует увеличения ширины и глубины паза преграды, а также, возможно, толщины заряда взрывчатого вещества.

## Введение

Для сокращения времени нарастания тока в нагрузках в устройствах на основе взрывомагнитных генераторов (ВМГ) [1] применяются взрывные размыкатели тока (ВРТ) [2–8], действие которых основано на механическом разрушении токоведущего проводника продуктами детонации (ПД) заряда взрывчатого вещества (ВВ). Используются несколько типов взрывных размыкателей: с ребристой преградой [3], с кумулятивными диэлектрическими струями [2], вихревые [4, 5], с проволочным соленоидом [6, 7].

В докладе представлено сравнение результатов численного моделирования коммутации тока спирального ВМГ взрывными размыкателями различных типов при одинаковых параметрах схемы коммутации, диаметре расположения и толщине разрываемого проводника из медной фольги, разрываемом токе и количестве элементов размыкателя. Приведены также результаты моделирования коммутации тока взрывным размыкателем с ребристой преградой при различной толщине разрываемого проводника из медной фольги. Численное моделирование проводилось в магнитогиродинамическом (МГД) приближении с использованием двумерной эйлеровой методики «МЭГ-2D» [8].

## Постановка задачи

Для численного моделирования выбрано устройство на основе спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-100 и взрывного размыкателя с ребристой преградой [3] (рис. 1). Внутренний диаметр спирали равен 100 мм, длина – 500 мм. Разрушаемый проводник – медная фольга толщиной 0,3 мм, представляет собой цилиндр диаметром 100 мм и длиной 90 мм. В расчетах предполагалось, что производится разрыв контура ВМГ-100 с током ~6 МА. Индуктивность разрываемого контура – 30 нГн, индуктивность нагрузки – 10 нГн.

Коммутация импульса тока ВМГ в нагрузку осуществляется по схеме, изображенной на рис. 2. При  $t < t_k$  ключ К разомкнут – происходит накопление энергии в контуре ВМГ, при  $t > t_k$  ключ К замкнут – происходит коммутация тока ВМГ в нагрузку. Нагрузка подключалась при разрушении изолятора между фольгой 7 и фланцем ключа 12 под действием продуктов детонации заряда ВВ 8 (см. рис. 1). При разрушении проводника под действием продуктов детонации заряда ВВ увеличивается сопротивление ВРТ и ток генератора начинает течь в контур нагрузки.

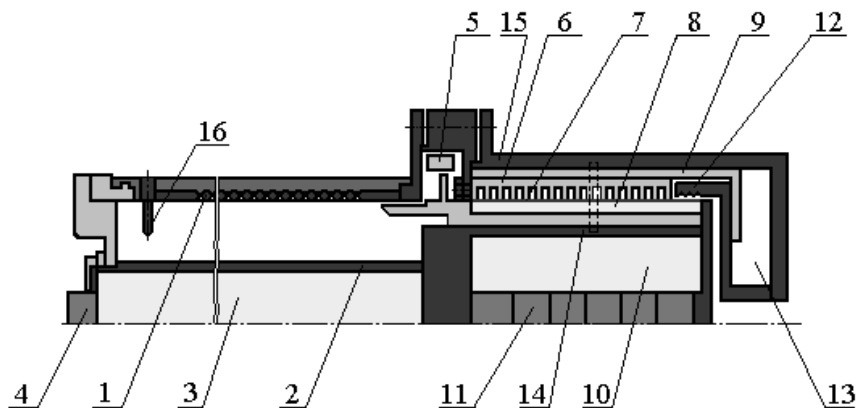


Рис. 1. Эскиз спирального ВМГ с взрывным размыкателем. 1 – спираль, 2 – центральная труба, 3 – заряд ВВ, 4 – электродетонатор (ЭД), 5 – измерительный датчик, 6 – ребристая преграда с металлическими вставками на ребрах, 7 – фольга, 8 – заряд ВВ, 9 – изолятор, 10 – заряд ВВ, 11 – ЭД, 12 – замыкающий ключ, 13 – нагрузка, 14 – металлический цилиндр (прямой токопровод), 15 – корпус нагрузки (обратный токопровод), 16 – замыкающий ключ (кrouбар) для шунтирования источника начального тока. Пунктиром выделен элемент размыкателя, являющийся расчетной областью для МГД расчета

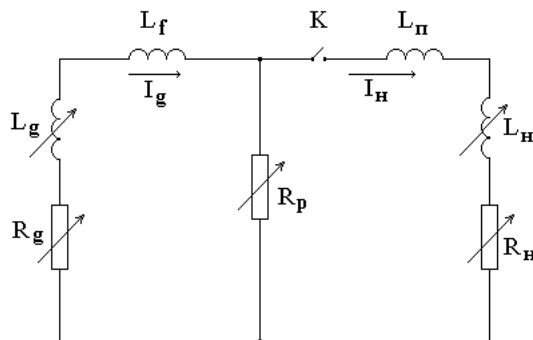


Рис. 2. Схема коммутации тока ВМГ с помощью ВРТ.  $L_g$ ,  $R_g$  – индуктивность и сопротивление ВМГ,  $L_f$  – индуктивность полости под фольгой ВРТ,  $R_p$  – сопротивление ВРТ,  $K$  – замыкающий ключ,  $L_{\Pi}$  – суммарная индуктивность полости над фольгой ВРТ и передающей линии до входа в нагрузку,  $L_H$ ,  $R_H$  – индуктивность и сопротивление нагрузки,  $I_g$ ,  $I_H$  – ток ВМГ и ток в нагрузке

ВРТ представляет собой периодическую структуру, состоящую из повторяющихся элементов. Элемент размыкателя является расчетной областью для МГД расчета, а схема коммутации – граничным условием. Эскизы элементов размыкателей различных типов приведены на рис. 3. Габаритные размеры расчетной области всех элементов одинаковы и соответствуют размерам элемента размыкателя с ребристой преградой в экспериментах [3]. Масса ВВ примерно одинакова для всех размыкателей. Массы обтекаемых элементов и вставок в преградах также примерно одинаковы. В расчетах предполагалось, что ток протекает только по фольге размыкателя. Состояние фольги описывалось комплексом «уравнение состояния – проводимость» из [9].

В процессе расчета определялись пространственные распределения физических величин, а также зависимости от времени токов ВМГ и в нагрузке, напряжения на размыкателе и сопротивления размыкателя. Сравнение размыкателей друг с другом производилось по величине времени нарастания тока в нагрузке от 0,1 до 0,9 его максимального значения и по характеру изменения сопротивления размыкателя со временем.

Для вихревого размыкателя с пазами в заряде ВВ (см. рис. 3в) распределение параметров продуктов детонации к моменту начала воздействия на фольгу вычислялось с использованием принципа Гюйгенса и основанной на нем лучевой модели детонации [10]. В процессе счета в ячейки, до которых на текущем шаге по времени дошел фронт

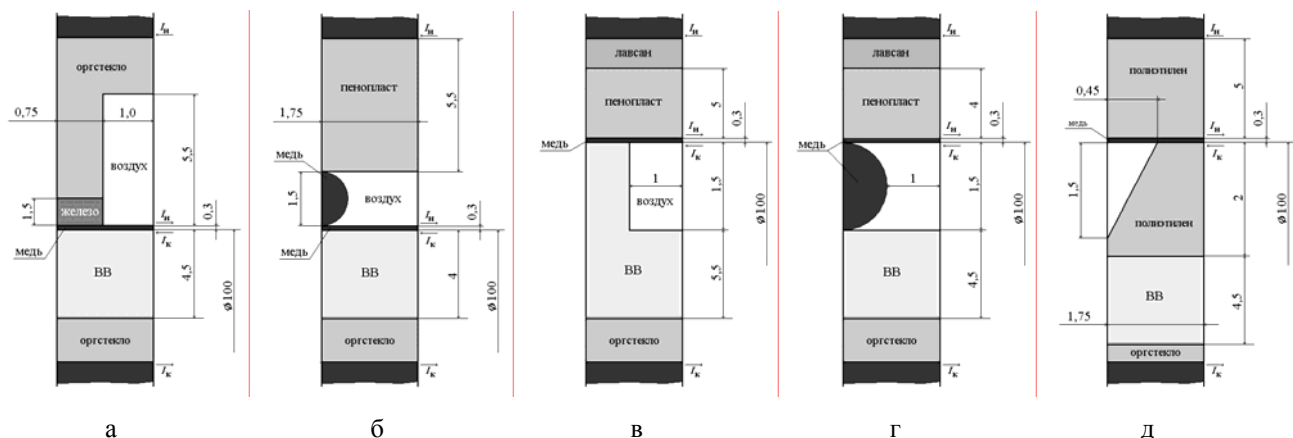


Рис. 3. Эскизы элементов взрывных размыкателей различных типов: а) классический [3], б) с проволочным соленоидом [7], в) вихревой с пазами в заряде ВВ [4], г) вихревой с обтекаемыми элементами [5], д) с кумулятивными диэлектрическими струями [2]

детонации, мгновенно вкладывается известная энергия. Расчет дальнейшего разлета продуктов детонации проводится в соответствии с уравнениями газодинамики.

### Результаты расчетов

Динамика разрушения фольги в размыкателе с комбинированной ребристой преградой представлена на рис. 4, в размыкателе с проволочным соленоидом – на рис. 5, в вихревом размыкателе с пазами в заряде ВВ – на рис. 6, в вихревом с обтекаемыми элементами – на рис. 7, с кумулятивными диэлектрическими струями – на рис. 8. На рис. 9 представлены расчетные зависимости сопротивления от времени для рассмотренных раз-

мыкателей. Как видно из рисунков, рост сопротивления всех рассмотренных типов взрывных размыкателей осуществляется вследствие растяжения и последующего электровзрыва утонченных участков фольги. Длина участков, подвергающихся электровзрыву, и момент его начала, а также расположение, размер, скорость разлета и проводимость образующегося облака продуктов электровзрыва различны у разных типов размыкателей. Это приводит к тому, что и характер изменения сопротивления различен у различных типов размыкателей (см. рис. 9). Тем не менее, время нарастания тока в нагрузке различается незначительно – у всех размыкателей, кроме вихревого с пазами в заряде ВВ оно  $\sim 0,7$  мкс, у вихревого с пазами в заряде ВВ –  $\sim 1$  мкс.

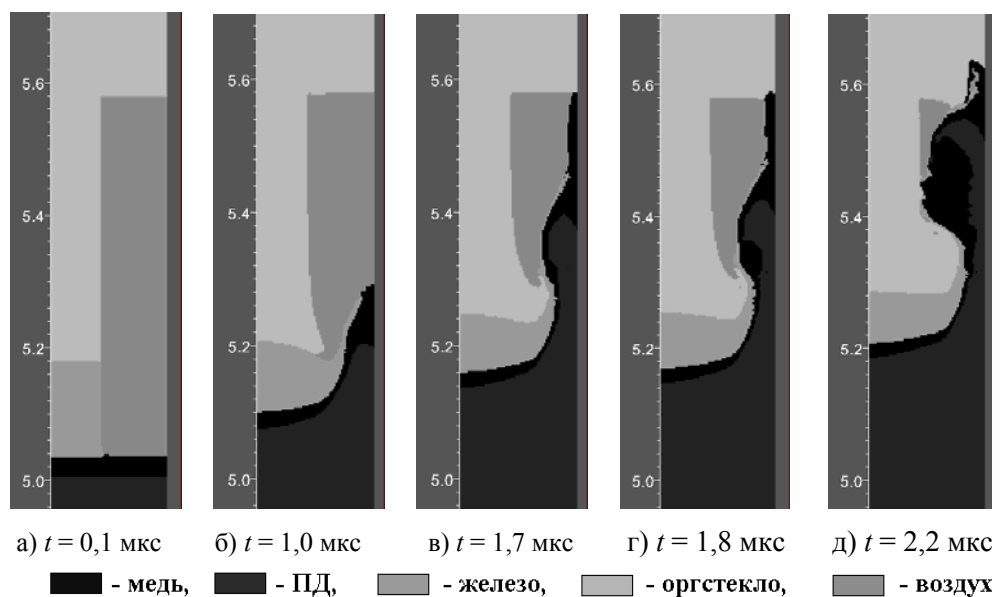


Рис. 4. Динамика разрушения фольги в размыкателе с комбинированной преградой: а) через 0,1 мкс после начала воздействия ПД на фольгу, б) окончание плавления наиболее тонкого участка, в) начало разлета продуктов электровзрыва фольги, г) максимум напряжения на размыкателе, д) ток в нагрузке равен 0,9 от максимального

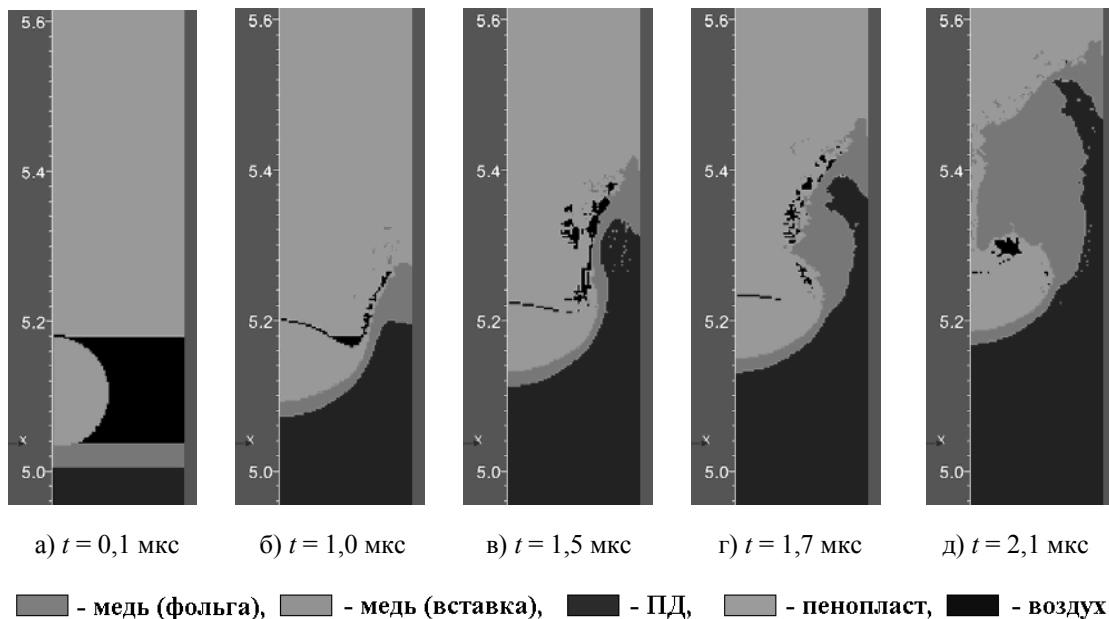


Рис. 5. Динамика разрушения фольги в размыкателе с проволочным соленоидом: а) через 0,1 мкс после начала воздействия ПД на фольгу, б) окончание плавления наиболее тонкого участка, в) начало разлета продуктов электровзрыва фольги, г) максимум напряжения на размыкателе, д) ток в нагрузке равен 0,9 от максимального

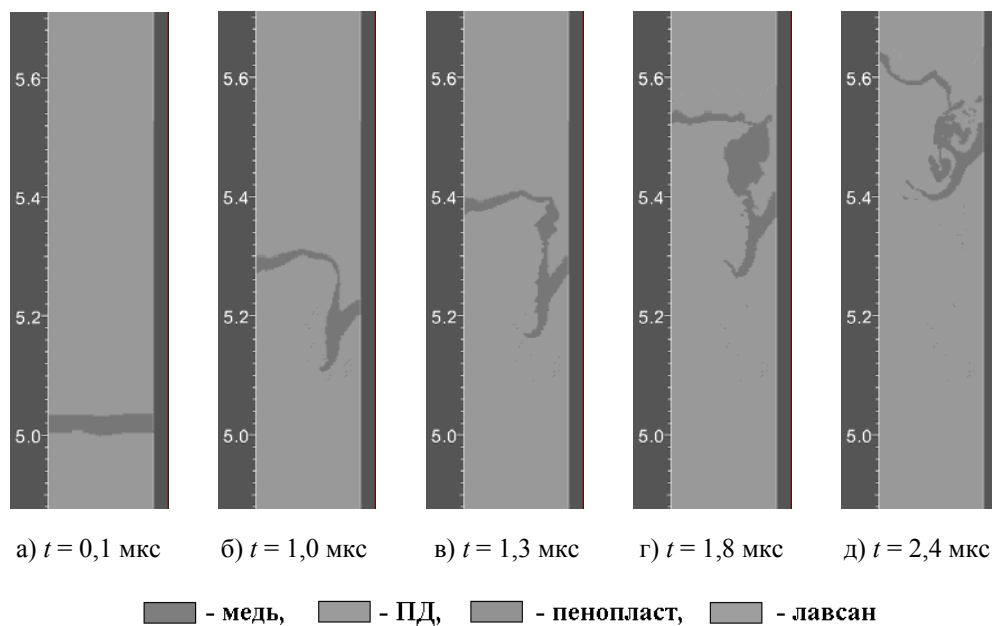


Рис. 6. Динамика разрушения фольги в вихревом размыкателе с пазами в заряде ВВ: а) через 0,1 мкс после начала воздействия ПД на фольгу, б) окончание плавления наиболее тонкого участка, в) через 0,1 мкс после начала разлета продуктов электровзрыва фольги: максимум напряжения на размыкателе, г) облако продуктов электровзрыва достигает максимального объема, затем начинает уменьшаться, д) ток в нагрузке равен 0,9 от максимального

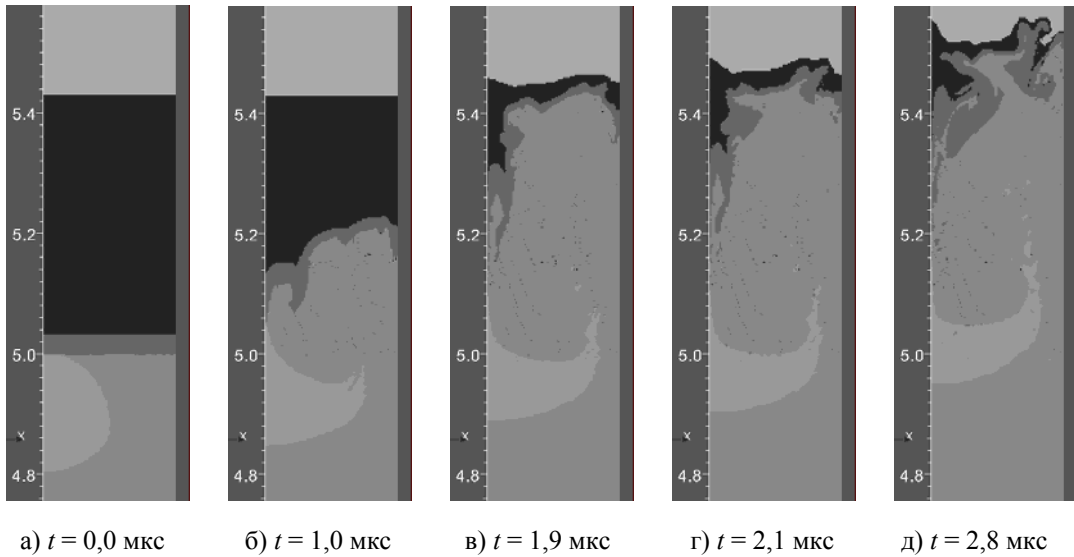


Рис. 7. Динамика разрушения фольги в вихревом размыкателе с обтекаемыми элементами: а) начало воздействия ПД на фольгу (через 0,3 мкс после начала расчета), б) начало плавления фольги, в) начало разлета продуктов электровзрыва фольги, г) начало разлета второго участка, максимум напряжения на размыкателе, д) ток в нагрузке равен 0,9 от максимального

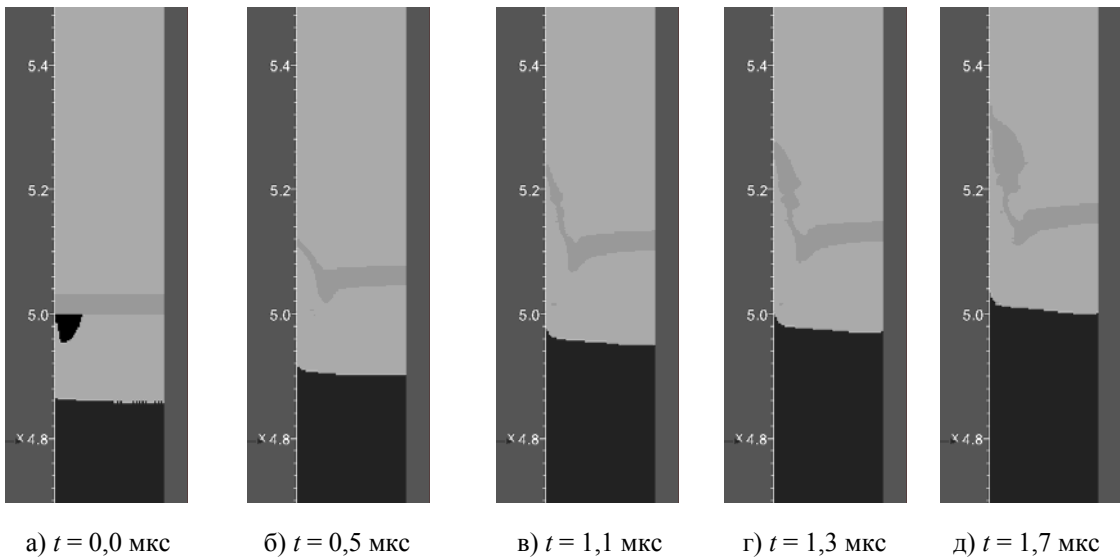


Рис. 8. Динамика разрушения фольги в размыкателе с кумулятивными диэлектрическими струями: а) начало воздействия кумулятивной струи на фольгу (через 0,3 мкс после начала расчета), б) окончание плавления наиболее тонкого участка, в) начало разлета продуктов электровзрыва фольги, г) максимум напряжения на размыкателе, д) ток в нагрузке равен 0,8 от максимального

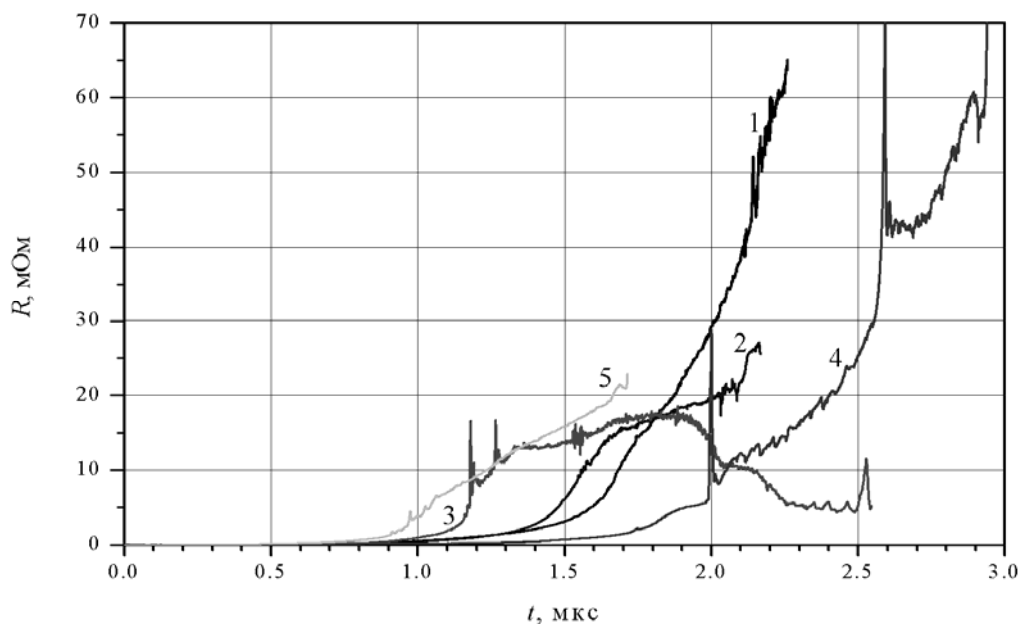


Рис. 9. Зависимость сопротивления от времени для взрывных размыкателей различных типов. 1 – с комбинированной преградой, 2 – с проволочным соленоидом, 3 – вихревой с пазами в заряде ВВ, 4 – вихревой с обтекаемыми элементами, 5 – с кумулятивными диэлектрическими струями. Время – от начала воздействия на фольгу

Как видно из рис. 9, наиболее быстрое разрушение фольги на начальной стадии происходит кумулятивной диэлектрической струей, однако длина разрушаемого участка невелика и рост сопротивления в дальнейшем замедляется. В размыкателях с ребристой преградой и с проволочным соленоидом на начальной стадии сопротивление растет медленнее, но разлет продуктов электровзрыва фольги происходит более интенсивно, что приводит к более быстрому росту сопротивления. При этом, в размыкателе с проволочным соленоидом наибольшее влияние на величину сопротивления на конечной стадии оказывает увеличение размеров облака продуктов электровзрыва, а не спад проводимости в нем. Поэтому скорость роста сопротивления в этом размыкателе снижается на конечной стадии. В вихревом размыкателе с пазами в заряде ВВ на начальной стадии наблюдается быстрый рост сопротивления, однако в дальнейшем, достигнув максимума, оно снижается из-за уменьшения объема облака продуктов электровзрыва фольги и роста проводимости в нем. Сжатие облака происходит разлетающимися ПД с одной стороны, и отраженной от правой плоскости симметрии ударной волной – с другой. Наиболее медленный рост сопротивления на начальной стадии наблюдается у вихревого размыкателя с обтекаемыми элементами, однако на конечной стадии

рост сопротивления происходит достаточно быстро из-за формирования двух участков, в которых происходит электровзрыв фольги.

### Варьирование толщины фольги

В расчетах предполагалось, что производится разрыв контура ВМГ-100 с током ~6 МА размыкателем с комбинированной преградой. Параметры преграды представлены на рис. 3а. Толщина медной фольги ВРТ варьировалась в пределах от 0,1 мм до 0,5 мм. Расчеты (рис. 10) показали, что с ростом толщины фольги характерное время нарастания тока в нагрузке растет сначала медленно, а, начиная с некоторой толщины фольги, резко возрастает. Аналогичное поведение зависимости характерного времени нарастания тока от толщины фольги наблюдалось в экспериментах с вихревым размыкателем [4].

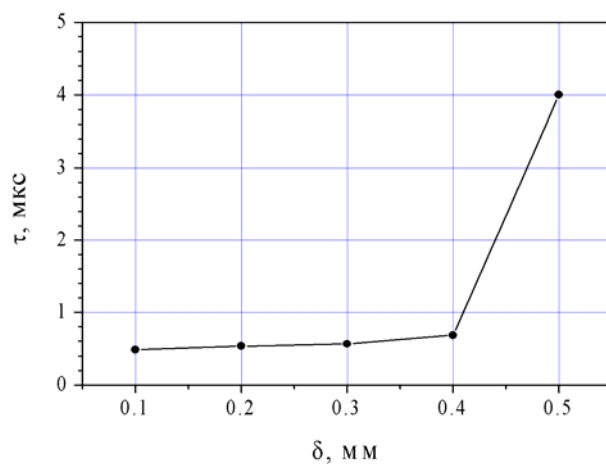
Согласно результатам расчетов, при толщине фольги ВРТ менее 0,2 мм можно уменьшить глубину паза преграды (примерно до 4 мм для фольги толщиной 0,1 мм) без ухудшения быстродействия размыкателя. Осуществление эффективного разрыва контура размыкателем с ребристой преградой при толщине фольги ВРТ более 0,4 мм потребует увеличения ширины и глубины паза преграды, а также, возможно, толщины заряда ВВ.



а)

б)

в)



г)

■ - медь, ■ - продукты детонации, ■ - железо, ■ - оргстекло, ■ - воздух

Рис. 10. Расположение границ компонентов расчетной области в момент  $t$  начала электровзрыва утонченных участков фольги. а) толщина фольги  $\delta = 0,1$  мм;  $t = 0,5$  мкс, б)  $\delta = 0,3$  мм;  $t = 1,6$  мкс, в)  $\delta = 0,5$  мм; электровзрыва утонченных участков фольги не наблюдается; г) зависимость времени  $\tau$  нарастания тока в нагрузке от толщины фольги  $\delta$  размыкателя с комбинированной преградой

### Заключение

В рамках рассмотренной МГД модели предполагалось, что ток протекает только по фольге размыкателя, состояние отдельных участков которой изменяется в процессе коммутации от твердого до плазменного. Расчеты проводились при одинаковых параметрах схемы коммутации, диаметре расположения и толщине разрываемого проводника из медной фольги, разрываемом токе и количестве элементов размыкателя. Расчеты показали, что длина участков фольги, подвергающихся электровзрыву, и момент его начала, а также расположение, размер, скорость разлета и проводимость образующегося облака продуктов электровзрыва различны у разных типов размыкателей. Это приводит к тому, что характер изменения сопротивления различен у различных типов размыкателей. Тем не менее, время нарастания тока в нагрузке различается незначительно – у всех размыкателей, кроме вихревого с пазами в заряде ВВ оно  $\sim 0,7$  мкс, у вихревого с пазами в заряде ВВ –  $\sim 1$  мкс.

Согласно результатам расчетов, при толщине фольги ВРТ менее 0,2 мм можно уменьшить глубину паза преграды (примерно до 4 мм для фольги толщиной 0,1 мм) без ухудшения быстродействия размыкателя. Осуществление эффективного разрыва контура размыкателем с ребристой преградой при толщине фольги ВРТ более 0,4 мм потре-

бует увеличения ширины и глубины паза преграды, а также, возможно, толщины заряда ВВ.

### Список литературы

1. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах. Том 1 / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2011. С. 439.
2. Дудай П. В., Иванов В. А. и др. Основные типы взрывных размыкателей тока и их коммутационные характеристики // Сборник докладов XII Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, 13–18 июля 2008 г., Новосибирск, Россия. С. 384–395.
3. 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 / Ed. by I. R. Smith and B.M. Novac. London. 2007. P. 199–203.
4. Demidov V. A., Meshkov E. E., Vlasov Yu. V. et al. Study of a vortex current opening switch // Megagauss-9 / Ed. by V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. Sarov: VNIIEF, 2004. P. 316–323.
5. Власов Ю. В., Демидов В. А., Казаков С. А., Мешков Е. Е., Яненко В. А. Обострение импульса тока спирального ВМГ с помощью вихревого размыкателя // Сборник докладов XII Международ-

ной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам, 13–18 июля 2008 г., Новосибирск, Россия. С. 378–383.

6. Патент 2438206 RU МПК НО1Н 39/00. Взрывной размыкатель тока / В. А. Демидов, С. А. Казаков // БИ. 2011. № 36.

7. Демидов В. А., Казаков С. А., Борискин А. С., Агапов А. А., Власов Ю. В., Голосов С. Н., Шаповалов Е. В., Щетников Е. И., Павлов С. Е., Николаев Н. И. Размыкание мегаамперных токов взрывным размыкателем с преградой в виде проволочного соленоида // Мощная импульсная электрофизика. Международная конференция XIV Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С. 208–212.

8. Егоров Н. В., Барабанов В. Н., Власов Ю. В. Двумерная эйлерова методика «МЭГ-2D» и ее применение для расчета взрывного размыкателя тока // Мощная импульсная электрофизика. Международная конференция XIV Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С. 51–56.

9. Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В. Магнитогидродинамический расчёт взрывающихся проводников // ЖТФ, Т. 46, вып. 9. 1976. С.1963–1969.

10. Бахрах С. М., Воронина Е. Б., Устинова Е. В., Шавердов С. А. Алгоритм расчета распространения фронта послонного горения, основанный на принципе Гюйгенса // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. 1998, вып. 1. С. 59–65.