

Сверхмощные дисковые взрывомагнитные генераторы электромагнитной энергии для исследований в области высоких плотностей энергии

**В. Б. Куделькин, Л. П. Бабич,
Б. Е. Гриневич, А. В. Ивановский,
А. И. Краев, Е. В. Шаповалов**

Приведен обзор многомодульных дисковых взрывомагнитных генераторов микросекундных импульсов электромагнитной энергии до сотен МДж, работа которых основана на преобразовании энергии взрыва в электромагнитную энергию (магнитная кумуляция). В общих чертах обрисованы основные принципы работы ДВМГ. Кратко описаны ДВМГ с профилированными дисковыми модулями. Особое внимание уделено менее дорогостоящим модернизированным ДВМГ с плоскими дисковыми модулями. Приведены экспериментальные и расчетные импульсы тока и временные зависимости производной тока. При сохранении выходных характеристик ДВМГ с профилированными дисками коэффициент преобразования внутренней энергии ВВ в электромагнитную энергию ДВМГ с плоскими дисками в два раза выше; такие ДВМГ являются более быстродействующими, технологичными и менее дорогостоящими.

Введение

Для решения важных задач современной науки и техники в области высоких плотностей энергии требуются мощные импульсные источники энергии с запасом 10–100 МДж, способные обеспечить в различных нагрузках импульсы тока с амплитудой 20–200 МА. Такие источники необходимы в работах по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС), для ускорения металлических пластин и оболочек до сверхвысоких скоростей в исследованиях по физике плазмы и твердого тела, для генерации сверхвысоких давлений и в других областях физики высоких плотностей энергии, в технике и технологиях.

Получение импульсов тока со столь огромной амплитудой и длительностью порядка десятков и сотен наносекунд, требуемой, в частности, в проблеме УТС, является нетривиальной задачей. Для ее решения в 1951 г., т. е. в начале исследований по УТС, А. Д. Сахаров предложил использовать в качестве первичного носителя энергии взрывчатое вещество (ВВ), а для преобразования

энергии взрыва в электромагнитную энергию – эффект магнитной кумуляции, основанный на сжатии давлением продуктов взрыва проводящего контура с введенным в него от внешнего источника магнитным потоком [1–3]. Наиболее подходящим инструментом для достижения термоядерного зажигания в схемах с инерционным удержанием в настоящее время считаются лазерные установки, уникальные по создаваемой ими концентрации энергии. Однако, возможно, наиболее быстрый и дешевый подход к достижению зажигания предоставляют устройства, преобразующие внутреннюю энергию ВВ в энергию электромагнитного поля [4].

Этот подход оказался очень плодотворным. В процессе реализации идеи магнитной кумуляции были разработаны спиральные взрывомагнитные генераторы (СВМГ) (рис. 1) [3, 5, 6] и более мощные быстродействующие дисковые взрывомагнитные генераторы (ДВМГ) [7], в которых СВМГ используются в качестве внешнего источника (предусилителя), создающего начальный магнитный поток в ДВМГ.

При построении ДВМГ использовался модульный принцип. Конструкция генератора состоит из отдельных дисковых модулей, включенных последовательно и питающих одновременно общую внешнюю нагрузку (рис. 2). Число модулей определяется выходной энергией, требуемой для решения конкретной экспериментальной задачи.

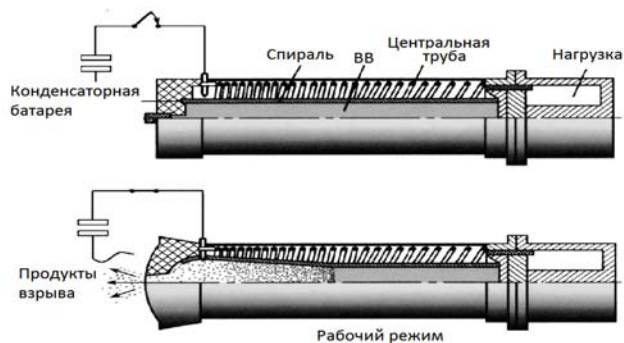


Рис. 1. Схема спирально-коаксиального генератора МК-2

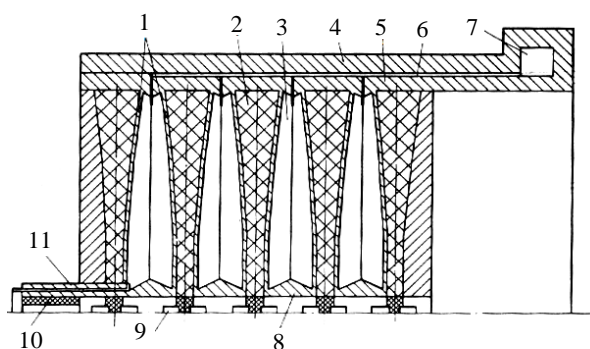


Рис. 2. Облик многомодульного ДВМГ (обозначения см. в тексте)

Принцип построения ДВМГ заключается в следующем. Металлические пластины (диски) 1, соединенные попарно в центре токопроводящими переключками 8 и образующие полости сжатия магнитного потока 3, установлены друг за другом в цилиндрическом корпусе 4, внутренняя поверхность которого покрыта диэлектриком 6. Смежные пластины соседних пар пластин соединены между собой по периметру токопроводящими кольцами 5 с образованием объемов, заполненных зарядами ВВ 2, причем кольцо первого заряда соединено через источник питания генератора с одним концом корпуса 4, а кольцо последнего заряда через цепь нагрузки 7 – с другим концом корпуса 4. Точки инициирования 9 синхронного подрыва зарядов 7 расположены на оси симметрии конструкции. Внешний источник начального магнитного потока подключается к переходнику 11, отключение генератора от источника питания производится замыканием радиальной щели давлением продуктов взрыва заряда ВВ 10.

При достижении в генераторе магнитного потока заданной величины давлением продуктов взрыва заряда ВВ 10 электрический контур генератора замыкается, и таким образом введенный источником питания магнитный поток захватывается. В этот же момент с помощью системы электродетонаторов 9 синхронно подрываются заряды ВВ 7. Под действием продуктов взрыва токопроводящие пластины 1 одновременно сжимают магнитный поток во всех полостях 3 и вытесняют его в нагрузку 7. На рис. 3 показан процесс работы ДВМГ, описанный выше.

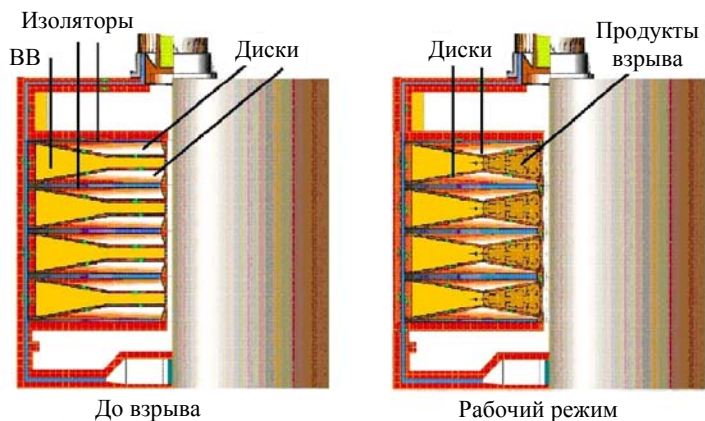


Рис. 3. Процесс работы ДВМГ

В данной статье приведен обзор ДВМГ различного калибра. В разделе 1 кратко обсуждаются изначально развитые ДВМГ с профилированными дисковыми модулями (семейство «Поток»). В разделах 2 и 3 в общих чертах описана техника численного моделирования, изложены результаты моделирования и описаны эксперименты с модернизированными ДВМГ с плоскими модулями.

1. ДВМГ с профилированными дисками

Прорыв в развитии ДВМГ произошел в начале 1970-х гг., когда во ВНИИЭФ были проведены первые испытания многомодульных ДВМГ с профилированной поверхностью пластин, сжимающих магнитный поток [8]. Сложный профиль проводников обеспечивал плавный вывод магнитного потока из полостей сжатия без его потерь.

Результаты первых испытаний ДВМГ с профилированными дисковыми модулями были впечатляющими: в 5-элементном генераторе диаметром 400 мм начальный ток 6,5 МА был усилен до 90 МА за время ~5 мкс; электромагнитная энергия в нагрузке составила ~10 МДж. Возможность увеличения энергии путем наращивания числа элементов была проверена в 1984 г. в эксперименте с 10-модульным ДВМГ диаметром 400 мм, в котором амплитуда импульса тока и энергия магнитного поля достигли 107,8 МА и 27,5 МДж соответственно [6]. Коэффициент преобразования энергии ВВ (5 МДж/кг) в электромагнитную энергию составил 6,8 % [9]. В это же время отработывались ДВМГ большого и малого классов с диаметрами 1000 и 250 мм соответственно. Исследования, выполненные в 1970–1980 гг., завершились созданием ДВМГ так называемого семейства «Поток» с профилированными дисковыми модулями и зарядами ВВ диаметром 250, 400 и 1000 мм [10]. В табл. 1 приведены основные характеристики таких ДВМГ.

Дальнейшее развитие ДВМГ шло по двум направлениям: увеличение индуктивности проводников, ограничивающих полости сжатия, с целью увеличения генерируемой энергии электромагнитного поля [11] и уменьшения массы ВВ; повышение КПД генератора путем замены профилированных дисковых модулей плоскими с формированием профиля треугольными металлическими вставками в полостях сжатия [12]. Вставки со столь простой топологией позволяют избежать профилирования дисков, требующего применения довольно сложной технологии. На рис. 4 представлены эскизы ДВМГ: семейства «Поток» [10], ДВМГ с увеличенной индуктивностью полости сжатия (схема 1) [11] и с плоскими дисковыми модулями (схема 2) [12].

Таблица 1

Характеристики ДВМГ семейства «Поток»

Диаметр ДВМГ, мм	250	400	1000
Число модулей	30	10–25	5–15
Вырабатываемая энергия, МДж	10–30	20–60	100–500
Ток ДВМГ, МА	30–70	50–160	130–400
Характерное время нарастания тока τ , мкс	4,0	6,0	12,0
Конечная индуктивность, нГн	10–15	5–10	2–5
Масса заряда дискового элемента, кг	1,6	6,7	54,0

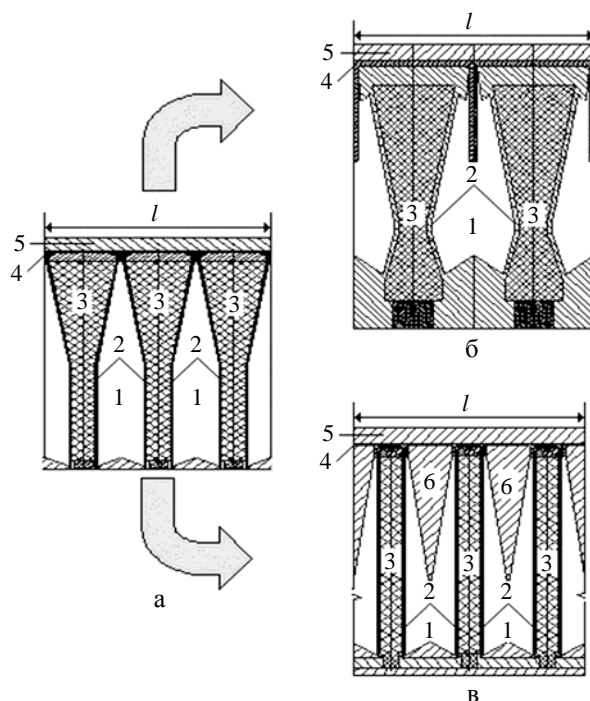


Рис. 4. Эскизы ДВМГ: а – семейства «Поток» с профилированными дисковыми модулями, б – семейства «Поток» с увеличенной индуктивностью полости сжатия (схема 1); в – с плоскими модулями (схема 2); 1 – полости сжатия, 2 – медные диски, 3 – заряды ВВ, 4 – волновая линия, 5 – обратный токопровод, 6 – металлические инертные вставки

Рост индуктивности проводников, формирующих полости сжатия, согласно схеме 1 достигнут путем увеличения расстояния между дисками и усложнения профиля медных дисков. По этой схеме в последние годы отработаны ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 240 и 480 мм [13, 14], генерирующие импульсы тока с амплитудами от 60 до 100 МА за время от 4 до 10 мкс при выходной энергии от 20 до 100 МДж.

ДВМГ по схеме 2 отличаются от ДВМГ семейства «Поток» с профилированными модулями уменьшенной массой ВВ и, соответственно, более высоким КПД. Благодаря плоской геометрии их изготовление проще и обходится дешевле, чем ДВМГ семейства «Поток» [15], что открывает перспективы проектирования ДВМГ любого калибра без предварительной экспериментальной отработки [16]. В следующем разделе изложены результаты численного моделирования и экспериментов с ДВМГ по схеме 2.

2. Методика численного моделирования. Результаты расчетов

Общая методика численного моделирования ДВМГ содержит:

- двумерный гидродинамический расчет детонации ВВ и динамики продуктов взрыва;
- МГД-расчет смещения дисков под действием давления продуктов взрыва с учетом противодействия магнитного поля;
- расчеты диффузии магнитного поля в диски и передающие линии с учетом расширения линий под действием противодействия магнитного поля;
- возможность учета дополнительных потерь магнитного потока и расчета некоторых режимов работы ДВМГ, отличающихся от нормальных.

Подробное описание методики приведено в работе [17], а сравнение расчетов с данными некоторых экспериментов – в работах [9, 18].

Дополнительные возможности методики моделирования ДВМГ с плоскими дисками. Общая схема ДВМГ с тремя полостями сжатия приведена на рис. 4,в. Она имеет ряд особенностей, которые в какой-то степени могут быть учтены в расчетах.

- Любой ДВМГ имеет центральные полости и две боковые полуполости. Центральные полости содержат металлические инертные вставки, боковые полуполости ограничены медными дисками и боковыми металлическими стенками, причем геометрия этих полуполостей может быть отлична от половины центральной полости.

- Вставка б (см. рис. 4,в) может быть покрыта слоем изолятора (лавсан) толщиной 25–75 мкм, вертикальные зазоры на выходе из полостей содержат изолятор толщиной 0,7–1,2 мм.

- Токовый контур генератора обычно изготавливается из меди, алюминия или железа.

- В конкретной конструкции генератора возможны дополнительные элементы, обусловленные особенностями системы запитки, например узел отключения от СВМГ в момент закоротки контура.

Для учета этих особенностей конструкции генератора в методику и программу расчета ДВМГ были внесены следующие дополнения:

1. Поскольку динамика краевых дисков отличается от динамики внутренних дисков, проводятся два дополнительных двумерных расчета для описания движения краевых дисков к правой и левой боковым стенкам генератора с учетом различной геометрии стенок.

В ДВМГ с большим количеством модулей (больше 5–7) отличие основных характеристик (например, индуктивности или радиуса окружности контакта краевых полуполостей от центральных полостей) не оказывает заметного влияния на работу генератора. Для ДВМГ с 2–3 модулями влияние боковых неполных элементов может быть существенным.

2. Учет изоляторов вдоль боковых стенок и на вставках, которые могут приводить к задержке замыкания диска с корпусом генератора или с инертными металлическими вставками и, как следствие, к дополнительным потерям магнитного потока.

3. Для расчета потерь магнитного потока в токовом контуре, составленном из разных металлов, в программу введена возможность дополнительного решения уравнений диффузии магнитного поля для участков стенок, изготовленных из алюминия и стали. В стандартном варианте расчета задается «классическая» проводимость металлов по Кнопфелю [19].

Методические дополнения, введенные в программу расчета ДВМГ для учета некоторых конструктивных особенностей генераторов с плоскими модулями, проверены путем сравнения экспериментальных и расчетных производных тока в экспериментах с одним, двумя, тремя и десятью модулями. В расчетах были учтены практически все конструктивные особенности экспериментальных сборок: материал дисков – медь, вставки – алюминий, боковые стенки – сталь, наличие дополнительной изоляции, подводящая линия для запитки генератора и т. п. Графики расчетных и экспериментальных производных тока приведены в разделе 3.

Результаты расчетов динамики дисков проверены в газодинамических экспериментах, в которых контактными датчиками измерена зависимость радиуса окружности контакта от времени. Расчетные и экспериментальные данные, полученные для дискового модуля диаметром 250 мм, приведены на рис. 5.

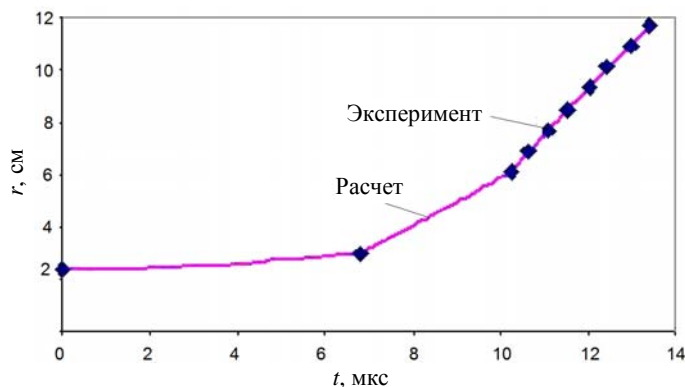


Рис. 5. Зависимость радиуса точки контакта от времени

3. Экспериментальная отработка ДВМГ с плоскими модулями

ДВМГ малого класса. Экспериментальная отработка ДВМГ малого класса диаметром 250 мм проводилась на двух- и трехмодульных генераторах [20]. Серия экспериментов с двухмодульным ДВМГ позволила определить оптимальную конструкцию изоляторов передающей линии, дисковых модулей, металлических инертных вставок. Эскиз двухмодульного ДВМГ-250-2 в последнем эксперименте приведен на рис. 6.

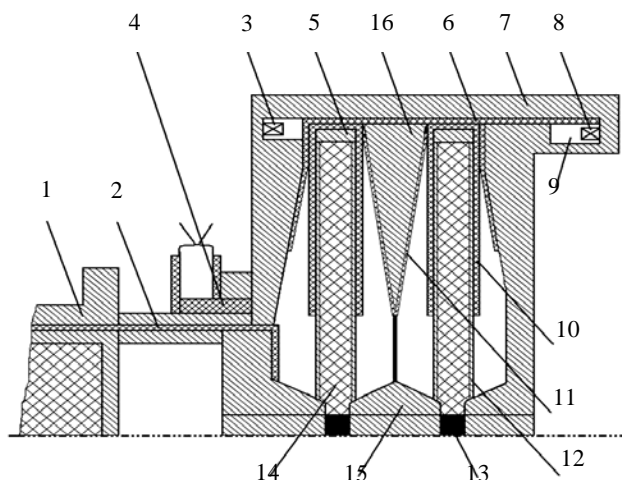


Рис. 6. Эскиз ДВМГ-250-2: 1 – предусилитель (СВМГ), 2, 6, 10, 11 – изолятор, 3 – первая группа измерительных датчиков, 4 – узел отключения СВМГ, 5 – металлическое кольцо, 7 – наружный токопровод, 8 – вторая группа измерительных датчиков, 9 – нагрузка, 12 – медный диск, 13 – электродетонатор, 14 – заряд ВВ, 15 – соединительный элемент, 16 – металлическая вставка

Каждый элемент генератора содержит заряд ВВ 14 на основе октогена (плотность $\rho = 1,82 \text{ г/см}^3$, скорость детонации $D = 8430 \text{ м/с}$). Торцы заряда облицованы медными дисками 12 толщиной 1 мм. Между дисковыми элементами установлена металлическая инертная вставка 16 из алюминия. Наружный токопровод 7 выполнен из меди. Инициирование зарядов ВВ осуществляется электродетонаторами 13. Начальная индуктивность одного элемента составляет $\sim 6 \text{ нГн}$. Дисковые элементы и металлическая вставка разделены лавсановыми изоляторами 10, 11. Электропрочность изоляторов составляет не менее 10 кВ. Изолятор передающей линии 6 обеспечивает электропрочность между дисками и наружным токопроводом 7.

В качестве предусилителя энергии использовался СВМГ диаметром 100 мм. К моменту замыкания контура ДВМГ ток в предусилителе составил $I_{\text{feed}} = 6,1 \text{ МА}$, максимальная производная тока $2,6 \cdot 10^{11} \text{ А/с}$.

В нагрузке ДВМГ-250-2 с индуктивностью $L_{\text{load}} = 0,55 \text{ нГн}$ зарегистрирован импульс тока амплитудой 58,5 МА с максимальной скоростью нарастания $1,4 \cdot 10^{13} \text{ А/с}$ и характерным временем $\tau_e \sim 4 \text{ мкс}$. Экспериментальная и расчетная зависимости производной тока ДВМГ приведены на рис. 7.

Расчетная кривая расположена несколько выше экспериментальной, нет особенности на производной вблизи максимума, спад расчетной производной после максимума не такой крутой, как в эксперименте. Расчетный ток $\sim 60 \text{ МА}$.

В дальнейшем экспериментальная отработка проводилась с трехмодульным ДВМГ-250-3, т. е. в конструкцию генератора был добавлен один дисковый элемент и одна металлическая вставка. Суммарная индуктивная нагрузка генератора L_{load} увеличена до 1,2 нГн. Все элементы были изготовлены из меди. Система изоляции – такая же, как в двухмодульном ДВМГ-250-2. В эксперименте в качестве предусилителя применялся СВМГ диаметром 160 мм с начальным током $I_{\text{feed}} = 4 \text{ МА}$. В нагрузке с индуктивностью 1,2 нГн зарегистрирован импульс тока амплитудой 42 МА с максимальной скоростью нарастания $9 \cdot 10^{12} \text{ А/с}$ и характерным временем $\tau_e \sim 4 \text{ мкс}$. Расчетная и экспериментальная зависимости производной тока приведены на рис. 8.

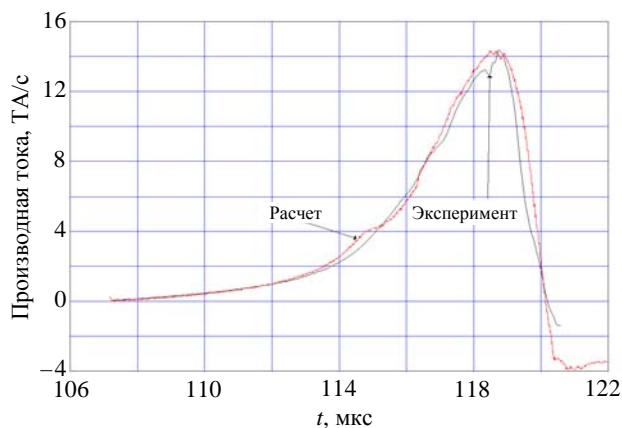


Рис. 7. Производная тока ДВМГ-250-2:
 $L_{\text{load}} = 0,55 \text{ нГн}$, $I_{\text{feed}} = 6,1 \text{ МА}$

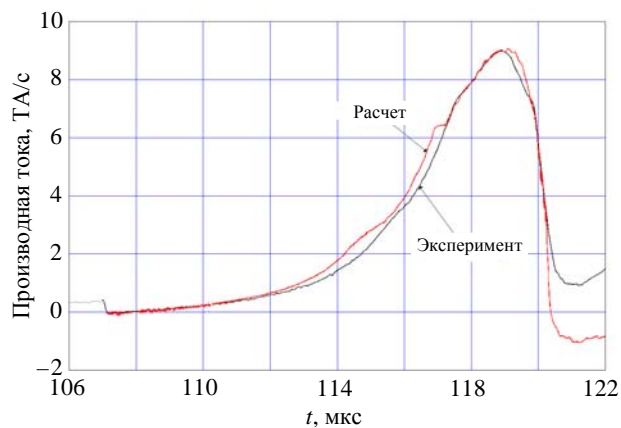


Рис. 8. Производная тока ДВМГ-250-3:
 $L_{\text{load}} = 1,2 \text{ нГн}$, $I_{\text{feed}} = 4 \text{ МА}$

Следующий эксперимент с трехмодульным ДВМГ-250-3 был проведен при начальном токе $I_{\text{feed}} = 5,1 \text{ МА}$ с индуктивной нагрузкой 1,7 нГн. Основные детали генератора изготовлены из меди, цилиндрический корпус стальной. Уменьшена толщина изоляции на дисковых модулях, металли-

ческие вставки и стенки генератора не изолировались. В нагрузке ДВМГ сформировал импульс тока амплитудой 36,6 МА с максимальной скоростью нарастания $6,8 \cdot 10^{12}$ А/с и характерным временем $\tau_e \sim 4$ мкс. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетом. Расчетная и экспериментальная зависимости производной тока ДВМГ приведены на рис. 9.

Было выполнено численное моделирование работы трехмодульного ДВМГ-250-3 при начальном токе $I_{feed} = 6,5$ МА. В расчетах принято, что корпус, металлические вставки, стенки ДВМГ изготовлены из меди, индуктивность нагрузки $L_{load} = 1,2$ нГн. График производной тока приведен на рис. 10. Максимальный ток в расчете 65,5 МА, максимальная скорость нарастания тока в нагрузке $1,4 \cdot 10^{13}$ А/с, максимальная электромагнитная энергия 2,6 МДж.

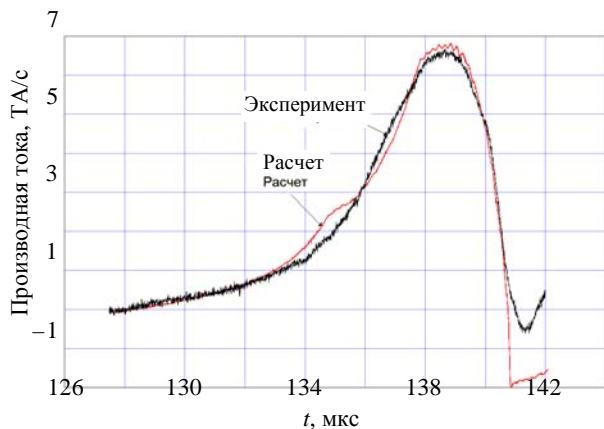


Рис. 9. Производная тока ДВМГ-250-3:
 $L_{load} = 1,7$ нГн, $I_{feed} = 5,1$ МА

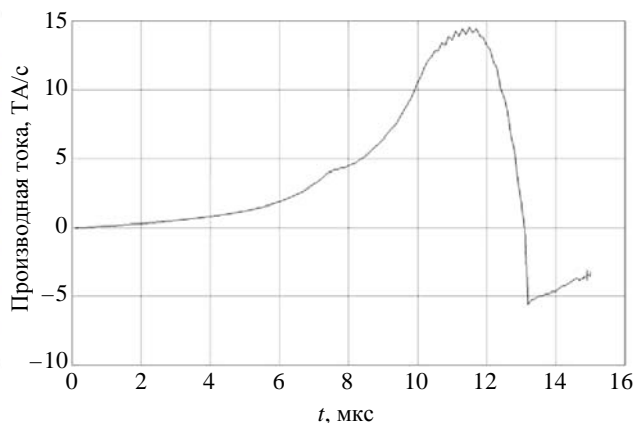


Рис. 10. Производная тока ДВМГ-250-3:
 $L_{load} = 1,2$ нГн, $I_{feed} = 6,5$ МА

С использованием полученных экспериментальных данных выполнен прогнозный расчет работы 30-модульного ДВМГ малого класса диаметром 250 мм при токе запитки $I_{feed} = 7,0$ МА. В табл. 2 приведены экспериментальные данные и результаты расчетов работы ДВМГ-250, которые показывают возможность получения рекордного для ДВМГ диаметром 250 мм количества производимой магнитной энергии на 1 кг массы ВВ – около 0,95 МДж.

Таблица 2

Результаты испытаний и расчета ДВМГ-250 с плоскими модулями

Число модулей	2	3	3	3	30
I_{feed} , МА	6,1	4,0	5,1	6,5	7,0
I_{load} , МА	58,5	42,0	36,6	65,6	68,7
\dot{I}_{load} , МА/мкс	14,0	9,0	6,8	14,0	15,4
L_0 , нГн	12,3	19,6	19,0	19,0	177,3
L_{load} , нГн	0,55	1,2	1,7	1,2	12,07
E_{load} , МДж	0,94	1,1	1,4	2,6	29,6
τ_e , мкс	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
$m_{ВВ}$, кг	1,8	2,7	2,7	2,7	27,0
ВВ	Эксп.	Эксп.	Эксп.	Расч.	Расч.

ДВМГ среднего класса. Отработка конструкции ДВМГ среднего класса диаметром 400 мм проводилась с экспериментальным блоком, содержащим один плоский дисковый модуль и боко-

вые профилированные фланцы [18]. Один из фланцев имеет тороидальную полость внешней нагрузки. На рис. 11 приведена схема блока, который состоит из следующих основных элементов: электродетонатора 1, СВМГ 2 диаметром 160 мм, узла отключения 3, модуля ДВМГ 4, устройства подрыва 5, нагрузки 6. В модуле ДВМГ масса заряда ВВ 3,3 кг, что в 2 раза меньше, чем в дисковом элементе семейства «Поток». Ток запитки ДВМГ составляет $I_{\text{feed}} = 6,7 \text{ MA}$.

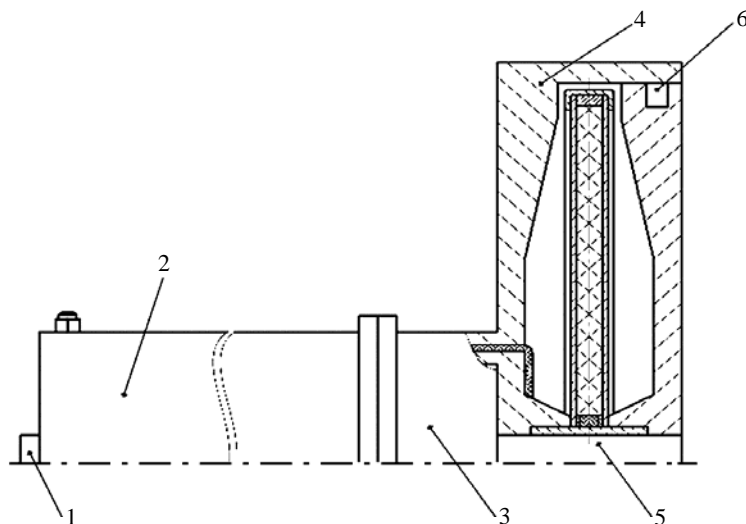


Рис. 11. Схема экспериментального блока с одномодульным ДВМГ-400-1

Экспериментальные зависимости производной тока и тока ДВМГ от времени приведены на рис. 12. В нагрузке ДВМГ-400-1 с индуктивностью 0,3 нГн зарегистрирован импульс тока амплитудой 118,1 МА с максимальной скоростью нарастания $3,0 \cdot 10^{13} \text{ A/c}$ и характерным временем $\tau_e \approx 23,5 \text{ мкс}$. Энергия в нагрузке достигла 3,22 МДж.

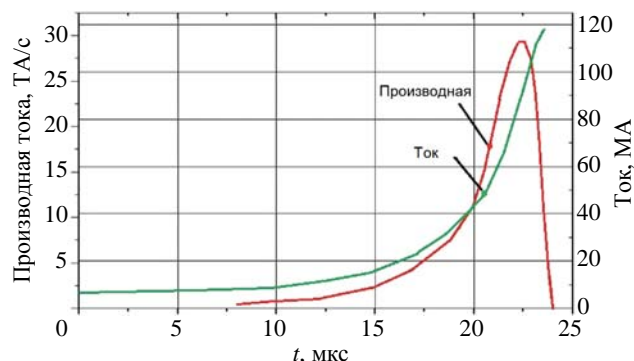


Рис. 12. Производная тока $\dot{I}(t)$ и ток $I(t)$ в одномодульном ДВМГ-400-1

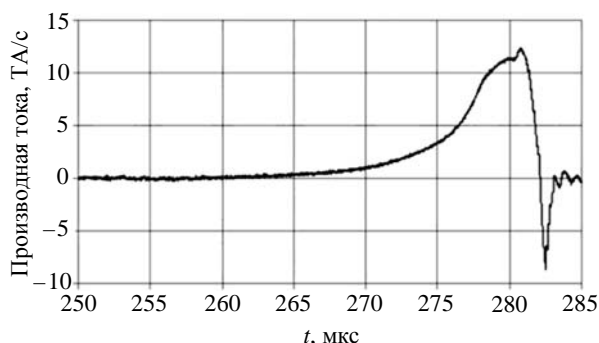


Рис. 13. Производная тока десяти модульного ДВМГ-400-10

Положительные результаты экспериментов явились основанием для разработки и испытания источника электромагнитной энергии на базе десяти модульного ДВМГ-400-10. Ожидалось, что в эксперименте предусилитель (СВМГ диаметром 400 мм) обеспечит ток запитки ДВМГ-400-10 $I_{\text{feed}} \sim 7,0 \text{ MA}$. Однако на стадии работы СВМГ произошел пробой входного высоковольтного

изолятора в области узла отключения, так что ДВМГ-400-10 был запитан током 5,3 МА [19]. Кривая производной тока ДВМГ приведена на рис. 13. Результаты предварительного расчета работы ДВМГ-400-10 при токе запитки 7 МА и эксперимента приведены в табл. 3. Анализ показывает, что переход от профилированных модулей к плоским позволяет при сохранении энергетических характеристик ДВМГ диаметром 400 мм семейства «Поток» повысить КПД более чем в два раза – с 7 до 16 %.

Таблица 3

Результаты испытаний и расчета ДВМГ среднего класса с плоскими модулями

Число модулей	1	10	10
I_{feed} , МА	6,7	5,3	7,0
I_{load} , МА	118,1	76,0	120,0
\dot{i}_{load} , МА/мкс	29,7	12,0	32,4
L_0 , нГн	12,7	131,2	127,3
L_{load} , нГн	0,3	4,70	3,8
E_{load} , МДж	3,22	13,57	27,3
τ_e , мкс	23,5	23,6	23,3
$m_{\text{ВВ}}$, кг	3,3	33,0	33,0
ВВ	Эксп.	Эксп.	Расч.

ДВМГ большого класса. Источники энергии на базе ДВМГ диаметром 1000 мм семейства «Поток» с профилированными дисковыми модулями – самые мощные в настоящее время источники, способные обеспечить в нагрузке электромагнитную энергию в сотни мегаджоулей [20]. Переход к плоским модулям позволяет снизить массу заряда в 1,8 раза и поднять КПД генератора с 8 до 20 %. Результаты испытаний и численного моделирования работы ДВМГ диаметром 1000 мм с плоскими модулями приведены в табл. 4 [16].

Таблица 4

Результаты испытаний и расчетов ДВМГ-1000 с плоскими модулями

Число модулей	8	8	1	1
I_{feed} , МА	3,5	3,5	9,0	12,0
I_{load} , МА	107,4	121,4	260,8	280,8
\dot{i}_{load} , МА/мкс	8,9	10,1	17,1	19,4
L_0 , нГн	275,5	275,5	35,0	35,0
L_{load} , нГн	5,4	5,4	0,89	1,08
E_{load} , МДж	31,2	39,2	30,1	41,8
τ_e , мкс	66,0	66,0	64,1	64,1
$m_{\text{ВВ}}$, кг	248,0	248,0	31,0	31,0
ВВ	Эксп.	Эксп.	Эксп.	Расч.

Заключение

Для решения различных проблем физики и техники высоких плотностей энергии, прежде всего в областях УТС [4] и физики твердого тела [21, 22], были разработаны сверхмощные быстродействующие взрывные генераторы электромагнитной энергии (ДВМГ), основанные на эффекте компрессии магнитного потока. ДВМГ способны производить импульсы тока с амплитудой сотни мегаампер и продолжительностью десятки микросекунд. Такие токи позволяют производить в индуктивной нагрузке импульсы электромагнитной энергии до сотен МДж – недостижимой для других импульсных источников энергии величины. Так, самая мощная лабораторная установка Z (Sandia National Laboratories, США), питаемая конденсаторными батареями, производит волны высокого напряжения с продолжительностью на полувысоте первого колебания 100 нс и соответствующие импульсы тока в магнитоизолированной линии с амплитудой 26 МА, временем нарастания 100 нс и длительностью 200 нс, что позволяет получить в индуктивной нагрузке электромагнитную энергию 20 МДж [23], т. е. ниже, чем E_{load} в табл. 4. Ожидается, что при правильной запитке ДВМГ энергия в нагрузке E_{load} будет значительно увеличена [4].

Изначально для достижения необходимой высокой скорости сжатия магнитного потока дисковые модули соответственно профилировались. Профилирование, однако, требует сложной и дорогой технологии, а также много времени на изготовление. Замена дисковых профилированных модулей плоскими и профилирования дисков металлическими вставками с простой топологией, размещаемыми в полостях сжатия между смежными дисками, позволяет значительно уменьшать массу ВВ, увеличить эффективность преобразования энергии ВВ в электромагнитную энергию, упростить технологию изготовления модулей, снизить себестоимость производства в 3–4 раза и сократить время изготовления. Разработано и экспериментально отработано семейство ДВМГ с плоскими модулями, а именно ДВМГ малого (250 мм), среднего (400 мм) и большого (1000 мм) калибра с массой ВВ в модуле 0,9 кг/мод., 3,3 кг/мод. и 31 кг/мод., позволяющих производить энергию 1 МДж/мод., 3 МДж/мод. и 40 МДж/мод. соответственно. С такими ДВМГ выполнена серия экспериментов и численных расчетов. Несмотря на потери магнитного потока в металлических вставках, в экспериментах с ДВМГ с плоскими модулями достигнуто снижение массы ВВ и, соответственно, повышение эффективности преобразования энергии ВВ в электромагнитную энергию в 1,8–2 раза по сравнению с ДВМГ с профилированными дисками того же калибра. Использование плоских дисковых модулей открывает перспективы в проектировании многоцелевых ДВМГ любого калибра без предварительных экспериментальных испытаний.

Использование ДВМГ особенно перспективно для выполнения окончательных уникальных экспериментов в диапазоне энергий, недоступном для стационарных установок, после выполнения серии предварительных экспериментов на таких установках, в результате которых были бы разработаны соответствующие нагрузки (мишени)). Помимо области высоких плотностей энергии ДВМГ могут быть перспективны для проведения моделирующих экспериментов в области атмосферного электричества [24, 25].

Список литературы

1. Fowler C. M., Garn W. B., Caird R. S. Production of very high magnetic fields by implosion // J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. P. 588–594.

2. Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. И. и др. Магнитная кумуляция // ДАН СССР. 1965. Т. 165. С. 65–68.
3. Сахаров А. Д. Взрывомагнитные генераторы // УФН. 1966. Т. 88. С. 725–734.
4. Garanin S. G., Ivanovsky A. I., Mhitar'yan L. S. An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator // Nuclear Fusion. 2011. Vol. 51. P. 103010 [DOI: 10.1088/0029–5515/51/10/103010].
5. Bazanov A. A. Helical magnetocumulative generators with magnetic flux amplification: comparative advantages of amplification schemes and the operational efficiency of generators with dynamic transformation // Techn. Phys. 2011. Vol. 56. P. 1339–1344 [DOI: 10.1134/S1063784211090064].
6. Pak S. V., Babich L. P., Ivanovsky A. I. Fundamentals of electrodynamic technique of numerical designing of helical high-explosive magnetic generators // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2015. Vol. 43. P. 2743–2753 [DOI: 10.1109/TPS.2015.2443378].
7. Chernyshev V. K., Protasov M. S., Shevtsov V. A. First disk explosive magnetic generators // Proc. of the 3rd Int. Conf. Megagauss Magn. Field Generat. Rel. Topics. – Novosibirsk, 1983. P. 23–25.
8. Protasov M. S., Arkhipov B. V., Petrukhin A. A. et al. High-speed disk explosive magnetic generator // Ibid. P. 26–28.
9. Buyko A. M., Kudel'kin V. B., Kuzyayev A. I. et al. Effect of explosives parameters on the performance of a disc explosive magnetic generator // Abstr. 7th Int. Conf. Megagauss Magn. Field Generat. Rel. Topics. – Novosibirsk, 2008. P. 55.
10. Чернышев А. К., Протасов М. С., Швецов В. А. и др. Генераторы семейства «Поток» / Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 1992. Вып. 4. С. 33–41.
11. Demidov V. A., Selemir V. D. Explosive pulsed power for controlled fusion // Proc. of the 11th Int. Conf. Megagauss Magn. Field Generat. Rel. Topics. – London, 2006. P. 77–83.
12. Chernyshev V. K., Vakhrushev V. V., Kudel'kin V. B. Small class (250 mm) disk EMG testing result // Proc. 13th IEEE Int. Pulsed Power Conf. and 28th IEEE Int. Conf. Plasma Science. – Las Vegas, Nevada, 2001. P. 971–973.
13. Demidov V. A., Selemir V. D. Explosive pulsed power for controlled fusion. Megagauss Magnetic Fields and High Energy Liner Technology / Eds. G. F. Kiuttu, P. J. Turchi, R. E. Reinovsky. – Santa Fe, New Mexico, USA, 2007. P. 245–254.
14. Selemir V. D., Demidov V. A., Boriskin A. S. et al. Disk magnetocumulative generator of 480 mm diameter for explosive EMIR facility // Plasma Science. 2010. Vol. 38. P. 1762–1766.
15. Aryutkin M. Yu., Grinevich B. E., Egorychev B. T. et al. A family of disk EMG with flat disk elements // Proc. of Russian Federal Nuclear Center – VNIIEF. In Russian, 2013. Vol. 18. P. 575–580.
16. Гриневич Б. Е., Дудай П. В., Ивановский А. В. и др. Дискосые взрывомагнитные генераторы энергии малого класса // Приклад. механика и техн. физика. 2015. № 1. С. 31–39.

17. Buyko A. M., Danov V. M., Mamyshev V. I., Yakubov V. B. Numerical calculation method for disk explosive magnetic generators (DEMGs) // Proc. of 7th Int. conf. Megagauss Magn. Field Generat. Rel. Topics. – Sarov, 1997. P. 402–406.
18. Chernyshev V. K., Grinevich B. E., Vahrushev V. V., Mamyshev. Scaling Image of ~90 MJ explosive magnetic generators // Megagauss Fields and Pulsed Power Systems / Eds. V. M. Titov, G. A. Shvetsov. – N.Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 347–350.
19. Knoepfel H. Pulsed high magnetic fields. – Amsterdam, London: Norton-Holland Publ. company, 1970.
20. Aryanov V. Yu., Grinevich B. E., Ivanovsky A. V. et al. Experimental determination of limiting capabilities of small-class DEMG // Proc. of 13th Int. Conf. Megagauss Magn. Field Generat. Rel. Topics. – Suzhou, 2010. P. 305–313.
21. Васюков В. А., Глыбин А. М., Дудай П. В. и др. Исследование реологических свойств алюминия с применением взрывомагнитных генераторов // Докл. АН. 2013. Т. 448. С. 285–288.
22. Kaul A. M., Ivanovsky A. V., Atchison W. L. et al. Damage growth and recollection in aluminum under axisymmetric convergence using a helical flux compression generator // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. P. 023516.
23. Spielman R. I., Chantrenne S., McDaniel D. M. Limitations of laboratory pulsed power systems for multi-megagauss field generation // Proc. 11th Int. Conf. Megagauss Magn. Field Generat. Rel. Topics. – London, 2006. P. 271–276.
24. Babich L. P., Boriskin A. S., Dimant E. et al. Simulation of direct effect of the lightning current with employing of a voltage multiplier created on the basis of transportable high explosive magnetocumulative generator // Proc. of Int. Conf. on Lightning and Static Electricity. – Toulouse (France), 1999, ICOLSE 1999-01-2319.
25. Selemir V. D., Demidov V. A. Pulsed power explosive generators for physical studies // Proc. 10th Int. Conf. Megagauss Magn. Field Generat. Rel. Topics. – Berlin, 2005. P. 207–209.

Super-Power Disk Explosive Magnetic Generators of Electromagnetic Energy for High-Energy Densities Research

V. B. Kudel'kin, L. P. Babich, B. E. Grinevich, A. V. Ivanovskii,
A. I. Kraev, E. V. Shapovalov

Multi-module disk explosive magnetic generators (DEMGs) of microsecond pulses of electromagnetic energy up to hundreds MJ, based on the internal explosive energy into electromagnetic energy conversion (magnetic flux compression), are reviewed. Fundamentals of the DEMG operation are outlined. Conventional DEMGs with intricate disk profile are described in short. A numerical technique of DEMG simulations is outlined. Special attention is given to the modernized DEMGs with flat modules of different caliber. At preservation of the output characteristics of the DEMGs with profile discs, the factor of the explosive to electromagnetic energy conversion of the DEMGs with flat discs is two-fold higher; such DEMGs achieve higher speeds, represent a technological advance and are less expensive.