

СПИРАЛЬНЫЙ ВЗРЫВОМАГНИТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДИАМЕТРОМ 280 ММ

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

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

Предварительное усиление энергии в экспериментах с дисковыми взрывомагнитными генераторами (ДВМГ) обеспечивается спиральными ВМГ. Для запитки разрабатываемого по программе ЭМИР [1] десятиэлементного ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм (ДВМГ480-10) требуется начальный ток 10 МА, магнитная энергия ~10 МДж. Имеющийся предусилитель ВМГ-240 [2, 3] не может обеспечить такие параметры.

Рассмотрено несколько возможностей повышения выходной энергии и мощности предусилителя: применение в центральной трубе ВМГ-240 более мощного (на основе октогена) конического заряда ВВ, использование узла дожатия магнитного потока с осевым иницированием заряда ВВ и увеличение внутреннего диаметра спирали. Все модификации спиралей предусилителей были унифицированы по длине, что позволило использовать один комплект технологической оснастки для их изготовления и изготовления центральных труб ВМГ.

В результате проведенных исследований разработан спиральный ВМГ со статором диаметром 280 мм (ВМГ-280), предназначенный для запитки многоэлементных ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм. Новый предусилитель способен запитывать десятиэлементный ДВМГ480 с начальной индуктивностью ~0,2 мкГн током ~10 МА с характерным временем нарастания 32 мкс и обладает мощностью ~400 ГВт.

Введение

Энергетической основой электрофизического рентгеновского комплекса ЭМИР [1] являются многоэлементные дисковые взрывомагнитные генераторы с диаметром заряда взрывчатого вещества 480 мм [2, 3]. На первом этапе, для формирования в лайнере быстронарастающего импульса тока на уровне ~30 МА будет применяться генератор с начальной индуктивностью $L_0 \sim 0,2$ мкГн, состоящий из десяти дисковых секций. Генератор работает при начальном токе ~10 МА, что соответствует магнитной энергии ~10 МДж.

Для питания многоэлементных ДВМГ во ВНИИЭФ традиционно применялись [3] предусилители энергии в виде спиральных ВМГ диаметром 240 мм [2–4]. Их различные модификации обеспечивали 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 создании предусилителя для ДВМГ480-10 в качестве базовой модели был выбран спиральный генератор ВМГ-240, который, начиная с 1980-х годов, многократно применялся для запит-

ки разрабатывавшихся в то время во ВНИИЭФ дисковых генераторов диаметром 1000 мм [3, 4].

Решение задачи повышения энергии и мощности предусилителя началось с оптимизации соленоида. Далее исследовалась эффективность использования более энергоемкого заряда ВВ, возможность применения дополнительного узла сжатия магнитного потока с осевым иницированием заряда ВВ и увеличения внутреннего диаметра спирали. Расчетные данные тестировались экспериментами. В настоящем докладе представлены результаты проведенных исследований, которые завершились разработкой спирального ВМГ со статором диаметром 280 мм (ВМГ-280). Генератор формирует в нагрузке индуктивностью ~0,2 мкГн, равной индуктивности 10-элементного ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм, ток ~10 МА с характерным временем нарастания 32 мкс и обладает максимальной мощностью ~400 ГВт.

1. Базовая модель предусилителя

Спиральный генератор ВМГ-240 был создан для запитки дисковых ВМГ с зарядами ВВ диа-

метром ~ 1 м током 12 МА и более [3-5]. Внутренний диаметр статора составляет 240 мм, длина спирали 1200 мм. Внешний вид ВМГ-240 приведен на рис. 1.

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

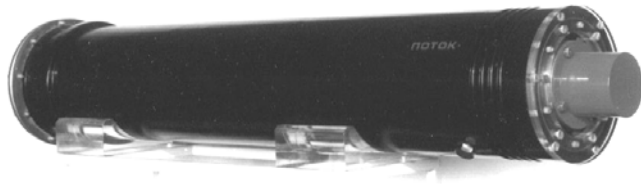


Рис. 1. Внешний вид генератора ВМГ-240

Центральная медная труба (лайнер) с наружным диаметром 109 мм (диаметр заряда ВВ 90 мм) имеет под последними шестью секциями конусное расширение до диаметра 157 мм, внутренний диаметр увеличивается до 144 мм (рис. 2). При этом толщина стенки конуса трубы изменяется от ~ 9 мм до 6,5 мм. Заряд ВВ выполнен из состава ТГ 30/70.

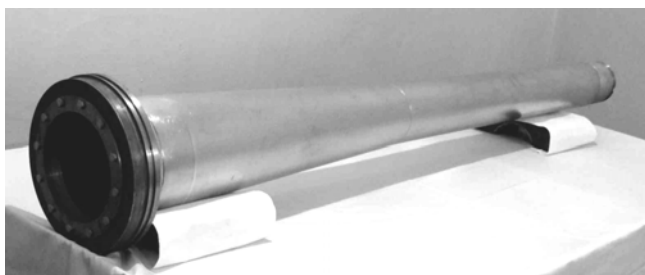


Рис. 2. Центральная труба генератора ВМГ-240

ВМГ-240 имеет начальную индуктивность $L_0 = 115$ мкГн. Экспериментальные зависимости конечного тока I_f , энергии W_f и характерного вре-

мени нарастания тока τ_e от индуктивности нагрузки генератора приведены на рис. 3 [3].

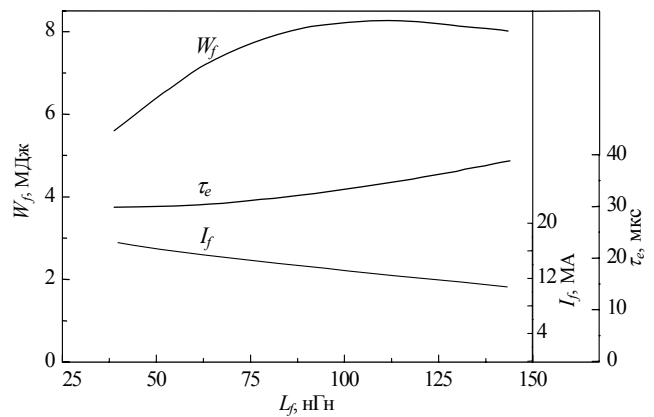


Рис. 3. Зависимости магнитной энергии, максимального тока и характерного времени нарастания тока ВМГ-240 от индуктивности нагрузки

2. Модернизация предусилителя ВМГ-240

Из рис. 3 видно, что оптимальная, с точки зрения генерации максимальной магнитной энергии, нагрузка базового предусилителя ВМГ-240 равна ~ 110 нГн. Для эффективной работы ВМГ-240 на нагрузку $\sim 0,2$ мкГн необходимо другое распределение витков вдоль оси генератора. В связи с этим параметры спирали диаметром 240 мм при сохранении ее длины 1200 мм были изменены. Спираль рассчитывалась на получение в индуктивной нагрузке 0,2 мкГн энергии до 10 МДж при следующих условиях: начальный магнитный поток ~ 4 Вб, максимальное напряжение в объеме генератора ~ 50 кВ, коэффициент усиления энергии ~ 70 . По сравнению с ВМГ-240, количество секций в модернизированной спирали уменьшилось с 17 до 15, изменились длины секций. Повышение скорости вывода индуктивности на конечном этапе работы генератора обеспечено уменьшением шага витков последней секции с 240 мм до 192 мм [3]. В дополнение к пленочной изоляции на витках спирали, внутренняя полость статора заполняется газом SF_6 при повышенном давлении. Это позволяет повысить электрическую прочность и надежность работы генератора.

Проведено испытание предусилителя с модернизированной спиралью [3]. В опыте использовалась такая же центральная труба, как и в базовом генераторе ВМГ-240 (рис. 2). Отличием являлось то, что в конической части трубы вместо за-

ряда из состава ТГ 30/70 применен конус из более мощного состава ВВ на основе октогена. Для изготовления лайнера не потребовалось дополнительного технологического оборудования, что позволило свести к минимуму материальные затраты.

Начальная индуктивность модернизированного ВМГ-240 равна 74 мкГн. При токе запитки $I_0 = 60$ кА (магнитный поток Φ_0 равен 4,4 Вб, энергия $W_0 = 134$ кДж) в нагрузке $L_l = 0,2$ мкГн получен ток $\sim 9,2$ МА, магнитная энергия $W \sim 8,5$ МДж (коэффициент усиления энергии равен ~ 65). Характерное время нарастания тока $\tau_e = 28$ мкс, максимальная производная тока равна $\sim 2,6 \cdot 10^{11}$ А/с, пиковая мощность генератора ~ 350 ГВт.

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые тока и производной тока. Высокая быстроходность ВМГ достигнута за счет оптимального распределения витков на последних секциях спирали и использования в конусной части лайнера более мощного заряда ВВ.

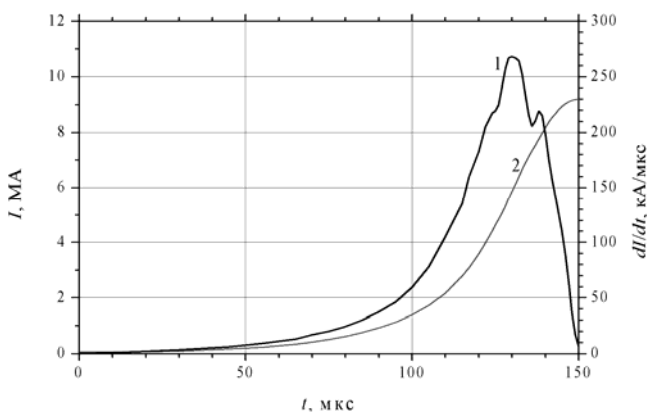


Рис. 4. Производная тока (1) и ток (2) в эксперименте

3. Предусилитель с дополнительным узлом сжатия магнитного потока

Применение цилиндрически-конических лайнеров, один из которых показан на рис. 2, обусловлено необходимостью повышения энергии и быстродействия спиральных ВМГ. Однако изготовление таких лайнеров и зарядов ВВ к ним является трудоемким и дорогостоящим процессом. В связи с этим разработан предусилитель, состоящий из двух соединенных электрически последовательно статоров диаметром 240 мм, внутри которых используются цилиндрические лайнеры. В первом, высокоиндуктивном, статоре длиной 1200 мм применяется медный лайнер с зарядом ВВ, инициируемом с торца, а во втором статоре – узле дожатия магнитного потока (УДМП), используется лайнер с зарядом ВВ, который инициируется по оси одновременно по всей длине. При работе предусилителя магнитный поток вытесняется из полости высокоиндуктивного статора в полость УДМП. Подрыв заряда ВВ в лайнере УДМП производится таким образом, чтобы к моменту времени полного вывода витков высокоиндуктивной спирали лайнер УДМП набрал максимальную радиальную скорость. Сжатие магнитного потока производится одновременно по всему объему УДМП, что обеспечивает высокую скорость изменения индуктивности и нарастания тока.

Схема конструкции спирального ВМГ (I) с устройством дожатия магнитного потока (II) представлена на рис. 5.

Расчеты работы такого устройства проводились с использованием модифицированной численной модели ВМГ [7]. Целью расчетов был выбор конструкции и режима работы предусилителя, обеспечивающих получение в нагрузке 0,2 мкГн тока ~ 9 МА при минимизации напряжения на входе нагрузки. Варьировались время включения

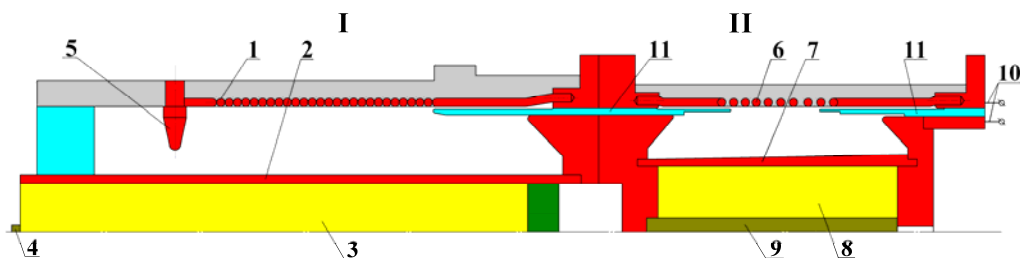


Рис. 5. Спиральный ВМГ (I) с устройством дожатия магнитного потока (II): 1 – многосекционный статор, 2 – лайнер, 3 – заряд ВВ, 4 – электродетонатор, 5 – крубар, 6 – односекционный статор, 7 – лайнер УДМП, 8 – заряд ВВ, 9 – система осевого инициирования заряда ВВ, 10 – электроды, 11 – изоляторы

УДМП, параметры последних секций высокоиндуктивной спирали, профиль лайнера УДМП.

В результате расчетных исследований показано, что поставленным условиям удовлетворяет устройство, в котором высокоиндуктивная спираль из 14 секций выполнена на базе спирали модернизированного ВМГ-240. С этой спиралью применяется медная цилиндрическая центральная труба с внешним диаметром 109 мм, длиной ~1600 мм. Диаметр заряда ВВ из состава ТГ 30/70 равен 90 мм. Статор УДМП имеет длину ~350 мм и представляет собой изолированную многозаходную спираль с шагом навивки витков 192 мм. Лайнер в УДМП представляет собой медную трубу длиной ~450 мм с внутренним диаметром 125 мм. В лайнере размещен заряд ВВ из состава ТГ 30/70 с внутренним отверстием для размещения системы осевого иницирования. Толщина стенки лайнера в УДМП линейно увеличивается в сторону нагрузки с 6 мм до 7 мм, а вывод витков в секции с осевым иницированием заканчивается через 9 мкс после окончания вывода витков последней секции высокоиндуктивного ВМГ. В таком устройстве расчетное максимальное выходное напряжение не превышает ~80 кВ. Расчетное характерное время нарастания тока в предусилителе с УДМП составляет 35 мкс.

Начальная индуктивность предусилителя равна 92 мкГн. Начальная индуктивность УДМП составляет 0,31 мкГн. Во внутренних полостях обоих статоров применяется газ SF_6 при повышенном давлении. Масса зарядов ВВ в предусилителе с УДМП на 13 % больше, чем в модернизированном ВМГ-240.

Испытание предусилителя с УДМП (рис. 6) проведено при начальном магнитном потоке ~4,4 Вб. Максимальная производная тока ВМГ составила $3 \cdot 10^{11}$ А/с. В нагрузке 0,2 мкГн зарегистрирован ток 8 МА с характерным временем нарастания 36 мкс, магнитная энергия W равна ~6,4 МДж. Пиковая мощность генератора достигла ~420 ГВт.

Сравнение зависимостей тока от времени, представленных на рис. 7, показывает, что экспериментальные данные хорошо совпадают с расчетными. Снижение экспериментального тока на конечном этапе работы генератора по сравнению с расчетным связано, по-видимому, с потерей части сжимаемого магнитного потока под витками статора УДМП.

4. Предусилитель со статором диаметром 280 мм

Проведена разработка предусилителя с увеличенным до 280 мм внутренним диаметром статора. Параметры статора соответствуют параметрам модернизированного ВМГ-240.

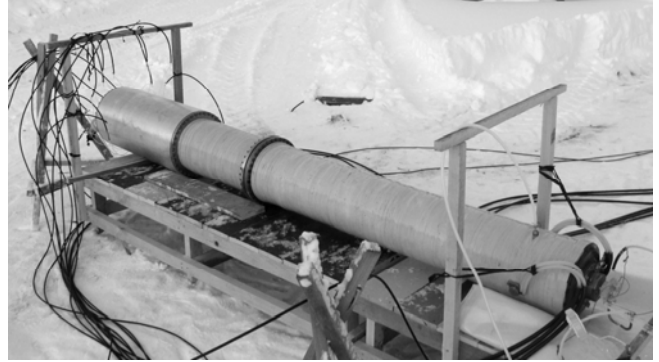


Рис. 6. Предусилитель с УДМП

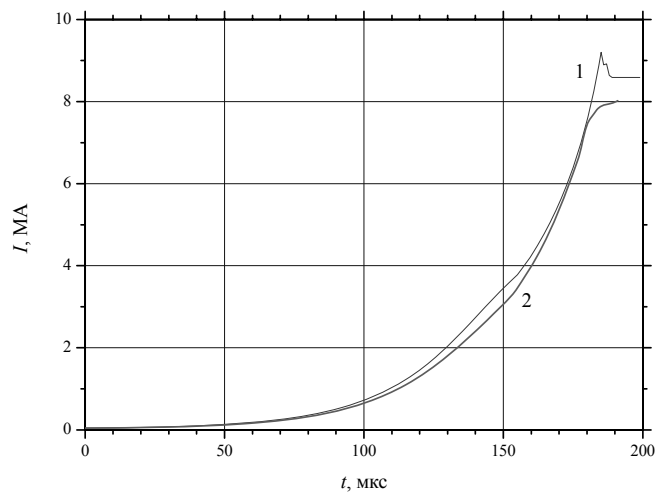


Рис. 7. Расчетный (1) и экспериментальный (2) токи предусилителя с УДМП

В предусилителе используется цилиндрически-конический лайнер с повышенной, по сравнению с ВМГ-240, массой ВВ. Цилиндрический участок лайнера имеет наружный диаметр 120 мм и толщину стенки 9,5 мм. На коническом участке лайнер расширяется по наружному диаметру 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 (рис. 8) проведен при запитке предусилителя начальным магнитным потоком 4,6 Вб.

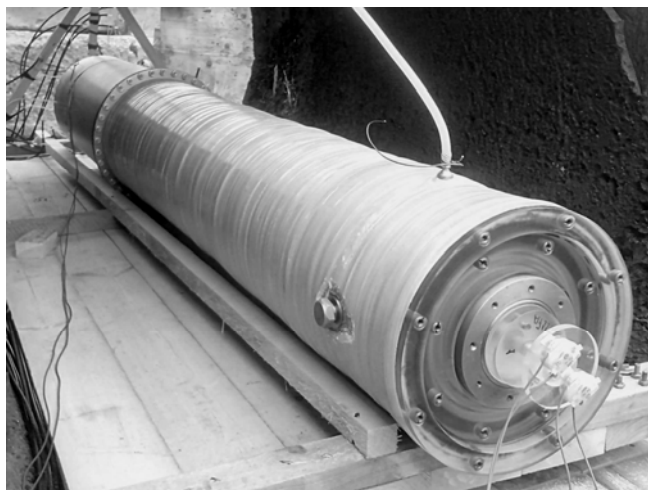


Рис. 8. Общий вид предусилителя ВМГ-280

В нагрузке индуктивностью $\sim 0,2$ мкГн, эквивалентной индуктивности ДВМГ480-10, получен ток ~ 10 МА. График изменения тока представлен на рис. 9. Максимальная производная тока составляет $3,5 \cdot 10^{11}$ А/с, характерное время нарастания тока ~ 32 мкс. Величина энергии, запасенная в нагрузке, равна ~ 10 МДж. Пиковая мощность генератора составляет ~ 400 ГВт.

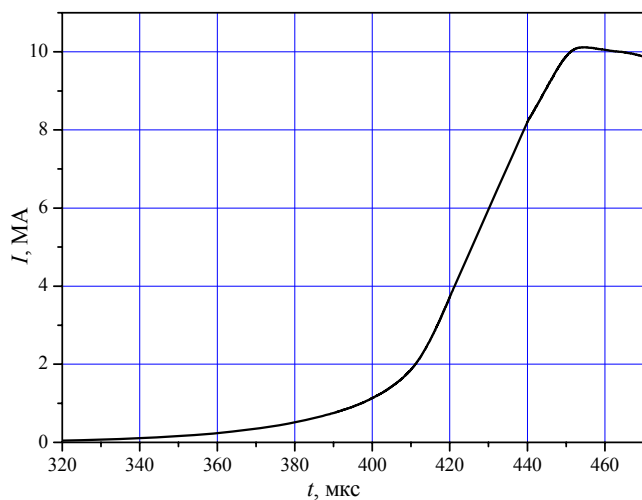


Рис. 9. Экспериментальная зависимость тока ВМГ-280 от времени

Заключение

Расчетные и экспериментальные исследования спиральных ВМГ проведены с целью создания

предусилителя, предназначенного для запитки десятиэлементного дискового генератора с зарядами ВВ диаметром 480 мм энергией ~ 10 МДж. За основу разработки взят предусилитель энергии со статором диаметром 240 мм (ВМГ-240) с выходной энергией ~ 8 МДж, обладающий мощностью ~ 300 ГВт. Испытано три варианта конструкции предусилителя.

В модернизированном предусилителе ВМГ-240, за счет оптимизации распределения витков в статоре и увеличения энергоемкости заряда ВВ, в нагрузке 0,2 мкГн получен ток 9,2 МА. Характерное время нарастания тока составило 28 мкс, запасенная энергия 8,5 МДж. Мощность предусилителя по отношению к базовому генератору возросла до 350 ГВт.

В предусилителе с цилиндрическим лайнером, содержащим устройство дожатия магнитного потока с осевым инициированием заряда ВВ в той же нагрузке 0,2 мкГн получен ток 8 МА, пиковая мощность достигла ~ 420 ГВт. Такой предусилитель более прост в изготовлении (из-за отсутствия конусного лайнера и конусного заряда ВВ), однако его выходная энергия недостаточна для питания 10-элементного ДМГ480.

В результате увеличения диаметра статора с 240 мм до 280 мм и применения лайнера с повышенной массой ВВ создан новый предусилитель ВМГ-280. Начальная индуктивность ВМГ-280 составляет 100 мкГн. При его испытании в нагрузке 0,2 мкГн получен ток ~ 10 МА с характерным временем нарастания 32 мкс. Пиковая мощность ВМГ-280 составляет ~ 400 ГВт. Полученные характеристики соответствуют требованиям по запитке десятиэлементного дискового генератора с зарядами ВВ диаметром 480 мм.

Список литературы

1. Selemir V. D., Demidov V. A. and Repin P. B. Explosive Electrophysical Complex EMIR: Current State and Perspectives // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38. No. 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 Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38. No. 8. P. 1762–1767.
3. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2012. Том 1. С. 439.

4. Chernyshev V.K., Demidov V.A., Kazakov S.A., Fetisov I.K. and Shevtsov V.A. Multielement Disk EMG Powering, Using High-Inductive Helical Generators // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications / Ed by M. Cowan and R.B. Spielman. N.Y.: Nova Science Publishers, Inc. 1994. Part 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 / Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. Саров: ВНИИЭФ. 1997. С. 248–254.

6. Chernyshev V. K., Zharinov E. I., Demidov V. A., and Kazakov S. A. High-Inductance Explosive Magnetic Generators with High Energy Multiplication // Megagauss Physics and Technology / Ed. by P.J. Turchi; Plenum Press. N.Y.; L. 1980. P. 641–649.

7. Власов Ю. В., Голосов С. Н., Демидов В. А., Казаков С. А. Расчетное моделирование системы взрывомагнитный генератор – магнитоплазменный компрессор // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения / Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. Саров: ВНИИЭФ. 1997. С. 500–504.