

Формирование биполярных наносекундных импульсов различной длительности в схеме с одним разрядником

А.М. Ефремов^{}, В.М. Алексеенко*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия,

^{}efremov@oit.hcei.tsc.ru*

Абстракт. Показана принципиальная возможность формирования биполярных импульсов различной длительности в схеме с одним разрядником. Создан четырехканальный формирователь синхронных биполярных импульсов с амплитудой до 80 кВ, длительностью 1 нс (2 канала) и 2 нс (2 канала) и частотой повторения 100 Гц на нагрузках по 50 Ом. По сравнению с аналогичными формирователями, где каждый канал имеет два разрядника, данный формирователь отличается более стабильными выходными параметрами и простотой настройки схемы.

Ключевые слова: высоковольтные биполярные импульсы, разрядники высокого давления.

1. Введение

Высоковольтные биполярные импульсы наносекундной длительности применяют для возбуждения антенн СШП излучения [1]. Отсутствие в спектре биполярного импульса постоянной составляющей позволяет эффективно преобразовать энергию импульса в энергию электромагнитного излучения. Важной задачей здесь является расширение спектра мощных импульсов излучения. При заданной длительности биполярного импульса полоса частот излученного импульса ограничена полосой частот возбуждающего импульса. Расширить полосу частот излученного импульса возможно за счет возбуждения антенных решеток биполярными импульсами различной длительности. Данный подход развивался в работах [2–4]. В таких СШП источниках различают два режима: режим максимальной напряженности поля и режим с максимальной шириной спектра излучения. В первом случае все биполярные импульсы различной длительности должны быть сведены по моменту времени нулевого перехода, а во втором импульсы синхронизированы по передним фронтам. Как правило, сведение импульсов делается дополнительными вставками коаксиальных линий в передающие тракты. В обоих режимах работы источника требуется жесткая синхронизация биполярных импульсов, как по передним фронтам, так и по моменту времени нулевого перехода. Для возбуждения четырехэлементной антенной решетки были созданы четырехканальные генераторы биполярных импульсов в комбинациях с длительностями импульса 0.5, 1, 2 и 3 нс. Четырехканальные формирователи биполярных импульсов были собраны по схеме с разомкнутой линией [5]. Эта схема содержит отрезки коротких коаксиальных линий и два газовых разрядника высокого давлением в каждом канале. Схема формирования была довольно сложная в настройке. Использовалось до 9 разрядников (включая и разрядник в промежуточной ступени обострения), расположенных в 5 газовых объемах высокого давления. Для субнаносекундной времени срабатывания разрядников требовалась тщательная настройка зазоров в разрядниках. Стабильность излученного импульса по амплитуде такого источника довольно низкая на уровне 9%.

Целью данной работы является создание четырехканального формирователя биполярных импульсов с различной длительностью, в схеме которого используется только один разрядник высокого давления. В настоящее время на наш взгляд наиболее перспективной схемой формирования биполярных импульсов является схема с одним разрядником, предложенная в работе [6] и показанная на Рис.1. Здесь формирующая линия состоит из двух последовательно соединенных линий FL_1 и FL_2 . с волновыми сопротивлениями ρ и суммарной электрической длиной τ . Разрядник S коммутирует

формирующие линии одновременно и на «землю», и на нагрузку. При зарядке формирующих линий через развязывающую индуктивность L до напряжения U_0 и срабатывании разрядника в нагрузке $R = \rho$ формируется биполярный импульс напряжения с амплитудой $U_0/2$ и длительностью 2τ . Созданный по такой схеме четырехканальный генератор имел амплитуду напряжения $\pm 60\text{--}80\text{ кВ}$ на нагрузке $R = 12.5\text{ Ом}$ [7]. В зависимости от электрической длины τ генератор способен формировать биполярные импульсы длительностью 1 или 2 нс. К выходу генератора возможно подключение четырех антенн по 50 Ом каждая.

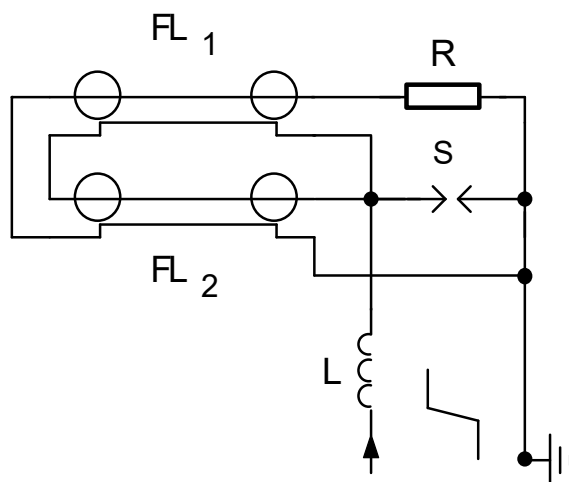


Рис.1. Схема формирования биполярных импульсов с одним разрядником.

2. Принципиальная схема четырехканального формирователя биполярных импульсов различной длительности

Схему формирования с одним разрядником можно расширить для формирования синхронных биполярных импульсов с длительностями 1 нс и 2 нс. На Рис.2 показана принципиальная схема четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 1 нс (2 канала) и 2 нс (2 канала). Формирующие линии $FL_1\text{--}FL_8$ заряжались с частотой 100 Гц от генератора СИHУС-160. При срабатывании разрядника S в передающих линиях $FL_9\text{--}FL_{12}$, нагруженных на согласованные нагрузки R , формировались синхронные биполярные импульсы с длительностями 1 и 2 нс. Схема моделировалась по программе PSpice. В расчетах разрядник S имел коммутацию близкую к идеальной с временем коммутации $TRAN = 0.5\text{ нс}$. Расчетные импульсы зарядного напряжения U_z и биполярные импульсы на входе в передающие линии $FL_{10}\text{--}FL_{13}$ представлены на Рис.3. Регулируя электрические длины передающих линий, можно синхронизировать биполярные импульсы в нагрузках по передним фронтам или по точкам нулевых переходов.

3. Конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов различной длительности

Общий вид четырехканального генератора биполярных импульсов с длительностями 1 и 2 нс показан на Рис.4. Генератор состоит из генератора СИHУС-160 (1), четырехканального формирователя (2) с передающими линиями (3) и нагрузками, непоказанными на рисунке.

Конструкция формирователя приведена на Рис.5. Внутри корпуса под давлением азота 50 атм расположены формирующие линии $FL_1\text{--}FL_8$ и кольцевой разрядник S . Линии FL_1 ; FL_3 ; FL_5 и FL_7 имеют изоляцию из капролона. Все линии $FL_1\text{--}FL_8$ полосково-коаксиальные.

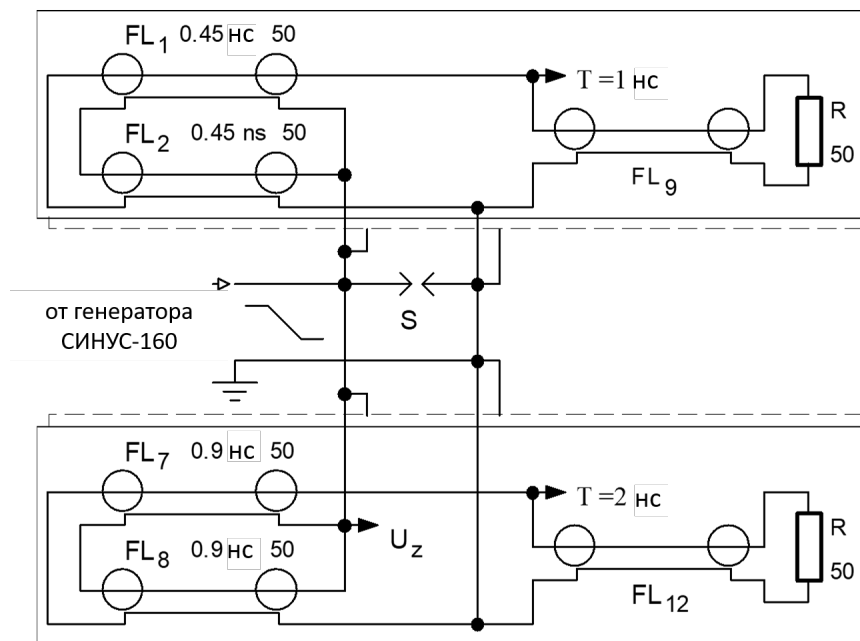


Рис.2. Принципиальная схема четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 1 и 2 нс.

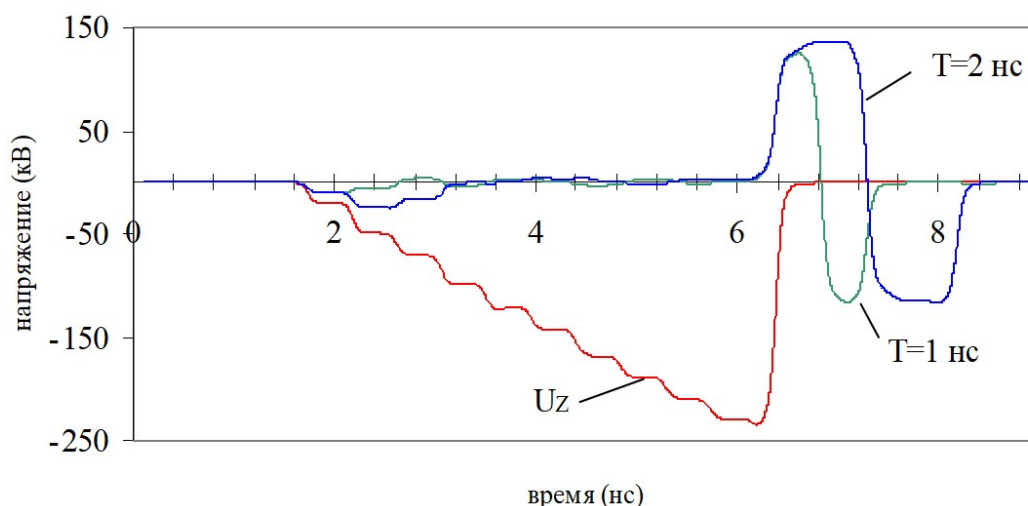


Рис.3. Расчетные импульсы зарядного напряжения на линиях FL₁–FL₈ и выходные биполярные импульсы напряжения на входе в передающие линии FL₉–FL₁₂.

Зарядный импульс от генератора СИНУС-160 поступает по центральному проводнику к потенциальным проводникам формирующих линий FL₁–FL₈. Кольцевой разрядник с диаметром 55 мм встроен в концы потенциальных проводников линий FL₁–FL₈. Электроды разрядника выполнены из меди. Межэлектродный зазор равен 1.4 мм. При срабатывании разрядника S биполярные импульсы выводятся по четырем передающим линиям FL₉–FL₁₂. В концы этих линий установлены нагрузки, не показанные на Рис.5. Идентичные по конструкции передающие линии FL₉–FL₁₂ с встроенными делителями напряжения на связанных линиях D₁–D₄ [8] имеют элегазовую изоляцию под избыточным давлением 4 атм. Капролоновые изоляторы разделяют газовые объемы формирователя и передающих линий. Регистрация выходных биполярных импульсов напряжения проводилась

осциллографом Tektronix TDS 6604 с полосой пропускания до 6 ГГц. Делители калибровались низковольтными биполярными импульсами.

При разработке конструкции четырехканального формирователя необходимо было решить ряд проблем. Основная проблема связана с размещением формирующих линий и разрядника в небольшом объеме под высоким давлением азота. Взаимное влияние проводников соседних линий должно быть минимальным, чтобы не было искажений форм выходных биполярных импульсов. Конструкция формирователя моделировалась с помощью программы CST Studio. Вторая проблема – это кольцевой разрядник. Он должен быть многоканальным, чтобы коммутировать формирующие линии с низким импедансом 12.5 Ом. Согласно работе [9] для многоканальной коммутации электроды кольцевого разрядника должны быть соосно выставлены с точностью ± 0.05 мм, а скорость нарастания напряжения на электродах должна быть не менее 10^{13} В/сек. Третья проблема – это подвод зарядного напряжения к формирующим линиям. Для формирования биполярных импульсов с равновесными амплитудами важна точка подсоединения зарядного напряжения к потенциальным проводникам формирующих линий. При замыкании разрядником на «землю» формирующих линий в последних распространяются перепады напряжения с амплитудами $+U_0$. Эти перепады могут гаситься паразитной емкостью подвода зарядного напряжения $-U_0$, что вызывает искажения второй полуволны биполярного импульса. Если зарядная цепь подсоединена к потенциальному электроду разрядника, то она отсекается разрядником накоротко и не участвует в формировании второй полуволны биполярного импульса.

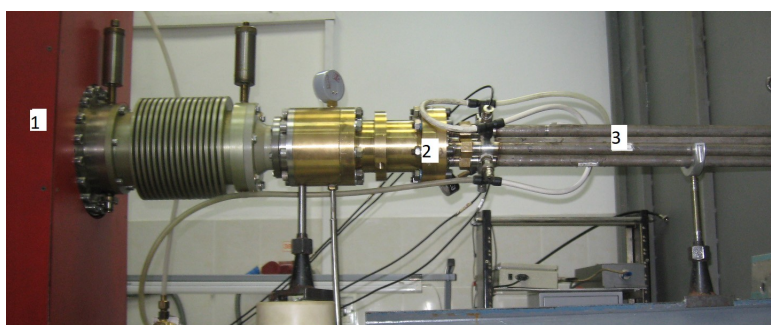


Рис.4 Общий вид четырехканального генератора биполярных импульсов.

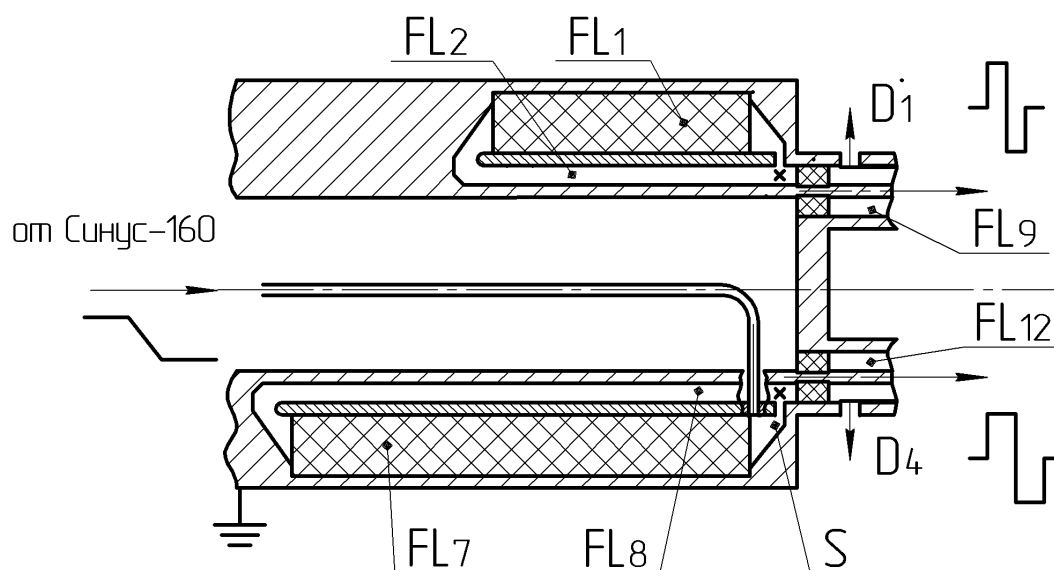


Рис.5. Конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Выходные биполярные импульсы, полученные с делителей D₁–D₄, показаны на Рис.6. Импульсы имеют амплитуды до 80 кВ и длительности ≈ 1 и ≈ 2 нс при частоте следования 100 Гц. При среднеквадратичном разбросе амплитуды зарядного напряжения генератора СИНУС-160 относительно средней около 1% среднеквадратичный разброс амплитуд биполярных импульсов относительно средней для всех каналов составлял менее 3%. Довольно стабильные длительности биполярных импульсов имели место в этой схеме формирования: среднеквадратичный разброс длительности в каналах не превышал 13 пс. Среднеквадратичный разброс времени Δ между передними фронтами биполярных импульсов в каналах составлял 20–23 пс (Рис.7), что указывает на стабильную многоканальную коммутацию кольцевого разрядника по всей поверхности электродов. При измерениях стабильности импульсов среднеквадратичный разброс запуска развертки осциллографа составлял 12 пс.

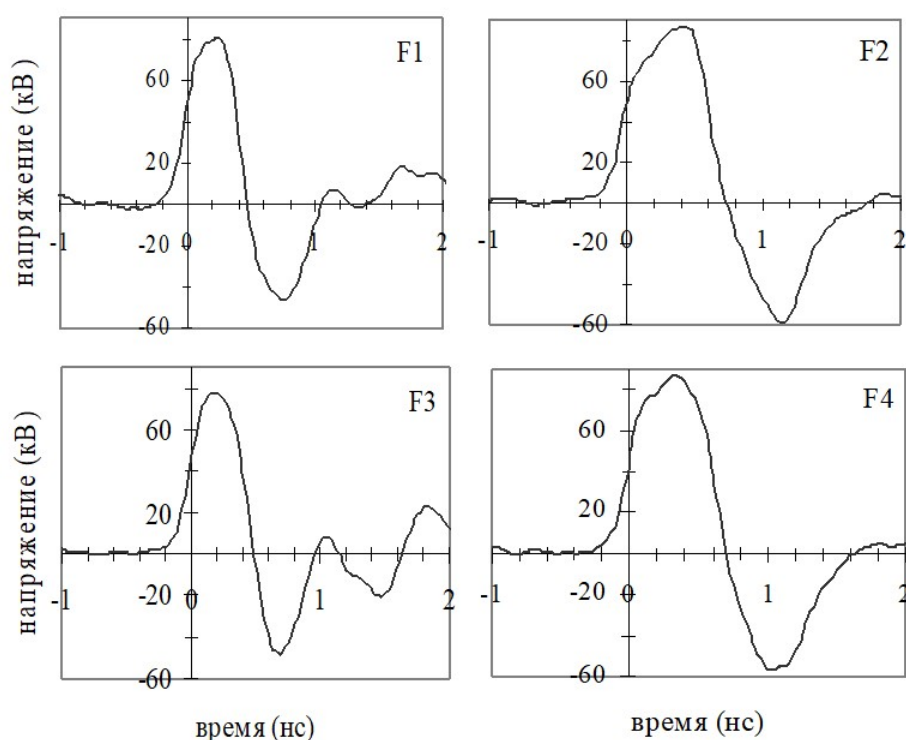


Рис.6. Осциллограммы выходных биполярных импульсов в каналах F1–F4, полученные с делителей D₁–D₄.

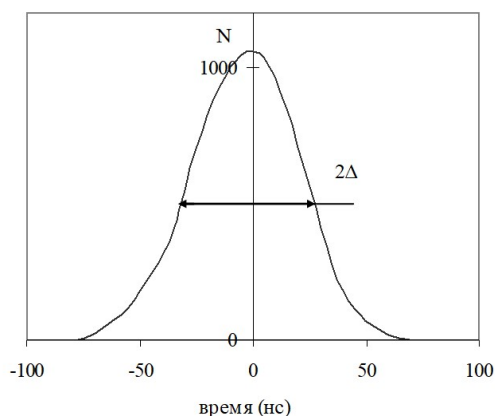


Fig.7. Гистограмма среднеквадратичного разброса времени Δ между передними фронтами биполярных импульсов в каналах F2 и F4.

На данном этапе исследований мы ограничились синхронным формированием биполярных импульсов с длительностями 1 и 2 нс. Принципиально возможно расширение спектра СШП-излучения возбуждением антенной решетки 2×2 биполярными импульсами, например, с длительностями 4, 3, 2 и 1 нс. Применение комбинированной антенны [1] с длительностью импульса 4 нс в качестве нагрузки ограничено из-за больших ее размеров. Расширение спектра в область более высоких частот можно получить с использованием биполярных импульсов, например, с длительностями 3, 2, 1 и 0.5 нс. Время коммутации многоканального разрядника недостаточно для формирования биполярного импульса с длительностью 0.5 нс. Для этих целей нужна промежуточная ступень обострения, состоящей из газового разрядника и коаксиальной линии. В настоящее время разработан четырехканальный генератор биполярных импульсов с длительностями 0.5 нс. Он состоит из генератора СИНУС-160, промежуточной ступени обострения и четырех независимых формирователей. Каждый формирователь собран по схеме с одним разрядником и способен формировать на нагрузке 50 Ом биполярные импульсы до 60–70 кВ.

5. Заключение

Таким образом, показана принципиальная возможность формирования синхронных биполярных импульсов длительностью 1 и 2 нс амплитудой до 80 кВ в схемах с одним разрядником. Такая схема формирования биполярных импульсов обладает рядом преимуществ по сравнению со схемами формирования с двумя разрядниками. Во-первых, она способна формировать более стабильные импульсы, как по амплитуде, так и по длительности импульса. Во-вторых, значительно упрощается настройка формирователя: достаточно установить необходимый зазор в разряднике и отрегулировать необходимое для его пробоя давление. В-третьих, повышается эффективность преобразования монополярного зарядного импульса в биполярный из-за сокращения потерь энергии в разрядниках.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00093 А).

6. Литература

- [1] Belichenko V.P., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I., *Ultrawideband Pulsed Radio Systems*, (Novosibirsk: Nauka, 2015).
- [2] Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A., *Instrum. Exp. Tech.*, **62**(1), 33, 2019; doi: 10.1134/S0020441218060052
- [3] Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A., *Rev. Sci. Instrum.*, **88**(9), 094705, 2017; doi: 10.1063/1.50034184.1.7
- [4] Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., *J. Communications Technology and Electronics.*, **65**(5), 480, 2020; doi.org/10.1134/S1064226920050046
- [5] Andreev Yu.A., et al., *Laser Part. Beams*, **21**(2), 211, 2003; doi: 10.1017/S0263034603212088
- [6] Andreev Yu.A., Buyanov Yu.I., Efremov A.M., Koshelev V. I., Kovalchuk B. M., Sukhushin K.N., Vizir V.A., Zorin V.B., *Proc. 11 IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, **1**, 730, 1997.
- [7] Efremov A., Alexeenko V., *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 267, Tomsk, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242086
- [8] Efremov A.M., *20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE)*, 117, Tomsk, 2018; doi: 10.1109/ISHCE.2018.8521230
- [9] Efremov A.M., *Instrum. Exp. Tech.*, **60**(4), 541, 2017; doi: 10.1134/S0020441217040030