

УДК 534.222.2:621.3

ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИРАЛЬНОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ДИАМЕТРОМ 280 мм

В. А. Демидов, С. А. Казаков, А. С. Борискин, Ю. В. Власов,
В. А. Яненко, Н. И. Николаев, С. И. Володченков

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия

E-mails: demidov@ntc.vniief.ru, SAKazakov@vniief.ru, AISBoriskin@vniief.ru,
YVVlasov@vniief.ru, VAYanenko@vniief.ru, NINikolaev@vniief.ru,
SIVolodchenkov@vniief.ru

Рассмотрены возможности увеличения энергии и мощности преусилителя дисковых взрывомагнитных генераторов: использование в центральной трубе более мощного (на основе октогена) конического заряда взрывчатого вещества, устройства дожатия магнитного потока с осевым инициированием заряда взрывчатого вещества, увеличение внутреннего диаметра спирали. Разработан ВМГ мощностью ≈ 400 ГВт с внутренним диаметром спирали 280 мм (ВМГ-280), способный запитывать 10-элементный ДВМГ480 с начальной индуктивностью $\approx 0,2$ мкГн током ≈ 10 МА с характерным временем нарастания (в e раз на конечном этапе работы) $\tau_e = 32$ мкс.

Ключевые слова: спиральный взрывомагнитный генератор, дисковый взрывомагнитный генератор, преусилитель, мощность, характерное время нарастания тока.

Введение. Энергетической основой электрофизического рентгеновского комплекса ЭМИР [1] являются многоэлементные дисковые взрывомагнитные генераторы (ДВМГ) с зарядами взрывчатого вещества (ВВ) диаметром 480 мм [2, 3]. Для формирования в нагрузке быстронарастающего импульса тока ≈ 30 МА применяется генератор с начальной индуктивностью $L_0 \approx 0,2$ мкГн, состоящий из 10 дисковых кассет (элементов). Генератор работает при начальном токе ≈ 10 МА, что соответствует магнитной энергии ≈ 10 МДж.

Для питания многоэлементных ДВМГ во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики традиционно используются [3] преусилители — спиральные ВМГ диаметром 240 мм [2–4], различные модификации которых создают в дисковых генераторах диаметром 400 ÷ 1000 мм с начальной индуктивностью 60 ÷ 340 нГн токи 5 ÷ 15 МА и энергию до 8 МДж [2–4].

При разработке преусилителя для ДВМГ480-10 в качестве базовой модели был выбран спиральный генератор ВМГ-240, который начиная с 80-х гг. XX в. многократно применялся для запитки ДВМГ диаметром 1000 мм [3, 4].

Для повышения энергии и мощности преусилителя требовалось оптимизировать спираль. Кроме того, исследовалась эффективность использования более энергоемкого заряда ВВ, возможность применения дополнительного узла сжатия магнитного потока с осевым

иницированием заряда ВВ и увеличения внутреннего диаметра спирали с соответствующим увеличением диаметров центральной трубы и заряда ВВ. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Представлены результаты разработки спирального ВМГ-280.

1. Базовая модель предусилителя. Спиральный генератор ВМГ-240 (рис. 1) был создан для запитки ДВМГ с зарядами ВВ диаметром ≈ 1000 мм током более 12 МА [3–5]. Внутренний диаметр секционированной спирали составляет 240 мм, ее длина — 1200 мм.

Распределение индуктивности по длине рассчитано по известному закону [6] в предположении постоянства максимального рабочего напряжения между центральной трубой и витками спирали в течение всего периода работы ВМГ. Расчеты параметров спирали проведены таким образом, чтобы при начальном магнитном потоке $\Phi_0 = 3$ Вб максимальное внутреннее напряжение не превышало 45 кВ, а магнитное поле под витками последних секций спирали ограничивалось величиной ≈ 1 МГс [3]. Изоляция витков спирали из полимерных пленок выдерживает импульсное напряжение более 60 кВ.

Под последними шестью секциями спирали центральная медная труба с внешним диаметром 109 мм (диаметр заряда ВВ 90 мм) имеет конусное расширение (внешний диаметр трубы увеличивается до 157 мм, внутренний диаметр — до 144 мм). Заряд ВВ выполнен из состава ТГ 30/70, масса заряда в центральной трубе ≈ 21 кг.

ВМГ-240 имеет начальную индуктивность $L_0 = 115$ мкГн. На рис. 2 приведены экс-



Рис. 1. Внешний вид генератора ВМГ-240

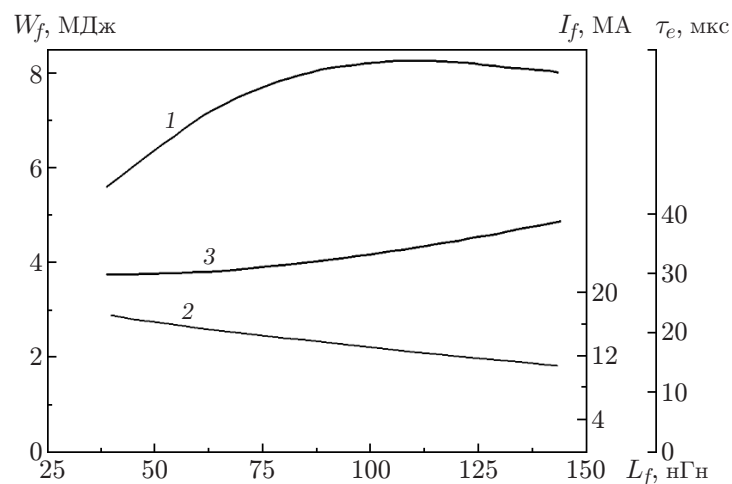


Рис. 2. Зависимости магнитной энергии W_f (1), максимального тока I_f (2) и характерного времени нарастания тока τ_e (3) в ВМГ-240 от индуктивности нагрузки L_f

периментальные зависимости конечного тока I_f , энергии W_f и характерного времени нарастания тока τ_e от индуктивности нагрузки генератора [3].

2. Модернизация предусилителя ВМГ-240. Оптимальная с точки зрения генерации максимальной магнитной энергии нагрузка базового предусилителя ВМГ-240 составляет ≈ 110 нГн (см. рис. 2). Для эффективной работы ВМГ-240 на нагрузку с индуктивностью $\approx 0,2$ мкГн необходимо другое распределение витков вдоль оси генератора, поэтому были изменены все параметры спирали диаметром 240 мм, кроме ее длины (1200 мм). Расчет параметров спирали проводился при следующих условиях: начальный магнитный поток ≈ 4 Вб, максимальное напряжение в объеме генератора ≈ 50 кВ, коэффициент усиления энергии ≈ 70 . На конечном этапе работы генератора увеличение скорости изменения индуктивности, необходимое для уменьшения характерного времени нарастания тока, обеспечивалось за счет уменьшения шага витков в последней секции с 240 до 192 мм. Электрическая прочность генератора обеспечивалась пленочной изоляцией на витках спирали. Для повышения электрической прочности ВМГ его внутренняя полость заполнялась газом SF₆ при повышенном давлении.

Проведено испытание предусилителя с модернизированной спиралью [3]. В эксперименте использовалась такая же центральная труба, как и в базовом генераторе ВМГ-240. Отличием являлось то, что в конической части трубы вместо заряда из состава ТГ 30/70 использовался заряд конусообразной формы из более мощного состава ВВ на основе октогена.

Начальная индуктивность модернизированного ВМГ-240 равна 74 мкГн. При токе запитки $I_0 = 60$ кА (магнитный поток $\Phi_0 = 4,4$ Вб) в нагрузке с индуктивностью $L_l = 0,2$ мкГн получен ток $\approx 9,2$ МА, магнитная энергия $W_f \approx 8,5$ МДж (коэффициент усиления энергии ≈ 65). Характерное время нарастания тока τ_e , определяющее быстроходность генератора, уменьшилось в 1,25 раза и составило 28 мкс. Максимальная производная тока $\approx 2,6 \cdot 10^{11}$ А/с, мощность генератора ≈ 350 ГВт. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости тока и его производной от времени.

Высокая быстроходность ВМГ (уменьшение значения τ_e с 35 до 28 мкс) достигнута за счет увеличения скорости изменения индуктивности на конечном этапе работы генератора вследствие увеличения плотности витков на последних секциях спирали и использования в конической части центральной трубы более мощного заряда ВВ.

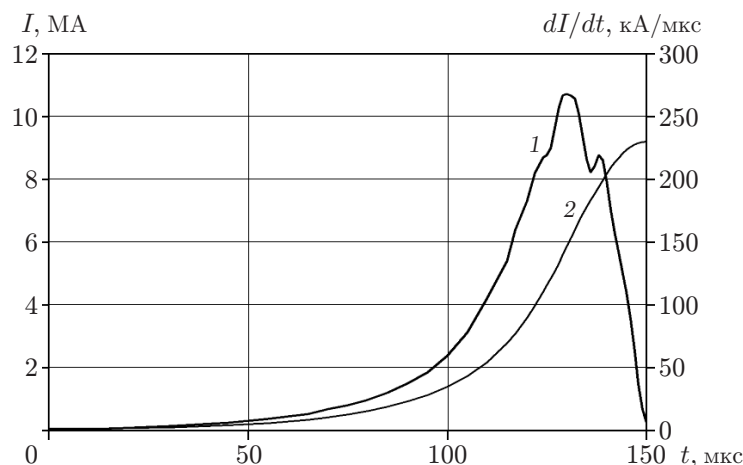


Рис. 3. Экспериментальные зависимости производной тока (1) и тока (2) от времени

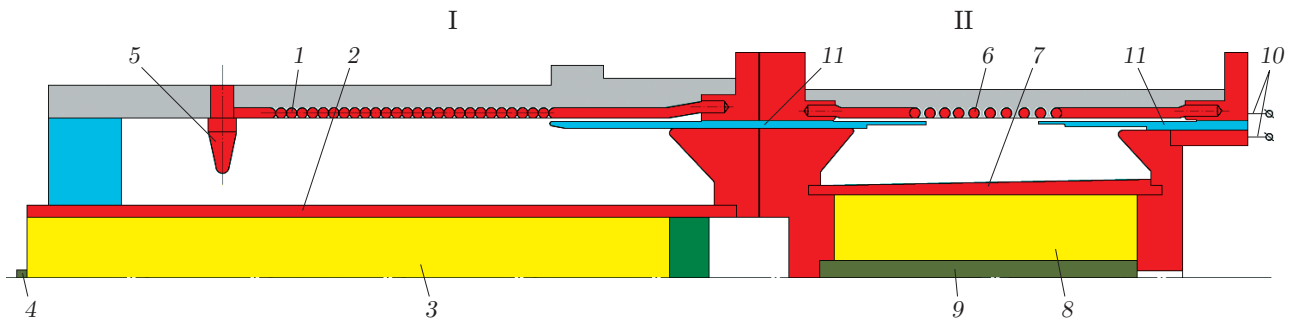


Рис. 4. Спиральный ВМГ (I) с устройством дожата магнитного потока (II):
 1 — многосекционная спираль, 2 — центральная труба, 3 — заряд ВВ, 4 — электродетонатор, 5 — кроубар, 6 — односекционная спираль, 7 — труба УДМП, 8 — заряд ВВ, 9 — система осевого иницирования заряда ВВ, 10 — электроды, 11 — изоляторы

3. Предусилитель с дополнительным узлом сжатия магнитного потока. Применение центральных труб с коническим расширением в направлении нагрузки обусловлено необходимостью увеличения энергии и быстродействия спиральных ВМГ. Однако изготовление таких труб и зарядов ВВ для них требует больших финансовых затрат. Поэтому разработан предусилитель, состоящий из двух последовательно соединенных спиралей диаметром 240 мм, внутри которых размещены цилиндрические трубы. В первой (высокоиндуктивной) спирали длиной 1200 мм используется медная труба с зарядом ВВ, иницируемым с торца, а во второй (низкоиндуктивной) спирали — устройстве дожата магнитного потока (УДМП) — труба с зарядом ВВ, который иницируется по оси одновременно по всей его длине. Схема конструкции предусилителя с устройством дожата магнитного потока представлена на рис. 4.

Подрыв заряда ВВ в УДМП проводится таким образом, чтобы к моменту окончания работы высокоиндуктивной спирали разлетающаяся труба УДМП приобрела максимальную радиальную скорость. Сжатие магнитного потока осуществляется одновременно по всей длине УДМП, что обеспечивает высокую скорость изменения индуктивности и нарастания тока.

Расчеты характеристик такого устройства проводились с использованием модифицированной численной модели ВМГ [7]. На основе результатов этих расчетов выбирались конструкция и режим работы предусилителя, обеспечивающие получение в нагрузке с индуктивностью 0,2 мкГн тока ≈ 9 МА при ограничении напряжения на входе в нагрузку значением 80 ÷ 90 кВ. Варьировались время включения УДМП, параметры последних секций высокоиндуктивной спирали, профиль трубы УДМП.

Результаты расчетов показывают, что поставленным условиям удовлетворяет устройство, в котором высокоиндуктивная спираль выполнена на основе спирали модернизированного ВМГ-240. В генераторе с такой спиралью применяется медная центральная труба с внешним диаметром 109 мм и длиной ≈ 1600 мм. Диаметр заряда ВВ из состава ТГ 30/70 равен 90 мм. Шаг витков многозаходной спирали УДМП длиной ≈ 350 мм составляет 192 мм. Внутренний диаметр медной трубы УДМП равен 125 мм. Толщина стенки трубы линейно увеличивается в направлении нагрузки с 6 до 7 мм. В трубе используется заряд ВВ из состава ТГ 30/70 с внутренним отверстием, предназначенным для размещения системы осевого иницирования. Сжатие магнитного потока в УДМП заканчивается через 9 мкс после окончания работы высокоиндуктивного ВМГ. В таком устройстве расчетное максимальное напряжение на выходе не превышает 80 кВ.

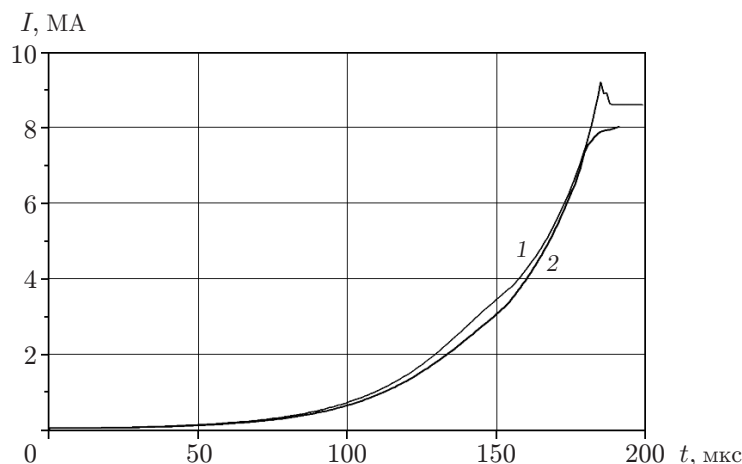


Рис. 5. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости тока предусилителя с УДМП от времени

Начальная индуктивность предусилителя ≈ 90 мкГн, начальная индуктивность УДМП составляет $\approx 0,3$ мкГн. Внутренние полости предусилителя заполняются газом SF_6 при повышенном давлении.

Испытание предусилителя с УДМП проведено при начальном магнитном потоке $\approx 4,4$ Вб. Максимальная производная тока ВМГ составила $3 \cdot 10^{11}$ А/с. В нагрузке с индуктивностью $0,2$ мкГн зарегистрирован ток 8 МА с характерным временем нарастания 36 мкс, магнитная энергия $W_f \approx 6,4$ МДж. Мощность генератора достигла ≈ 420 ГВт.

Сравнение зависимостей тока от времени, представленных на рис. 5, показывает, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными. Уменьшение экспериментальных значений тока на конечном этапе работы генератора по сравнению с расчетными значениями обусловлено, по-видимому, потерей части сжимаемого магнитного потока в пленочной изоляции УДМП.

4. Предусилитель со спиралью диаметром 280 мм. Разработан предусилитель с увеличенным до 280 мм внутренним диаметром спирали. Параметры секций спирали (шаг витков, количество заходов, диаметр и изоляция проводов) такие же, как в модернизированном ВМГ-240. Внешний диаметр цилиндрического участка центральной трубы равен 120 мм, толщина стенки — $9,5$ мм. На коническом участке внешний диаметр трубы увеличивается до 168 мм при толщине стенки 7 мм. Цилиндрический заряд ВВ выполнен из состава ТГ 30/70, конический — из состава на основе октогена. Масса ВВ в предусилителе ВМГ-280 на 22% больше, чем в модернизированном ВМГ-240.

Начальная индуктивность генератора составляет 100 мкГн. Взрывной эксперимент с ВМГ-280 проведен при запитке предусилителя начальным магнитным потоком $4,6$ Вб.

В нагрузке с индуктивностью $\approx 0,2$ мкГн, эквивалентной индуктивности ДВМГ480-10, получен ток ≈ 10 МА. Зависимость тока от времени представлена на рис. 6. Максимальная производная тока составляет $3,5 \cdot 10^{11}$ А/с, характерное время нарастания тока ≈ 32 мкс, величина магнитной энергии, запасенной в нагрузке, ≈ 10 МДж. Мощность генератора составляет ≈ 400 ГВт.

Заключение. Проведены расчетные и экспериментальные исследования спиральных ВМГ с целью создания предусилителя, предназначенного для запитки энергией ≈ 10 МДж 10-элементного ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм. Новый спиральный ВМГ разработан на базе предусилителя энергии со спиралью диаметром 240 мм (ВМГ-240), име-

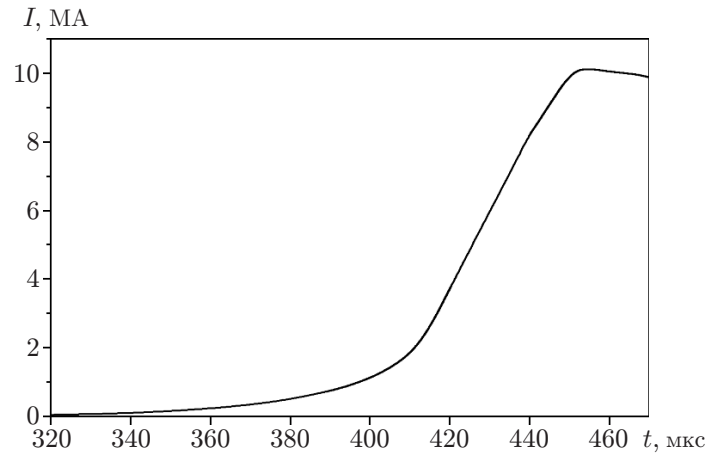


Рис. 6. Экспериментальная зависимость тока ВМГ-280 от времени

ющего энергию на выходе ≈ 8 МДж и мощность ≈ 300 ГВт. Исследовано три варианта конструкции предусилителя.

В модернизированном ВМГ-240 за счет оптимизации распределения витков спирали и увеличения энергоемкости заряда ВВ внутри трубы характерное время нарастания тока в нагрузке с индуктивностью $0,2$ мкГн уменьшилось в $1,25$ раза и составило 28 мкс. Мощность предусилителя возросла до 350 ГВт. Однако выходные характеристики модернизированного генератора ВМГ-240 (ток $9,2$ МА и запасенная энергия $8,5$ МДж) не позволяют применять его для оптимальной запитки дискового генератора.

В предусилителе с цилиндрическим лайнером, содержащим устройство дожатия магнитного потока с осевым иницированием заряда ВВ, удалось увеличить мощность до 420 ГВт, но ток и энергия, полученные на выходе из этого генератора, не достигли заданных значений. Для повышения выходных характеристик такого предусилителя необходимо проведение дополнительных исследований.

Задачу создания источника запитки 10 -элементного ДВМГ480 удалось решить путем разработки спирального ВМГ-280, в котором диаметр спирали увеличен с 240 до 280 мм, радиальные размеры центральной трубы также увеличены. При испытании ВМГ-280, имеющего начальную индуктивность 100 мкГн, в нагрузке с индуктивностью $0,2$ мкГн получены требуемые значения тока ≈ 10 МА и энергии ≈ 10 МДж. Характерное время нарастания тока $\tau_e = 32$ мкс. Мощность ВМГ-280 составляет ≈ 400 ГВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Selemir V. D., Demidov V. A., Repin P. B.** Explosive electrophysical complex EMIR: current state and perspectives // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 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. V. 38, N 8. P. 1762–1767.
3. **Магнитокумулятивные генераторы — импульсные источники энергии:** Моногр.: В 2 т. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2012. Т. 1.
4. **Chernyshev V. K., Demidov V. A., Kazakov S. A., et al.** Multielement disk EMG powering, using high-inductive helical generators // Proc. of the 6th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and pulsed power applications, Albuquerque (USA), Nov. 8–11, 1992. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1994. Pt 1. P. 519–523.

5. **Селемир В. Д., Демидов В. А., Пляшкевич Л. Н. и др.** Сильноточные (30 МА и более) импульсы энергии для питания индуктивных и активных нагрузок // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 248–254.
6. **Chernyshev V. K., Zharinov E. I., Demidov V. A., Kazakov S. A.** High-inductance explosive magnetic generators with high energy multiplication // Megagauss physics and technology. N. Y.; L.: Plenum Press, 1980. P. 641–649.
7. **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. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 500–504.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.
