

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.384.6+621.386.8

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ИГУР-П
ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

**©2026 г. Н. М. Вагина^{а,*}, А. В. Шляпкин^а, Е. Н. Колосков^а,
Д. Д. Черноскулова^а, Е. Н. Ежов^а, Г. Н. Краснов^а, А. В. Кошкин^а**

*^аРоссийский федеральный ядерный центр–Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина*

Россия, 456770, Снежинск Челябинской обл., ул. Васильева, 13

**e-mail: dep5@vniitf.ru*

Поступила в редакцию 14.07.2025 г.

После доработки 05.09.2025 г.

Принята к публикации 30.10.2025 г.

Представлены результаты работ по созданию высоковольтного импульсного ускорителя электронов ИГУР-П, способного формировать до четырех импульсов рентгеновского излучения длительностью от 50 до 250 нс и максимальной энергией до 1.5 МВ на одном вакуумном диоде. Временной интервал между первым и последним импульсами варьируется и может составлять от 0.4 до 2.5 мкс. Дано описание эксперимента и приведены условия генерации нескольких импульсов рентгеновского излучения подряд на одном RP-диоде. Определены рентгенографические возможности ускорителя – диаметр фокусного пятна и просвечивающая способность в двух- и четырехимпульсном режиме генерации. Стабильность воспроизведения импульсов позволяет использовать ускоритель ИГУР-П в качестве многокадрового источника рентгеновского излучения и создать на его базе комплекс по изучению свойств материалов во взрывных экспериментах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача создания многокадровых комплексов для рентгенографии быстропротекающих процессов является сложной как с точки зрения создания многоимпульсного источника рентгеновского излучения, так и систем регистрации. Увеличение количества кадров с одного ракурса увеличивает информативность результатов рентгенографирования. Преимуществом высоковольтных импульсных ускорителей электронов является возможность работы в ждущем режиме, когда время ожидания прихода синхроимпульса от внешнего источника с последующей генерацией нескольких импульсов рентгеновского излучения может составлять до нескольких минут, что обеспечивает синхронизацию

импульса рентгеновского излучения (РИ) с разными стадиями развивающегося процесса. Например, для изучения развития детонационных волн в сложных конструкциях и процессов пыления с поверхности образца.

Для этих целей в РФЯЦ–ВНИИТФ создан высоковольтный импульсный ускоритель электронов ИГУР-П на базе двухмодульного индуктивно-емкостного накопителя энергии с системой формирования импульса на основе электрически взрывааемых проводников. Уникальной особенностью ускорителя является возможность формирования до четырех импульсов РИ на одном мишенном узле без его разрушения. Последовательности могут состоять из одного, двух, трех или четырех импульсов. Условия для формирования последовательностей импульсов РИ при одном срабатывании ускорителя разные, но достаточно стабильные, чтобы обеспечить синхронизацию с системами диагностики. При этом граничная энергия квантов рентгеновского излучения может варьироваться в широких пределах – от 0.3 до 1.5 МэВ. Дополнительным преимуществом ускорителя ИГУР-П при генерации РИ является возможность воспроизводить сходные параметры второго, третьего или четвертого импульса в одноимпульсном режиме. Данная возможность позволяет воспроизводить спектр РИ второго, третьего или четвертого кадра, что важно при отработке режимов регистрации и последующей обработке рентгеновских изображений. Время, при которых обеспечивается генерация РИ, варьируется и может составлять от 0.4 до 2.5 мкс от начала первого импульса.

Выбор схемы ускорителя на базе индуктивно-емкостного накопителя энергии (ИЕНЭ) с системой формирования высоковольтного импульса на основе электрически взрывааемых проводников (ЭВП) обусловлен следующими соображениями:

- возможность реализации многоимпульсного режима генерации РИ с одного ракурса;
- возможность в широких пределах изменять граничную энергию и временные характеристики импульсов РИ, что позволяет использовать один ускоритель для решения широкого круга задач;
- работа в ждущем режиме.

2. КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

В качестве прототипа четырехимпульсного ускорителя ИГУР-П использовался ускоритель ИГУР-3.5 [1], созданный в 2006 году и успешно применяемый в РФЯЦ–ВНИИТФ для рентгенографии быстропротекающих процессов. Внешний вид ускорителя ИГУР-3.5 представлен на рис. 1.

Рис. 1. Внешний вид ускорителя ИГУР-3.5

Ускоритель ИГУР-3.5 состоит из ~~одномодульного~~ первичного накопителя энергии – шестиступенчатого генератора импульсных напряжений (ГИН), собранного по схеме Аркадьева–Маркса с двуполярной зарядкой, и системы формирования импульса (СФИ) и ускорительной трубки (УТ). В СФИ в качестве обострителя мощности применяется индуктивный накопитель в виде бескорпусного соленоида, а в качестве прерывателя тока – несколько десятков тонких медных электрически взрывающихся проводов [1]. Ускорительная трубка с вакуумным RP-диодом (rod-pinch diod) находится на выходе СФИ и обеспечивает вывод рентгеновского излучения через прозрачное выходное окно. За счет подбора режима работы ГИН и количества взрывающихся проводников ускоряющее напряжение на вакуумном диоде можно регулировать в диапазоне от 0.3 до 4 МВ. Конструкция СФИ позволила реализовать последовательный взрыв двух каскадов медных проводников разного сечения и тем самым сформировать два импульса высокого напряжения. Данный прототип показал свою работоспособность. Комплекс работ по отработке режимов работы ускорителя ИГУР-3.5 совместно с системой регистрации на основе фотохромных запоминающих экранов, позволил создать двухкадровую рентгеновскую диагностику быстропротекающих процессов.

Дальнейшие работы по изменению конструкции первичного накопителя энергии и результаты исследований по возможности генерации РИ на одном RP-диоде позволили создать конструкцию нового четырехимпульсного высоковольтного ускорителя электронов ИГУР-II и использовать его для генерации до четырех кадров РИ.

На рис. 2 представлена конструкция ускорителя ИГУР-II, а на рис. 3 – его принципиальная электрическая схема.

Рис. 2. Конструкция ускорителя ИГУР-II (частичный разрез)

Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ускорителя ИГУР-II

Конструкция ускорителя аналогична прототипу, но состоит из двух симметричных автономных модулей, поочередно срабатывающих на общую нагрузку – УТ со стержневым RP-диодом. Каждый модуль представляет собой генератор высоковольтных импульсов напряжения и содержит первичный накопитель энергии – ГИН, собранный по трехступенчатой схеме Аркадьева–Маркса с двуполярной зарядкой, и систему формирования коротких высоковольтных импульсов (СФИ), включающей в себя индуктивный накопитель энергии в виде бескаркасной катушки индуктивности L , прерыватель тока в виде узла ЭВП и обостряющий разрядник (ОР). Бескорпусной масляный двухэлектродный ОР предназначен для обострения фронта импульса напряжения на нагрузке в виде УТ, вследствие возможности изменения зазора в ОР и, таким образом, регулировки уровня напряжения, при котором модуль подключается к УТ.

~~Генераторы работают на общую нагрузку — ускорительную трубку со стержневым RP-диодом.~~ Фаза проводимости с последующим размыканием тока и формированием одного или двух высоковольтных импульсов обеспечивается на каждом модуле тремя последовательными каскадами электрически взрывающихся проводников (ЭВП₁ или ЭВП₂). Поочередный взрыв медных проводников первого и второго каскадов в одном узле ЭВП обеспечивает получение двух последовательных импульсов перенапряжения на общей нагрузке. Для формирования одного импульса с одного модуля взрываются оба каскада одновременно. Третий каскад предназначен для отсечки. Общий мишенный узел с тонким танталовым стержнем-анодом обеспечивает фокусировку и генерацию импульсов рентгеновского излучения в одной и той же точке пространства, в одном ракурсе.

Таблица 1. Основные технические характеристики ускорителя ИГУР-П

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение, МВ	≤ 1.5
Ток пучка электронов, кА	≤ 30
Длительность импульса тормозного излучения, нс	50–250
Максимальная просвечивающая способность на расстоянии 1 м от источника излучения в двухимпульсном режиме, мм	≤ 100 (Fe)
Размер фокусного пятна источника излучения, мм	1–5

Конструкция ускорительной трубки ускорителя ИГУР-П с RP-диодом представлена на рис. 4. Стержневой RP-диод состоит из анодной иглы, которая проходит сквозь кольцевой катод (катодный диск) по его оси. Под воздействием приложенного потенциала электроны эмитируются с внутренней поверхности катодного диска и некоторое время дрейфуют к торцу анодной иглы. Под воздействием нарастающего тока электроны фокусируются на конце иглы, происходит взаимодействие электронного пучка с материалом анода, и испускаются кванты рентгеновского излучения преимущественно в направлении острия анода [2, 3]. Такая конструкция позволяет получить диаметр фокусного пятна, сопоставимый с диаметром анодной иглы.

Рис. 4. Конструкция ускорительной трубки ускорителя ИГУР-П

Работу ускорителя ИГУР-П в режиме одиночного импульса можно представить следующим образом:

– предварительно заряженные конденсаторные батареи ГИН по подаче синхроимпульса от внешнего источника на разрядные устройства FV начинают медленно

разряжаться по синусоидальному закону (период около 10 мкс) через индуктивность L и каскады ЭВП₁, при этом разрядники ОР₁ и ОР₂ разомкнуты и препятствует протеканию тока через УТ;

– по мере нарастания тока, каскады ЭВП разогреваются и, претерпевая ряд фазовых превращений, взрываются, в результате чего ток в контуре прерывается, а на индуктивности возникает ЭДС самоиндукции, и в точке разрыва цепи (на электроде ОР₁) формируется короткий (около 100 нс) импульс в несколько раз превышающий ударное напряжения с амплитудой $U_{\text{ЭВП}} \approx L(di/dt)$, где $U_{\text{ЭВП}}$ – амплитуда напряжения в результате электровзрыва проводников, L – полная индуктивность разрядного контура, а di/dt – скорость убывания тока после разрыва цепи;

– при достижении на ОР₁ пробивного напряжения, зависящего от величины зазора в ОР, происходит его пробой, и высоковольтный импульс прикладывается к УТ, где происходит эмиссия и ускорение электронов в катод-анодном пространстве РР-диода;

– электроны фокусируются на кончике анодной иглы и генерируется импульс РИ.

Как правило, к моменту окончания импульса РИ происходит электрический пробой по продуктам взрыва набора ЭВП₁, напряжение на УТ падает, и ток снова начинает течь через ЭВП₁. Если в качестве ЭВП₁ используются два последовательных каскада проводников с различным суммарным сечением, то в момент формирования импульса высокого напряжения взрывается только первый каскад, а в последующем и второй, формируя второй импульс напряжения по описанной выше схеме. При этом необходимо помнить, что величина тока в диоде от импульса к импульсу растет и возможность фокусировки электронов на острие иглы ухудшается за счет образования плазмы от предыдущего импульса.

Проведенные теоретические расчеты электрической схемы ускорителя демонстрируют возможность реализации на ускорителе ИГУР-П режимов генерации до четырех последовательных импульсов РИ за счет использования двухкаскадного взрыва ЭВП в обоих генераторах ускорителя. На рис. 5 показаны расчетные кривые, полученные в результате численного моделирования по доработанной для двухкаскадного взрыва ЭВП программе КЭВ (каскадный электровзрыв) [4].

Рис. 5. Расчетные кривые токов и напряжений на ЭВП и УТ для двухкаскадного взрыва ЭВП при различных длинах проволок в каскадах

Ускоритель ИГУР-П компактен. Его габариты (Д×Ш×В) составляют 4.5×7.5×2.5 м³. В качестве изоляции в ГИН применяется трансформаторное масло. Масса ускорителя ИГУР-П заполненного маслом – 15 т. Технологические системы (маслообеспечения, вакуумная, газонаполнения, питания, зарядно-заземляющие блокировки и система запуска)

расположены отдельно, но при необходимости могут быть компактно размещены в рамках указанных габаритов. Модульная конструкция ускорителя позволяет оперативно перемещать и размещать его на разных площадках.

Ждущий режим работы ускорителя обеспечивается высокой электрической прочностью многоканальных газонаполненных разрядных устройств и коммутацией их от внешнего запускающего устройства по внешнему синхроимпульсу.

3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ

Режимы работы ускорителя и формирование одного, двух, трех или четырех импульсов ускоряющего напряжения обеспечивается временным интервалом между запусками модулей и разным уровнем напряжения, при котором модули подключаются к УТ и, соответственно, разными наборами медных проводников.

Ускоряющее напряжение на УТ может варьироваться в зависимости от количества импульсов и находится в диапазоне от 1.5 до 0.3 МВ, при этом значение тока в нагрузке будет нарастать от 5 до 30 кА. Измерение амплитуды ускоряющего напряжения ведется емкостными делителями напряжения, расположенными над высоковольтным фланцем УТ (рис. 2), а амплитуды тока – двумя поясами Роговского, расположенными в корпусе УТ (рис. 4).

Регистрация длительности импульсов рентгеновского излучения (РИ) проводится непосредственно за прозрачным выходным окном ускорителя ИГУР-П и определяется прямым измерением по показаниям полупроводникового детектора на основе $p-i-n$ -диода.

Типичные осциллограммы тока и напряжения УТ и импульса РИ для различных режимов работы ускорителя ИГУР-П представлены на рис. 6.

Рис. 6. Типичные осциллограммы тока и напряжения УТ

При каскадном взрыве проводников обеспечивается хорошая стабильность положения импульсов РИ по времени и позволяет синхронизироваться с требуемой стадией быстропротекающего процесса. Для примера, на рис. 7 представлены данные от детектора РИД-Г для серии из пяти пусков ускорителя в двухимпульсном режиме (а) и двух пусков ускорителя в четырехимпульсном режиме (б).

Рис. 7. Данные от детектора РИД-Г для серии из пяти пусков ускорителя в двухимпульсном режиме (а) и двух пусков ускорителя в четырехимпульсном режиме (б)

В двухимпульсном режиме генерации РИ длительность первого импульса всегда составляет примерно 50 нс, а второго – около 125 нс. В трех- и четырехимпульсном режимах длительности первого и второго импульсов сохраняются при достаточно высоком разбросе

для третьего и четвертого. Максимальный временной интервал между первым и последним импульсами РИ может составлять 2.5 мкс.

4. РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРИТЕЛЯ

Для создания на базе ускорителя ИГУР-П многокадрового комплекса для рентгенографии быстропротекающих процессов необходимо проверить его рентгенографические возможности – максимальную просвечивающую способность и размер фокусного пятна источника излучения. Определение данных параметров проводилось с помощью системы многокадровой регистрации на базе электронно-оптических камер с использованием сцинтиллятора LYSO (ортосиликат лютеция-иттрия).

Для определения размера фокусного пятна ускорителя использовался снимок протяженного края танталовой пластины толщиной 1 мм, которая устанавливалась за выходным окном ускорителя на расстоянии 1 м.

Определение диаметра пучка проводилось стандартным способом по денситограмме теневого изображения и составило не более 1.2 мм для анодной иглы диаметром 1 мм для каждого импульса в двухимпульсном режиме.

Для определения просвечивающей способности в качестве тест-объекта использовался стальной дырчатый клин максимальной толщиной 120 мм, установленный за выходным окном ускорителя на расстоянии 1 м. Для двухимпульсного режима работы ускорителя максимальная просвечивающая способность в обоих импульсах составляет 100 мм, для четырехимпульсного – не менее 80 мм во втором и не менее 60 мм в четвертом импульсе.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В РФЯЦ-ВНИИТФ создан четырехимпульсный высоковольтный ускоритель электронов прямого действия ИГУР-П на базе двухмодульного индуктивно-емкостного накопителя энергии с системой формирования высоковольтного импульса на основе электрически взрываемых проводников для решения задач по рентгенографии быстропротекающих процессов. В ждущем режиме с одного ракурса генерируется до четырех импульсов рентгеновского излучения с варьируемыми временными интервалами между импульсами и максимальным временным интервалом 2.5 мкс. С целью подтверждения рентгенографических возможностей ускорителя ИГУР-П проведено определение размера фокусного пятна для анодной иглы диаметром 1 мм и просвечивающей способности в двух- и четырехимпульсном режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ведерников А.И., Касьянов Н.Ю., Колосков Е.Н.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. № 3–4. С. 125. elibrary.ru/item.asp?id=23215296
2. *Плохой В.В.* РФ Патент 2731545, 2019.
3. *Cooperstein G., Boller J.R., Commisso R.J. et al.* // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. № 10. P. 4618. <https://doi.org/10.1063/1.1493795>
4. *Бакулин Ю.Д., Куропатенко В.Ф., Лучинский А.В.* // ЖТФ. 1976. Т. 46. № 9. С. 1963.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Внешний вид ускорителя ИГУР-3.5: 1 – модуль генератора импульсных напряжений, 2 – система формирования импульсов на основе взрывающихся проводников, 3 – ускорительная трубка с вакуумным RD-диодом, 4 – выходное окно ускорителя.
- Рис. 2.** Конструкция ускорителя ИГУР-П: 1 – генераторы импульсных напряжений (ГИН1 и ГИН2), 2 – индуктивный накопитель энергии, 3 – система формирования импульса (СФИ₁ и СФИ₂), 4 – делители напряжения, 5 – ускорительная трубка, 6 – обостряющие разрядники, 7 – разрядное устройство.
- Рис. 3.** Принципиальная электрическая схема ускорителя ИГУР-П: С – конденсаторная батарея ГИН, L – индуктивный накопитель энергии, ЭВП – набор взрывающихся проводников, ОР – обостряющие разрядники, УТ – ускорительная трубка с RD-диодом, FV – управляемые разрядники.
- Рис. 4.** Конструкция ускорительной трубки ускорителя ИГУР-П: 1 – анодная игла, 2 – катодный диск, 3 – пояс Роговского, 4 – изолятор УТ, 5 – высоковольтный фланец обостряющего разрядника.
- Рис. 5.** Расчетные кривые токов и напряжений на ЭВП и УТ для двухкаскадного взрыва ЭВП для двух вариантов расчета: а – вариант 1, б – вариант 2.
- Рис. 6.** Типичные осциллограммы импульсов тока и напряжения УТ и импульса РИ в одноимпульсном (а), двухимпульсном (б) и четырехимпульсном (в) режимах работы ускорителя.
- Рис. 7.** Данные от детектора РИД-Г для серии из пяти пусков ускорителя в двухимпульсном режиме (а) и двух пусков ускорителя в четырехимпульсном режиме (б) генерации РИ.

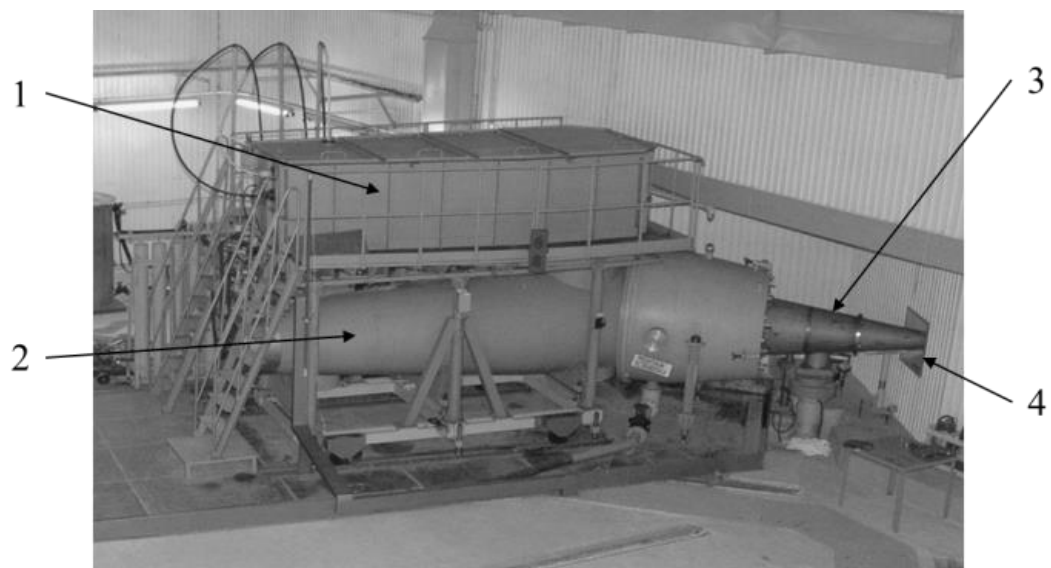


Рис. 1.

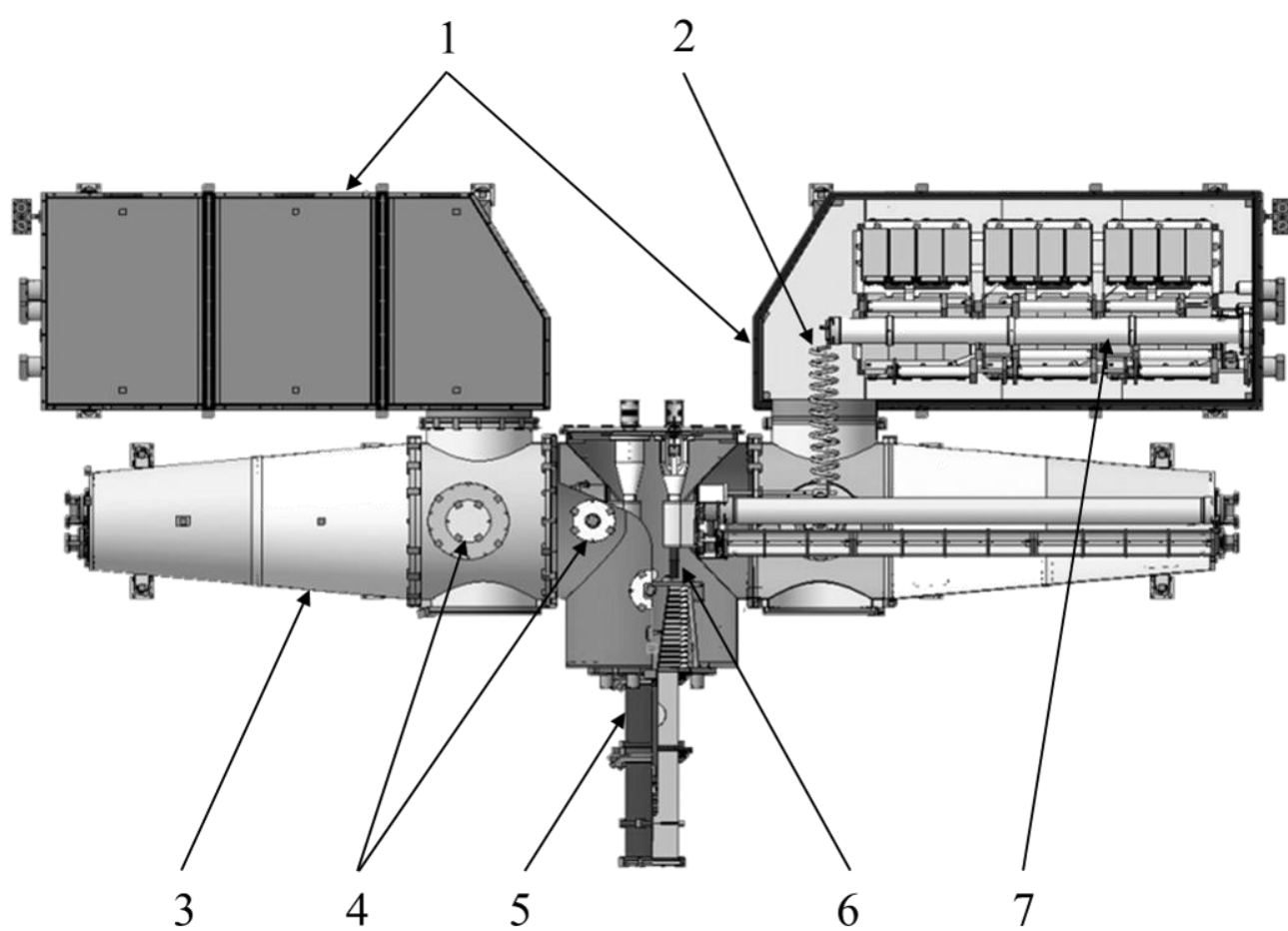


Рис. 2.

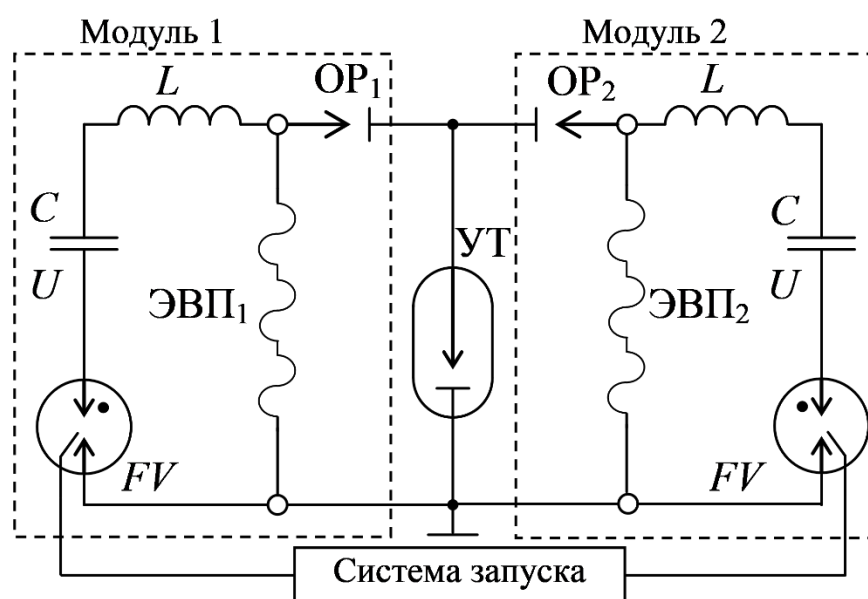


Рис. 3.

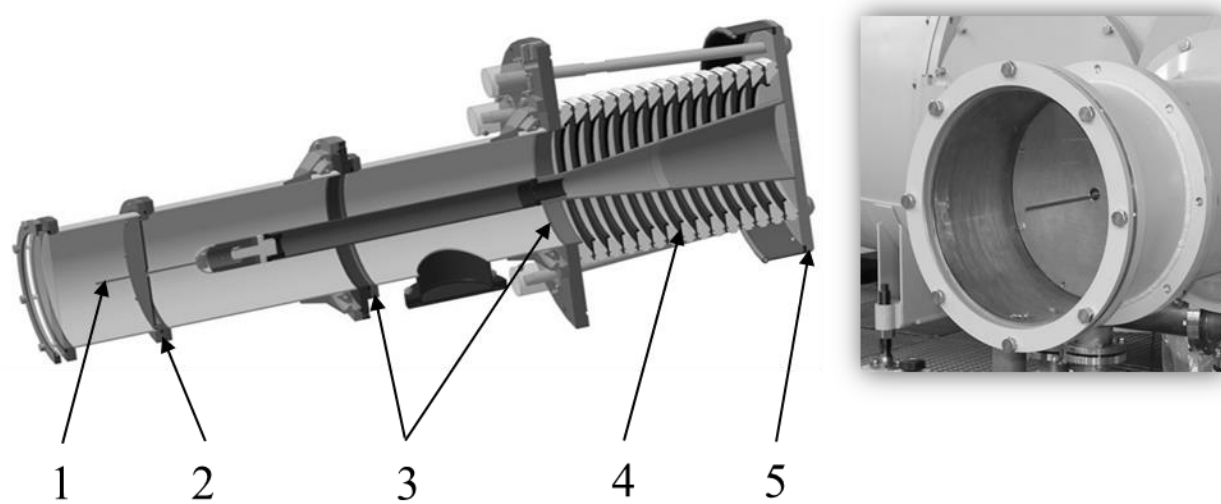
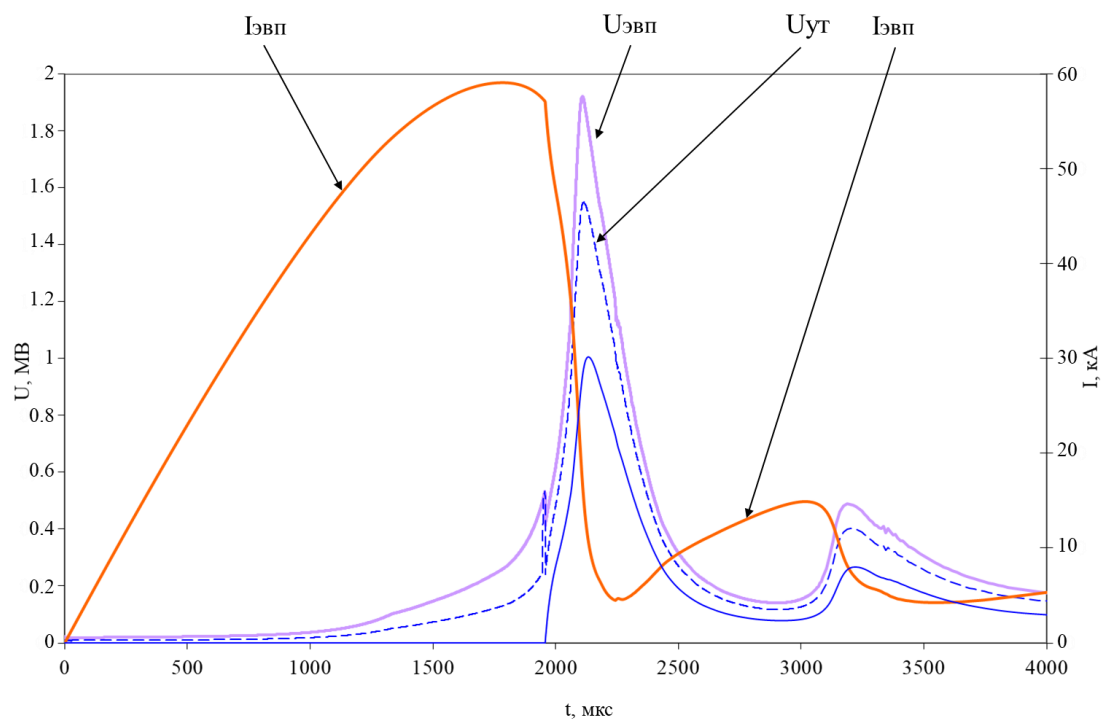
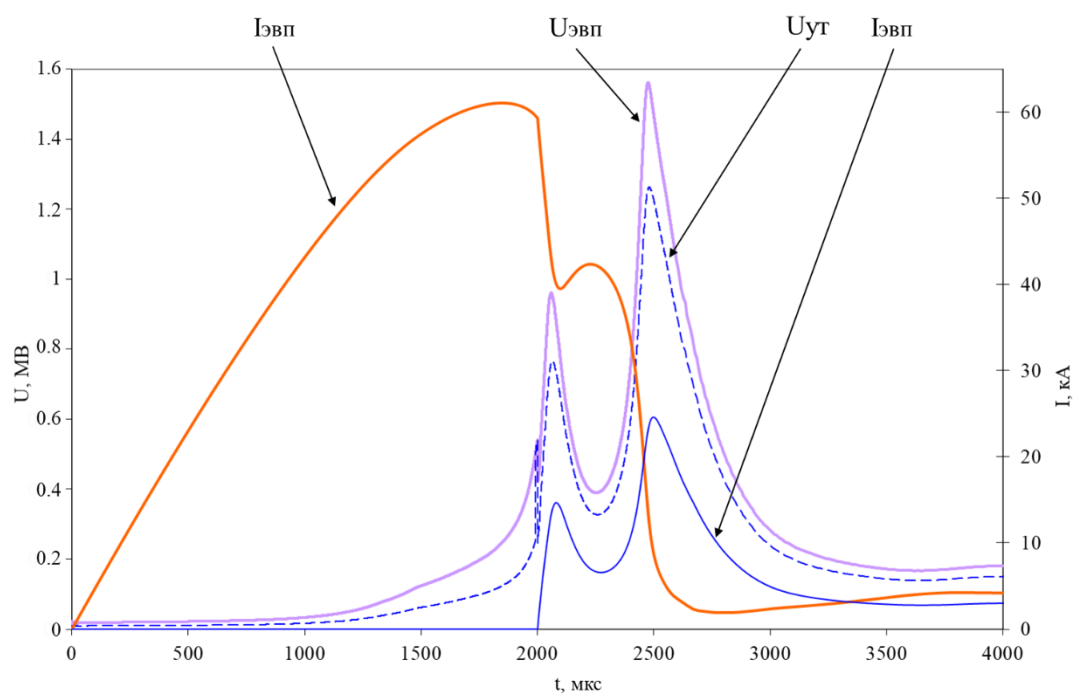


Рис. 4.

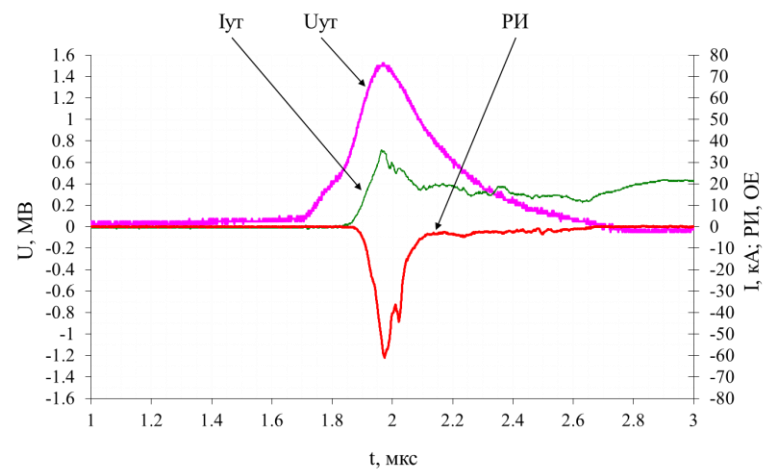


(a)

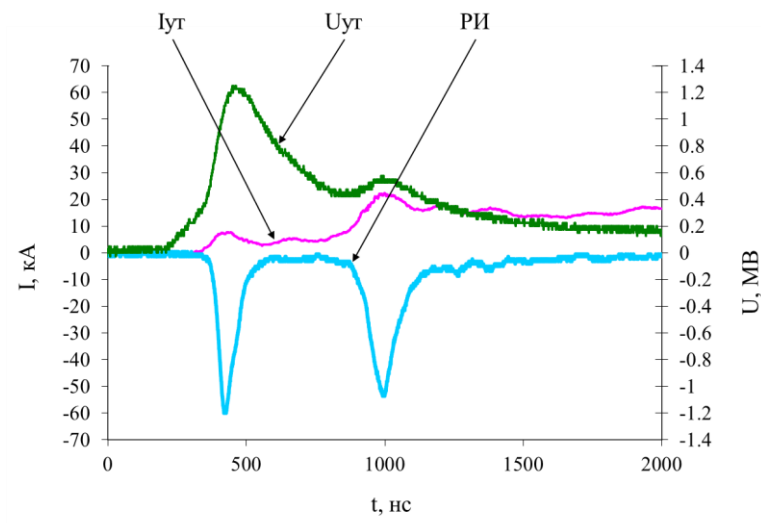


(б)

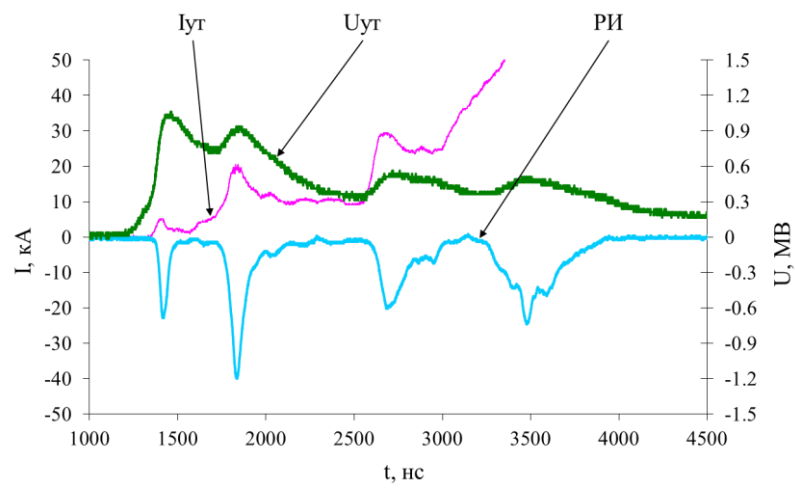
Рис. 5.



(a)



(б)



(B)

Рис. 6.

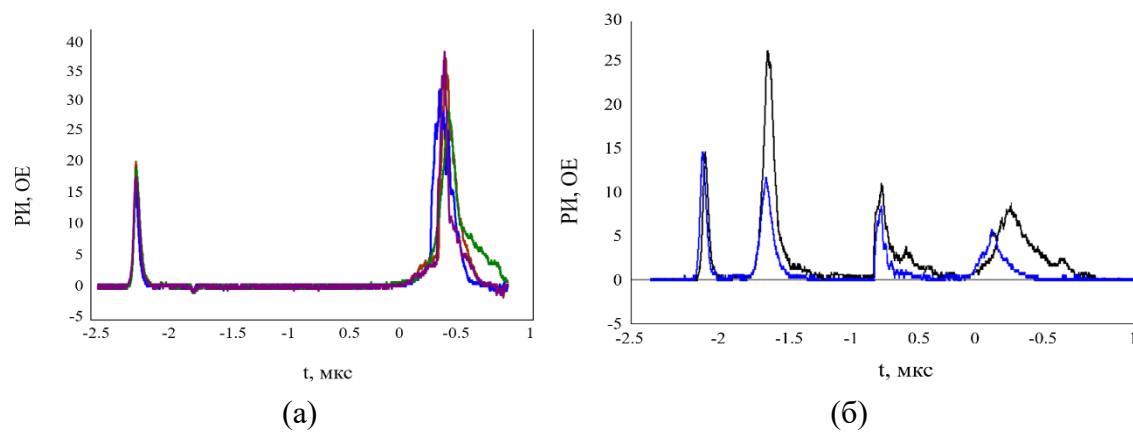


Рис. 7.