ЭЛЕКТРОНИКА

И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.384.663

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА ДВУКРАТНОГО СРАБАТЫВАНИЯ КИКЕР-МАГНИТА КМ16 НА УСКОРИТЕЛЕ У-70

© 2027 г. А. В. Максимов, М. П. Овсиенко, Н. Е. Воронков*, В. Д. Раев, В. Д. Рудько

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова

Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

**E-mail: nevoronkov@ihep.ru*

Поступила в редакцию 08.07.2026

После доработки 02.09.2026

Принята к публикации 15.10.2026

Приведены результаты реализации режима двукратного срабатывания кикер-магнита КМ16 ускорителя У-70. Для этого на базе системы питания первой секции кикер-магнита выполнена модернизация и создан дополнительный импульсный генератор для обеспечения двукратного срабатывания. Получены требуемые характеристики импульсов тока в режиме двукратного срабатывания.

Ключевые слова: ускорительная техника, быстрый вывод, система питания кикер-магнита, двукратное срабатывание кикер-магнита.

1. 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 [1–3]. Целью данной работы является улучшение функциональных возможностей комплекса ПРГК-100, в частности увеличение общего времени регистрации динамических процессов до 10–50 мкс. Такая задача может быть решена путем увеличения числа срабатываний системы питания кикер-магнита КМ16 до двух раз и, соответственно, вывода двух групп сгустков протонного пучка со временем между группами 10–50 мкс.

2. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ КИКЕР-МАГНИТА КМ16

Кикер-магнит КМ16 является первым элементом системы быстрого вывода пучка на установку ПРГК-100. В табл. 1 приведены некоторые параметры магнита КМ16 [4].

Таблица 1. Некоторые параметры магнита КМ16

Параметр	Значение
Количество секций	10
Длина одной секции, м	0.3
Рабочее напряжение, кВ	50
Магнитное поле, Тл	0.06
Количество выводимых сгустков	1–29

В существующей системе питания КМ16 формирующая линия состоит из десяти LC-ячеек (конденсатор плюс индуктивность), обеспечивающих формирование импульса тока максимальной длительностью до 5 мкс (длительность оборота пучка по кольцевому ускорителю У-70). В качестве ключей использованы штатные искровые трехэлектродные разрядники, работающие в атмосфере сжатого воздуха. Заряд формирующих линий осуществляется от высоковольтных источников зарядного напряжения.

Принципиальная схема существующей системы питания одной секции кикер-магнита КМ16 приведена на рис. 1.

Рис. 1. Принципиальная схема существующей системы питания одной секции КМ16

В состав системы питания одной секции КМ16 входят:

– высоковольтный источник зарядного напряжения,

– импульсный генератор (формирующая линия, ключи),

– кабельная линия,

– секция ударного магнита.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА ДВУКРАТНОГО СРАБАТЫВАНИЯ

Оценка возможности построения системы для работы в режиме двукратного срабатывания была проведена в 2020 г. В 2021 г. 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 импульсными генераторами приведена на рис. 2.

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

Верхняя формирующая линия и разрядники, изображенные на рис. 2, составляют штатный импульсный генератор. Электрическая длина формирующей линии равна 5 мкс. Фронтальный и обрезающий разрядники обеспечивают формирование фронтов первого импульса. Генератор соединен с нагрузкой через сборку разделительных диодов.

Нижняя формирующая линия и разрядник (рис. 2) представляют собой дополнительный импульсный генератор. Электрическая длина формирующей линии меньше, она составляет 3/4 оборота пучка. Формирование фронта второго импульса обеспечивается дополнительным разрядником. Необходимость в формировании заднего фронта отсутствует.

Первый импульсный генератор был также модернизирован. Было увеличено количество LC-ячеек формирующей линии до 15 шт., а также осуществлена установка конденсаторов с улучшенными характеристиками и меньшими размерами (КПИ1-100-0.05).

Две формирующие линии размещены в отсеке формирующих линий первой секции КМ16 (рис. 3).

Рис. 3. Фото отсека формирующих линий

В отсеке ключей (рис. 4а) был установлен дополнительный разрядник, в этом же отсеке находится разделительная диодная сборка из 18 быстровосстанавливающихся диодов ДЧЛ 333-320-22 Е4. Время восстановления диодов составляет примерно 5 мкс. Разделительная диодная сборка (рис. 4б) обеспечивает полное восстановление электрической прочности разрядника первого импульсного генератора после пропускания импульса тока.

Рис. 4. **а** – Фото отсека ключей, **б** – диодная сборка.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСОВ ТОКА В РЕЖИМЕ ДВОЙНОГО СРАБАТЫВАНИЯ

В 2022 г. были проведены исследования по анализу формы импульсов тока КМ16 в режиме двойного срабатывания. Было зафиксировано, что некоторые параметры, такие как длительность фронта импульса и 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%, амплитуды искажений тока на плато уменьшены на 25–30%, а также уменьшен временной интервал между импульсами (примерно до 10 мкс). Анализ итоговых результатов приведен ниже.

На рис. 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 примерно ±3.2%. Показатель неоднородности тока в основном определяется амплитудой отраженного импульса, возникающего из-за небольшой несогласованности волнового сопротивления кабельных линий и сопротивления секции кикер-магнита КМ16 (начинается примерно через 1250 нс после начала импульса тока, его длительность равна примерно 370 нс.). Длительность фронта в диапазоне изменения тока от 5 до 95% амплитуды оценивается на уровне около 300 нс.

На рис. 6 представлен второй импульс тока модернизированной первой секции КМ16.

Рис. 6. Измеренный второй импульс тока первой секции КМ16

5. 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 18 диодов ДЧЛ333-320-22 Е4 (рис. 2). Диоды имеют паспортное значение времени обратного восстановления 5 мкс. Удалось получить значение временного промежутка между спадом первого импульса и нарастанием второго около 10 мкс, однако запас по времени выключения диодов получается незначительным, и возможен выход из строя всей диодной сборки. Использование в дальнейшем диодов ДЧЛ333-320-22, но с группой по времени обратного восстановления М4 (2.5 мкс), обеспечит более надежную работу секции в режиме двойного срабатывания, а также возможность вывода второй группы сгустков уже на втором обороте пучка в ускорителе У-70.

Осциллограмма последовательности импульсов тока приведена на рис. 7.

Рис. 7. Последовательность импульсов КМ16 при двойном срабатывании

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты выполненных работ по улучшению функциональных возможностей комплекса ПРГК-100, в частности по увеличению общего времени регистрации динамических процессов до 10–50 мкс. Для решения этой задачи в период 2019–2022 гг. были проведены исследования и осуществлена модернизация системы питания первой секции кикер-магнита КМ-16 для обеспечения двукратного срабатывания в пределах требуемой длительности динамических процессов. Был создан дополнительный импульсный генератор и обеспечено независимое функционирование двух импульсных генераторов в рамках системы питания одной секции кикер-магнита КМ-16. Получены требуемые характеристики импульсов тока в режиме двукратного срабатывания системы питания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ Н.Е. Тюрину за поддержку данной работы и С.В. Авраменко, О.Б. Дмитриеву, С.И. Маценко за помощь в проделанной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андриянов А.И., Афонин А.Г., Гусев И.А. и др*. Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2015-3, Протвино, 2015. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_011103179/
2. *Ivanov S.V.* Status of U-70. Report on 26th Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2018) / JACoW, Geneva, Switzerland, 2018. https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEXMH01.
3. *Максимов А.В., Тюрин Н.Е., Федотов Ю.С.* ЖТФ. Т. 84. № 9. С. 132. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22019436 .
4. *Андреев В.Н., Курнаев О.В., Сычев В.А., Трофимов Ю.Д.* Развитие системы ударных магнитов на ускорителе ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 82-72, Серпухов, 1982. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001094237/

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Принципиальная схема существующей системы питания одной секции КМ16

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

Рис. 3. Фото отсека формирующих линий

Рис. 4. **а –** Фото отсека ключей; **б** – диодная сборка.

Рис. 5. Измеренный первый импульс тока первой секции КМ16

Рис. 6. Измеренный второй импульс тока первой секции КМ16

Рис. 7. Последовательность импульсов КМ16 при двойном срабатывании

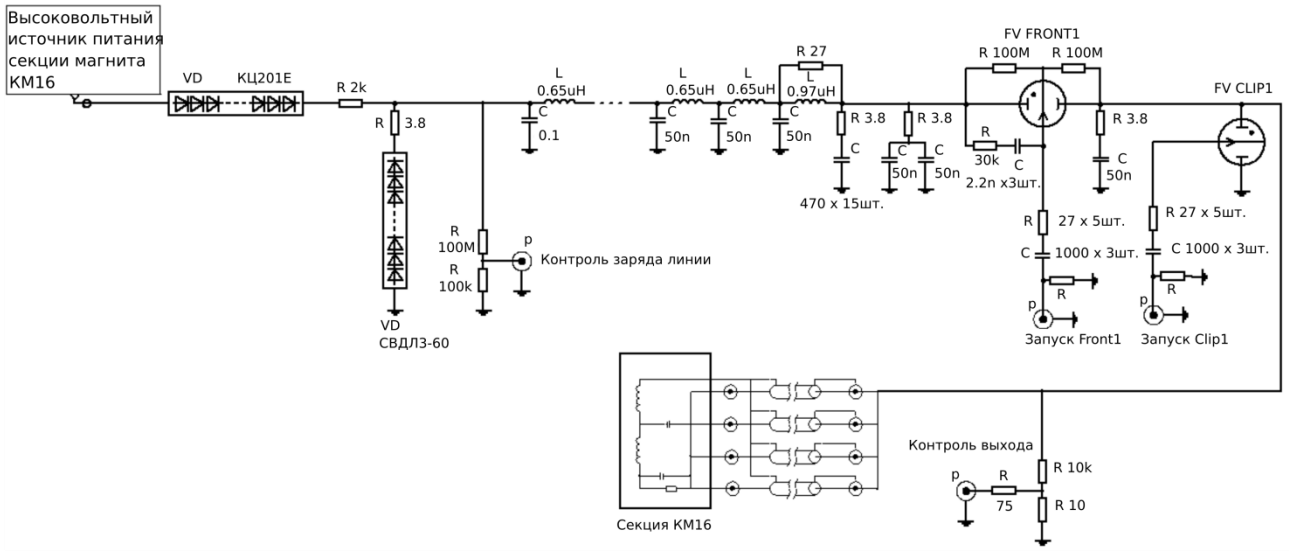

Высоковольтный
источник питания
секции магнита
КМ16
VD
КЦ201Е
R 2k
R 3.8
VD
СВДЛ3-60
L
0.65uH
C
0.1
R
100M
R
100k
p
Контроль заряда линии
L
0.65uH
C
50n
L
0.65uH
C
50n
R 27
L
0.97uH
C
50n
R 3.8
C
470 x 15шт.
R 3.8
C
50n
C
50n
FV FRONT1
R 100M
R 100M
R
30k
C
2.2n x3шт.
R 3.8
C
50n
FV CLIP1
R
27 x 5шт.
C
1000 x 3шт.
R 27 x 5шт.
C 1000 x 3шт.
R
R
p
Запуск Front1
p
Запуск Clip1
Секция КМ16
Контроль выхода
p
R
75
R 10k
R 10

Рис. 1.

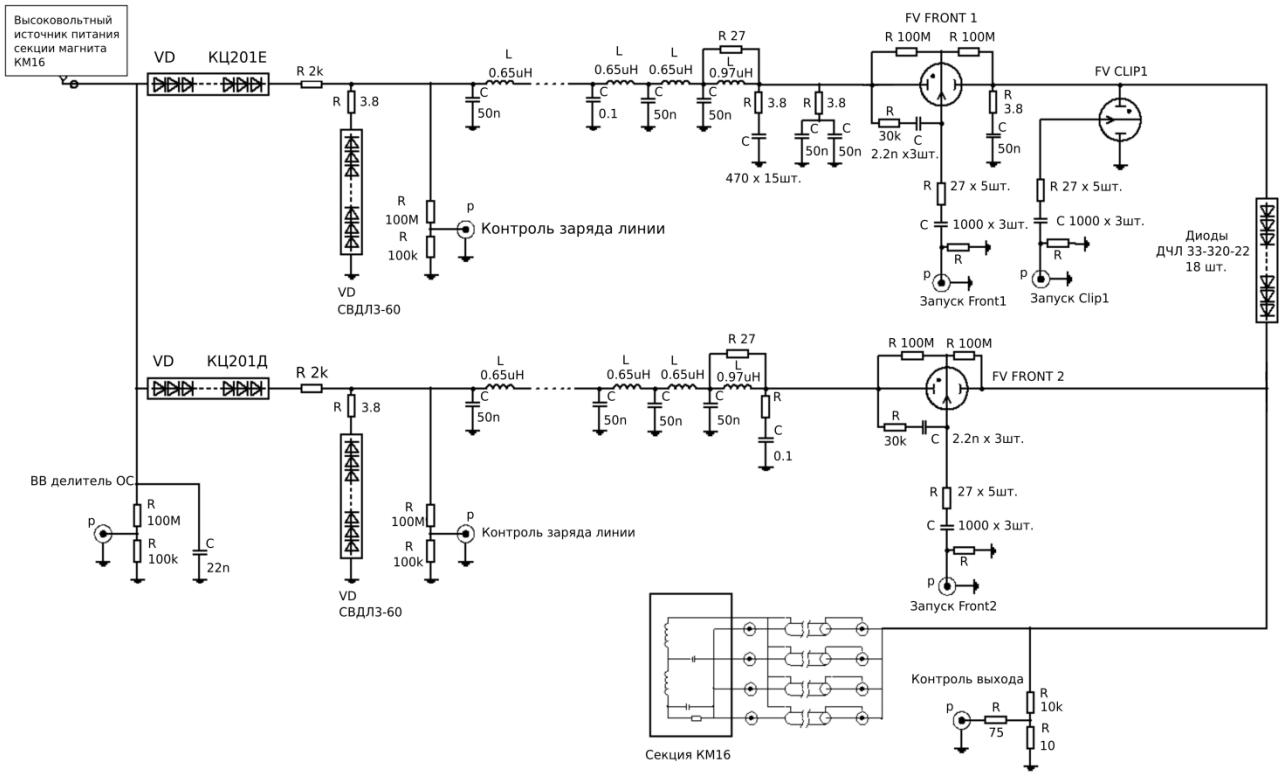
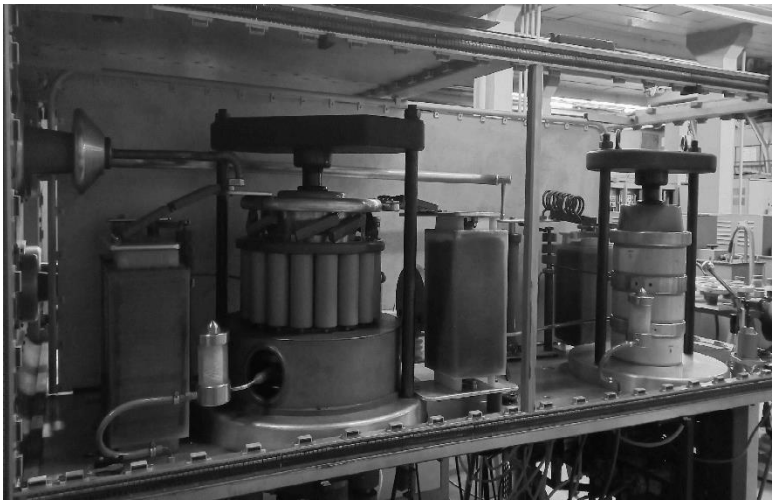

Высоковольтный источник питания секции магнита КМ16
VD КЦ201Е
R 2k
R 3.8
L 0.65uH
C 50n
L 0.65uH
C 0.1
L 0.65uH
C 50n
R 27
L 0.97uH
C 50n
R 3.8
C 470 x 15шт.
R 3.8
C 50n
C 50n
FV FRONT 1
R 100M
R 100M
R 30k
C 2.2n x3шт.
R 3.8
C 50n
FV CLIP1
R 27 x 5шт.
C 1000 x 3шт.
R
p
Запуск Front1
R 27 x 5шт.
C 1000 x 3шт.
R
p
Запуск Clip1
Диоды ДЧЛ 33-320-22 18 шт.
R 100M
R 100k
p
Контроль заряда линии
VD СВДЛ3-60
VD КЦ201Д
R 2k
R 3.8
L 0.65uH
C 50n
L 0.65uH
C 50n
L 0.65uH
C 50n
R 27
L 0.97uH
C 50n
R
C 0.1
R 100M
R 100M
FV FRONT 2
R 30k
C 2.2n x 3шт.
R 27 x 5шт.
C 1000 x 3шт.
R
p
Запуск Front2
ВВ делитель ОС
p
R 100M
R 100k
C 22n
R 100M
R 100k
p
Контроль заряда линии
VD СВДЛ3-60
Секция КМ16
Контроль выхода
p
R 75
R 10k
R 10

Рис. 2.



Рис. 3.



(а)



(б)

Рис. 4.

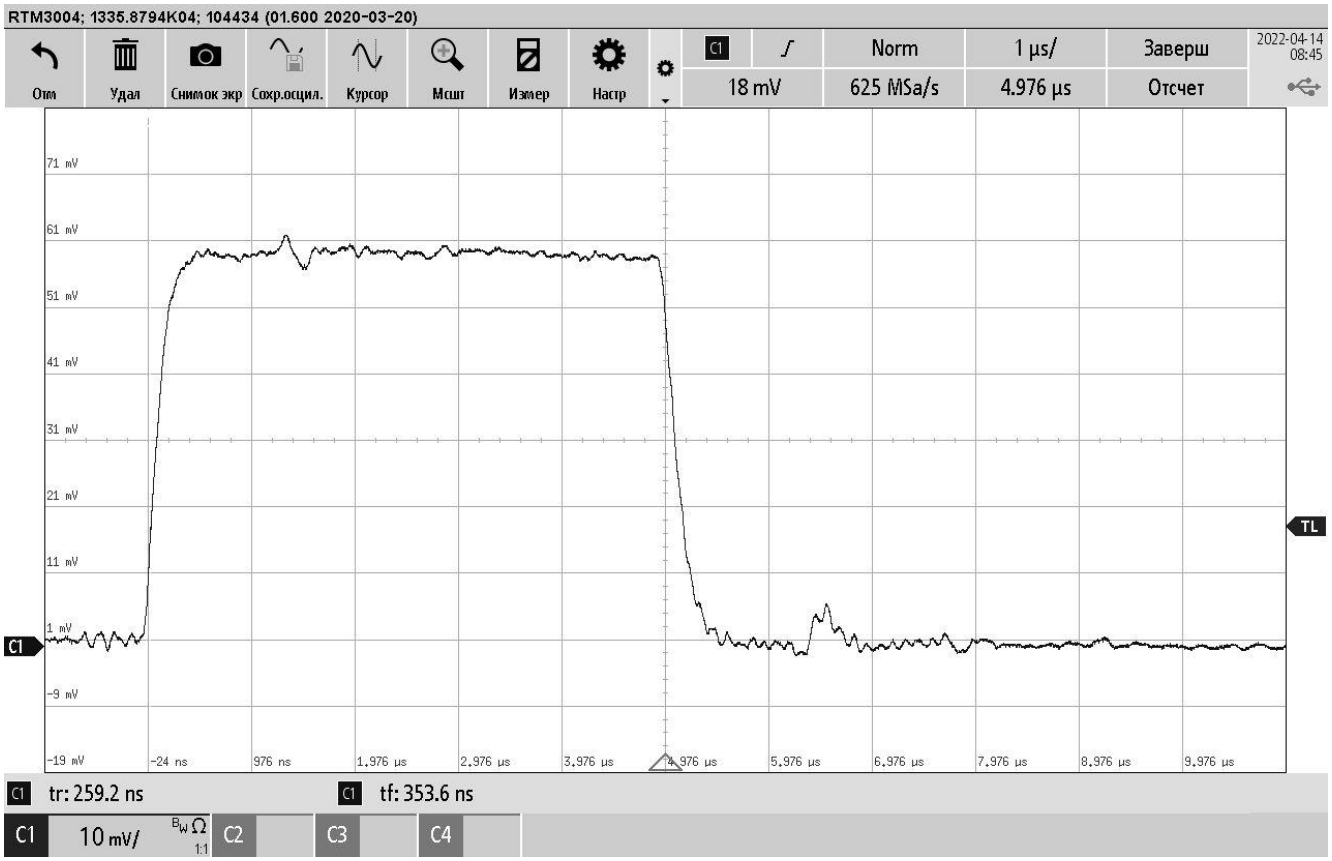

RTM3004; 1335.8794K04; 104434 (01.600 2020-03-20)
Отм
Удал
Снимок экр
Сохр.осцил.
Курсор
Мсшт
Измер
Настр
C1
Norm
1 µs/
Заверш
2022-04-14
08:45
18 mV
625 MSa/s
4.976 µs
Отсчет
71 mV
61 mV
51 mV
41 mV
31 mV
21 mV
11 mV
1 mV
-9 mV
-19 mV
-24 ns
976 ns
1.976 µs
2.976 µs
3.976 µs
4.976 µs
5.976 µs
6.976 µs
7.976 µs
8.976 µs
9.976 µs
TL
C1
C1 tr: 259.2 ns
C1 tf: 353.6 ns
C1 10 mV/
C2
C3
C4

Рис. 5.

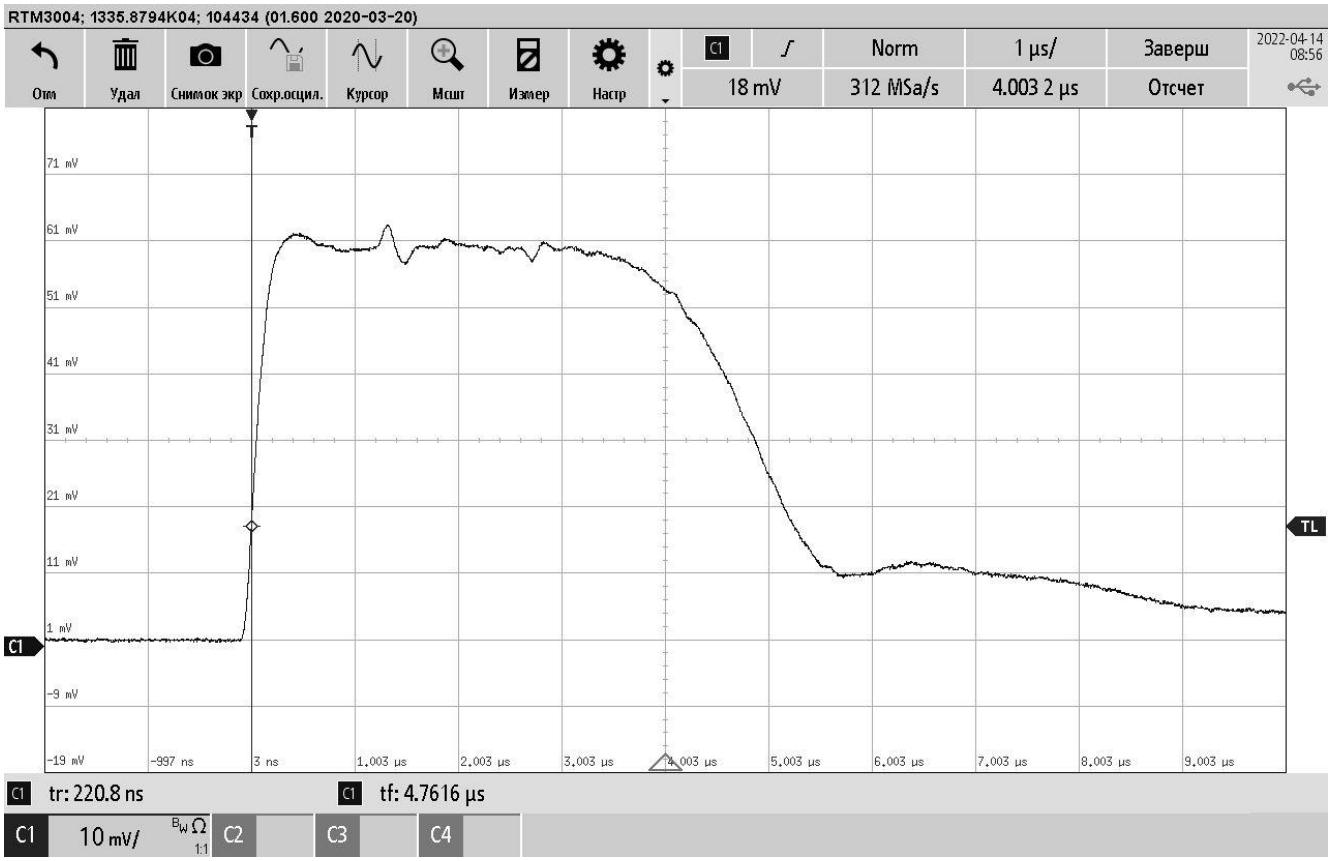

RTM3004; 1335.8794K04; 104434 (01.600 2020-03-20)
Отм
Удал
Снимок экр
Сохр.осцил.
Курсор
Масшт
Измер
Настр
C1
Norm
1 µs/
Заверш
2022-04-14
08:56
18 mV
312 MSa/s
4.003 2 µs
Отсчет
71 mV
61 mV
51 mV
41 mV
31 mV
21 mV
11 mV
1 mV
-9 mV
-19 mV
-997 ns
3 ns
1.003 µs
2.003 µs
3.003 µs
4.003 µs
5.003 µs
6.003 µs
7.003 µs
8.003 µs
9.003 µs
TL
C1
C1 tr: 220.8 ns
C1 tf: 4.7616 µs
C1 10 mV/
C2
C3
C4

Рис. 6.

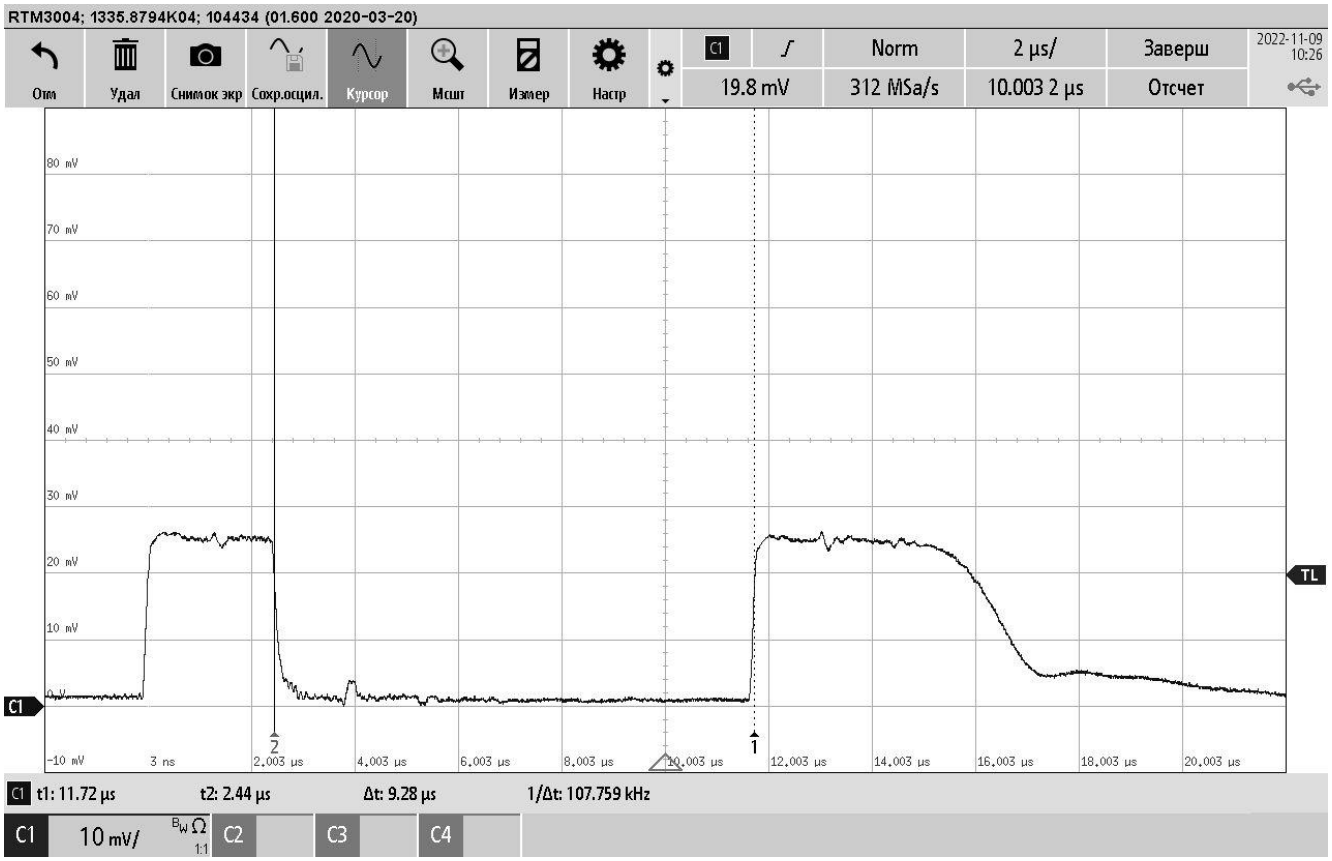

RTM3004; 1335.8794K04; 104434 (01.600 2020-03-20)
Отм
Удал
Снимок экр
Сохр.осцил.
Курсор
Масшт
Измер
Настр
C1
Norm
2 µs/
Заверш
2022-11-09
10:26
19.8 mV
312 MSa/s
10.003 2 µs
Отсчет
80 mV
70 mV
60 mV
50 mV
40 mV
30 mV
20 mV
10 mV
0 V
C1
TL
-10 mV
3 ns
2.003 µs
4.003 µs
6.003 µs
8.003 µs
10.003 µs
12.003 µs
14.003 µs
16.003 µs
18.003 µs
20.003 µs
C1 t1: 11.72 µs
t2: 2.44 µs
Δt: 9.28 µs
1/Δt: 107.759 kHz
C1
10 mV/
C2
C3
C4

Рис. 7.