

Формирование высоковольтных биполярных импульсов наносекундной длительности

*А.М. Ефремов**

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**efremov@oit.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Высоковольтные биполярные импульсы наносекундной длительности применяют для возбуждения антенн СШП электромагнитного излучения. Для формирования биполярных импульсов используют отрезки коротких коаксиальных линий и газовые разрядники с высоким давлением. По сравнению с монополярными импульсами биполярные импульсы обладают рядом преимуществ. В данной обзорной статье представлены и проанализированы схемы и конструкции формирователей биполярных импульсов, разработанные в ИСЭ СО РАН. Показана перспективность применения схемы с одним разрядником для формирования биполярных наносекундных импульсов с различными длительностями.

Ключевые слова: биполярные импульсы, источники СШП излучения.

1. Введение

Одним из методов генерации мощного СШП-излучения является прямое преобразование энергии высоковольтных электрических импульсов в энергию электромагнитных импульсов с помощью антенных систем. Для возбуждения СШП-антенн используют различные формы импульсов. В ИСЭ СО РАН на протяжении более 25 лет исследуют источники СШП излучения, основанные на возбуждении комбинированных антенн и антенных решеток биполярными импульсами наносекундной длительности.

Блок-схема источника СШП-излучения представлена на Рис. 1. Зарядный импульс от генератора типа «Синус» поступает в формирователь биполярных импульсов. В случае необходимости фронт зарядного импульса может быть укорочен в промежуточной ступени обострения. Для формирования биполярных импульсов используются отрезки коаксиальных линий и разрядники высокого давления. При срабатывании разрядников биполярный импульс выводится в антенну или антенную решетку по передающей линии со встроенным делителем напряжения. Данная статья посвящена схемам и конструкциям формирователей биполярных импульсов.

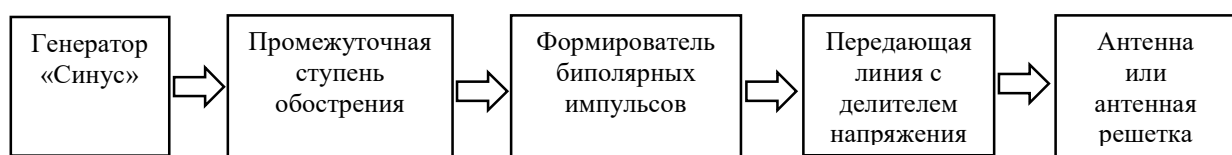


Рис. 1. Блок-схема источника СШП- излучения.

2. Формирователь биполярных импульсов с двумя разрядниками

Эта схема формирования биполярного импульса была предложена сотрудниками Института Электрофизики УрО РАН [1]. Схема состоит из формирующей линии FL_1 , двух разрядников S_{11} , S_{12} и нагрузки R (Рис. 2). Схема моделировалась в программе PSpice. Разрядники имели одинаковые коммутационные характеристики с временем коммутации $T_{RAN} = 0.5$ нс и внутренним сопротивлением, равным нулю (0). Допустим, линия FL_1 с электрической длиной $\tau = 1$ нс и волновым сопротивлением $\rho = R = 50$ Ом заряжалась через разделительную индуктивность L до напряжения U_0 . При одновременном срабатывании разрядников в нагрузке формируется биполярный импульс длительностью 2 нс и амплитудами $\pm U_0/2$. В случае срабатывания только разрядника S_{12} в нагрузке формируется монополярный импульс такой же длительности и амплитудой $U_0/2$. Недостатком такой

схемы формирования биполярных импульсов является то, что для получения стабильных биполярных импульсов требуется быстрая зарядка формирующей линии. Разрядники срабатывают независимо друг от друга, и каждый имеет свой разброс по времени срабатывания. Несинхронность их срабатывания приводит к нестабильной форме биполярных импульсов, как по амплитудам, так и по длительности.

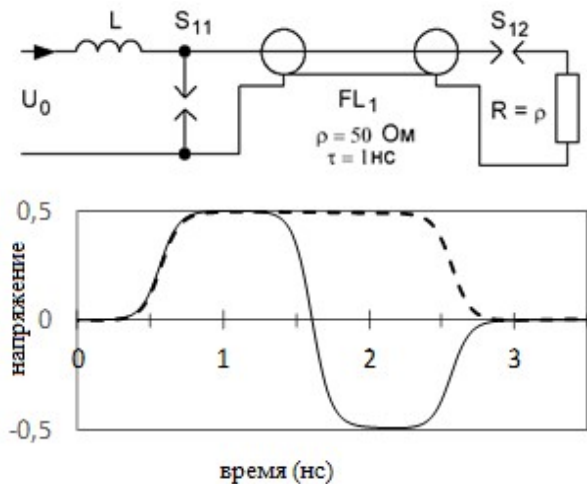


Рис. 2. Принципиальная схема формирования монополярного или биполярного импульсов с двумя разрядниками и расчетные импульсы на нагрузке.

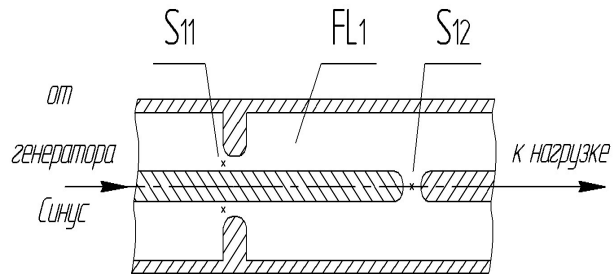


Рис. 3. Конструкция формирователя с двумя разрядниками. FL – формирующая линия, S_{11} и S_{12} – разрядники.

Конструкция такого формирователя показана на Рис. 3. Электроды разрядников встроены в проводники формирующей линии. В разработанном нами генераторе биполярных импульсов длительностью 3.5 нс и амплитудами ± 200 кВ на нагрузке 12.5 Ом [3] быстрая зарядка формирующей линии обеспечивалась за счет использования промежуточной ступени обострения, состоящей из коаксиальной линии и обостряющего разрядника, что усложняло конструкцию генератора биполярных импульсов.

3. Монополяр или биполяр?

На примере схемы, показанной на Рис. 2, удобно показать преимущества использования биполярных импульсов для возбуждения антенн по сравнению с монополярными. Биполярный импульс по сравнению с монополярным имеет следующие преимущества [2]. Во-первых, снижается вероятность пробоя изоляции антенны из-за более меньшей длительности воздействия полного напряжения и меньшей амплитуды отраженного импульса от входа в антенну. Во-вторых, расчетный спектр биполярного импульса расширен в область более высоких частот, следовательно, можно создавать более компактные передающие антенны. В-третьих, если оценить напряженность электрического поля E на приемной антенне как производную биполярного или монополярного импульсов на входе в передающую антенну, то амплитуда напряженности окажется в 2 раза больше у биполярного импульса (Рис. 4). Таким образом, при равных энергетических параметрах формирующей линии и одинаковых коммутационных характеристиках разрядников применение биполярных импульсов для возбуждения СШП антенн по сравнению с монополярными импульсами позволяет реализовать более высокие амплитуды напряженности электрического поля.

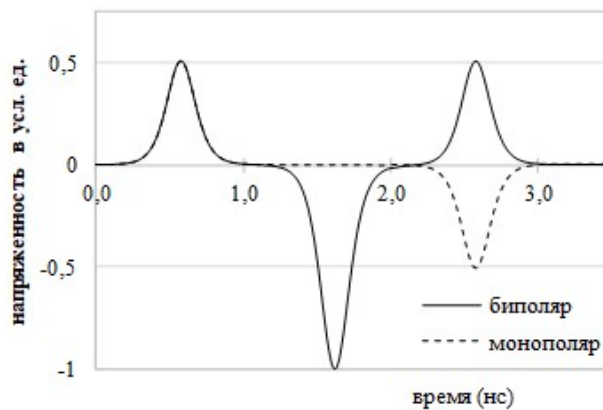


Рис. 4. Расчетные импульсы напряженности электрического поля $E \sim dU/dt$ на приемной антенне в относительных единицах при биполярном и монополярном импульсах на входе в передающую антенну.

4. Формирователь биполярных импульсов с разомкнутой линией

В настоящее время наибольшее распространение получила схема формирования биполярных импульсов с разомкнутой линией, предложенная в работе [4]. В состав схемы (Рис. 5) входит три линии FL_1-FL_3 (каждая с электрической длиной τ и волновым сопротивлением ρ), передающая линия FL_4 , разрядники S_1, S_2 и нагрузка $R = 2\rho$. При срабатывании разрядника S_1 при зарядном напряжении U_0 , а разрядника S_2 с относительной задержкой 2τ в передающей линии, нагруженной на согласованную нагрузку, формируется биполярный импульс длительностью $t = 4\tau$ и амплитудами $\pm U_0/2$. В отличие от рассмотренной выше схемы с двумя разрядниками данная схема способна формировать более стабильные биполярные импульсы. Разрядник S_2 срабатывает в условиях более быстрой скорости нарастания напряжения на его электродах, и как результат, малое время коммутации и малый разброс времени коммутации.

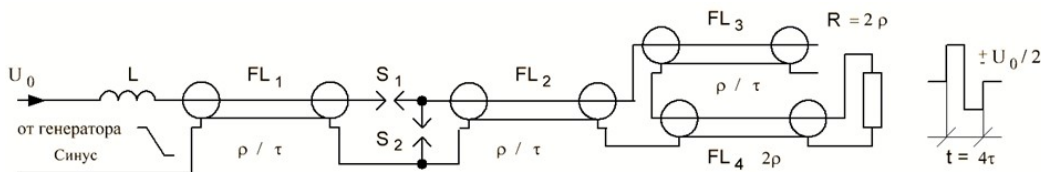


Рис. 5. Принципиальная схема формирования биполярных импульсов с разомкнутой линией.

На основе схемы с разомкнутой линией в ИСЭ СО РАН была разработана целая линейка формирователей биполярных импульсов с длительностями от 0.2 до 3 нс, амплитудами до 200 кВ на нагрузках 12.5 и 50 Ом и с частотой следования до 100 Гц. Наибольшее количество формирователей было изготовлено с длительностью 2 нс и амплитудами ± 90 кВ на нагрузке 12.5 Ом [5]. Конструкция такого формирователя представлена на Рис. 6. Зарядный импульс на формирующую линию FL_1 поступал напрямую от генератора «Синус». В отличие от предыдущей схемы формирователя с двумя разрядниками, рассмотренного выше, в этой схеме нет необходимости применения промежуточной ступени обострения, что значительно упрощало конструкцию генератора.

Формирователь размещен внутри корпуса в среде азота под давлением 40 атм. Для коммутации линий FL_1-FL_3 с низким волновым сопротивлением 6.25 Ом необходимо, чтобы разрядники были многоканальными. Многоканальный режим коммутации достигается: во-первых, высокой скоростью нарастания напряжения $10^{13}-10^{14}$ В/сек на электродах разрядников, во-вторых, тщательной соосной установкой межэлектродных зазоров с

точностью ± 0.05 мм. В этом случае наблюдается равномерная эрозия по всей поверхности электродов и биполярный импульс с крутыми фронтами, показанный на Рис. 7.

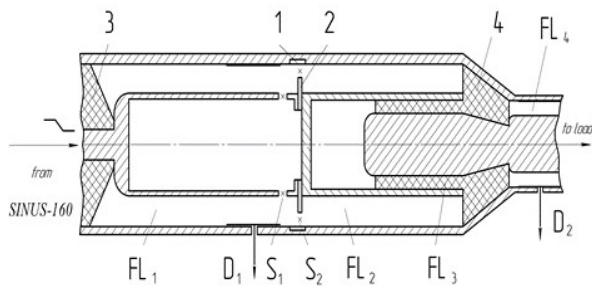


Рис. 6. Конструкция формирователя биполярных импульсов длительностью 2 нс. 1 и 2 – электроды разрядника S_2 , 3 и 4 – проходные изоляторы.

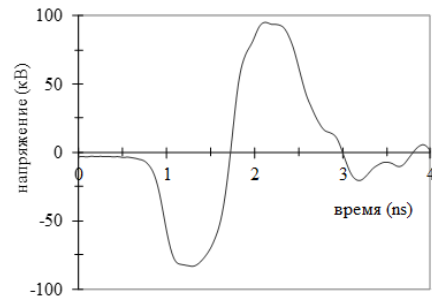


Рис. 7. Выходные биполярные импульсы длительностью 2 нс на нагрузке 12.5 Ом при давлении азота 40 атм и зазорах 1.5 и 0.75 мм в разрядниках S_1 и S_2 соответственно.

5. Формирователь с одним разрядником

В настоящее время на наш взгляд наиболее перспективной схемой формирования биполярных импульсов является схема с одним разрядником, предложенная в работе [6]. Если в схеме с двумя разрядниками (Рис. 1) свернуть в кольцо формирующую линию и объединить разрядники, то схема приобретает вид, показанный на Рис. 8. Здесь формирующая линия представлена в виде двух последовательно соединенных линий FL_{31} и FL_{32} с волновыми сопротивлениями ρ и суммарной электрической длиной τ . Разрядник S_3 коммутирует формирующие линии одновременно с одной стороны накоротко, а с другой на согласованную нагрузку. При зарядке формирующих линий до напряжения U_0 и срабатывании разрядника в нагрузке формируется биполярный импульс напряжения с амплитудой $\pm U_0/2$ и длительностью 2τ .

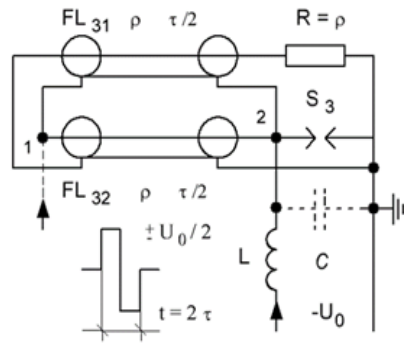


Рис. 8. Принципиальная схема формирования биполярных импульсов одним разрядником.

В схеме с одним разрядником важна точка подсоединения зарядного напряжения к потенциальному проводнику формирующих линий. Подключение зарядной цепи в точке 1 приводит к искажению второй полуволны биполярного импульса. Установлено [7], что эти искажения связаны паразитной емкостью подвода зарядного напряжения. Если зарядную цепь перенести к потенциальному электроду разрядника в точке 2, то при срабатывании разрядника она отсекается накоротко и не участвует в формировании второй полуволны биполярного импульса.

По предложенной схеме изготовлен формирователь биполярных импульсов длительностью 1 нс, амплитудой до 80 кВ на нагрузке 12.5 Ом [7]. Конструкция

формирователя показана на Рис.9. Внутри корпуса в среде азота под давлением 65 атм расположены формирующие линии FL_{31} и FL_{32} , разрядник S_3 . Разрядный промежуток кольцевого многоканального разрядника образован концом потенциального проводника 1 линий и стенкой 2. Подвод зарядного напряжения от генератора «Синус» осуществлялся тонким проводником через небольшое отверстие в стенке. Межэлектродный зазор в разряднике был равен 1.5 мм, и он был меньше радиального зазора между стенкой и зарядным проводником. Выходной биполярный импульс с делителя D представлен на Рис. 10.

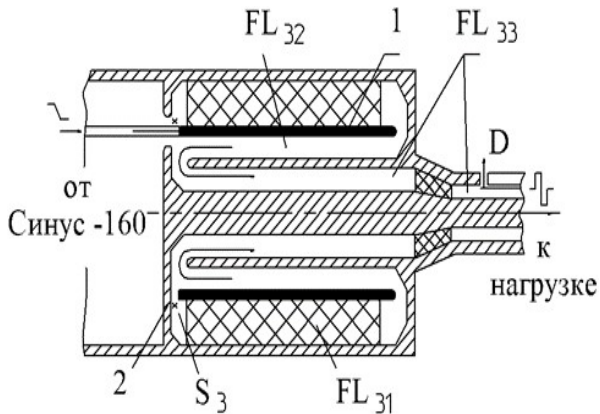


Рис. 9. Конструкция формирователя биполярных. 1 – потенциальный проводник формирующих линий FL_{31} и FL_{32} , 2 – стенка.

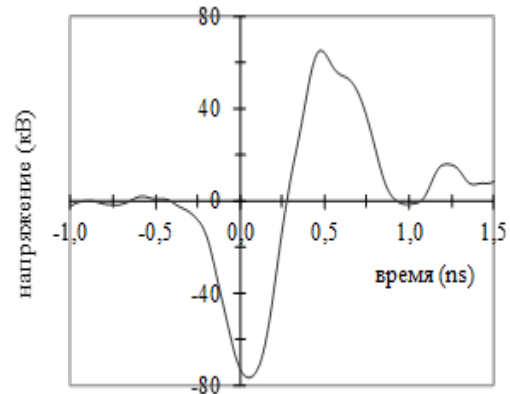


Рис. 10. Выходной биполярный импульс длительностью 1 нс с делителя D .

По схеме с одним разрядником также разработан четырехканальный формирователь биполярных импульсов с длительностями 0.5 нс [8]. Принципиальная схема и конструкция формирователя показаны на Рис. 11 и 12. Формирователь состоит из промежуточной ступени обострения, состоящей из линии FL_1 и разрядника S_1 , и четырех идентичных каналов формирования $F1-F4$. После срабатывания разрядника S_1 вблизи максимума зарядного напряжения, зарядный импульс поступал в каналы формирования $F1-F4$, собранные по схеме с одним разрядником. Формирователи располагались в четырех независимых газовых объемах. Давление азота в формирователях и промежуточной ступени обострения регулировалось автоматикой. Изменением давления в пределах от 40 до 50 атм можно изменять время задержки срабатывания разрядников, следовательно, и задержки биполярных импульсов в каналах в пределах 70–100 пс.

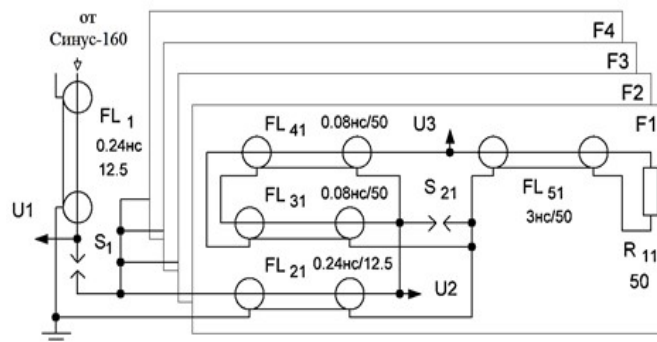


Рис. 11. Принципиальная схема формирователя четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 0.5 нс.

Выходные биполярные импульсы показаны на Рис.13. Амплитуды импульсов напряжения достигали 65 кВ. Эксперимент показал весьма стабильные параметры выходных биполярных импульсов. Среднеквадратичный разброс амплитуд биполярных импульсов относительно средней для всех каналов $F1-F4$ составил не более 2.5%. Среднеквадратичный разброс времени между передними фронтами биполярных импульсов в каналах был равен 10–15 пс. Четырехканальный формирователь использовался возбуждения решетки из четырех комбинированных антенн, расположенной в фокусе офсетного отражателя. Реализованы режимы излучения с дискретным сканированием волновым пучком.

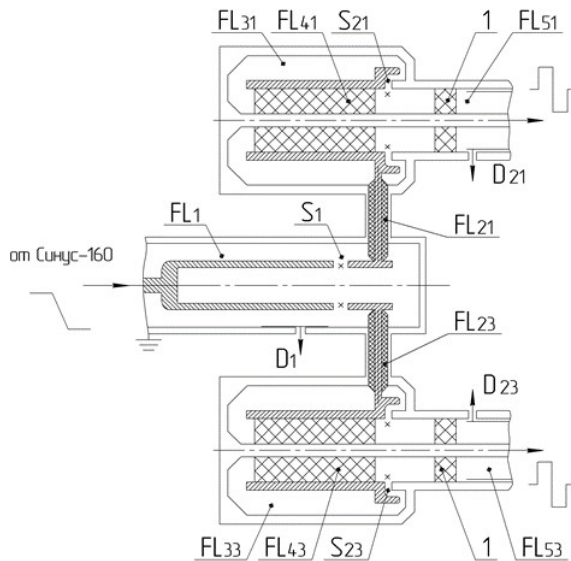


Рис. 12. Конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов.

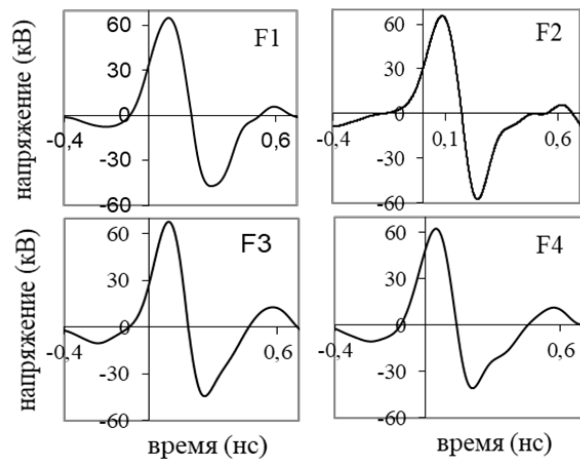


Рис. 13. Выходные импульсы с делителей $D_{21}-D_{24}$.

Таким образом, схема формирования биполярных импульсов с одним разрядником по сравнению со аналогичными схемами с двумя разрядниками имеет следующие преимущества. Во-первых, она способна формировать более стабильные импульсы, как по амплитуде, так и по длительности импульса. Во-вторых, схема имеет только один разрядник вместо двух. Ожидается более высокая эффективность преобразования зарядного импульса в биполярный за счет снижения потерь в разрядниках. В-третьих, значительно сокращается время на настройку формирователя: достаточно установить необходимый межэлектродный зазор в разряднике и отрегулировать давлением время задержки его пробоя.

6. Четырехканальные формирователи биполярных импульсов различной длительности.

При разработке мощных СШП-источников важной задачей является расширение спектра 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. Такой подход развивался в работе [9]. Первоначально за основу четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 0,5, 1, 2 и 3 нс мы взяли схему с разомкнутой линией. Принципиальная схема и конструкция формирователя биполярных импульсов показаны на Рис. 14 и 15. Здесь линия FL с разрядником S это выходная ступень генератора «Синус-160»,

линия FL_2 с разрядником S_1 – промежуточная ступень обострения, F_0-F_3 – каналы формирования биполярных импульсов 0,5, 1, 2 и 3 нс, соответственно.

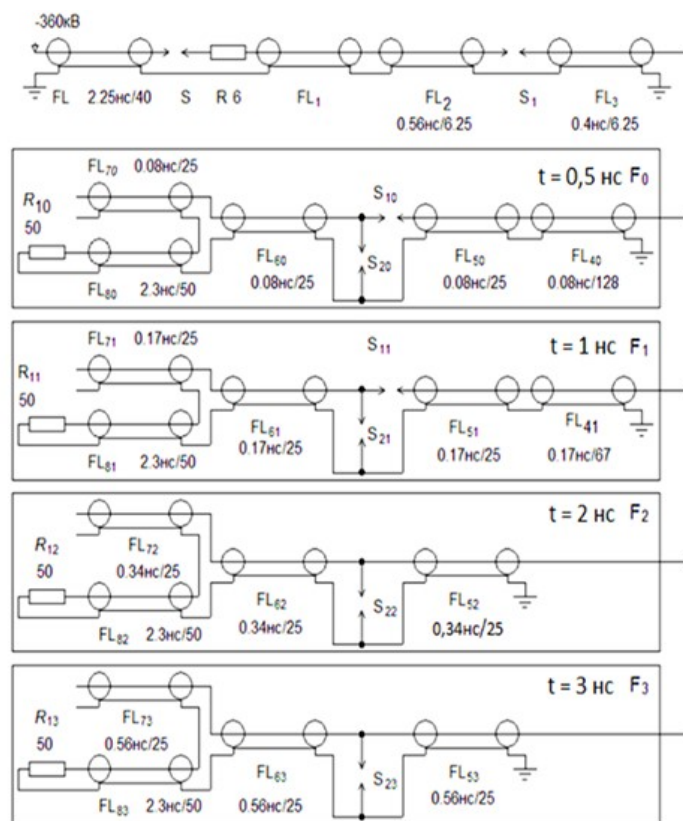


Рис. 14. Принципиальная схема четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 0,5, 1, 2 и 3 нс.

Выходные биполярные импульсы с делителями $D_{30}-D_{34}$ имели амплитуды до 80 кВ (Рис. 16). В целом, конструкция генератора получилась довольно сложной и очень трудоемкой в настройке межэлектродных зазоров в семи разрядниках. Стабильность излученных импульсов была невысокой.

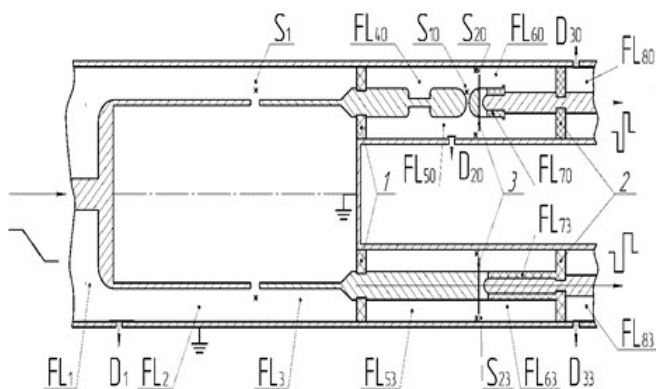


Рис. 15. Конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 0,5, 1, 2 и 3 нс.

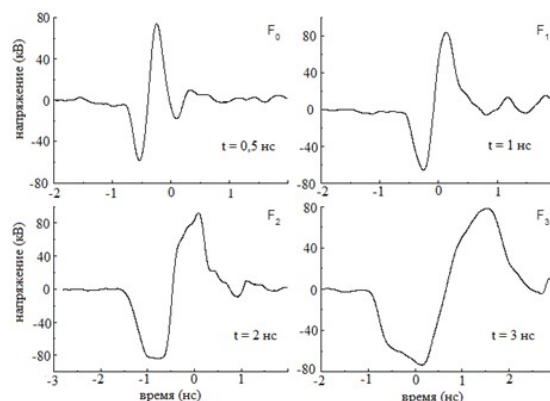


Рис. 16. Выходные биполярные импульсы с делителей $D_{30}-D_{34}$.

Кардинальным решением этой проблемы было предложение новой схемы формирования биполярных импульсов с различными длительностями, где вместо семи разрядников

используется только один. На первом этапе мы ограничились разработкой четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 1 нс (2 канала) и 2 нс (2 канала) [10]. Принципиальная схема и конструкция такого формирователя показаны на Рис. 17 и 18. Формирующие линии FL_1-FL_8 заряжались с частотой 100 Гц от генератора «Синус». При срабатывании разрядника S в четырех передающих линиях FL_9-FL_{12} , нагруженных на согласованные нагрузки по 50 Ом, формировались синхронные биполярные импульсы с амплитудами до 80 кВ и длительностями 1 и 2 нс (Рис. 19). Среднеквадратичный разброс времени между передними фронтами биполярных импульсов в каналах был равен 25 пс, что указывает на стабильную многоканальную коммутацию кольцевого разрядника по всей поверхности электродов.

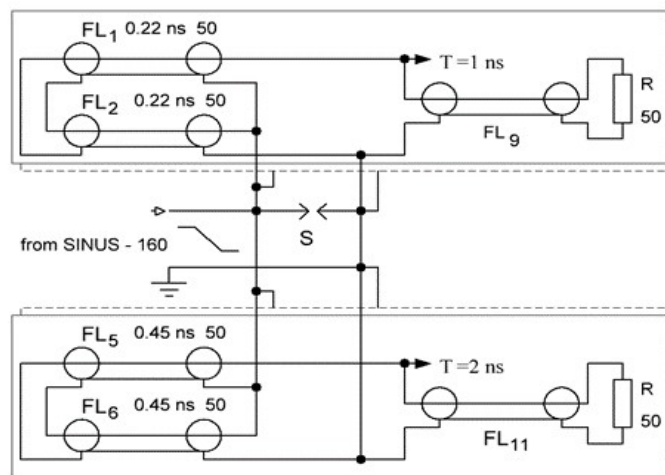


Рис. 17. Принципиальная схема и конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов с длительностями 1 и 2 нс.

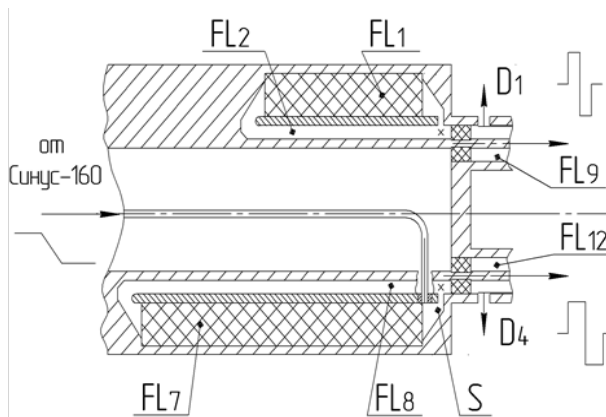


Рис. 18. Конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов длительностями 1 и 2 нс.

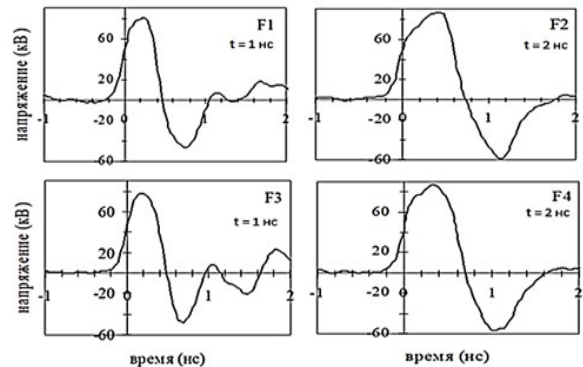


Рис. 19. Выходные биполярные импульсы с делителей D_1-D_4 при давлении 50 атм в разряднике S .

7. Заключение

Таким образом, из трех рассмотренных схем формирования биполярных импульсов схема с одним разрядником способна формировать наиболее стабильные импульсы по амплитуде и длительности. Применение схемы для формирования биполярных импульсов с различными длительностями перспективно для генерации СШП излучения с расширенной полосой спектра.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWRM-2021-0001.

8. Список литературы

- [1] V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmashulov, M.I. Yalandin, Generation of high-power broadband electromagnetic pulses with prf of 100 pps, *Proc. 10 IEEE Int. Pulsed Power Conf.* Albuquerque, NM, USA, 666, 1995.
- [2] Yu. A. Andreev, A. M. Efremov, and V. V. Plisko, Excitation pulse selection for UWB antenna, *Russ. Phys. J.*, vol. **66**, 1005, 2023, doi: 10.1007/S11182-023-03036-6
- [3] V.A. Vizir, V.B. Zorin, A.M. Efremov, B.M. Kovalchuk, High-power nanosecond bipolar voltage pulses, *Russ. Phys. J.*, vol. **42**, 1020, 1999.
- [4] Yu.A. Andreev, V.P. Gubanov, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, S.D. Korovin, B.M. Kovalchuk, V.V. Kremnev, V.V. Plisko, K.N. Sukhushin, High-power ultrawideband radiation source, *Laser and Particle Beams*, vol. **21**, 211, 2003, doi: 10.1017/S0263034603212088
- [5] A.M. Efremov, A low-impedance high-voltage bipolar pulse former, *Instrum. Exp. Tech.*, vol. **60**, 541, 2017, doi: 10.1134/S0020441217040030
- [6] Yu.A. Andreev, Yu.I. Buyanov, A.M. Efremov, V. I. Koshelev, B. M. Kovalchuk, K. N. Sukhushin, V. A. Vizir, V. B. Zorin, High-power ultrawideband electromagnetic radiation generator, *Proc. 11 IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, vol. **1**, 730, 1997.
- [7] Efremov and V. Alexeenko, Formation of bipolar high-voltage pulses of nanosecond duration in the electric circuits with a single spark gap, *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242086.
- [8] E.V. Balzovsky, Yu.I. Buyanov, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, E.S. Nekrasov, S.S. Smirnov, A high-power source of ultrawideband radiation of subnanosecond duration with controllable characteristics, *Instrum. Exp. Tech.*, vol. **66**, 394, 2023, doi: 10.1134/S0020441223020136
- [9] A.M. Efremov, V.I. Koshelev, V.V. Plisko, Synthesis of electromagnetic pulses with different frequency bands in free space, *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. **65**(5), 442, 2020, doi: 10.31857/S0033849420050046
- [10] A.M. Efremov, V.M. Alexeenko, Four-channel former of bipolar pulses of various durations in a circuit with one spark gap, *Russ. Phys. J.*, vol. **66**, 906, 2023, doi: 10.1007/S11182-023-03022-y