

БЛОК ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ОБОСТРИТЕЛЕМ ИМПУЛЬСОВ В ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ

© 2022 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^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 16.03.2022 г.

После доработки 01.04.2022 г.

Принята к публикации 02.04.2022 г.

Приведены результаты исследований высоковольтного блока динисторов с ударной ионизацией в режиме коммутации импульсов тока с амплитудой несколько килоампер и скоростью нарастания до 100 кА/мкс. Описана цепь управления этого блока с обострителем фронта импульсов запускающего напряжения, обеспечивающая существенное уменьшение потерь энергии в динисторах.

DOI: 10.31857/S0032816222050068

Эффективность генераторов быстро нарастающих импульсов тока с емкостными накопителями энергии существенно зависит от потерь энергии в замыкающих коммутаторах, которые определяются временем их включения в состояние с высокой проводимостью. В связи с этим современные полупроводниковые коммутаторы тиристорного типа имеют хорошие перспективы использования, так как обладают достаточно малым временем переключения в хорошо проводящее состояние. В настоящее время наименьшем временем переключения из непроводящего состояния в состояние с высокой проводимостью обладают описанные в работах [1–4] кремниевые коммутаторы тиристорного типа (КТТ), переключаемые в результате ударной ионизации кремния. В этих коммутаторах процесс ударной ионизации инициируется предложенным в [5] способом, состоящим в приложении наносекундного импульса высокого напряжения, амплитуда которого существенно превышает напряжение стационарного пробоя полупроводниковой структуры КТТ. Ударная ионизация обеспечивает очень быструю генерацию электронно-дырочной плазмы. В результате высокая проводимость КТТ достигается за время < 1 нс, которое уменьшается при увеличении скорости нарастания запускающего напряжения. Такое малое время переключения в хорошо проводящее состояние определяет рекордно малые потери энергии при коммутации наносекундных импульсов тока. К несомненным достоинствам КТТ можно отнести то, что при последовательном соединении они могут включаться об-

щим запускающим импульсом высокого напряжения.

В данной статье описаны исследования высоковольтного блока динисторов с ударной ионизацией (SID – shock-ionized dynistors) [6], выполненные с целью повышения его эффективности. Конструкция SID была разработана в результате оптимизации известных КТТ. Как показывают исследования [7–9], она обеспечивает эффективное переключение SID при сравнительно малой мощности импульса запуска.

Исследовался блок SID с рабочим напряжением 12 кВ. Его переключение осуществлялось с помощью широко используемой для запуска КТТ цепи управления, которая содержала запускающий генератор с индуктивным накопителем энергии и прерыватель тока в виде блока последовательно соединенных дрейфовых диодов с резким восстановлением (DSRD – Drift Step Recovery Diodes) [10]. Так как напряжение на блоке SID в момент включения велико, то блок DSRD имел большое рабочее напряжение и состоял из высоковольтных диодов с напряжением стационарного пробоя 1.2 кВ, которые не могли обеспечить фронт запускающих импульсов менее 3 нс.

Целью нашей работы являлось исследование возможности уменьшения коммутационных потерь энергии в блоке SID при уменьшении фронта импульсов запускающего напряжения с помощью высоковольтного обострителя на основе SID с малой рабочей площадью.

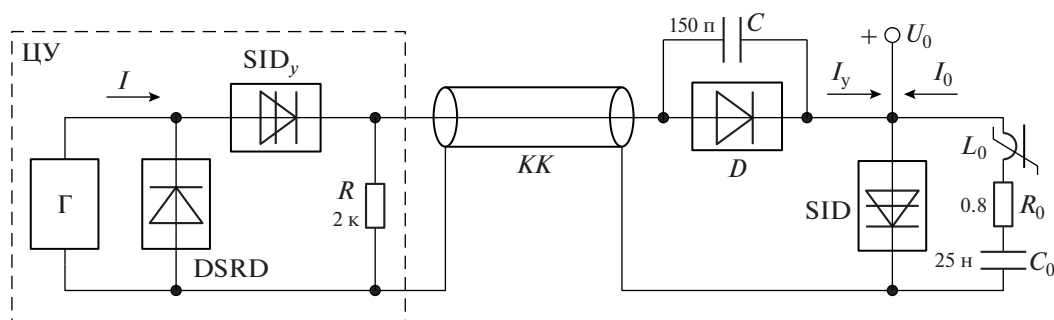


Рис. 1. Электрическая схема опытного стенда. ЦУ – цепь управления; КК – коаксиальный кабель; Г – генератор; D – К100 (2 последовательно); L_0 – сердечник феррит N87 (EPCOS), 5 колец размером $16 \times 9.6 \times 6.3$ мм, $w = 1$.

Исследования проводились на опытном стенде, который был построен по схеме, представленной на рис. 1. Стенд состоял из основной цепи, содержащей конденсатор C_0 , дроссель L_0 и основной блок SID, а также разделительной цепи C – D и коаксиального кабеля КК. Переключение блока SID осуществлялось с помощью цепи управления ЦУ, которая содержала блок DSRD, обостряющий блок SID_y и запускающий генератор Г. В блоках SID и SID_y использовались соответственно 6 и 3 последовательно соединенных диода с напряжением стационарного пробоя 2.5 кВ, которые имели диаметр структур соответственно 24 и 7 мм. Блок DSRD состоял из 35 диодов с диаметром структур 16 мм.

Принцип действия стенда заключается в следующем. В исходном состоянии конденсатор C_0 заряжен до напряжения U_0 . Это напряжение приложено к блоку SID. Цепь C – D и резистор R устраняют возможность приложения напряжения U_0 к цепи SID_y –DSRD. Процесс формирования импульса запуска блока SID начинается после включения генератора Г, который был ранее описан в работе [11]. Сначала через блок DSRD пропускается импульс тока в прямом направлении. Он имеет принципиально малую длительность (~ 350 нс) и обеспечивает накопление заряда в диодах. В момент окончания прямого тока через блок DSRD пропускается быстро нарастающий обратный ток, который за время ~ 150 нс осуществляет вынос всего накопленного заряда. В результате диоды блока DSRD выключаются, и протекающий через генератор Г ток I коммутируется в блок SID_y . При этом происходит быстрая зарядка собственных емкостей диодов этого блока, и напряжение на блоке SID_y резко нарастает. Когда напряжение на блоке SID_y достигает величины, достаточной для ударной ионизации диодных структур, он включается за время < 1 нс. После включения блока SID_y ток I коммутируется в коаксиальный кабель КК. В результате на входе кабеля формируется импульс напряжения $U_{\text{вх}}$,

амплитуда которого определяется произведением тока I на волновое сопротивление кабеля. Амплитуда импульса напряжения $U_{\text{вых}}$ на выходе кабеля зависит от величины напряжения переключения блока SID и может достигать $2U_{\text{вх}}$.

Быстро нарастающее напряжение $U_{\text{вых}}$ прикладывается к цепи C – D и к блоку SID. В результате через собственную емкость блока SID протекает ток управления I_y , который осуществляет зарядку этой емкости. При этом напряжение на блоке SID резко нарастает до величины, достаточной для его включения. В процессе запуска блока SID дроссель L_0 имеет большую индуктивность и исключает возможность перераспределения тока I_y в силовую цепь. После включения блока SID через него продолжает протекать ток I_y , который поддерживает высокую проводимость диодов до момента насыщения сердечника дросселя L_0 . Сердечник дросселя L_0 насыщается спустя несколько наносекунд после включения блока SID. При этом индуктивность дросселя резко уменьшается, и через блок SID протекает быстро нарастающий ток I_0 .

В процессе исследований измерялись токи I , I_0 и напряжение U на блоке SID. Для измерения токов I , I_0 использовался осциллограф Tektronix TDS 3052C с полосой пропускания 500 МГц и датчики тока Pearson current monitor 410. Измерение напряжения U осуществлялось с помощью осциллографа Tektronix DPO 5204 с полосой пропускания 2 ГГц и самодельного низкоомного делителя, который подключался к блоку SID через разделительный конденсатор. Конструкция делителя описана во многих работах, например, в [12]. Нижним плечом делителя являлся коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом. В качестве верхнего плеча использовался частично экранированный малогабаритный резистор с сопротивлением 470 Ом. Делитель был калиброван при использовании импульсов напряжения с фронтом 0.3 нс, которые формировались с помощью генератора И1-15. В результате

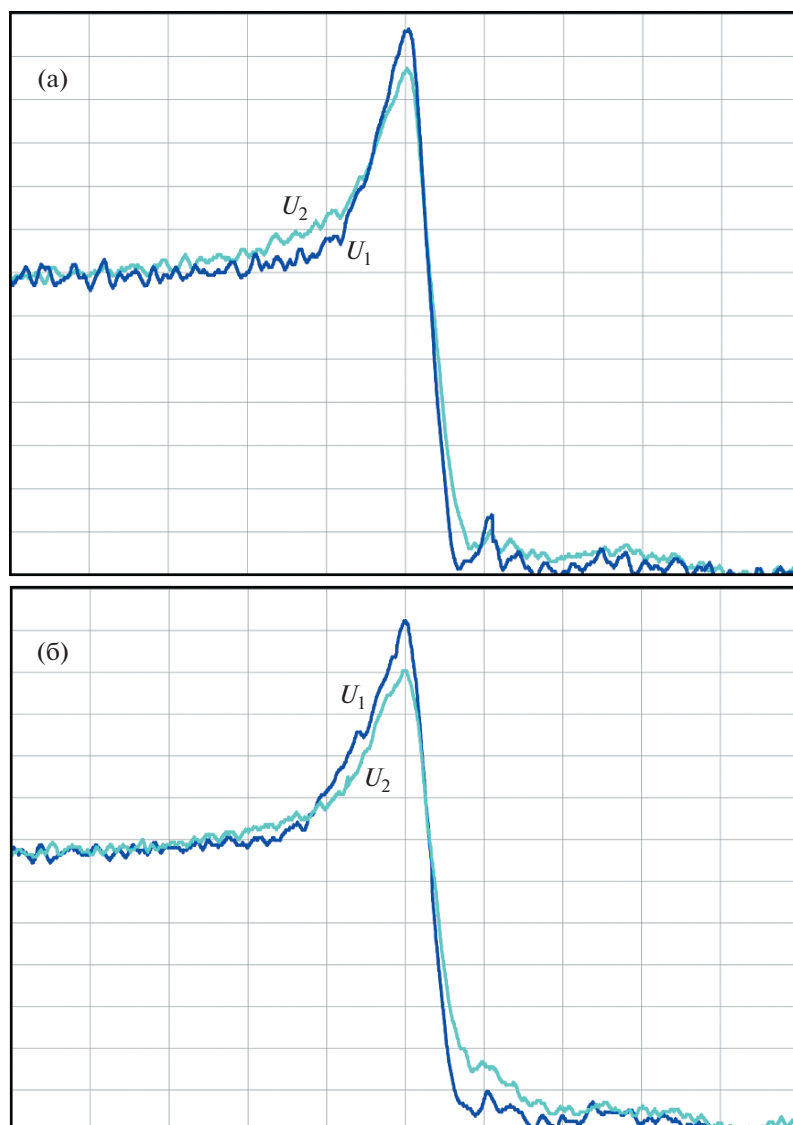


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на блоке SID при токе I с амплитудой 300 А (а) и 200 А (б) при использовании обострителя (U_1) и без обострителя (U_2). Масштаб: по вертикали – 2 кВ/деление, по горизонтали – 2 нс/деление.

оптимизации длины экрана резистора верхнего плеча была обеспечена возможность достоверного измерения сигналов с фронтом 0.5 нс.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на блоке SID, иллюстрирующие процесс его переключения при использовании блока SID_y, обостряющего фронт запускающего напряжения (кривые с индексом 1) и без блока SID_y (кривые с индексом 2). Они получены при отключенной основной цепи. Осциллограммы на рис. 2а и 2б соответствуют токам I с амплитудой 300 и 200 А соответственно.

Как видно из осциллограмм, величина напряжения на блоке SID в момент его включения составляет более 20 кВ. Она существенно превышает величину суммарного напряжения стационар-

ного пробоя шести используемых динисторов (15 кВ). Такой результат обусловлен тем, что за время нарастания запускающего напряжения стационарный пробой в динисторных структурах развиваться не успевает. Обостритель позволяет увеличить скорость нарастания запускающего напряжения на блоке SID. При этом включение блока SID происходит при более высоком напряжении, которое определяет более высокую интенсивность процессов ударной ионизации в динисторных структурах. В результате уменьшается время включения блока SID и увеличивается его проводимость после переключения. Напряжение включения блока SID увеличивается незначительно, но этого оказывается достаточно для существенного повышения его эффективности.

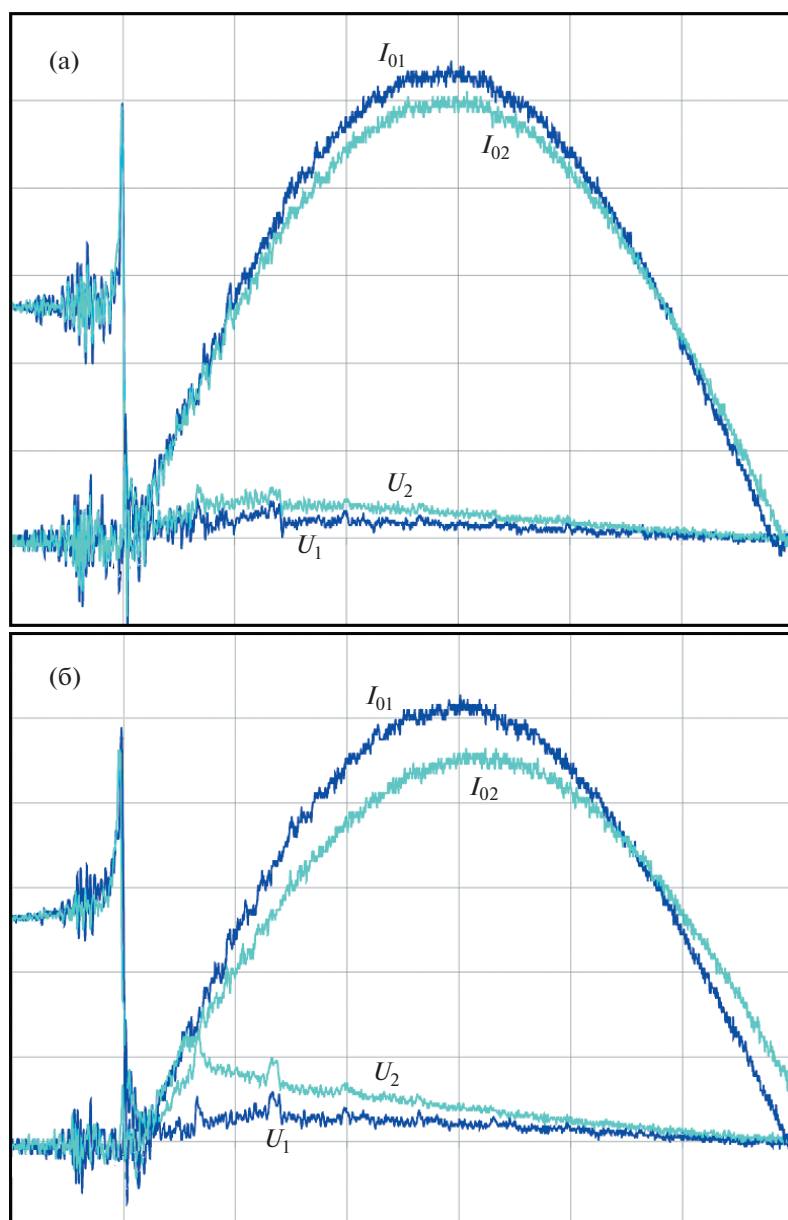


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на блоке SID и основного тока I_0 при использовании обострителя (а) и без обострителя (б). Кривые с индексами 1 и 2 соответствуют току I с амплитудой 300 и 200 А соответственно. Масштаб по вертикали: тока – 500 А/деление, напряжения – 5 кВ/деление; по горизонтали – 50 нс/деление.

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на блоке SID при протекании основного тока, полученные в стенде (см. рис. 1) при зарядке конденсатора C_0 до напряжения 12 кВ. Осциллограммы на рис. 3а соответствуют экспериментам с обострителем SID_y в цепи управления ЦУ. Осциллограммы на рис. 3б получены без обострителя. Кривые с индексами 1 и 2 соответствуют току I с амплитудой 300 и 200 А соответственно.

Согласно осциллограммам, увеличение скорости нарастания запускающего напряжения, полученное при использовании обострителя, обеспе-

чивает уменьшение потерь энергии в блоке SID при коммутации импульсов основного тока I_0 . Влияние обострителя возрастает при уменьшении тока I . Так, при $I = 300$ А амплитуда тока I_0 при использовании обострителя составляет ~ 2.65 кА, а без обострителя ~ 2.5 кА, а при $I = 200$ А – соответственно ~ 2.5 кА и ~ 2.25 кА.

На рис. 4 приведена осциллограмма основного тока, полученная в экспериментах, когда в рассмотренном стенде не использовался резистор R_0 , а емкость конденсатора C_0 была увеличена до 88 нФ.

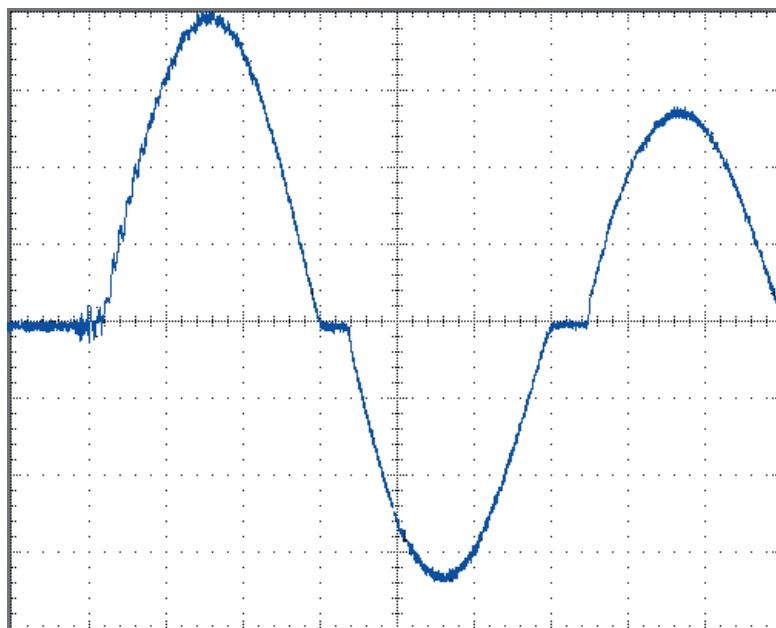


Рис. 4. Осциллограмма основного тока. Масштаб: по вертикали – 2.5 кА/деление, по горизонтали – 100 нс/деление.

Величина напряжения зарядки конденсатора C_0 составляла 12 кВ. Переключение блока SID осуществлялось цепью управления с обостряющим блоком SID_y при токе I с амплитудой 300 А.

Согласно осциллограмме на рис. 4, максимальная амплитуда и скорость нарастания основного тока составляют соответственно 10 кА и 100 кА/мкс. Малое затухание основного тока свидетельствует о малых потерях энергии в цепи разряда конденсатора C_0 . Амплитуда первой полуволны основного тока (I_{m1}) в 1.18 раза превышает амплитуду второй полуволны (I_{m2}). Определенная из соотношения $(I_{m2}/I_{m1})^2$ эффективность процесса коммутации составляет ~72%.

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанный блок SID способен эффективно коммутировать мощные наносекундные импульсы тока, нарастающие со скоростью десятки килоампер в микросекунду. Потери энергии в блоке SID существенно уменьшаются даже при незначительном увеличении скорости нарастания запускающего напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efanov V., Kardo-Sysoev A., Tchashnicov I., Yarin P. // Proc. 22nd Int. Power Modulator Symp. Ft, USA, Boca Raton, 1996. P. 225. <https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440>
2. Grekhov I., Korotkov S., Rodin S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. Iss. 2. Part 1. P. 378. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.918661>
3. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А., Люблинский А.Г. // ПТЭ. 2009. № 5. С. 90.
4. Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. Iss. 10. Part 1. P. 1888. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
5. Grekhov I., Kardo-Sysoev A. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1979. V. 5. Iss. 8. P. 395.
6. Коротков С.В. Патент на полезную модель № 197597 РФ // Опубл. 15.05.2020. Бюл. № 14.
7. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24. <https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
8. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 75. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050171>
9. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L. // Review of Scientific Instruments. 2020. V. 91. 084704. <https://doi.org/10.1063/5.0015284>
10. Grekhov I., Efanov V., Kardo-Sysoev A., Shenderey S. // Solid State El. 1985. V. 28. № 6. P. 597.
11. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2022. В печати
12. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Препринт № 91–51. Новосибирск: Институт ядерной физики, 1991.