

03;04;06;12

## **Генерирование высоковольтных субнаносекундных импульсов с пиковой мощностью до 300 MW и частотой повторения 2 kHz**

© М.И. Яландин, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский,  
М.Р. Ульмаскулов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 9 августа 2000 г.

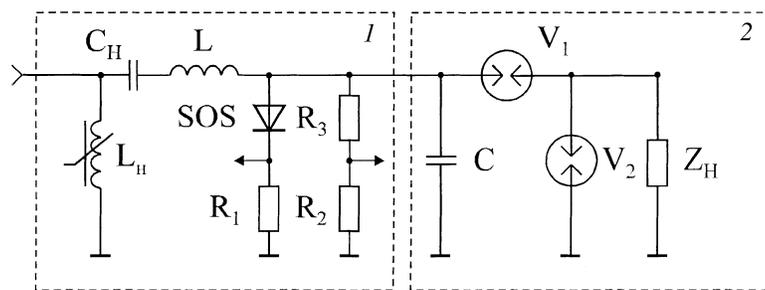
Представлены результаты испытаний гибридного субнаносекундного модулятора с выходным сопротивлением  $50 \Omega$ , основанного на полностью твердотельном высоковольтном наносекундном зарядном источнике с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока и обострителе импульсов с газовыми разрядниками. Обостряющий и срезающий разрядники, заполненные водородом под давлением 100 ат, обеспечивали формирование стабильных импульсов с амплитудой до 140 kV длительностью  $\sim 500$  ps на частоте повторения до 2 kHz.

1. Для совершенствования генераторов мощных сверхширокополосных электромагнитных импульсов [1–3] и СВЧ-импульсов субнаносекундной длительности [4] требуются модуляторы, обеспечивающие высокую пиковую и среднюю мощность. Рост пиковой мощности достигается увеличением выходного напряжения, а увеличение средней мощности обеспечивается повышением частоты повторения. Особые требования предъявляются к стабильности генерируемых импульсов, которая должна быть не хуже, чем у субнаносекундных модуляторов с полупроводниковыми коммутаторами [5]. Последние на данный момент имеют ограничения по амплитуде и пиковой мощности. Так, при использовании в качестве выходного коммутатора дрейфового диода с резким восстановлением, формирующего импульсы длительностью около 1–2 ns, максимальные достигнутые значения по пиковой мощности и амплитуде составляют 64 MW и 80 kV соответственно [6]. Диодные обострители на основе задержанной ионизационной волны позволяют получать субнаносекундные импульсы с фронтом около 200 ps, однако

пиковые значения мощности и амплитуды здесь еще ниже: 500 kV и 5 kV [5]. Формирование более мощных субнаносекундных импульсов по-прежнему остается прерогативой устройств с емкостными накопителями энергии (короткими формирующими линиями) и искровыми разрядниками [7–9]. При работе с частотой повторения более 100 Hz разрядники целесообразно заполнять водородом, отличающимся высокой скоростью восстановления электрической прочности [10]. В этом случае для обеспечения приемлемой стабильности не требуется усложнять разрядник системами продувки газа [11] или управляемой коммутации [12,13]. Противоречивые требования, предъявляемые к электрической прочности изоляции миниатюрного субнаносекундного емкостного накопителя и к высокому уровню предпробойного перенапряжения разрядника, заставляют использовать быструю (за единицы наносекунд) зарядку формирующей линии. Стабильность источника короткого зарядного импульса (драйвера) существенно влияет на разброс напряжения пробоя разрядника. Таким образом, для создания мощных модуляторов высоковольтных субнаносекундных импульсов требуются наносекундные драйверы, которые бы обеспечивали стабильную зарядку накопителя при высоких частотах повторения.

В настоящей работе представлены первые результаты испытаний нового модулятора с высокой частотой повторения, впервые объединившего твердотельный наносекундный драйвер с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока (SM-3NS) [14] вместе с субнаносекундным формирователем импульсов на основе газовых разрядников сверхвысокого давления [8]. Создание экспериментального макета такого модулятора стало возможным после исследований режимов работы полупроводникового прерывателя, позволивших обеспечить на выходе драйвера длительности импульсов менее 10 ns [14]. Модулятор испытан в режиме частот повторения 100–2000 Hz. В качестве рабочего газа разрядников использовался водород под давлением 100 ат. Для сравнения проведены эксперименты при азотном заполнении. Циркуляция газов в зазорах разрядников не применялась.

2. Наносекундный драйвер SM-3NS представляет собой несколько ступеней компрессии энергии в виде промежуточных емкостных накопителей, импульсного трансформатора и твердотельных коммутаторов: тиристоров и магнитных насыщающихся ключей. Выходной каскад был выполнен в виде последовательного контура (рис. 1), где кроме емкостного накопителя и магнитного ключа расположен индуктивный накопитель и сильноточный высоковольтный полупроводниковый



**Рис. 1.** Схема выходных каскадов субнаносекундного модулятора с частотой повторения 2 kHz: 1 — наносекундный драйвер, 2 — субнаносекундный формирователь.

прерыватель тока (сборка из SOS диодов [15]). При срабатывании прерывателя на разомкнутом выходе достигалось напряжение до 400 kV при длительности импульса на полувывоте  $\sim 6$  ns. Драйвер обеспечивал работу в пакетном режиме на частоте повторения до 2 kHz. Мониторинг параметров, производившийся с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS684 в режимах накопления "ENVELOP" и усреднения по большому (до 1000) количеству импульсов, показал, что стабильность генерируемых зарядных импульсов не выходила за пределы паспортной точности регистрации для осциллографа упомянутого типа.

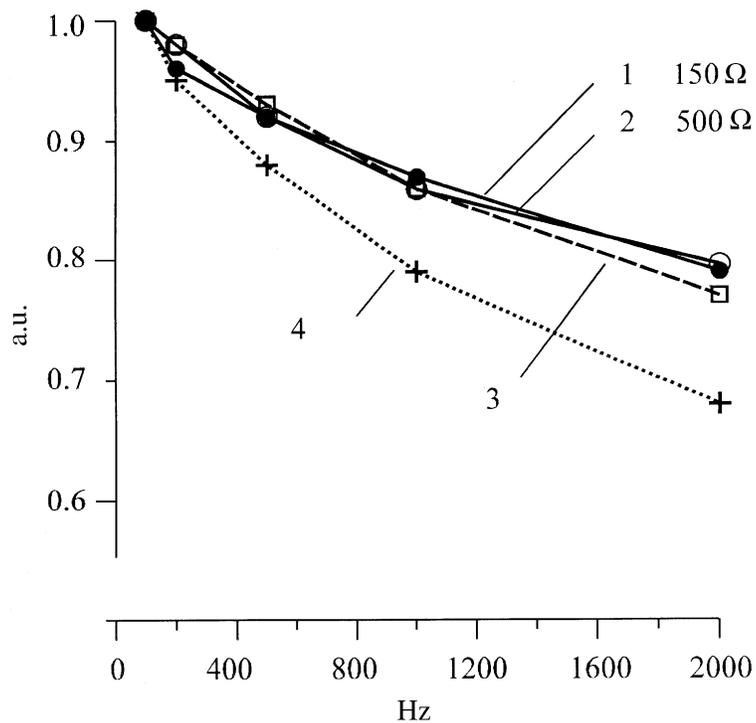
Драйвер SM3-NS использовался в качестве зарядного устройства формирующей линии с волновым сопротивлением  $50 \Omega$  и емкостью  $\sim 12$  pF. Конструктивно линия была совмещена с блоком газовых разрядников сверхвысокого давления (до 100 ат). Формирование импульсов 1 ns происходило по принципу обострения и среза зарядного импульса. Первым срабатывал обостряющий разрядник, а затем, с некоторой регулируемой задержкой, — срезающий. Разрядники имели единую газовую среду. Оба искровых зазора могли плавно регулироваться непосредственно во время работы модулятора. В режиме максимальной зарядки при частотах повторения импульсов до 100 Hz формирующая линия заряжалась до  $\sim 300$  kV. Напряжение пробоя разрядника-обострителя настраивалось близким к этой максимальной величине. Тем не менее пропуски срабатывания разрядника нами не наблюдались. Нагрузкой модулятора являлась 50-омная коаксиальная маслonaполненная линия. В качестве датчика для регистрации формируемых импульсов исполь-

зовался калиброванный емкостный делитель напряжения с переходной характеристикой 120 ps.

3. В представляемых экспериментах драйвер SM-3NS работал в режиме ограниченной мощности, обусловленной сопротивлением проводов сети ( $3 \times 380 \text{ V}$ , 50 Hz). Поэтому при увеличении частоты повторения импульсов до 2 kHz наблюдался плавный спад напряжения как на входном фильтре, так и далее, по каскадам драйвера. В результате снижались прямой и обратный токи накачки SOS-диодов и, как следствие, напряжение на индуктивном накопителе в момент обрыва тока в SOS-диодах. Зависимости выходного напряжения драйвера от частоты повторения были получены при подключении двух различных резистивных нагрузок (рис. 2). Соответствующие кривые 1 и 2 в каждом случае нормированы на максимальное значение амплитуд, достигавшихся при частотах повторения в диапазоне 0–100 Hz. В результате данных измерений было показано, что динамика спада амплитуды выходного импульса драйвера с ростом частоты повторения не зависела от величины нагрузки. Этот факт учитывался в дальнейшем при определении реального снижения амплитуды выходного субнаносекундного импульса при повышенных частотах повторения модулятора.

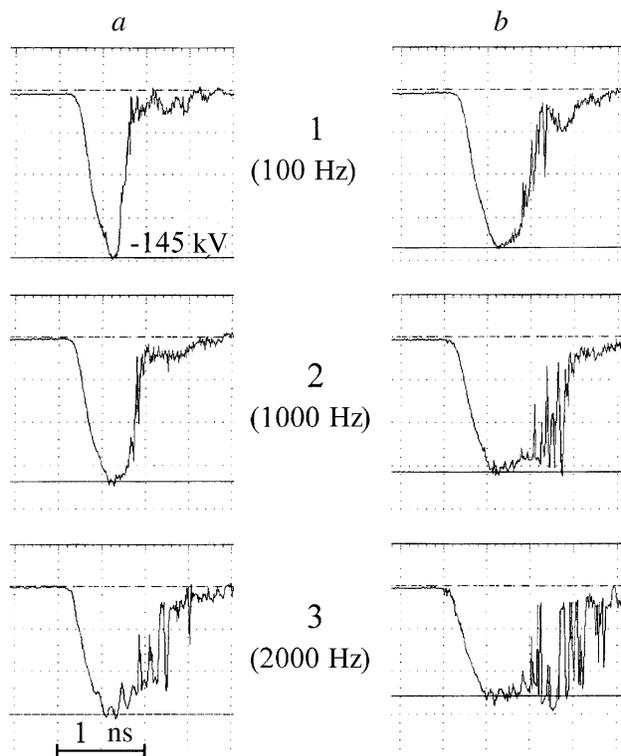
На рис. 3 представлена последовательность осциллограмм выходных импульсов, зарегистрированных при различных частотах повторения субнаносекундного модулятора. Каждая осциллограмма получена в режиме 500 импульсов с помощью цифрового стробоскопического осциллографа Tektronix TDS820 (полоса регистрации 6 GHz). Рабочими газами разрядников являлись водород (100 ат, рис. 3, а) или азот (60 ат, рис. 3, б).

При водородном заполнении (рис. 3, а) зазоры разрядников преобразователя настраивались при частоте повторения модулятора 100 Hz для получения стабильных импульсов максимальной амплитуды и минимальной ( $\sim 400 \text{ ps}$ ) длительности (рис. 3, а-1) и в дальнейшем не менялись. В силу отмеченной выше особенности режима работы наносекундного драйвера с ростом частоты повторения импульсов от 100 до 2000 Hz зарядное напряжение формирующей линии снижалось на 20–21% (рис. 2, кривые 1, 2). При этом спад амплитуды выходного субнаносекундного импульса составил  $\sim 23\%$ , а с учетом нормировки на максимальную амплитуду (при частоте повторения 100 Hz) эта зависимость (рис. 2, кривая 3) практически совпала с кривыми 1 и 2 на том же рисунке. Максимальная амплитуда импульса в режиме



**Рис. 2.** Зависимость амплитуд выходных импульсов при изменении частоты повторения: 1 и 2 — амплитуда импульсов наносекундного драйвера с нагрузками 150 и 500  $\Omega$ , 3 — амплитуда субнаносекундного импульса при водородном заполнении разрядников; 4 — амплитуда субнаносекундного импульса при азотном заполнении разрядников.

работы с частотой повторения 100 Hz достигала  $\sim 145$  kV, что было близко к половине зарядного напряжения накопителя, где перед пробоем разрядника запасалась энергия 0.5 J. Пиковая мощность импульсов составила  $\sim 300$  MW. С ростом частоты повторения до 2000 Hz запасаемая энергия снижалась до 0.3 J, а средняя мощность на 50-омном выходе модулятора достигала 0.3 kW. Таким образом, зависимость (3) на рис. 2 показала, что в диапазоне коммутируемых энергий менее 1 J скорость восстановления электропрочности водородного разрядника приемлема



**Рис. 3.** Осциллограммы субнаносекундных импульсов модулятора, полученные в случае водородного (*a*) и азотного (*b*) заполнения разрядников при различных частотах повторения.

для генерирования импульсов с частотами повторения импульсов до 2000 Hz практически без снижения амплитуды.

С ростом частоты повторения снижение зарядного напряжения линии на 20–21% при времени зарядки  $\sim 5$  ns практически не влияло на длительность переднего фронта, формируемого обостряющим водородным разрядником. Время запаздывания пробоя срезающего разрядника при фиксированном зазоре увеличивалось. В диапазоне 100–1000 Hz задний фронт импульса затягивался от 100 до 200 ps. Это происходило, когда электрическое поле в срезающем зазоре снижалось на 13%.

Между тем длительность импульса, укороченного срезающим разрядником, оставалась стабильной: разброс на полувысоте не превышал 100 ps. С дальнейшим снижением предпробойного напряжения (с 13 до 23%) момент коммутации срезающего разрядника терял временную стабильность. На осциллограмме стробоскопического осциллографа нестабильность длительности выражалась в виде хаотической последовательности пиков на затянутом "заднем фронте" (рис. 3, *a-3*). Ясно, что приведенные факты никоим образом не характеризуют скорость восстановления электрической прочности газовой среды срезающего разрядника. Для любой из частот повторения в диапазоне 100–2000 Hz зазор разрядника мог быть перестроен (уменьшен) для получения импульсов приблизительно такой же формы, как на рис. 3, *a-1*, но при сниженной амплитуде.

Анализ осциллограмм (рис. 3, *b*) при работе разрядников с азотным заполнением показал, что спад амплитуды выходного импульса (напряжения пробоя обострителя) с ростом частоты повторения модулятора оказался значительным. Абсолютное значение спада составило 32–33% (рис. 2, кривая 4), а в сравнении с амплитудой зарядного импульса, которую реально обеспечивал наносекундный драйвер (рис. 2, кривые 1 и 2), снижение достигло 15%. Уже на частоте повторения 100 Hz стабильность длительности импульса на полувысоте не превышала 200–300 ps.

4. Таким образом, предварительные испытания нового субнаносекундного модулятора показали перспективность интегрирования зарядного устройства на основе высоковольтного наносекундного драйвера с твердотельными коммутаторами и обострителя импульсов с водородными разрядниками сверхвысокого давления. Объединение этих двух устройств позволяет получать стабильные импульсы с амплитудой ~ 150 kV и выше при длительности менее 500 ps и частотах повторения более 1000 Hz. В представленных экспериментах количество импульсов в пакете на частоте повторения 2 kHz достигало  $10^4$ . Эта величина не имела принципиальных физических ограничений.

## Список литературы

- [1] Астахин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 192 с.
- [2] Shpak V.G. et al. // Proc. of X IEEE Intern. Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM, USA. 1995. P. 666–671.

- [3] *Agee F.J.* et al. // Proc. of SPIE Intern. Symposium Intense Microwave Pulses III. V. 2557. San Diego, CA, USA. 1995. P. 98–109.
- [4] *Ginzburg N.S.* et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 3297–3304.
- [5] *Тучкевич В.М., Грехов И.В.* Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л.: Наука, 1988. 117 с.
- [6] *Грехов И.В.* // Изв. АН. Сер. Энергетика. 2000. № 1. С. 53–62.
- [7] *Ковальчук Б.М.* и др. // ПТЭ. 1976. № 6. С. 73–75.
- [8] *Mesyats G.A.* et al. // Proc. of SPIE Intern. Symposium Intense Microwave Pulses. V. 2154. Los Angeles, CA, USA. 1994. P. 262–268.
- [9] *Shpak V.G.* et al. // Proc. of XII IEEE Intern. Pulsed Power Conference. V. 2. Monterey, California, USA. 1999. P. 692–695.
- [10] *Grothaus M.G.* et al. // Proc. of IX IEEE Intern. Pulsed Power Conference. V. 1. Albuquerque, NM, USA. 1993. P. 475–478.
- [11] *Ельчанинов А.С.* и др. // ПТЭ. 1979. № 4. С. 162–164.
- [12] *Быков Н.М.* и др. // ПТЭ. 1988. № 6. С. 96–99.
- [13] *Shpak V.G.* et al. // Proc. of X IEEE Intern. Pulsed Power Conference. V. 2. Albuquerque, NM, USA. 1995. P. 544–549.
- [14] *Lybutin S.K.* et al. // Proc. of XII IEEE Intern. Pulsed Power Conference. V. 2. Monterey, California, USA. 1999. P. 1226–1229.
- [15] *Рукин С.Н.* // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5–36.