

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**

В работе представлен проект четырехмодульной электрофизической установки «Гамма-4» (2 МВ, 3 МА, 320 кДж, 60 нс), предназначенной для проведения исследований в области радиационной физики. Для установки создан и экспериментально отработан типовой модуль. В 700 рабочих включениях подтверждены его параметры и надежность в работе. На согласованной нагрузке модуль генерирует электрический импульс с амплитудами напряжения и тока до 2 МВ, 750 кА и длительностью на полувывоте 60 нс.

Разработаны компоновочные схемы установки в режимах синхронной, с точностью ± 3 нс, работы модулей на вакуумные электронные диоды и сумматор тока для генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения.

1. 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, равномерно расположенных по окружности, выполненных на основе сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» [1–4]. На рис. 1 представлен общий вид размещения типовых модулей установки в экспериментальном зале.

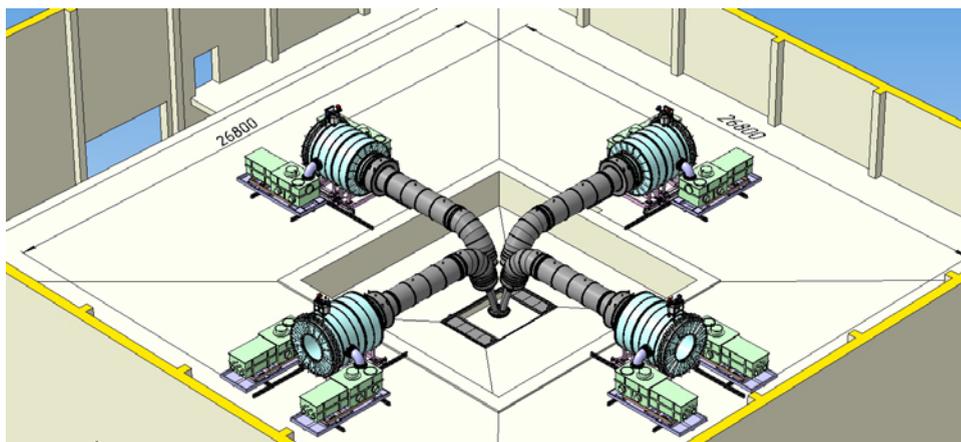


Рис. 1. Общий вид модулей установки «Гамма-4» в экспериментальном зале

При такой компоновке реализуется режим синхронной, с точностью ± 3 нс, работы типовых модулей на вакуумные электронные диоды с размещением матрицы диодов в единой вакуумной камере.

2. Типовой модуль установки «Гамма-4»

Экспериментально отработанный типовой модуль включает в свой состав системы формирования высоковольтных импульсов (СФВИ) и передачи энергии к узлу нагрузки (СПЭ). На согласованной нагрузке модуль генерирует электрический импульс с амплитудами напряжения и тока до 2 МВ, 750 кА и длительностью на полувысоте 60 нс. Общий вид типового модуля установки «Гамма-4» представлен на рис. 2.

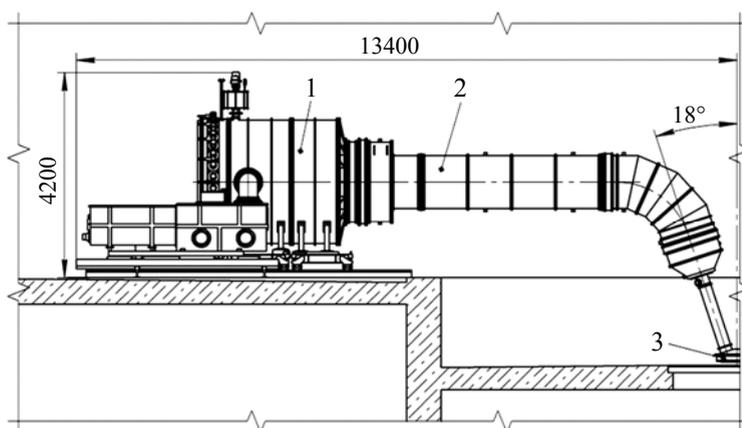


Рис. 2. Общий вид типового модуля установки «Гамма-4»:
1 – СФВИ; 2 – СПЭ; 3 – вакуумная камера

2.1. Система формирования высоковольтных импульсов

Конструктивная схема СФВИ представлена на рис. 3 и состоит из двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) с узлом многоканального коммутатора, встроенного преобразователя длительности формируемого импульса и предимпульсного коммутатора.

Компоновка СФВИ была определена, исходя из условий размещения установки «Гамма-4» в экспериментальном зале. Основными компонентами СФВИ являются ДСФЛ и два генератора импульсных напряжений ГИН-1000. Основные компоненты размещаются на колесных платформах, обеспечивающих их перемещение по рельсовому пути при монтаже и ремонте.

ДСФЛ предназначена для накопления электрической энергии, передаваемой от двух генераторов ГИН-1000, формирования высоковольтного импульса напряжения с помощью многоканального коммутатора и сокращения длительности выходного импульса вдвое с помощью встроенного в ДСФЛ преобразователя длительности. В связи с заполнением внутреннего объема ДСФЛ деионизированной водой, корпуса и электроды изготовлены из нержавеющей стали. Изолятор, установленный в крышке второй секции, изготовлен из полиэтилена. Толщины обечаяк корпусов и электродов были определены из расчетов на прочность и жесткость при действии на них статических нагрузок, обусловленных собственным весом, гидростатическим давлением и вакуумировани-

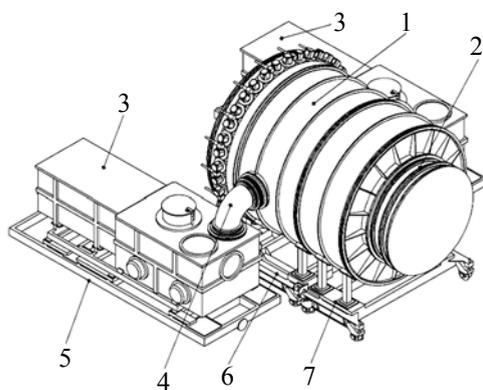


Рис. 3. Конструктивная схема системы формирования высоковольтных импульсов: 1 – ДСФЛ; 2 – предимпульсный коммутатор; 3 – ГИН-1000; 4 – ввод высоковольтный 1 МВ; 5, 6, 7 – юстировочные платформы

опыте эксплуатации разработанного ранее целого ряда генераторов импульсных напряжений: ГИН-500М, ГИН-500И, ГИН-600, ГИТ-100П, ГИН-700, ГИН-500 [7–9]. Отличительной 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.

2.2. Система передачи энергии

СПЭ для режима 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 обеспечивает передачу энергии высоковольтного электрического импульса по ВПЛ с импедансом 2,9 Ом и МИПЛ к узлу нагрузки. Конструктивная схема представлена на рис. 4.

ВПЛ представляет собой коаксиальную конструкцию, состоящую из трех участков: двух цилиндрических с различными характерными наружными диаметрами ($\sim 1,6$ и ~ 1 м) и с поворотом на угол 18° относительно вертикальной плоскости. Внутренний объем ВПЛ заполняется деионизированной водой. В связи с этим корпусные элементы изготовлены из нержавеющей стали. Геометрические размеры ВПЛ обусловлены электрическими параметрами линии, конструкцией типового модуля и компоновочной схемой установки в экспериментальном зале. Коаксиальный цилиндрический участок с диаметром ~ 1 м содержит компенсационные сильфонные узлы на внешнем и внутреннем электроде.

УТ сконструирована с учетом многолетнего опыта использования аналогичных устройств в формирующих системах электрофизических установок, составляющих экспериментальную базу РФЯЦ-ВНИИЭФ. Основным узлом является СИ, конструктивно представляющий собой набор изоляционных (из полиэтилена) и градиентных колец (из нержавеющей стали), стянутых диэлектрическими шпильками. Длина СИ (~ 530 мм) определена из условия электрической прочности на основе результатов электростатических расчетов напряженности электрического поля и прове-

ем внутренней полости ДСФЛ при заполнении ее деионизированной водой. Радиус охранных колец электродов, а также радиусы скругления поверхностей в местах перехода цилиндрической поверхности высоковольтного электрода в радиальную были выбраны, исходя из результатов электростатических расчетов напряженности электрического поля, а также с учетом опыта эксплуатации ускорителей ЛИУ-10М и СТРАУС-2. Подробно система формирования высоковольтных импульсов ускорителя описана в [1, 2, 5].

Высоковольтную зарядку ДСФЛ обеспечивают два генератора импульсных напряжений ГИН-1000 [6] через высоковольтные вводы до напряжения ~ 1 МВ за $\sim 0,9$ мкс. ГИН с энергозапасом около 80 кДж представляет собой двенадцатикаскадный генератор Аркадьева–Маркса и состоит из двух параллельных разрядных контуров, работающих на общую нагрузку.

Конструкция основных узлов и деталей ГИН, выбор элементной базы основаны на многолетнем

рена при электрических испытаниях типового модуля. Герметичность и вакуумная плотность узла СИ обеспечивается резиновыми уплотнениями между изоляционными и градиентными кольцами. Поскольку СИ конструктивно представляет собой цельный узел, обеспечена возможность контроля качества сборки и вакуумной плотности до его установки в УТ.

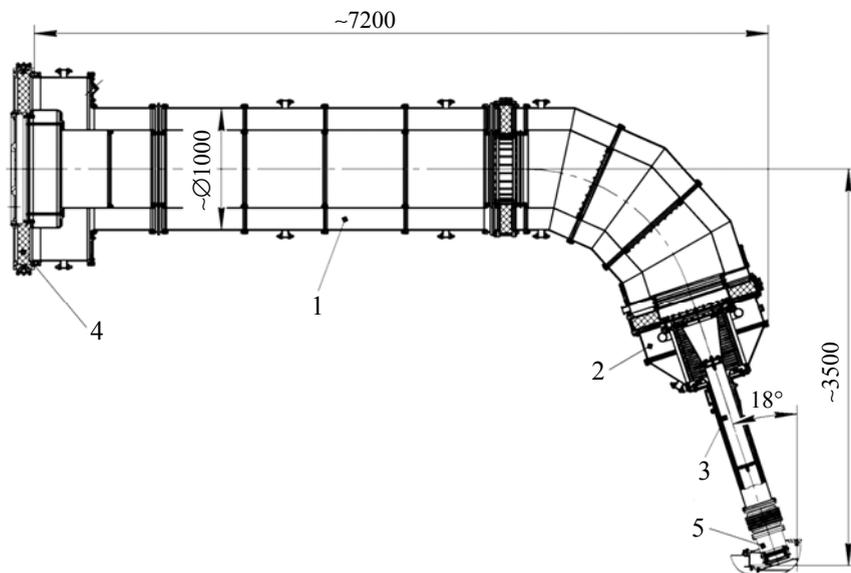


Рис. 4. Конструктивная схема СПЭ типового модуля установки «Гамма-4»: 1 – ВПЛ; 2 – УТ; 3 – МИПЛ; 4 – опорный изолятор СФВИ; 5 – вакуумная камера с диодной нагрузкой

МИПЛ предназначена для транспортировки высоковольтного электрического импульса от секционированного изолятора к узлу нагрузки. Длина электродной системы (~1,8 м) определена, исходя из компоновки четырех типовых модулей в экспериментальном зале при размещении диодов в горизонтальной плоскости. Диаметры электродов МИПЛ выбраны по результатам экспериментальной отработки макетных образцов МИПЛ в составе типового модуля. Отличительной особенностью данной конструкции является внешний вакуумный кожух, соединенный с наружным корпусом УТ. Это конструктивное решение позволяет сохранять равномерный межэлектродный зазор в связи с отсутствием дополнительных нагрузок, обусловленных вакуумированием МИПЛ.

Равномерный межэлектродный зазор в МИПЛ выставляется угловым и линейным (перпендикулярно оси, вдоль оси) перемещением высоковольтного электрода, а также изменением углового положения заземленного электрода при помощи юстировочных элементов, расположенных на катододержателе УТ. Данная настройка 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. Сильфонный узел компенсирует линейные и угловые погрешности при подсоединении МИПЛ к вакуумной камере. Откачка межэлектродного зазора МИПЛ и внутренней полости СИ производится с двух сторон: через вакуумный кожух и вакуумную камеру. Основным материалом для изготовления МИПЛ является нержавеющая сталь.

3. 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, предымпульсного коммутатора, высоковольтного ввода, 36 разрядников тригatronного типа на рабочее напряжение 1 МВ, составляющих многоканальный коммутатор ДСФЛ. Подтверждены порядок функционирования всех систем и узлов СФВИ и соответствие требованиям технологических параметров.

Экспериментальная отработка СПЭ для 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 более 700 включений типового модуля установки «Гамма-4», подтверждены его параметры и надежность в работе.

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

4. Компоновочная схема установки в режиме работы модулей на сумматор тока

Одним из перспективных режимов работы установки «Гамма-4» является режим генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ) при работе ее модулей на единую плазменную нагрузку. На рис. 5 представлена компоновочная схема установки в режиме работы модулей на сумматор тока.

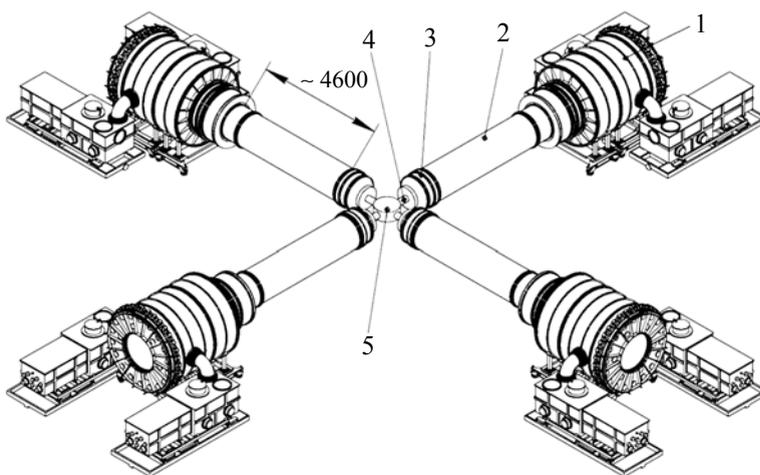


Рис. 5. Схема размещения модулей установки «Гамма-4» с сумматором тока для генерации импульсов МРИ: 1 – СФВИ; 2 – ВПЛ; 3 – УТ; 4 – МИПЛ; 5 – сумматор тока

Отличительной особенностью конструкции СПЭ типового модуля в данной компоновке по сравнению с основным вариантом установки является отсутствие узла поворота ВПЛ. На рис. 6 представлена в разрезе центральная часть установки с сумматором тока.

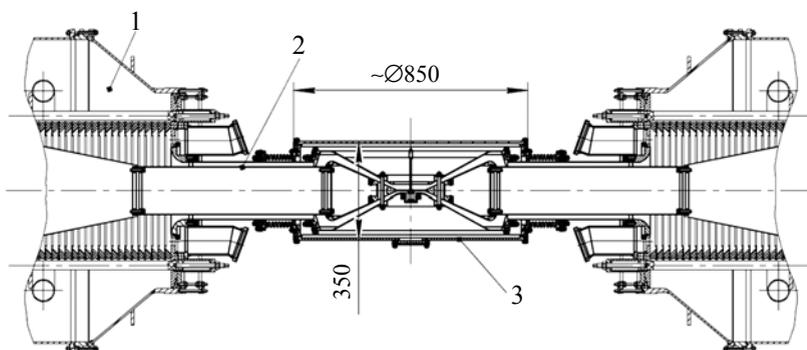


Рис. 6. Разрез центральной части установки с сумматором тока: 1 – УТ; 2 – МИПЛ; 3 – сумматор тока

Конструктивно 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, которая представляет собой узел из натянутых между двумя фланцами вольфрамовых проволок.

5. Вспомогательные, дополнительные и технологические системы

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

Система синхронизации предназначена для управления включением разрядников ДСФЛ, генераторов импульсных напряжений ГИН-1000, предимпульсных разрядников по заданной временной программе. Система статической зарядки служит для статической зарядки накопительных элементов (конденсаторов) генераторов импульсных напряжений ГИН-1000, ГИН системы синхронизации до высокого напряжения, коммутации цепей при зарядке и сбросе энергии.

Система водоподготовки предназначена для получения обессоленной воды, используемой в качестве изоляционного материала, в рабочем объеме ДСФЛ и СПЭ (удельное электрическое сопротивление не менее 10 МОм·см), в рабочих объемах генераторов системы синхронизации (удельное электрическое сопротивление не менее 5 МОм·см).

Система маслоподготовки предназначена для сушки масла, очистки масла от механических примесей, 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 составных частей установки «Гамма-4» обеспечивает автоматизированная система управления и контроля.

6. Электрические и дозовые параметры установки

Режим работы установки, в котором все модули установки полностью автономны, предполагает, что поле излучения, формируемое установкой, является суперпозицией полей излучений отдельных модулей. Параметры поля излучения установки в целом можно оценить по параметрам излучения одного модуля. В таблице приведены оценки основных электрических и дозовых параметров установки «Гамма-4», основанные на экспериментальных данных, полученных на типовом модуле установки – ускорителе «Гамма-1». Также в таблице представлены расчетные параметры импульсов МРИ, генерируемых установкой в режиме единой плазменной нагрузки [10].

Электрические и дозовые параметры установки «Гамма-4» в режимах генерации импульсов тормозного излучения (ТИ) и МРИ

Электрические параметры	ТИ при облучении объектов большой площади	МРИ
Запасаемая энергия 620 кДж	Поглощенная доза 10 крад (Si)	Ток через нагрузку 3,0 МА
Напряжение на диоде 2,0 МВ	Длительность импульса ТИ на полувывоте 50 нс	Энергия МРИ в основном импульсе 100 кДж
Ток каждого диода 0,75 МА	Флюенс энергии ТИ на оси в полном спектре 1,5 Дж/см ²	Максимальная мощность импульса МРИ 12 ТВт
Энергия электронных пучков 320 кДж	–	Длительность импульса МРИ на полувывоте 5,8 нс
Мощность 6,0 ТВт	–	–

Заключение

Представлен проект четырехмодульной электрофизической установки «Гамма-4». Установку в режиме работы на автономные вакуумные диоды планируется ввести в опытную эксплуатацию после завершения строительства здания. К настоящему моменту изготовлены системы формирования высоковольтных импульсов всех 4 модулей.

Список литературы

1. Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S., Laptev D. V. Design of a High-Current Pulse Electron Accelerator // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1999. Вып. 3. С. 68–70.
2. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С., Лаптев Д. В. Проект сильноточного ускорителя электронов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 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 // International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2014. Vol. 32. 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» // International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2014. Vol. 32. 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» // XII научные Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 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 // Proceeding of 15-th International Conference on High-Power Particle Beams. BEAMS'2004. Saint-Petersburg. RF. 2004. 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. и др. О перспективах генерации мощных импульсов МРИ на установке «Гамма» // XIV научные Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2013. С. 153–160.

Design of electrophysical facility «Gamma-4»

N. V. Zavyalov, V. S. Gordeev, V. T. Punin, A. V. Grishin, S. T. Nazarenko,
V. S. Pavlov, V. A. Demanov, T. F. Shikhanova, D. A. Kalashnikov, A. V. Kozachek,
S. L. Glushkov, K. V. Strabykin, S. Yu. Puchagin, D. O. Mansurov,
B. P. Mironychev, R. A. Mayorov, V. L. Mayornikova

The paper presents a design of a four-module electrophysical facility «Gamma-4» (2 MV, 3 MA, 320 kJ, 60 ns) developed to make researches in the sphere of radiation physics. For the facility there is created and experimentally elaborated a standard module including the systems of high-voltage pulses shaping and pulse transmission to a load node. During 700 shots its parameters and operational reliability were proved. With matched load the module generates electric pulse with the amplitudes of voltage and current up to 2 MV, 750 kA and half-height duration equal to 60 ns.

There are developed layout diagrams of the facility in the modes of synchronous (accuracy ± 3 ns) operation of module with vacuum electron diodes and with current summator to generate soft X-ray pulses.