

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 621.373.5

**ТРАНЗИСТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ
ИМПУЛЬСОВ С СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ**

©2023г. С. В. Коротков^{а,*}, А. Л. Жмодиков^а, Д. А. Коротков^а

*^аФизико-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.

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 этой связи 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 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 $16 \times 9.6 \times 6.3$ мм³. 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 $U_{вх}$ 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 Tr 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 Т до напряжения включения. Амплитуда импульсов напряжения на затворах ограничивается на допустимом уровне стабилитронами D. После включения Т 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 Т 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 Т уменьшается в результате разряда их собственных емкостей через резисторы R. Транзисторы Т выключаются, когда величина напряжения U_y становится меньше порогового значения. В процессе выключения Т 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 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 T_r превышала 5 А. С целью уменьшения амплитуды тока в цепи C_y - R_y - T_y трансформаторы T_r были выполнены с небольшим коэффициентом трансформации ($w_1=1$, $w_2=3$). Площадь сечения сердечников T_r составляла примерно 40 мм². Она позволяла формировать на затворах транзисторов прямоугольные импульсы напряжения, имеющие достаточную большую амплитуду и длительность до 1.5 мкс.

Рис. 2

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 IRGPS60B120KDP 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 IRGPS60B120KDP практически не могут обеспечить длительность тока I менее 400 нс.

В этой связи было проведено сравнительное исследование опытного генератора при замене IGBT-транзисторов IRGPS60B120KDP 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.

Рис. 3

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 увеличения 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 T 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 T 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 T 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 T . 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 T в процессе его выключения не превышало величину рабочего напряжения.

Рис. 4

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 суммарное сопротивление цепей, подключенных ко вторичным обмоткам запускающих трансформаторов, позволяет обеспечить слабую зависимость параметров импульсов тока I_{w2} от количества транзисторов T . 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 пропускаться 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 трансформаторов использовались резисторы $R_y=50$ Ом и $R=5$ Ом. Токи I_{w2} , протекающие через вторичные обмотки запускающих трансформаторов, имели амплитуду 5 А.

Рис. 5

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

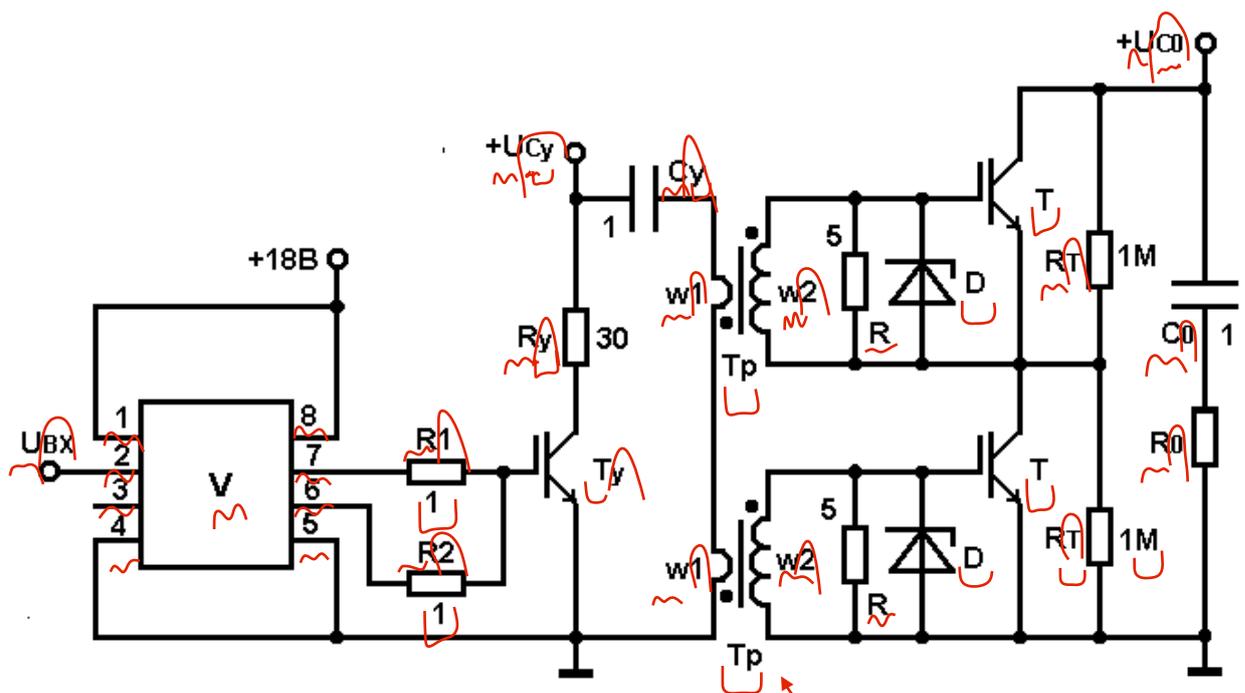
Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности создания генераторов с выходным напряжением десятки киловольт на основе малогабаритных транзисторных коммутаторов, способных на килогерцевой частоте формировать в резистивной нагрузке прямоугольные импульсы тока с субмикросекундной 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., Моикунов С. И., Хомич В. Ю., Шериунова Е. А.* // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71. DOI: 10.7868/S0032816216020099
3. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 42. DOI: 10.7868/S0032816218010202

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Электрическая схема опытного генератора: D – BZV55C15; Тр: $w_1=1$, $w_2=3$ (сердечник – феррит №87 фирмы Ersos с размерами $16 \times 9.6 \times 12.6$ мм³); V – MIC4452.
- Рис. 2.** Осциллограммы силового тока I , напряжения U_T на транзисторе Т, напряжения U_y на затворе транзистора Т 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.
- 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.
- 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.
- 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.



~ курсив

┌ прямо

Рис.1.

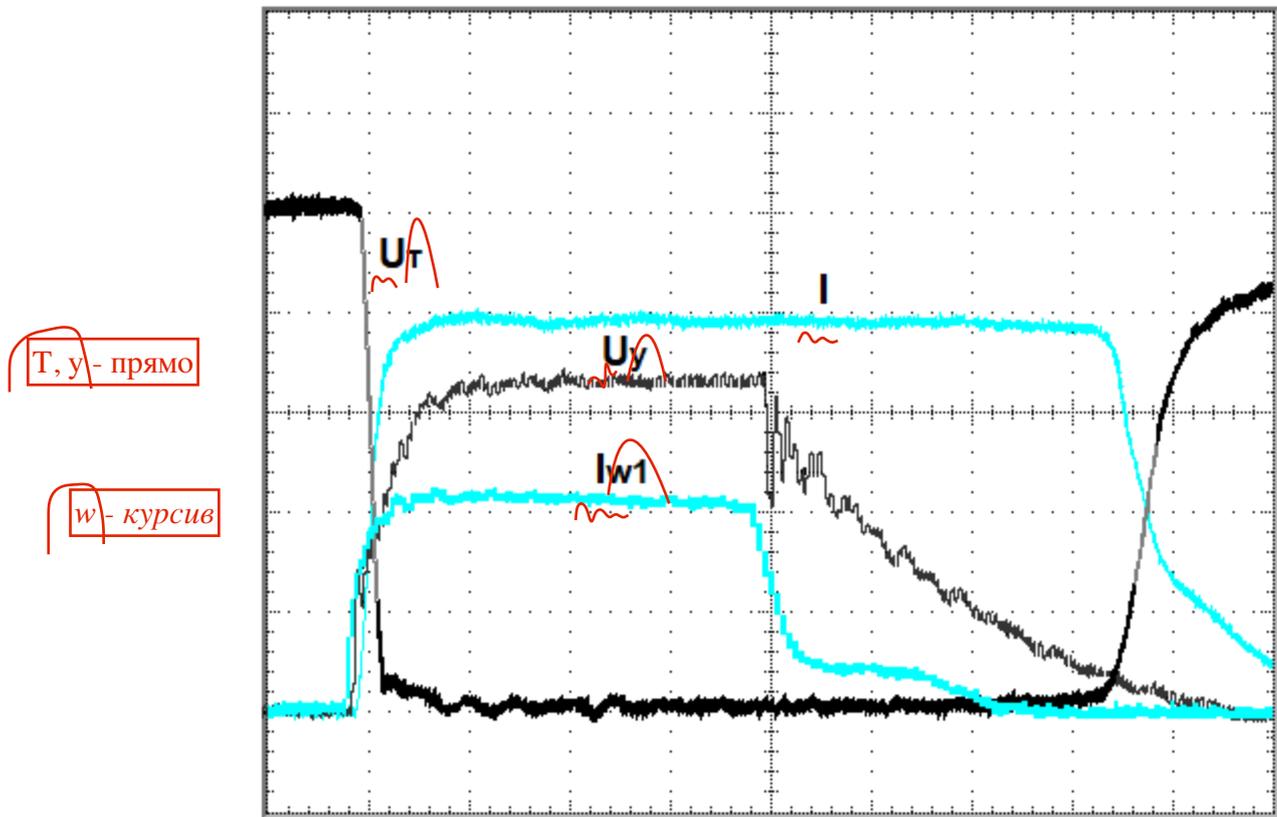


Рис.2.

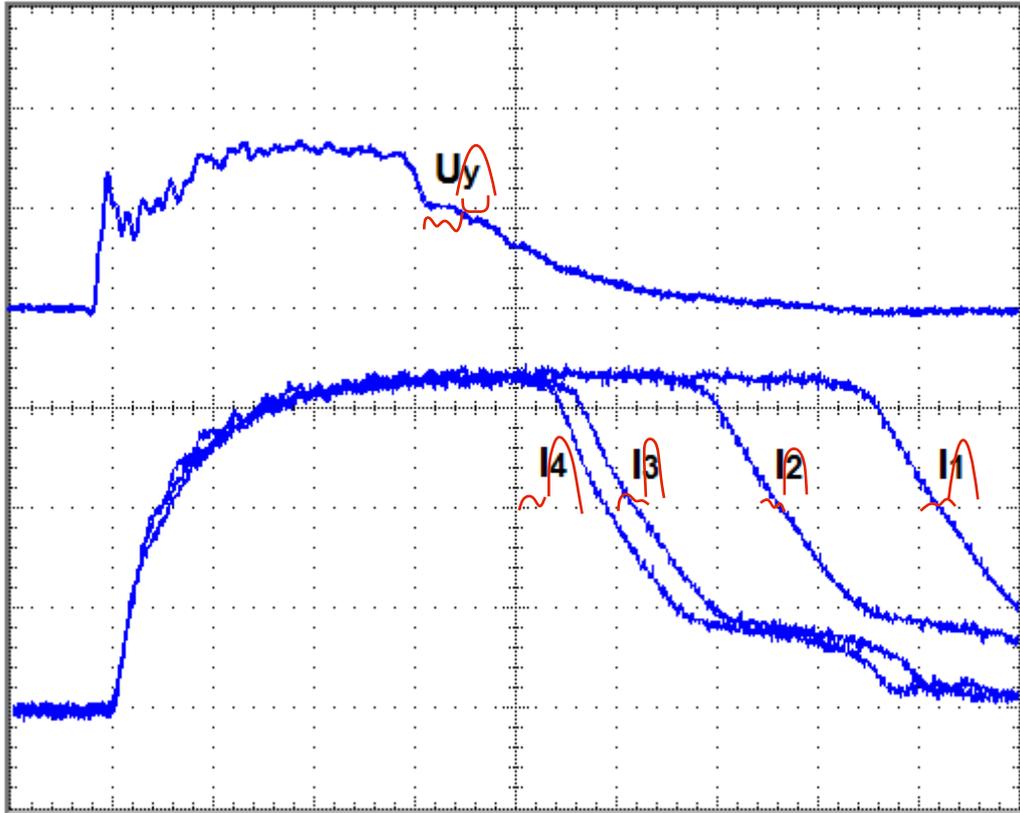


Рис.3.

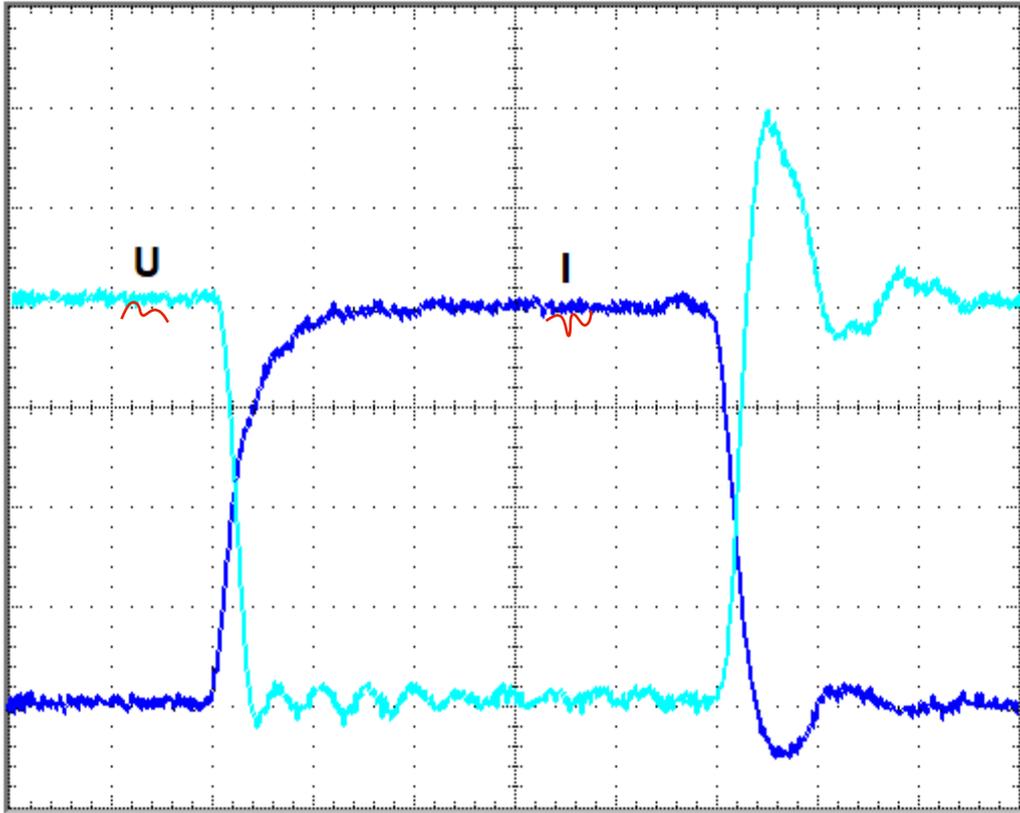


Рис.4.

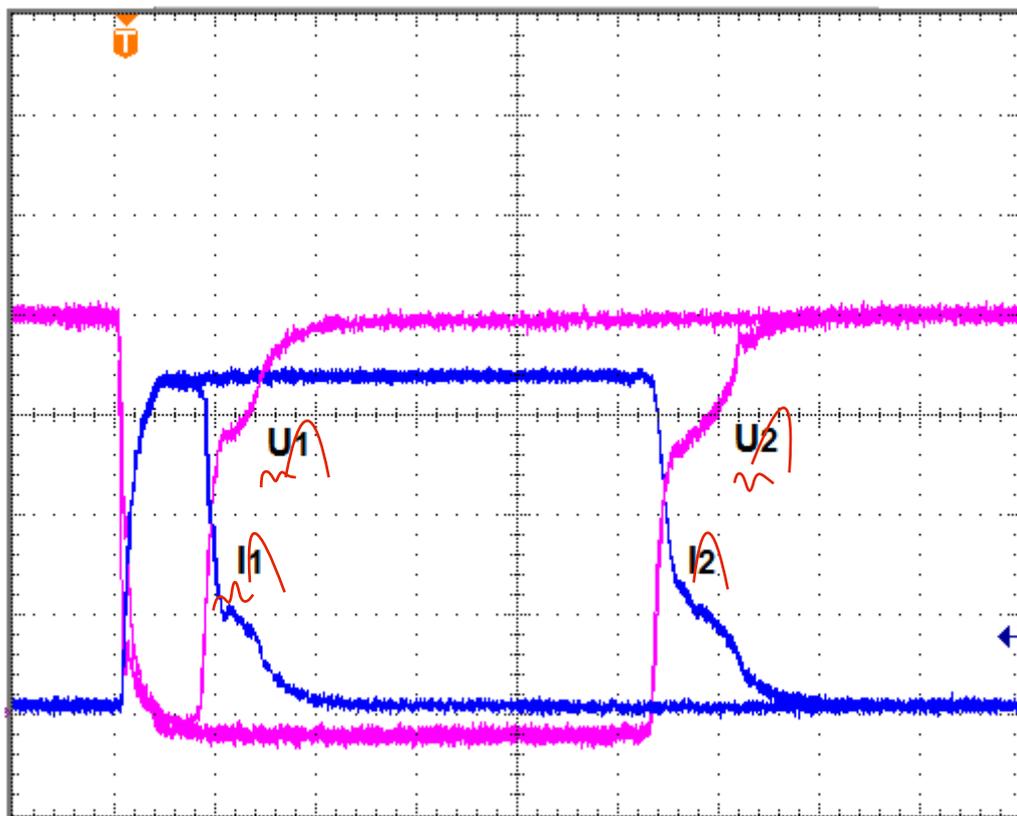


Рис.5.

Для связи с авторами:

Коротков Сергей Владимирович

(812)297-49-25 (сл.)

(812)297-10-01 (дом.)

8-901-305-84-71 (моб.)

E-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

E-mail: korotkov.kara@yandex.ru

Для переводчика:

Transistor generators of high power rectangular pulses with submicrosecond duration

Аннотация:

The results of comparative studies of generators of high power pulses with rectangular shape are presented. The switch in these generators is made in the form of a transistor block with a transformer control circuit. A block consisting of ten transistors connected in series is described, which is able to commutate into a load of 150 Ω rectangular current pulses with an amplitude of 50 A, a duration of up to 1 μ s, and a rise and fall times of less than 50 ns at a repetition rate of 2 kHz. The possibility of increasing the switched power by increasing the power voltage up to tens of kV is determined.