

ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.319.53

САМОЗАПУСК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ
НАНОСЕКУНДНОМ ГЕНЕРАТОРЕ АРКАДЬЕВА–МАРКСА

©2026 г. А. В. Корженевский*, Т. С. Туйкин**

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук

Россия, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

**E-mail: avklab@gmail.com*

***E-mail: for_subscribe_tt@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.03.2026

После доработки 24.04.2026

Принята к публикации 04.05.2026

Генераторы Аркадьева–Маркса широко применяются для создания высоковольтных импульсов. В них накопительные конденсаторы заряжаются параллельно, а затем последовательно соединяются с помощью коммутаторов и разряжаются на нагрузку. С появлением высоковольтных транзисторов стало возможным использовать их вместо традиционных разрядников. Однако такие генераторы требуют сложных систем управления для каждого транзистора. В этой статье представлен высоковольтный генератор Аркадьева–Маркса с карбид-кремниевыми (SiC) полевыми транзисторами, который не нуждается в отдельных источниках запуска для каждой ступени. Управляющая схема подает сигнал только на нижнюю ступень, а остальные транзисторы открываются через пассивные цепочки, создающие импульсы на их затворах. Это обеспечивает синхронизацию выходного импульса с управляющим сигналом с разбросом менее 1 нс и длительность фронта импульса менее 10 нс. Дальнейшее укорочение фронта примерно до 2 нс достигается использованием неуправляемого обостряющего разрядника на выходе.

Ключевые слова: генератор Аркадьева–Маркса, высоковольтный наносекундный импульс, самозапуск ключа на полевом транзисторе.

1. ВВЕДЕНИЕ

Импульсные генераторы высокого напряжения часто разрабатываются на основе емкостных накопителей энергии, которые заряжаются параллельно, а затем коммутируются последовательно для формирования высокого напряжения на нагрузке. Пример типовой схемы, включающей пять ступеней, представлен на рис. 1. Процесс коммутации может быть реализован с применением различных устройств, как управляемых, так и неуправляемых.

Рис. 1. Схема пятиступенчатого высоковольтного емкостного генератора.

Впервые генератор данного типа был предложен Аркадьевым в 1914 году и получил название "генератор молний". В оригинальной конструкции использовались механические коммутаторы для каждой ступени. В 1924 году Эрвин Маркс оптимизировал схему, внедрив

разрядники (искровые зазоры). В этой модификации коммутация первой ступени осуществлялась по сигналу запуска, тогда как последующие ступени срабатывали автономно вследствие перенапряжения, вызванного последовательной коммутацией накопительных конденсаторов. Для современных задач, требующих высокой точности синхронизации высоковольтного импульса с другими процессами, классическая схема генератора Маркса, использующая разрядники в качестве коммутационных элементов, имеет существенный недостаток. Этот недостаток заключается в вариабельности задержки высоковольтного импульса относительно запускающего. Такая вариабельность обусловлена стохастическими процессами во времени самопроизвольного срабатывания разрядников. Для минимизации этого разброса (джиттера) можно использовать разрядники высокого давления, однако они характеризуются сложностью эксплуатации, большими габаритами и массой [1].

С появлением высоковольтных транзисторов, используемых для коммутации, генератор Маркса совершил качественный скачок в развитии. Фактически он вернулся к своей первоначальной концепции, предложенной Аркадьевым, но на новой элементной базе. Теперь требуется управляемая коммутация каждого каскада с использованием соответствующих управляющих сигналов для каждой ступени. Важно обеспечить высоковольтную гальваническую развязку этих сигналов, чтобы предотвратить повреждение управляющей схемы высоким напряжением. Для этого управляющие сигналы подаются через трансформаторы или оптоволоконные устройства. Однако наличие множества запускающих сигналов с гальванической развязкой усложняет систему, увеличивает ее размеры и стоимость.

С дальнейшим развитием высоковольтных твердотельных коммутационных приборов, таких как биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), металло-оксидные полевые транзисторы (MOSFET), в том числе транзисторы на карбиде кремния (SiC), многообразие схем генераторов Аркадьева-Маркса увеличилось, а также значительно улучшились характеристики, в первую очередь энергоэффективность и компактность. Существует множество вариаций схем генераторов, в работе [2] дан обзор таких схем.

Нашей задачей в рамках исследования была разработка высоковольтного импульсного генератора с возможностью синхронизации импульса с точностью не хуже 1 нс и длительностью фронта несколько нс. При этом было найдено решение, позволившее не использовать запускающие сигналы для каждой ступени генератора. Такие сигналы требуют гальванической развязки от управляющих модулей, что делает систему более громоздкой и сложной в реализации.

В настоящей статье представлен вариант схемы генератора Аркадьева–Маркса, использующей высоковольтные полевые SiC-транзисторы с внешним управляющим

сигналом, подводимым только к коммутатору нижней ступени. Приводятся результаты моделирования и экспериментальной проверки.

2. ОСНОВНАЯ ИДЕЯ

Вместо подачи внешних запускающих сигналов для каждой ступени можно использовать изменение напряжения на выходе предыдущей ступени для запуска последующих ступеней. Для этого добавим конденсатор C_g с истока каждой ступени на затвор транзистора следующей ступени. На рис. 2 приведен пример схемы подключения для двух ступеней.

Рис. 2. Фрагмент схемы генератора Маркса на транзисторах

Рассмотрим процесс открытия транзисторов подробнее на примере двух первых ступеней. Запускающий импульс подается на затвор транзистора первой ступени и открывает его, в результате чего вторая – емкость-накопитель оказывается подключенной последовательно к первой через открытый транзистор. При этом резко меняется потенциал истока транзистора второй ступени (с нуля на величину, равную по модулю напряжению питания и имеющую противоположный знак, см. рис. 3). Конденсатор C_g с емкостью затвора транзистора C_p образуют емкостной делитель от истока первой ступени к истоку второй, они создают разность напряжений между истоком и затвором транзистора второй ступени: $U_{sg} = UC_g / (C_g + C_p)$, эта разность напряжений и открывает транзистор второй ступени.

Рис. 3. Эквивалентная схема самозапуска при открытии первой ступени

Подключая последующие ступени аналогичным образом, мы создаем генератор без использования дополнительных сигналов запуска для каждой ступени. При оптимизации параметров и дополнении элементами защиты затвора такая схема обеспечивает стабильную работу и позволяет укоротить фронт импульса за счет форсирования зарядки емкостей затворов верхних ступеней генератора. Это можно сделать, увеличив амплитуду импульса напряжения исток–затвор, ограничивая при этом его длительность. Кратковременное повышение импульсного напряжения обеспечивает ускорение процесса включения транзистора за счет ускоренной зарядки управляющего электрода через его конструктивные индуктивность и сопротивление повышенным током, при этом напряжение на этом электроде не превышает допустимых значений, благодаря ограничению длительности импульса и, следовательно, заряда на затворе [3]. Такое кратковременное повышение открывающего импульсного напряжения может компенсировать затягивание фронта при последовательном включении нескольких ступеней.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование системы было проведено в среде LTSpice для двух, шести и двадцати одной ступени с использованием модели типичного высоковольтного SiC-транзистора CoolSiC_1700V_G1_IMBF170RxxxM1. К цепям затворов транзисторов были добавлены резисторы для задания нулевого потенциала в отсутствие сигналов и защитные диоды для ограничения амплитуды прямого и обратного бросков напряжения (рис. 4).

Рис. 4. Модель генератора Аркадьева–Маркса с самозапуском от первого каскада.

На рис. 5 приведены эпюры напряжения между выводами истока и затвора второго транзистора при различных емкостях запускающего конденсатора.

Рис. 5. Эпюры запускающего сигнала и напряжения на затворе второго транзистора в схеме с самозапуском

Напряжение внутри транзистора непосредственно на электроде затвора, показанное на рис. 5, значительно ниже, чем напряжение между внешними выводами. Как было изложено ранее, напряжение на управляющем выводе транзистора может в импульсе значительно превышать допустимое рабочее напряжение, указанное в документации, без вреда для его работоспособности. Такое кратковременное повышение напряжения ускоряет открывание транзистора [3] и помогает компенсировать затягивание фронта при последовательном включении нескольких ступеней.

Моделирование с учетом внутренних паразитных параметров транзистора показало, что оптимальное значение входного напряжения на выводе затвора составляет около 100 В. Для ограничения напряжения на этом уровне использован импульсный диод с напряжением пробоя 100 В. Этот диод также защищает затвор транзистора от обратных выбросов напряжения, возникающих при выключении.

Подбор оптимальной запускающей емкости осуществлялся на основе параметров транзистора при заданных напряжении питания и амплитуде запускающего импульса. Эти параметры оказывают влияние на скорость включения транзистора. Оптимальный выбор емкости позволяет не только обеспечить эффективное управление транзистором, но и ускорить процесс переключения в цепях, состоящих из нескольких транзисторов. Это подтверждается результатами моделирования, представленными на рис. 6, 7, а также экспериментальными данными, приведенными далее.

Рис. 6. Фронты на выходе каждой ступени в системе из шести ступеней и запускающий импульс

Рис. 7. Фронт на выходе первой и шестой ступеней

При увеличении количества каскадов генератора существенную роль начинают оказывать паразитные емкости элементов ступеней на землю. На рис. 8 представлены результаты моделирования выходного напряжения на 21-й ступени генератора при различных

значениях паразитных емкостей ступеней относительно земли. Уменьшение паразитных емкостей является одним из ключевых факторов увеличения выходного напряжения генератора с большим количеством ступеней.

Рис. 8. Эпюры напряжений на выходе 21-й ступени для разных паразитных емкостей ступеней

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

По предложенной схеме была собрана система из шести ступеней на полевых SiC-транзисторах RSM1701K0W производителя REASUNIS с сопротивлением открытого канала 1 Ом в корпусе TO-220. На рис. 9 представлена фотография системы. Емкости конденсаторов-накопителей 1000 пФ, запускающих конденсаторов – 10 пФ, использовался диэлектрик NP0, обеспечивающий низкие потери в режиме с наносекундными фронтами. Запускающий сигнал подавался через импульсный трансформатор для гальванической изоляции затвора транзистора первой ступени от системы запуска. На рис. 10 приведены осциллограммы запускающего импульса на выходе трансформатора. Напряжение питания 1500–1700 В создавалось импульсным источником на основе транзисторного автогенератора и высоковольтного трансформатора-выпрямителя ТДКС. Регулировка выходного напряжения осуществлялась изменением напряжения на входе импульсного источника.

Рис. 9. Шестикаскадный твердотельный генератор Маркса с самозапуском.

Рис. 10. Осциллограммы запускающего импульса на выходе изолирующего трансформатора.

Результаты экспериментов представлены на рис. 11. В экспериментальной системе фронт импульса на выходе шестого каскада заметно более пологий, чем на выходе первого. Выходное напряжение импульса в идеальном случае равно напряжению заряда конденсаторов-накопителей, умноженному на количество ступеней, т. е. $1.7 \text{ [кВ]} \cdot 6 = 10.2 \text{ кВ}$. Фактически измеренная амплитуда импульса составила около 8 кВ, по результатам моделирования она оценивалась равной примерно 9 кВ. Стабильность задержки выходного импульса в экспериментах оказалась не хуже 1 нс.

Рис. 11. Фронт импульса на выходе первого каскада (слева) и шестого каскада генератора (справа)

В целом экспериментальные данные соответствуют результатам моделирования. Фронт выходного импульса в эксперименте оказался более длинным, чем в модели, что обусловлено, по-видимому, более пологим фронтом запускающего сигнала в эксперименте и неполным учетом паразитных параметров элементов схемы в модели, в том числе погрешности использованной модели полевого транзистора. Выходное напряжение экспериментального макета немного ниже ожидаемого по результатам моделирования предположительно из-за влияния не учтенной в модели индуктивности трасс печатной платы, паразитных емкостей, а также влияния щупа подключенного осциллографа.

5. ВЫВОДЫ

Представленная схема генератора Аркадьева–Маркса на высоковольтных полевых SiC-транзисторах позволяет формировать высоковольтные импульсы с амплитудой несколько кВ, длительностью фронта порядка 10 нс и джиттером менее 1 нс. Разработанные цепи автозапуска верхних ступеней и защиты затворов их транзисторов позволяют отказаться от сложных многоканальных гальванически развязанных систем запуска, в сочетании с кратковременным перенапряжением на затворах транзисторов они позволяют получать более короткий фронт выходного импульса, компенсируя накопление задержек в процессе последовательного срабатывания каскадов генератора. С увеличением количества каскадов растет выходное сопротивление генератора и рост амплитуды выходного импульса замедляется. При использовании транзисторов средней мощности (с максимальным током порядка 10 А) появляются отказы транзисторов, вызванные слишком быстрым нарастанием тока через них. Эти проблемы до определенного предела решаются использованием более мощных и сильноточных транзисторов, таких как C2M0045170P с сопротивлением канала 45 мОм и допустимым импульсным током 160 А. Дальнейшее укорочение фронта достигается путем использования неуправляемого обостряющего разрядника на выходе генератора. Поскольку такой разрядник работает в условиях многократного перенапряжения, разброс времени его включения оказывается небольшим и он не ухудшает характеристик генератора. С таким разрядником длительность фронта выходного импульса достигает примерно 2 нс при сохранении джиттера около 1 нс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. Москва: Наука, 2004.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=19573246>
2. *Zhong Z., Rao J., Liu H., Redondo L.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. V. 49. № 11. P. 3625. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3121683>
3. *Azizi M., van Oorschot J.J., Huiskamp T.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. V. 48. № 12. P. 4262. <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.3039372>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема пятиступенчатого высоковольтного емкостного генератора.
- Рис. 2.** Фрагмент схемы генератора Маркса на транзисторах.
- Рис. 3.** Эквивалентная схема самозапуска при открытии первой ступени.
- Рис. 4.** Модель генератора Аркадьева–Маркса с самозапуском от первого каскада.
- Рис. 5.** Эпюры запускающего сигнала и напряжения на затворе второго транзистора в схеме с самозапуском для значений емкости запускающего конденсатора $\{C\}$, равных 5, 10 и 15 пФ.
- Рис. 6.** Фронт на выходе каждой ступени в системе из шести ступеней и запускающий импульс, масштабированный и смещенный на величину высоковольтного питания для сравнения.
- Рис. 7.** Фронт на выходе первой и шестой ступеней. Напряжение первой ступени (более пологая эпюра) масштабировано с коэффициентом 6 и смещено по вертикали для сопоставления.
- Рис. 8.** Эпюры напряжений на выходе 21-й ступени для значений паразитной емкости ступеней, равных 0, 0.2, 0.5 и 1 пФ. Входной импульс, приведенный для сравнения, масштабирован и смещен.
- Рис. 9.** Шестикаскадный твердотельный генератор Маркса с самозапуском.
- Рис. 10.** Осциллограммы запускающего импульса на выходе изолирующего трансформатора.
- Рис. 11.** Фронт импульса на выходе первого каскада (слева) и шестого каскада генератора (справа), делитель на входе осциллографа 1:1000.

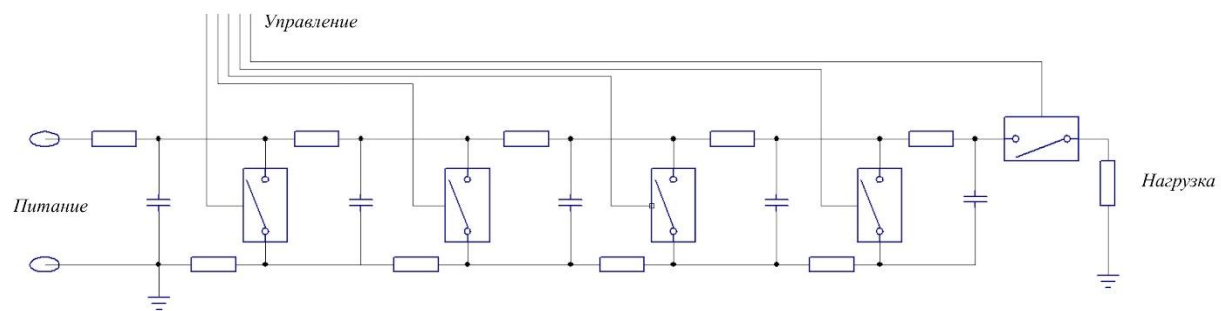


Рис. 1

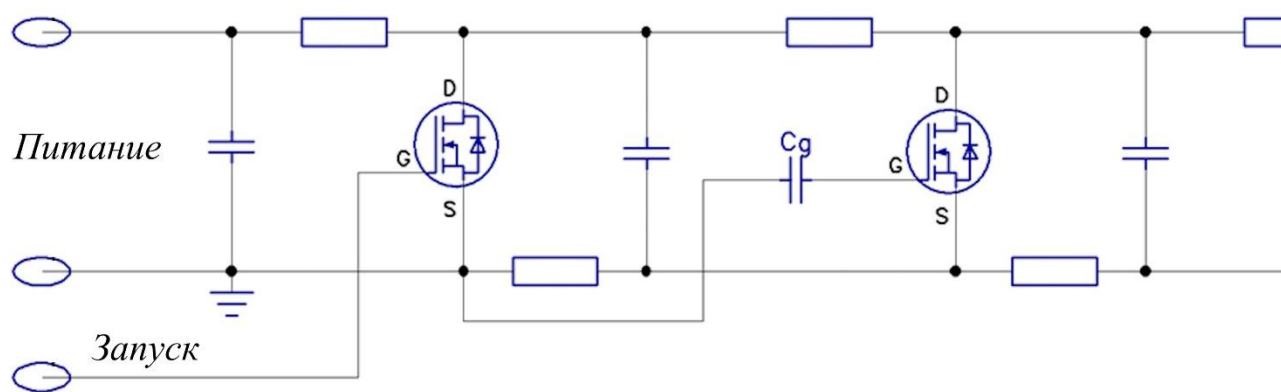


Рис. 2.

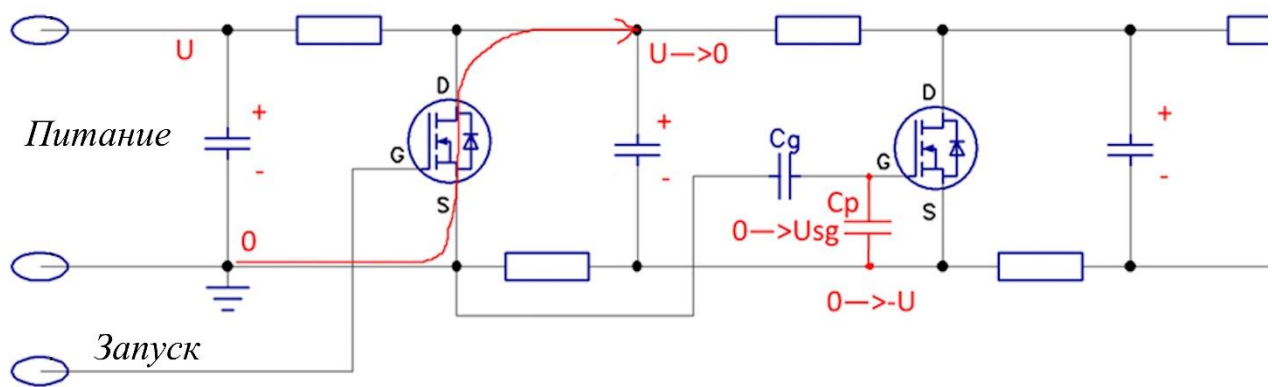


Рис. 3.

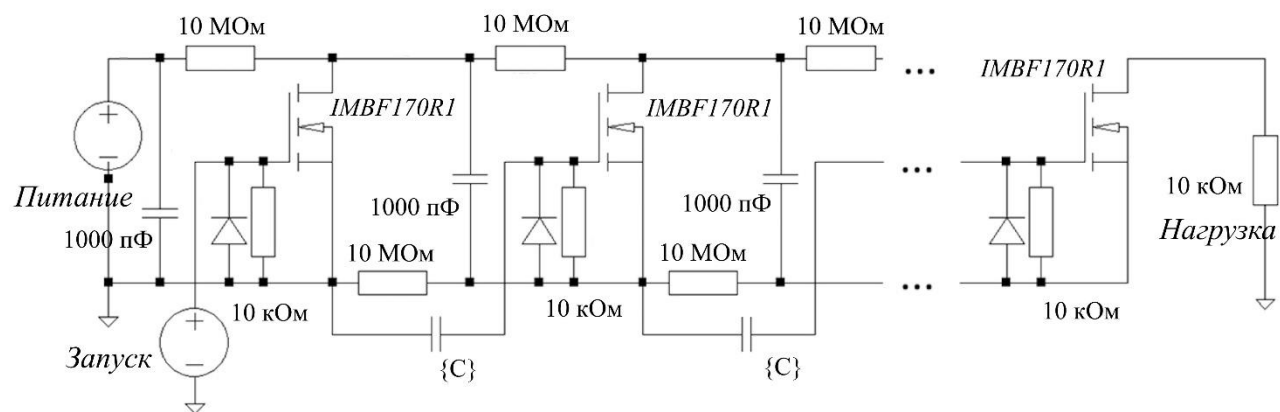


Рис. 4.

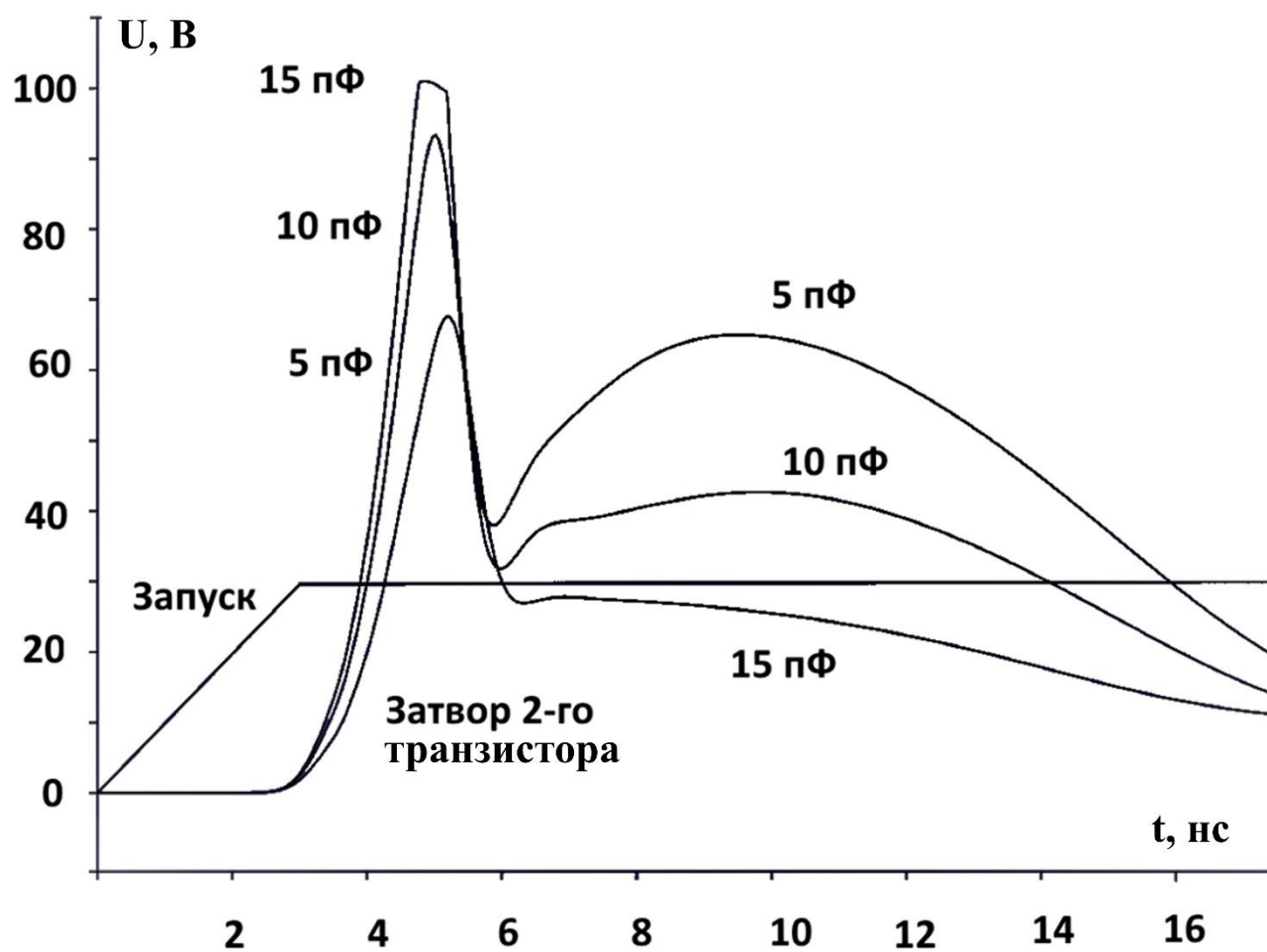


Рис. 5.

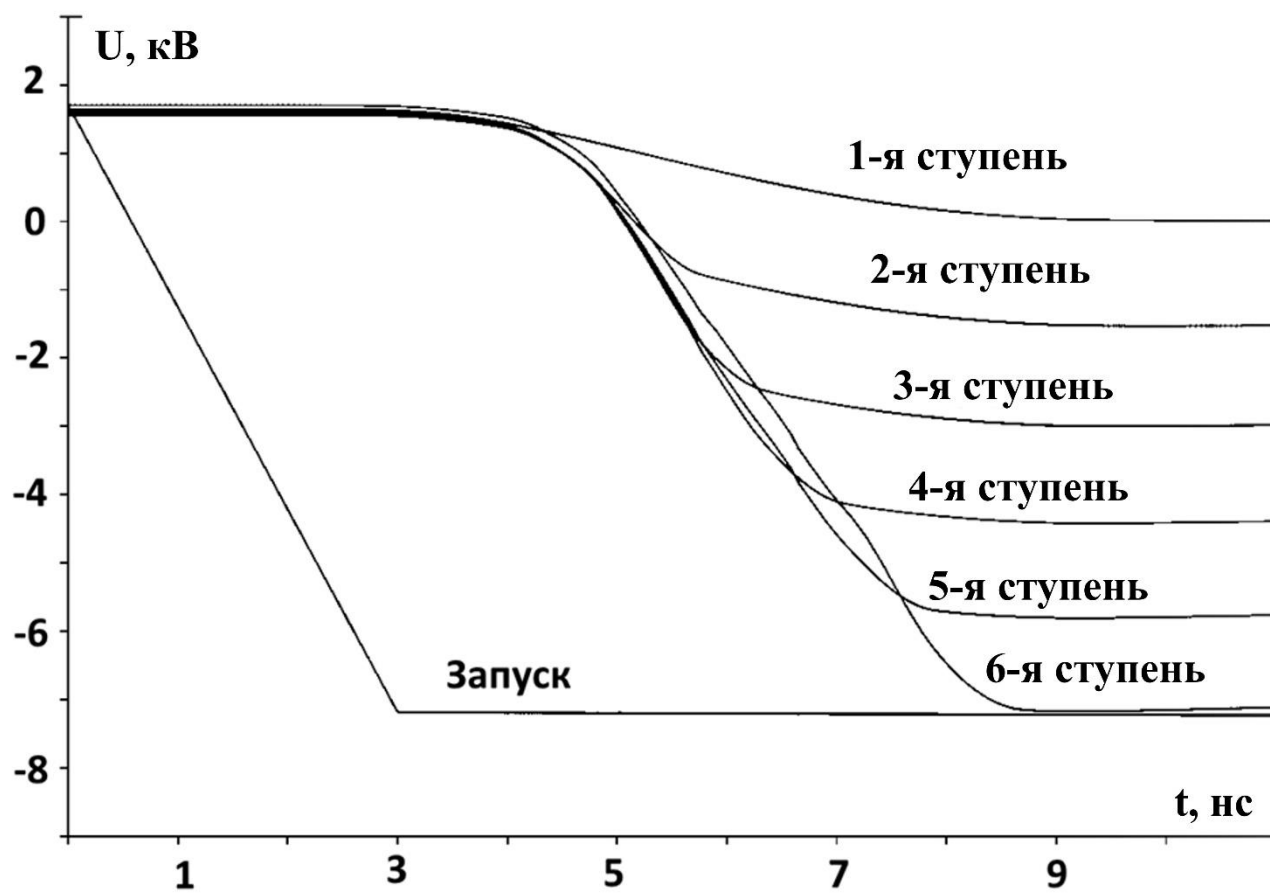


Рис. 6.

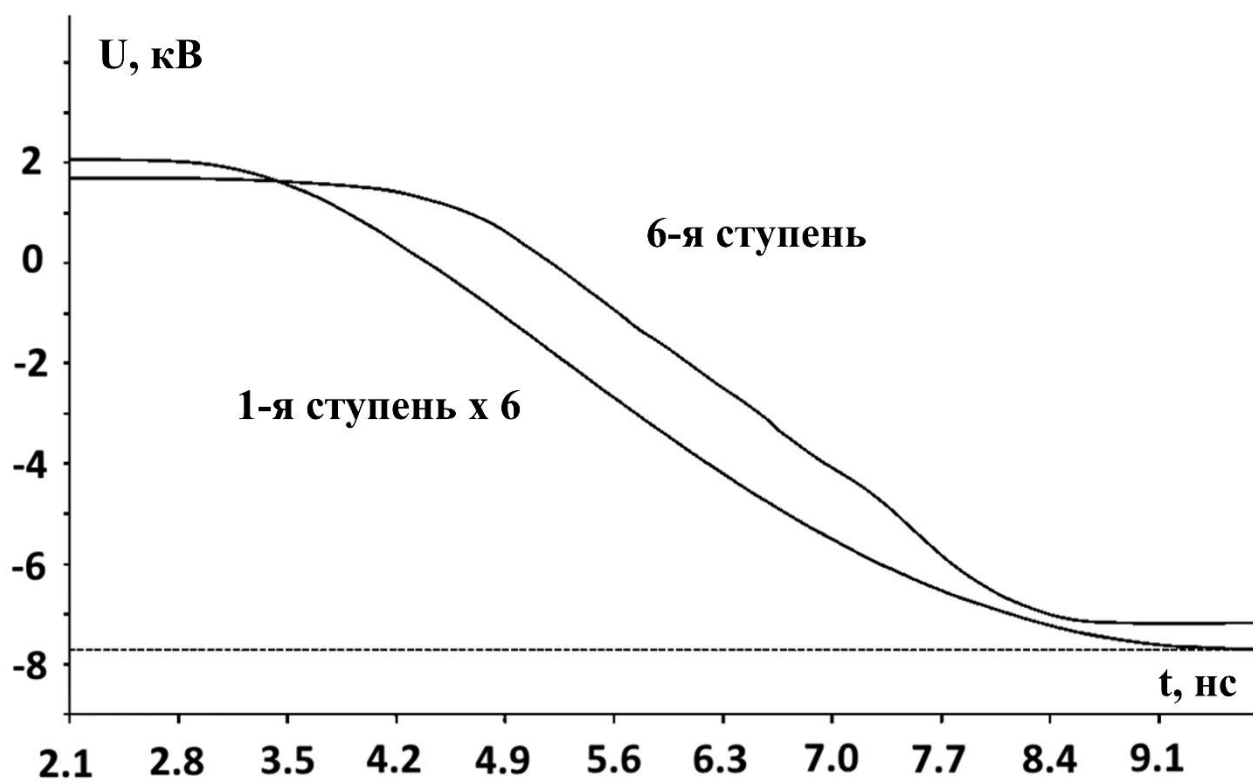


Рис. 7.

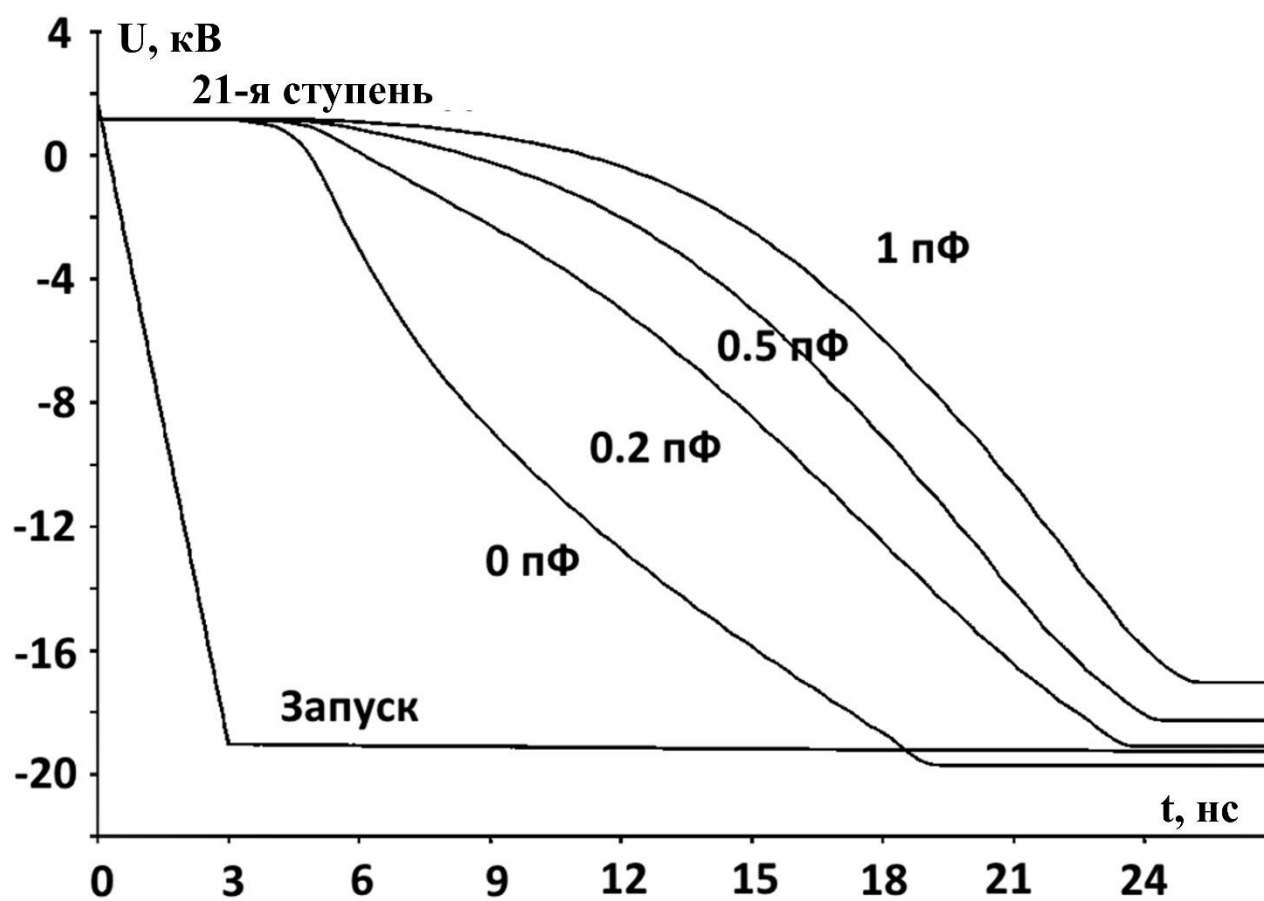


Рис. 8.

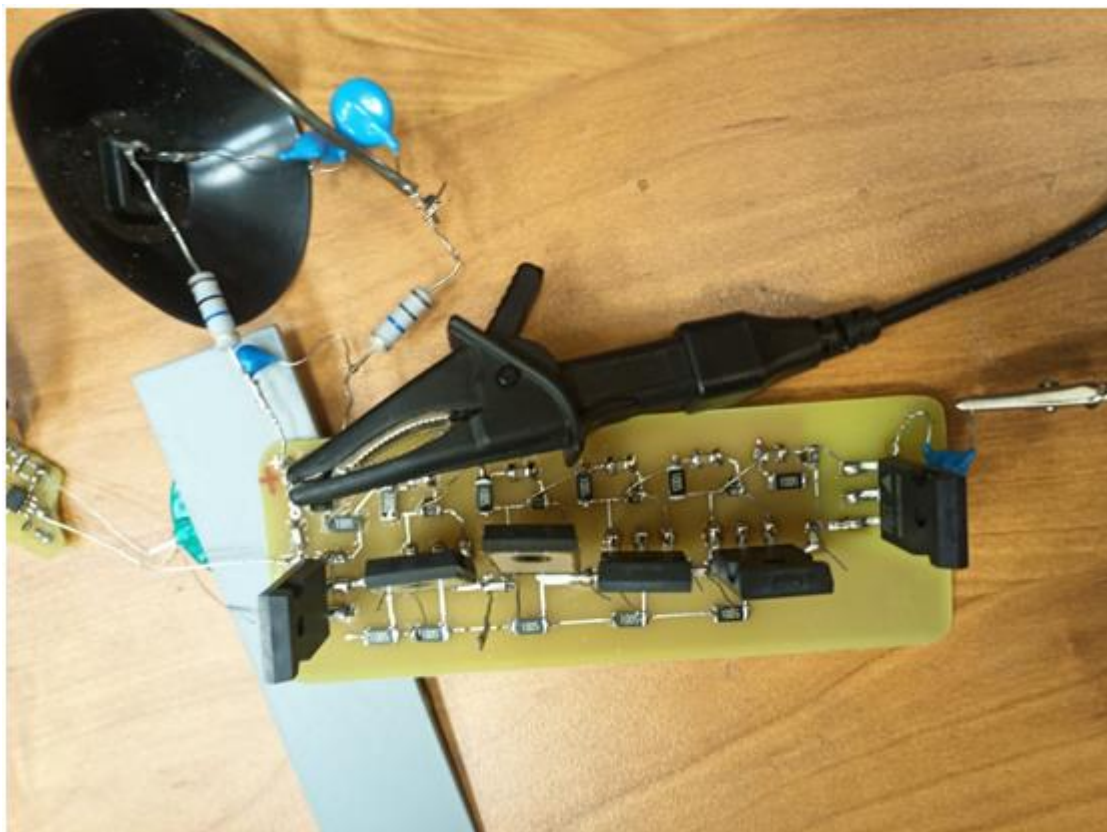


Рис. 9.

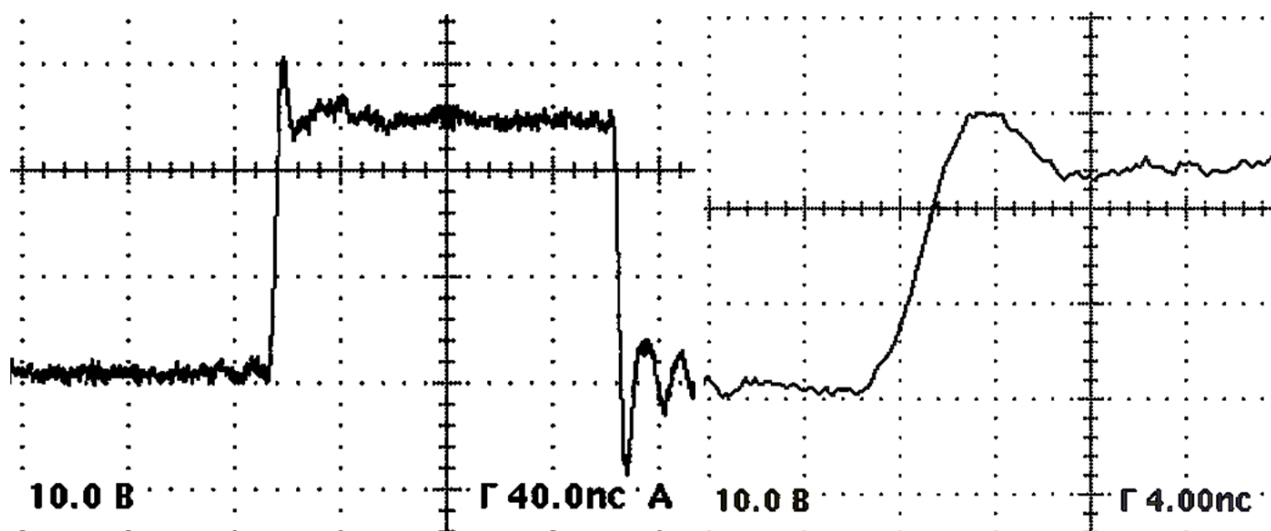


Рис. 10.

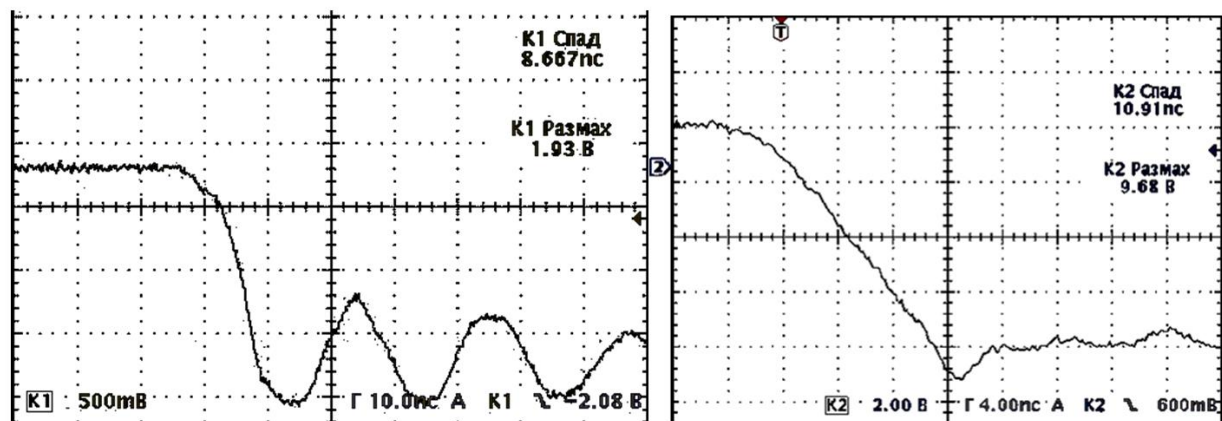


Рис. 11.