ГЕНЕРАЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Ю.А, Андреев, А.М. Ефремов, В.И. Кошелев, Б.М. Ковальчук, В.В. Плиско, К.Н. Сухушин
Институт сильноточной электроники СО РАН
koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

В работе приводятся конструкция и результаты исследований мощного источника СШП излучения с 16-элементной решеткой, возбуждаемой высоковольтным биполярным импульсом пикосекундной длительности. Получены импульсы излучения с эффективным потенциалом 370 кВ при частоте повторения 100 Гц.

Введение

В настоящее время широко обсуждаются возможности разработки сверхширокополосных (СШП) радаров в полосе частот 1.99 – 10.6 ГГц. Этому частотному диапазону примерно соответствует спектр (1.7 – 9.3 ГГц по уровню –10 дБ) биполярного импульса длительностью 200 пс. Данная работа направлена на проверку возможности создания мощного источника СШП излучения на основе возбуждения решетки комбинированных антенн от одного высоковольтного генератора через делитель мощности биполярными импульсами длительностью ~ 200 пс. Такие источники могут представлять интерес в СШП радарах для увеличения дальности при высоком пространственном разрешении и для исследований в области электромагнитной совместимости.

1. Источник импульсов сверхширокополосного излучения

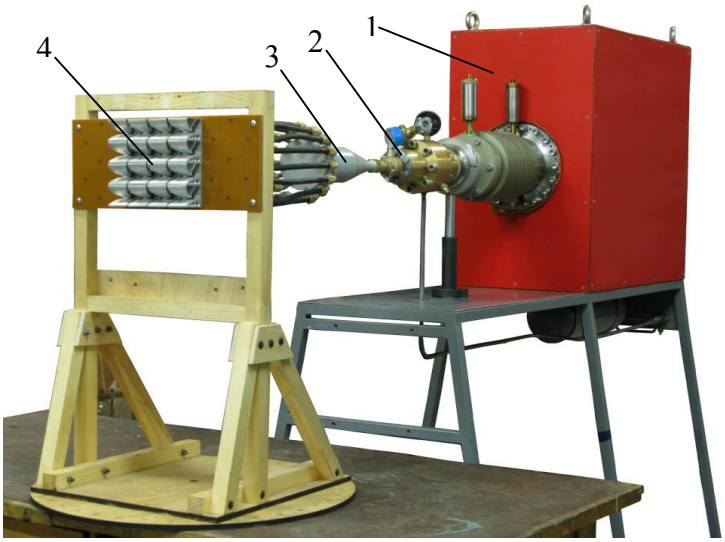

Рис. 1. Источник с 16-элементной антенной решеткой.

Внешний вид источника сверхширокополосного излучения приведен на рис. 1. Источник состоит из следующих основных частей: генератор биполярных импульсов, состоящий из генератора монополярных импульсов 1 и формирователя биполярных импульсов 2, трансформатор сопротивлений с делителем мощности 3 и 16-элементная антенная решетка 4, соединенная с делителем мощности с помощью коаксиальных кабелей.

2. Генератор биполярных импульсов напряжения

Генератор биполярных импульсов источника состоит из генератора монополярных импульсов, промежуточной ступени обострения и формирователя биполярных импульсов напряжения. В качестве генератора монополярных импульсов в данном источнике использовался генератор высоковольтных импульсов СИНУС–160 [1]. На эквивалентной схеме генератора биполярных импульсов напряжения, показанной на рис.2, генератор монополярных импульсов представлен выходной формирующей линией T0 и разрядником S0. Эта линия

могла заряжаться от вторичной обмотки трансформатора Тесла до напряжения 360 кВ с частотой следования импульсов 100 Гц. Промежуточная ступень обострения состоит из линии T1, ограничительного резистора R0, зарядной индуктивности L и разрядника S1. Формирователь биполярных импульсов собран по схеме с разомкнутой линией, в состав которой входят линии T2-T8, обостряющий S2 и срезающий S3 разрядники и нагрузка R. Подобная схема построения использовалась нами в работе [2] при генерировании биполярных импульсов напряжения длительностью 0.5 нс. Принципиальным отличием схемы формирователя является то, что разомкнутая линия T5 включена между земляными проводниками линий T4-T5, а выход ее нагружен на две последовательно соединенные высокоомные линии T6-T7. Параметры линий T6-T7 выбирались расчетным путем и из конструктивных соображений.

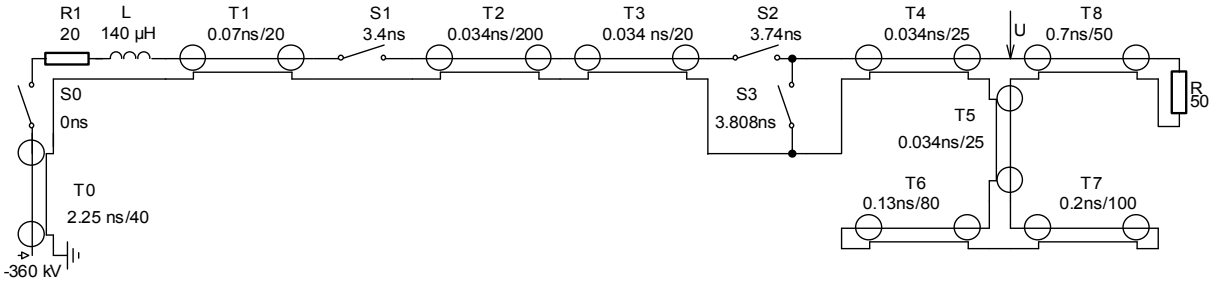

Рис. 2. Эквивалентная схема генератора биполярных импульсов.

Схема работает следующим образом. Заряженная линия T0 коммутируется разрядником S0 на промежуточную линию T1 через ограничительное сопротивление R1 и зарядную индуктивность L. Разрядник S1 срабатывает вблизи максимума зарядного напряжения и подключает линию T1 через высокоомную линию T2 к формирующей линии T3. При срабатывании разрядника S2 вблизи максимума зарядного напряжения на линии T3, а S3 – с относительной задержкой, равной двойному пробегу по линии T4, в передающей линии T8, в конце которой установлена нагрузка R = 50 Ом, формируется биполярный импульс напряжения.

Конструкция промежуточной ступени обострения и формирователя биполярных импульсов показана на рис. 3. Внутри корпуса в среде азота под давлением 92 атм расположены линии T1 - T7, левая часть линии T8, обостряющие разрядники S1 – S2, срезающий разрядник S3, зарядная индуктивность и емкостной делитель напряжения D1. Параметры линий и индуктивности приведены на рис. 2. Все электроды разрядников изготовлены из меди. Зазоры в

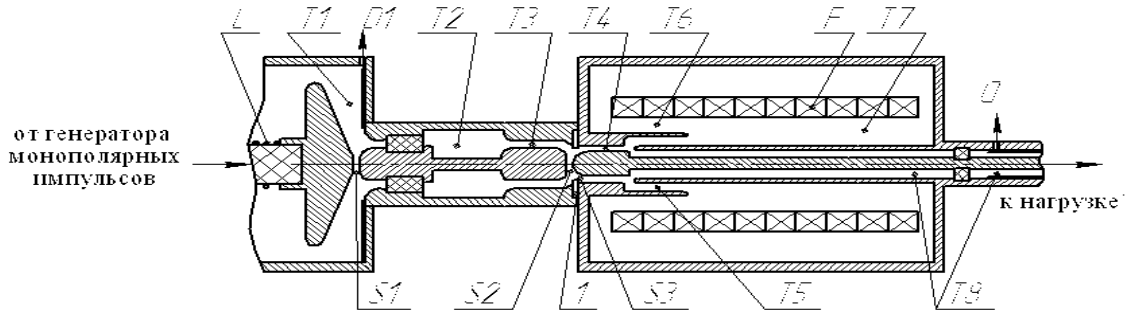

Рис. 3. Конструкция промежуточной ступени обострения и формирователя биполярных импульсов.

разрядниках S1 и S2 регулируется и равны 1.5 и 0.4 мм соответственно. Радиальный зазор в разряднике S3 равен 0.2 мм. Для уменьшения колебаний напряжения после прохождения биполярного импульса в линиях T6 – T7 установлены 10 ферритовых колец F марки 35ВЧ17

размерами 39x17x6 мм. Делитель D1 не калибровался и служит для оценки времени зарядки промежуточной линии T1.

В передающей линии T8 расположен делитель напряжения на связанных линиях D для регистрации выходного биполярного импульса. Делитель D калибровался биполярным импульсом напряжения длительностью 200 пс от низковольтного генератора, с помощью стробоскопического осциллографа TMR 8112 с полосой пропускания 12 ГГц. Для регистрации выходного высоковольтного импульса с формирователя использовался осциллограф TDS 6604 с полосой пропускания 6 ГГц, что приводило к искажению импульса как по амплитуде, так по длительности. Для сравнения на рис. 4 показаны импульсы низковольтного генератора, зарегистрированные с помощью осциллографов TDS 6604 и TMR 8112. Осциллограф TDS 6604 с измерительным кабелем дает уширение длительности импульса в 1.145 раза, уменьшение амплитуд отрицательной и положительной полуволн в 1.93 и 1.66 раза соответственно. По этим пересчетным коэффициентам можно оценить параметры выходного импульса с формирователя.

На рис. 5 показана скорректированная форма импульса напряжения U, регистрируемая с делителя напряжения D. Передний фронт биполярного импульса напряжения затянут предымпульсом, связанным с прохождением импульса зарядки формирующей линии T3 через проходную емкость разрядника S2 (рис. 2). Длительность импульса определялась по уровню 0.1 от амплитудного значения путем линейной аппроксимации переднего фронта до пересечения с нулевой линией и с учетом пересчетных коэффициентов и составила 230 пс.

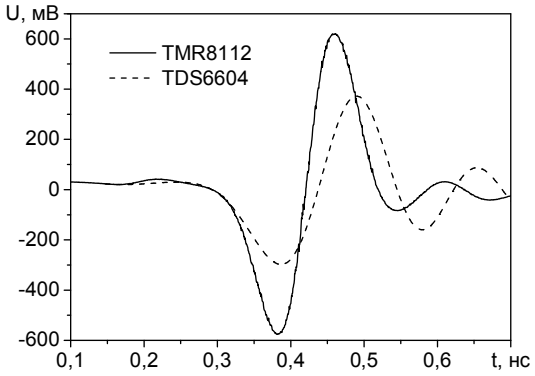

Рис. 4. Импульс напряжения низковольтного генератора, зарегистрированный осциллографами TRM 8112 и TDS 6604.

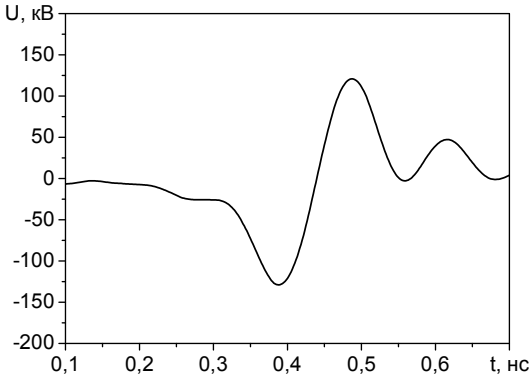

Рис. 5. Скорректированный выходной биполярный импульс напряжения.

3. Антенная решетка

Решетка состоит из 16 (4×4) комбинированных антенн размером 40×40 мм, закрепленных на диэлектрической пластине (рис. 1). Элементы решетки объединены в вертикальные секции по четыре элемента в каждой. Соседние элементы в вертикальной секции гальванически связаны между собой. Расстояние между секциями равно 44 мм. Апертура решетки составляет 172×160 мм.

В качестве элемента решетки использовалась комбинированная антенна [3], оптимизированная для излучения биполярных импульсов напряжения длительностью 200 пс. Полоса согласования комбинированной антенны по уровню КСВН ≤ 2 составляет 1.4…9.8 ГГц. Изменение амплитудно-частотной характеристики относительно среднего значения не выходит за пределы ±1.5 дБ для прямого направления ($\varphi,\delta=0°$, где φ - азимутальный угол, δ - угол места) в диапазоне частот 1.1…8.1 ГГц. Отклонение фазо-частотной характеристики от линейной для этого же направления наблюдения менее $\pm\pi/16$ для частот 1.7…9.2 ГГц. Относительная полоса пропускания, определяемая одновременным выполнением этих трех критериев, составляет 4.8:1 в направлении главного максимума излучения. Диаграммы направленности антенны по пиковой мощности близки к кардиоидным в H- и E-плоскостях. Ширина диаграммы на

полувысоте в Н- плоскости равна 90°, а в Е- плоскости – 100°. Коэффициент направленного действия антенны в главном направлении $D_0 = 4$.

Фидерная система СШП источника представляет собой трансформатор сопротивлений с 50 Ом до 3.125 Ом, в конце которого расположен делитель мощности. Сопротивление каждого из 16 выходных каналов делителя равно 50 Ом. Для соединения делителя с элементами антенной решетки использовался кабель марки РК50-7-58 с кордельной полиэтиленовой изоляцией. Конструкция кабелей позволила закачивать внутрь фидерной системы элегаз (SF_6) под давлением 4 атм, что увеличило ее электрическую прочность.

Для измерения характеристик фидерной системы на ее вход подавался низковольтный биполярный импульс длительностью 200 пс. На выходе каждого из каналов делителя импульс регистрировался стробоскопическим осциллографом TMR 8112. Нормированные импульсы на входе $U_{вх}$ и выходе одного из каналов $U_{вых\ 1}$ делителя приведены на рис. 6. Отношение $U_{вх}/U_{вых\ 1}$ равно ≈5.1, хотя в идеальном случае без потерь это отношение должно быть равно 4. Кроме того, длительность импульса увеличилась до 260 пс. Оценки спектров импульсов на входе и выходе фидерной системы показали сужение спектра выходного импульса как в низкочастотной, так и в высокочастотной областях. Это и приводит к расширению выходного импульса, появлению дополнительного временного лепестка и увеличению коэффициента ослабления. Энергия импульса на выходе трансформатора с делителем мощности составляет ≈70% от энергии импульса на входе.

Для регистрации электромагнитных импульсов использовалась приемная антенна, представляющая собой половину ТЕМ-рупора с размерами земляной пластины 50×120 см и раскрывом 40×8 см. Волновое сопротивление в раскрыве рупора равно 50 Ом. Были проведены расчеты зависимости эффективной длины такой антенны от частоты [3]. Вблизи максимума спектра излучения на частотах 4-5 ГГц эффективная длина антенны h_e составляет 0.034-0.031 м. В измерениях использовалось значение h_e=0.033 м.

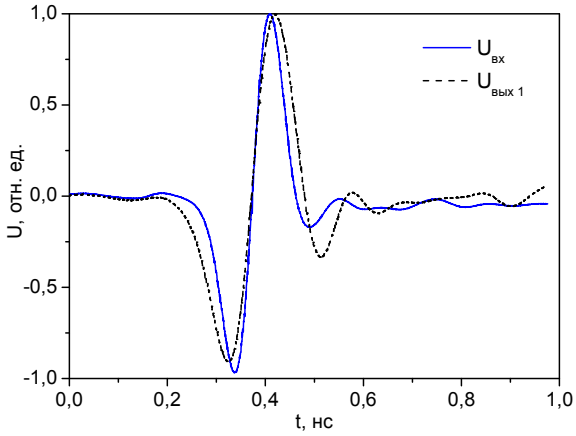

Рис. 6. Импульсы на входе ($U_{вх}$) и на выходе ($U_{вых\ 1}$) 16-канального делителя мощности

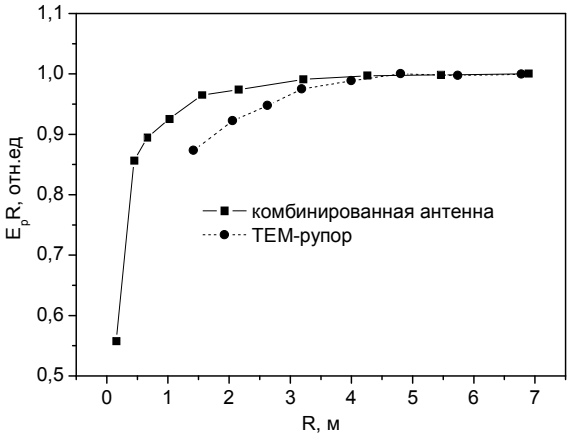

Рис. 7. Зависимость эффективного потенциала излучения от расстояния.

На рис 7. приведена зависимость эффективного потенциала излучения (произведение пиковой напряженности поля E_p на расстояние R от излучателя до точки наблюдения) E_pR от расстояния между решеткой и двумя приемными антеннами. В качестве приемных использовались компактная комбинированная антенна, аналогичная элементу решетки, и большая ТЕМ-антенна. Горизонтальный участок кривой соответствует дальней зоне. Из рисунка видно, что расстояния большие 4 м можно считать дальней зоной для ТЕМ-антенны с большой апертурой. Все измерения проводились с помощью ТЕМ-антенны на расстояниях более 6 м.

По результатам низковольтных измерений коэффициент направленного действия D_0≈50. Эффективность по излученному полю, определяемая как $k_E = E_pR/U_g$, где U_g – пиковое значение модуля амплитуды напряжения генератора, равна 3. Ширина диаграммы направленности на полувысоте в горизонтальной Н-плоскости равна 18°, а в вертикальной Е-плоскости – 20°.

4. Высоковольтные испытания источника

На рис. 8 приведена осциллограмма импульса излученного решеткой. Эффективный потенциал составил ~370 кВ при амплитуде биполярного импульса напряжения ~130 кВ.

Были проведены испытания на стабильность и продолжительность работы источника при частоте повторения импульсов 100 Гц. В экспериментах измерялась амплитуда электромагнитного импульса (E_pR) и ее среднеквадратическое отклонение (СКО). Усреднение проводилось по 100 импульсам. Результаты первого часа работы представлены на рис.9. После двухчасового перерыва, необходимого для охлаждения генератора монополярных импульсов, и снижения давления в формирователе на 10 атм, возможна работа источника еще в течении часа работы, но при этом требуется время 15 минут для выхода на стабильный режим. Дальнейшее снижение давления не возможно из-за опасности пробоя изоляторов. Следует заметить, мы не оптимизировали режим работы генератора биполярных импульсов. В нагрузку передается ≈ 1% от накопленной в формирующей линии T0 энергии, равной 3.6 Дж. После срабатывания разрядника S3 остальная энергия рассеивается в резисторе R1 и разрядниках, вызывая эрозию электродов.

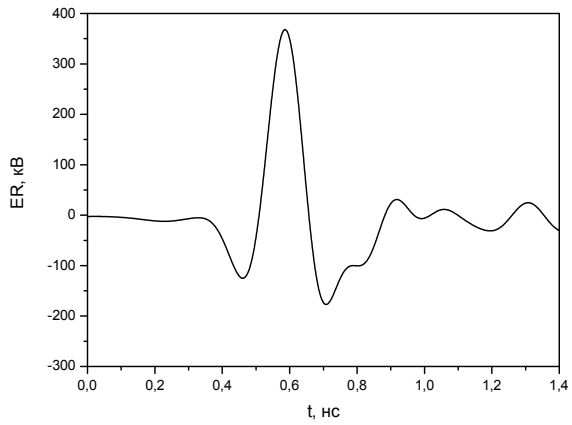

Рис. 8. Осциллограмма импульса излучения источника с 16-элементной антенной решеткой.

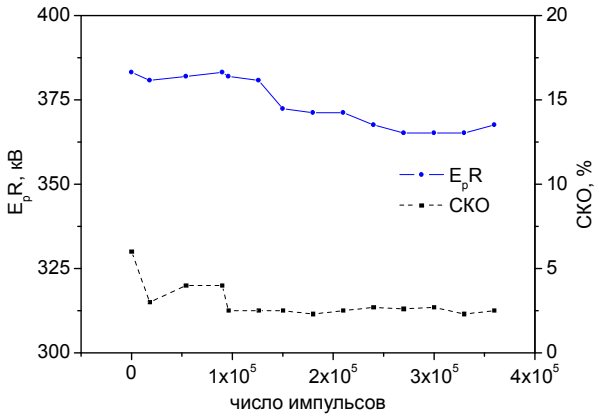

Рис. 9. Зависимости эффективного потенциала и его среднеквадратического отклонения от числа импульсов.

Заключение

Создан мощный источник СШП излучения пикосекундной длительности с высокой направленностью. Продемонстрирована возможность непрерывной работы в течение часа на частоте 100 Гц с высокой стабильностью излучения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 06-08-00295.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., et al. Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. No. 2. P. 211-217.

2. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., et al. Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics,Tomsk. 2006. P. 446-449.

3. Andreev Yu.A., Efremov A.M., Koshelev V.I., et al. Proc. 15 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2008. P. 447-450.