

## ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ КЛЮЧЕЙ

© 2013 г. В. В. Кладухин, С. В. Кладухин, А. А. Новоселов, С. П. Храпцов

*Институт электрофизики УрО РАН  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106  
E-mail: laepr@ier.uran.ru*

Поступила в редакцию 16.05.2012 г.

Описан генератор мощных наносекундных импульсов на основе трансформатора Льюиса и сверхбыстродействующих IGBT-транзисторов. Генератор обеспечивает формирование на 50-омной согласованной нагрузке прямоугольных импульсов с частотой следования до 2 кГц. Длительность формируемых импульсов может свободно варьироваться от 20 до 200 нс, а импульсная мощность от 200 Вт до 2 МВт.

DOI: 10.7868/S0032816213030087

### ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрена реализация генератора мощных наносекундных импульсов на основе сложения парциальных потоков энергии, синхронно распространяющихся по коаксиальным кабельным каналам в виде ТЕМ-волн. Формирование парциальных потоков энергии в линиях выполнено с помощью управляемых пространственно-распределенных ключей на основе сверхбыстродействующих IGBT-транзисторов. Сложение потоков энергии выполнено по схеме трансформатора Льюиса [1–4] путем суммирования напряжений групп парциальных линий, объединенных в отдельные секции, т.е. с коэффициентом повышения напряжения, равным числу секций. Блокирование потоков энергии (токов), распространяющихся по наружным оплеткам коаксиальных линий от их выходов (сумматора) к входам (ключам), выполнено с помощью развязывающих индуктивных с использованием ферритовых колец.

Использование транзисторных ключей, обеспечивающих полный цикл коммутации, позволило генерировать импульсы регулируемой длительности, а управляемый заряд емкостных накопителей — регулировать их амплитуду. Предложенная схема является развитием подходов, изложенных в работах [5, 6].

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА

Генератор построен на основе схемы трансформатора Льюиса с использованием 64-х передающих коаксиальных линий и 32-х управляемых транзисторных ключей. Входы передающих линий, сгруппированных по восьми секциям, через транзисторные ключи (по 4 в каждой секции) сопряжены с емкостными накопителями, при этом

каждый ключ обеспечивает подключение к емкостным накопителям входов двух линий данной секции.

Выходы передающих линий соединены параллельно-последовательно так, что выходы линий, относящихся к одной секции, соединяются параллельно (суммирование токов), а выходы линий разных секций — последовательно (суммирование напряжений). При замкнутом состоянии ключей и отсутствии обратных токов по наружным оплеткам линий на согласованной нагрузке формируются напряжение и ток, определяемые соотношениями:  $U = Nu$ ,  $I = nu/\rho$ , где  $U$  — напряжение на выходе генератора,  $u$  — напряжение на входе передающей линии (на емкостных накопителях),  $I$  — выходной ток генератора,  $N$  — число секций,  $n$  — число передающих линий в секции,  $\rho$  — импеданс передающей линии.

Замыкание и размыкание транзисторных ключей выполняется синхронно путем подачи импульсов управления на их входы. Длительность формируемых импульсов определяется временем нахождения ключей в замкнутом состоянии, которое незначительно превышает длительность управляющих импульсов.

Электрическая схема генератора, в которой с целью упрощения параллельные линии и ключи, относящиеся к одной секции, представлены одной обобщенной линией и одним обобщенным ключом, приведена на рис. 1, где  $\rho_s = \rho/8$  — волновое сопротивление обобщенной линии,  $Z_i$  — импедансы каналов распространения обратных токов по конструктивным линиям, образуемым наружными оплетками передающих коаксиальных линий и корпусом.

Управляемые ключи выполнены на основе сверхбыстродействующих IGBT-транзисторов FGL40N120 фирмы Fairchild Semiconductor. Достоинствами этих транзисторов являются высокая скорость коммутации ( $<15$  нс), большой коммутируемый ток ( $>64$  А), высокое рабочее напряжение (до 1200 В) и низкое остаточное напряжение насыщения коллектор–эмиттер (3 В).

Управляются IGBT-транзисторы с помощью драйверов IXDN414PI фирмы IXYS Corporation, которые отличаются большим пиковым током управления (14 А) и коротким временем нарастания тока ( $<15$  нс). Широкий диапазон рабочих напряжений драйвера позволяет надежно переводить управляемые транзисторы в режим насыщения.

Схема управления IGBT-транзисторами приведена на рис. 2. Формирователь управляющих импульсов представляет собой усилитель мощности, формирующий импульсы управления с амплитудой, необходимой для драйверов ключей, по длительности совпадающие с внешними импульсами синхронизации. Выполнен формирователь на основе той же микросхемы IXDN414PI.

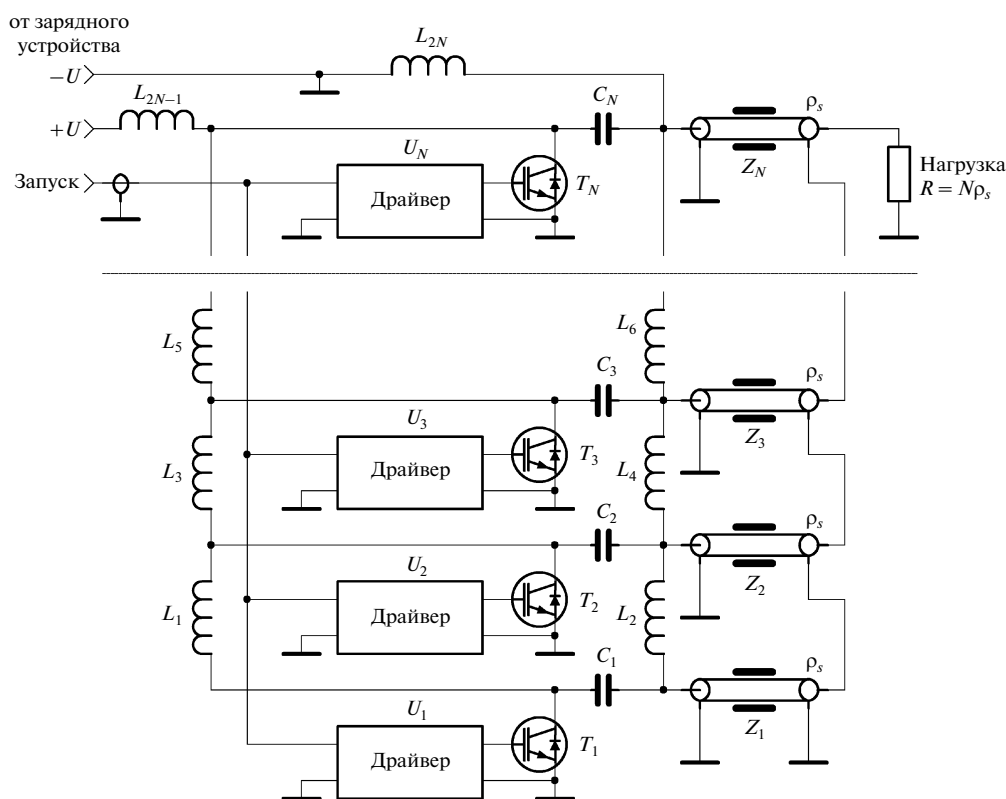
В качестве емкостных накопителей секций  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) используются керамические кон-

денсаторы К15-5 с низким эквивалентным последовательным сопротивлением, заряд которых осуществляется с помощью управляемого источника питания параллельно с процессом формирования импульсов.

Варьирование длительности и частоты следования выходных импульсов генератора обеспечивается управляемыми транзисторными ключами, а варьирование их амплитуды достигается изменением напряжения заряда конденсаторов. Фронт и спад импульсов, в основном, определяются динамическими свойствами транзисторных ключей.

## КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА

Генератор имеет секционированную аксиальную конструкцию, в которой секции сопряжены последовательно. Каждая секция генератора использует восемь параллельных отрезков кабеля РК50-1.5-11, имеющих общее волновое сопротивление 6.25 Ом. Блокирование токов по наружным оплеткам передающих линий выполнено путем формирования из них высокоимпедансных участков линий спирального и квазиаксиального типов с использованием кольцевых ферритовых сердечников К100-60-15 из ферритового материала 100НН с критической частотой 30 МГц.



**Рис. 1.** Упрощенная электрическая схема генератора.  $\rho_s = \rho/n$  – волновое сопротивление обобщенной линии одной секции;  $n$  – число передающих линий в секции;  $Z_i$  – импедансы каналов распространения обратных токов;  $L_1 - L_{2N}$  – развязывающие индуктивности;  $N$  – число секций;  $T_1 - T_N$  – IGBT-транзисторы FGL40N120.

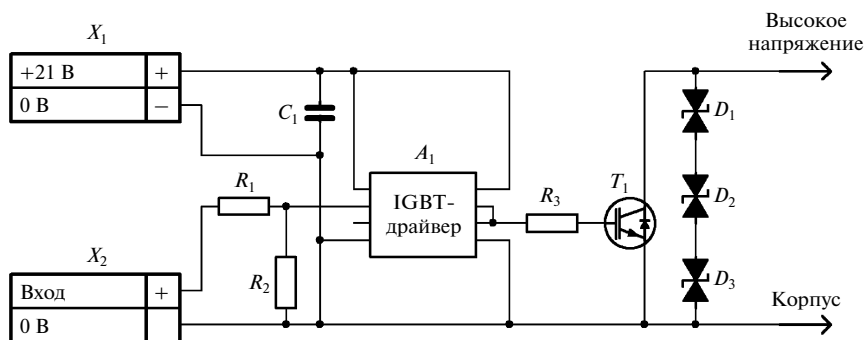


Рис. 2. Схема полупроводникового ключа.  $A_1$  – IXDN414PI;  $T_1$  – FGL40N120;  $D_1$ – $D_3$  – P6KE400CA.

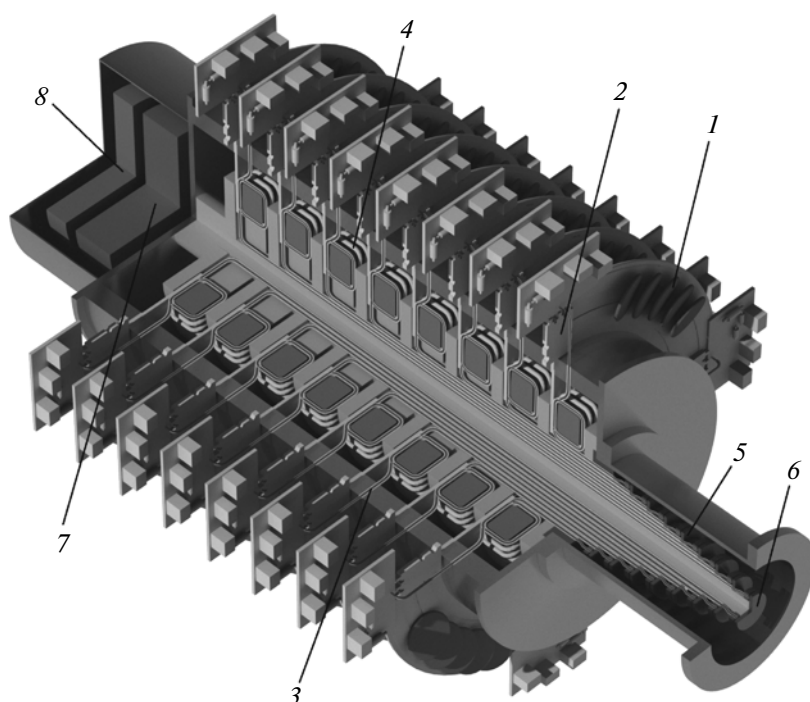


Рис. 3. Конструкция генератора. 1 – накопительные конденсаторы; 2 – IGBT-ключи; 3 – кабельные линии; 4 – замедляющая спиральная линия; 5 – сумматор; 6 – высоковольтный выход; 7 – зарядное устройство; 8 – запускающее устройство.

На квази coaxialных участках линий, образованных оплетками коаксиальных кабелей и корпусом, кабели проходят внутри ферритовых сердечников низковольтных секций, а на спиральных участках кабели намотаны на эти сердечники (рис. 3). При этом индуктивность спиральных участков линий составила  $\sim 16$  мкГн при характеристическом волновом сопротивлении  $\sim 5$  Ом на секцию, а квази coaxialных – от 0.3 до 2.4 мкГн при характеристическом волновом сопротивлении  $\sim 200$  Ом на секцию.

Наружные тоководы входов всех передающих кабелей соединены с корпусом, а внутренние то-

ководы – с одной из обкладок емкостных накопителей, вторая обкладка которых через транзисторные коммутаторы соединяется с корпусом. С целью минимизации индуктивности цепи разряда соединения выполняются шиной из медной фольги, на которую монтируются накопительные конденсаторы. Общая емкость накопителей одной секции равна 200 нФ.

Емкостные накопители соседних секций отделены друг от друга развязывающими индуктивностями по 0.5 мкГн, а восьмая секция отделена от источника питания индуктивностями 0.5 мГн.

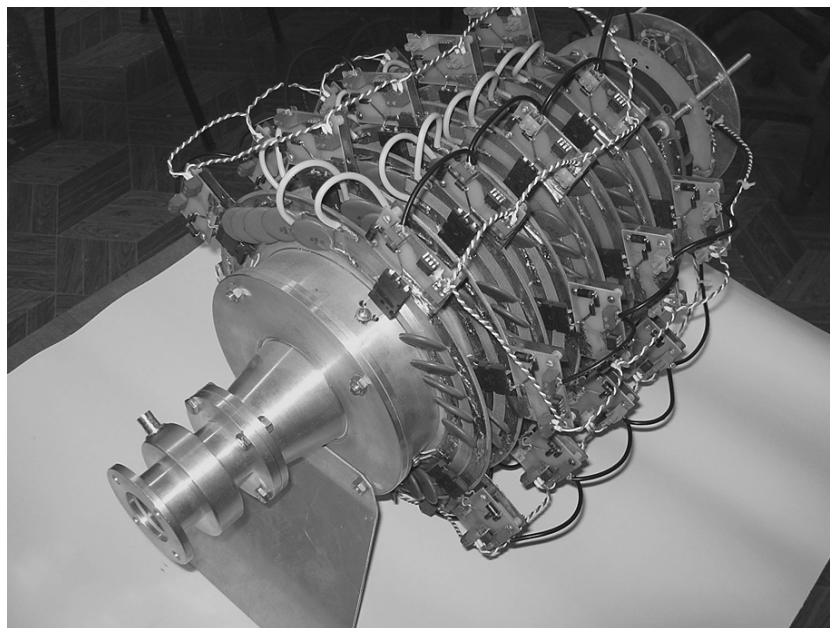


Рис. 4. Внешний вид генератора.

Отпирание транзисторных ключей всех секций выполняется с помощью идентичных управляющих импульсов, поступающих на их входы по коаксиальным управляющим кабелям от общего устройства управления, расположенного в торцевой части генератора. При этом различие в длине управляющих линий соответствует различию в длине коаксиальных передающих линий, что при идентичной работе ключей обеспечивает одновременность появления импульсов на выходе передающих линий. Конструкция генератора приве-

дена на рис. 3, его внешний вид показан на рис. 4, а расположение передающих линий в сечении генератора — на рис. 5.

## ТЕСТИРОВАНИЕ

Тестирование генератора проводилось с целью определения его работоспособности в различных режимах формирования импульсов. Измерения проводились осциллографом Tektronix 3052B с аналоговой входной полосой 500 МГц при входном импедансе канала измерения осциллографа 50 Ом. Динамические свойства ключей, характе-

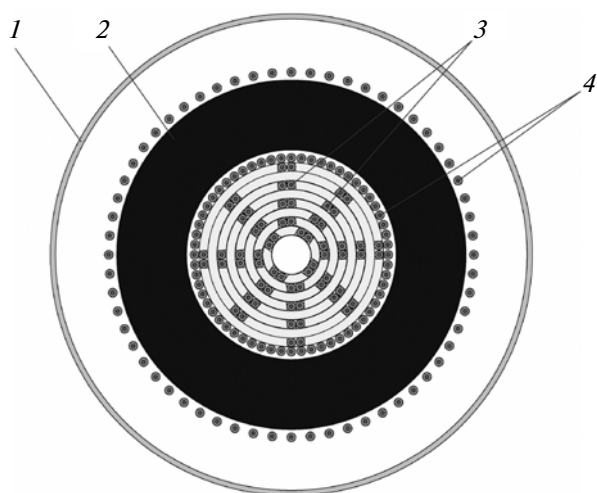


Рис. 5. Расположение передающих линий. 1 — корпус; 2 — ферритовое кольцо; 3 — квазикоаксиальный участок обратного токовода; 4 — спиральный участок обратного токовода.

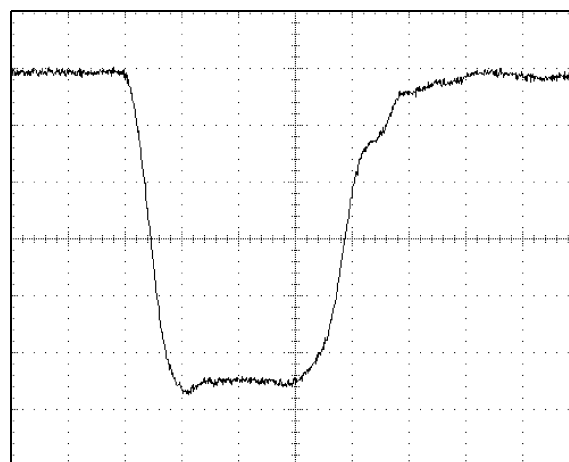


Рис. 6. Динамика тока на входе в частичную линию. Масштаб по вертикали 4.2 А/деление, по горизонтали — 20 нс/деление.

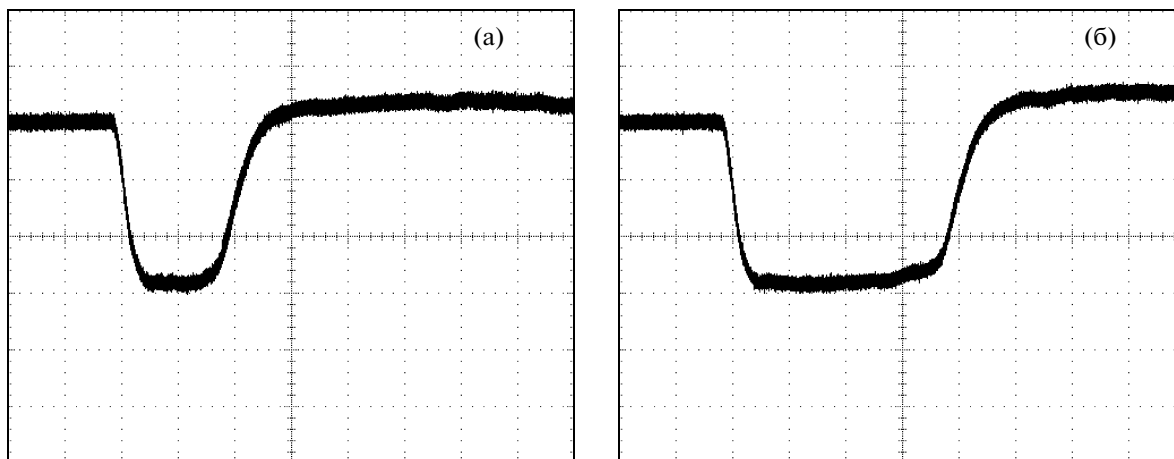


Рис. 7. Осциллограммы серий импульсов длительностью 80 нс (а), 160 нс (б). Напряжение на нагрузке 50 Ом. Масштаб по вертикали 3.2 кВ/деление, по горизонтали – 40 нс/деление; частота следования 2 кГц (а), 1 кГц (б).

ризирующие скорости нарастания и спада тока на входах парциальных линий, иллюстрирует осциллограмма тока, приведенная на рис. 6. Формирующие свойства генератора в целом иллюстрируют осциллограммы выходного импульса на рис. 7.

### ВЫВОДЫ

Изложен подход к реализации генератора прямоугольных высоковольтных наносекундных импульсов мультимегаваттного уровня мощности на основе трансформатора Льюиса и современных IGBT-транзисторов. Создан экспериментальный образец генератора с параметрами: мощность до 1.8 МВт, напряжение до 9.5 кВ, длительность импульсов 20–200 нс, длительность фронта импульсов 15 нс, частота их следования до 2 кГц. Используемые электрическая и конструктивная схемы генератора, при незначительных изменениях, могут быть использованы при создании генераторов

прямоугольных наносекундных импульсов мощностью и напряжением до 25 МВт и 50 кВ соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-08-00122-а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewis I.A.D., Wels F.H. Millimicrosecond pulse techniques. L.: Pergamon, 1959.
2. Fitch R.A., Howell V.T.S. // Proc. Inst. Elect. Eng. 1964. V. 111. P. 849.
3. Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнёв В.В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. М.: Энергия, 1970.
4. Павловский А.И., Склизков Г.В. // ПТЭ. 1962. № 2. С. 52.
5. Yen B., Davis B., Bootch R. // Proc. Particle Accel. Conf. 1999. V. 3. P. 1506.
6. Yan K., Pemen A.J.M. // Proc. 325th IEEE Int. Power Modulator Symp. 2002. P. 420.