

## ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СУММАТОРА С ОБЩИМ ИЗОЛИРУЮЩИМ ДРОССЕЛЕМ

© 2020 г. В. В. Кладухин<sup>а,\*</sup>, С. П. Храпцов<sup>а</sup>, В. Ю. Ялов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт электрофизики УрО РАН  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

\*e-mail: laepr@ier.uran.ru

Поступила в редакцию 12.09.2019 г.

После доработки 12.09.2019 г.

Принята к публикации 22.09.2019 г.

Описан генератор мощных квазипрямоугольных высоковольтных импульсов на основе  $N$ -секционного сумматора, выполненного на отрезках коаксиальных линий с общим изолирующим магнитопроводом. На согласованной нагрузке сумматор обеспечивает  $N$ -кратное повышение амплитуды напряжения относительно амплитуды входных импульсов с временами нарастания и спада выходных импульсов, определяемыми соотношениями:  $2(N-1)\tau_c + \tau_{RT}$ ,  $2(N-1)\tau_c + \tau_{FT}$  соответственно, где  $\tau_c$  – электрическая длина секции сумматора,  $\tau_{RT}$  – длительность фронта входного импульса,  $\tau_{FT}$  – длительность спада входного импульса,  $N$  – число секций. Представлена конструкция и приведены результаты тестирования 22-секционного генератора импульсов с 50-омной согласованной нагрузкой, с возможностью регулирования напряжения выходных импульсов в диапазоне 1–21 кВ, длительности в диапазоне 100–500 нс, частоты следования импульсов до 1 кГц, с длительностью фронта и спада выходных импульсов (по уровню 0.1–0.9) – 100 нс.

DOI: 10.31857/S003281622001022X

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование мощных высоковольтных импульсов путем сложения совокупности парциальных импульсов в сумматорах, выполненных на основе последовательно соединенных отрезков (секций) двухпроводных линий, нашло широкое применение при создании генераторов мощных высоковольтных импульсов LIVA (Linear Induction Voltage Adder) и MIVA (Magnetically-Insulated Induction Voltage Adder) [1–3]. В общем случае, парциальные импульсы в таких генераторах формируются независимо друг от друга и передаются на входы секций сумматора с помощью передающих линий. При формировании парциальных импульсов путем разряда отрезков длинных линий передающие линии могут совмещаться с формирующими [3].

Схема генератора импульсов с отдельным формированием парциальных импульсов и протяженными передающими линиями изображена на рис. 1.

Согласованное сложение парциальных импульсов (представляющих собой пакеты ТЕМ-волн) обеспечивается реализацией в линиях режима бегущих ТЕМ-волн, который достигается

согласованием волновых сопротивлений передающих линий и секций суммирующей линии, а также синхронизацией моментов поступления парциальных импульсов на входы ее секций, для чего необходимо выполнение следующих условий:

$$W_k = W_0 k, \quad (1)$$

$$R_L = N W_0, \quad (2)$$

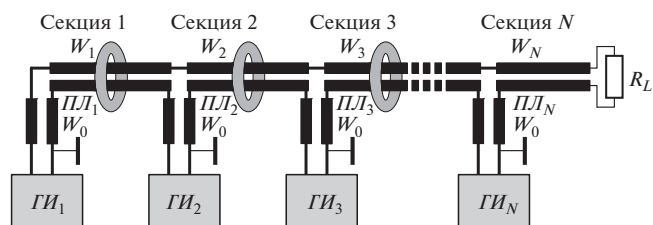
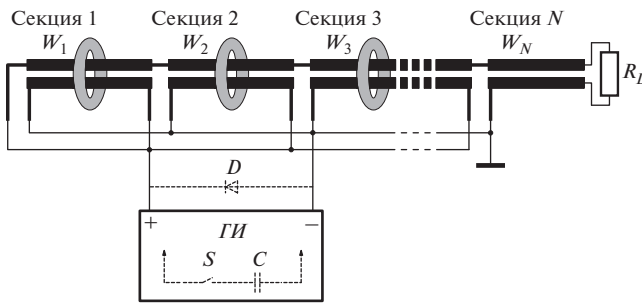


Рис. 1. Схема генератора импульсов с отдельным формированием парциальных импульсов.  $ГИ_1–ГИ_N$  – генераторы парциальных импульсов;  $ПЛ_1–ПЛ_N$  – передающие линии с волновыми сопротивлениями  $W_0$ ; Секция 1–Секция  $N$  – секции составной суммирующей линии с волновыми сопротивлениями  $W_1–W_N$ , охваченные кольцевыми магнитопроводами;  $N$  – число секций;  $R_L$  – сопротивление нагрузки.



**Рис. 2.** Схема генератора импульсов с общим формирователем парциальных импульсов.  $D$  – обратный диод,  $S$  – транзисторный ключ,  $C$  – накопительная емкость.

$$t_k = \frac{l_c}{V_c} (k - 1), \quad k = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где  $t_k$  – момент поступления парциального импульса на вход  $k$ -й секции,  $l_c$  – длина линии суммирующей секции,  $V_c$  – скорость ТЕМ-волн в секции.

При согласованном сложении парциальных импульсов, на нагрузке суммирующей линии формируются импульсы, амплитуда и форма тока которых повторяет амплитуду и форму тока входных парциальных импульсов, а напряжение в  $N$  раз превышает напряжения парциальных импульсов. Подобные сумматоры, реализующие режим бегущей волны, под именем TWC (Travelling Wave Combiners) нашли применение и для сложения гармонических сигналов в радиотехнике [4], при этом условие временной согласованности фронтов парциальных импульсов заменяется условием фазовой согласованности входных сигналов.

Наряду с достоинствами рассмотренная схема имеет такие существенные недостатки, как большое число изолирующих дросселей (магнитопроводов), обеспечивающих развязку “потенциальных” и “земляных” тоководов входов соседних секций суммирующей линии, а также необходимость согласования моментов подачи парциальных импульсов на входы секций. Если согласованность моментов поступления парциальных импульсов может обеспечиваться использованием формирователей с управляемыми ключами [5–7] или использованием общего формирователя импульсов с передающими линиями разной длины, то уменьшение числа магнитопроводов изолирующих дросселей возможно лишь при объединении входов суммирующих секций, что эквивалентно одновременному поступлению парциальных импульсов на входы секций. Ниже рассмотрены характерные черты такого подхода.

## 1. ГЕНЕРАТОР С ОБЩИМ ФОРМИРОВАТЕЛЕМ ПАРЦИАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Схема генератора импульсов с общим формирователем парциальных импульсов, одновременно подаваемых на входы суммирующих секций без использования передающих линий, допускающая использование общего магнитопровода для всех развязывающих дросселей, приведена на рис. 2.

Далее предполагается, что входные импульсы формируются путем частичного разряда накопительной емкости  $C$  через транзисторный ключ  $S$  и используется обратный диод  $D$ , обеспечивающий сокращение времени переходных процессов при выключении ключа и его защиту от перенапряжения. Вышеназванные элементы показаны на рис. 2 штриховой линией. Входы секций суммирующей линии (кроме первого) рассматриваются как ТЕМ-тройники с последовательно включенными плечами. Импульсы, поступающие на входы этих тройников, распространяются по плечам тройников в виде суперпозиции прямых и обратных ТЕМ-волн. Сложение импульсных токов и напряжений в таких тройниках рассмотрено в [5].

При одновременном поступлении импульсов на входы секций суммирующей линии, в отличие от согласованного случая, удовлетворяющего условиям (1)–(3), возникает смешанный режим распространения ТЕМ-волн, при котором обратные волны (токи) не компенсируются падающими, и возникает переходный процесс, продолжающийся до тех пор, пока обратные волны не будут преобразованы в прямые на входе и стыках последующих секций суммирующей линии. Время протекания переходных процессов зависит от числа секций в суммирующей линии, их длины, соотношения волновых сопротивлений секций между собой и с сопротивлением нагрузки, а также динамических свойств ключа. После завершения переходного процесса ток на нагрузке достигнет своего стационарного значения  $i_N = Nu_0/R_L$ , где  $u_0$  – амплитуда напряжения входного импульса.

Так как аналитическое описание волновых процессов в многосекционной суммирующей линии, учитывающее отражения на стыках секций и нагрузке, является чрезвычайно громоздким уже при  $N \geq 3$ , то далее процессы сложения входных импульсов иллюстрируются результатами численного моделирования токов и напряжений на примере 5-секционной суммирующей линии ( $N = 5$ ).

Ниже приведена динамика напряжений на нагрузке при одинаковом волновом сопротивлении секций суммирующей линии ( $W_k = W, k = \overline{1, N}$ ), при котором время и интенсивность переходных процессов минимальны. При этом для повыше-

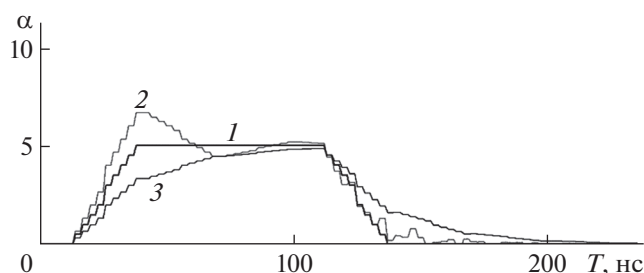


Рис. 3. Импульс напряжения на нагрузке. 1 –  $R_L = W$ , 2 –  $R_L = 2W$ , 3 –  $R_L = W/2$ .

ния наглядности, предполагалось, что генератор импульсов имеет пренебрежимо малое внутреннее сопротивление и токи утечки через изолирующие дроссели ничтожны, электрическая длина секции суммирующей линии  $\tau_c = 3$  нс, длительность входного импульса  $\tau_0 = 100$  нс, длительность фронта входного импульса  $\tau_{RT} = 1$  нс, длительность спада входного импульса  $\tau_{FT} = 1$  нс, амплитуда напряжения входного импульса  $u_0$ .

На рис. 3 и рис. 4 приведены динамика относительного напряжения импульса на нагрузке  $\alpha = u_R/u_0$  и относительные токи на входах в секции линии  $\beta = u_0/W$  для  $R_L = W$ ,  $2W$  и  $W/2$ . При этом номера входов в секции увеличиваются в сторону нагрузки.

Из представленных графиков видно, что плоская вершина выходного импульса формируется при одинаковом волновом сопротивлении секций и нагрузки ( $R_L = W$ ). Длительность переходного процесса в этом режиме определяется временем двойного пробега ТЕМ-волны между входами в первую и последнюю секции суммирующей линии. При этом амплитуда напряжения импульса на нагрузке определяется величиной  $Nu_0$ , а время его нарастания и спада соотношениями

$$\tau_{RTL} = 2(N-1)\tau_c + \tau_{RT}, \quad (4)$$

$$\tau_{FTL} = 2(N-1)\tau_c + \tau_{FT}. \quad (5)$$

При повышенном сопротивлении нагрузки ( $R_L = 2W$ ) на фронте импульса напряжения формируется выброс, переходящий в быстро затухающий колебательный процесс с длительностью полупериода  $2(N-1)\tau_c + \tau_{RT}$ . Амплитуда напряжения на вершине выброса определяется величиной  $2R_L Nu_0 / (R_L + W)$ . Время нарастания импульса до вершины выброса составляет  $2(N-1)\tau_c + \tau_{RT}$ . Время спада импульса изменяется незначительно и составляет около  $2(N-1)\tau_c + \tau_{FT}$ .

При пониженном сопротивлении нагрузки ( $R_L = W/2$ ) время нарастания напряжения импульса сильно увеличивается, при этом рост напряжения происходит по квазиэкспоненциаль-

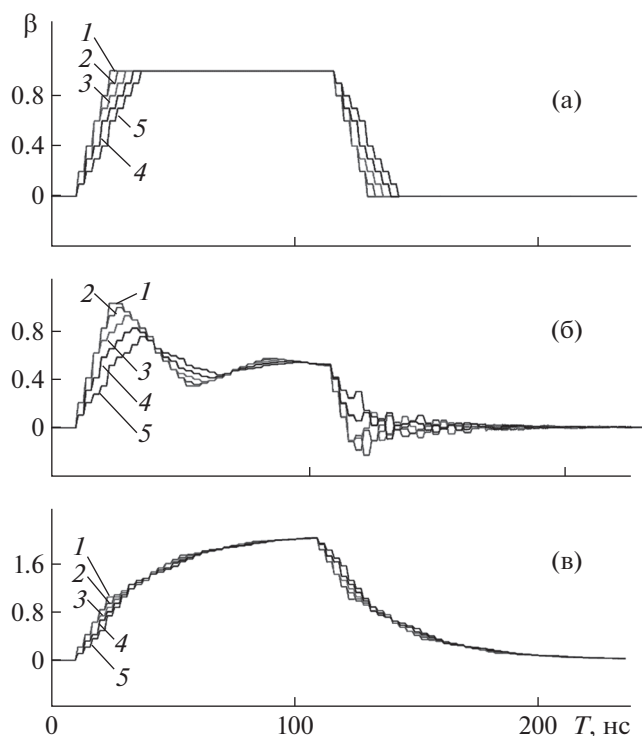


Рис. 4. Динамика токов на входах секций суммирующих линий при  $R_L = W$  (а),  $2W$  (б),  $W/2$  (в). 1–5 – ток на входе в соответствующую секцию.

ному закону с постоянной времени, близкой к  $2(N-1)\tau_c + \tau_{RT}$ . Спад импульса также происходит по квазиэкспоненциальному закону с той же постоянной времени. Амплитуда напряжения стремится к величине  $Nu_0$ .

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, был разработан и изготовлен генератор мощных наносекундных импульсов на основе 22-секционного сумматора (волнового трансформатора) входных импульсов наносекундной длительности, формируемых генератором импульсов (ГИ). Наряду с суммирующей линией в состав генератора вошли генератор входных импульсов и три устройства: зарядное, размагничивающее и запускающее.

**Генератор входных импульсов** обеспечивает формирование (генерацию) входных (парциальных) импульсов прямоугольной формы с параметрами: напряжение до 1100 В, ток до 10 кА, длительность 100–500 нс, и состоит из 16 параллельно включенных формирующих модулей, основанных на разряде конденсаторов через управляемые транзисторные ключи.

Каждый модуль содержит 40 параллельно-последовательно включенных керамических кон-

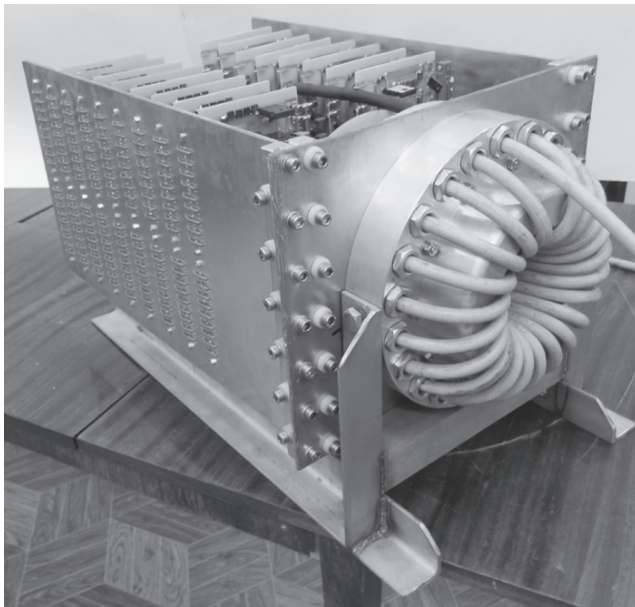


Рис. 5. Внешний вид генератора.

денсаторов C4532X7T2J224K200KC (TDK Corp., [www.tdk.com](http://www.tdk.com)) общей емкостью 2200 нФ с зарядным напряжением до 1260 В и 10 параллельно включенных IGBT-транзисторов FGL40N120AND (Fairchild Semiconductor Corp., [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)), запускаемых с помощью драйверов IXDI630CI (IXYS Corp., [www.ixys.com](http://www.ixys.com)). При нагрузке модуля  $r_{out} = 2$  Ом и напряжении 1000 В время нарастания тока на выходе модуля до 500 А составляет около 100 нс, спада – около 15 нс, допустимая частота формирования 30-секундных серий импульсов длительностью 500 нс – 1 кГц.

Соединение модулей между собой выполнено с помощью двух кросс-плат, изготовленных из двухстороннего 3-мм фольгированного стеклотекстолита с толщиной проводящих слоев 75 мкм, каждая из которых обеспечивает параллельное подключение 8 модулей. Электрическая схема и конструкция модулей аналогичны схеме и конструкции формирующих модулей, описанных в [6].

**Суммирующая линия** обеспечивает сложение импульсов, поступающих на входы ее секций, которые совмещены в виде общей короткой радиальной линии. Каждая секция суммирующей линии представляет собой участок 50-омного кабеля RG8/U длиной 45 см (электрическая длина  $\tau_c = 2.3$  нс). Для развязки потенциального и нулевого токовода (корпуса) входной радиальной линии использован одновитковый изолирующий дроссель с кольцевым магнитопроводом, выполненным из 6 ферритовых колец фирмы EPCOS (EPCOS, [www.tdk-electronics.tdk.com](http://www.tdk-electronics.tdk.com)), внутренний диаметр которых 102 мм, а наружный 140 мм, толщина – 25 мм, материал – N30. Для полного

использования потенциала магнитопровода используется его обратное намагничивание, выполненное с помощью размагничивающей одновитковой катушки, через которую пропускается постоянный ток 10 А. Подключается генератор входных импульсов (кросс-платы) к входной радиальной линии, выполненной из 3-мм стеклотекстолита с толщиной проводящих слоев 75 мкм, с двух сторон с помощью разъемных соединений.

**Устройство заряда**, обеспечивающее начальный заряд емкостных накопителей формирующих модулей до рабочего напряжения ( $u_0$ ) и поддержание его в процессе работы, выполнено по типовой бустерной схеме. Максимальная мощность этого устройства, в значительной степени определяющая среднюю мощность генератора импульсов, составляет около 10 кВт.

**Размагничивающее устройство**, обеспечивающее формирование постоянного тока обратного намагничивания магнитопровода изолирующего дросселя, основано на источнике питания 12 В и стабилизирующем дросселе с индуктивностью около 1 мГн. Так как витки размагничивающего контура имеют трансформаторную связь с входами секций суммирующей линии, шунтируемые обратным диодом  $D$ , которая ведет к затягиванию времени восстановления размагничивающего магнитного потока в изолирующем дросселе после запитания транзисторных ключей в формирующих модулях, то по аналогии с [7] последовательно с обратным диодом включена встречно-заряженная емкость 50 мкФ, подключенная к источнику питания (12 В) размагничивающего контура, чем обеспечивается восстановление размагничивающего магнитного потока в изолирующем дросселе в течение 150 мкс.

**Запускающее устройство**, задающее длительность и частоту следования импульсов формирующих модулей, выполнено в виде стандартного генератора импульсов с регулируемой длительностью и усилителя импульсов на основе микросхемы IXDI630CI.

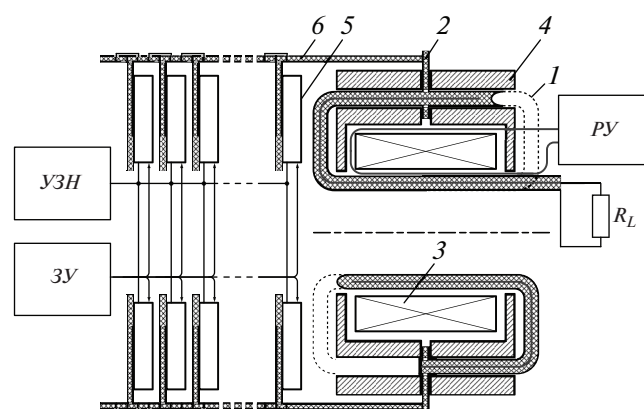
Внешний вид генератора размером 62 × 35 × 34 см (без устройства запуска, зарядного и размагничивающего устройств) показан на рис. 5.

Конструктивная схема генератора импульсов приведена на рис. 6.

### 3. ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА

Тестирование генератора было выполнено с целью проверки его работоспособности и измерения динамики выходного напряжения на различных нагрузках. Измерения проводились с помощью резистивного делителя осциллографом АК ИП-4113/2 (АО «ПриСТ», [www.prist.ru](http://www.prist.ru)) с аналоговой входной полосой 200 МГц. На рис. 7 приведена осциллограмма тока на выходе формиру-





**Рис. 6.** Конструктивная схема генератора импульсов. 1 – суммирующая коаксиальная линия; 2 – общий вход в секции суммирующей линии; 3 – магнитопровод изолирующего дросселя; 4 – корпус; 5 – формирующий модуль; 6 – кросс-секция; УЗН – устройство заряда емкостных накопителей модулей, ЗУ – устройство запуска транзисторных ключей формирующих модулей, ПУ – устройство формирования размагничивающего тока.

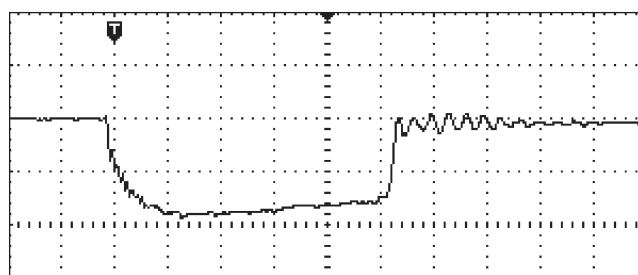
ющего модуля, нагруженного на сопротивление 2 Ом (коммутируемое напряжение – 1000 В), из которой следует, что  $\tau_{RT} \approx 100$  нс,  $\tau_{FT} \approx 15$  нс. На рис. 8 приведены осциллограммы 500-нс выходного импульса генератора на нагрузках 50 и 100 Ом, индуктивность нагрузки  $\approx 35$  нГн.

Измеренные характеристики выходных импульсов генератора близки к расчетным. В согласованном случае времена полного нарастания и спада импульса напряжения на нагрузке составили  $\tau_{RTL} \approx 200$  нс,  $\tau_{FTL} \approx 100$  нс. На 50-омной нагрузке были получены квазипрямоугольные импульсы с выходным напряжением до 21 кВ, фронтом и спадом по уровню 0.1–0.9 соответственно 150 и 95 нс.

Длительность импульсов напряжения на нагрузке ограничивается снизу временами его нарастания и спада при включении и выключении транзисторного ключа, сверху – спадом вершины из-за разряда емкостных накопителей формирующих модулей и тока утечки через индуктивность изолирующего дросселя. При выходном напряжении 21 кВ и длительности выходного импульса в пределах 500 нс спад вершины импульса, в значительной степени обусловленный разрядом емкостей в модулях, формирующих входной импульс, не превышал 15%. Частота следования импульсов, ограниченная источником питания (зарядом емкостных накопителей формирующих модулей), находилась в пределах 1 кГц.

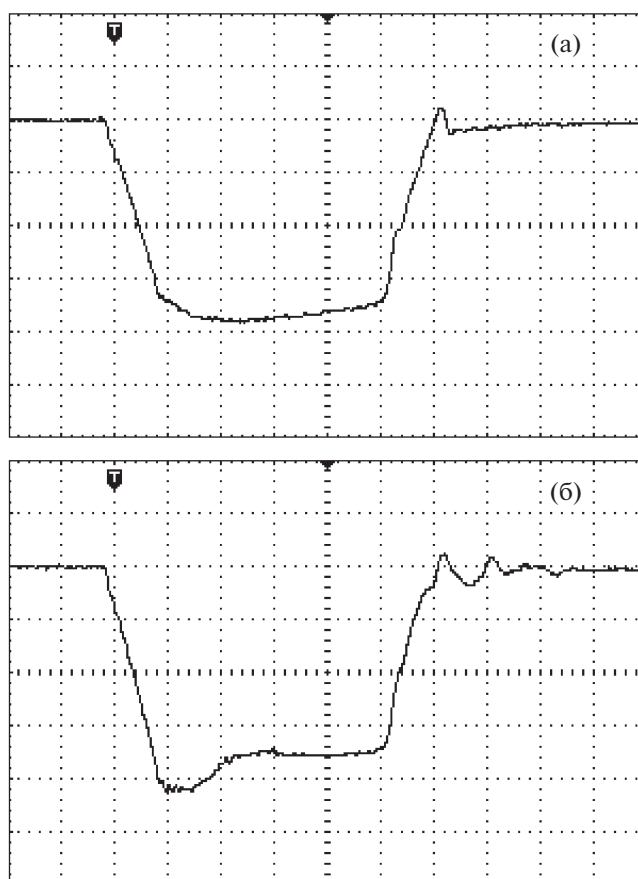
## ВЫВОДЫ

Отказ от временного согласования моментов подачи парциальных импульсов на входы секций



**Рис. 7.** Нарастание и спад тока на выходе формирующего модуля. Масштаб по вертикали – 250 А/деление, по горизонтали – 100 нс/деление.

суммирующей линии позволяет использовать один общий изолирующий дроссель и один общий формирователь импульсов. При этом утрачивается возможность сложения парциальных импульсов в режиме бегущей волны, что ведет к отклонению формы выходного импульса от прямоугольной. Минимальные искажения прямоугольности выходного импульса, проявляемые в виде затягивания его фронта и спада, имеют место при исполь-



**Рис. 8.** Форма импульса на нагрузке генератора 50 Ом (а), 100 Ом (б). Масштаб по вертикали 6 кВ/деление, по горизонтали – 100 нс/деление.

зовании секций с одинаковым волновым сопротивлением, равным сопротивлению активной нагрузки, и обратного диода, включаемого на выходе генератора входного импульса. В этом случае амплитуда напряжения квазипрямоугольного выходного импульса определяется соотношением  $Nu_0$ , полное время его нарастания и спада –  $2(N-1)\tau_c + \tau_{RT}$  и  $2(N-1)\tau_c + \tau_{FT}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith I.D.* // Phys. Rev. Special Topics – Accel. Beams. 2004. V. 7. P. 064801-1.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.7.064801>
2. *Yixiang Hu, Fengju Sun, Jiangtao Zeng, Hao Wei* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42. № 11. P. 3598.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2332212>
3. *Corcaran P., Carboni V., Smith I., Fishlock S.* // Proc. 15th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Monterrey. USA. 2005. P. 308.  
<https://doi.org/10.1109/PPC.2005.300620>
4. *Russel K.J.* // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1979. V. 27. № 5. P. 472
5. *Кладухин В.В., Кладухин С.В., Новоселов А.А., Храмов С.П.* // ПТЭ. 2015. № 5. С. 68.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816215040187>
6. *Кладухин В.В., Кладухин С.В., Новоселов А.А., Храмов С.П.* // ПТЭ. 2017. № 3. С. 54.  
<https://doi.org/10.7868/s0032816217020197>
7. *Кладухин В.В., Храмов С.П.* // ПТЭ. 2018. № 6. С. 68.  
<https://doi.org/10.1134/S0032816218060071>