



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2022–12

А. В. Максимов, М.П. Овсиенко, В.Д. Раев, В.Д. Рудько

**Развитие ударной системы кикер-магнита КМ16  
ускорителя У-70**

Протвино 2022

**Аннотация**

Максимов А.В. и др. Развитие ударной системы кикер-магнита КМ16 ускорителя У-70: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2022–12. – Протвино, 2022. – 8 с., 7 рис., 1 табл., библиогр.: 4.

Приведены результаты по развитию ударной системы кикер-магнита КМ16 на ускорителе У-70. На базе первой секции кикер-магнита выполнена модернизация системы питания и создана дополнительная разрядная линия для обеспечения двукратного срабатывания. Получены требуемые характеристики импульсов тока в режиме двукратного срабатывания.

**Abstract**

Maximov A.V. et al. Development on kick system of the kicker-magnet KM16 of U70 accelerator: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2022–12. – Protvino, 2022. – p. 8, fig. 7, tables 1, refs.: 4.

The results on development of the kick scheme of the kicker-magnet KM16 of U70 accelerator are presented. Implementation based on the first section of existing kicker-magnet, included modernization of power supply system and creation of additional discharge line, providing double kick. The required characteristics of kick pulses in double kick mode have been achieved.

## Введение

Импульсная протонная радиография является мощным инструментом для изучения широкого спектра быстропротекающих явлений и структуры объектов большой плотности. На базе ускорительного комплекса У-70 создан протонный радиографический комплекс ПРГК-100 для систематических актуальных прикладных исследований быстропротекающих газодинамических процессов [1,2,3]. Целью данной работы является повышение функциональных возможностей комплекса ПРГК-100, в частности, увеличение общего времени регистрации динамических процессов до  $10\div 50$  мкс. Задача может быть решена увеличением числа срабатываний системы запуска кикер-магнита КМ-16 не менее 2-х раз и последовательного вывода двух групп сгустков протонного пучка с расстоянием между группами  $10\div 50$  мкс. В период 2019-2022г. были проведены исследования на системе питания первой секции КМ-16. Была создана дополнительная разрядная линия и обеспечено независимое функционирование двух разрядных линий. Получены требуемые характеристики импульсов тока при двукратном срабатывании системы питания.

## Описание кикер-магнита КМ16

В таблице 1 приведены некоторые параметры КМ16 [4].

Таблица 1.

Параметр	Значение
Количество секций	10
Длина одной секции (м)	0.3
Рабочее напряжение (кВ)	50
Значение магнитного поля (Тл)	0.06
Количество выводимых сгустков	$1\div 29$

Принципиальная схема существующей системы питания одной секции кикер-магнита КМ16 приведена на рисунке 1. В состав одной секции КМ16 входят:

1. Высоковольтный источник зарядного напряжения
2. Разрядная линия (формирующая линия + ключи)
3. Кабельная линия
4. Секция ударного магнита.

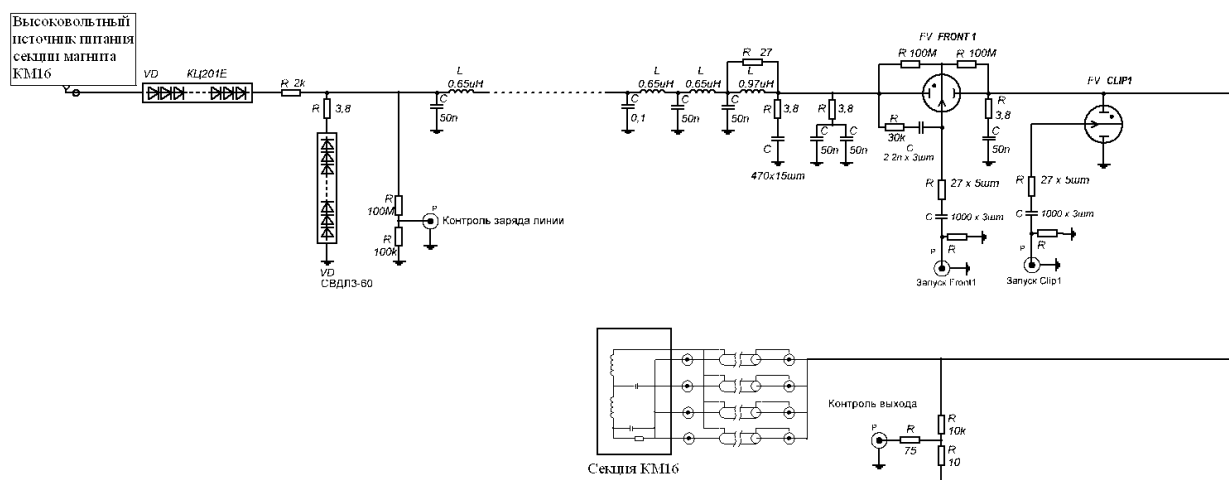


Рис. 1. Принципиальная схема существующей системы питания одной секции кикер-магнита.

В существующей системе питания КМ-16, формирующая линия состоит из десяти конденсаторов и индуктивностей, обеспечивающих формирование импульса тока максимальной длительностью до 5 мкс (длительность оборота пучка). В качестве ключей использованы штатные искровые, трёхэлектродные разрядники, работающие в атмосфере сжатого воздуха. Заряд формирующих линий осуществляется от высоковольтных источников зарядного напряжения.

## Реализация схемы двукратного срабатывания

Оценка возможности построения системы для работы в режиме двукратного срабатывания была проведена в 2020 г. В 2021г. на базе первой секции КМ16 был создан тестовый макет, на котором были проведены необходимые исследования, позволившие перейти к следующему этапу работы - созданию прототипа системы питания для работы в режиме двойного срабатывания. Принципиальная электрическая схема системы питания с двумя разрядными линиями приведена на рисунке 2.

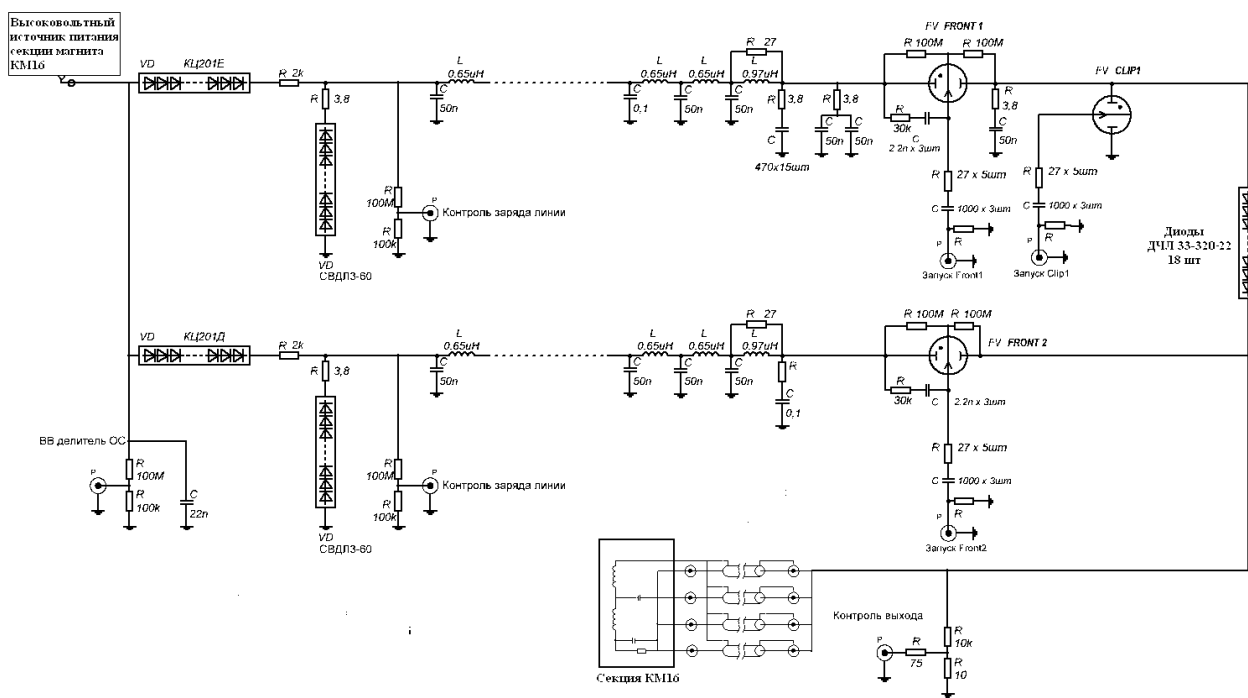


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема системы питания с двумя разрядными линиями.

Верхняя формирующая линия – штатная, её электрическая длина 5 мкс с фронтальным и обрезающим ключами – разрядниками. Линия соединена с нагрузкой через сборку разделительных диодов. Нижняя формирующая линия – дополнительная, её электрическая длина укороченная с длительностью  $3/4$  оборота пучка и только с фронтальным разрядником.

Первая формирующая линия была также модернизирована: были заменены исходные конденсаторы на конденсаторы с лучшими характеристиками и меньшей паразитной индуктивностью. Две созданные формирующие линии размещены в отсеке формирующих линий первой секции КМ16 (рисунки 3 и 4).



Рис. 3. Фото отсека формирующих линий.

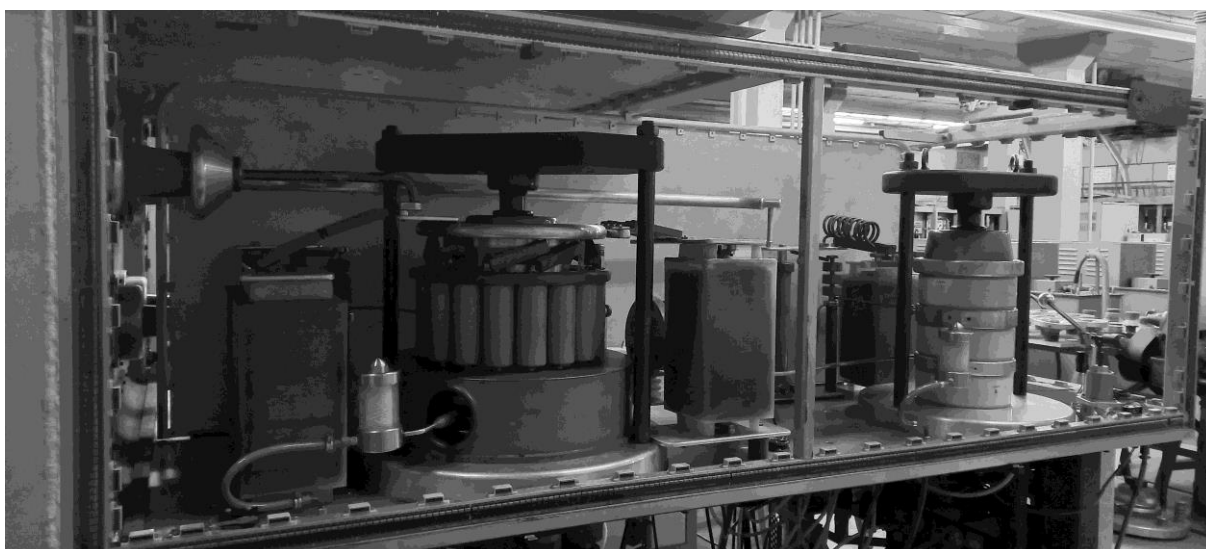


Рис. 4. Фото отсека ключей.

Здесь же находится разделительная диодная сборка из 14-и быстро восстанавливающихся диодов ДЧЛ 333-320-22, время восстановления которых составляет  $\sim 5$  мкс. Разделительная диодная сборка обеспечивает полное восстановление электрической прочности разрядника первой линии после пропускания импульса тока.

### **Исследование характеристик импульсов тока в режиме двойного срабатывания**

В 2022г. были проведены исследования по анализу формы импульсов тока КМ16 в схеме двойного срабатывания. Было зафиксировано, что некоторые параметры, такие как

длительность фронта импульса, однородность тока на плато импульса, требуют дальнейшего улучшения для соответствия исходным требованиям. В связи с этим, выполнена схемотехническая доработка отдельных узлов системы питания, в результате чего длительность фронта импульса тока уменьшена на 10%, а амплитуды искажений тока на плато уменьшены на 25-30%, уменьшен временной интервал между импульсами до ~10 мкс. Анализ итоговых результатов приведен ниже.

На рисунке 5 представлен **первый (из двух) импульс тока** модернизированной первой секции КМ16.

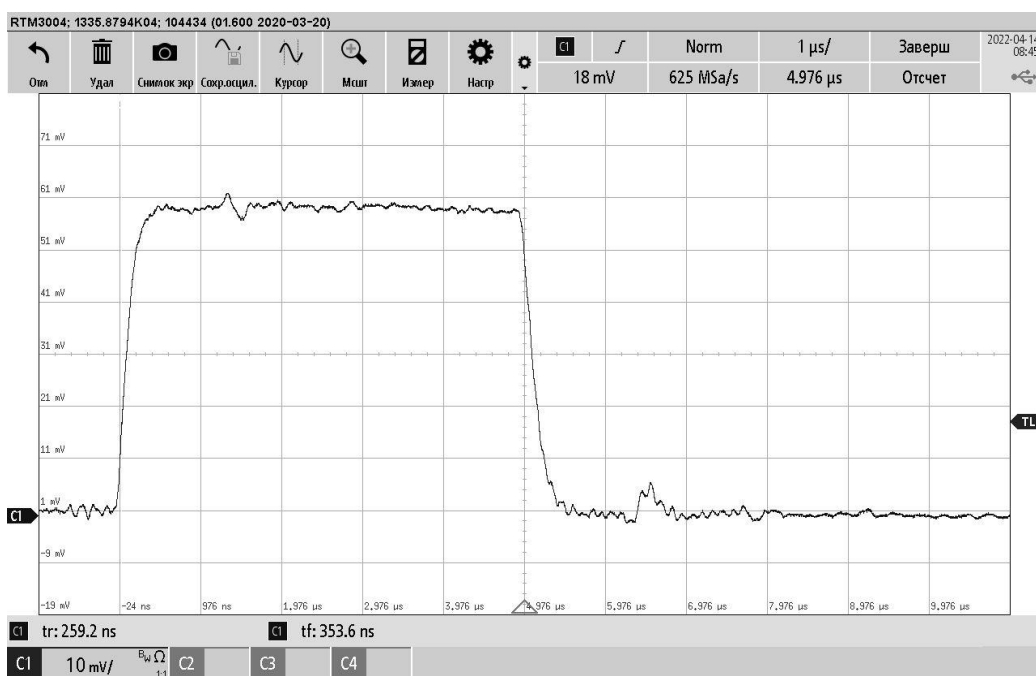


Рис. 5. Измеренный 1-й импульс тока 1-й секции КМ16.

Неоднородность тока на плато составляет  $\approx \pm 3.2\%$ . В основном определяется амплитудой “отраженного” импульса, формируемого в распределенной структуре разрядной линии (начинается через ~1350 нс после начала импульса тока и длительность его ~ 370 нс), Длительность фронта в диапазоне изменения тока от 5% до 95% амплитуды оценивается на уровне ~300 нс.

На рисунке 6 представлен **2-й импульс тока** модернизированной первой секции КМ16.



Рис.6. Измеренный 2-й импульс тока 1-й секции КМ16.

Неоднородность тока на плато составляет  $\approx \pm 3.5\%$ . Длительность плато импульса **3430 нс** (3/4 длительности оборота). Длительность фронта импульса  $\sim$  **270 нс**.

### Уменьшение временного интервала между импульсами токов в режиме двойного срабатывания

Основным фактором, ограничивающим возможность уменьшения временного интервала следования импульсов, является время выключения сборки разделительных диодов. Сборка составлена из 14 диодов ДЧЛ333-320-22 (рисунок 2). Данная группа характеризуется паспортным значением времени выключения **5 мкс**. Удалось получить значение временного промежутка между спадом первого импульса и нарастанием второго около  $\approx$  **10 мкс**, однако, запас по времени выключения диодов получается незначительным и возможен выход из строя всей диодной сборки. Использование в дальнейшем диодов ДЧЛ333-320-22кл с группой по времени выключения **2.5 мкс** обеспечит более надежную работу секции в режиме двойного срабатывания.



Осциллограмма последовательности импульсов тока приведена ниже на рисунке 7.

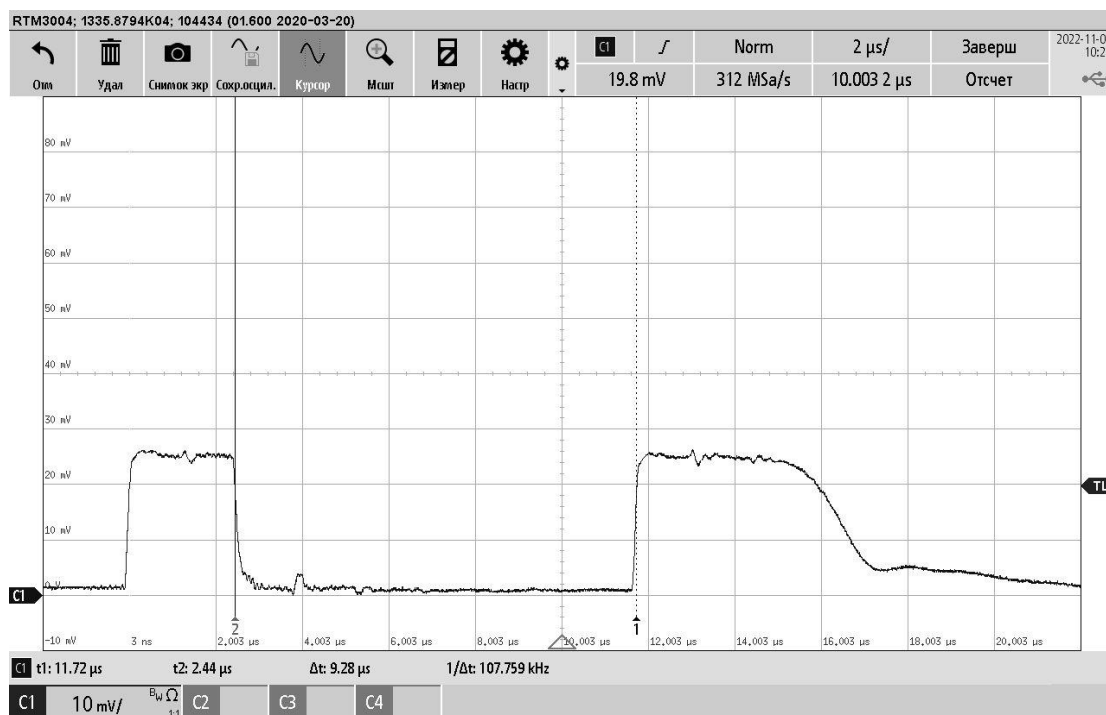


Рис.7. Последовательность импульсов КМ16 при двойном срабатывании.

## Заключение

Представлены результаты работы по повышению функциональных возможностей комплекса ПРГК-100, в частности, увеличение общего времени регистрации динамических процессов до 10÷50 мкс. Для решения этой задачи, в период 2019-2022г. были проведены исследования и проведена модернизация системы питания первой секции кикер-магнита КМ-16 для обеспечения двукратного срабатывания в пределах требуемой длительности динамических процессов. Была создана дополнительная разрядная линия и обеспечено независимое функционирование двух разрядных линий. Получены требуемые характеристики импульсов тока в режиме двукратного срабатывания системы питания.

Авторы выражают благодарность Н.Е. Тюрину за поддержку данной работы. Также выражаем благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ С.В. Авраменко, О.Б. Дмитриеву, С.И. Маценко за помощь в данной работе.

## Список литературы

- [1] А.И. Андриянов, А.Г. Афонин и др. «Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ», Препринт ИФВЭ 2015-3, Протвино, 2015 г.;
- [2] S.V. Ivanov et al. «STATUS OF U-70», Report on 26th Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2018), 1 – 5 October 2018, Protvino, Russia, JACoW, DOI:10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEXMH01 (<https://accelconfweb.cern.ch/rupac2018/papers/wexmh01.pdf>);
- [3] А. Максимов, Н. Тюрин, Ю. Федотов «Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ», Журнал технической физики, том 84, выпуск 9, страницы: 132 – 138, eLIBRARY ID: 22019436, опубликовано: 2014;
- [4] В.Н. Андреев, О.В. Курнаев, В.А. Сычев, Ю.Д. Трофимов, «Развитие системы ударных магнитов на ускорителе ИФВЭ», Препринт ИФВЭ 82-72, Серпухов, 1982.

*Рукопись поступила 16 декабря 2022 г.*

А.В. Максимов и др.

Развитие ударной системы кикер-магнита КМ16 ускорителя У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 21.12.2022                      Формат 60 × 84/16.    Цифровая печать.

Печ.л. 0,75.    Уч.–изд.л. 1.    Тираж 60.    Заказ 1.    Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2022-12,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2022

---