

УДК 534.222.2:621.3

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОММУТАЦИИ ТОКА ВЗРЫВНЫМИ РАЗМЫКАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Ю. В. Власов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия
E-mail: YVVlasov@vniief.ru

С использованием методики МЭГ-2D проведено магнитогидродинамическое моделирование процесса коммутации мегаамперного тока взрывным размыкателем. Представлены результаты моделирования коммутации тока спирального ВМГ взрывными размыкателями различного типа при одних и тех же параметрах схемы коммутации, толщине разрушаемого проводника из медной фольги, прерываемом токе и количестве элементов размыкателя. Приведены результаты моделирования процесса коммутации тока взрывным размыкателем с ребристой преградой при различных значениях толщины разрушаемого проводника из медной фольги. Исследовалась ребристая преграда со стальными вставками на ребрах с оптимальными параметрами в случае использования фольги толщиной 0,3 мм. Показано, что при толщине фольги менее 0,2 мм можно уменьшить глубину паза в преграде, при этом время срабатывания размыкателя не увеличивается.

Ключевые слова: взрывомагнитный генератор, взрывной размыкатель тока, магнитогидродинамическое моделирование, ребристая преграда, характерное время нарастания тока.

Введение. Для уменьшения времени нарастания тока в нагрузках устройств на основе взрывомагнитных генераторов (ВМГ) [1] применяются взрывные размыкатели тока (ВРТ) [2–8], принцип действия которых основан 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 данной работе проведено сравнение результатов численного моделирования коммутации тока спирального ВМГ взрывными размыкателями различного типа при одних и тех же параметрах схемы коммутации, толщине разрушаемого проводника из медной фольги, прерываемом токе и количестве элементов размыкателя. Приведены также результаты моделирования процесса коммутации тока взрывным размыкателем с ребристой преградой при различных значениях толщины разрушаемого проводника из медной фольги. Численное моделирование проводилось в магнитогидродинамическом (МГД) приближении с использованием методики МЭГ-2D [8].

Численное моделирование. Проведено численное моделирование устройства на основе спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-100 и взрывного размыкателя с ребристой преградой [3] (рис. 1). Внутренний диаметр спирали равен 100 мм, длина —

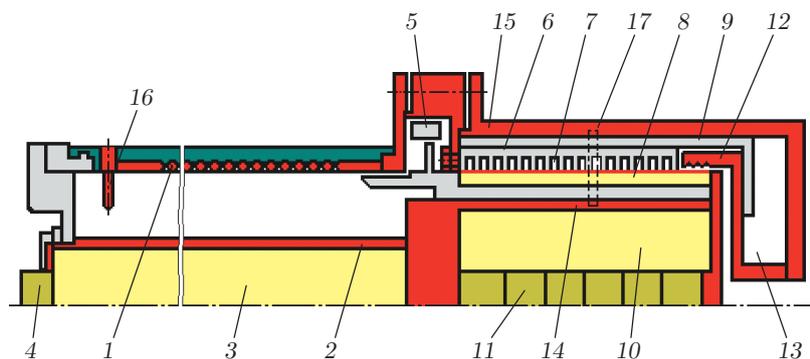


Рис. 1. Схема спирального ВМГ с взрывным размыкателем:

1 — спираль, 2 — центральная труба, 3, 8, 10 — заряды ВВ, 4, 11 — электродетонаторы, 5 — измерительный датчик, 6 — ребристая преграда с металлическими вставками на ребрах, 7 — фольга, 9 — изолятор, 12 — замыкающий ключ, 13 — нагрузка, 14 — металлический цилиндр (прямой токопровод), 15 — корпус нагрузки (обратный токопровод), 16 — замыкающий ключ (кроубар) для шунтирования источника начального тока; 17 — расчетная область

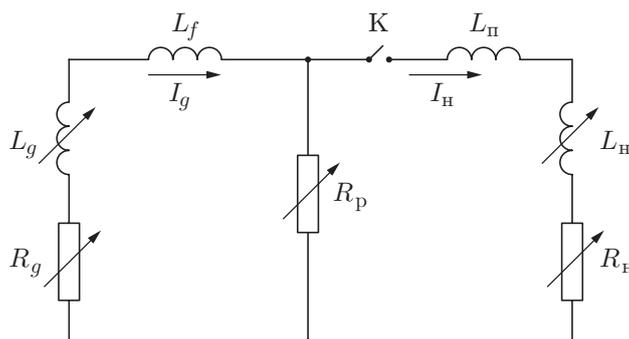


Рис. 2. Схема коммутации тока ВМГ с помощью ВРТ:

L_g, R_g — индуктивность и сопротивление ВМГ, L_f — индуктивность полости под фольгой ВРТ, R_p — сопротивление ВРТ, К — замыкающий ключ, L_n — суммарная индуктивность полости над фольгой ВРТ и передающей линии на участке перед входом в нагрузку, L_n, R_n — индуктивность и сопротивление нагрузки, I_g, I_n — ток ВМГ и ток в нагрузке

500 мм. Разрушаемый проводник — медная фольга толщиной 0,3 мм — представляет собой цилиндр диаметром 100 мм и длиной 90 мм. При моделировании предполагалось, что осуществляется разрыв контура ВМГ-100 с током ≈ 6 МА.

Коммутация импульса тока ВМГ в нагрузку осуществляется по схеме, представленной на рис. 2. При $t < t_n$ (t_n — момент подключения нагрузки) ключ К разомкнут: происходит накопление энергии в контуре ВМГ, при $t > t_n$ ключ К замкнут: происходит коммутация тока ВМГ в нагрузку. Нагрузка подключалась при разрушении изолятора между фольгой 7 и фланцем ключа 12 под действием ПД заряда ВВ 8 (см. рис. 1). При разрушении проводника под действием ПД заряда ВВ сопротивление ВРТ увеличивается и ток генератора течет в контур нагрузки. В момент начала разрыва индуктивность контура ВМГ равна $L_g(t_n) + L_f = 35$ нГн, индуктивность контура нагрузки $L_n + L_n = 10$ нГн. Считалось, что в процессе коммутации тока индуктивность ВМГ уменьшается со скоростью 5 нГн/мкс, а сопротивления R_g и R_n равны нулю.

ВРТ представляет собой периодическую систему, состоящую из повторяющихся элементов. Расчетной областью является элемент размыкателя (см. рис. 1). Граничные усло-

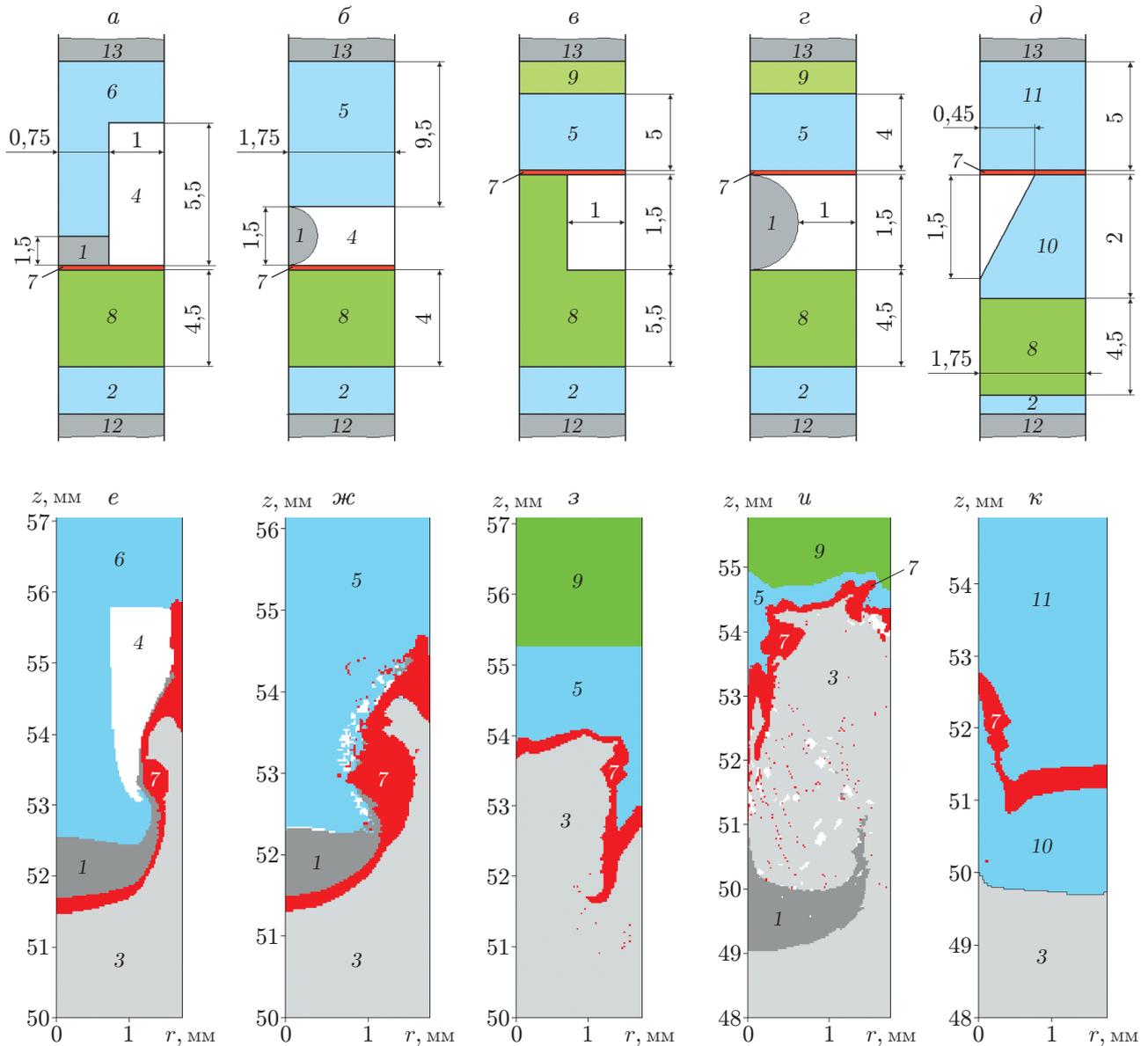


Рис. 3. Схемы элементов взрывных размыкателей различного типа (а-д) и распределение материалов в расчетной области в момент t_m достижения максимума напряжения на размыкателе (е-к):

а, е — ВРТ с ребристой преградой [3], $t_m = 1,8$ мкс, б, ж — ВРТ с проволочным соленоидом [7], $t_m = 1,7$ мкс, в, з — вихревой ВРТ с пазами в заряде ВВ [4], $t_m = 1,3$ мкс, г, у — вихревой ВРТ с обтекаемыми элементами [5], $t_m = 2,1$ мкс, д, к — ВРТ с кумулятивными диэлектрическими струями [2], $t_m = 1,3$ мкс; 1 — металлические вставки, 2, 9 — изоляторы, 3 — ПД, 4 — воздух, 5 — пенопласт, 6 — ребристая преграда с металлическими вставками, 7 — фольга, 8 — заряд ВВ, 10 — полиэтилен (струеформирователь), 11 — полиэтилен (струегаситель), 12 — металлический цилиндр (прямой токопровод), 13 — корпус нагрузки (обратный токопровод)

вия задачи определяются на основе схемы коммутации. Схемы элементов размыкателей различного типа приведены на рис. 3, *a–d*. Размеры расчетной области для всех элементов одни и те же и соответствуют размерам элемента размыкателя с ребристой преградой в экспериментах [3]. Для всех размыкателей масса ВВ примерно одинакова, масса обтекаемых элементов и вставок в преградах также примерно одинакова. В расчетах предполагалось, что ток течет только по фольге размыкателя, состояние которой в процессе коммутации тока изменяется от твердого до плазменного. Состояние фольги описывалось комплексом уравнение состояния — уравнение проводимости [9]. Проводимость остальных областей считалась равной нулю. В [8] показано, что данная модель достаточно точно описывает коммутацию тока ВМГ-100 размыкателем с ребристой преградой. Другие процессы, которые могут влиять на работу размыкателя (теплопроводность и лучистый теплоперенос, проводимость в воздушных областях под действием ударных волн, проводимость ПД), в данной работе не учитывались.

В расчете определялись пространственные распределения физических величин, а также зависимости токов в ВМГ и нагрузке, напряжения на размыкателе и сопротивления размыкателя от времени. Проведено сравнение значений времени нарастания тока в нагрузке от 0,1 до 0,9 его максимального значения и зависимостей сопротивления размыкателя от времени для различных размыкателей.

Для вихревого размыкателя с пазами в заряде ВВ (см. рис. 3, *в*) распределение параметров ПД в момент начала воздействия на фольгу вычислялось с использованием принципа Гюйгенса и лучевой модели детонации [10]. При расчете в ячейки, которых на текущем шаге по времени достиг фронт детонации, мгновенно вводится известная энергия. Расчет разлета ПД проводится с использованием уравнений газодинамики.

Результаты расчетов. На рис. 3, *e–k* показано распределение материалов в расчетной области в момент достижения максимума напряжения на размыкателе (r — радиальная координата, отсчитываемая от оси симметрии устройства; z — аксиальная координата, отсчитываемая от левой границы элемента размыкателя). На рис. 4 представлены расчетные зависимости сопротивления от времени для рассмотренных размыкателей. Время отсчитывается с момента начала воздействия ПД на фольгу. Анализ полученных в расчетах пространственных распределений и зависимостей физических величин от времени

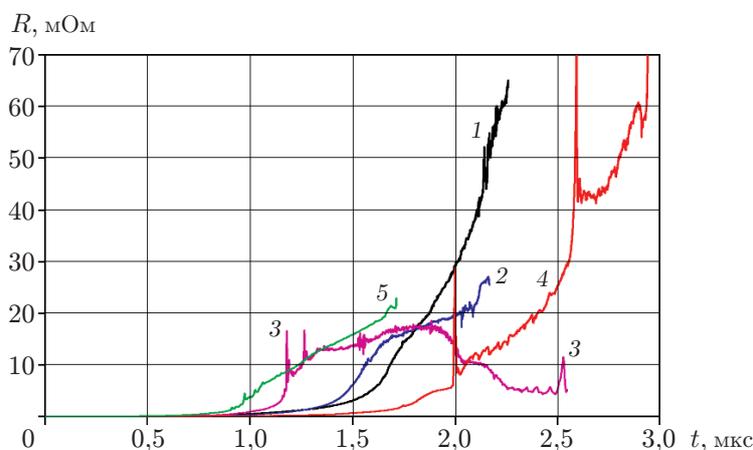


Рис. 4. Зависимость сопротивления от времени для взрывных размыкателей различного типа:

1 — с ребристой преградой, 2 — с проволочным соленоидом, 3 — вихревой с пазами в заряде ВВ, 4 — вихревой с обтекаемыми элементами, 5 — с кумулятивными диэлектрическими струями

показывает, что увеличение сопротивления взрывных размыкателей всех рассмотренных типов обусловлено растяжением участков фольги с последующим электровзрывом. Длина участков, подвергающихся электровзрыву, момент электровзрыва, а также скорость разлета продуктов электровзрыва, положение, размер и проводимость образующегося облака для размыкателей разного типа различны. Это приводит к различию характера изменения сопротивления у размыкателей различного типа (см. рис. 4). Тем не менее время нарастания тока в нагрузке различается незначительно: для всех размыкателей, кроме вихревого с пазами в заряде ВВ, оно составляет $\approx 0,7$ мкс, для вихревого с пазами в заряде ВВ — ≈ 1 мкс.

Согласно расчетам наиболее быстро растяжение фольги происходит в размыкателе с кумулятивными диэлектрическими струями и вихревом размыкателе с пазами в заряде ВВ. Однако длина растянутого участка, на котором происходит электровзрыв, невелика. Это приводит к быстрому увеличению сопротивления размыкателя на начальной стадии процесса коммутации и к его замедлению или даже к уменьшению сопротивления (в вихревом размыкателе с пазами в заряде ВВ) в дальнейшем. В размыкателях с ребристой преградой и проволочным соленоидом растяжение фольги происходит более медленно, но длина растянутого участка больше, чем в размыкателе с кумулятивными струями и вихревом размыкателе с пазами в заряде ВВ. Наиболее медленно растяжение фольги происходит в вихревом размыкателе с обтекаемыми элементами. Это приводит к медленному увеличению сопротивления размыкателя на начальной стадии процесса коммутации. В процессе растяжения фольги в данном размыкателе возникают условия для ее электровзрыва на двух участках.

Варьирование толщины фольги. При численном моделировании предполагалось, что осуществляется разрушение контура ВМГ-100 с током ≈ 6 МА размыкателем с ребристой преградой. Параметры преграды представлены на рис. 3, а. Толщина медной фольги ВРТ варьировалась в диапазоне $\delta = 0,1 \div 0,5$ мм. Расчеты (рис. 5) показали, что с увеличением толщины фольги время с момента начала воздействия ПД на фольгу до начала электровзрыва ее растянутых участков увеличивается. Начиная с некоторой толщины фольги участок, расположенный напротив паза преграды, долетает до дна паза, но электровзрыва растянутого участка при этом не происходит (см. рис. 5, в).

Согласно результатам расчетов при толщине фольги ВРТ менее 0,2 мм глубину паза преграды можно уменьшить (примерно до 4 мм для фольги толщиной 0,1 мм), при этом время срабатывания размыкателя не увеличивается. Для осуществления эффективного разрыва контура размыкателем с ребристой преградой при толщине фольги ВРТ

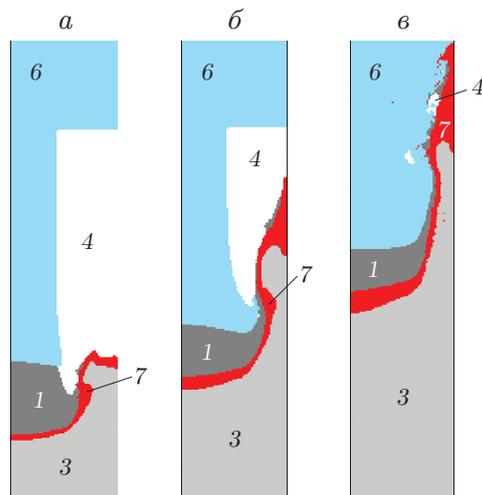


Рис. 5. Распределение материалов в расчетной области в момент t электровзрыва растянутых участков фольги: a — $\delta = 0,1$ мм, $t = 0,5$ мкс, b — $\delta = 0,3$ мм, $t = 1,6$ мкс, v — $\delta = 0,5$ мм, электровзрыв отсутствует; обозначения те же, что на рис. 3

более 0,4 мм необходимо увеличить ширину и глубину паза преграды, а также, возможно, толщину заряда ВВ.

Заключение. Проведено численное моделирование процесса коммутации тока взрывными размыкателями тока различного типа. Расчеты показали, что характер изменения сопротивления у размыкателей различного типа различен, тем не менее время нарастания тока в нагрузке различается незначительно. Из результатов расчетов работы размыкателя с ребристой преградой следует, что при толщине фольги ВРТ менее 0,2 мм глубину паза преграды можно уменьшить (примерно до 4 мм для фольги толщиной 0,1 мм), при этом время срабатывания размыкателя не увеличивается. Для осуществления эффективного разрыва контура размыкателем с ребристой преградой при толщине фольги ВРТ более 0,4 мм необходимо увеличить ширину и глубину паза преграды, а также, возможно, толщину заряда ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Магнитокумулятивные** генераторы — импульсные источники энергии: Моногр.: В 2 т. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2011. Т. 1.
2. **Волков Г. И., Дудай П. В., Иванов В. А. и др.** Основные типы взрывных размыкателей тока и их коммутационные характеристики // Тр. 12-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–18 июля 2008 г. [Электрон. ресурс]. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 2010. 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 // Proc. of the 11th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, London, Sept. 10–14, 2006. L.: Loughborough Univ., 2007. P. 199–203.
4. **Demidov V. A., Meshkov E. E., Vlasov Yu. V., et al.** Study of a vortex current opening switch // Proc. of the 9th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Moscow — St.-Petersburg, July 7–14, 2002. Sarov: VNIIEF, 2004. P. 316–323.
5. **Власов Ю. В., Демидов В. А., Казаков С. А. и др.** Обострение импульса тока спирального ВМГ с помощью вихревого размыкателя // Тр. 12-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–18 июля 2008 г. [Электрон. ресурс]. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 2010. С. 378–383.
6. **Пат. 2438206 RU, МПК НО 1 Н 39/00.** Взрывной размыкатель тока / В. А. Демидов, С. А. Казаков. Оpubл. 27.12.11, Бюл. № 36.
7. **Демидов В. А., Казаков С. А., Борискин А. С. и др.** Размыкание мегаамперных токов взрывным размыкателем с преградой в виде проволочного соленоида // Мощная импульсная электрофизика: Сб. докл. Междунар. конф. “14-е Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 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: Сб. докл. Междунар. конф. “14-е Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2013. С. 51–56.
9. **Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В.** Магнитогидродинамический расчет взрывающихся проводников // Журн. техн. физики. 1976. Т. 46, вып. 9. С. 1963–1969.
10. **Бахрах С. М., Воронина Е. Б., Устинова Е. В., Шавердов С. А.** Алгоритм расчета распространения фронта послойного горения, основанный на принципе Гюйгенса // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1998. Вып. 1. С. 59–65.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.