

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПИРАЛЬНОГО ВМГ С ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МДЖ

SUMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE HELICAL MCG WITH OUTPUT ENERGY OF 10 MJ

В. А. Демидов, С. А. Казаков, Ю. В. Власов, А. С. Борискин, С. Н. Голосов, А. А. Агапов

V. A. Demidov, S. A. Kazakov, Y. V. Vlasov, A. S. Boriskin, S. N. Golosov, A. A. Agapov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Для эффективной работы многоэлементных дисковых взрывомагнитных генераторов (ДВМГ) требуются большие начальные токи. Запитка ДВМГ обеспечивается предусилителем энергии – спиральным ВМГ. Из-за наличия в многоэлементных дисковых генераторах большого количества контактных соединений, расположенных на малом радиусе, запитку ДВМГ необходимо осуществлять за короткое время, т. е. предусилитель должен быть быстроходным.

В докладе представлены результаты первого эксперимента с быстроходным спиральным ВМГ с внутренним диаметром витков 320 мм. При запитке энергией 120 кДж генератор в нагрузке 300 нГн, равной начальной индуктивности 15-элементного ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм, обеспечил ток 8,4 МА (магнитную энергию 10,4 МДж) с характерным временем нарастания 38 мкс.

High initial currents are required for the effective work of the multi-element disk magneto-cumulative generators (DMCG). The DMCG is powered by the energy preamplifier (helical MCG). The DMCG should be powered during a short time period because of the large quantity of small contact connections in the multi-element disk generators, located at small radius, so the preamplifier should be of high-speed.

The results of the first experiment with a high-speed helical MCG with an internal diameter of rings of 320 mm are presented in the report. The generator provided the current of 8.4 MA (magnetic energy of 10.4 MJ) with a characteristic rise time of 38 μ s in the load of 300 nH, that is equal to the initial inductance of fifteen-element DMCG with HE charges of 480 mm diameter.

Введение

Энергетической основой создающейся во ВНИИЭФ установки ЭМИР, предназначенной для генерирования мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения, являются дисковые взрывомагнитные генераторы (ДВМГ) с зарядами ВВ диаметром 480 мм (ДВМГ480) [1, 2]. Их ток в нагрузках ~ 20 нГн должен составлять 100 МА, а магнитная энергия более 100 МДж.

Для обеспечения столь высокой энергии необходимо применять 15–20 элементные ДВМГ480, для запитки которых требуется ток ~ 10 МА. Увеличение разрядного тока конденсаторной батареи до значений входного тока ДВМГ производится предусилителем энергии – спиральным ВМГ. На-

чальная индуктивность 15-элементного ДВМГ480 (ДВМГ480-15) равна 300 нГн, энергия запитки ~ 15 МДж.

Предусилитель для запитки ДВМГ480-15 создавался на основе высокоиндуктивной спирали с внутренним диаметром витков 320 мм (СВМГ320) [6, 7]. Для снижения характерного времени нарастания тока (τ_c) в конце работы предусилителя в нем применена конусная центральная труба с разнотолщинной стенкой и конусный заряд ВВ на основе октогена. Номинальная энергия запитки W_0 спирального генератора от емкостного источника составляет ~ 220 кДж. Первый опыт был проведен при пониженной энергии $W_0 \sim 120$ кДж.

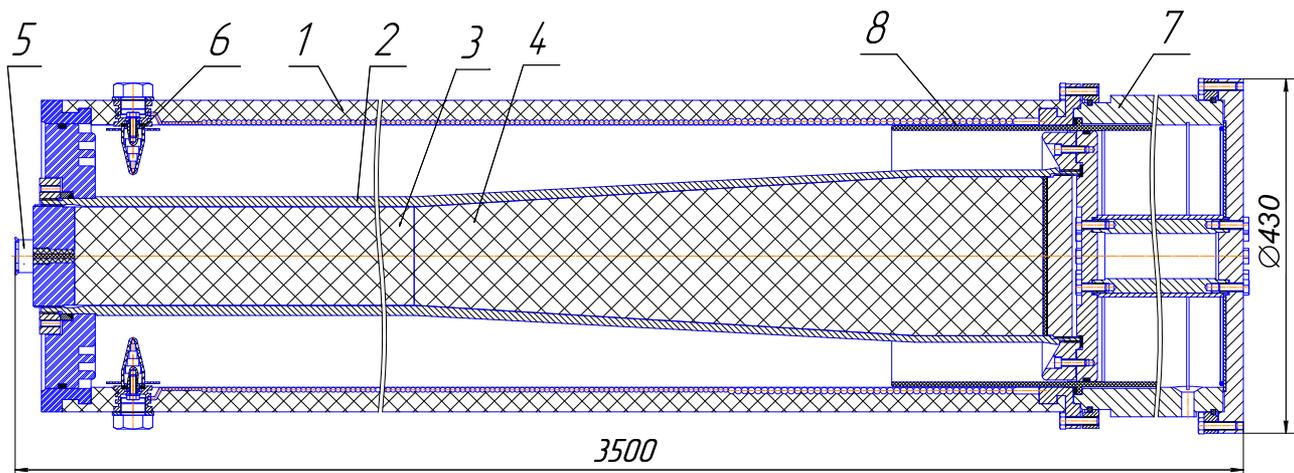


Рис. 1. Спиральный предусилитель энергии: 1 – спираль, 2 – центральная труба, 3, 4 – заряды (ВВ), 5 – детонатор, 6 – кроубар, 7 – нагрузка, 8 – изолятор

Описание спирального ВМГ

Отличительной особенностью СВМГ320 является генерирование большого количества магнитной энергии в сравнительно высокоиндуктивной нагрузке.

Общий вид устройства представлен на рис. 1. СВМГ320 имеет соленоид, состоящий из 15 секций длиной 80 и 160 мм. Изоляция витков – фторопласт толщиной 0,7 мм. Общая длина спирали равна 1600 мм.

Внешний вид центральной трубы представлен на рис. 2. Наружный диаметр цилиндрической части трубы равен 145 мм, толщина стенки – 12 мм. Максимальный диаметр большего основания конуса трубы равен 210 мм, внутренний диаметр – 194 мм, высота конуса 610 мм. Масса зарядов ВВ в генераторе составляет ~50 кг.



Рис. 2. Центральная труба ВМГ-320

Нагрузка индуктивностью 0,3 мкГн представляет собой коаксиал, выполненный из алюминиевых сплавов и меди. Внутренний диаметр наружного токопровода равен 320 мм, диаметр внутреннего стержня – 100 мм, длина коаксиала составляет 1290 мм.

В нагрузке располагались индукционные и магнитооптические датчики для измерения тока генератора.

Результаты расчетов

Расчет работы СВМГ-320 проводился по методике [3]. Распределение витков по длине соленоида выбиралось исходя из обеспечения минимальных напряжений в объеме генератора [4]. Шаг витков изменялся от 20 мм – на первой секции, до 256 мм – на последней. Начальная индуктивность СВМГ320 равна 67 мкГн. Зависимость изменения индуктивности предусилителя от времени представлена на рис. 3. На этом же рисунке приведена кривая роста тока в нагрузке при запитке СВМГ320 начальным магнитным потоком 5,0 Вб ($I_0 = 75$ кА).

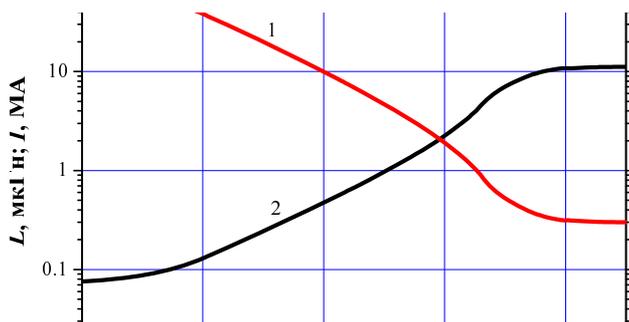


Рис. 3. Результаты расчета СВМГ-320: 1 – индуктивность генератора, 2 – ток. Время – от замыкания контура

Видно, что максимальный ток достигает ~ 11 МА, характерное время нарастания тока (в e раз) равно 38 мкс.

Максимальное расчетное напряжение, действующее между точкой контакта «спираль – труба» и витками при запитке потоком 5 Вб, составляет 75 кВ. По расчету осевое критическое смещение витков последней секции спирали [5] достигается за ~5 мкс до конца работы генератора, что, очевидно, не может привести к заметному снижению тока в эксперименте.

Результаты испытания ВМГ

В опыте ВМГ запитывался от конденсаторной батареи емкостью 3000 мкф при зарядном напряжении ~15 кВ. Ток запитки составил 59,5 кА (рис. 4). Начальная магнитная энергия равна ~120 кДж, магнитный поток – 4 Вб.

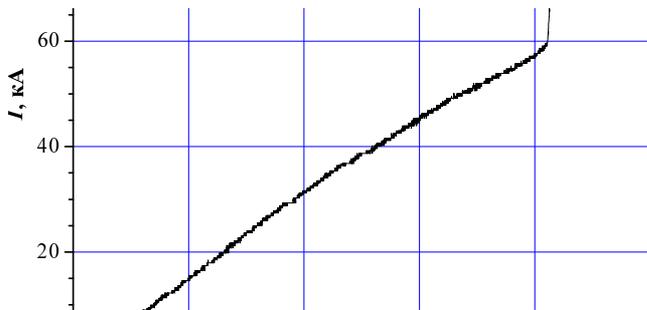


Рис. 4. Ток запитки СВМГ-320

Зависимости экспериментальной и расчетной (при начальном потоке 4 Вб) производных тока приведен на рис. 5. Максимальная производная тока, полученная в опыте, составляет $1,8 \cdot 10^{11}$ А/с.

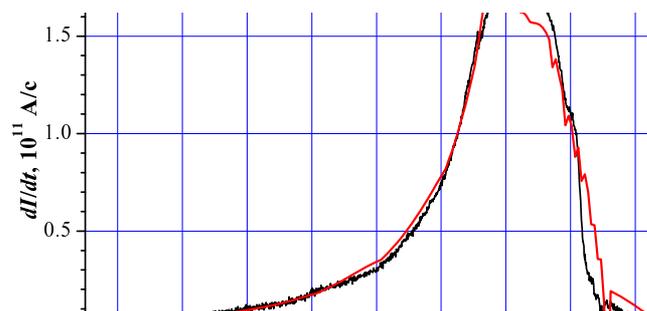


Рис. 5. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости производной тока от времени

Ток генератора, измеренный разными методами в опыте, представлен на рис. 6.

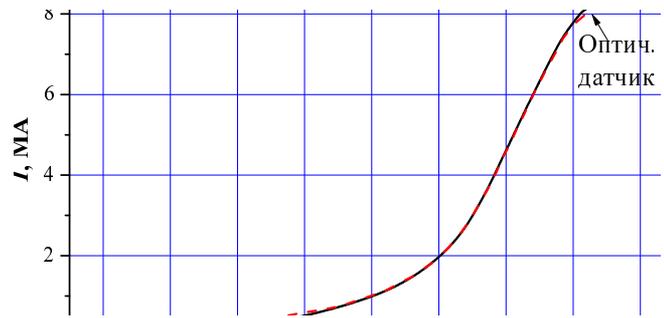


Рис. 6. Зависимость изменения тока от времени, полученная по индукционной и магнитооптической методикам

На рис. 7 для сравнения приведены расчетная и экспериментальная зависимости тока от времени.

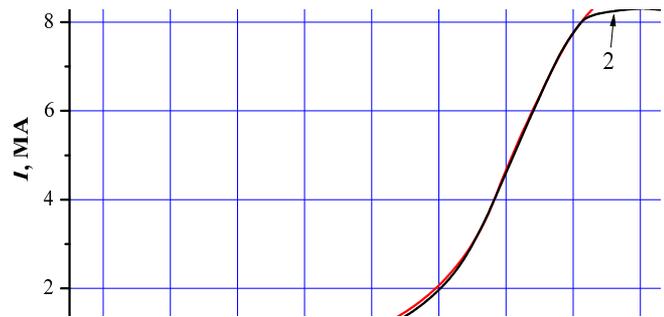


Рис. 7. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости изменения тока от времени

Максимальный ток в генераторе равен 10,4 МА, характерное время нарастания тока на конечном этапе работы СВМГ380 составляет 38 мкс. Магнитная энергия в нагрузке равна 10,6 МДж. Напряжение на входе в нагрузку достигает ~55 кВ. Полученные в опыте характеристики хорошо совпадают с расчетными.

На рис. 8 приведен график изменения коэффициента сохранения магнитного потока от времени работы генератора.

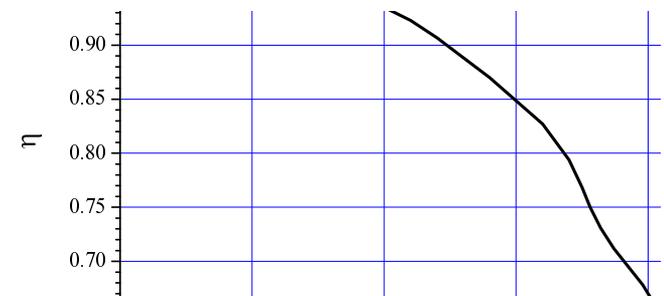


Рис. 8. График изменения коэффициента сохранения магнитного потока

Высокое конечное значение этого коэффициента ($\sim 0,63$) объясняется хорошим качеством изготовления соленоида и центральной трубы, а также сравнительно большими размерами генератора (масштабный эффект) [6, 7]. Коэффициент усиления энергии генератора при работе на относительно высокоиндуктивную нагрузку составляет ~ 90 .

Заключение

Проведены расчетные исследования и взрывное испытание спирального ВМГ320 – предусилителя энергии, предназначенного для запитки токама 10 МА дискового 15-элементного генератора диаметром 480 мм с начальной индуктивностью 300 нГн. Расчетно выбрано такое распределение витков вдоль оси соленоида, при котором максимальное напряжение в объеме генератора в течении большей части времени нарастания тока имеет заданную величину, которая не превышает пробойных значений для изоляции этого устройства.

Первый эксперимент с генератором проведен при пониженной в $\sim 1,5$ раза начальной энергии. В опыте СВМГ320 с начальной индуктивностью 67 мкГн был запитан током ~ 60 кА, (магнитный поток – 4 Вб, магнитная энергия – 120 кДж). В жесткой нагрузке 300 нГн разными методиками измерений зафиксирован максимальный ток 8,4 МА с характерным временем нарастания тока 38 мкс, получена магнитная энергия 10,6 МДж. В эксперименте СВМГ320 работал с высоким значением коэффициента сохранения магнитного потока – 0,63 и усиления энергии ~ 90 . Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

Полученные расчетные и экспериментальные данные показывают, что повышение начального магнитного потока в предусилителе до ~ 5 Вб по-

зволит получить в нагрузке ток 10 МА и энергию ~ 15 МДж, необходимые для запитки ДВМГ480-15.

Список литературы

1. Selemir V. D., Demidov V. A., and Repin P. B. Explosive Electrophysical Complex EMIR: Current State and Perspectives // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol 38, N 8. P. 1754–1757.
2. Selemir V. D., Demidov V. A., Boriskin A. S. et al Disk Magnetocumulative Generator of 480-mm Diameter for Explosive EMIR Facility. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol 38, N8. P. 1762–1767.
3. Власов Ю. В., Голосов С. Н., Демидов В. А., Казаков С. А. Расчетное моделирование системы взрывамагнитный генератор – магнитоплазменный компрессор // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения / Под ред. Чернышева В.К., Селемира В.Д., Пляшкевича Л.Н.. Саров. ВНИИЭФ. 1997. С. 500–504.
4. Demidov V.A. Problems of Creation of High-Efficient Magnetocumulative Generators. Electric Strength of Helical Magnetocumulative Generators. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol. 38, N 8. P. 1773–1779.
5. Demidov V. A. Limitations of the Fast Operation of Helical Magneto-Cumulative Generators. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol. 38, N8. P. 1780–1783.
6. Chernyshev V. K. Zharinov E. I. Demidov V. A., and Kazakov S. A. High – Inductance Explosive Magnetic Generators with High Energy Multiplication. // MG – 2. Megagauss Physics and Technology. / P. J. Turchi, Ed. N.Y. – L.: Plenum Press. 1980. P. 641–646.
7. Демидов В. А., Жаринов Е. И., Казаков С. А., Чернышев В. К. Высокоиндуктивные взрывамагнитные генераторы с большим коэффициентом усиления энергии. // ПМТФ. № 6. 1981. С. 106–111.