

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАЗМЫКАТЕЛЕЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ТОКА С ТРЕБУЕМОЙ ФОРМОЙ ДЛЯ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

*В. В. Авдошин, П. В. Дудай, А. А. Зименков, В. А. Иванов, С. В. Пак,
А. Н. Скобелев, А. Ю. Февралёв*

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

Для проведения экспериментальных работ в различных областях физики требуются источники электромагнитной энергии, имеющие высокую импульсную мощность. Одним из путей повышения импульсной мощности является применение быстродействующих токовых открывающих ключей, способных коммутировать мегаамперные токи и обеспечивать тераваттный уровень мощности. К настоящему времени созданы открывающие ключи – взрывные размыкатели тока (ВРТ), способные в сочетании со спиральными взрывомагнитными генераторами (СВМГ) формировать в нагрузке импульсы тока амплитудой более 10^7 А за микросекундное время [1]. На время коммутации тока в нагрузку с помощью взрывного размыкателя тока влияют: способ разрыва проводника, симметрия детонационного фронта и толщина разрывного заряда ВВ размыкателя, электрофизические свойства детонационной плазмы, плотность тока в разрываемом проводнике, геометрические размеры и материал проводника, электрические параметры разрываемого контура и цепи нагрузки [2].

В электрофизическом отделении ВНИИЭФ разработаны спиральные ВМГ калибром от 5 до 40 см, позволяющие в конечном контуре сжатия с индуктивностью 25...50 нГн получать токи от 1 МА до 35 МА [3] с характерным временем нарастания тока от 10 до 30 мкс. Для формирования в нагрузках импульсов тока требуемой длительности и амплитуды СВМГ снабжены размыкателями тока различных конструкций.

В докладе рассматриваются вопросы выбора параметров ВРТ для формирования импульсов тока с заданными характеристиками.

1. Требуемые выходные параметры источников тока для физических исследований

Таблица 1

Во ВНИИЭФ совместно с лабораториями LANL (США) и СЕА (Франция) был проведён ряд физических исследований:

– изучение возможности нагрева $D-T$ плазмы до термоядерной температуры в камерах с магнитным обжатием (МАГО) [1],

– исследование фазовых переходов, ударных волн и развитие Релей-Тейлоровских неустойчивостей при обжатии мишени в лайнерных экспериментах [4, 5],

– формирование высокоскоростных струй при схлопывании лайнера [6],

– изучение откольных механизмов разрушения материалов с использованием взрывомагнитного устройства [7].

Для проведения этих экспериментов в электрофизическом отделении ВНИИЭФ необходимо было создать источники тока со следующими выходными параметрами (см. табл. 1).

№ п/п	Цель экспериментов	L_n , нГн	I_n , МА	t_n , мкс	U_f , кВ
1	Нагрев плазмы в камере МАГО калибром 100 мм	20	3	1	100
2	Нагрев плазмы в камере МАГО калибром 200 мм	30...40	5...10	3	200
3	Исследование фазовых переходов	30	5	6,5	50
4	Исследование неустойчивостей	50	10	10	150
5	Формирование высокоскоростных струй	55	15	10	200
6	Изучение откольных механизмов	22	5...10	2	100

В таблице 1 приняты следующие обозначения: L_n – величина индуктивности нагрузки, I_n – амплитуда тока в нагрузке, t_n – время нарастания импульса тока в нагрузке, U_f – величина напряжения на фольге в момент разрыва.

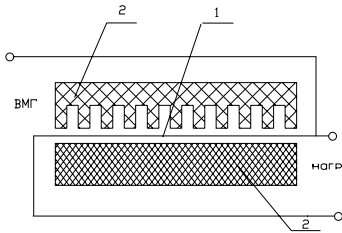


Рисунок 1

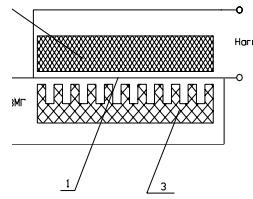


Рисунок 2

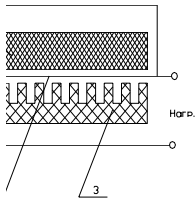


Рисунок 3

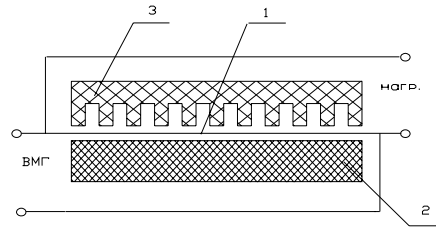


Рисунок 4

а) ВРТ с ребристой преградой

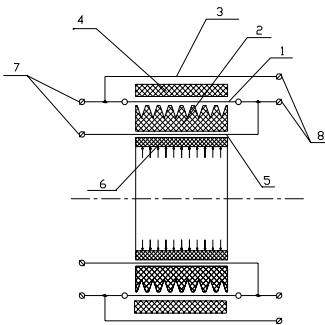


Рисунок 5

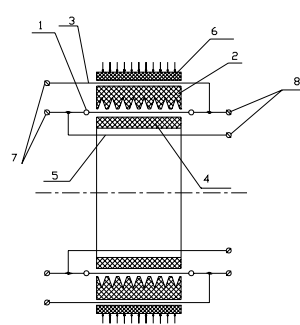


Рисунок 6

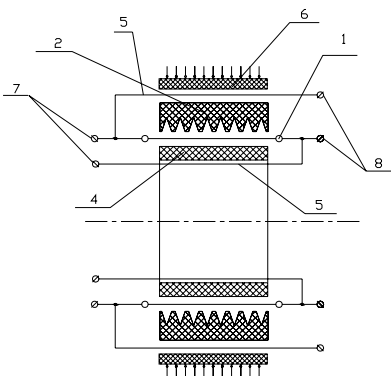


Рисунок 7

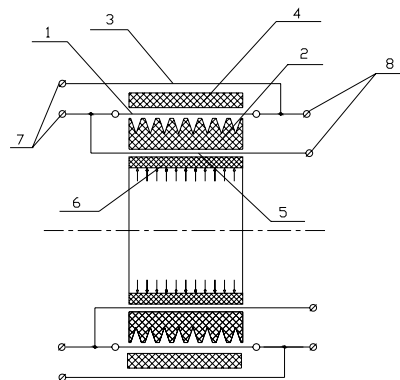


Рисунок 8

б) ВРТ на кумулятивных струях

2. Выбор параметров ВРТ

При использовании спиральных ВМГ для формирования импульса тока в нагрузке наиболее широко используются ВРТ двух типов: а) с разрывом проводника на ребристой преграде и б) с разрывом проводника диэлектрическими кумулятивными струями. Возможны четыре варианта по-

строения конструкций ВРТ в зависимости от взаимного расположения элементов ВРТ. Схематично эти варианты коаксиальных конструкций ВРТ показаны на рис. 1–8.

На рис. 1–4 приняты следующие обозначения: 1 – разрываемый проводник, 2 – заряд ВВ, 3 – ребристая преграда. На рис. 5–8 приняты следующие обозначения: 1 – разрываемый проводник, 2 –

струеформирователь, 3, 5 – наружный и внутренний электроды, 4 – струегаситель, 7 – выводы для подключения ВМГ, 8 – выводы для подключения нагрузки.

В зависимости от расположения ребристой преграды или струеформирователя (в контуре ВМГ или в контуре нагрузки) разрываемый проводник может вдавливаясь в пазы ребристой преграды или в кумулятивные пазы струеформирователя или отжиматься от пазов давлением магнитного поля тока ВМГ. При смещении проводников значительно увеличивается индуктивность ВРТ, а за счёт вдавливания разрываемого проводника в пазы возрастает сопротивление проводника ещё до разрыва контура. Для предотвращения растяжения разрываемого проводника в пазах следует выбрать схему построения конструкции ВРТ, при которой проводник магнитным полем отжимается от пазов.

Сравнение эффективности разрыва проводника с помощью диэлектрических кумулятивных струй и на основе метания проводника на ребристую преграду показало, что для алюминиевых проводников толщиной до 0,4 мм оба способа обладают примерно одинаковым быстрым действием. Для фольги толщиной более 0,4 мм эффективнее разрушение проводника с помощью диэлектрических кумулятивных струй [8]. Кумулятивный ВРТ позволяет применять в качестве разрываемого проводника как тонкие фольги (толщиной < 0,4 мм из алюминия или < 0,2 мм из меди), так и толстые пластины (толщиной до 5 мм из алюминия). Конструкция обострителя на кумулятивных струях позволяет располагать заряд ВВ с системой его инициирования вне электрического контура размыкателя и производить с помощью заряда ВВ размыкателя дополнительное сжатие магнитного потока в контуре ВМГ, что является преимуществом по сравнению с ВРТ на ребристой преграде. За счёт дополнительного сжатия контура ВМГ величина конечного тока ВМГ перед разрывом может быть увеличена до 50 % по сравнению со случаем расположения заряда ВВ в контуре обострителя. Ввиду этих преимуществ кумулятивного размыкателя перед ВРТ с ребристой преградой для создания импульсного источника тока на основе СВМГ был разработан ВРТ кумулятивного типа со схемой построения, показанной на рис. 5.

Выбор элементов конструкции импульсного источника тока надо производить, исходя из требуемых характеристик импульса тока в нагрузке. Время коммутации тока в нагрузку зависит от толщины разрываемого проводника. Чем тоньше проводник, тем меньшее время коммутации может

быть достигнуто. Время коммутации тока t_n уменьшается пропорционально $\sqrt{\delta_f}$, где δ_f – толщина разрываемого проводника. Выбор толщины разрываемого проводника производится исходя из времени коммутации. Влияние толщины разрываемого проводника на время коммутации рассматривается в работе [8]. Длина обострителя (l_f) должна быть такой, чтобы без электрического пробоя был получен импульс напряжения U_f нужной амплитуды. Минимальная длина обострителя при этом должна составлять: $l_f = U_f / E$ (1), где E напряженность электрического поля вдоль ВРТ. При постоянной величине магнитного потока в разрываемом контуре с увеличением длины разрываемого проводника напряженность электрического поля вдоль ВРТ уменьшается по степенному закону с показателем $\sim 0,5$. До длины ВРТ равной ~ 600 мм средняя величина напряженности E составляет ~ 5 кВ/см. После определения толщины и длины разрываемого проводника производится выбор диаметра его расположения.

Значения величин тока нагрузки I_n , индуктивности нагрузки L_n , конечного тока I_k , и индуктивности L_k конечного контура СВМГ связаны между собой известным соотношением: $I_k L_k = I_n (L_k + L_n)$. Генератор разрабатывается исходя из значений величин конечного тока I_k и индуктивности L_k . Важно, чтобы в разрабатываемом генераторе было обеспечено минимальное значение интеграла действия тока $\int_0^t I^2(t) dt$, это связано с тем, что поперечное сечение S разрываемого проводника выбирается исходя из величины интеграла действия тока. Увеличение сопротивления проводника в ВРТ за счёт токового нагрева слабо сказывается на эффективности работы СВМГ, если удельный интеграл действия тока не превышает 0,9 от того значения, при котором проводник нагревается до температуры плавления. Отсюда вытекает критерий выбора минимальной площади S поперечного сечения разрываемого проводника:

для проводника из меди:

$$\frac{\int_0^t I^2(t) dt}{S^2} \leq 8 \cdot 10^8 \frac{A^2 c}{\text{см}^4}, \quad (2)$$

для проводника из алюминия:

$$\int_0^t I^2(t) dt \leq 3 \cdot 10^8 \frac{A^2 \cdot c}{\text{см}^4} \quad (3)$$

Для создания импульсного источника тока для опытов с камерой МАГО калибром 100 мм (см. п. 1 табл. 1) был разработан СВМГ диаметром 160 мм, испытания которого показали, что в конечной индуктивности 30 нГн он генерирует ток амплитудой 7 МА с интегралом действия тока – $5,5 \cdot 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$. Во время предварительной запитки камеры ($I_{\text{предв}}=1,5 \text{ МА}$) ток через разрываемый проводник не протекает, вследствие этого интеграл действия тока в проводнике снижается до величины $3,2 \cdot 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$. Время формирования импульса тока в нагрузке должно составить ~ 1 мкс. Проведённые исследования показали, что $t_n < 1$ мкс достигается при использовании в качестве разрываемого проводника алюминиевой фольги толщиной $\leq 0,4$ мм или медной фольги толщиной $\leq 0,2$ мм [2] при одновременности выхода детонационной волны на поверхность струеформирователя на 90 % поверхности $\sim 0,1$ мкс. В качестве материала разрываемого проводника мы выбрали медную фольгу (для уменьшения величины контактного сопротивления при пайке фольги к фланцам) толщиной 0,2 мм. Из соотношения (2) мы определили площадь поперечного сечения фольги, она составила $0,63 \text{ см}^2$. При этой величине площади сечения фольга толщиной 0,2 мм в форме цилиндра должна быть расположена на диаметре 100 мм, удельный интеграл действия тока при этом составит $8 \cdot 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{см}^4$. Длину разрываемой части фольги определили из соотношения (3):

$$l_f = 100 \text{ кВ} / 5 \text{ кВ}/\text{см} = 20 \text{ см.}$$

Для создания импульсного источника со временем формирования импульса тока в нагрузке ~ 3 мкс для опытов с камерой МАГО калибром 200 мм (см. п. 2 табл. 1) был изготовлен СВМГ диаметром 200 мм, позволяющий в конечной индуктивности 40 нГн получать ток амплитудой 20 МА с интегралом действия тока – $6 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$. Время коммутации тока зависит от толщины разрываемого проводника $t \sim \sqrt{\delta_f}$, поэтому для формирования импульса тока в нагрузке со временем нарастания ~ 3 мкс в качестве разрываемого проводника была выбрана алюминиевая фольга толщиной 1 мм, расположенная в ВРТ на диаметре 200 мм, длиной 400 мм (для обеспечения на фольге в момент разрыва 200 кВ).

Для исследования фазовых переходов и ударных волн в материалах при ударе о мишень разогнанного магнитным полем лайнера использовался СВМГ диаметром 200 мм, обеспечивающий в конечной индуктивности 30 нГн ток амплитудой 8 МА с интегралом действия тока $8,5 \cdot 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$. В качестве разрываемого проводника в ВРТ была выбрана алюминиевая фольга толщиной 1 мм, расположенная на диаметре 200 мм. Для обеспечения на фольге в момент разрыва напряжения 50 кВ длина фольги была выбрана равной 100 мм. Для увеличения времени коммутации до 6,5 мкс заряд ВВ в размыкателе задействовался в режиме скользящей детонации.

Для изучения развития Релей-Тейлоровских неустойчивостей при обжати мишени в лайнерных экспериментах применялся СВМГ диаметре 200 мм. В конечной индуктивности 50 нГн он генерирует ток амплитудой 22 МА с интегралом действия тока $4,8 \cdot 10^{10} \text{ A}^2 \cdot \text{с}$. В качестве разрываемого проводника в ВРТ была выбрана алюминиевая фольга толщиной 2 мм, расположенная диаметре 200 мм, удельный интеграл действия тока при этом равен $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{см}^4$. Длина фольги была выбрана равной 600 мм. Для увеличения времени коммутации до 10 мкс заряд ВВ задействовался последовательно вдоль направления тока с задержкой инициирования в 1 мкс через каждые 100 мм.

Для исследования процесса формирования высокоскоростных струй при схлопывании лайнера был разработан СВМГ диаметром 400 мм, испытания которого показали, что в конечной индуктивности 55 нГн он генерирует ток амплитудой 30 МА с интегралом действия тока $10,6 \cdot 10^{10} \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ (с учётом дожатия контура ВМГ зарядом ВРТ). В качестве разрываемого проводника в ВРТ была выбрана алюминиевая фольга толщиной 2 мм в виде цилиндра диаметром 290 мм. Минимальная длина ВРТ должна составлять 400 мм (для обеспечения на фольге в момент разрыва 200 кВ), но для усиления эффекта дожатия конечного контура ВМГ его длина была увеличена до 840 мм. Для получения времени коммутации ~ 9 мкс заряд ВВ инициировался последовательно вдоль направления тока с задержкой инициирования в 1 мкс через каждые 100 мм.

Для изучения откольных механизмов разрушения материалов с применением взрывомагнитного устройства использовался СВМГ диаметром 200 мм, испытания которого показали, что в конечной индуктивности 24 нГн он генерирует ток амплитудой 14 МА с интегралом действия тока – $4,2 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$. В качестве разрываемого проводника в ВРТ была выбрана алюминиевая фольга толщи-

ной 0,7 мм, расположенная на диаметре 200 мм. Для обеспечения на фольге в момент разрыва напряжения 100 кВ её длина была выбрана равной 200 мм. Разновременность выхода детонационной волны заряда ВВ размыкателя на поверхность струеформирователя не превышала 0,3 мкс.

Результаты испытаний импульсных источников тока на основе СВМГ и ВРТ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Назначение источника тока	L_k , нГн	I_k , МА	L_n , нГн	I_n , МА	t_n , мкс	U_f , кВ
Нагрев плазмы в камере МАГО калибром 100 мм	30	7	30	3,5	1	100
Нагрев плазмы в камере МАГО калибром 200 мм	40	10	30	10	2,5	150
Исследование фазовых переходов	30	8	23	4,5	6	30
Исследование неустойчивостей	50	22	50	10	10	150
Формирование высокоскоростных струй	57	27	50	14,4	8,8	200
Изучение откольных механизмов	24	14	22	7	2	80

Из табл. 2 видно, что полученные экспериментальные результаты близки к требуемым характеристикам импульсов тока в нагрузке.

По результатам экспериментальных данных можно сделать вывод, что представленный метод выбора параметров ВРТ позволяет создавать импульсные источники тока с требуемыми выходными характеристиками.

Список литературы

1. Чернышев В. К. Сверхмощные взрывомагнитные источники энергии для термоядерных и

физических исследований // Труды Седьмой международной конференции по генерации Мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам. Мегагауссная и Мегаамперная импульсная технология и применения / Саров, ВНИИЭФ, 1997, с. 41–58.

2. Дудай П. В. и др. Исследование влияния параметров взрывного обострителя тока на время коммутации // Труды международной конференции XIII Харитоновские научные чтения. 14–18 марта 2011 г., РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, с. 755–760.

3. Чернышев В. К. и др. Спиральные взрывомагнитные источники с запасаемой энергией 0,5–25 МДж для исследования работы газового пондеромоторного узла с МГД-соплом и динамики разгона твёрдотельного лайнера. Ibid.1, с. 279–281.

4. Azra A. et al. Experimental study of Rayleigh Taylor instability by means of magnetic implosion // International Pulsed Power Conference 2001, Las Vegas, USA, p. 146–150.

5. Чокин Дж. Ф. и др. Фазовые переходы и ударные волны в лайнерных экспериментах. Ibid.1, с. 696–700.

6. Carlotti X. F. et al. Experimental study of conical liner magnetic implosion. Ibid.4, p. 142–145.

7. Дудай П. В. и др. Применение спиральных ВМГ для исследования реологических свойств алюминия. Эксперименты "R-Damage-8,9" // Труды международной конференции XIV Харитоновские научные чтения, 12–16 марта 2012 г., РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, сборник тезисов докладов, с. 46.

8. Volkov G. I. et al. Basic types of explosive current opening switches and their switching parameters, Proceedings of 12th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Novosibirsk, 2008, Abstracts, p. 68.