

## ТИРИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР МИКРОСЕКУНДНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2021 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 РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

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

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 05.01.2021 г.

Принята к публикации 08.01.2021 г.

Рассмотрен генератор импульсов напряжения прямоугольной формы с амплитудой ~30 кВ, фронтом ~1.5 мкс и длительностью до 10 мкс, содержащий повышающий импульсный трансформатор, а также тиристорные коммутаторы с низким и высоким рабочим напряжением, формирующие, соответственно, фронт и спад выходного импульса. Показана возможность генерирования с частотой 1 кГц объемных разрядов в реакторе барьерного типа, предназначенном для проведения биологических исследований.

DOI: 10.31857/S0032816221030290

В современных импульсных технологиях, основанных на использовании низкотемпературной плазмы, необходимо формировать стабилизированные по току объемные разряды с микросекундной длительностью. Для их генерации необходимы высоковольтные прямоугольные импульсы высокого напряжения. Достаточно высокая надежность плазменных реакторов достигается при использовании межэлектродных диэлектрических барьеров, емкость которых стабилизирует процесс развития разряда.

Так как емкость барьерного реактора ограничивает выходной ток генератора после ее зарядки, то высокая эффективность работы генератора может быть получена при использовании двух коммутаторов: первый обеспечивает зарядку барьерной емкости реактора (фронт импульса), а второй разряд этой емкости (спад импульса). В [1, 2] такой режим обеспечивали генераторы на основе высоковольтного емкостного накопителя с частичным разрядом и двух коммутаторов в виде блоков последовательно соединенных транзисторов, которые выключались при малом токе. Основной проблемой при их использовании является возможность пробоя барьерного реактора. В этом случае через первый блок транзисторов будет протекать очень большой ток разряда высоковольтного накопителя.

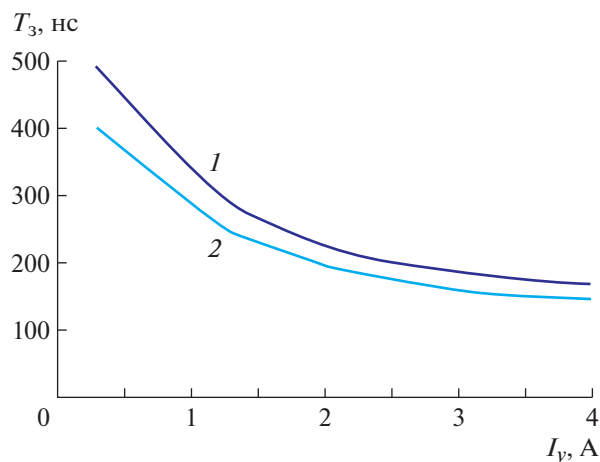
По нашему мнению, для питания устройств с небольшой мощностью, предназначенных для проведения исследовательских работ, достаточ-

ный интерес могут представлять тиристорные генераторы высоковольтных прямоугольных импульсов, в которых не производится обрыв тока нагрузки. Основным достоинством таких генераторов является высокая надежность и простота.

В данной статье описан тиристорный генератор, способный на частоте 1 кГц формировать прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой ~30 кВ, фронтом ~1.5 мкс и длительностью до 10 мкс, инициирующие разряды в реакторе барьерного типа, предназначенном для проведения биологических исследований.

Генератор выполнен на основе малогабаритных тиристоров 40TPS12 с размером 20 × 15 × 5 мм. Он содержит низковольтный емкостный накопитель энергии, который с помощью тиристора быстро разряжается через первичную обмотку трансформатора с большим коэффициентом трансформации. Ток вторичной обмотки обеспечивает быструю зарядку емкости барьерного реактора через блок отсекающих диодов. После окончания процесса зарядки блок диодов препятствует разряду барьерной емкости. В результате напряжение на реакторе не изменяется до момента включения шунтирующего блока последовательно соединенных тиристоров.

В процессе разработки генератора были исследованы электрические характеристики тиристоров 40TPS12 в режиме коммутации мощных импульсов тока с фронтом несколько сотен наносе-



**Рис. 1.** Зависимости времени задержки включения тиристора  $T_3$  (1 – максимального, 2 – минимального) от тока управления  $I_y$ .

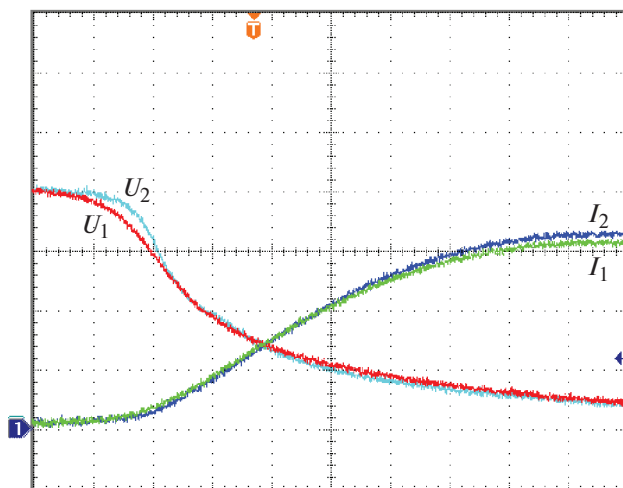
кунд, которые не указаны в техническом паспорте этих приборов.

Рис. 1 иллюстрирует результаты экспериментов по определению зависимостей времени задержки включения 40TPS12 ( $T_3$ ) от тока управления  $I_y$ , полученные при исследовании 50 тиристоров. В экспериментах тиристоры переключались короткими быстро нарастающими импульсами тока управления с фронтом  $\sim 400$  нс и длительностью  $\sim 4$  мкс. Графики кривых 1, 2 соответствуют тиристорам с наибольшей и наименьшей задержкой включения. Величина  $T_3$  определялась интервалом между моментом коммутации в тиристор тока управления  $I_y$  и моментом, когда силовой ток  $I$ , нарастающий со скоростью  $\sim 0.5$  А/нс, достигал величины 10 А.

Графики свидетельствуют о том, что разброс задержек включения исследуемых тиристоров уменьшается при увеличении тока управления и при  $I_y > 2$  А становится очень мал ( $< 30$  нс). Полученный результат определяет высокие перспективы для надежной работы последовательно соединенных 40TPS12 при достаточно мощном запуске, устраняющем перенапряжения на отстающих тиристорах.

На рис. 2 приведены осциллограммы падения напряжения ( $U_1, U_2$ ) на блоке из двух последовательно соединенных тиристоров, представленных графиками на рис. 1. Они получены при коммутации быстро нарастающих импульсов силового тока ( $I_1, I_2$ ) при токе управления тиристоров с амплитудой 400 мА и 2 А.

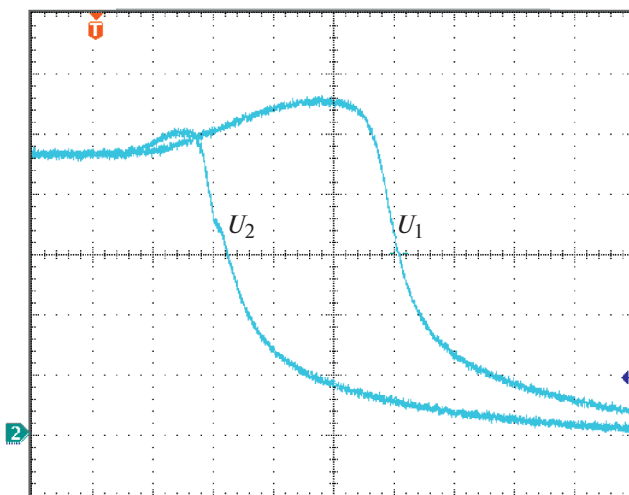
Как видно из осциллограмм, тиристоры 40TPS12 позволяют за время менее 400 нс эффективно коммутировать ток  $I$  с амплитудой  $\sim 200$  А. Увеличение тока управления приводит к уменьшению



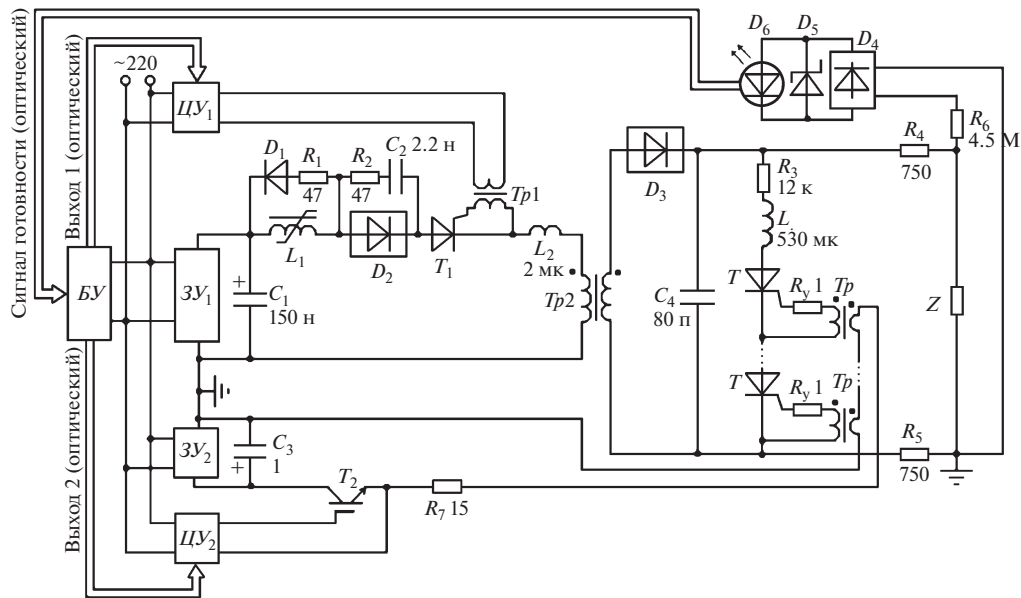
**Рис. 2.** Осциллограммы падений напряжений и тока через тиристоры 40TPS12 при токе управления 400 мА ( $U_1, I_1$ ) и 2 А ( $U_2, I_2$ ). Масштаб по вертикали: тока – 60 А/деление, напряжения – 500 В/деление; по горизонтали – 40 нс/деление.

коммутационных потерь энергии и к увеличению амплитуды тока  $I$ .

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на отстающем тиристоре в исследуемом блоке при токе управления 400 мА ( $U_1$ ) и 2 А ( $U_2$ ). Они показывают малую величину всплеска напряжения при  $I_y = 2$  А, что определяет целесообразность использования такого тока при переключении последовательно соединенных 40TPS12.



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения на отстающем тиристоре в блоке последовательно соединенных 40TPS12 при токе управления 400 мА ( $U_1$ ) и 2 А ( $U_2$ ). Масштаб по вертикали 200 В/деление, по горизонтали – 100 нс/деление.



**Рис. 4.** Электрическая схема генератора.  $T_1$  – 40TPS12,  $T_2$  – IRGPS60B120KD,  $T$  – 40TPS12 (30 последовательно);  $D_1$  – HER508,  $D_2$  – 60EPF12 (2 последовательно),  $D_3$  – HER308 (50 последовательно),  $D_4$  – W005M,  $D_5$  – 1N4732A,  $D_6$  – HF-BR-1522Z;  $Tp$  – феррит N87 16 × 9.6 × 6.3 мм,  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 5$ ;  $Tp1$  – феррит N87 16 × 9.6 × 6.3 мм,  $w_1 = w_2 = 5$ ;  $Tp2$  – феррит N87 102 × 65.8 × 30 мм,  $w_1 = 4$ ,  $w_2 = 140$ ;  $L_1$  – феррит N87 20 × 10 × 7 мм,  $w = 20$ .

На рис. 4 приведена электрическая схема тиристорного генератора, предназначенного для питания барьерного реактора  $Z$  специальной конструкции, обеспечивающей обработку низкотемпературной плазмой клеток или живых организмов. Реактор имел дисковые электроды, к которым примыкали диэлектрические барьеры. При приложении высокого напряжения в промежутке между барьерами инициировался объемный разряд. Диэлектрическими барьерами являлась кварцевая пластина толщиной 0.5 мм (на высоком потенциале) и донце чашечки Петри, в которую помещались исследуемые объекты. Электроды имели диаметр до 20 мм. Межэлектродное расстояние составляло ~2 мм.

В схеме на рис. 4 фронт напряжения на реакторе  $Z$  формируется при включении тиристора  $T_1$ , спад – при включении тиристорov  $T$ . Включение  $T_1$ ,  $T$  производится с помощью малогабаритных трансформаторов  $Tp1$ ,  $Tp$ , обеспечивающих протекание токов управления с длительностью до 4 мкс.

При подключении сетевого напряжения ~220 В осуществляется зарядка конденсаторов  $C_1$  и  $C_3$  до напряжения 1 кВ и 150 В соответственно. По сигналу с блока управления БУ включается цепь управления  $ЦУ_1$ , которая формирует ток управления тиристора  $T_1$  с амплитудой ~1 А. При включении  $T_1$  происходит зарядка конденсатора  $C_4$  за время ~1.5 мкс. Ток зарядки протекает через вторичную обмотку повышающего трансформатора

$Tp2$  и сборку последовательно соединенных диодов  $D_3$ . Напряжение зарядки  $C_4$  прикладывается к блоку тиристорov  $T$ . Так как время зарядки мало, то напряжение на тиристорах определяется величинами емкостей их полупроводниковых структур, которые примерно одинаковы благодаря высокой точности современной технологии изготовления. Поэтому в тиристорном блоке не используются традиционные статические делители напряжения.

После зарядки до максимального напряжения конденсатор  $C_4$  пытается разрядиться. При этом через  $T_1$  быстро нарастает обратный ток. Диод  $D_2$  имеет очень малое время выключения и устраняет возможность приложения к  $T_1$  обратного напряжения. Дроссель  $L_1$  и цепи  $R_1-D_1$ ,  $R_2-C_2$  устраняют перенапряжения на  $D_2$  в момент его выключения. На рис. 5 приведены осциллограммы тока  $I$  через тиристор  $T_1$  и напряжения  $U_D$  на диоде  $D_2$ .

Одновременно с зарядкой  $C_4$  заряжается емкость  $C_Z$  реактора  $Z$  ( $C_Z \ll C_4$ ). После зарядки  $C_4$ ,  $C_Z$  до максимального напряжения (~30 кВ) сборка последовательно соединенных диодов  $D_3$  блокирует это напряжение. В результате напряжение на реакторе практически не изменяется до момента включения тиристорov  $T$ .

После того, как напряжение на реакторе  $U_Z$  нарастает до величины >10 кВ, оптопередатчик  $D_6$  передает в блок управления БУ разрешающий сигнал готовности. При наличии сигнала готов-

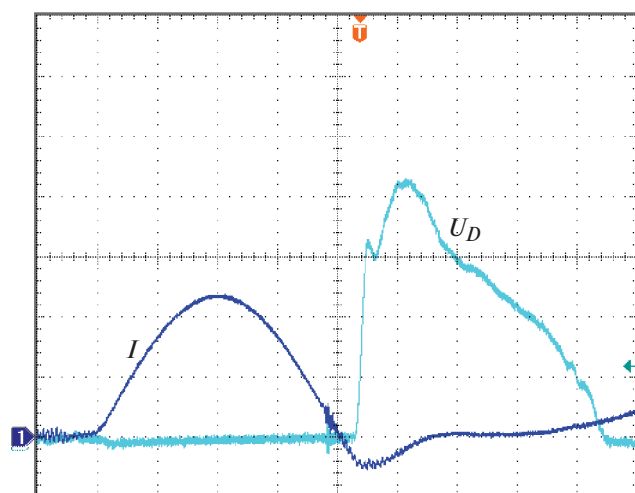


Рис. 5. Осциллограммы тока ( $I$ ) через тиристор  $T_1$  и напряжения ( $U_D$ ) на диоде  $D_2$ . Масштаб по вертикали: тока — 50 А/деление, напряжения — 200 В/деление; по горизонтали — 400 нс/деление.

ности БУ включает цепь управления  $ЦУ_2$  с заданной задержкой относительно момента зарядки  $C_Z$  до максимального напряжения. Эта задержка определяет длительность плоской части импульса напряжения  $U_Z$ .

Цепь  $ЦУ_2$  осуществляет включение транзистора  $T_2$ , который обеспечивает быстрый разряд конденсатора  $C_2$ . Ток разряда ( $\sim 10$  А) протекает через резистор  $R_7$  и одновитковые первичные обмотки трансформаторов  $Tr$ . В результате во вторичные обмотки  $Tr$  коммутируются токи управления тиристоров  $T$ . Так как сопротивление резистора  $R_7$  достаточно велико, то амплитуды этих токов ( $\sim 2$  А) определяются фактически только коэффициентом трансформации  $Tr$ . При включении тиристоров  $T$  по цепи  $R_3-L_3$  протекает ток разряда  $C_4$ . В результате напряжение на барьерном реакторе спадает до нуля за время  $\sim 4$  мкс. Высокая амплитуда и скорость нарастания токов управления обеспечивают малый разброс моментов включения тиристоров  $T$  и высокую надежность их работы.

Если по каким-то причинам (пробой барьерного реактора, короткое замыкание в выходной цепи генератора) напряжение на реакторе не достигает высокого уровня, то  $D_6$  не вырабатывает сигнал готовности. В результате блок управления БУ не включает цепь  $ЦУ_2$  и останавливает работу генератора.

Кольцевые сердечники трансформаторов  $Tr$  расположены соосно. Вторичные обмотки  $Tr$  намотаны тонким высоковольтным проводом и равномерно размещены по поверхности сердечников. Одновитковые первичные обмотки  $Tr$  выполнены в виде провода с силиконовой изоляцией, ко-

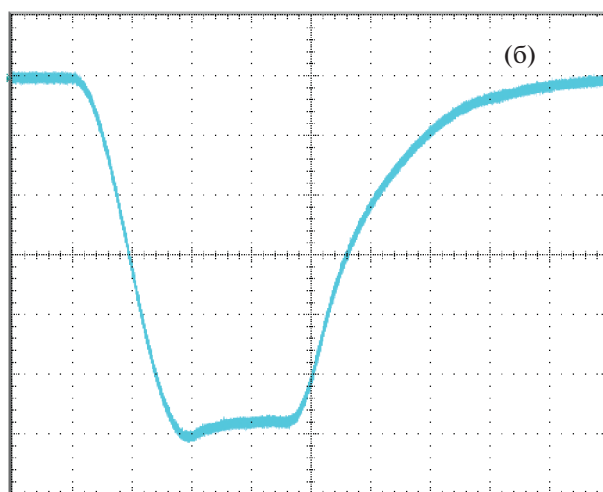
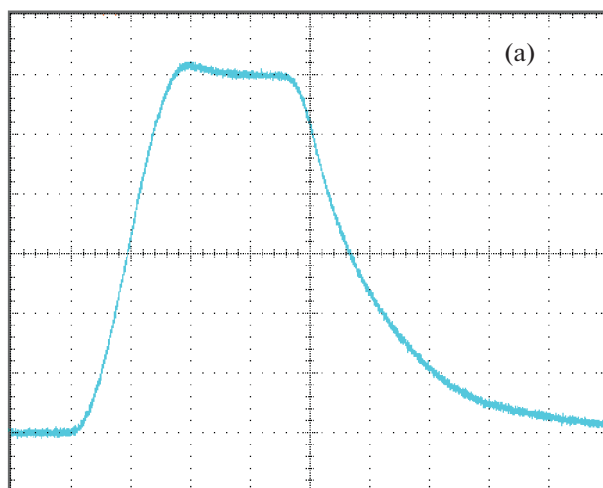


Рис. 6. Осциллограммы импульсов напряжения на реакторе  $Z$  с положительной (а) и отрицательной (б) полярностью. Масштаб по вертикали 5 кВ/деление, по горизонтали — 1 мкс/деление.

торый помещен в фторопластовую трубку, продев ее через сердечники по их оси. Высокая изоляционная прочность такой конструкции исключает пробой межобмоточных промежутков в  $Tr$ .

В схеме на рис. 4 импульсы напряжения на реакторе имеют положительную полярность. В разработанном генераторе полярность импульсов выходного напряжения может изменяться путем изменения монтажа токопроводов цепи вторичной обмотки  $Tr_2$ . Конструкция этой цепи обеспечивает изменение полярности при использовании одних и тех же токопроводов.

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов напряжения на барьерном реакторе  $Z$  с положительной (рис. 6а) и отрицательной (рис. 6б) полярностью. Они соответствуют реактору с диаметром электродов 10 мм. Представленные импульсы напряжения получены на частоте 1 кГц и имеют ам-

плитуду  $\sim 30$  кВ. Небольшие отличия в форме кривых обусловлены изменением емкости элементов цепи вторичной обмотки  $Tr2$  на землю при изменении монтажа токопроводов.

Генератор был исследован при использовании реакторов с диаметром электродов от 5 до 20 мм. Так как емкость конденсатора  $C_4$  значительно превышает емкость реакторов с такими размерами электродов, то в процессе экспериментов форма и амплитуда импульсов выходного напряжения практически не изменялась. Генератор

был успешно испытан в режиме, когда реактор  $Z$  был закорочен.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малашин М.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71. <https://doi.org/10.7868/S0032816216020099>
2. Гаируллин М.Д., Курачий А.П., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Чернышев С.Л., Ямщиков В.А. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 95.