

МОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
С СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСА

© 2011 г. А. М. Ефремов, В. И. Кошелев, Б. М. Ковальчук, В. В. Плиско, К. Н. Сухушин

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 07.07.2010 г.

Описаны источники мощных сверхширокополосных электромагнитных импульсов субнаносекундной длительности. Биполярный импульс напряжения длительностью 0.5 нс и амплитудой ~200 кВ подается на вход излучающей системы (16-элементная решетка или одиночная антенна). Получены значения эффективного потенциала излучения  $E_p R = 260$  кВ для источника с одиночной антенной и  $E_p R = 690$  кВ для источника с 16-элементной решеткой на частоте повторения импульсов 100 Гц.

## ВВЕДЕНИЕ

Для решения ряда задач, таких как радиолокация удаленных ( $R \sim 100$  км) объектов и исследования по электромагнитной совместимости, необходимы мощные источники сверхширокополосного (с.ш.п.) электромагнитного излучения с эффективным потенциалом  $E_p R \sim 1-10$  МВ, где  $E_p$  – пиковая напряженность электромагнитного поля в дальней зоне на расстоянии  $R$ , и различной длительностью импульса. Малая длительность импульса обеспечивает хорошее пространственное разрешение, а большая полоса частот позволяет увеличить объем информации о зондируемых объектах и средах. В предыдущих наших работах [1, 2] были представлены источники с.ш.п.-излучения, основанные на возбуждении одиночных антенн и решеток биполярными импульсами напряжения длительностью 2 и 1 нс. Следующим шагом является создание с.ш.п.-источников с субнаносекундной длительностью биполярного импульса напряжения. Целью данной работы было создание компактных источников мощного с.ш.п.-излучения, основанных на возбуждении одиночной антенны или многоэлементной решетки от одного генератора биполярных импульсов напряжения длительностью 0.5 нс.

## КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА

Источник (рис. 1) состоит из генератора монополярных импульсов 1, формирователя биполярных импульсов (ф.б.и.) 2 и излучающей системы. В качестве излучающей системы используется 16-элементная антенная решетка 5, возбуждаемая от ф.б.и. через волновой трансформатор 3 и делитель мощности 4, или одиночная антенна (на рисунке не показана).

## ГЕНЕРАТОР БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Генератор биполярных импульсов источника состоит из генератора монополярных импульсов и формирователя биполярных импульсов напряжения. В качестве генератора монополярных импульсов в данном источнике использовался генератор высоковольтных импульсов СИНУС-160 [3].

На эквивалентной схеме генератора биполярных импульсов напряжения, приведенной на рис. 2, генератор монополярных импульсов представлен выходной формирующей линией  $FL_0$  и разрядником  $S_0$ . Линия  $FL_0$  с волновым сопротивлением 40 Ом и электрической длиной 2.25 нс заряжается от вторичной обмотки трансформатора Тесла до напряжения –360 кВ с частотой следования импульсов 100 Гц.

Формирователь биполярных импульсов напряжения выполнен по схеме с разомкнутой линией [1–3] и состоит из линий  $FL_2-FL_6$ , обостряющего  $S_2$  и срезающего  $S_3$  разрядников и нагрузки  $R_n$ . В отличие от предыдущих работ [1–3], для увеличения скорости нарастания напряжения на электродах разрядника  $S_2$  использована дополнительная ступень обострения, состоящая из линии  $FL_1$ , ограничительного резистора  $R_0$ , зарядной индуктивности  $L$  и разрядника  $S_1$ .

Схема моделировалась на компьютере с использованием программы PSpice. Время коммутации, т.е. время, в течение которого сопротивление разрядника меняется от 100 кОм до 0.01 Ом, установлено для  $S_0, S_1, S_2$  и  $S_3$  равным 1, 0.75, 0.2 и 0.2 нс соответственно. Сопротивление  $R_1$  необходимо только для обеспечения работы программы.

Формирующая линия  $FL_0$  генератора монополярных импульсов коммутируется разрядником  $S_0$  на промежуточную линию  $FL_1$  через ограничительное сопротивление  $R_0$  и зарядную индуктив-

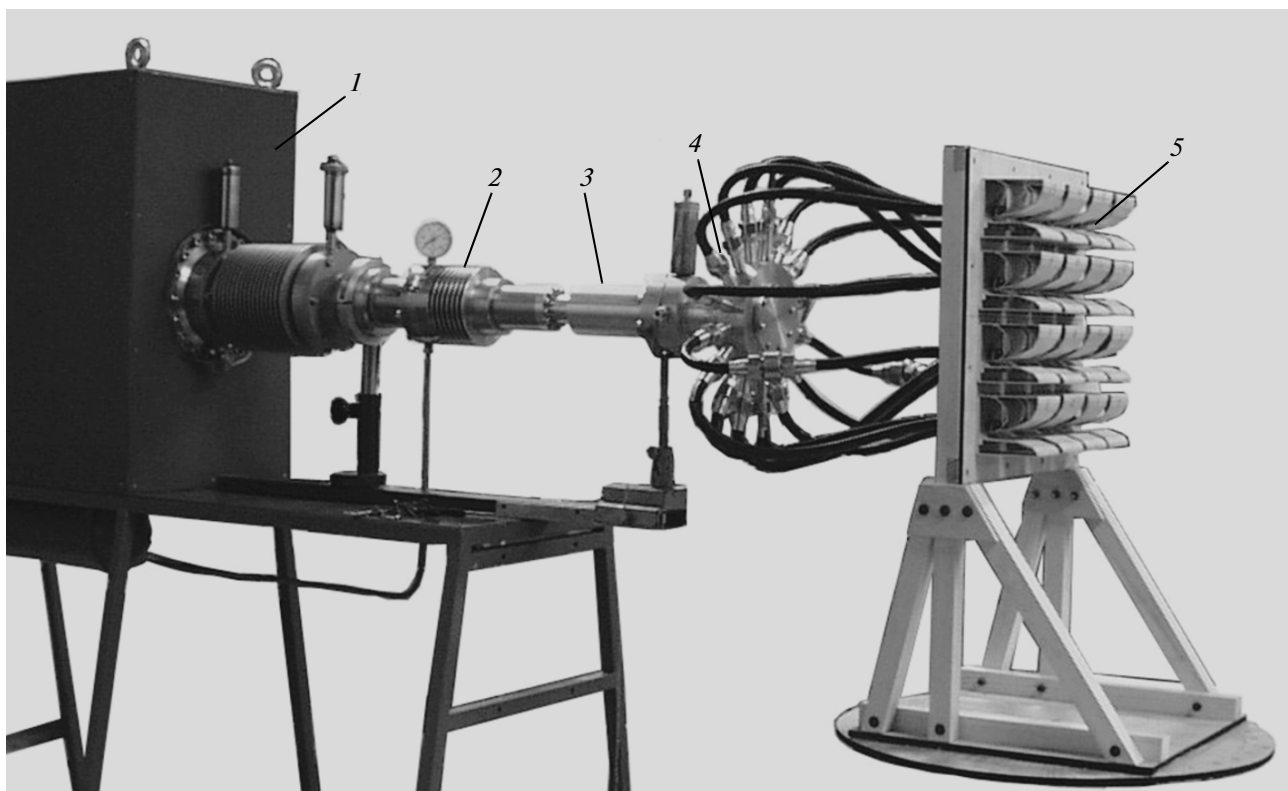


Рис. 1. Внешний вид источника излучения. 1 – генератор монополярных импульсов, 2 – формирователь биполярных импульсов, 3 – волновой трансформатор, 4 – делитель мощности, 5 – 16-элементная решетка.

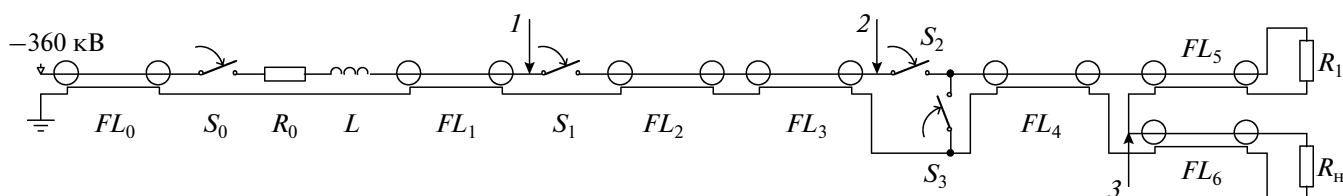


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора биполярных импульсов.  $FL$  – формирующие линии;  $S$  – разрядники; 1–3 – точки снятия расчетных осциллограмм.

ность  $L$ . Максимальное зарядное напряжение на промежуточной линии  $FL_1$  достигает 580 кВ за время 6.5 нс (рис. 3, кривая 1).

Разрядник  $S_1$  срабатывает в максимуме зарядного напряжения и подключает линию  $FL_1$  через высокоомную линию  $FL_2$  к формирующей линии  $FL_3$ , которая заряжается до напряжения 790 кВ за время 0.5 нс (кривая 2). При срабатывании разрядника  $S_2$  в максимуме зарядного напряжения на линии  $FL_3$ , а  $S_3$  – с относительной задержкой 0.16 нс в передающей линии  $FL_6$ , в конце которой установлена согласованная нагрузка  $R_n$ , формируется биполярный импульс с амплитудой 360 кВ длительностью 0.5 нс (кривая 3). Точки, где выведены расчетные осциллограммы, указаны на рис. 2.

Конструкция формирователя биполярных импульсов представлена на рис. 4. Внутри латунного корпуса в среде азота под давлением 8.6 МПа размещены зарядная индуктивность  $L$ , шесть коаксиальных линий  $FL_1$ – $FL_6$ , обостряющие  $S_1$ ,  $S_2$  и срезающий  $S_3$  разрядники. Зарядная индуктивность  $L$  соединяется через проходной капролоновый изолятор (на рис. 4 не показан) с ограничительным резистором  $R_0$ . Линии  $FL_2$ ,  $FL_4$  и  $FL_6$  имеют изоляцию из фторопласта-4, а линия  $FL_5$  – из оргстекла. Диаметры наружных проводников линий  $FL_1$ – $FL_6$  равны 35, 35, 23, 35, 16.5 и 35 мм соответственно.

Электроды разрядников  $S_1$  и  $S_2$  являются концы внутренних проводников линий  $FL_1$ – $FL_4$ . Electroдами срезающего разрядника  $S_3$  служат

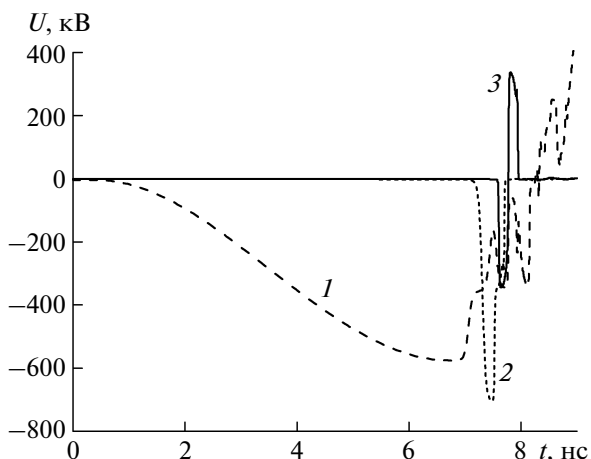


Рис. 3. Расчетные импульсы напряжений на линиях  $FL_1$  (1),  $FL_3$  (2) и  $FL_6$  (3).

внутренний проводник линии  $FL_4$  и диск толщиной 2 мм на внешнем проводнике этой линии. Все электроды разрядников съемные и изготовлены из меди. Зазоры в разрядниках  $S_1$  и  $S_2$  регулируются прокладками и равны 1.55 и 1.25 мм соответственно. Передающая линия  $FL_6$  соединяет выход формирователя биполярных импульсов с резистивной нагрузкой  $R_H$  (на рис. 4 не показана). В качестве нагрузки использовался резистор ТВО-5 номиналом 51 Ом.

Выходной биполярный импульс напряжения регистрировался с помощью делителя на связанных линиях  $DL$ , установленного в тракте линии  $FL_6$ , осциллографом TDS 6604 фирмы Tektronix с полосой пропускания до 6 ГГц. Делитель калибровался путем подачи биполярного импульса напряжения длительностью  $\sim 0.5$  нс от низковольтного генератора на вход передающей линии  $FL_6$ . Восстановленная с коэффициентом ослабления  $\approx 300$  форма импульса с делителя  $DL$  имела хорошее совпадение с формой импульса на выходе линии.

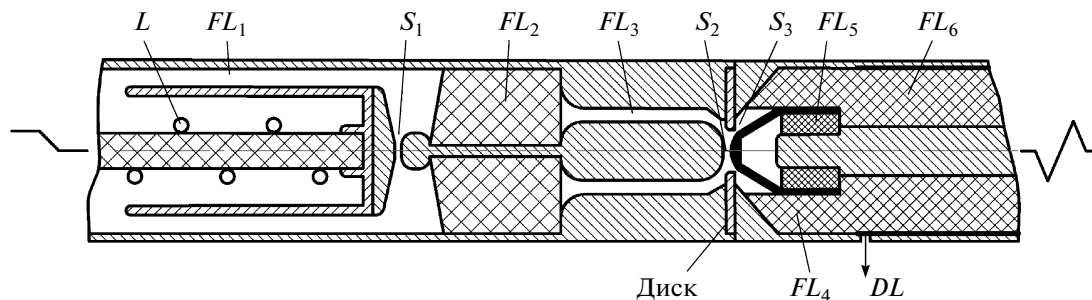


Рис. 4. Конструкция формирователя биполярных импульсов.  $FL$  — формирующие линии;  $S$  — разрядники;  $DL$  — делитель на связанных линиях;  $L$  — зарядная индуктивность.

Настройка формирователя сводилась к последовательной настройке зазоров в разрядниках  $S_1$ – $S_3$ . Зазоры в разрядниках  $S_1$ ,  $S_2$  выбирались таким образом, чтобы обеспечить стабильное срабатывание этих разрядников вблизи максимального зарядного напряжения при частоте следования импульсов 100 Гц. Регулировкой зазора в срезающем разряднике  $S_3$  добивались наиболее симметричной формы биполярного импульса напряжения. При указанных выше зазорах и давлении измеренный выходной биполярный импульс (рис. 5) имеет амплитуды  $-160$ ,  $+200$  кВ и длительность 520 пс на уровне 0.1 амплитуды.

Максимальная амплитуда импульса отличается от расчетной в 1.8 раза, что обусловлено упрощением в расчетах процесса коммутации тока и срабатыванием разрядников при напряжении ниже максимального зарядного. Относительный разброс амплитуды биполярного импульса напряжения не превышает 4–5% при относительном разбросе амплитуды зарядного напряжения генератора СИНУС-160 менее 1%.

#### ВОЛНОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР И 16-КАНАЛЬНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Волновой трансформатор экспоненциального типа использовался для согласования выходного волнового сопротивления формирователя биполярных импульсов 50 Ом и суммарного волнового сопротивления фидера антенной решетки 3.125 Ом. Волновой трансформатор моделировали на компьютере с помощью программы PSpice. Плавный переход разбивали на 20 участков, сопротивление которых менялось ступенчато по экспоненциальному закону от 50 до 3.125 Ом. Из анализа численных расчетов выбрана электрическая длина перехода  $\tau = 0.8$  нс.

Конструкция волнового трансформатора (рис. 6) представляет собой коаксиальный маслонаполненный переход длиной 153 мм, волновое сопротивление  $\rho_w$  которого меняется вдоль оси  $z$  по закону  $\rho_w = 50 \exp(-18.22z)$ . Диаметры внешних проводников на входе 3 и выходе 4 перехода состав-

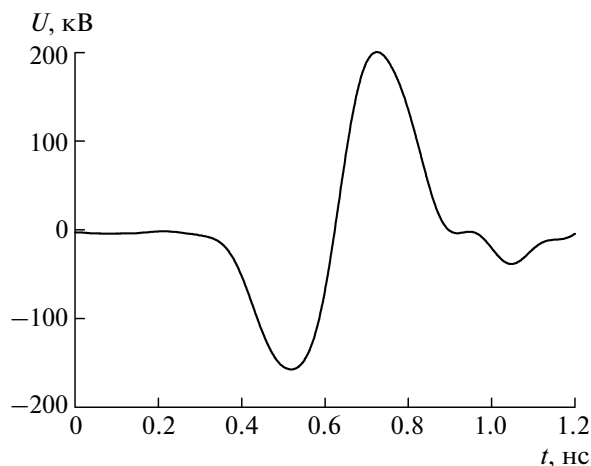


Рис. 5. Осциллограмма выходного импульса напряжения с делителя  $DL$ .

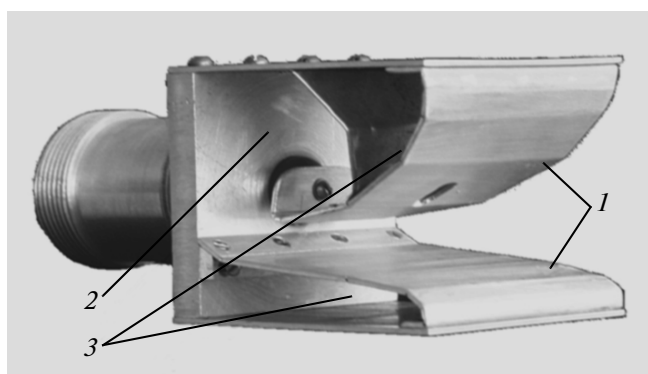


Рис. 7. Внешний вид комбинированной антенны. 1 –  $TEM$ -рупор, 2 – активный магнитный диполь, 3 – пассивные магнитные диполи.

ляют 20 и 68 мм. Вход трансформатора 3 соединен с выходом формирователя биполярных импульсов 1 через проходной изолятор 2, а выход – с 16-канальным делителем мощности 5, от которого с помощью кабелей 6 типа РК-50-11-11 биполярный импульс напряжения подается к элементам антенной решетки.

### ИЗЛУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА

В качестве самостоятельного излучателя и как элемент решетки использовалась комбинированная антенна (рис. 7), специально разработанная для возбуждающего биполярного импульса длительностью 0.5 нс. Антенна близка по конструкции к описанной в [2], но имеет в два раза меньшие размеры –  $7.5 \times 7.5 \times 8$  см. В источнике с одиночной антенной она присоединялась к выходу ф.б.и. без использования волнового трансформатора и делителя мощности. Для предотвращения электрического пробоя антенна помещалась в ди-

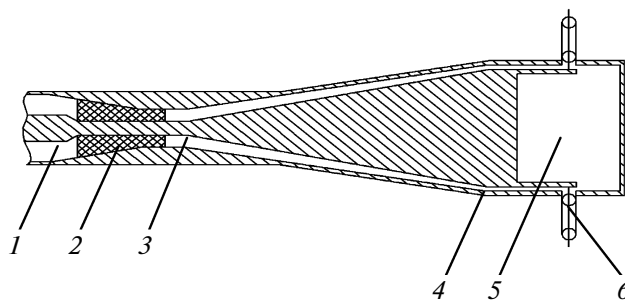


Рис. 6. Конструкция волнового трансформатора с делителем мощности. 1 – выход ф.б.и.; 2 – проходной изолятор; 3 – вход трансформатора; 4 – выход трансформатора; 5 – делитель мощности; 6 – кабели.

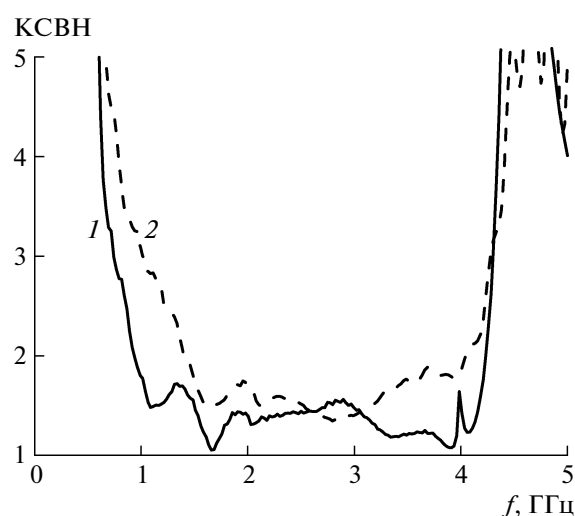


Рис. 8. КСВН комбинированной антенны (1) и элемента решетки (2).

электрический контейнер, заполненный газом  $SF_6$  под давлением 0.4 МПа.

На рис. 8 приведен коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) комбинированной антенны (кривая 1), а на рис. 9 – диаграммы направленности (д.н.) по пиковой мощности в  $H$ - и  $E$ -плоскостях. Ширина д.н. по половинному уровню мощности составляет  $\sim 85^\circ$  в плоскости  $H$  и  $\sim 110^\circ$  в плоскости  $E$ . Зная эффективность антенны по энергии ( $k_w = 0.9$ ) и пространственно-временные характеристики излучения, можно найти эффективность антенны по пиковой мощности [4] как  $k_p = P_{изл}/P_{г}$ , где  $P_{изл}$  – пиковая мощность импульса излучения,  $P_{г}$  – пиковая мощность импульса напряжения генератора на входе антенны. Измерения, выполненные при возбуждении антенны низковольтным биполярным импульсом длительностью 0.5 нс, позволили оценить величину  $k_p$  как  $\sim 0.8$ .

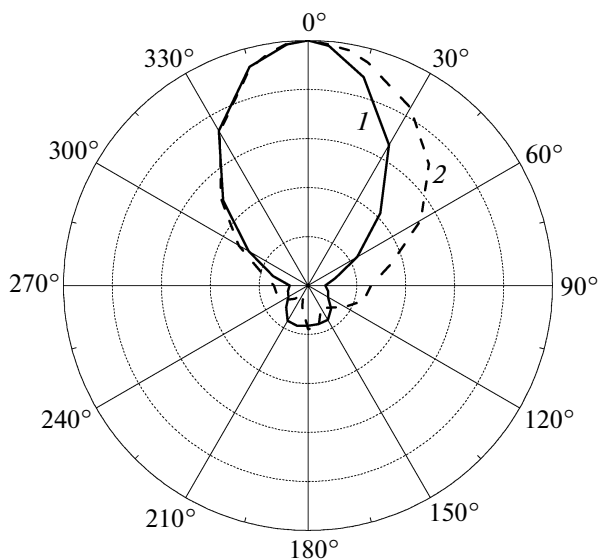


Рис. 9. Диаграммы направленности комбинированной антенны в плоскостях  $H$  (1) и  $E$  (2).

Измеренный коэффициент направленного действия антенны в главном направлении диаграммы составил  $D_0 \approx 4$ , а коэффициент по пиковой напряженности поля  $k_E = E_p R / U_{gmax} \approx 1.2$ , где  $U_{gmax}$  – максимальная амплитуда импульса напряжения. Полученная в измерениях величина  $E_p$  отличалась от рассчитанной по формуле

$$E_p = \frac{1}{R} \sqrt{30 P_r k_p D_0} \quad (1)$$

менее чем на 10%. Это различие обусловлено несимметричностью д.н. антенны (см. рис. 9), приводящей к увеличению погрешности вычисления  $k_p$  по методике, изложенной в [4].

Для антенны, излучающей с.ш.п.-импульс, важным параметром является зависимость формы импульса от угла наблюдения. Искажение формы импульса оценивалось как среднеквадратичное отклонение импульса  $U(t)$ , излученного под произвольным углом, от импульса  $V(t)$ , излученного в направлении максимума д.н.:

$$\sigma = \sqrt{\int_T [u(t) - v(t)]^2 dt / \int_T v^2(t) dt}, \quad (2)$$

где  $u(t) = U(t)/U_{max}$  и  $v(t) = V(t)/V_{max}$  – нормализованные функции,  $T$  – временное окно интегрирования.

На рис. 10 приведены зависимости от угла среднеквадратичного отклонения формы импульса, излученного комбинированной антенной, в  $H$ - (кривая 1) и  $E$ -плоскостях (кривая 2). Видимое различие форм импульсов проявляется при  $\sigma > 0.1$ .

В решетке комбинированные антенны закреплены на диэлектрической пластине с расстоянием между центрами антенн 9 см. В отличие от одиночной антенны изолятором на входе в элемент

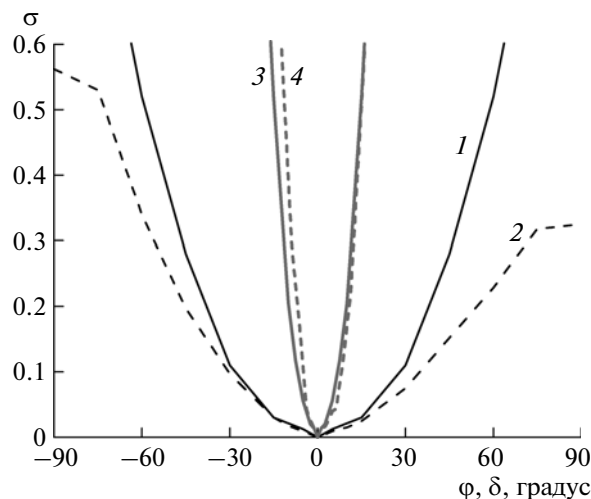


Рис. 10. Среднеквадратичное отклонение формы импульса в плоскостях  $H$  (1, 3) и  $E$  (2, 4), излученного комбинированной антенной (1, 2) и решеткой (3, 4).

решетки служит диэлектрик питающего кабеля. Усредненный КСВН элемента решетки приведен на рис. 8 (кривая 2). Его отличие от КСВН одиночной антенны (рис. 8, кривая 1) обусловлено другой конструкцией антенного входа.

На рис. 11 приведены д.н. решетки, ширина д.н. по половинному уровню мощности составляет  $\sim 20^\circ$  в обеих плоскостях. В отличие от одиночной антенны д.н. решетки симметричны в обеих плоскостях. Коэффициент направленного действия решетки в главном направлении составляет  $D_0 \approx 54$ , а эффективность по пиковой мощности  $k_p = 0.36$ . Эффективность по пиковой мощности рассчитывалась в приближении, что энергетическая эффективность элемента решетки такая же,

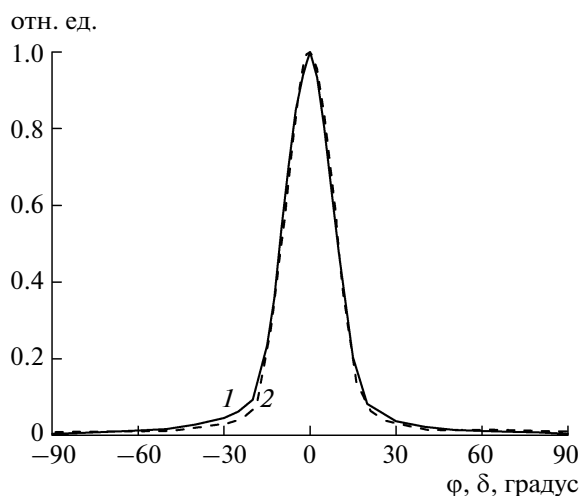


Рис. 11. Диаграммы направленности решетки в плоскостях  $H$  (1) и  $E$  (2).

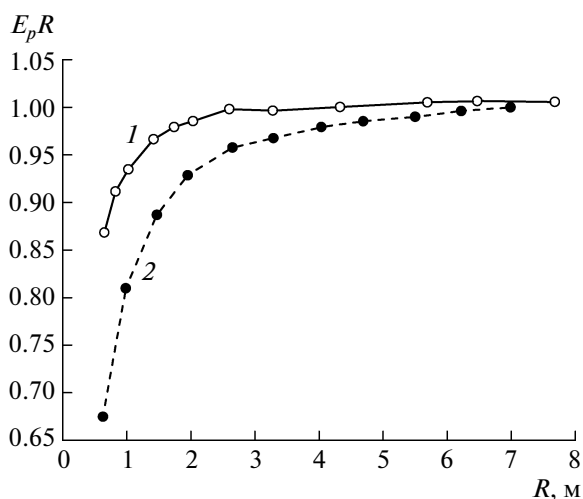


Рис. 12. Зависимость эффективного потенциала излучения решетки от расстояния. 1 – комбинированная антенна, 2 – ТЕМ-антенна.

как и у одиночной антенны ( $k_w = 0.9$ ). Коэффициент по пиковой напряженности поля для антенно-фидерной системы “волновой трансформатор – делитель мощности – кабельные фидеры – антенная решетка” составляет  $k_E \approx 3.1$ . Из формулы (1) можно найти для этой системы эффективность по пиковой мощности –  $k_p = 0.3$ . Так как в отличие от одиночной антенны д.н. решетки симметрична, можно полагать, что различие коэффициентов  $k_p$  решетки и антенно-фидерной системы обусловлено потерями (20% по мощности) как от рассогласования в системе, так и потерями в трансформаторном масле.

Приведенные на рис. 10 зависимости от угла среднеквадратичного отклонения формы импульса, излученного решеткой, в  $H$ - (кривая 3) и

$E$ -плоскостях (кривая 4) показывают, что по сравнению с одиночной антенной форма импульса начинает искажаться при меньших углах.

Были проведены измерения для нахождения дальней зоны излучения решетки. Расстояние до границы дальней зоны можно оценить из формулы  $R_T = 2D^2/\lambda_0$ , где  $D$  – максимальный размер решетки,  $\lambda_0$  – центральная длина волны спектра возбуждающего биполярного импульса напряжения. В нашем случае  $R_T \approx 3$  м. На рис. 12 приведена зависимость эффективного потенциала излучения  $E_p R$  от расстояния между решеткой и приемной антенной. В качестве приемных использовались компактная комбинированная антенна (кривая 1), аналогичная элементу решетки, и ТЕМ-антенна (кривая 2) с апертурой  $40 \times 8$  см. Горизонтальный участок кривой соответствует дальней зоне. Различие в поведении кривых объясняется разными размерами апертур антенн. Теоретическая оценка границы дальней зоны согласуется с результатами измерений с приемной комбинированной антенной. Из рисунка видно, что расстояния больше 6 м можно считать дальней зоной для ТЕМ-антенны с большой апертурой. Все измерения проводились с помощью ТЕМ-антенны на расстояниях более 6 м.

#### ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ

На рис. 13а представлена осциллограмма электромагнитного импульса, излученного одиночной антенной. Эффективный потенциал  $E_p R$  составил 260 кВ. При этом среднеквадратичное отклонение величины  $E_p R$  за 100 импульсов не превышало 5%. При использовании принудительного воздушного охлаждения источник с одиночной антенной работал непрерывно в течение часа, при этом изменение амплитуды излученных импульсов не

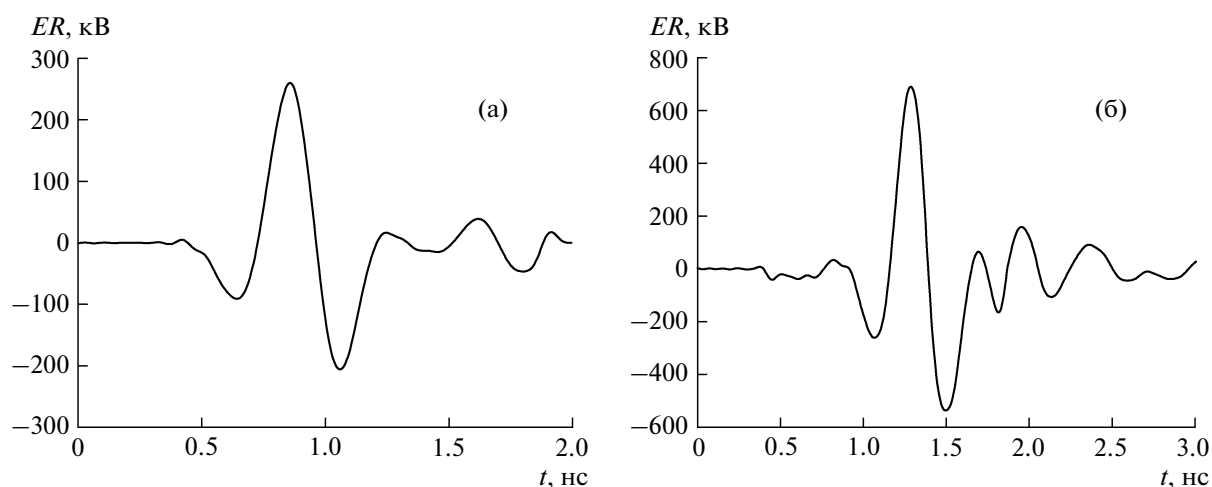


Рис. 13. Осциллограммы импульсов, излученных одиночной антенной (а) и решеткой (б).

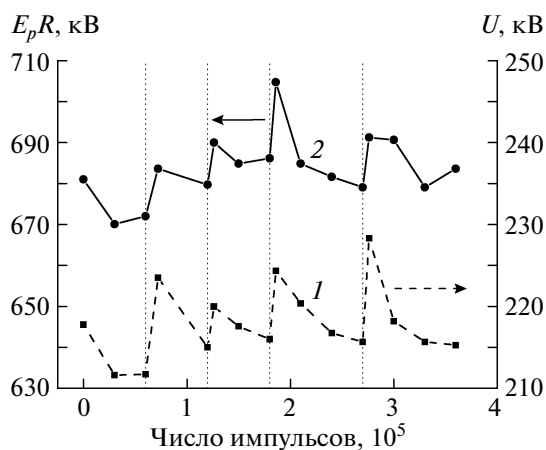


Рис. 14. Зависимости амплитуды биполярного импульса напряжения (1) и эффективного потенциала излучения (2) от числа импульсов.

превысило 15%. Пиковая мощность излучения составила  $\sim 650$  МВт. На рис. 13б представлена осциллограмма импульса, излученного решеткой.

На рис. 14 приведены зависимости амплитуды биполярного импульса напряжения на выходе ф.б.и. и эффективного потенциала от числа импульсов при частоте повторения 100 Гц для источника с 16-элементной решеткой. Вертикальными пунктирными линиями на рисунке показаны 10-минутные перерывы в работе генератора для охлаждения ф.б.и. Среднее значение эффективного потенциала составило  $E_p R \approx 690$  кВ. При этом среднеквадратичное отклонение  $E_p R$  за 100 импульсов не превышало 5%, а изменение амплитуды за  $3.6 \cdot 10^5$  импульсов (1 ч работы) не превысило 10%.

Коэффициент по пиковой напряженности поля был таким же, как и для низковольтных импульсов,  $k_E \approx 3.1$ . Пиковая мощность источника излучения с решеткой составила  $\sim 240$  МВт (при  $U_{gmax} = 200$  кВ). Меньшая по сравнению с источником на основе одиночной антенны пиковая мощность объясняется, прежде всего, тем, что у решетки форма импульса излучения сохраняется только в небольшом диапазоне углов в направлении максимума д.н. (рис. 10), а также вследствие уменьшения энергетической эффективности антенно-фидерной системы.

## ВЫВОДЫ

Разработаны источники импульсов с.ш.п.-излучения с субнаносекундной длительностью и пиковой мощностью 300–600 МВт при частоте повторения 100 Гц. Эффективный потенциал излучения источника с 16-элементной решеткой достигает 700 кВ при нестабильности менее 10%. При использовании принудительного воздушного охлаждения ф.б.и. генератор биполярных импульсов может работать непрерывно в течение одного часа на частоте повторения 100 Гц с изменением амплитуды выходного импульса менее 15%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // ПТЭ. 2005. № 3. С. 46.
2. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др. // РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 813.
3. Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. № 2. P. 211.
4. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // РЭ. 2005. Т. 50. № 5. С. 585.