*ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 42–48*

## ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

*УДК 621.373.5*

# ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ С НАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ НА ОСНОВЕ БЛОКОВ ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

**© 2025 г. С. В. Коротков[a, *], А. Л. Жмодиков[a], К. А. Козлов[a], Д. А. Коротков[a]**

[a] *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 12.02.2025 г.
После доработки 17.02.2025 г.
Принята к публикации 04.03.2025 г.

Показана возможность эффективного использования принципа импульсного умножения напряжения в генераторах мощных наносекундных импульсов на основе высоковольтных блоков динисторов с ударной ионизацией. Описаны электрическая схема и конструкция генератора, содержащего коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом и 4 модуля с рабочим напряжением 10 кВ. Модули включаются эстафетно, в каждом модуле используются блок динисторов и блок конденсаторов с емкостью 8.8 нФ. Приведены результаты экспериментального исследования генератора. Когда кабель подключен к резистору с сопротивлением 75 Ом, генератор обеспечивает формирование импульсов выходного напряжения с амплитудой приблизительно 38 кВ, фронтом длительностью около 4.5 нс и длительностью по полувысоте примерно 145 нс. Разброс выходных импульсов (джиттер) не превышает 2 нс. При подключении кабеля к искровому разряднику генератор способен работать в широком диапазоне изменений напряжения пробоя разрядника, а также в режиме холостого хода, при котором амплитуда напряжения на конце кабеля достигает величины, близкой к 80 кВ. Показана возможность масштабирования выходных параметров генератора.

**DOI:** 10.31857/S0032816225030074

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мощные наносекундные импульсы широко используются для создания электрических разрядов в технологических и экспериментальных устройствах. В этих устройствах заполненный газом межэлектродный промежуток пробивается при приложении импульса напряжения. После пробоя в канал разряда вкладывается требуемая энергия. Производительность устройств повышается при увеличении объема образованной неравновесной плазмы, который определяется расстоянием между электродами. При увеличении межэлектродного расстояния повышается напряжение пробоя и снижается стабильность разрядного процесса, что требует генерации импульсов высокого напряжения с достаточно большой длительностью, которая должна превышать максимально возможную длительность задержки пробоя. Высокая эффективность плазменных технологий достигается при создании большой напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Для этого скорость нарастания инициирующего пробой импульса напряжения должна быть велика, чтобы за время развития предпробойного процесса напряжение на промежутке успело нарасти до достаточно высокого значения. Для решения ряда специальных задач требуется строго одновременное формирование нескольких разрядов или последовательности разрядов, следующих с заданной задержкой друг относительно друга. В этих условиях разброс моментов генерации высо-

ковольтных импульсов (джиттер) должен быть очень мал.

Таким образом, генераторы электрических разрядов должны формировать выходные импульсы напряжения, имеющие высокую амплитуду, малый фронт, достаточно большую длительность и малый джиттер. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют генераторы на основе полупроводниковых приборов. В настоящее время в наносекундном диапазоне наибольшую энергию позволяют коммутировать полупроводниковые генераторы с размыкающими коммутаторами в виде блоков диодов с наносекундным временем выключения [1, 2] и с замыкающими коммутаторами в виде блоков четырехслойных полупроводниковых приборов с наносекундным временем включения [3–5].

В работе [6] описан мощный генератор на основе динисторов типа SID (shock ionized dynistors), которые включаются за время около 1 нс при приложении наносекундного импульса перенапряжения, инициирующего процесс ударной ионизации. Генератор при нагрузке 30 Ом формировал импульсы напряжения с амплитудой примерно 25 кВ и фронтом длительностью около 4 нс. Он был выполнен по схеме Маркса и состоял из четырех модулей, включающихся эстафетно. Каждый модуль содержал блок последовательно соединенных SID с рабочим напряжением 8 кВ и накопительный конденсатор с емкостью 2.2 нФ. Конденсаторы модулей заряжались одним импульсом тока за время около 15 мкс. Определенным недостатком такого решения являлось то, что в интервале времени между моментами окончания зарядки и включения генератора накопительные конденсаторы частично разряжались через блоки SID и элементы цепи зарядки. В результате при изменении момента включения генератора менялась амплитуда импульса выходного напряжения.

В настоящей статье приведены результаты исследования аналогичного генератора, в котором энергоемкость модулей была увеличена в шесть раз. Принципиальным отличием разработанного генератора является то, что зарядка накопительных конденсаторов осуществляется с помощью высокочастотного зарядного устройства, которое обеспечивает высокую стабильность величины зарядного напряжения. В результате достигается высокая повторяемость параметров выходных импульсов в режимах работы генератора при изменении моментов его включения.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Электрическая схема генератора показана на рис. 1. В состав схемы входят основной блок, содержащий накопительные конденсаторы $C_{01}$–$C_{04}$, динисторные блоки $SID_1$–$SID_4$ и запускающие конденсаторы $C_{y1}$–$C_{y3}$, а также блок управления (БУ), коаксиальный кабель (КК) и высокостабильные блоки зарядки (БЗ, $БЗ_0$). В исходном состоянии к блоку БУ приложено входное напряжение $U = 2$ кВ, а конденсаторы основного блока заряжены до напряжения $U_0 = 10$ кВ. Напряжение $U_0$ прикладывается к динисторным блокам, содержащим пять последовательно соединенных SID. Резисторы $R$ обеспечивают равномерное распределение напряжения $U_0$ между SID. Цепь $D$–$R_1$ исключает возможность приложения к блоку БУ выходного напряжения блока $БЗ_0$.

Динисторные блоки включаются эстафетно. Сначала с помощью блока управления включается блок $SID_1$. Последующее включение блоков $SID_2$–$SID_4$ осуществляется волной перенапряжения, которая формируется с помощью запускающих конденсаторов $C_{y1}$–$C_{y3}$.

Блок БУ выполнен по схеме, описанной в работе [7]. Он содержит диодный блок DSRD (drift step-recovery diodes), формирующий импульсы высокого напряжения с фронтом несколько нс, цепь $C_1$–$L_1$–$C_2$–$L_2$ и тиристор $T$, обеспечивающий коммутацию принципиально коротких импульсов тока, необходимых для эффективной работы блока DSRD. Малые коммутационные потери энергии в тиристоре $T$ достигаются с помощью цепи управления ЦУ, которая формирует мощные импульсы тока управления с амплитудой около 6 А и фронтом длительностью примерно 300 нс. Включение ЦУ осуществляется оптическим сигналом от внешнего генератора импульсов управления.

После включения тиристора $T$ конденсатор $C_1$ быстро перезаряжается до существенного обратного напряжения. Ток перезарядки протекает через индуктивность $L_1$ и цепь DSRD–$L_2$–$C_2$. В результате происходит зарядка конденсатора $C_2$, и через блок DSRD в течение нескольких сотен наносекунд протекает прямой ток. Этот ток обеспечивает накопление заряда электронов и дырок в базовых областях диодов.

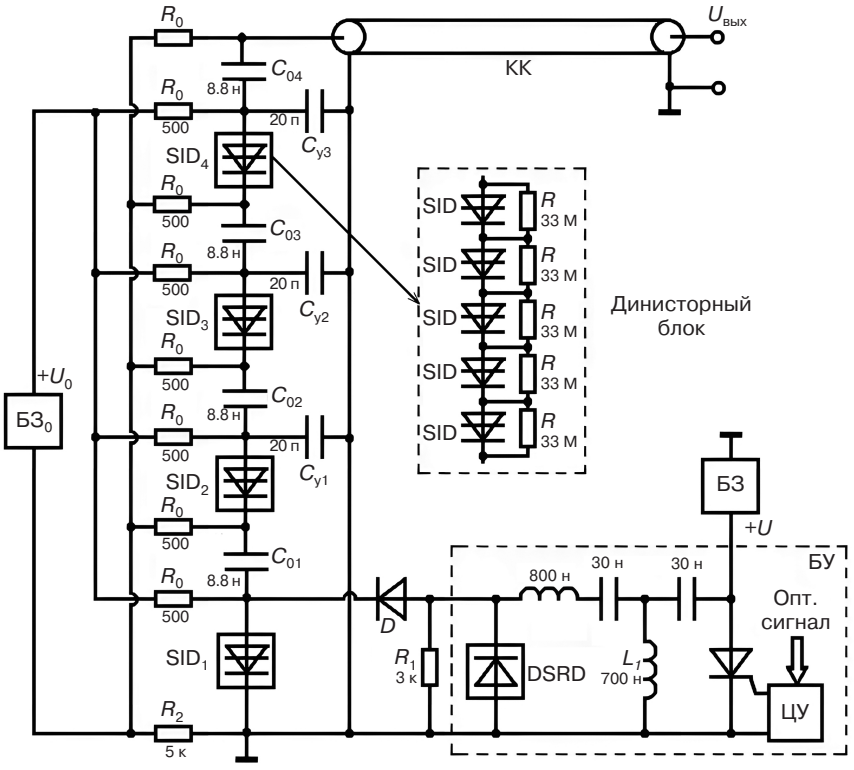


**Рис. 1.** Электрическая схема генератора: *D* – K100F; DSRD – 36 диодных структур с диаметром 20 мм; SID – диаметр структуры 16 мм, предельно допустимое напряжение в стационарном состоянии 2.5 кВ; *T* – ТБ133-25-24; КК – РК75-9-12.

Затем накопленный заряд выносится быстро нарастающим обратным током, который формируется при разряде конденсаторов $C_1$, $C_2$ через индуктивность $L_2$. Когда из диодных структур выносится весь накопленный заряд, блок DSRD выключается.

В процессе выключения блока DSRD протекающий через индуктивность $L_2$ ток коммутируется в блок $SID_1$ и быстро заряжает собственные емкости динисторов этого блока до напряжения, инициирующего их включение. В процессе включения динисторов проводимость блока $SID_1$ резко увеличивается, и конденсаторы $C_{y1}$, $C_{01}$разряжаются по цепи $C_{01}$–$SID_1$–$C_{y1}$–$SID_2$. В результате напряжение на блоке $SID_2$ быстро нарастает до напряжения включения. После включения блока $SID_2$ через собственные емкости динисторов блока $SID_3$ протекает ток разряда конденсаторов $C_{y2}$, $C_{02}$, $C_{01}$. Эти емкости быстро заряжаются, напряжение на блоке $SID_3$ резко нарастает, он включается и создает условия для эстафетного включения блока $SID_4$. После включения блока $SID_4$ в кабель КК коммутируется импульс тока разряда последовательно соединенных конденсаторов $C_{01}$–$C_{04}$. В результате на входе КК формируется импульс высокого напряжения $U_{кк}$. Поскольку время включения SID очень мало, длительность фронта $U_{кк}$ в основном определяется величиной монтажной индуктивности цепи разряда накопительных конденсаторов.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения $U_1$–$U_4$ на блоках $SID_1$–$SID_4$, иллюстрирующие процесс их переключения. Они получены при использовании лабораторного делителя [8] с сопротивлением около 500 Ом. Делитель позволял достоверно измерять сигналы с фронтом длительностью более 0.5 нс, он подключался к блокам через разделительный конденсатор.

Из осциллограмм на рис. 2 следует, что напряжение включения динисторных блоков, состоящих из пяти последовательно соединенных SID, составляет примерно 22 кВ. Если считать, что оно делится равномерно между динисторами, то напряжение включения SID составляет при-

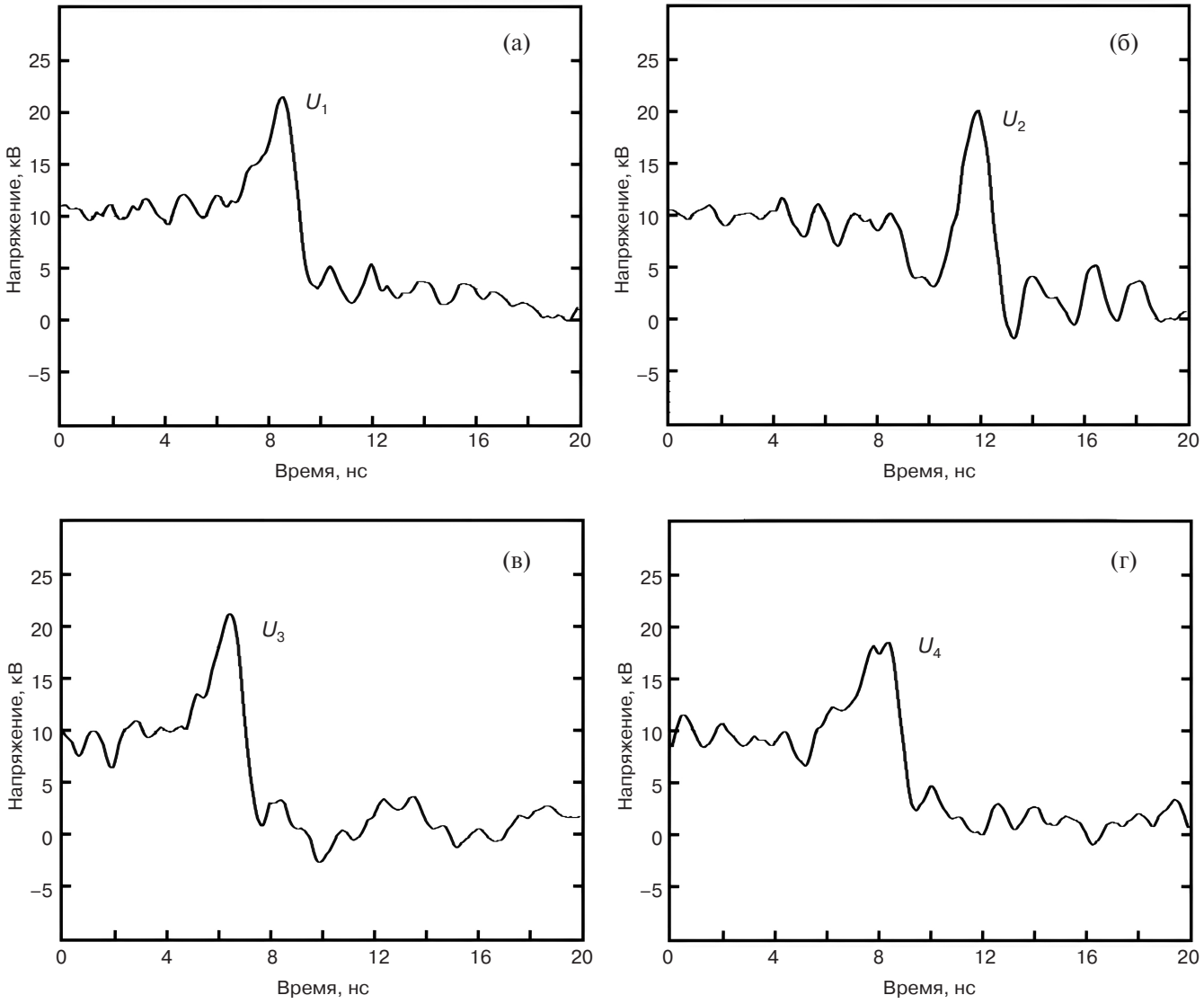


**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения на блоках $SID_1$ (**а**), $SID_2$ (**б**), $SID_3$ (**в**), $SID_4$ (**г**).

мерно 4.4 кВ, что почти в 1.8 раза превышает величину напряжения, которое он способен блокировать в стационарном состоянии.

В процессе запуска блоков SID время нарастания напряжения от исходной величины 10 кВ до напряжения включения составляет примерно 2 нс, время включения блоков SID не превышает 1 нс. Уменьшение напряжения на блоке $SID_2$ в процессе нарастания напряжения на блоке $SID_1$ свидетельствует о том, что часть выходного тока БУ замыкается по цепи $SID_2$–$C_{y1}$.

На рис. 3 приведена осциллограмма импульса выходного напряжения $U_{вых}$, измеренного щупом Tektronix P6015A на резисторе с сопротивлением 75 Ом, который был подключен к концу кабеля КК. Кабель имел волновое сопротивление 75 Ом и длину 3.5 м.

Как следует из осциллограммы, выходное напряжение генератора быстро нарастает; оно достигает максимального значения 38 кВ за время, меньшее 5 нс. Затем $U_{вых}$ медленно спадает, и через 80 нс после максимума это напряжение составляет не менее чем 24 кВ.

Полученный результат позволяет эффективно использовать генератор для создания мощных электрических разрядов. Этому способствует и то обстоятельство, что до момента пробоя межэлектродного промежутка генератор работает в режиме холостого хода. В этом режиме амплитуда напряжения на конце КК может в два раза превысить амплитуду напряжения на входе кабеля.

На рис. 4 показаны осциллограммы импульсов выходного напряжения $U_{вых}$ и импульсов

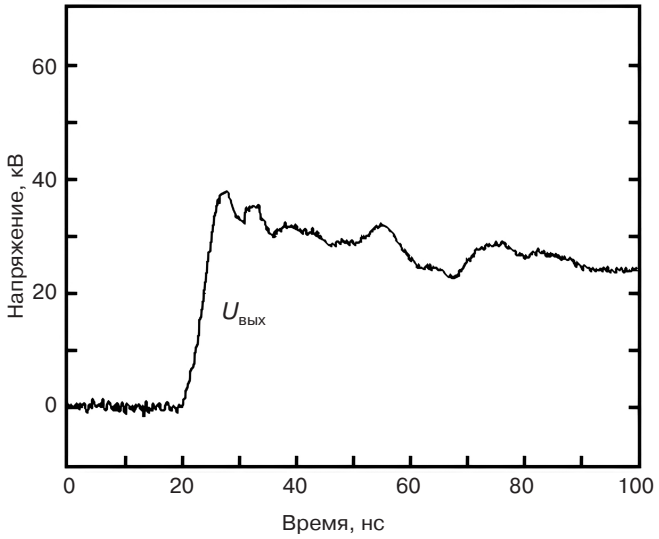


**Рис. 3.** Осциллограмма импульса выходного напряжения при подключении кабеля к резистору с сопротивлением 75 Ом.

напряжения $U_{кк}$ на входе КК, полученные при подключении кабеля к искровому разряднику. В эксперименте, который соответствовал осциллограммам на рис. 4а, 4б, разрядник пробивался при большем значении выходного напряжения по сравнению с экспериментом, который соответствовал осциллограммам на рис. 4в, 4г. Сравнение осциллограмм на рис. 4б, 4г показывает, что при существенном увеличении амплитуды импульса выходного напряжения амплитуда импульса напряжения на входе кабеля изменяется незначительно. В результате обеспечивается высокая надежность основного блока генератора, соединенного со входом КК.

Осциллограммы на рис. 4 измерялись с помощью пробника Tektronix P6015A, который подключался к нижнему плечу высоковольтного резистивного делителя с сопротивлением

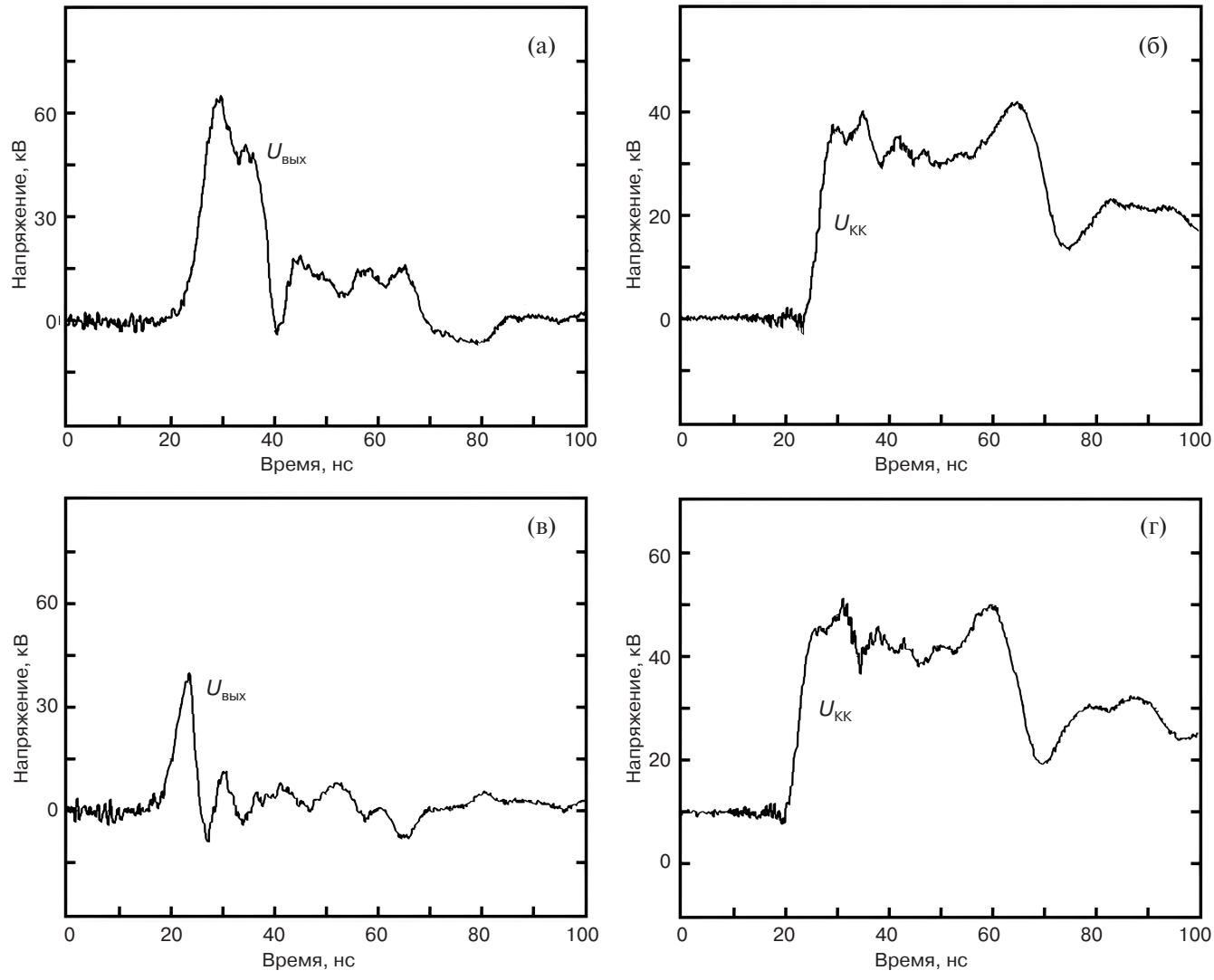


**Рис. 4.** Осциллограммы импульса выходного напряжения ($U_{вых}$) и импульса напряжения на входе кабеля ($U_{кк}$) при подключении кабеля к искровому разряднику.

200 Ом. Сопротивление верхнего плеча делителя составляло 1 кОм.

При подключении КК к резистору 75 Ом был определен джиттер импульсов выходного напряжения. На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов $U_{вых1}$, $U_{вых2}$, которые формировались на конце КК с минимальной и максимальной задержками относительно фронта сигнала управления. Они получены при запуске осциллографа с помощью малогабаритного трансформатора, который фиксировал фронт выходного тока генератора импульсов управления. Из осциллограмм на рис. 5 следует, что в разработанном генераторе разброс моментов генерации выходных импульсов не превышает 2 нс.

На рис. 6 показана фотография основного блока генератора. Он содержит четыре группы накопительных конденсаторов цилиндрической формы, три запускающих конденсатора и четыре блока SID. К блокам SID подключены статические делители напряжения, показанные

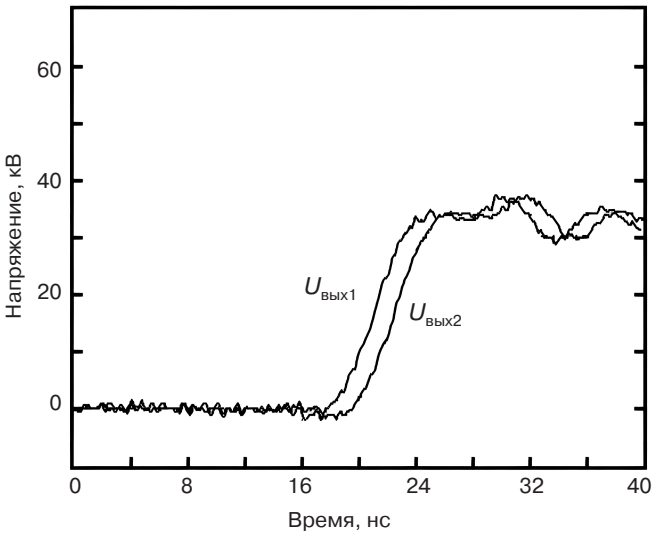


**Рис. 5.** Осциллограммы импульсов выходного напряжения, соответствующих минимальной и максимальной задержкам включения генератора относительно фронта сигнала управления.

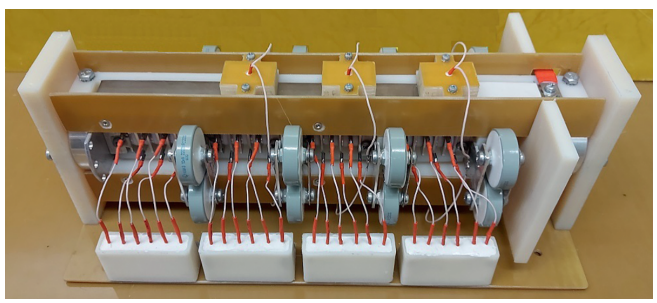

**Рис. 6.** Внешний вид основного блока генератора.

на переднем плане. Элементы основного блока зажаты в каркасе, который образован боковыми капролоновыми стенками и торцевыми металлическими фланцами. Качественный электрический контакт обеспечивает прижимное устройство. Оно находится в центре одного из фланцев и содержит винт и тарельчатую пружинную шайбу. На внешней стороне боковой стенки расположена заземленная шина, являющаяся обратным токопроводом. На этой шине закреплены корпуса запускающих конденсаторов.

На рис. 7 показан эскизный чертеж фрагмента основного блока: *1* – участок заземленной шины, *2* и *3* – участки боковых стенок, *4* – накопительный конденсатор, *5* – корпус запускающего конденсатора. Блок SID расположен между стенками *2, 3*, он содержит пять динисторных структур, которые помещены во фторопластовые корпуса *6* и зажаты между алюминиевыми фланцами *7*, *8* с помощью пружины, расположенной внутри фланца *8*. Фланцы закреплены на капролоновых пластинах *9*. Между корпусами *6* расположены тонкие алюминиевые пластины *10*, к которым подключаются резисторы статического делителя. Малая индуктивность коммутационного узла, состоящего из блока SID и накопительных конденсаторов, достигается с помощью бифилярных шин *11*, *12*. Шина *11* выполнена из алюминия, шина *12* – из медной фольги. Капролоновая вставка *13* исключает прогиб шины *12* при сильном давлении, кото-

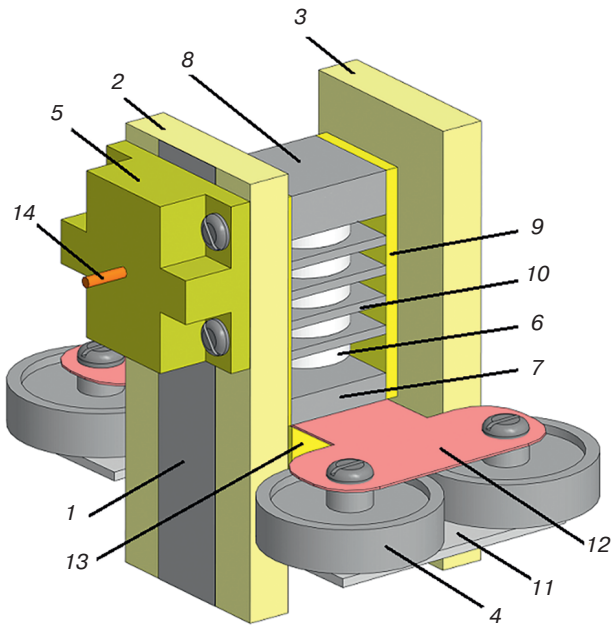


**Рис. 7.** Эскизный чертеж фрагмента основного блока.

рое создается в основном блоке для обеспечения качественного электрического контакта.

Корпус *5* запускающего конденсатора имеет тонкие стенки, он прижат к шине *1*. Потенциальный электрод конденсатора изготовлен из медной фольги, он плотно прилегает к нижней стенке корпуса. Вторым электродом конденсатора является шина *1*. Величина емкости запускающего конденсатора определяется площадью его потенциального электрода и толщиной нижней стенки корпуса, которая определяет межэлектродное расстояние и выбирается достаточной для исключения возможности пробоя. Вывод *14* припаян к потенциальному электроду конденсатора, он позволяет соединить этот электрод с блоком SID.

## 4. ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что разработанный генератор способен формировать выходные импульсы напряжения, имеющие малый джиттер (не более 2 нс), большую амплитуду (38 кВ при работе на нагрузку 75 Ом и 65 кВ при работе на искровой разрядник), малую длительность фронта (менее 5 нс) и сравнительно малую скорость спада (не более 400 В/нс при нагрузке 75 Ом). Благодаря таким коммутационным характеристикам он может быть эффективно использован для развития мощных электроразрядных технологий.

Принцип действия генератора обеспечивает возможность значительно увеличить амплитуду импульсов выходного напряжения путем увеличения количества эстафетно включающихся модулей.

Разработанная конструкция генератора позволяет оперативно увеличивать выходную энергию в результате подключения к бифилярным шинам коммутационного узла дополнительных накопительных конденсаторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рукин С.Н.* // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5.
2. *Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderey S.V.* // Solid-State Electron. 1985. V. 28. № 6. P. 597.
3. *Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Tchashnikov I.G., Yarin P.M.* // Proceed. International Power Modulator Symposium, Boca Raton, USA, 1996. P. 22. https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440
4. *Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L.* // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. № 8. P. 084704. https://doi.org/10.1063/5.0015284
5. *Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. № 10. P. 1888. https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343
6. *Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А.* // ПТЭ. 2023. № 6. С. 23. https://doi.org/10.31857/S0032816223060034
7. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов К.А.* // ПТЭ. 2023. № 4. С. 70. https://doi.org/10.31857/S0032816223040134
8. *Белкин В.С., Шульженко Г.И.* Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе. Препринт 91-51, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1991.