

ГЕНЕРАЦИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА БАЗЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАТОРОВ НА ТРАНЗИСТОРНОЙ ОСНОВЕ ПРИ РАБОТЕ В СИНХРОННОМ И АСИНХРОННОМ РЕЖИМАХ

© 2022 г. Я. Е. Жарков^а, С. И. Мошкунов^а, И. Е. Ребров^{а,*},
В. Ю. Хомич^а, В. А. Ямщиков^а

^а Институт электрофизики и электроэнергетики РАН
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18

*e-mail: rbrv.igor@gmail.com

Поступила в редакцию 13.02.2022 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

Рассмотрены два режима – синхронный и асинхронный – работы высоковольтного импульсного генератора на основе параллельно соединенных высоковольтных коммутаторов (ВВК) для формирования прямоугольных импульсов. В синхронном режиме достигнута крутизна фронта нарастания 336 В/нс при подключении четырех ВВК и 188 В/нс при подключении одного ВВК на резистивной нагрузке 330 Ом при питающем напряжении 8 кВ. Исследована зависимость длительности нарастания высоковольтного импульса от уровня питающего напряжения и количества коммутируемых ВВК. Для случая асинхронного режима достигнута частота следования импульсов 4 МГц и эффективность 75% при мощности в нагрузке 41 кВт. На примере моделирования показано влияние частоты коммутации на параметры формируемых импульсов на нагрузке.

DOI: 10.31857/S0032816222040279

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время импульсные высоковольтные генераторы с характерными временами фронтов десятки наносекунд, рабочими частотами свыше 1 МГц и токами десятки ампер находят применение в различных областях электротехники и электрофизики. В частности, они применяются для изменения поляризации сегнетокерамики, служащей эмиттером электронов [1, 2], в качестве источников питания для электронно-оптических камер [3–6], для тестирования электронных устройств [7, 8], в качестве драйверов ячеек Поккельса [9, 10], а также для создания стробирующих импульсов для микроканальной пластины в кадрирующих камерах [11, 12]. Сравнительно новыми областями применения высоковольтных высокочастотных импульсов являются электроформование полимерных материалов [13, 14], питание внешних отклоняющих электродов [15], а также динамическая фокусировка и удержание в пространстве электрогидродинамической струи [16].

Высоковольтные коммутаторы, способные обеспечить крутизну фронта в десятки–сотни вольт в наносекунду, могут быть реализованы на основе компонентов различных типов. К ним относятся лавинные транзисторы, искровые раз-

рядники, крайтроны, тиристоры, а также полевые транзисторы. В настоящее время крайтроны вышли из употребления и используются только в технике специального назначения. Импульсные генераторы, выполненные на основе искровых разрядников, заняли нишу в области формирования импульсов сверхвысокого напряжения (>100 кВ) и/или больших токов (>20 кА). Данные генераторы способны достичь скоростей нарастания импульсов в сотни–тысячи вольт в наносекунду. Тем не менее, их работа связана с пробивными процессами в газах, что ведет к задержкам включения, возникновению джиттера и, как следствие, накладывает ограничение на частоту следования импульсов (≤ 1 кГц), кроме того, выключение возможно только при нулевом протекающем токе. Помимо этого, появление разряда сопровождается электромагнитными помехами в широком диапазоне частот, которые могут воздействовать на другие электронные схемы.

Схожими с генераторами на основе искровых разрядников свойствами обладают устройства, выполненные на основе тиристоров. При возможности коммутации значительных мощностей тиристоры обладают длительным временем выключения, что накладывает ограничения на частоту их функционирования (≤ 10 кГц). Генерато-

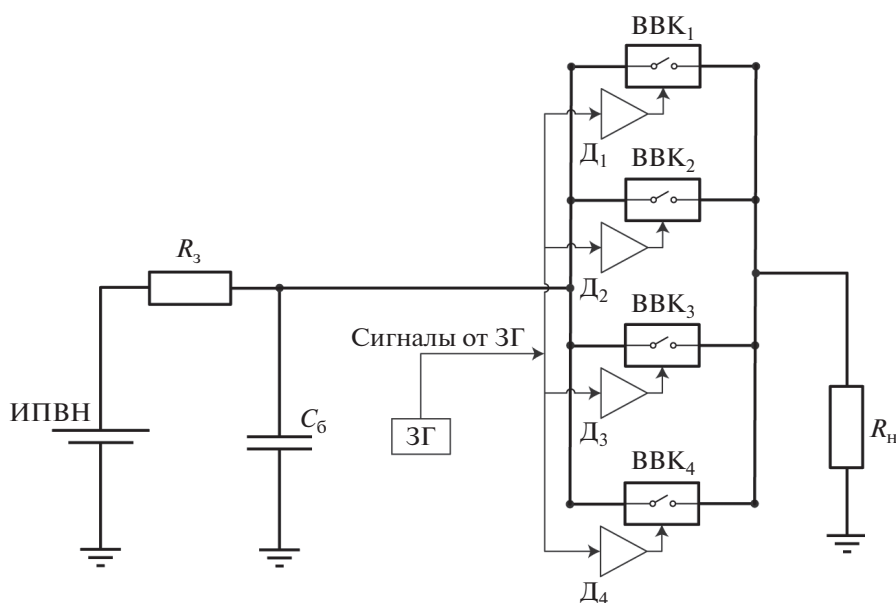


Рис. 1. Электрическая схема экспериментальной установки. ИПВН – источник питания высокого напряжения; ЗГ – задающий генератор; Д – драйверы управления; ВВК – высоковольтные коммутаторы.

ры на основе сборок из лавинных транзисторов применяются из-за возможности их быстрого переключения и простой управляющей электроники. Однако их низкая популярность обоснована большим разбросом параметров транзисторов в сборке и большим временем их восстановления.

Среди высоковольтных импульсных генераторов широкое распространение получили устройства, выполненные с применением высоковольтных ключей (ВВК) – последовательно соединенных транзисторов с полевым управлением и биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ) [17–21]. Особенностью таких сборок является наличие влияния паразитных параметров, таких как индуктивности дорожек и контактов, емкости Миллера, паразитные емкости между радиаторами транзисторов. Эти параметры оказывают двоякий эффект на процессы переключения ВВК: с одной стороны, они приводят к динамическому выравниванию потенциалов в процессе переключения ВВК, а с другой – увеличивают время коммутации. Минимизации такого негативного влияния можно добиться посредством применения рассмотренного в работе [22] мощного драйвера управления, который позволяет обеспечить скорость нарастания управляющих импульсов напряжений до 200 В/нс и синхронное включение транзисторов.

Перспективным является проектирование устройств на основе отдельных модулей ВВК, что позволяет добиться удобства в техническом обслуживании, а также расширить диапазон параметров формируемых высоковольтных импульсов. Важным преимуществом такого подхода яв-

ляется то, что распределение нагрузки на несколько самостоятельных модулей обеспечивает более щадящий тепловой режим для каждого модуля, что дает возможность расширить выбор электротехнических компонентов в ходе проектирования, ускорить разработку и сделать ее более экономичной.

Целью данной работы является разработка генератора, выполненного на основе нескольких параллельно включенных ВВК (до четырех штук), способных работать в двух режимах: при синхронной подаче сигналов включения на несколько сборок ВВК для увеличения скорости нарастания напряжения, а также в режиме асинхронной подачи запускающих сигналов для обеспечения максимальной частоты следования импульсов выходного напряжения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Схема состоит из источника питания высокого напряжения ИПВН, накопительного высоковольтного конденсатора C_6 общей емкостью 20 мкФ, зарядного резистора R_3 , резистивной нагрузки R_n (330 Ом), четырех ВВК₁–ВВК₄ с идентичными драйверами управления Д₁–Д₄ [22] и задающего генератора ЗГ.

В приведенной схеме каждый из ВВК включает в себя 16 отдельных модулей, состоящих из БТИЗ марки IRGPS40B120UD [23]. Использование БТИЗ вместо МОП (металл–окисел–полупроводник) транзисторов объясняется, в первую очередь, со-

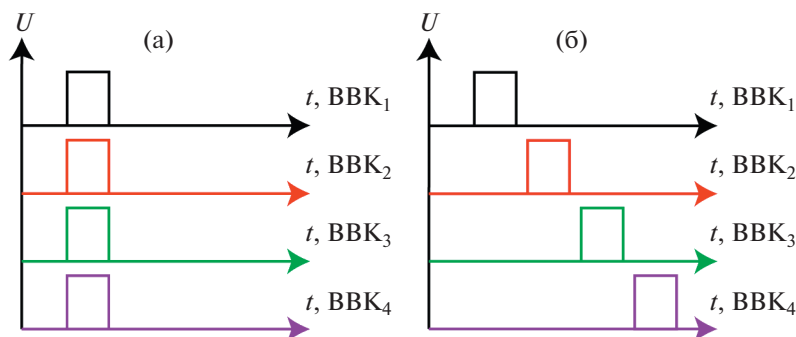


Рис. 2. Схема подачи сигналов управляющих импульсов открытия для синхронного (а) и асинхронного (б) режимов коммутации ВВК.

ображениями надежности: МОП-транзистор труднее защитить от превышения предельного значения тока из-за его невысокого значения для отдельного дискретного прибора. Напротив, БТИЗ показывает устойчивую работу даже при уровне тока короткого замыкания примерно в десять раз больше номинального [24].

На рис. 2 приведены последовательности сигналов открытия, поступающих на драйверы управления ВВК от ЗГ при их синхронном (рис. 2а) и асинхронном (рис. 2б) включении.

В случае синхронного режима коммутации исследуемым параметром являлось время нарастания высоковольтного импульса (уровень 0.1–0.9) в зависимости от питающего напряжения и количества коммутируемых высоковольтных ключей. Для подачи импульса открытия на высоковольтные ключи к одному из каналов задающего генератора подключалось от одного до четырех параллельно соединенных BNC-кабелей с равными длинами и волновыми сопротивлениями (50 Ом), что обеспечивало синхронность поступления сигнала открытия на идентичные драйверы управления.

В случае асинхронного режима исследуемыми параметрами являлись времена нарастания и спада высоковольтного импульса (в зависимости от напряжения питания), а также предельная частота функционирования сборки из четырех ВВК с транзисторами указанных марок и воздушной системой охлаждения. Для формирования высокочастотного высоковольтного сигнала на нагрузке импульсы управления на драйверы управления ВВК поступали с временным сдвигом, зависящим от основной частоты и номера коммутируемого ВВК, а период подачи управляющего сигнала составлял $1/4$ от периода высоковольтного импульса на нагрузке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Синхронный режим

Результаты измерений времени нарастания высоковольтного импульса на активной нагрузке в зависимости от уровня питающего напряжения и количества участвующих в коммутации ВВК приведены на рис. 3. Согласно приведенным данным, вне зависимости от количества коммутируемых ВВК время нарастания линейно возрастает с увеличением напряжения питания, что согласуется с результатами, полученными в работе [22], и является следствием достижения предельного тока нарастания БТИЗ в составе ВВК.

Разные углы наклона линейных зависимостей времени нарастания от напряжения питания, приведенных на рис. 3, определяются нелинейностью эквивалентной емкости ВВК, которая зависит от уровня коммутируемого напряжения и количества ключей в серии. Помимо этого, не-

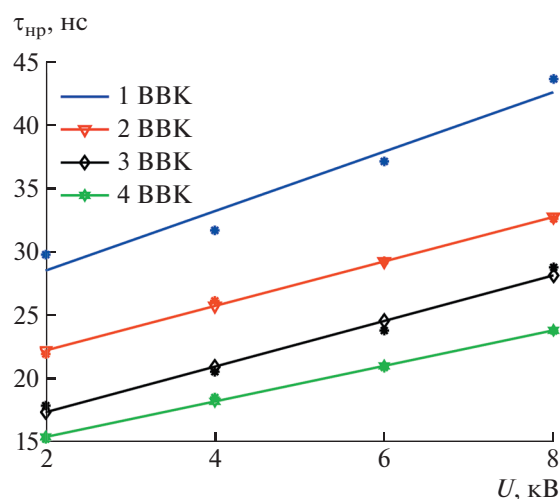


Рис. 3. Зависимость времени нарастания высоковольтных импульсов от уровня питающего напряжения при коммутации от одного до четырех ВВК.

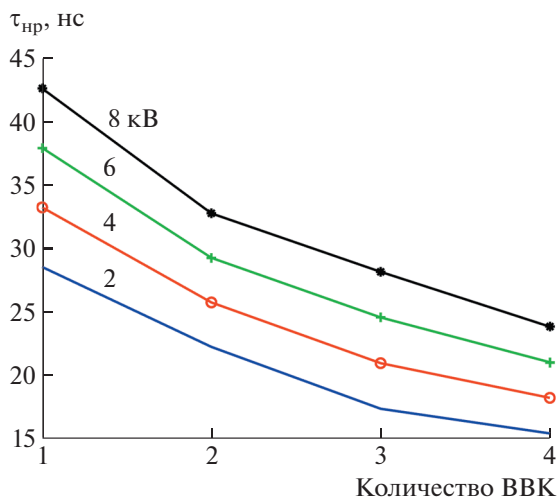


Рис. 4. Зависимость времени нарастания импульса от количества используемых ВВК при различном уровне питающего напряжения (цифры у кривых).

большие отклонения также могут возникать из-за несинхронности срабатывания отдельных ключей в силу их взаимного влияния.

На рис. 4 приведены зависимости времени нарастания при подключении разного количества ВВК для разных напряжений. Согласно приведенным графикам, характер кривых зависит как от уровня напряжения, так и от количества подключенных ВВК. Это может быть обосновано двумя факторами. С одной стороны, повышение напряжения на нагрузке ведет к возрастанию тока, что увеличивает время открытия БТИЗ. С другой стороны, при увеличении числа параллельно соединенных ВВК (в данном случае одинаковых и синхронно управляемых) увеличивается количество параллельно соединенных транзисторов, что приводит к росту предельной крутизны нарастания тока.

Полученные значения крутизны фронта нарастания высоковольтных импульсов напряжения при различном количестве ВВК и разных уровнях напряжения питания приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения крутизны фронта нарастания импульсов напряжения при нагрузке 330 Ом

Напряжение, кВ	Крутизна фронта нарастания импульсов напряжения, В/нс, при числе ВВК			
	1	2	3	4
2	70	90	115	130
4	121	156	191	220
6	158	205	245	286
8	188	244	284	336

Асинхронный режим

Результаты измерений времен нарастания и спада высоковольтного импульса на активной нагрузке при разных частотах коммутации ВВК в зависимости от уровня питающего напряжения приведены на рис. 5.

Согласно приведенным результатам, прослеживается тенденция к увеличению времени нарастания и уменьшению времени спада с ростом частоты. Для зависимостей, полученных при частотах 0.4 и 1 МГц, статистически значимых различий характерных времен фронтов не выявлено. Тем не менее, для зависимостей при 0.4 и 1 МГц, с одной стороны, а также зависимости при 4 МГц, с другой стороны, разница характерных времен фронтов достигает 100 нс. Также, согласно рис. 5, при частоте коммутации, равной 4 МГц, время нарастания импульса больше, чем время спада, приблизительно в 1.6 раза. В то же время, для частот 0.4 и 1 МГц расхождение времен нарастания и спада при одинаковом уровне напряжения находится в диапазоне статистической погрешности.

Для объяснения полученного существенного различия времен нарастания и спада высоковольтных импульсов на частоте 4 МГц была создана SPICE-модель (программа моделирования электронных схем) по схеме, приведенной на рис. 6.

Модель содержит источник ЭДС $E_{ист} = 375$ В; индуктивность $L_{п}$ контактов, равную 10 нГн; активное сопротивление нагрузки $R_{нагр} = 10$ Ом; SPICE-модель транзистора Q марки IRG4S40B120UD; резисторы затвора транзистора R_3 и первичной цепи драйвера управления $R_{откр}$ с сопротивлениями 2.2 Ом; элемент взаимной индуктивности одновиткового трансформатора T с индуктивностями первичной и вторичной обмоток, равными по 3.5 мкГн, и коэффициентом связи 0.97; ЭДС драйвера управления $E_3 = 30$ В; буферную емкость $C_6 = 10$ нФ, а также идеальный ключ PS для периодической коммутации цепи драйвера управления.

Для получения расчетных зависимостей длительностей времен нарастания и спада импульсов напряжений ключ PS коммутировался с частотой в диапазоне от 170 до 290 кГц и скважностью 50%.

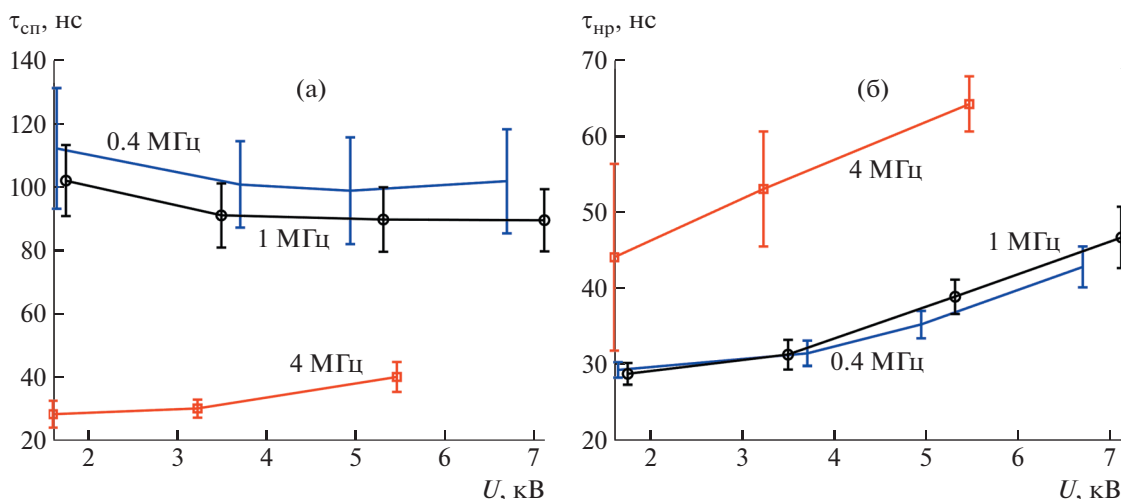


Рис. 5. Зависимости времен спада (а) и нарастания (б) высоковольтного импульса от уровня питающего напряжения при различной частоте коммутации (цифры у кривых) с 70%-ным доверительным интервалом.

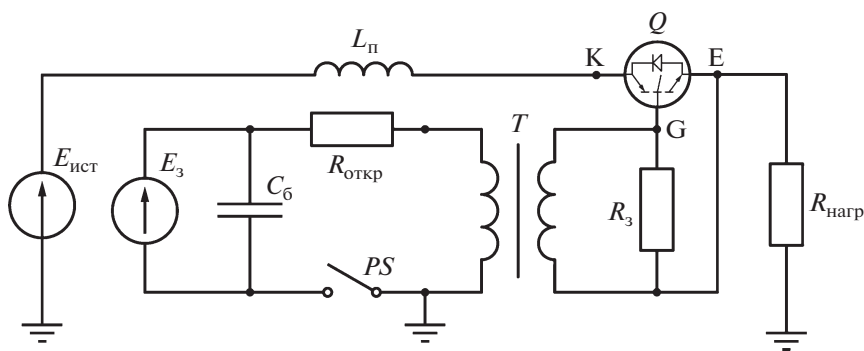


Рис. 6. Электрическая схема SPICE-модели.

Это соответствовало частотам работы одного из четырех драйверов параллельно включенных ВВК при частоте выходных высоковольтных импульсов 0.68–1.16 МГц. Для проведения расчета нелинейной схемы был использован метод трапеций с шагом дискретизации 0.25 нс.

Согласно результатам моделирования, приведенным на рис. 7, при увеличении частоты сигнала управления, поступающего на драйвер транзистора, происходит 10-кратное уменьшение длительности времени спада и возрастание в 1.25 раза времени нарастания, что согласуется с результатами эксперимента.

Для иллюстрации возникающих процессов на рис. 8 представлены расчетные осциллограммы напряжения “затвор–эмиттер” транзистора и нагрузки, временные оси которых приведены к длительности времени расчета. Согласно приведенным осциллограммам, при частоте 170 кГц скажность высоковольтных импульсов, формируемых на нагрузке, ниже, чем при частотах 240 и 260 кГц.

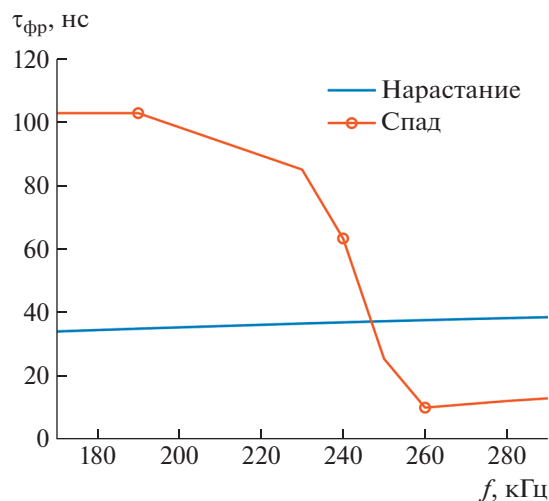


Рис. 7. Расчетные зависимости длительностей времен нарастания и спада импульса напряжения на активной нагрузке

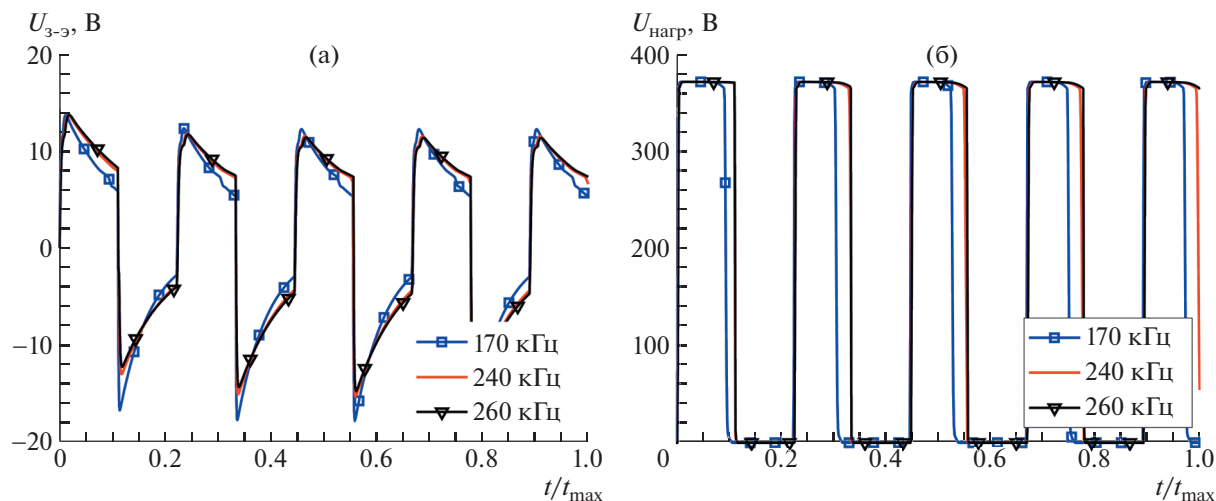


Рис. 8. Расчетные осциллограммы напряжения “затвор–эмиттер” транзистора (а) и нагрузки (б).

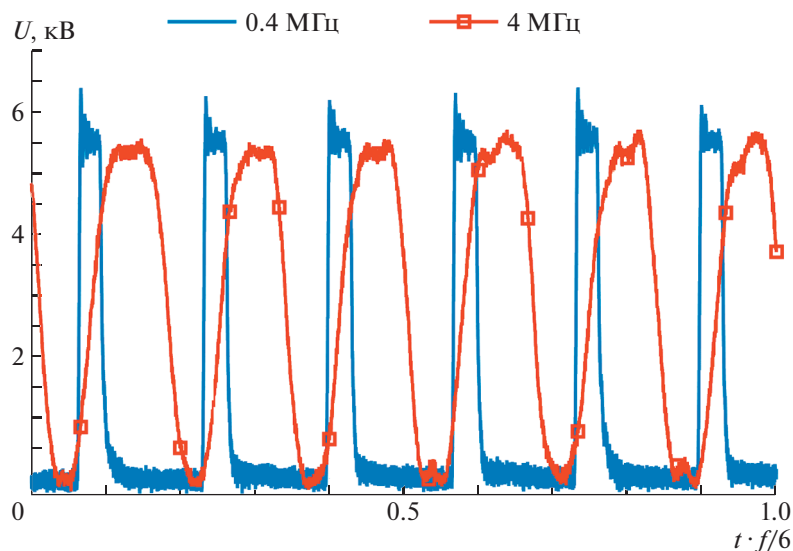


Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы импульсов напряжений на нагрузке при частотах коммутации ВВК 0.4 и 4 МГц.

Это свидетельствует о более раннем закрытии транзистора в модели. Преждевременный переход в непроводящее состояние происходит из-за достижения током первичной обмотки предельной величины, ограниченной токоограничивающим резистором $R_{откр}$. Напряжение “затвор–эмиттер” перестает поддерживаться и снижается, что приводит к усилению эффекта Миллера и, в итоге, к затягиванию времени спада высоковольтного импульса на нагрузке.

Также, согласно расчетным осциллограммам на рис. 8, при прекращении поступления сигнала открытия напряжение “затвор–эмиттер” становится отрицательным из-за возникновения индук-

цированных напряжений. Уровень отрицательного напряжения в момент поступления сигнала открытия увеличивается с ростом частоты. Данный эффект приводит к тому, что при последующем поступлении сигнала на открытие передаваемая от драйвера энергия также затрачивается на изменение полярности напряжения “затвор–эмиттер” транзистора, что ведет к увеличению длительности нарастания фронта импульса.

Разница в выходных импульсах при разных частотах коммутации иллюстрируется осциллограммами на рис. 9. Временные оси приведены к шести периодам сигнала открытия. Видно хорошее соответствие экспериментальных и модельных данных.

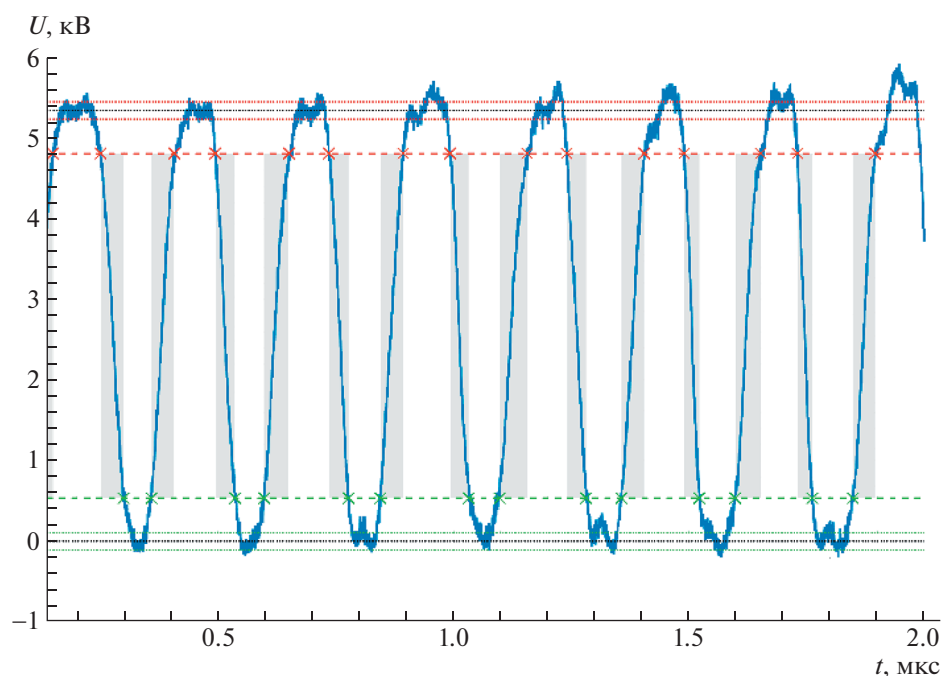


Рис. 10. Экспериментальная осциллограмма импульсов напряжения на нагрузке с частотой следования 4 МГц при напряжении питания 6 кВ.

На рис. 10 приведена экспериментальная осциллограмма импульсов выходного напряжения на нагрузке с частотой следования 4 МГц при амплитудном значении напряжения 5.5 кВ. Для данного случая напряжение питания составляло 6 кВ, что свидетельствует о достижении пределов функционирования схемы, состоящей из четырех параллельно соединенных ВВК. Действующее значение напряжения на нагрузке при этом составляло 3.68 кВ, что соответствует 41 кВт активной мощности. Принимая во внимание, что идеальный выходной сигнал будет выглядеть, как меандр с амплитудой 6 кВ и скважностью 0.5, а все отклонения от этой формы обусловлены потерями на транзисторах ВВК, можно сказать, что суммарное значение потерь составит 13.5 кВт, а эффективность работы генератора – не менее 75%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены два режима работы высоковольтного импульсного генератора на основе параллельно соединенных ВВК для формирования прямоугольных импульсов – синхронный и асинхронный режимы коммутации ВВК.

Синхронный режим при параллельном включении коммутаторов (до 4 штук) служит для повышения крутизны фронта нарастания напряжения на нагрузке. При 8 кВ питающего напряжения на резистивной нагрузке 330 Ом (24.2 А тока нагрузки) была достигнута крутизна фронта 336 В/нс при

подключении четырех ВВК и 188 В/нс при подключении одного ВВК.

Показано, что в режиме синхронной коммутации ВВК на активную нагрузку зависимость времени нарастания от уровня напряжения питания и количества синхронно включаемых в работу коммутаторов носит линейный характер. Это дает возможность использовать параллельно соединенные ВВК со своими системами управления для повышения скорости нарастания напряжения. Такое решение позволяет более гибко использовать созданные модули при компоновке промышленных установок, унифицировать ВВК для различных применений, сократить время разработки.

Показана возможность асинхронного последовательного включения параллельно соединенных ВВК для генерации высоковольтных высокочастотных сигналов. Такой режим позволяет распределить тепловую нагрузку между отдельными коммутаторами и драйверами управления. В этом режиме блок из четырех ВВК обеспечивает коммутацию в активную нагрузку (330 Ом) высоковольтных импульсов (до 5.5 кВ). При использовании воздушной системы охлаждения достигнута частота следования импульсов 4 МГц и эффективность 75% при мощности в нагрузке 41 кВт.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 18-29-17066 мк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boscolo I., La Torre S.* // Review of Scientific Instruments. 1999. V. 70. № 3. P. 1857. <https://doi.org/10.1063/1.1149680>
2. *Du J.M., Liu G.M., Zhang F.P., He H.L.* // Key Engineering Materials. 2008. V. 368. P. 18. doi 10.4028/www.scientific.net/KEM.368-372.18
3. *Baker R.J., Johnson B.P.* // Measurement Science and Technology. 1994. V. 5. № 4. P. 408. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/5/4/014>
4. *Litton A.B., Erickson A., Bond P., Kardo-Susoyev A., O'Meara B.* // Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. 1995. V. 1. P. 733 <https://doi.org/10.1109/PPC.1995.596808>
5. *Joshi M.J., Upadhyay J., Deshpande P.P., Sharma M.L., Navathe C.P.* // Review of Scientific Instruments. 2010. V. 81. № 8. P. 85. <https://doi.org/10.1063/1.3462984>
6. *Upadhyay J., Sharma M.L., Navathe C.P., Toley M.A., Shinde S.J., Nadkarni S.A., Sarkar S.K.* // Review of Scientific Instruments. 2012. V. 83. № 2. P. 24. <https://doi.org/10.1063/1.3685245>
7. *Rezinkin O., Rezinkina M., Danyluk A., Guchenko A.* // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021. С. 237. <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575752>
8. *Mytnikov A., Lavrinovich A., Strugov V., Saqib M.* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1019. № 1. P. 12. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1019/1/012024>
9. *Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 630.
10. *Kim H.-S., Yu C.-H., Jang S.-R., Kim G.-H.* // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. V. 66. № 6. P. 4334. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2866078>
11. *Bradley D.K., Bell P.M., Kilkenny J.D., Hanks R., Landen O., Jaanimagi P.A., Verdon C.P.* // Review of Scientific Instruments. 1992. V. 63. № 10. P. 4813. <https://doi.org/10.1063/1.1143571>
12. *Jankee U., Navathe C.P.* // Meas. Sci. Technol. 2006. V. 17. P. 25. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/7/N01>
13. *Rebrov I.E., Lukanina K.I., Grigoriev T.E., Bakirov A.V., Krashennnikov S.V., Dmitryakov P.V., Kamyshevsky R.A., Antipova C.G., Chvalun S.N., Khomich V.Yu.* // Chemical Engineering Journal. 2021. V. 418. P. 126561. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126561>
14. *Yeo L.Y., Gagnon Z., Chang H.C.* // Biomaterials. 2005. V. 26. № 31. P. 6122. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.03.033>
15. *Arras M.M.L., Grasl C., Bergmeister H., Schima H.* // Science and Technology of Advanced Materials. 2012. V. 13. № 3. P. 35. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/13/3/035008>
16. *Kyselica R., Enikov E.T.* // Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2016. V. 50541. P. V04AT05A025. <https://doi.org/10.1115/IMECE2016-65405>
17. *Иванов Е.В.* Препринт ИПЭФ РАН. М., 2004
18. *Khomich V.Y., Moshkunov S.I., Rebrov I.E.* // 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). 2016. P. 918. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2016.7525962>
19. *Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю.* // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 122.
20. *Иванов Е.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Грязнов О.В.* // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 32.
21. *Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А.* // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71. <https://doi.org/10.7868/S0032816216020099>
22. *Жарков Я.Е., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.* // ПТЭ. 2021. № 6. С. 25. <https://doi.org/10.31857/S0032816221060239>
23. *Storasta L., Matthias S., Kopta A., Rahimo M.* // IEEE. 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. 2012. P. 157. <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2012.6229047>
24. *Jang S., Ryoo H., Goussev G., Rim G.H.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2012. V. 40. № 10. P. 2561. <https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2186592>