

ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.384.63

**МОДУЛЬ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕТАТРОНА
МОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

©2026 г. **О. А. Шамро, А. И. Бунин, В. И. Нижегородцев, К. В. Савченко,
В. Д. Селемир, В. А. Фомичёв*, А. А. Чинин**

*Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Россия, 607190, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37
e-mail: vaalfom@gmail.com

Поступила в редакцию 26.01.2026 г.

После доработки 27.02.2026 г.

Принята к публикации 30.03.2026 г.

Описан модуль импульсного питания электромагнита мобильного генератора гамма-излучения на базе бетатрона типа БИМ (безжелезный, импульсный, малогабаритный). Модуль содержит систему импульсного питания электромагнита бетатрона и систему ее транспортировки, эксплуатации и хранения. Первая система включает в себя емкостный накопитель на энергию 0.7 МДж (восемь конденсаторов емкостью 300 мкФ и напряжением 24 кВ каждый) и стойку коммутации, вторая – специально оборудованный двадцатифутовый контейнер на полуприцепе. Система импульсного питания предназначена для создания в обмотках электромагнита бетатрона униполярного импульса тока амплитудой 110 кА и длительностью по основанию 1 мс с разбросом по времени срабатывания не более 50 нс. Описана электрическая схема и порядок работы системы импульсного питания. Представлены результаты тестовых включений модуля. Приведены осциллограммы сигналов с датчиков контроля параметров системы импульсного питания. Конструкция модуля может найти применение и в других мобильных электрофизических установках с учетом их электрических параметров.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод импульсной рентгенографии широко применяется для исследования быстропротекающих процессов. Он позволяет решать как фундаментальные, так и прикладные задачи. К фундаментальным задачам [1] относится построение уравнений состояния веществ (Ta, CO₂, H₂, D₂ и др.) в сверхкритических условиях. Прикладные задачи [2]

включают определение по рентгеновским изображениям характерных зон и фаз быстропротекающих процессов, контуров объектов, фронтов ударных и детонационных волн, восстановление внутренней структуры объектов исследования, в том числе распределение плотности материала.

Для данного метода необходимы мощные источники рентгеновского излучения. Во ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ” при проведении исследований [3] на рентгенографических комплексах в течение длительного времени применяются циклические ускорители на базе бетатрона типа БИМ (безжелезный, импульсный, малогабаритный) [4]. Преимущества таких бетатронов – компактность (радиус равновесной орбиты составляет 234 мм), большое время цикла ускорения, что позволяет оптимально синхронизировать момент сброса ускоренных электронов на мишень с коротким (обычно не более 100 мкс) исследуемым процессом, два режима сброса – быстрый и медленный. В первом режиме генерируется как один импульс сброса на мишень с $t_{\text{имп}} \leq 100$ нс, так и больше (до трех) с $t_{\text{имп}} \leq 150$ нс на полувысоте (следовательно, от одного до трех импульсов излучения). Генерация более одного импульса за цикл ускорения обеспечивает многокадровость в одном эксперименте. Во втором режиме формируется моноимпульс с $t_{\text{имп}} \leq 5$ мкс на полувысоте. Кроме того, в зависимости от решаемых задач возможно изменение граничной энергии электронного пучка в диапазоне от 10 до 70 МэВ (определяется величиной емкостного накопителя системы импульсного питания электромагнита бетатрона).

Функционирующие в настоящее время рентгенографические комплексы представляют собой стационарные объекты. Для решения ряда экспериментальных задач, требующих оптимизации геометрии опыта, необходим мобильный вариант [5] исполнения рентгенографического комплекса. Он содержит мобильные генераторы гамма-излучения [6], взрывозащитную камеру с объектом исследования, системы коллимации рентгеновского излучения и регистрации теневых изображений.

В период с 2022 по 2024 гг. во ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ” разработан, изготовлен и выведен на рабочие параметры мобильный генератор гамма-излучения нового поколения [7]. Он состоит из трех модулей – модуля импульсного питания электромагнита (МИПЭ) бетатрона, ускорительного модуля и модуля управления и контроля. На рис. 1 приведена его фотография.

Рис. 1. Мобильный генератор гамма-излучения нового поколения

Каждый модуль включает часть оборудования циклического ускорителя и систему его транспортировки, эксплуатации и хранения (СТЭХ).

В настоящей статье представлены результаты разработки и испытания МИПЭ,

включающего в себя систему импульсного питания [8] электромагнита бетатрона и СТЭХ МИПЭ [9].

2. СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕТАТРОНА

На рис. 2 приведена фотография оборудования системы импульсного питания электромагнита бетатрона, размещенного в двадцатифутовом контейнере. В ее состав входят: емкостный накопитель 1 на энергию 0.7 МДж, стойка коммутации 2 и система соединителей импульсного питания 3.

Рис. 2. Система импульсного питания электромагнита бетатрона

Емкостной накопитель состоит из восьми конденсаторов ИЭПС-24-290 УЗ (ООО “Серпуховский конденсаторный завод “КВАР”) общей емкостью $C_0 \approx 2.4$ мФ.

Стойка коммутации предназначена для передачи энергии емкостного накопителя на обмотки электромагнита. Она соединена с емкостным накопителем и электромагнитом бетатрона кабельными линиями (кабель марки РК50 -11-13) длиной 4 метра (40 штук) и 20 метров (30 штук) соответственно. В качестве основного разрядника емкостного накопителя применяется силовой полупроводниковый блок КРД1-250-25 (НИЦ СПП ПАО “Электровыпрямитель”, г. Саранск) на основе реверсивно-включаемых динисторов [10].

Система импульсного питания предназначена для создания в обмотках электромагнита бетатрона униполярного импульса тока амплитудой 110 кА и длительностью по основанию 1 мс с разбросом по времени срабатывания не более 50 нс.

Потребляемая электрическая мощность в рабочем цикле – не более 15 кВт, длительность рабочего цикла – 5 мин. Габаритные размеры емкостного накопителя $1.9 \times 1.4 \times 1.5$ м³, стойки коммутации $1.3 \times 1.3 \times 1.9$ м³. Общий вес оборудования 2 т.

На рис. 3 представлена электрическая схема системы импульсного питания электромагнита бетатрона. Схема включает в себя высоковольтный источник питания ЗУ 2515М (НП “ОКБ развития высоких технологий”, г. Н. Новгород), элементы автоматизированной системы управления и контроля (АСУиК), элементы системы синхронизации (низковольтной и высоковольтной), стойку коммутации, емкостный накопитель C_0 и обмотки электромагнита L_n . Штриховой линией выделены элементы схемы, расположенные в стойке коммутации.

Рис. 3. Электрическая схема системы импульсного питания

Порядок работы системы импульсного питания следующий. По команде с пульта оператора АСУиК дает команду электромагнитному переключателю K (ЭМ33-61111-00, ПО “Электротехник”, Москва) на размыкание заземления зарядной цепи, поскольку

первоначально емкостный накопитель заземлен. Бесконтактный датчик D_1 контролирует срабатывание переключателя. После размыкания высоковольтный источник питания ЗУ 2515М заряжает емкостной накопитель C_0 и емкость C_2 блока управления КРД1-250-25 через цепочку диодов VD_2 – VD_5 и резисторы R_1 – R_3 . Диод VD_1 предназначен для защиты ЗУ 2515М от напряжения обратной полярности во время срабатывания системы импульсного питания.

Контроль напряжения зарядки емкостного накопителя осуществляется с помощью делителя напряжения обратной связи на резисторах R_4 и R_5 . После зарядки емкостного накопителя C_0 до рабочего напряжения $U_{\text{раб}} = -18$ кВ АСУиК посылает сигнал на многоканальный генератор низковольтной системы синхронизации с оптическими выходами. Этот сигнал через волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС) пересылается на генератор [11] высоковольтной системы синхронизации, который формирует импульс напряжения амплитудой $U = 20$ кВ и длительностью фронта $t = 2$ нс. Сформированный импульс напряжения активирует блок управления КРД1-250-25. Применение ВОЛС позволяет минимизировать электромагнитные помехи на оборудование АСУиК. После срабатывания блока управления КРД1-250-25 коммутатор VD_7 осуществляет передачу энергии, запасенной в емкостном накопителе, на обмотки L_n электромагнита. Для стабильного и надежного срабатывания КРД1-250-25 необходимо обеспечить минимальный заряд $Q_{\text{нак}} \approx 3.5$ мКл для импульса тока накачки с длительностью импульса $t = 1$ – 5 мкс по основанию.

Для защиты емкостного накопителя от обратного тока во время срабатывания системы импульсного питания электромагнита используется специально разработанная схема формирования униполярного импульса тока. Она реализуется путем шунтирования обмоток электромагнита резистивной нагрузкой R_6 и диодом VD_6 после достижения в обмотках максимума импульса тока. В качестве диода VD_6 применяется полупроводниковый блок СДК1-250-25 (НИЦ СПП ПАО “Электровыпрямитель”, г. Саранск). Резистор R_6 образован конструкцией из труб нержавеющей стали с $d = 25$ мм и $l = 19$ м.

Диод VD_8 предназначен для защиты КРД1-250-25 от перенапряжений на выводах электромагнита, связанных с волновыми процессами в линиях передачи во время срабатывания системы импульсного питания электромагнита.

Для подавления высокочастотных помех в схему включен RLC-фильтр с элементами R_7 , L_1 и C_1 . Конденсатор C_1 шунтируется резистором R_8 для исключения возможности возникновения на нем остаточного напряжения.

При аварийном или нештатном режимах работы системы импульсного питания, емкостной накопитель C_0 разряжается на “землю” через резисторы R_2 и R_3 электромагнитным переключателем K .

Токовый шунт D_2 измеряет сигнал импульса напряжения с генератора высоковольтной системы синхронизации. Пояс Роговского D_3 контролирует сигнал импульса тока накачки КРД1-250-25 с его блока управления. Пояс Роговского D_4 измеряет сигнал импульса тока разряда емкостного накопителя на нагрузку L_n . Индукционный датчик D_5 расположен в медианной плоскости электромагнита и контролирует импульс тока в его обмотках. Его условно называют сигналом “ноль-поля”. Именно с него начинается отсчет времени включения систем мобильного генератора согласно его рабочей временной диаграмме.

3. СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ХРАНЕНИЯ

На рис. 4 приведена фотография СТЭХ МИПЭ. Она включает специально разработанный двадцатифутовый утепленный контейнер 1 с боковой дверью и торцевыми распашными воротами. Для транспортировки по дорогам общего пользования контейнер установлен на полуприцеп 2 с высотой седельно-цепного устройства 1100 мм. Общий вес оборудования 4 т. Для передвижения МИПЭ по территории экспериментального полигона в состав СТЭХ входит подкатная тележка 3.

Рис. 4. Система транспортировки, эксплуатации и хранения МИПЭ

Оборудование системы импульсного питания закреплено внутри контейнера, что исключает возможность его перемещения во время транспортировки. Контейнер МИПЭ оборудован отоплением, системами контроля климата, пожаротушения, светозвуковой сигнализации, видеонаблюдения, блокировками по высокому напряжению и грузоподъемным механизмом на 1 т.

Электропитание (380 В) подключается к МИПЭ по четырехжильному кабелю с разъемом, расположенному снаружи на торцевой поверхности контейнера, не оснащенной распашными воротами. Кабель электропитания ($l \approx 100$ м) в транспортном положении свернут на барабане. Подключение потребителей и цепей управления осуществляется через распределительный шкаф внутри контейнера.

Подключение силовых, управляющих и измерительных кабельных линий связи МИПЭ с оборудованием мобильного генератора гамма-излучения производится через специально предусмотренные конструкцией контейнера люки размером 300×200 мм².

В 2024 году проведены испытания МИПЭ на воздействие механических факторов в условиях, имитирующих передвижение автомобильным транспортом. Испытания проведены методом ударных нагрузений многократного действия на электродинамическом вибрационном стенде. Параметры режима нагружения подобраны с учетом расстояния транспортирования, равного 300 км, автомобильным транспортом по шоссе с твердым

покрытием. Испытания прошли успешно.

Далее МИПЭ был подключен к ускорительному модулю и модулю управления и контроля и проведены тестовые включения как самого модуля отдельно, так и в составе мобильного генератора гамма-излучения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В сентябре 2024 г. были проведены тестовые включения МИПЭ мобильного генератора гамма-излучения. В ходе тестовых включений система импульсного питания была испытана при коммутации конденсаторной батареи максимальной емкостью $C_{\text{бат}} = 2.4$ мФ на индуктивную нагрузку электромагнита бетатрона. Также была отработана электромагнитная совместимость оборудования.

На рис. 5 приведены типичные осциллограммы сигналов с датчиков контроля параметров системы импульсного питания электромагнита в рабочем цикле. Осциллограмма импульса напряжения с генератора запуска блока управления основного разрядника батареи приведена на рис. 5а. Анализ осциллограммы показал: амплитуда $U \approx 20$ кВ, длительность фронта $t = 2$ нс. На рис. 5б приведена осциллограмма импульса тока накачки основного разрядника батареи с блока управления. Амплитуда сигнала $I \approx 2.3$ кА, длительность $t = 1.5$ мкс по основанию. На рис. 5в приведена осциллограмма импульса тока разряда емкостного накопителя на обмотки электромагнита. Максимальный ток разряда емкостного накопителя $I \approx 110$ кА, длительность $t = 1$ мс по основанию. Полученные данные соответствуют штатным параметрам. На рис. 5г приведена осциллограмма сигнала с индукционного датчика “ноль-поля”, расположенного в медианной плоскости электромагнита.

Рис. 5. Осциллограммы сигналов с датчиков контроля параметров системы импульсного питания электромагнита бетатрона в рабочем цикле

Для оценки стабильности срабатывания системы импульсного питания электромагнита было выполнено пятнадцать ее включений при $U_{\text{раб}} = -18$ кВ. Осциллограф фиксировал сигналы в режиме наложения. На рис. 6 показано наложение пятнадцати осциллограмм импульса тока системы импульсного питания электромагнита. Вставка в правом верхнем углу соответствует увеличенному фрагменту осциллограмм в окрестности начальной временной точки. Анализ сигналов показал: разброс времени разряда системы импульсного питания электромагнита составил $\Delta t \leq 50$ нс.

Рис. 6. Наложенные осциллограммы импульса тока системы импульсного питания электромагнита генератора гамма-излучения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан, испытан и выведен на рабочие параметры модуль импульсного питания электромагнита бетатрона мобильного генератора гамма-излучения нового поколения. Успешно проведены транспортные испытания модуля и его тестовые включения. Тестовые включения проводились как самого модуля отдельно, так и в составе мобильного генератора. На выходе системы импульсного питания сформирован униполярный импульс тока амплитудой 110 кА и длительностью по основанию 1 мс. Разброс по времени срабатывания не превысил 50 нс. Система продемонстрировала стабильное и надежное срабатывание. Зарегистрированные в ходе тестовых включений выходные характеристики системы импульсного питания электромагнита бетатрона соответствуют штатному режиму работы мобильного генератора гамма-излучения.

Конструкция модуля может найти применение и в других мобильных электрофизических установках с учетом их электрических параметров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность Г.В. Борискову за полезные советы и критические замечания, высказанные при подготовке рукописи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Egorov N.I., Boriskov G.V., Bykov A.I., Kuropatkin Yu.P., Lukynov N.B., Mironenko V.D., Pavlov V.N.* // Contrib. Plasma Phys. 2011. V. 51. № 4. P. 333. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201010123>
2. *Панов К.Н., Комрачков В.А.* // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 5. С. 102. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9120450>
[*Panov K.N., Komrachkov V.A.* // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2004. V. 40. P. 591. <https://doi.org/10.1023/B:CESW.0000041412.51534.dd>]
3. *Комрачков В.А., Панов К.Н., Подурец А.М.* Невозмущающие методы диагностики быстротекающих процессов / под ред. А.Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2015.
4. *Kuropatkin Yu.P., Mironenko V.D., Suvorov V.N., Zenkov D.I., Tkachenko B.F.* // Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, USA. 1997. V. 2. P. 1669. <https://doi.org/10.1109/PPC.1997.674646>
5. *Зенков Д.И., Куропаткин Ю.П., Нижегородцев В.И., Селемир В.Д., Шамро О.А.* РФ Патент 2548585, 2015.
6. *Куропаткин Ю.П., Нижегородцев В.И., Романов И.Н., Савченко К.В., Селемир В.Д., Урлин*

- Е.В., Фомичёв В.А., Чинин А.А., Шамро О.А.* // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 2. С. 297.
<https://doi.org/10.21883/jtf.2022.02.52021.196-21>
- [*Kuropatkin Yu.P., Nizhegorodtsev V.I., Romanov I.N., Savchenko K.V., Selemir V.D., Urlin E.V., Fomichev V.A., Chinin A.A., Shamro O.A.* // Tech. Phys. JTP. 2022. V. 67. №. 3. P. 197.
<https://doi.org/10.1134/S1063784222040028>]
7. *Фомичёв В.А., Савченко К.В., Чинин А.А., Шамро О.А.* // Сб. докладов 19-й научно-технической конференции “Молодежь в науке”. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2022. С. 392.
8. *Fomichev V.A., Kuropatkin Yu.P., Nizhegorodtsev V.I., Savchenko K.V., Selemir V.D., Chinin A.A., Shamro O.A.* // 2023 IEEE Pulsed Power Conf. (PPC). San Antonio, USA. 2023. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/PPC47928.2023.10310997>
9. *Shamro O.A., Bunin A.I., Nizhegorodtsev V.I., Savchenko K.V., Selemir V.D., Fomichev V.A., Chinin A.A.* // 2025 IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS). Berlin, Germany, 2025. <https://doi.org/10.1109/PPPS56198.2025.11248641>
10. *Арзев А.Г., Галахов И.В., Ганин Л.С. и др.* // ПТЭ. 2021. № 4. С. 33.
<https://doi.org/10.31857/S0032816221040133>
- [*Arzev A.G., Galakhov I.V., Ganin L.S. et al.* // Instrum. and Experim. Tech. 2021. V. 64. № 4. P. 529. <https://doi.org/10.1134/S0020441221040138>]
11. *Kudasov B.G., Pavlov S.S., Tananakin V.A., Tsiberev V.A., Voronin V.V., Voronov S.L.* // Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, USA, 1997. V. 2. P. 1572. <https://doi.org/10.1109/ppc.1997.674628>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Мобильный генератор гамма-излучения нового поколения: слева – ускорительный модуль, по центру – модуль управления и контроля, справа – модуль импульсного питания электромагнита.
- Рис. 2.** Система импульсного питания электромагнита бетатрона: 1 – емкостный накопитель, 2 – стойка коммутации, 3 – система соединителей импульсного питания.
- Рис. 3.** Электрическая схема системы импульсного питания: K – электромагнитный переключатель ЭМ33-61111-00, VD_1 – диод СД-20-50, $VD_{2,3,4,5}$ – диоды КЦ-203В, $VD_{6,8}$ – диоды СДК1-250-25, VD_7 – КРД1-250-25, C_0 – конденсаторы ИЭПС-24-290, C_1 – конденсатор ИЭПМ, C_2 – конденсатор КПИМ, C_3 – конденсатор К75-74, L_n – обмотки электромагнита, L_1 – индуктивность, D_1 – бесконтактный датчик PR12-4DN, D_2 – токовый шунт, $D_{3,4}$ – пояса Роговского, D_5 – индукционный датчик, F_1 – разрядник РУ-78, F_2 – разрядник РУ-65, $R_{1,2}$ – резисторы С5-40, R_3 – жидкостной резистор, R_6 – ограничивающий резистор, $R_{4,8}$ – резисторы КЭВ, $R_{5,7,9-12}$ – резисторы ТВО, T – высоковольтный трансформатор.
- Рис. 4.** Система транспортировки, эксплуатации и хранения МИПЭ: 1 – двадцатифутовый контейнер, 2 – полуприцеп, 3 – подкатная тележка.
- Рис. 5.** Осциллограммы сигналов с датчиков контроля параметров системы импульсного питания электромагнита бетатрона в рабочем цикле: **а** – импульс напряжения генератора запуска блока управления основного разрядника батареи, **б** – импульс тока накачки основного разрядника батареи блока управления, **в** – импульс тока разряда емкостного накопителя на обмотки электромагнита, **г** – импульс напряжения индукционного датчика “ноль-поля” электромагнита.
- Рис. 6.** Наложенные осциллограммы импульса тока системы импульсного питания электромагнита генератора гамма-излучения.



Рис. 1.



Рис. 2.

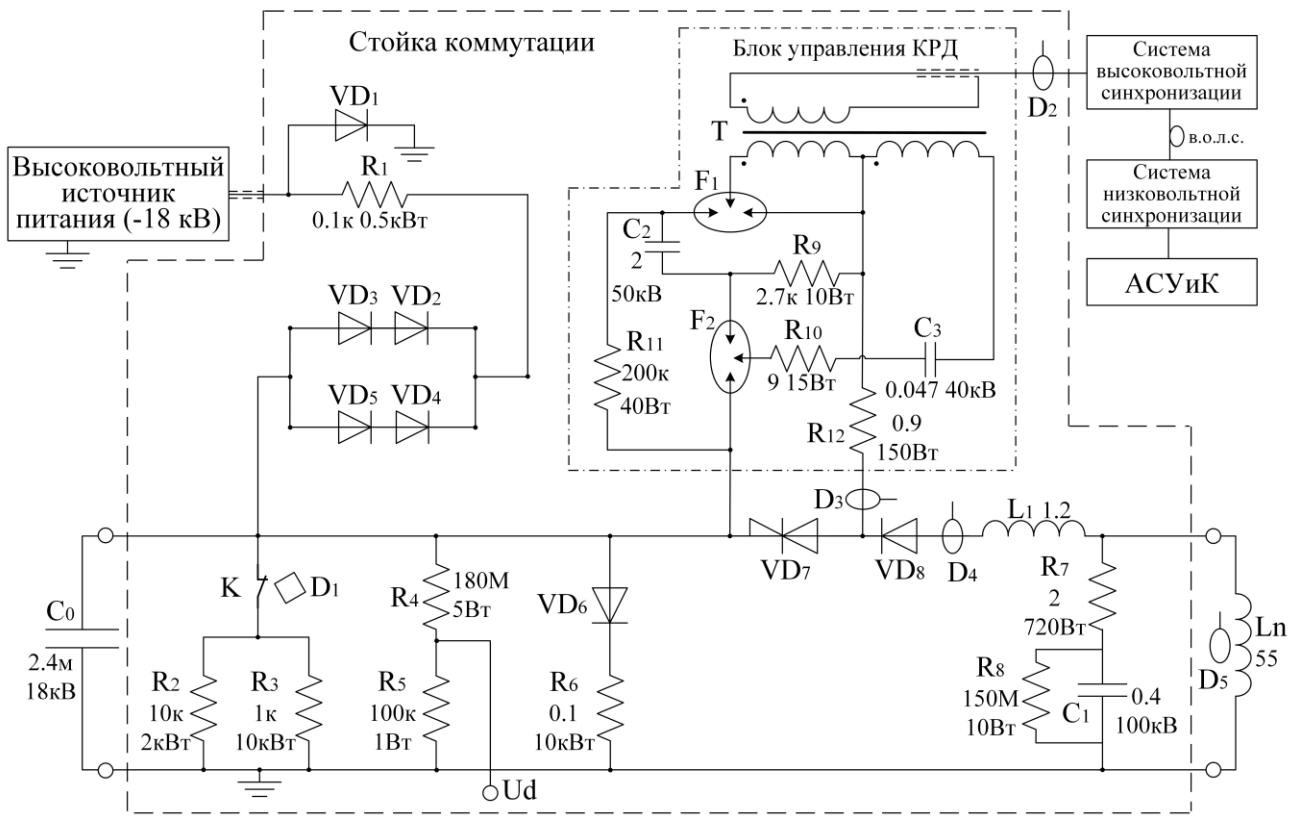


Рис. 3.



Рис. 4.

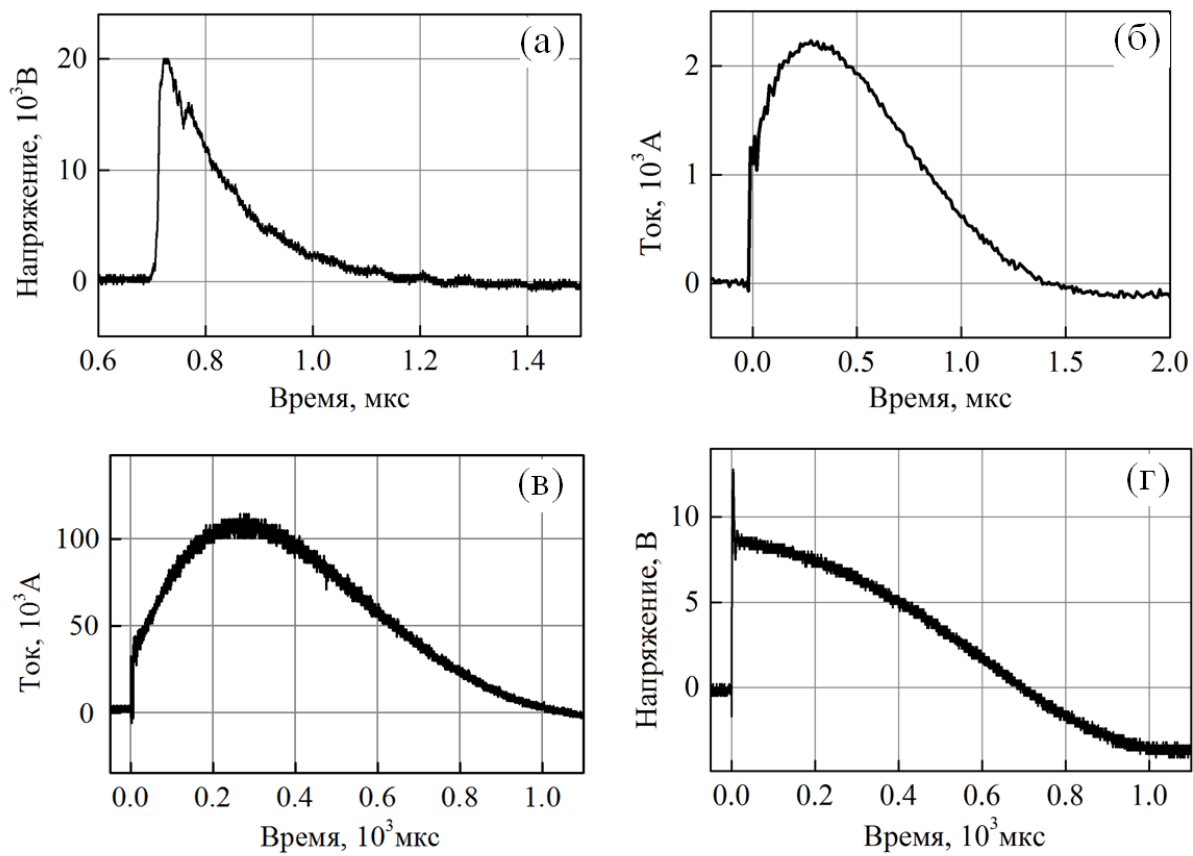


Рис. 5.

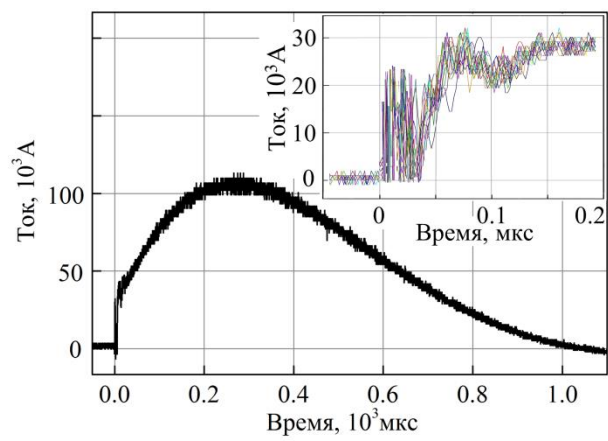


Рис. 6.