

УДК 539.1.03(621.384.6+533.9.07:533.952)

ПРОЕКТ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ “ГАММА-4”

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев, В. Т. Пунин, А. В. Гришин,
С. Т. Назаренко, В. С. Павлов, В. А. Деманов, Т. Ф. Шиханова,
Д. А. Калашников, А. В. Козачек, С. Л. Глушков, К. В. Страбыкин,
С. Ю. Пучагин, Д. О. Мансуров, Б. П. Миронычев,
Р. А. Майоров, В. Л. Майорникова

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

E-mails: zavyalov@expd.vniief.ru, gordeev@expd.vniief.ru, punin@expd.vniief.ru,
grishin@expd.vniief.ru, STNazarenko@vniief.ru, VSPavlov@vniief.ru,
VADemanov@vniief.ru, TFShihanova@vniief.ru, kalashnikov@expd.vniief.ru,
kozachek@expd.vniief.ru, glushkov@expd.vniief.ru, strabykin@expd.vniief.ru,
Sergey.Puchagin@cern.ch, mansurov@expd.vniief.ru, mironychev@expd.vniief.ru,
mayorov@expd.vniief.ru, majornikova@expd.vniief.ru

Представлен проект четырехмодульной электрофизической установки “Гамма-4”, предназначенной для проведения исследований в области радиационной физики. Для установки создан и экспериментально отработан типовой модуль, который при согласованной нагрузке генерирует электрический импульс с амплитудами напряжения до 2 МВ и тока до 750 кА и с длительностью на половине высоты 60 нс. Проведено 700 рабочих включений, в результате которых подтверждены параметры модуля и его надежность. Разработаны схемы установки в режимах синхронной (с погрешностью ± 3 нс) работы модулей на вакуумные электронные диоды и на сумматор тока для генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения.

Ключевые слова: импульсный ускоритель электронов, тормозное излучение, мягкое рентгеновское излучение, магнитоизолированная передающая линия, ускорительная трубка.

Введение. В настоящее время создается четырехмодульная электрофизическая установка “Гамма-4”, предназначенная для проведения исследований и испытаний в области радиационной физики. Установка состоит из четырех типовых модулей, выполненных на основе сильноточного импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” и расположенных по окружности на одинаковых расстояниях друг от друга [1–4]. На рис. 1 представлен общий вид типовых модулей установки, размещенных в экспериментальном зале. При такой компоновке реализуется режим синхронной (с погрешностью ± 3 нс) работы типовых модулей на вакуумные электронные диоды с матрицей диодов, помещенной в вакуумную камеру.

© Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Пунин В. Т., Гришин А. В., Назаренко С. Т., Павлов В. С., Деманов В. А., Шиханова Т. Ф., Калашников Д. А., Козачек А. В., Глушков С. Л., Страбыкин К. В., Пучагин С. Ю., Мансуров Д. О., Миронычев Б. П., Майоров Р. А., Майорникова В. Л., 2015

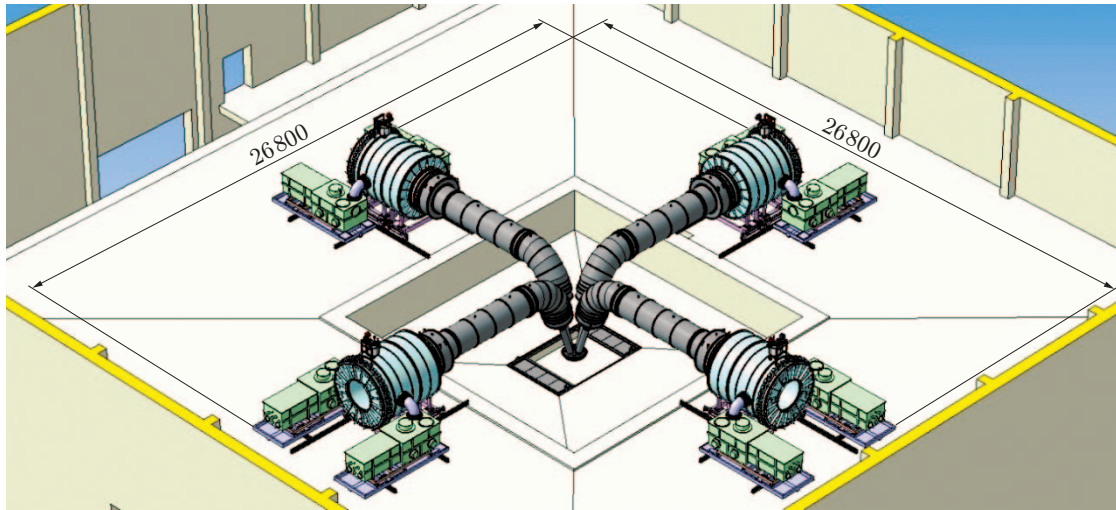


Рис. 1. Общий вид модулей установки “Гамма-4” в экспериментальном зале

1. Типовой модуль установки “Гамма-4”. В состав экспериментально отработанного типового модуля входят система формирования высоковольтных импульсов (СФВИ) и система передачи энергии (СПЭ) к узлу нагрузки. На согласованной нагрузке модуль генерирует электрический импульс с амплитудами напряжения до 2 МВ и тока до 750 кА и с длительностью на половине высоты 60 нс. Общий вид типового модуля установки “Гамма-4” представлен на рис. 2.

1.1. *Система формирования высоковольтных импульсов.* На рис. 3 приведена схема СФВИ, состоящей из двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) с узлом многоканального коммутатора, встроенного преобразователя длительности формируемого импульса и преимпульсного коммутатора.

При компоновке СФВИ учитывались условия размещения установки “Гамма-4” в экспериментальном зале. Основными компонентами СФВИ являются ДСФЛ и два генератора импульсных напряжений ГИН-1000, размещенные на колесных платформах, обеспечивающих их перемещение по рельсовому пути при монтаже и ремонте.

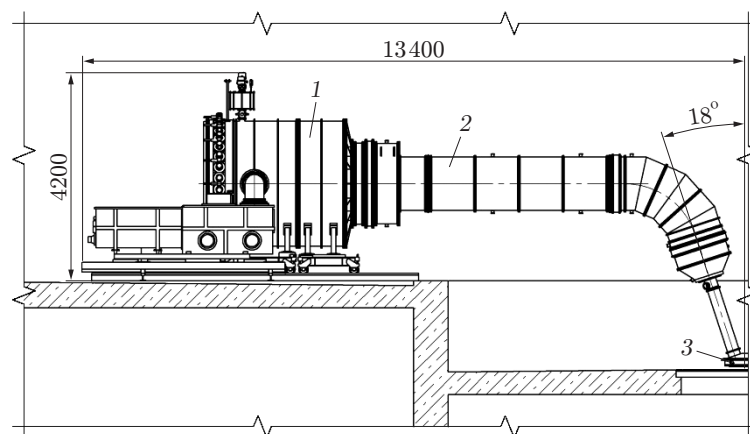


Рис. 2. Общий вид типового модуля установки “Гамма-4”:
1 — СФВИ, 2 — СПЭ, 3 — вакуумная камера

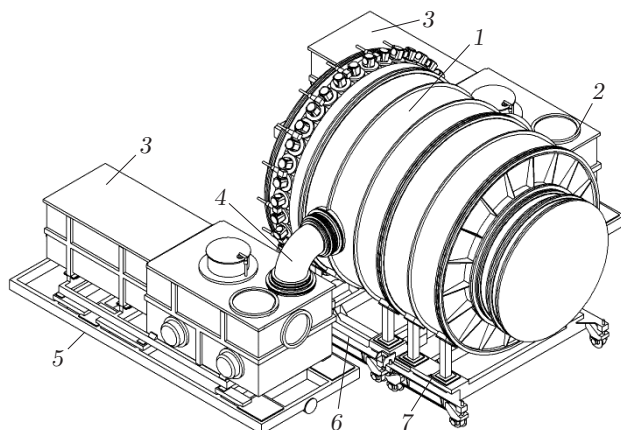


Рис. 3. Схема системы формирования высоковольтных импульсов:
 1 — ДСФЛ, 2 — предимпульсный коммутатор, 3 — ГИН-1000, 4 — высоковольтный ввод на 1 МВ, 5–7 — юстировочные платформы

ДСФЛ предназначена для накопления электрической энергии, передаваемой от двух генераторов ГИН-1000, формирования высоковольтного импульса напряжения с помощью многоканального коммутатора и уменьшения длительности выходного импульса в два раза с помощью встроенного в ДСФЛ преобразователя длительности. Поскольку внутренняя полость ДСФЛ заполняется деионизованной водой, корпуса и электроды изготовлены из нержавеющей стали. Изолятор, установленный на крышке второй секции, изготовлен из полиэтилена. В расчетах на прочность и жесткость были определены толщины обечаек корпусов и электродов при действии на них статических нагрузок, обусловленных их собственным весом, гидростатическим давлением и вакуумированием внутренней полости ДСФЛ при заполнении ее деионизованной водой. Радиус охранных колец электродов, а также радиусы скругления поверхностей в зонах перехода от цилиндрической поверхности высоковольтного электрода к плоской были выбраны с учетом результатов электростатических расчетов напряженности электрического поля, а также с учетом поведения ускорителей ЛИУ-10М и СТРАУС-2 в процессе эксплуатации. Более подробно система формирования высоковольтных импульсов ускорителя описана в [1, 2, 5].

Высоковольтную зарядку ДСФЛ обеспечивают два генератора импульсных напряжений ГИН-1000 [6] с помощью высоковольтных вводов (напряжение ≈ 1 МВ за время $\approx 0,9$ мкс). ГИН с запасом энергии ≈ 80 кДж представляет собой 12-каскадный генератор Аркадьева — Маркса и состоит из двух параллельных разрядных контуров, работающих на общую нагрузку.

При конструировании основных узлов и деталей ГИН и выборе элементной базы учитывался опыт эксплуатации разработанных ранее генераторов импульсных напряжений ГИН-500М, ГИН-500И, ГИН-600, ГИТ-100П, ГИН-700, ГИН-500 [7–9]. Особенностью конструкции генератора является размещение элементов последних пяти каскадов на общем экране, закрепленном на изоляторах на боковых стенках корпуса, для увеличения электрической прочности разрядного контура.

1.2. Система передачи энергии. СПЭ, обеспечивающая режим работы каждого модуля на свой автономный вакуумный диод, состоит из длинной водяной передающей линии (ВПЛ) с поворотом на угол, близкий к 90° , ускорительной трубки (УТ) с узлом секционированного изолятора (СИ), разделяющего среды вода — вакуум, прямой короткой цилиндрической магнитоизолированной передающей линии (МИПЛ) и диодной нагрузки. СПЭ передает энергию высоковольтного электрического импульса по ВПЛ с импедансом 2,9 Ом и МИПЛ к узлу нагрузки. Схема СПЭ представлена на рис. 4.

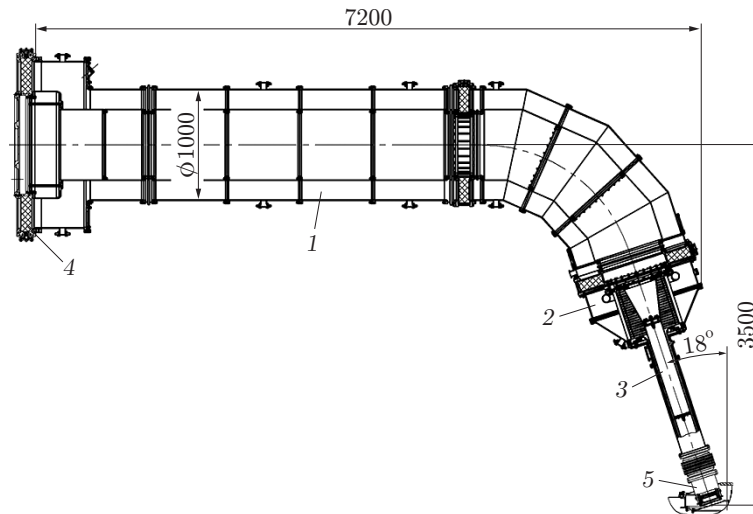


Рис. 4. Схема СПЭ типового модуля установки “Гамма-4”:

1 — ВПЛ, 2 — УТ, 3 — МИПЛ, 4 — опорный изолятор СФВИ, 5 — вакуумная камера с диодной нагрузкой

ВПЛ представляет собой коаксиальную конструкцию, содержащую три участка: два цилиндрических участка с различными характерными внешними диаметрами ($\approx 1,6$ и ≈ 1 м) и участок, повернутый на угол, равный 18° , относительно вертикальной плоскости. Внутренняя полость ВПЛ заполняется деионизованной водой, поэтому корпусные элементы изготовлены из нержавеющей стали. Геометрические размеры ВПЛ зависят от электрических параметров линии, конструкции типового модуля и схемы установки в экспериментальном зале. На внешнем и внутреннем электродах коаксиального цилиндрического участка диаметром ≈ 1 м имеются компенсационные сильфонные узлы.

При конструировании УТ учитывается опыт использования аналогичных устройств в формирующих системах электрофизических установок Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики. Основным узлом является СИ, представляющий собой набор изоляционных (из полиэтилена) и градиентных (из нержавеющей стали) колец, стянутых шпильками, изготовленными из диэлектрика. Длина СИ (≈ 530 мм) определена из условия электрической прочности на основе результатов электростатических расчетов напряженности электрического поля. Герметичность и вакуумная плотность узла СИ обеспечиваются резиновыми уплотнителями, расположенными между изоляционными и градиентными кольцами. Поскольку СИ представляет собой цельный узел, обеспечена возможность контроля качества сборки и вакуумной плотности до его установки в УТ.

МИПЛ предназначена для передачи высоковольтного электрического импульса от секционированного изолятора к узлу нагрузки. Длина электродной системы ($\approx 1,8$ м) определена с учетом расположения четырех типовых модулей в экспериментальном зале при размещении диодов в горизонтальной плоскости. Диаметры электродов МИПЛ выбраны на основе результатов экспериментальной отработки макетных образцов МИПЛ в составе типового модуля. Особенностью данной конструкции является наличие внешнего вакуумного кожуха, соединенного с корпусом УТ. Это конструктивное решение позволяет сохранять постоянный межэлектродный зазор при отсутствии дополнительных нагрузок, обусловленных вакуумированием МИПЛ.

Постоянный межэлектродный зазор в МИПЛ выставляется путем углового и линейного (перпендикулярно оси и вдоль нее) перемещения высоковольтного электрода, а также

за счет изменения угла наклона заземленного электрода с помощью юстировочных элементов, расположенных на катододержателе УТ. Данное регулирование размера зазора может выполняться при сборке СИ совместно с электродной системой МИПЛ на технологическом стапеле либо после монтажа данных узлов в корпусе УТ на месте эксплуатации.

Подсоединение вакуумного кожуха к вакуумной камере осуществляется через сильфонный узел, компенсирующий погрешности, возникающие при подсоединении МИПЛ к вакуумной камере. Откачка воздуха из межэлектродного зазора МИПЛ и внутренней полости СИ осуществляется с двух сторон: через вакуумный кожух и вакуумную камеру. Основным материалом для изготовления МИПЛ является нержавеющей сталь.

2. Экспериментальная отработка типового модуля. На первом этапе экспериментальной отработки СФВИ вместо УТ с диодом использовалась резистивная нагрузка. В данном режиме функционирования проверялась работоспособность установки: электропрочность ДСФЛ, предимпульсного коммутатора, высоковольтного ввода, 36 разрядников тригatronного типа при рабочем напряжении 1 МВ, составляющих многоканальный коммутатор ДСФЛ. Подтвержден порядок функционирования всех систем и узлов СФВИ, а также соответствие технологическим параметрам.

Экспериментальная отработка СПЭ для обеспечения режима работы типового модуля на вакуумный электронный диод выполнялась на макетных образцах с уменьшенной длиной коаксиальной цилиндрической ВПЛ [4, 5]. Проверена работоспособность узлов, входящих в состав СПЭ. При экспериментальной отработке проведено ≈ 700 включений типового модуля установки “Гамма-4”, подтверждены его параметры и надежность.

Экспериментальные исследования, выполненные на типовом модуле, подтвердили возможность его применения в составе четырехмодульной установки в режимах синхронной работы модулей на вакуумные электронные диоды и на сумматор тока для генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения.

3. Схема установки в режиме работы модулей на сумматор тока. Одним из перспективных режимов работы установки “Гамма-4” является режим генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения при работе ее модулей на единую плазменную нагрузку. На рис. 5 представлена схема установки в режиме работы модулей на сумматор тока.

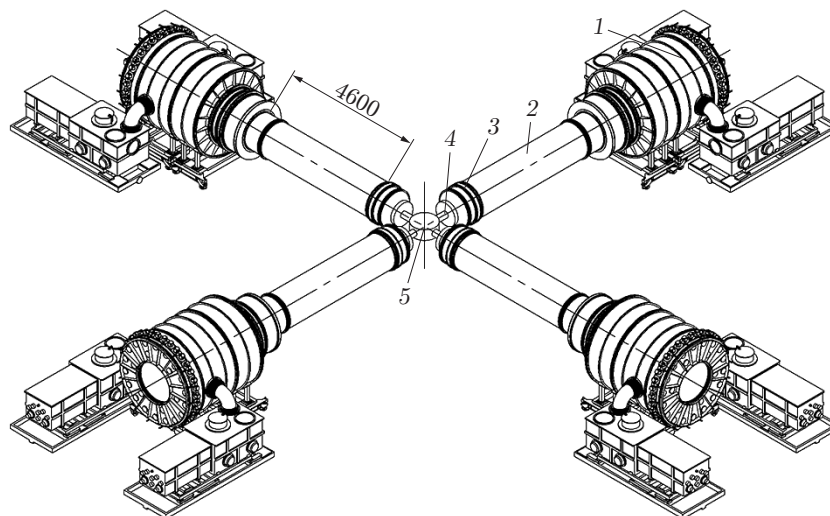


Рис. 5. Схема размещения модулей установки “Гамма-4” с сумматором тока для генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения:
1 — СФВИ, 2 — ВПЛ, 3 — УТ, 4 — МИПЛ; 5 — сумматор тока

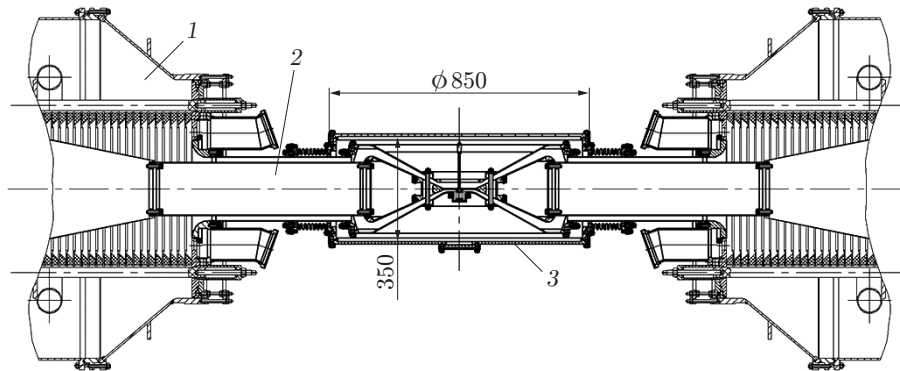


Рис. 6. Центральная часть установки с сумматором тока в разрезе:
1 — УТ, 2 — МИПЛ, 3 — сумматор тока

Отличием конструкции СПЭ типового модуля при такой компоновке от основного варианта установки является отсутствие узла поворота ВПЛ. На рис. 6 представлена центральная часть установки с сумматором тока в разрезе.

Сумматор тока представляет собой вакуумную камеру, во внутренней полости которой собрана система электродов концентратора энергии. При этом электроды концентратора энергии соединяются с электродами МИПЛ, которые в свою очередь соединяются с электродами УТ. В центральной части сумматора тока в межэлектродном зазоре концентратора энергии размещается лайнерная нагрузка, представляющая собой узел из натянутых между двумя фланцами вольфрамовых проволок.

4. Вспомогательные, дополнительные и технологические системы. В состав установки “Гамма-4” входят также следующие системы: вспомогательные (синхронизации, статической зарядки), технологические (водоподготовки, маслоподготовки, газонаполнения, вакуумная), дополнительные (блокировки дверей, световой и звуковой сигнализации, громкоговорящей связи, видеоконтроля). Эти системы обеспечивают функционирование модулей и установки в целом.

Система синхронизации управляет включением разрядников ДСФЛ, генераторов импульсных напряжений ГИН-1000, предимпульсных разрядников по заданной временной программе.

Система статической зарядки предназначена для статической зарядки накопительных элементов (конденсаторов) генераторов импульсных напряжений ГИН-1000 и системы синхронизации до высокого напряжения, коммутации цепей при зарядке и сбросе энергии.

Система водоподготовки обеспечивает получение обессоленной воды, используемой в качестве изоляционного материала в рабочем объеме ДСФЛ и СПЭ с удельным электрическим сопротивлением не менее 10 МОм·см и в рабочих объемах генераторов системы синхронизации с удельным электрическим сопротивлением не менее 5 МОм·см.

Система маслоподготовки предназначена для сушки, очистки от механических примесей и хранения масла, используемого в качестве изоляционного материала в предимпульсном коммутаторе, высоковольтных вводах, генераторах импульсных напряжений ГИН-1000, ГИН системы синхронизации, блоках высоковольтной коммутации и контакторах системы статической зарядки.

Система газонаполнения предназначена для приготовления в необходимых пропорциях газовой смеси азота N_2 и элегаза SF_6 и заполнения газовой смесью разрядников ДСФЛ и генераторов импульсного напряжения ГИН-1000, предимпульсных разрядников, разрядников системы синхронизации, а также для заполнения элегазом рабочих объемов генераторов импульсного напряжения системы синхронизации.

Вакуумная система предназначена для получения глубокого вакуума в рабочих объемах УТ, МИПЛ, диоде, вакуумной камере.

Согласованную работу составляющих установки “Гамма-4” обеспечивает автоматизированная система управления и контроля.

5. Электрические параметры и параметры излучения установки. При работе установки в режиме, в котором все ее модули автономны, предполагается, что поле излучения, формируемое установкой, является суперпозицией полей излучений отдельных модулей. Параметры поля излучения установки “Гамма-4” в целом можно оценить по параметрам излучения, полученным на типовом модуле установки — ускорителе “Гамма-1”. Установка “Гамма-4” имеет следующие электрические параметры: запасаемая энергия 620 кДж, напряжение на диоде 2,0 МВ, ток каждого диода 0,75 МА, энергия электронных пучков 320 кДж, мощность 6,0 ТВт. Параметры импульсов тормозного излучения установки “Гамма-4” при облучении объектов, имеющих большую площадь, имеют следующие значения: поглощенная доза 101 Гр, длительность импульса ТИ на половине высоты 50 нс, флюенс энергии ТИ в полном спектре 1,5 Дж/см². Параметры импульсов мягкого рентгеновского излучения, генерируемых установкой “Гамма-4” в режиме единой плазменной нагрузки [10], следующие: ток через нагрузку 3,0 МА, энергия в основном импульсе 100 кДж, максимальная мощность импульса 12 ТВт, длительность импульса на половине высоты 5,8 нс.

6. Выводы. Представлен проект четырехмодульной электрофизической установки “Гамма-4”. Приведены электрические параметры и параметры излучения этой установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S., Laptev D. V.** Design of a high-current pulse electron accelerator // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Ядерно-физ. исслед.* 1999. № 3. С. 68–70.
2. **Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С., Лаптев Д. В.** Проект сильноточного ускорителя электронов // *Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та эксперим. физики.* 2002. Вып. 3. С. 176–183.
3. **Zavyalov N. V., Gordeev V. S., Punin V. T., et al.** High-current pulsed electron accelerator “Gamma-1” with output power up to 1.5 TW // *Intern. J. Modern Phys. Conf. Ser. V. 32. Proc. of the Intern. conf. on plasma science applications (ICPSA-2013), Singapore, 4–6 Dec. 2013.* Singapore: World Sci. Publ. Co., 2014. P. 1460330.
4. **Zavyalov N. V., Gordeev V. S., Punin V. T., et al.** Calculated and experimental investigation of pulse transmission system in the typical module of the facility “Gamma” // *Intern. J. Modern Phys. Conf. Ser. V. 32. Proc. of the Intern. conf. on plasma science applications (ICPSA-2013), Singapore, 4–6 Dec. 2013.* Singapore: World Sci. Publ. Co., 2014. P. 1460336.
5. **Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др.** Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” // *Сб. докл. Междунар. конф. “12-е Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии”, Саров, 19–23 апр. 2010 г.* Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010. С. 49–54.
6. **Avdeeva A. V., Basmanov V. F., Gordeev V. S., et al.** Marx generator GIN-1000 with 1 MV output voltage and 80 kJ energy stored // *Proc. of the 15th Intern. conf. on high-power particle beams (BEAMS’2004), Saint-Petersburg, 18–23 July 2004.* S.-Petersburg: S.-Petersburg D. V. Efremov Inst., 2005. P. 327–329.

7. **Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Павловский А. И. и др.** Система из 72 синхронизированных генераторов Аркадьева — Маркса для зарядки до 500 кВ радиальных линий линейного импульсного ускорителя ЛИУ-30 // Приборы и техника эксперимента. 1997. № 2. С. 5–9.
8. **Герасимов А. И., Федоткин А. С., Зенков Д. И., Назаренко С. Т.** Надежный экранированный генератор Аркадьева — Маркса на 500 кВ и 6,25 кДж со стабильным временем задержки срабатывания // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 1. С. 96–101.
9. **Герасимов А. И., Федоткин А. С.** Генераторы Аркадьева — Маркса с улучшенной синхронизацией при высоких запасах электропрочности разрядников // Приборы и техника эксперимента. 1991. № 1. С. 146–150.
10. **Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В.** О перспективах генерации мощных импульсов МРИ на установке “Гамма” // Сб. докл. Междунар. конф. “14-е Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии”, Саров, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2013. С. 153–160.

Поступила в редакцию 22/XII 2014 г.
