

УДК 537.84

ДИСКОВЫЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2021 г. П. В. Дудай¹, А. А. Зименков¹, А. В. Ивановский^{1,2,*}, К. Н. Климушкин¹, А. И. Краев¹,
В. Б. Куделькин¹, В. И. Мамышев¹, С. М. Полошко¹, З. С. Цибилов¹, Е. В. Шаповалов¹

Представлено академиком РАН С.Г. Гараниным 09.03.2021 г.

Поступило 09.03.2021 г.

После доработки 09.03.2021 г.

Принято к публикации 14.03.2021 г.

Одним из ярких примеров реализации принципа магнитной кумуляции явилось создание в 1980-х годах под руководством В.К. Чернышева уникальных устройств – дисковых взрывомагнитных генераторов, генерирующих рекордные токи до 300 МА. Попытки реализации их аналогов за рубежом до сих пор не увенчались успехом. В работе представлены результаты исследований, завершившихся созданием нового поколения дисковых взрывомагнитных генераторов малого класса с эффективностью преобразования энергии взрывчатого вещества в энергию магнитного поля, более чем в два раза превышающую ранее достигнутый уровень.

Ключевые слова: магнитная кумуляция, дисковый взрывомагнитный генератор, профилированные дисковые элементы, плоские дисковые элементы, электровзрывной размыкатель тока, индуктивная нагрузка

DOI: 10.31857/S2686740021030081

Для исследований свойств веществ и моделирования физических процессов при высоких плотностях энергии, а также для термоядерных исследований, необходимы источники электромагнитной энергии в десятки МДж. В качестве таких источников могут использоваться взрывомагнитные генераторы (ВМГ) [1]. А.Д. Сахаров в 1951 г. высказал идею о переводе энергии взрывчатого вещества в энергию магнитного поля путем быстрой деформации токового контура. Явление было названо магнитной кумуляцией.

ВМГ работают на принципе сохранения магнитного потока $\Phi = LJ$, где J – ток, L – индуктивность токового контура. При деформации контура взрывчатым веществом (ВВ) с сохранением потока его индуктивность падает, ток увеличивается. Одновременно растёт и магнитная энергия W :

$$J = \frac{\Phi}{L} = \frac{L_0}{L} J_0, \quad W = \frac{\Phi^2}{2L} = \frac{L_0}{L} W_0, \quad (1)$$

где L_0, J_0, W_0 – начальные значения индуктивности, тока и магнитной энергии.

Существуют два основных ограничения, накладываемых на скорость сжатия. Во-первых, для минимизации диффузионных потерь потока магнитного поля сжатие должно быть достаточно быстрым или $\frac{dL}{dt} \gg R$, где R – сопротивление контура. Во-вторых, поскольку при быстром изменении потока Φ появляется высокое электрическое напряжение $U = -\frac{LdI}{dt}$, необходимо обеспечить достаточно прочную электрическую изоляцию, предохраняющую от электрических пробоев. Отсюда видно, что для эффективной работы генератора желательно поддерживать напряжение постоянным на максимально допустимой величине. При отсутствии потерь потока это достигается при экспоненциальном законе вывода индуктивности.

В дисковых взрывомагнитных генераторах (ДВМГ) деформируемый контур (рис. 1) образован двумя токопроводами: наружным цилиндрическим и внутренним, выполненным в виде последовательно соединённых тонкостенных медных дисков. Внизу диски попарно соединяются медными цилиндрическими перемычками. Пространство под перемычками заполнено ВВ. Все заряды в ДВМГ инициируются одновременно. Под действием продуктов взрыва соседние диски

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров, Нижегородская обл., Россия

² Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Нижегородская обл., Россия

*E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

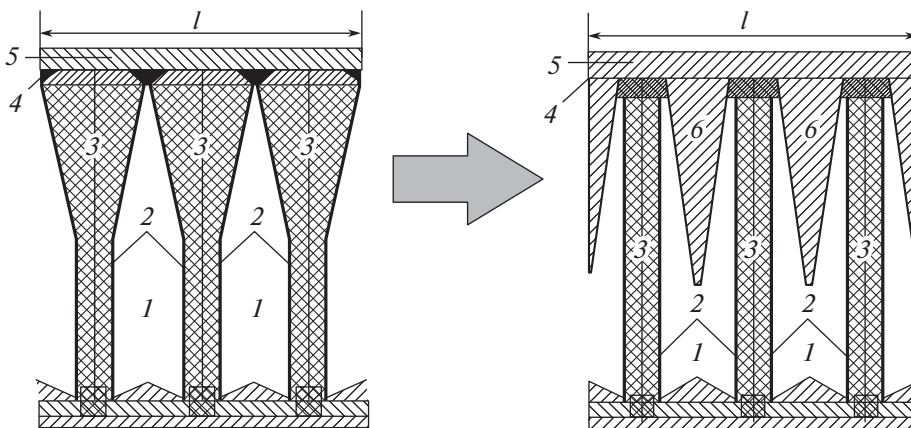


Рис. 1. Эскизы ДВМГ с профилированными и плоскими дисковыми элементами: 1 – полости сжатия; 2 – медные диски; 3 – заряды ВВ; 4 – волновая линия; 5 – обратный токопровод; 6 – металлические инертные вставки.

схлопываются, выводя магнитный поток в коаксиальную передающую линию и нагрузку. Для создания начального потока в ДВМГ применяют спиральные ВМГ (СВМГ) [1].

Быстрый вывод индуктивности в ДВМГ реализуется сжатием токового контура вдоль оси встречным движением поверхностей медных дисков. При этом близкий к экспоненциальному закон вывода индуктивности обеспечивается профилированием дисковых элементов.

ДВМГ были предложены В.К. Чернышевым в 1961 г. Им же и сотрудниками была экспериментально подтверждена их работоспособность [2] – в пятиэлементном генераторе диаметром 400 мм начальный ток в 6.5 МА был увеличен до 90 МА за время ~ 5 мкс; магнитная энергия в нагрузке составила ~ 10 МДж. Возможность увеличения энергии путем наращивания числа элементов была проверена в эксперименте с десятимодульным ДВМГ диаметром 400 мм, в котором амплитуда импульса тока достигла 108 МА, энергии магнитного поля 27.5 МДж.

Исследования 1970–1980-х годов завершились созданием ДВМГ семейства “Поток” с зарядами ВВ диаметром 250, 400 и 1000 мм [3]. Эти генераторы создают токи от 60 до 300 МА за время от 4 до 10 мкс при выходной энергии от 20 до 200 МДж.

Дальнейшее развитие ДВМГ велось по пути упрощения (удешевления) конструкции и увеличения эффективности преобразования энергии ВВ в энергию магнитного поля [4]. Для этих целей предложено перейти от профилированных к плоским дисковым элементам (см. рис. 1) с обеспечением близкого к экспоненциальному закону вывода индуктивности путем помещения в полость сжатия металлических инертных вставок [5].

Ниже представлены результаты первого этапа исследований, направленных на разработку ДВМГ

нового поколения, который завершился разработкой ДВМГ малого класса (диаметр 250 мм).

Экспериментальная отработка конструкции генераторов проводилась с ДВМГ малого класса в составе трех элементов. Начальный поток создавался СВМГ диаметром 100 мм. Результаты эксперимента с оптимизированной конструкцией генератора, работающего на жесткую нагрузку с индуктивностью $L \approx 1.2$ нГн, представлены на рис. 2. Там же приведен результат расчетного прогноза. Видно, что начальный ток генератора ≈ 5.8 МА был усилен до $J \approx 56$ МА за характерное время ≈ 4 мкс (полное время работы генератора ≈ 13.5 мкс). Полная энергия, переданная в нагрузку, составила $LJ^2/2 \approx 1.9$ МДж. С учетом массы ВВ в дисковом элементе 0.75 кг эффективность преобразования энергии ВВ в энергию магнитного поля составила $\eta \approx 0.84$ МДж/(кг ВВ). В ДВМГ семейства “Поток” малого и среднего класса величина $\eta \leq 0.4$ МДж/(кг ВВ).

Возможность увеличения энергии путем наращивания числа дисковых элементов была проверена в эксперименте с 30-модульным ДВМГ диаметром 250 мм (рис. 3), в котором при работе на индуктивность ≈ 10 нГн амплитуда импульса тока достигла 63 МА, энергии магнитного поля ≈ 20 МДж, эффективность преобразования энергии ВВ в магнитное поле $\approx 18\%$. Начальный поток в генераторе, равный ~ 1 Вебер (ток ~ 5.5 МА), создавался специально разработанным для этих целей быстродействующим СВМГ диаметром 400 мм. Для реализации ДВМГ, работающего в составе 30 модулей, была создана новая система инициирования. Ранее генераторы семейства “Поток” эксплуатировались в составе не более 15 элементов.

Пусть начальная кинетическая энергия тарелок дисковых элементов E_k составляет долю η_{ex} от энергии ВВ $E_{ex} - E_k = \eta_{ex} \cdot E_{ex}$. При отсутствии потерь потока и полном переводе кинетической

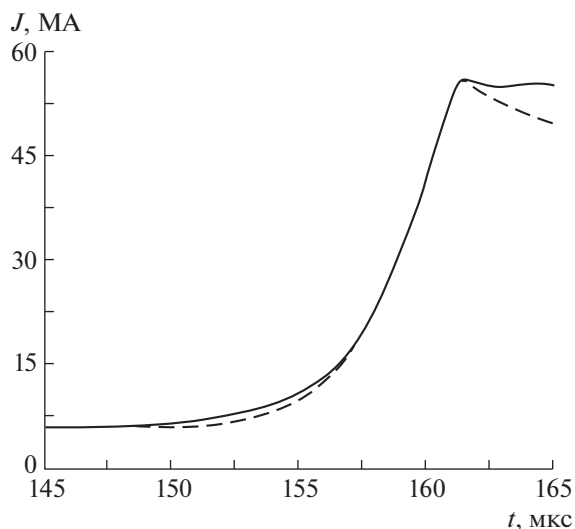


Рис. 2. Зависимости тока от времени в эксперименте с трехэлементным ДВМГ малого класса – сплошная кривая, расчет – штриховая линия.

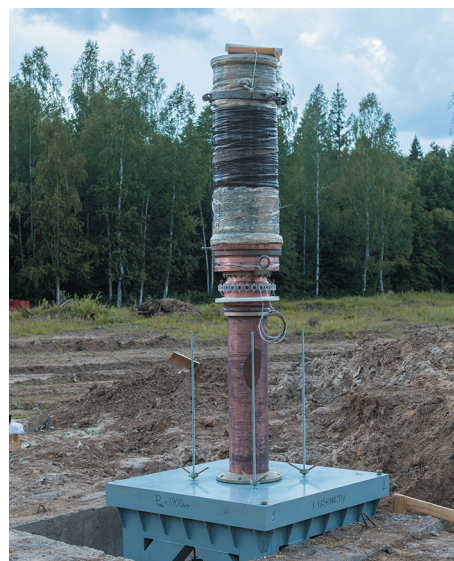


Рис. 3. Внешний вид 30-модульного ДВМГ диаметром 250 мм.

энергии E_k в энергию магнитного поля E_M получаем $E_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi_0^2}{L_k} = \eta_{ex} \cdot E_{ex}$, где Φ_0 – поток, L_k – конечная индуктивность контура ДВМГ. В случае сохранения доли η от начального потока $E_M = \frac{1}{2} \cdot \eta^2 \cdot \frac{\Phi_0^2}{L_k}$ или с учетом предыдущего – $\frac{E_M}{E_{ex}} = \eta_{ex} \eta^2$. Для ДВМГ малого и среднего классов величина $\eta \approx 0.6$.

Согласно формуле Е.И. Забабахина [6], при ускорении ВВ максимальная скорость движения несжимаемой жидкой оболочки W_{sh} связана со скоростью волны детонации D соотношением

$$\frac{W_{sh}}{D} = 1 + \frac{27}{16\alpha} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{32\alpha}{27}} \right),$$

где α – отношение масс единицы площади ВВ (m_{ex}) и оболочки (m_{sh}).

Исходя из этого, эффективность преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию тарелей дискового элемента ДВМГ оценивается из

$$\begin{aligned} \eta_{ex} &= 2 \cdot \frac{m_{sh} \cdot W_{sh}^2 / 2}{m_{ex} \cdot D^2 / 16} = \\ &= \frac{16}{\alpha} \cdot \left[1 + \frac{27}{16\alpha} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{32\alpha}{27}} \right) \right]^2. \end{aligned}$$

Величина η_{ex} достигает максимального значения $\eta_m \approx 70\%$ при $\alpha = \frac{81}{32} \left(W_{sh} = \frac{D}{3} \right)$.

Таким образом, реализованная эффективность преобразования энергии ВВ в энергию магнитного

поля $g \approx 18\%$ близка к теоретическому пределу $\frac{E_M}{E_{ex}} = \eta_m \eta^2 \approx 25\%$. Дальнейшее совершенствование ДВМГ по этому критерию, по-видимому, бессмысленно.

Для сокращения времени нарастания тока в ДВМГ нового поколения применяются малоиндуктивные электровзрывные размыкатели тока, выполненные в виде “змейки” [7]. На рис. 4 приведены результаты испытания ДВМГ нового поколения в составе 30 элементов, оснащенного электровзрывным размыкателем тока. Ток в нагрузке с индуктивностью ≈ 4 нГн составил ≈ 40 МА при времени нарастания ≈ 2 мкс. Время нарастания тока может быть сокращено до ≈ 1 мкс путем подбора момента срабатывания взрывного замы-

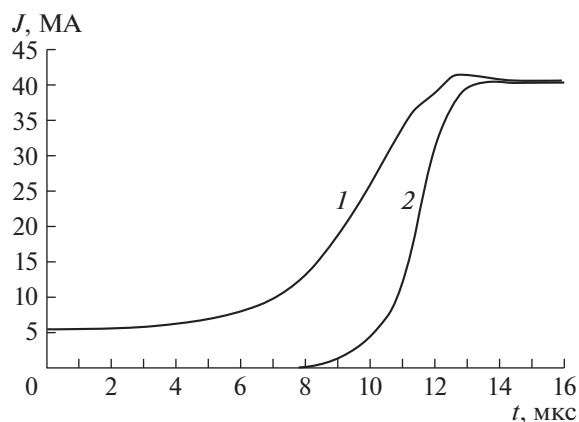


Рис. 4. Зависимости токов в цепи генератора (1) и в нагрузке (2) от времени.

кающего ключа, размещенного за размыкателем тока, или использованием вместо него разрядника-обострителя. В опыте взрывной замыкающий ключ сработал при напряжении на электровзрывном размыкателе тока ≈ 20 кВ.

Таким образом, создан ДВМГ малого класса нового поколения с эффективностью преобразования энергии ВВ в энергию магнитного поля, более чем в два раза превышающую ранее достигнутый уровень. В дальнейшем предполагается реализовать ДВМГ среднего класса (диаметр 400 мм). Простая конструкция и развитые расчетные методы ставят задачу проектирования ДВМГ без предварительной экспериментальной отработки с оптимальным для заданной нагрузки диаметром дисковых элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриневич Б.Е., Демидов В.А., Ивановский А.В., Селемир В.Д. // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 4. С. 422–427.
2. Чернышев В.К., Протасов М.С., Шевцов В.А. / Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Труды Мегагаусс-III / Под ред. В.М. Титова, Г.А. Швецова. М.: Наука, 1984. С. 23–25.
3. Чернышев В.К., Протасов М.С., Шевцов В.А. и др. // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. № 4. С. 33–41.
4. Чернышев В.К. // Труды международного семинара. Гидродинамика высоких плотностей энергии / Под ред. Г.А. Швецова. Новосибирск, 2004. С. 12–23.
5. Чернышев В.К., Вахрушев В.В., Мамышев В.И. // Труды междунар. семинара. Гидродинамика высоких плотностей энергии / Под ред. Г.А. Швецова. Новосибирск, 2004. С. 224–228.
6. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. С. 110.
7. Chernyshev V.K., Kucherov A.I., Mezhevov A.I., Vakhruшев V.V. / In: Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Baltimore, Maryland, USA. 1997. Ed. G. Cooperstein, I. Vitkovitsky, Omnipress. P. 1208–1212.

NEW GENERATION OF DISK EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS

**P. V. Duday^a, A. A. Zimenkov^a, A. V. Ivanovskiy^{a,b}, K. N. Klimushkin^a, A. I. Krayev^a,
V. B. Kudel'kin^a, V. I. Mamyshev^a, S. M. Polyushko^a, Z. S. Tsibikov^a, and E.V. Shapovalov^a**

^a Russia Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov, Nizhnii Novgorod Region, Russian Federation

^b Sarov Physicotechnical Institute NRNU MEPhI, Sarov, Nizhnii Novgorod Region, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS S.G. Garanin

One of the striking examples of implementation of the magnetic cumulation principle was a creation under V.K. Chernyshev's leadership in the 80s of the last century of the unique devices, i.e. disk explosive magnetic generators (DEMG) producing record currents up to 300 MA. The attempts to realize their analogues abroad have not been a success so far. The paper presents the results of the studies that culminated in the creation of a new generation of small class DEMGs with the efficiency of HE energy conversion into magnetic field energy more than twice the previously achieved level.

Keywords: magnetic cumulation, disk explosive magnetic generator, profiled disk elements, flat disk elements, electrically exploded current opening switch, inductive load