

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА И ВЗРЫВНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ ТОКА ПО МЕТОДИКЕ ТИМ-2D

Ю. В. Власов, А. И. Панов, А. В. Самодолов, С. С. Соколов

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

Приведены математическая постановка задачи и результаты магнитогидродинамического моделирования устройства для формирования мегаамперных импульсов тока с микросекундным временем нарастания на основе взрывомагнитного генератора и взрывного размыкателя тока по методике ТИМ-2D. В расчетной модели учитывались упругопластические свойства материалов, а также тепловое и ponderomotorное воздействие тока взрывомагнитного генератора на разрываемый проводник на стадии накопления энергии. Численное моделирование проводилось в лагранжевых переменных с использованием неструктурированных счетных сеток. Представлено сравнение результатов расчетов с экспериментами по коммутации тока с линейной плотностью ~ 150 кА/см и ~ 300 кА/см взрывным размыкателем с комбинированной ребристой преградой.

Введение

Для сокращения времени нарастания тока в нагрузках в устройствах на основе взрывомагнитных генераторов (ВМГ) [1] применяются взрывные размыкатели тока [2–6], действие которых основано на механическом разрушении токоведущего проводника продуктами детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ). Численное моделирование процесса коммутации тока взрывными размыкателями требует расчета растяжения проводника под действием продуктов детонации, а также электровзрыва растянутых участков фольги. Кроме того, необходимо рассчитывать изменение токов в ветвях схемы коммутации. Особенности геометрии взрывных размыкателей требуют использования программ для двумерного магнитогидродинамического (МГД) моделирования.

Для моделирования процесса коммутации тока ВМГ взрывным размыкателем использовалась двумерная МГД методика ТИМ-2D [7]. В этой методике имеется возможность расчета процесса детонации как заряда ВВ системы инициирования, так и разрывного заряда размыкателя. Можно также рассчитать конфигурацию проводника и распределение его параметров по пространству к моменту начала коммутации тока, исходя либо из расчета по схеме коммутации при известных зависимостях индуктивности и сопротивления генератора от времени, либо из известной зависимости тока генератора от времени.

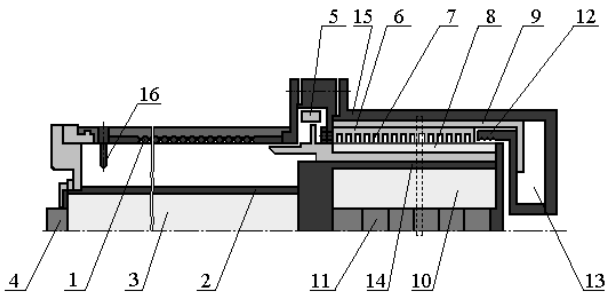
Постановка задачи для МГД моделирования процесса коммутации тока ВМГ взрывным размыкателем описана в [7]. В докладе приведены результаты расчетов коммутации тока в устройстве на основе спирального ВМГ диаметром 100 мм (ВМГ-100) с взрывным размыкателем [3] и аналогичного устройства на основе спирального генератора диаметром 200 мм (ВМГ-200) [3], а также их сравнение с результатами экспериментов.

Устройство на основе спирального генератора ВМГ-100

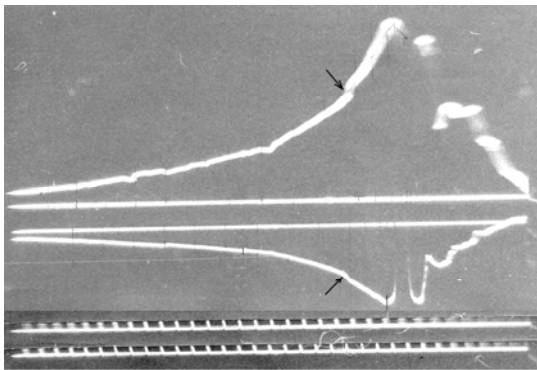
Для численного моделирования выбрано устройство на основе спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-100 и взрывного размыкателя с ребристой преградой [3]. Эскиз спирального ВМГ с взрывным размыкателем представлен на рис. 1. Внутренний диаметр спирали равен 100 мм, длина – 500 мм. Разрушаемый проводник – медная фольга толщиной 0,3 мм, представляет собой цилиндр диаметром 100 мм и длиной 90 мм (длина ребристой преграды).

Размыкание тока ВМГ производится согласно схеме, представленной на рис. 2а. При $t < t_k$ ключ K разомкнут – происходит накопление энергии в контуре ВМГ, при $t > t_k$ ключ K замкнут – происходит коммутация тока ВМГ в нагрузку. Результаты одного из опытов с этим устройством приведены на рис. 2б. В этом опыте начальный ток ВМГ

был равен 0,03 МА. Разрыв контура ВМГ производился при токе 5,5 МА (линейная плотность разрываемого тока составляла ~ 150 кА/см). Время работы ВМГ от замыкания кроубара 16 (см. рис. 1) разлетающейся центральной трубой 2 до подключения нагрузки $t_k = 61$ мкс. Нагрузка подключалась при разрушении изолятора между фольгой 7 и фланцем ключа 12 под действием продуктов детонации заряда ВВ 8 (см. рис. 1).

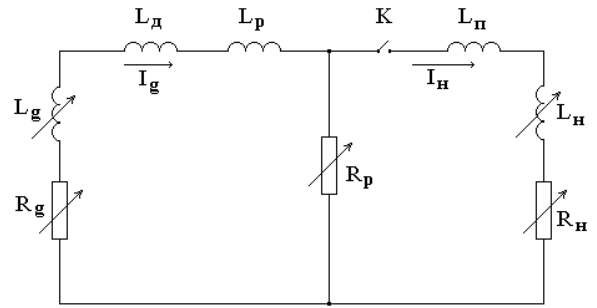


а)

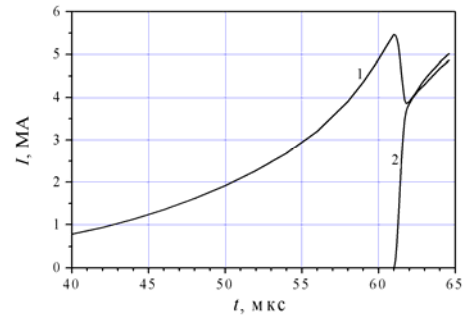


б)

Рис. 1. Эскиз спирального ВМГ с взрывным размыкателем (а) и осциллограмма производной тока ВМГ (б). 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 (кроубар) для шунтирования источника начального тока. Пунктиром выделен элемент размыкателя, являющийся расчетной областью для МГД расчета. Стрелкой на осциллограмме показан момент начала движения наружной границы прямого токопровода. Метки времени – через 1 мкс



а)



б)

Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема коммутации тока ВМГ (а) и экспериментальные зависимости от времени тока (1) генератора ВМГ-100 и тока (2) в нагрузке (б). L_g, R_g – индуктивность и сопротивление ВМГ, L_d – суммарная индуктивность полости под измерительные датчики и полости под замыкающим ключом, L_p – индуктивность под фольгой ВРТ, R_p – сопротивление ВРТ, K – замыкающий ключ, подключающий нагрузку в заданное время, L_n – суммарная индуктивность полости над фольгой ВРТ, L_n, R_n – индуктивность и сопротивление нагрузки, I_g, I_n – ток ВМГ и ток в нагрузке. Отсчет времени – от начала работы ВМГ

Ребристая преграда из оргстекла имела ребра шириной 1,5 мм и пазы шириной 2 мм и глубиной 5,5 мм. На ребрах преграды размещались железные вставки толщиной 1,5 мм. Толщина заряда ВВ составляла 4,5 мм. Таким образом, размыкатель представляет собой периодическую структуру из повторяющихся элементов. Элемент размыкателя является расчетной областью для МГД расчета. Количество элементов – 52. Геометрия расчетной области – цилиндрическая. Все границы расчетной области – жесткие стенки. Граничные условия по электродинамике – эквивалентная схема на рис. 2а. Ток протекает как по фольге, так и по металлическим вставкам на ребрах преграды.

Синхронизация расчетов и эксперимента производится по моменту начала движения наружной границы прямого токопровода (см. рис. 1). Изме-

нение скорости нарастания производной тока ВМГ в этот момент времени достаточно хорошо видно на осциллограммах.

В расчетах ЭД имитируется цилиндрическим зарядом с наружным диаметром, равным диаметру ЭД. Согласно расчету по методике ТИМ-2D, наружная граница прямого токопровода начинает движение через 5,1 мкс после осевого инициирования заряда ВВ, имитирующего ЭД. Отсюда находим расчетный момент инициирования заряда, имитирующего ЭД, относительно момента начала работы ВМГ $t_{и} = 52$ мкс.

Из-за недостаточной точности расчетной зависимости индуктивности и сопротивления ВМГ от времени, переход от расчета по экспериментальному току к расчету по схеме коммутации (см. рис. 2а) производится в момент инициирования заряда, имитирующего ЭД. За начальные условия в этот момент выбираются экспериментальный ток и расчетная индуктивность. Индуктивность ВМГ в интервале $t_{и} < t < t_f$ ($t_f = 67$ мкс – момент окончания работы ВМГ) описывалась зависимо-

стью $L_g(t) = L_g(t_{и}) \left(1 - \frac{t - t_{и}}{t_f - t_{и}}\right)^2$, где $L_g(t_{и}) = 100$ нГн. Сопротивление в контуре ВМГ описывалось зависимостью $R_g(t) = R_g(t_{и}) \left(1 - \frac{t - t_{и}}{t_f - t_{и}}\right)$.

Величина $R_g(t_{и}) = 5$ мОм подбиралась так, чтобы к моменту начала разрыва контура расчетный и экспериментальный ток различались незначительно.

До начала работы ВМГ ток протекает по

фольге в течение процесса его запитки от конденсаторной батареи (КБ), т.е. достаточно длительное время. Поэтому начальное распределение плотности тока предполагается постоянным вдоль сечения фольги. Проводники прямого и обратного токопровода считаются идеальными (удельное сопротивление равно нулю). Потери учтены в R_g . Считается также, что начальное распределение удельной тепловой энергии постоянно вдоль сечения фольги – пренебрегаем нагревом фольги при запитке ВМГ от КБ. Индуктивность $L_p \sim 5$ нГн (см. рис. 2) определяется из размеров размыкателя, $L_d + L_p = 8$ нГн, $L_n \sim 3$ нГн определяется из размеров размыкателя, $L_n + L_n = 10$ нГн, $R_n = 0$.

Медная фольга описывалась комплексом «уравнение состояния – проводимость» Гаранина [8]. Принималось, что проводимость вставок из железа растет линейно с удельной внутренней энергией в диапазоне от 0 до 10 кДж/г, а при удельной внутренней энергии более 10 кДж/г равна нулю. В процессе расчета определялись пространственные распределения физических величин, зависимости от времени токов в схеме и напряжения на размыкателе.

Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ показана на рис. 3. Согласно расчету, электровзрыв утонченных участков проводника начинается примерно через 61 мкс после начала работы ВМГ. К окончанию коммутации тока удельная внутренняя энергия в разрывах проводника достигает ~ 60 кДж/г. Получено достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей тока ВМГ и тока в нагрузке от времени (рис. 4).

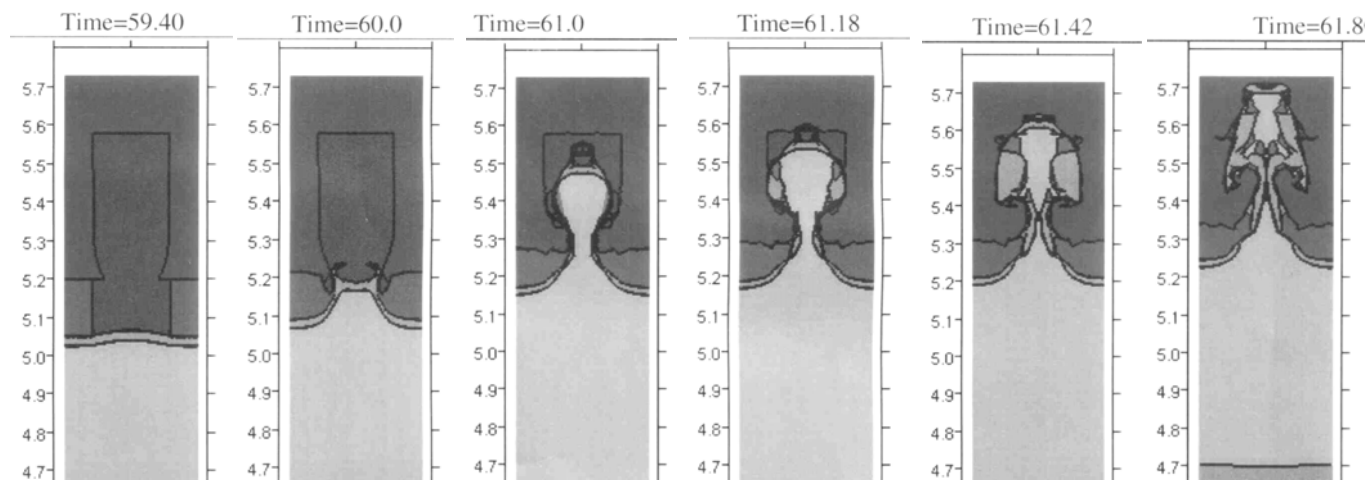


Рис. 3. Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ

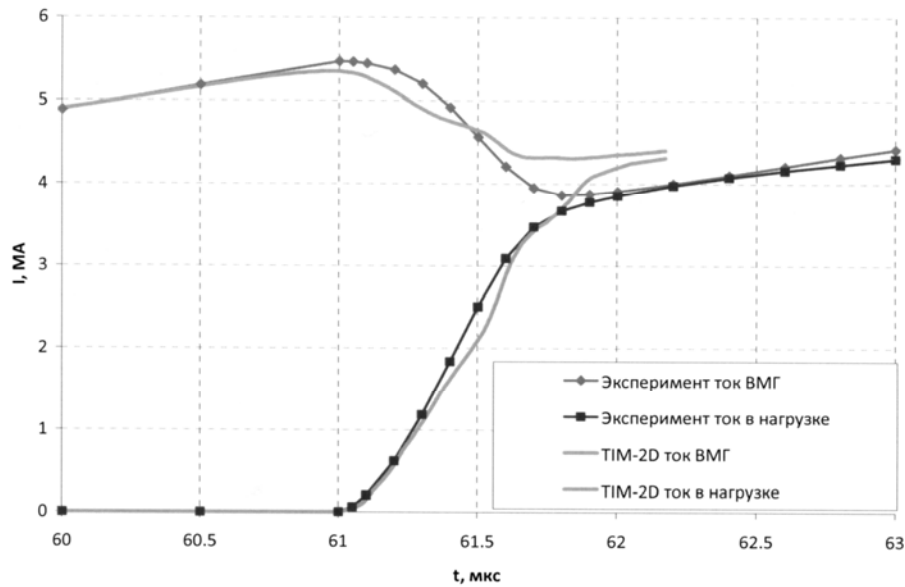
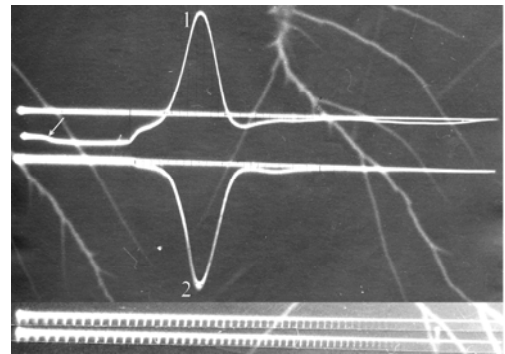


Рис. 4. Расчетные зависимости от времени тока ВМГ-100 и тока в нагрузке и их сравнение с экспериментальными

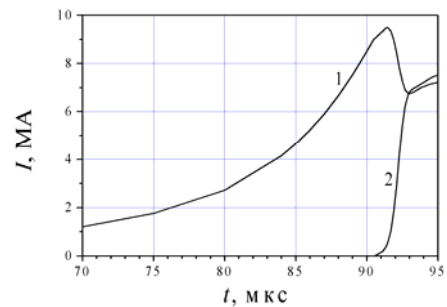
Устройство на основе спирального генератора ВМГ-200

Для исследования работы описанного размыкателя в режиме повышенной до ~ 300 кА/см линейной плотности разрываемого тока необходимо использование спирального генератора с внутренним диаметром спирали 200 мм (ВМГ-200), т. к. генератор ВМГ-100 не может обеспечить требуемый ток. Размыкание тока ВМГ также производится согласно схеме на рис. 2а. В отличие от устройства на основе генератора ВМГ-100, в данном размыкателе была изменена форма стальных вставок на ребрах преграды, а ширина паза была увеличена до 2,5 мм. Результаты одного из опытов с этим устройством приведены на рис. 5. В этом опыте начальный ток ВМГ был равен 0,034 МА, разрыв контура генератора производился через $t_k = 90,5$ мкс после начала его работы при токе 9,5 МА. В этом эксперименте подключение нагрузки произошло практически одновременно с началом воздействия продуктов детонации на фольгу. Синхронизация расчетов и эксперимента производилась по моменту начала движения наружной границы прямого токопровода (рис. 5а). Расчетный момент инициирования заряда, имитирующего ЭД, равен $t_{и} = 83$ мкс от начала работы ВМГ.



а

1 – производная тока ВМГ, 2 – производная тока в нагрузке. Метки времени через 0,2 мкс. Стрелкой указан момент начала движения наружной границы прямого токопровода



б

1 – ток ВМГ, 2 – ток в нагрузке. Отсчет времени – от начала работы ВМГ-200.

Рис. 5. Осциллограмма производной тока ВМГ и производной тока в нагрузке (а) и экспериментальные зависимости от времени тока генератора ВМГ-200 и тока в нагрузке (б)

Из-за недостаточной точности расчетной зависимости индуктивности и сопротивления ВМГ от времени переход от расчета по экспериментальному току к расчету по схеме коммутации (см. рис. 2а) производится в момент начала работы предпоследней секции ВМГ $t_8 = 75$ мкс. За начальные условия в этот момент выбраны экспериментальный ток и расчетная индуктивность в расчетный момент начала работы этой секции. Индуктивность ВМГ в интервале $t_8 < t < t_f$ ($t_f = 95$ мкс – момент окончания работы ВМГ) описывалась за-

висимостью
$$L_g(t) = L_g(t_8) \left(1 - \frac{t - t_8}{t_f - t_8} \right)^2$$
, где

$L_g(t_8) = 160$ нГн. Сопротивление в контуре ВМГ описывалось зависимостью $R_g(t) =$

$= R_g(t_8) \left(1 - \frac{t - t_8}{t_f - t_8} \right)$. Величина $R_g(t_8) = 4$ мОм

подбиралась так, чтобы к моменту начала разрыва

контура расчетный и экспериментальный ток различались незначительно. Индуктивность $L_p \sim 5$ нГн определяется из размеров размыкателя, $L_d + L_p = 10$ нГн, $L_n \sim 3$ нГн определяется из размеров размыкателя, $L_n + L_n = 10$ нГн, $R_n = 0$.

Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ показана на рис. 6. Согласно расчету, электровзрыв утонченных участков проводника начинается примерно через 91,5 мкс после начала работы ВМГ. К окончанию коммутации тока удельная внутренняя энергия в разрывах проводника достигает ~ 150 кДж/г. Расчетный ток в нагрузке растет заметно быстрее экспериментального (рис. 7). Возможно, это связано с тем, что в этом эксперименте линейная плотность разрываемого тока, а значит, и джоулев нагрев проводящих областей выше, чем в опыте с ВМГ-100, поэтому потребуются корректный учет проводимости вставок из железа при удельной внутренней энергии более 10 кДж/г.

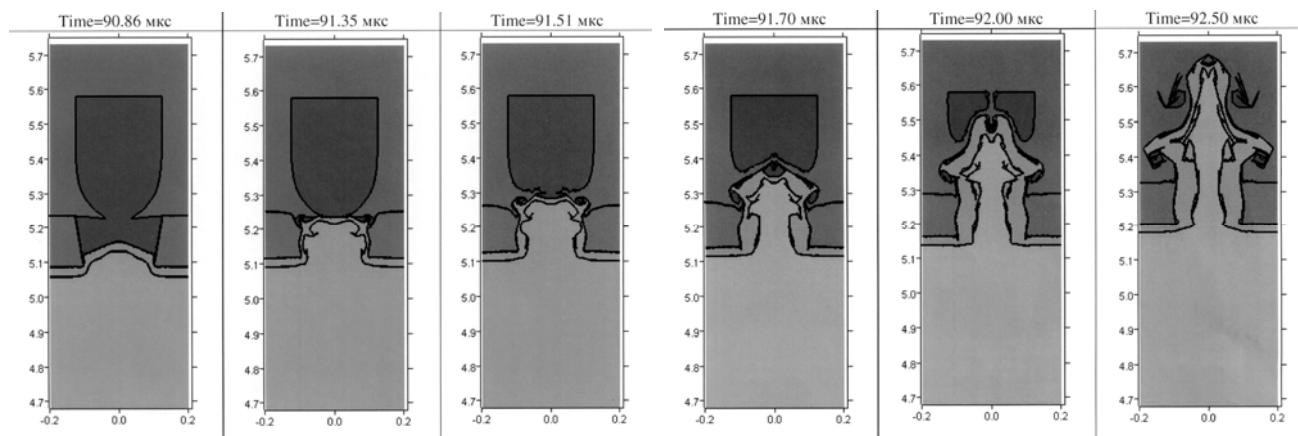


Рис. 6. Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ

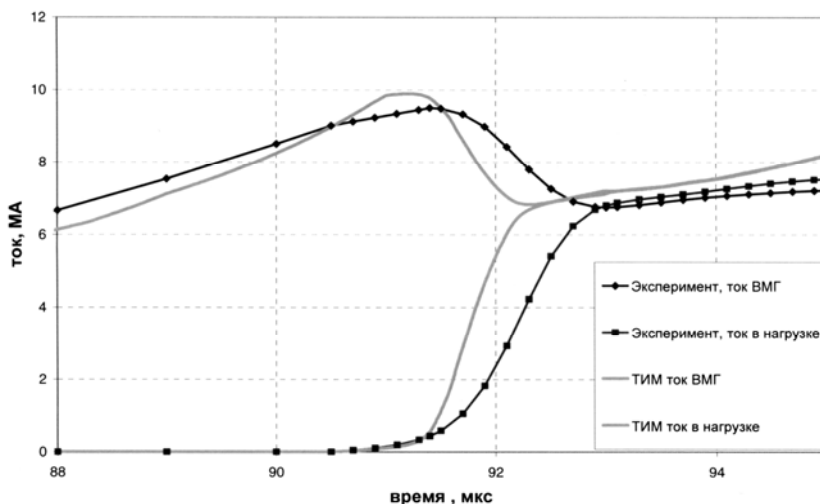


Рис. 7. Расчетные зависимости от времени тока ВМГ и тока в нагрузке и их сравнение с экспериментальными

Заключение

Показана возможность использования методики ТИМ-2D для численного моделирования устройств на основе взрывомагнитных генераторов и взрывных размыкателей тока. Численное моделирование по данной методике проводится в двумерном магнитогидродинамическом приближении в лагранжевых переменных с использованием неструктурированных счетных сеток. В расчетной модели учитываются упругопластические свойства материалов, а также тепловое и пондеромоторное воздействие тока взрывомагнитного генератора на разрываемый проводник на стадии накопления энергии. Результатом моделирования являются пространственные распределения физических величин в расчетной области и зависимости от времени токов в генераторе и в нагрузке.

Результаты моделирования процесса коммутации тока 5,5 МА спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-100 взрывным размыкателем тока с комбинированной ребристой преградой в индуктивную нагрузку 10 нГн согласуются с экспериментальными данными. При моделировании коммутации тока 9,5 МА спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-200 взрывным размыкателем такого же типа в индуктивную нагрузку 10 нГн расчетный ток в нагрузке растет заметно быстрее экспериментального. Возможно, это связано с тем, что в этом эксперименте линейная плотность разрываемого тока, а значит, и джоулев нагрев проводящих областей значительно выше, чем в опыте с ВМГ-100, поэтому требуется корректный учет проводимости вставок из железа при удельной внутренней энергии более 10 кДж/г.

Список литературы

1. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах. Том 1 / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляш-

кевича, 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. Павловский А. И., Васюков В. А., Руссков А. С. Формирование быстронарастающих мегаамперных импульсов тока от магнитокумулятивных генераторов // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3, Вып. 16. С. 789.

5. 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.

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

7. Дудай П. В., Ивановский А. В., Иванов В. А., Зименков А. А., Кудрявцева Н. А., Куцык И. М., Панов А. И., Скобелев А. Н., Соколов С. С. Моделирование работы взрывного размыкателя тока в МГД приближении // Мощная импульсная электрофизика. Международная конференция XIV Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С. 61–65.

8. Гаранин С. Ф., Мамышев В. И. Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой. ПМТФ. 1990, № 1. С. 30–37.