

## ТРАНЗИСТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ С СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ

© 2024 г. С. В. Коротков<sup>а,\*</sup>, А. Л. Жмодиков<sup>а</sup>, Д. А. Коротков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

\*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 05.09.2023 г.

После доработки 05.09.2023 г.

Принята к публикации 06.10.2023 г.

Приведены результаты сравнительных исследований генераторов мощных субмикросекундных импульсов прямоугольной формы, в которых коммутатор выполнен в виде транзисторного блока с трансформаторной цепью управления. Рассмотрен блок из десяти последовательно соединенных транзисторов, способный на частоте 2 кГц коммутировать в резистивную нагрузку 150 Ом прямоугольные импульсы тока с амплитудой 50 А и длительностью до 1 мкс, имеющие фронт и спад менее 50 нс. Определена возможность увеличения коммутируемой мощности путем увеличения силового напряжения до десятков кВ.

DOI: 10.31857/S0032816224010109, EDN: FWUMBF

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мощной импульсной технике широко используются генераторы наносекундных импульсов на основе транзисторных коммутаторов, имеющих рабочий ток десятки ампер и очень малые (десятки нс) времена включения и выключения. Фундаментальные физические ограничения не позволяют обеспечить такие коммутационные характеристики с помощью высоковольтных транзисторов. Поэтому высокое рабочее напряжение коммутаторов достигается при использовании большого количества последовательно соединенных транзисторов со сравнительно малым предельно допустимым напряжением (порядка 1 кВ). В результате определенной проблемой является разработка цепей управления (ЦУ), которые должны иметь высокую электрическую прочность и обеспечивать синхронное приложение к затворам транзисторов импульсов запускающего напряжения.

Традиционные цепи управления высоковольтных транзисторных коммутаторов содержат специальные драйверы с оптическим

запуском, подключенные к затворам транзисторов. Основными недостатками таких ЦУ являются их сравнительно большая стоимость и необходимость гальванической развязки источников питания драйверов на полное напряжение силовой цепи.

В связи с этим достаточно перспективными представляются недорогие трансформаторные ЦУ [1, 2], в которых первичные обмотки запускающих трансформаторов соединены последовательно, а вторичные обмотки подключены к затворам транзисторов. При коммутации в цепь первичных обмоток импульса тока управления к затворам одновременно прикладываются импульсы запускающего напряжения, обеспечивающие синхронное включение транзисторов. Определенным достоинством трансформаторных ЦУ является возможность создания высоковольтной гальванической развязки от элементов силовой цепи при выполнении первичных обмоток трансформаторов в виде одного надежно изолированного витка. К недостаткам ЦУ с одновитковыми запускающими трансформаторами можно отнести

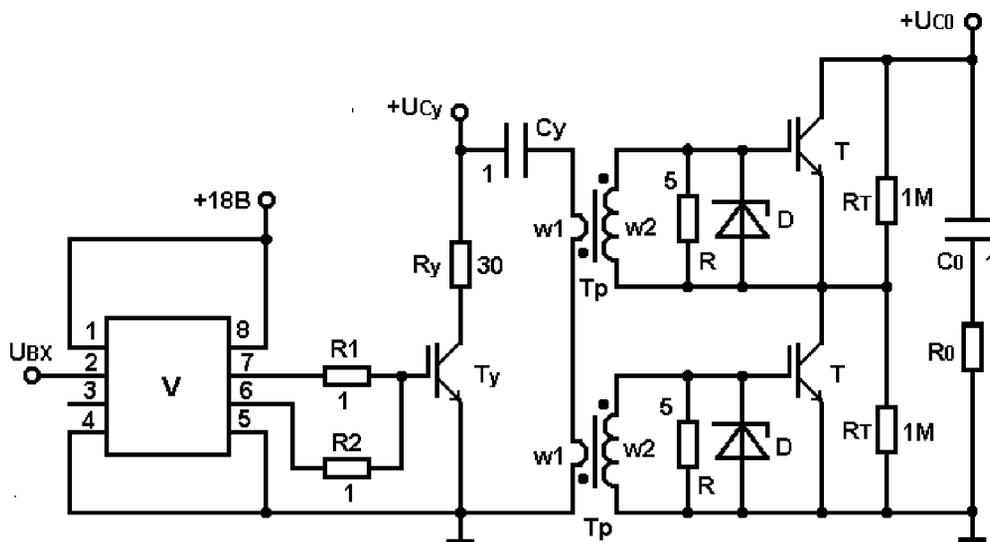


Рис. 1. Электрическая схема опытного генератора: D – BZV55C15; Тр:  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 3$  (сердечник – феррит № 87 фирмы Epcos с размерами  $16 \times 9.6 \times 12.6$  мм<sup>3</sup>); V – MIC4452.

большие габариты трансформаторов, которые определяются необходимостью формирования на затворах транзисторов импульсов напряжения в течение всего процесса коммутации силового тока. Однако если длительность силового тока мала, то габариты трансформаторов могут быть невелики.

В статье [3] описан генератор субмикросекундных импульсов колоколообразной формы, содержащий силовой конденсатор и коммутатор в виде блока последовательно соединенных IGBT-транзисторов IRGPS60B120KDP, которые переключались с помощью малогабаритных трансформаторов, имеющих кольцевые ферритовые сердечники с размерами  $16 \times 9.6 \times 6.3$  мм<sup>3</sup>. При полном разряде силового конденсатора генератор обеспечивал коммутацию в резистивную нагрузку импульсов тока с длительностью до 1.5 мкс, имеющих амплитуду около 200 А и фронт около 20 нс. Малые коммутационные потери энергии в транзисторах достигались в результате создания высокой амплитуды и скорости нарастания импульсов тока во вторичных обмотках трансформаторов.

В статье рассматриваются возможности создания генератора субмикросекундных прямоугольных импульсов на основе высоковольтного транзисторного коммутатора, в котором длительность тока, коммутируемого в резистивную

нагрузку, может плавно регулироваться путем выключения транзисторов при несущественном разряде силового конденсатора.

## 2. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОГО ГЕНЕРАТОРА

На рис. 1 приведена электрическая схема опытного генератора, разработанная на основе схемотехнического решения, описанного в работе [3]. Она содержит силовую цепь  $C_0-R_0$ , коммутатор в виде блока транзисторов Т и цепь управления коммутатора на основе транзистора  $T_y$ .

Управление транзистором  $T_y$  осуществляется с помощью драйвера V, который содержит два выходных микротранзистора  $T_1$ ,  $T_2$ , подключенных, соответственно, между выводами 8, 7 и 6, 5. В исходном состоянии микротранзистор  $T_1$  выключен, а  $T_2$  включен. В результате транзистор  $T_y$  надежно выключен, так как его затвор зашунтирован цепью, состоящей из включенного микротранзистора  $T_2$  и низкоомного резистора  $R_2$ . При приложении к выводам 2, 4 входного сигнала  $U_{bx}$  в схеме драйвера V происходит одновременное выключение  $T_2$  и включение  $T_1$ . В результате обеспечивается протекание тока через резистор  $R_1$ , и на затвор транзистора  $T_y$  подается импульс запускающего напряжения.

При включении  $T_y$  в первичные обмотки  $w_1$  трансформаторов Тр коммутируется запускающий ток  $I_{w1}$ , являющийся током разряда

конденсатора  $C_y$ . Длительность этого тока регулируется путем изменения длительности сигнала  $U_{вх}$ . В результате через вторичные обмотки трансформаторов  $Tr$  протекают токи  $I_{w2}$ , которые осуществляют быструю и синхронную зарядку емкостей затворов транзисторов  $T$  до напряжения включения. Амплитуда импульсов напряжения на затворах ограничивается на допустимом уровне стабилитронами  $D$ . После включения  $T$  цепь управления  $C_y-R_y-T_y$  обеспечивает приложение к их затворам напряжения, необходимого для поддержания высокой проводимости. При этом до момента выключения транзисторов  $T$  к нагрузке  $R_0$  прикладывается напряжение зарядки конденсатора  $C_0$ , и через нее протекает силовой ток  $I$ . Если емкость конденсатора  $C_0$  достаточно велика, то ток  $I$  практически не изменяется.

В момент окончания сигнала  $U_{вх}$  в схеме драйвера  $V$  одновременно изменяется состояние микротранзисторов  $T_1, T_2$ :  $T_1$  выключается, а  $T_2$  включается. В результате обеспечивается уменьшение напряжения на затворе транзистора  $T_y$ , обусловленное отсутствием тока через резистор  $R_1$  и разрядом емкости затвора через резистор  $R_2$ . Когда напряжение на затворе становится меньше необходимого для поддержания включенного состояния, транзистор  $T_y$  выключается, и ток  $I_{w1}$  уменьшается до нуля. После окончания тока  $I_{w1}$  напряжение  $U_y$  на затворах транзисторов  $T$  уменьшается в результате разряда их собственных емкостей через резисторы  $R$ . Транзисторы  $T$  выключаются, когда величина напряжения  $U_y$  становится меньше порогового значения. В процессе выключения  $T$  к транзисторному блоку прикладывается напряжение зарядки конденсатора  $C_0$ , и ток через нагрузку  $R_0$  уменьшается до нуля.

В опытном генераторе амплитуды прямоугольных импульсов тока  $I_{w1}, I$  регулировались путем изменения напряжения зарядки конденсаторов  $C_y, C_0$  ( $U_{Cy}, U_{C0}$ ). В качестве  $T_y$  и  $T$  использовались различные типы транзисторов, паспортные характеристики которых допускали возможность формирования мощных импульсов тока с фронтом и спадом менее 100 нс. Для получения высокой скорости нарастания силового тока цепь разряда конденсатора  $C_0$  имела малую монтажную индуктивность (не более 200 нГн). Выбранная величина

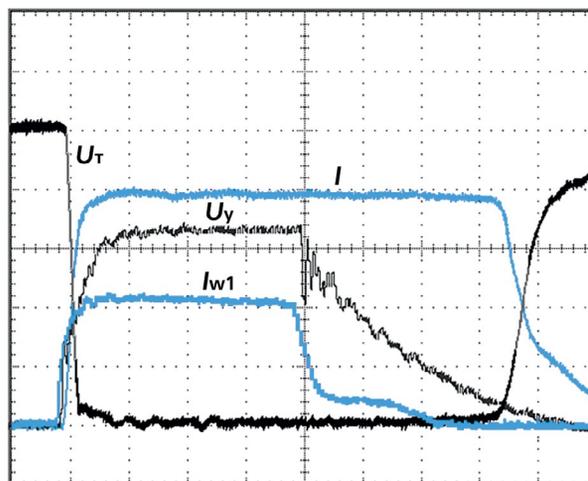


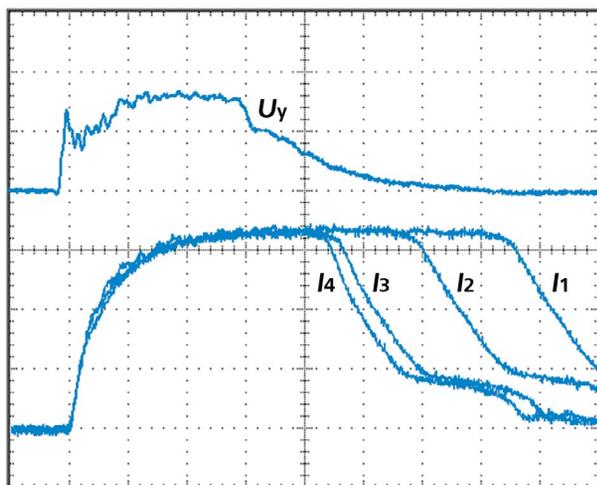
Рис. 2. Осциллограммы силового тока  $I$ , напряжения  $U_T$  на транзисторе  $T$ , напряжения  $U_y$  на затворе транзистора  $T$  и тока запуска  $I_{w1}$  в цепи управления. Масштабы по вертикали: тока  $I$  – 25 А/дел., напряжения  $U_T$  – 200 В/дел., напряжения  $U_y$  – 5 В/дел., тока  $I_{w1}$  – 10 А/дел., по горизонтали – 100 нс/дел.

сопротивлений  $R = 5$  Ом обеспечивала сравнительно малые потери энергии при формировании на затворах транзисторов  $T$  импульсов напряжения, необходимых для поддержания высокой проводимости, и она позволяла быстро разрядить емкости затворов в процессе выключения транзисторов.

Ниже описаны результаты исследований опытного генератора, в котором запускающий транзистор  $T_y$  и транзисторы  $T$  силового блока были выполнены в виде недорогих и доступных IGBT-транзисторов IRGPS60B120KDP с рабочим током 100 А и рабочим напряжением 1200 В.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты с транзисторными блоками, состоящими из произвольно выбранных транзисторов IRGPS60B120KDP, показали, что в условиях формирования субмикросекундных прямоугольных импульсов силового тока  $I$  транзисторы  $T$  выключаются практически синхронно, но с существенной задержкой относительно момента окончания тока запуска  $I_{w1}$ . При достигнутой скорости нарастания силового тока (около 2.5 кА/мкс) малые потери энергии при включении  $T$  обеспечивались, когда амплитуда импульсов тока  $I_{w2}$  через вторичные обмотки  $Tr$  превышала 5 А. С целью уменьшения амплитуды тока в цепи  $C_y-R_y-T_y$



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения  $U_y$  на затворе IRG4PF50WD и токов  $I_1$ – $I_4$  через транзисторный блок. Масштабы по вертикали: токов  $I_1$ – $I_4$  – 15 А/дел., напряжения  $U_y$  – 10 В/дел., по горизонтали – 40 нс/дел.

трансформаторы  $Tr$  были выполнены с небольшим коэффициентом трансформации ( $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 3$ ). Площадь сечения сердечников  $Tr$  составляла примерно 40 мм<sup>2</sup>. Она позволяла формировать на затворах транзисторов прямоугольные импульсы напряжения, имеющие достаточную большую амплитуду и длительность до 1.5 мкс.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы, полученные в результате исследований опытного генератора при  $U_{C0} = 2$  кВ и  $R_0 = 20$  Ом. Здесь  $I_{w1}$  и  $I$  – осциллограммы тока в ЦУ и в силовой цепи,  $U_T$  и  $U_y$  – осциллограммы напряжения на нижнем транзисторе  $T$  и на его затворе.

Из представленных осциллограмм следует, что при протекании тока  $I = 100$  А напряжение  $U_T$  на транзисторе  $T$  мало. В процессе выключения  $T$  напряжение  $U_T$  нарастает плавно, что свидетельствует о синхронной работе транзисторной пары. В конце процесса выключения транзисторов  $T_y$  и  $T$  на кривых токов  $I_{w1}$  и  $I$  формируются характерные для IGBT-транзисторов участки с малой скоростью убывания, обусловленные носителями, накопленными при протекании силового тока. Длительность запускающего тока  $I_{w1}$  составляет около 450 нс. Она существенно меньше длительности тока  $I$ , так как после выключения  $T_y$  к затворам транзисторов  $T$  приложено напряжение  $U_y$ , которое плавно убывает в результате разряда их

емкостей через резисторы  $R$ . Поскольку используемые транзисторы IRG60B120KDP имеют большую рабочую площадь и, соответственно, большую емкость затворов, время убывания напряжения  $U_y$  до нуля составляет примерно 400 нс. Полученный результат показывает, что в рассмотренной схеме мощные транзисторы IRG60B120KDP практически не могут обеспечить длительность тока  $I$  менее 400 нс.

В связи с этим было проведено сравнительное исследование опытного генератора при замене IGBT-транзисторов IRG60B120KDP на IGBT-транзисторы IRG4PF50WD с рабочим напряжением 900 В и паспортным значением силового тока 50 А, которые имели примерно в два раза меньшую емкость затвора.

Эксперименты проводились при использовании ранее рассмотренной цепи управления с сопротивлением  $R_0 = 30$  Ом. Амплитуда силового тока регулировалась до 50 А. Максимальное напряжение зарядки конденсаторов  $C_y$  и  $C_0$  составляло 800 В и 1.6 кВ.

На рис. 3 приведены осциллограммы импульсов тока  $I_1$  –  $I_4$  через блок из двух последовательно соединенных транзисторов IRG4PF50WD и напряжения  $U_y$  на затворе нижнего транзистора. Они получены при одинаковой длительности запускающего тока (около 100 нс) и разных значениях сопротивлений  $R$  и токов  $I_{w2}$ .

Осциллограммы  $I_1$ ,  $I_2$  соответствуют экспериментам при значениях тока  $I_{w2} = 8$  А и сопротивлений  $R = 10$  Ом и 5 Ом. Они показывают, что длительность силового тока можно уменьшать путем уменьшения сопротивления  $R$ . Поскольку очень малая величина  $R$  обуславливает чрезмерное увеличение тока в ЦУ, использование сопротивления менее 5 Ом представляется нежелательным. Осциллограммы  $I_2$ ,  $I_3$  и  $I_4$  получены при  $R = 5$  Ом и токах  $I_{w2}$  с амплитудами 8, 6 и 5 А. Из них следует, что длительность силового тока может быть уменьшена в результате уменьшения амплитуды токов  $I_{w2}$ . Осциллограмма  $U_y$  иллюстрирует напряжение на затворе IRG4PF50WD при  $R = 5$  Ом и  $I_{w2} = 5$  А. Она свидетельствует о том, что при таком сравнительно малом токе  $I_{w2}$  время нарастания напряжения на затворе  $T$  до паспортного значения (около 17 В) составляет примерно 70 нс. Полученный результат показывает нецелесообразность использования импульсов тока  $I_{w1}$

с длительностью менее 100 нс, так как при этом напряжение на затворе транзистора Т может не достигнуть пороговой величины, необходимой для его включения.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что в схеме на рис. 1 при использовании IGBT-транзисторов IRG4PF50WD минимальная длительность силового тока ограничена на уровне около 200 нс.

В рассмотренном опытном генераторе при тех же параметрах импульсов тока запуска транзисторов минимальная длительность силового тока была уменьшена до 110 нс, когда в качестве  $T_y$  и Т были использованы MOSFET-транзисторы C2M0160120D на основе карбида кремния (SiC). Они имели большее, по сравнению с IRG4PF50WD, рабочее напряжение (1200 В) и в 3 раза меньшую емкость затвора. Основными недостатками транзисторов C2M0160120D являлись высокая стоимость и сравнительно малое паспортное значение силового тока (20 А). Кроме того, вследствие малой длительности процесса выключения на SiC-транзисторах  $T_y$  и Т возникали опасные всплески напряжения, обусловленные высокой скоростью изменения тока через монтажные индуктивности цепи управления и силовой цепи. Амплитуды этих всплесков были существенно уменьшены в результате увеличения сопротивлений  $R_2$  и  $R$ , определяющих время разряда емкостей затворов транзисторов  $T_y$  и Т. Так, увеличение сопротивления  $R_2$  с 1 до 5 Ом позволило примерно в 2 раза уменьшить амплитуду всплеска напряжения на  $T_y$  при его выключении. В результате увеличения сопротивления  $R$  с 5 до 10 Ом напряжение на транзисторе Т в процессе его выключения не превышало величину рабочего напряжения.

На рис. 4 приведены характерные осциллограммы силового тока  $I$  с амплитудой около 20 А и длительностью около 110 нс и напряжения  $U$  на блоке из двух последовательно соединенных транзисторов C2M0160120D. Они получены при использовании сопротивления  $R_0$ , равного примерно 100 Ом, и импульсов тока  $I_{w2}$  с амплитудой примерно 5 А.

Рассмотренная цепь управления на основе конденсатора  $C_y$ , заряженного до сравнительно большого напряжения (сотни вольт), и сопротивления  $R_y$ , значительно превышающего

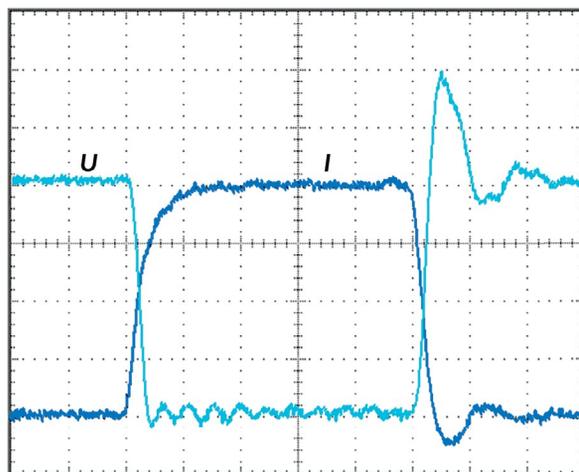
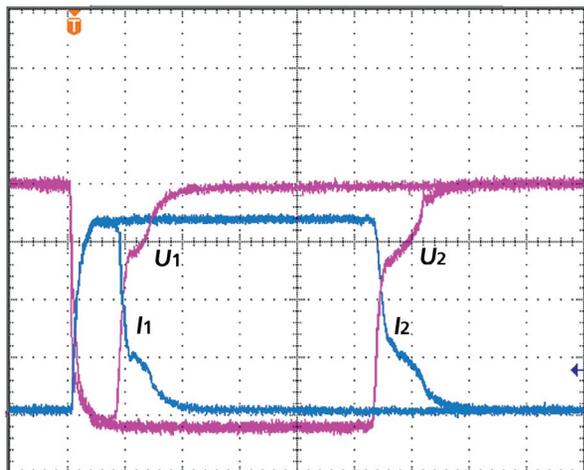


Рис. 4. Осциллограммы силового тока  $I$  и напряжения  $U$  на блоке SiC-транзисторов. Масштабы по вертикали: тока – 5 А/дел, напряжения – 500 В/дел, по горизонтали – 20 нс/дел.

суммарное сопротивление цепей, подключенных ко вторичным обмоткам запускающих трансформаторов, позволяет обеспечить слабую зависимость параметров импульсов тока  $I_{w2}$  от количества транзисторов Т. В результате создается возможность разработки высоковольтных генераторов с коммутаторами, состоящими из большого количества последовательно соединенных транзисторов.

Ниже приведены результаты исследований такого генератора с рабочим напряжением 8 кВ. В нем использовался коммутатор на основе десяти последовательно соединенных IGBT-транзисторов IRG4PF50WD, смонтированный на печатной плате. Транзисторы и запускающие трансформаторы располагались на минимальном расстоянии друг от друга, обеспечивающем напряженность поля не более 2 кВ/мм. Первичные обмотки трансформаторов были выполнены в виде провода с фторопластовой изоляцией, который пропусклся по центру кольцевых сердечников трансформаторов, расположенных вдоль одной оси.

При исследовании генератора на частоте 2 кГц была получена коммутация в нагрузку  $R_0 = 150$  Ом прямоугольных импульсов тока с амплитудой до 50 А, имеющих длительность фронта и спада примерно 50 нс. Длительность тока  $I$  плавно регулировалась в диапазоне (200–1000) нс. При проведении экспериментов в цепи управления и в цепях вторичных обмоток



**Рис. 5.** Осциллограммы силовых токов  $I_1$ ,  $I_2$  и напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  на блоке IGBT-транзисторов IRG4PF50WD. Масштабы по вертикали: токов  $I_1$ ,  $I_2$  — 15 А/дел., напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  — 2 кВ/дел., по горизонтали — 200 нс/дел.

трансформаторов использовались резисторы  $R_y = 50$  Ом и  $R = 5$  Ом. Токи  $I_{w2}$ , протекающие через вторичные обмотки запускающих трансформаторов, имели амплитуду 5 А.

На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов силового тока (кривые  $I_1$ ,  $I_2$ ) с минимальной и максимальной длительностями и соответствующие этим импульсам осциллограммы напряжения на блоке транзисторов Т (кривые  $U_1$ ,  $U_2$ ).

В рассмотренном генераторе величина предельно допустимого выходного напряжения определяется количеством последовательно соединенных транзисторов и электрической прочностью межобмоточной изоляции запускающих трансформаторов. Поскольку при

соответствующем выборе сопротивления резистора  $R_y$  и напряжения зарядки конденсатора  $C_y$  разработанная ЦУ позволяет эффективно управлять десятками последовательно соединенных транзисторов, а допустимая напряженность поля в современных изоляционных материалах составляет десятки кВ/мм, выходное напряжение может быть увеличено до (30–35) кВ без существенного изменения конструкции генератора. При устранении доступа атмосферного воздуха путем помещения силовых элементов генератора в изолирующую среду реальной представляется разработка аналогичных транзисторных генераторов с выходным напряжением более 100 кВ.

#### 4. ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности создания генераторов с выходным напряжением десятки киловольт на основе малогабаритных транзисторных коммутаторов, способных на килогерцевой частоте формировать в резистивной нагрузке прямоугольные импульсы тока с субмикросекундной длительностью, имеющие амплитуду десятки ампер и времена нарастания и убывания менее 50 нс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Рольник И.А., Степанянц А.Л. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 102.
2. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816216020099>
3. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 42.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816218010202>