

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ТИРИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА С СУБМИКРОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ

© 2021 г. С. В. Коротков^{а,*}, А. Л. Жмодиков^а, Д. А. Коротков^а

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

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

Поступила в редакцию 06.01.2021 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 13.01.2021 г.

Рассмотрен мощный генератор на основе малогабаритных тиристорных ТБ133-250-24, содержащий 4 тиристорных модуля с рабочим напряжением 24 кВ. Определены параметры импульсов управления и защитных цепей, обеспечивающие малые коммутационные потери энергии в последовательно соединенных тиристорах и отсутствие опасных перенапряжений при их включении. Приведены результаты испытаний генератора: на частоте 10 Гц он способен коммутировать микросекундные импульсы тока с амплитудой 12 кА и фронтом 0.8 мкс. Показана возможность масштабирования полученных результатов.

DOI: 10.31857/S0032816221030319

Современные тиристоры могут эффективно коммутировать мощные импульсы тока микросекундной длительности даже при небольшом размере полупроводниковых структур. Так, импульсные тиристоры специальной конструкции [1, 2] с площадью структур $\sim 1 \text{ см}^2$ способны за время $\sim 1 \text{ мкс}$ коммутировать ток с амплитудой несколько килоампер.

Ниже приведены результаты исследований коммутатора микросекундных импульсов тока с рабочим напряжением 24 кВ, выполненного на основе блока из 14 последовательно соединенных малогабаритных тиристорных ТБ133-250-24 с диаметром структур 30 мм, серийно выпускаемых в ЗАО «Протон-электротекс» (Россия, г. Орёл).

При разработке коммутатора были определены параметры импульсов управления, обеспечивающие малые потери энергии в тиристорах и малый разброс моментов их включения, необходимый для устранения опасных перенапряжений на отстающих тиристорах в блоке. При исследовании 50 тиристорных ТБ133-250-24 в режиме коммутации мощных микросекундных импульсов тока было установлено, что падение напряжения в первые моменты после их переключения и разброс моментов переключения монотонно уменьшаются при увеличении амплитуды и скорости нарастания тока управления I_y . В процессе экспериментов было показано, что при использовании тока управления с фронтом $\sim 300 \text{ нс}$ коммутационные потери энергии в тиристорах стабилизируются

на минимальном уровне при длительности тока управления $> 2 \text{ мкс}$ и амплитуде $I_y > 3 \text{ А}$. Величина разброса моментов включения достигала минимального значения ($\sim 80 \text{ нс}$) при $I_y \sim 6 \text{ А}$.

Электрическая схема стенда для исследования высоковольтного тиристорного коммутатора приведена на рис. 1. Для переключения тиристорных T_1-T_{14} использовалась описанная в [3] запускающая цепь, содержащая блок управления БУ и малогабаритные повышающие трансформаторы Tr с высокой электрической прочностью межобмоточной изоляции. Ее основными достоинствами являются достаточно высокое напряжение зарядки конденсатора C_k ($U_k = 800 \text{ В}$) и малые коммутационные потери энергии в запускающем транзисторе T_k .

Большая величина U_k позволяет при сравнительно большой индуктивности трансформаторных цепей обеспечить требуемую для эффективного переключения тиристорных высокую скорость нарастания тока управления и использовать в цепи разряда C_k резистор R_k с достаточно большим сопротивлением, определяющим пренебрежимо малое влияние входных цепей тиристорных T_1-T_{14} на процесс формирования импульсов тока I_y . Благодаря использованию мощной цепи управления ЦУ с выходным током 5 А транзистор T_k обеспечивал коммутацию в одновитковые первичные обмотки трансформаторов Tr короткого ($\sim 5 \text{ мкс}$) тока с амплитудой $\sim 30 \text{ А}$ и фронтом $\sim 300 \text{ нс}$. При этом через вторичные обмотки Tr протекали токи

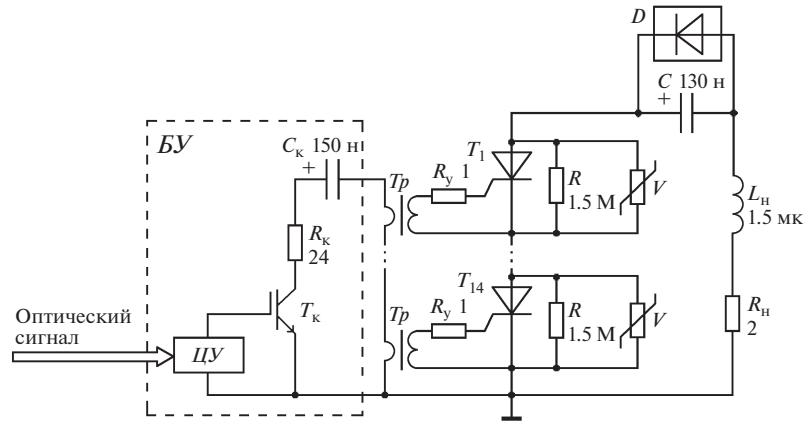


Рис. 1. Схема стенда для исследования высоковольтного тиристорного коммутатора. БУ – блок управления, ЦУ – цепь управления; T_k – IRGPS60B120KD, T_1 – T_{14} – ТБ133-250-24; D – 60EPF12 (24 последовательно); V – 14N102K (2 последовательно); Tp – феррит Epcos N87 $16 \times 9.6 \times 6.3$ мм, $w_1 = 1$, $w_2 = 5$.

управления с амплитудой ~ 6 А. Варисторы V ограничивали величины всплесков напряжения на тиристорах, обусловленных неодновременным включением.

При включении блока тиристоров T_1 – T_{14} силовой конденсатор C разряжался по цепи L_n – R_n . Блок диодов D исключал возможность его перезаряда. На рис. 2 приведены осциллограммы тока I (~ 4 кА), протекающего через тиристорный блок при напряжении зарядки силового конденсатора 24 кВ, и падения напряжения U на тиристоре T_{14} , который включался с задержкой ~ 50 нс после остальных тиристоров в блоке, подобранных так, что разброс моментов их включения не превышал

30 нс. Представленные осциллограммы свидетельствуют о неопасной для отстающего тиристора величине всплеска напряжения и о высоких коммутационных возможностях разработанного тиристорного коммутатора, которые определяют большие перспективы при его использовании.

На рис. 3 приведена схема мощного генератора, содержащего 4 силовых модуля с тиристорными коммутаторами T . Он предназначен для коммутации в индуктивную нагрузку L_n спаренных разнополярных импульсов высокого напряжения.

Выходные импульсы высокого напряжения формируются при разряде силовых конденсаторов C . Для зарядки C используется зарядное устройство ЗУ, выполненное по схеме [4]. В исходном состоянии конденсатор C_0 заряжен до напряжения ~ 300 В от сети 220 В, 50 Гц, конденсатор C_3 ($C_3 \ll C_0$) заряжен до напряжения 1 кВ током I_{L_0} , протекающим через индуктивность L_0 . При включении транзистора T_1 в первичную обмотку w_1 повышающего трансформатора Tp быстро коммутируется ток разряда конденсатора C_3 . В результате через вторичную обмотку w_2 и диодный блок D_4 протекает ток I_{w_2} , обеспечивающий зарядку силовых конденсаторов. Так как их суммарная емкость, приведенная к первичной обмотке Tp , много больше емкости конденсатора C_3 , то ток I_{w_2} заряжает конденсаторы C до небольшого напряжения. Требуемое высокое напряжение зарядки силовых конденсаторов обеспечивается пачкой импульсов тока I_{w_2} , следующих с частотой 1.5 кГц.

При формировании первых импульсов в пачке ЗУ работает в режиме, близком к короткому замыканию. В этом режиме происходит существенная перезарядка C_3 . Затем конденсатор C_3 перезарядается повторно до напряжения исходной поляр-

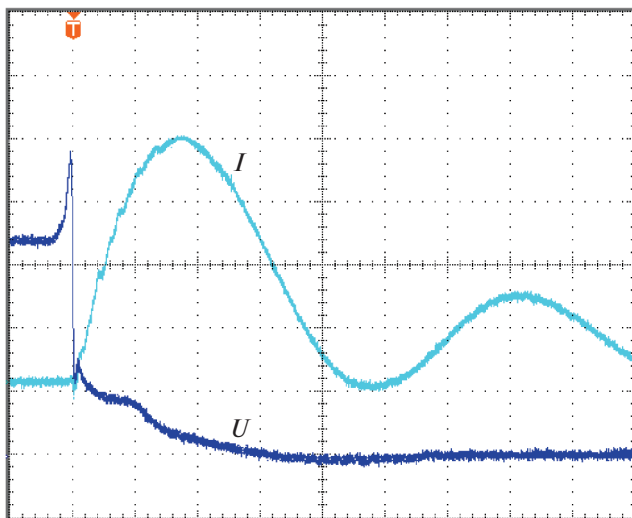


Рис. 2. Осциллограммы тока I через тиристорный коммутатор и напряжения U на отстающем тиристоре. Масштаб по вертикали: тока – 1.1 кА/деление, напряжения – 500 В/деление; по горизонтали – 400 нс/деление.

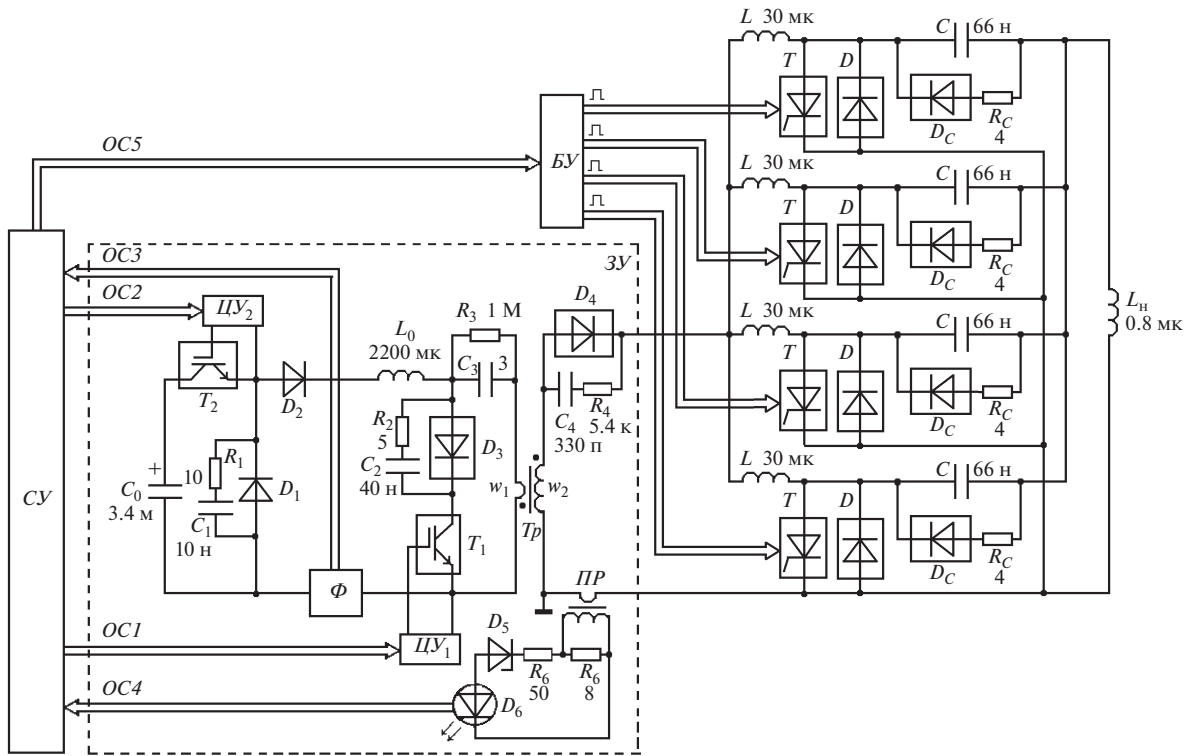


Рис. 3. Электрическая схема генератора. СУ – система управления, ЗУ – зарядное устройство, Φ – формирователь, ПР – пояс Роговского, ОС1–ОС5 – оптические сигналы; T_1, T_2 – IRGPS60B120KD (4 параллельно – T_1 , 2 параллельно – T_2); D_1 – D_3 – 80APF12 (D_3 – 2 параллельно), D_4 – HER508 (50 последовательно), D_5 – 1N4732A, D_6 – HFBR-1522Z, D – HER508 (28 последовательно), D_C – 60EPF12 (24 последовательно), T – коммутатор на основе ТБ133–250–24 (14 последовательно); Тр – аморфный пермаллой 9КСР, $180 \times 60 \times 40$ мм, $w_1 = 1, w_2 = 32$; ПР – феррит М2000НМ $40 \times 25 \times 11$ мм, $w_1 = 1, w_2 = 55$.

ности. Так как диод D_3 препятствует протеканию обратного тока через транзистор T_1 , то ток повторного перезаряда протекает по цепи D_1 – D_2 – L_0 . В процессе повторного перезаряда транзистор T_1 не выключается, поэтому в момент, когда на конденсаторе C_3 восстанавливается исходная полярность напряжения, ток I_{L_0} коммутируется в цепь D_3 – T_1 . Так как потери энергии в этой цепи малы, то величина тока I_{L_0} практически не изменяется до момента включения транзистора T_2 , которое происходит с небольшой задержкой.

При включении T_2 напряжение зарядки конденсатора C_0 прикладывается к диоду D_1 . В результате D_1 выключается, и конденсатор C_0 начинает разряжаться по цепи T_2 – D_2 – L_0 – D_3 – T_1 . Ток I_{L_0} нарастает практически линейно. В момент, когда I_{L_0} достигает заданного значения, с формирователя импульсов обратной связи Φ в систему управления СУ поступает оптический сигнал готовности.

По этому сигналу СУ выключает транзисторы T_1, T_2 . При этом ток I_{L_0} коммутируется в цепь C_3 – w_1 .

В результате происходит перемагничивание сердечника Тр и зарядка конденсатора C_3 до напряжения, определяемого величиной энергии, запасенной в индуктивности L_0 . Формирователь Φ , выполненный на основе датчика Холла ЛАН 50-Р и высокостабильного компаратора на операционных усилителях LF411, с большой точностью отслеживает момент достижения током I_{L_0} заданного значения. В результате достигается высокая стабильность напряжения зарядки C_3 (разброс < 5%).

В конце процесса зарядки конденсаторов C амплитуда импульсов тока I_{w_2} мала, так как величина напряжения на обмотке w_2 , определяемая коэффициентом трансформации Тр, близка к напряжению на конденсаторах C . При этом ЗУ работает в режиме, близком к холостому ходу. В этом режиме после окончания импульса тока I_{w_2} на конденсаторе C_3 остается значительное напряжение, которое прикладывается к обмотке w_1 . В результате сердечник Тр насыщается, C_3 быстро перезарядается через w_1 , и режим работы ЗУ становится близок к ранее описанному режиму работы при формировании первых импульсов в

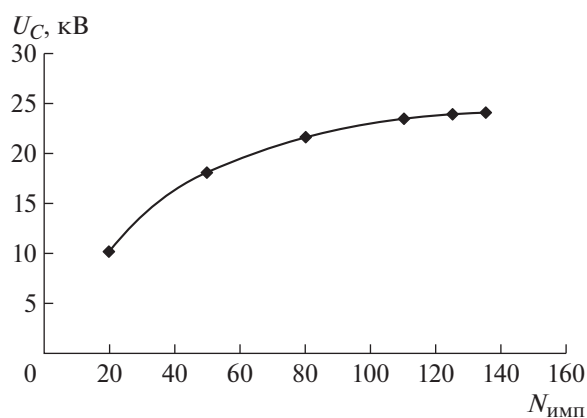


Рис. 4. График зависимости напряжения зарядки силовых конденсаторов U_C от количества импульсов зарядного тока $N_{имп}$.

пачке. Таким образом, в процессе зарядки конденсаторов C до заданного напряжения обеспечивается стабильная работа ЗУ и практически одинаковое напряжение зарядки конденсатора C_3 .

Величина напряжения зарядки силовых конденсаторов U_C определяется количеством импульсов зарядного тока $N_{имп}$. График зависимости U_C от $N_{имп}$ представлен на рис. 4, определенной при работе ЗУ на частоте 1.5 кГц.

После формирования последнего импульса зарядного тока система СУ (рис. 3) вырабатывает оптический сигнал на включение блока управления БУ. Блок БУ осуществляет одновременное включение тиристорных коммутаторов T . В результате в нагрузку L_n коммутируется быстро нарастающий выходной ток генератора I_n . Индуктивности L устраняют возможность перераспределения выходного тока в коммутаторы T с наименьшим электрическим сопротивлением. При коммутации тока I_n конденсаторы C перезаряжаются и к нагрузке L_n прикладывается напряжение обратной полярности. Не поглощенная в нагрузке энергия рассеивается в резисторах R_C .

В процессе зарядки силовых конденсаторов C ток вторичной обмотки Tr измеряется датчиком тока на основе пояса Роговского ПР и стабилитрона D_5 , который включается при большой амплитуде тока I_{w_2} , соответствующей режиму работы ЗУ при малом напряжении зарядки силовых конденсаторов. При включении D_5 в систему управления СУ поступает сигнал обратной связи с оптопередатчика D_6 . В момент формирования последнего импульса зарядного тока СУ проверяет наличие этого сигнала. Если он поступает в СУ, то это свидетельствует об аварии (пробой T или C). В этом случае СУ останавливает работу генератора.

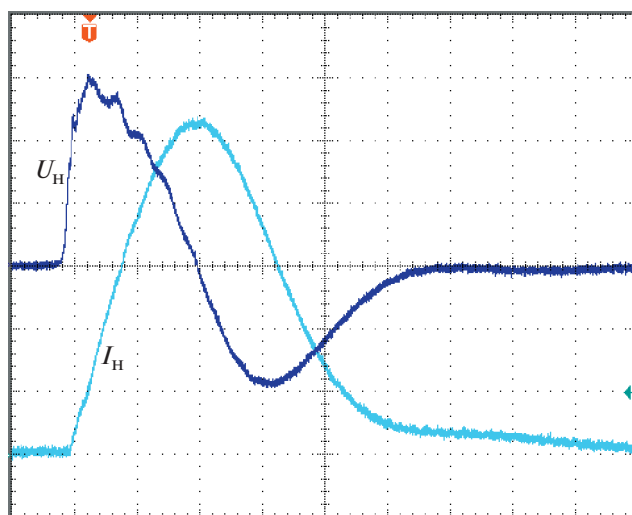


Рис. 5. Осциллограммы выходного тока генератора I_n при напряжении зарядки силовых конденсаторов 24 кВ и напряжения на нагрузке U_n . Масштаб по вертикали: тока – 2.2 кА/деление, напряжения – 5 кВ/деление; по горизонтали – 400 нс/деление.

На рис. 5 приведены осциллограммы тока I_n через нагрузку $L_n = 0.8$ мкГн и напряжения на нагрузке U_n , полученные при напряжении зарядки силовых конденсаторов 24 кВ.



Рис. 6. Внешний вид блока тиристоров.

Как видно из осциллограмм, рассмотренный модульный генератор позволяет за время ~ 800 нс коммутировать ток с амплитудой ~ 12 кА. В этом режиме генератор был испытан на частоте 10 Гц, которая ограничивалась мощностью зарядного устройства ЗУ.

Используемые в силовых модулях тиристоры ТБ133-250-24 имели таблеточную конструкцию. Они были зажаты в блоки (рис. 6) и охлаждались малогабаритными вентиляторами ES9225YK24. Высокая скорость нарастания выходного тока достигалась благодаря малой монтажной индуктивности модулей, которые подключались к нагрузке L_n широкими бифилярными шинами.

При исследовании генератора было установлено примерное равенство токов, протекающих через коммутаторы T , что определяет возмож-

ность повысить выходной ток путем использования большего количества тиристорных модулей. Радикальное увеличение коммутируемой мощности и энергии может быть получено при использовании тиристоров аналогичной конструкции, но с большей рабочей площадью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов И.В., Жмодиков А.Л., Коротков С.В., Прижимнов С.Г., Фоменко Ю.Л. // ПТЭ. 2016. № 3. С. 32. <https://doi.org/10.7868/S0032816216020208>
2. SMCTAA65N14A10 Datasheet | Solidtron – Datasheets pdf.com.
3. Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2021. № 3. С. 45.
4. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2021. № 3. С. 50.