

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

© 2011 г. Ю. А. Андреев, 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 11.05.2011 г.

Описан источник мощных сверхширокополосных электромагнитных импульсов наносекундной длительности. Биполярный импульс напряжения длительностью 3 нс и амплитудой 90 кВ подается на вход 4-элементной антенной решетки. Получены значения эффективного потенциала излучения  $E_p R = 560$  кВ на частоте повторения импульсов 100 Гц.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений применения мощных импульсов сверхширокополосного (с.ш.п.) излучения является исследование устойчивости радиоэлектронных систем больших объектов в условиях воздействия сильных импульсных электромагнитных полей. Современной тенденцией при разработке мощных источников с.ш.п.-излучения для исследований в данной области является увеличение длительности импульса ( $>1$  нс) и сдвиг нижней границы спектра излучения до 200–300 МГц [1]. Увеличение длительности импульса необходимо для того, чтобы цифровые информационные системы успевали реагировать на воздействие импульса [2]. Расстояние между объектом и источником излучения должно быть порядка максимального размера объекта. Поэтому при облучении больших объектов, например самолетов, предпочтительно использовать с.ш.п.-источники с антенными решетками для уменьшения ширины диаграммы направленности излучения и увеличения напряженности поля на объекте.

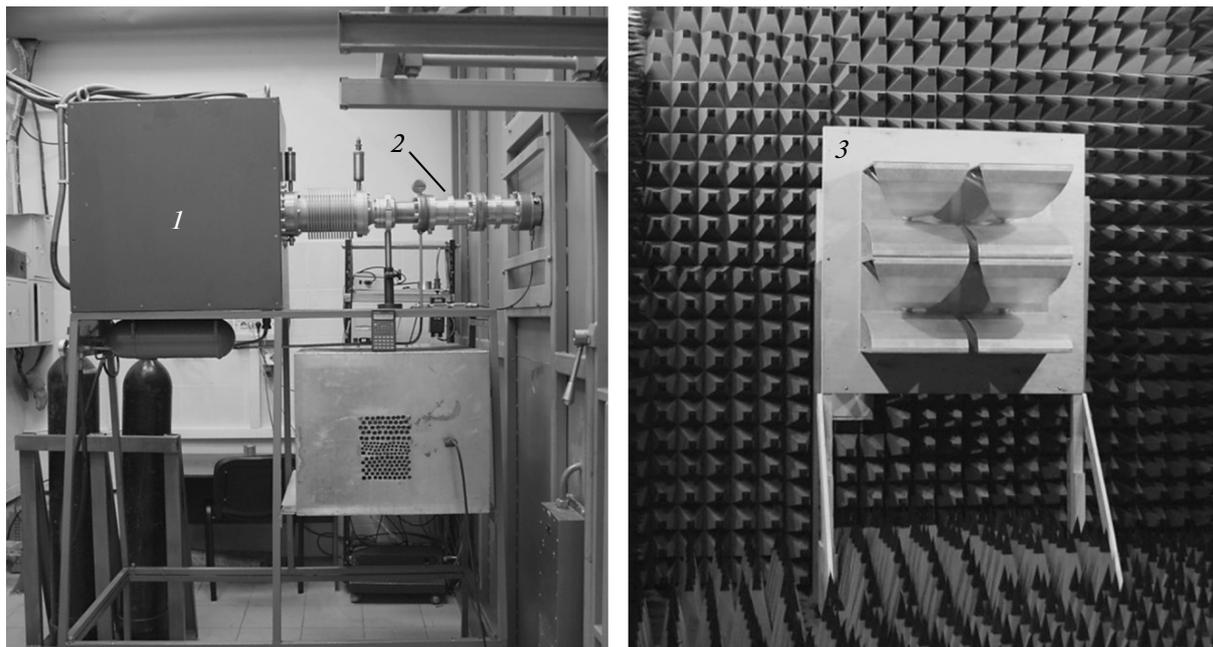
Ранее был разработан мощный источник с.ш.п.-излучения [3] на основе возбуждения 4-элементной решетки биполярным импульсом напряжения амплитудой 200 кВ и длительностью 3 нс. Длительность импульса излучения была равна  $\sim 5$  нс, а центральная частота спектра излучения  $\sim 300$  МГц. Эффективный потенциал излучения, определяемый как произведение пиковой напряженности поля на расстояние в дальней зоне, составил  $E_p R \approx 500$  кВ при энергии 13.5 Дж в формирующей линии генератора импульсов напряжения СИНУС-200.

Для получения биполярного импульса в этом с.ш.п.-источнике используется схема Введенско-

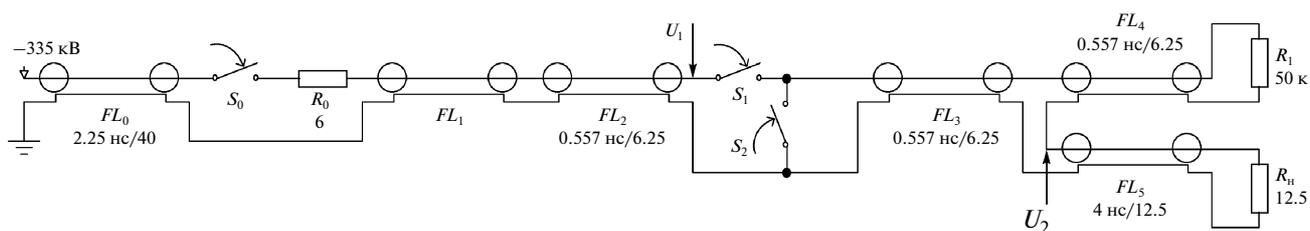
го [4] с двумя разрядниками. Недостатком этой схемы является то, что в процессе коммутации ток в обостряющем разряднике меняет свое направление при переходе через ноль. Это ограничивает скорость роста тока второй полуволны вследствие задержки зажигания катодных пятен при смене полярности тока [5] и соответственно пиковую напряженность излученного поля, которая пропорциональна производной тока по времени на входе антенны.

Кроме того, эффективность используемого первого варианта комбинированной антенны [6] была сравнительно низкой, что было обусловлено рядом причин, в том числе и наличием кроссполяризованного излучения. Топология элементов в решетке также была неоптимальной. Следует отметить, что время непрерывной работы источника с.ш.п.-излучения на частоте повторения импульсов 100 Гц [3] было 20 мин.

При последующих наших исследованиях была разработана новая схема формирователя биполярных импульсов (ф.б.и.) [7], в которой ток в обостряющем разряднике не менял свое направление, что позволило формировать биполярные импульсы длительностью до 200 пс [8]. Кроме того, был разработан новый вариант комбинированной антенны с расширенной полосой пропускания и высокой эффективностью [9, 10]. Все это позволило создать мощные источники с.ш.п.-излучения [11–14] с эффективным потенциалом излучения 0.3–1.7 МВ при длительности биполярных импульсов напряжения 0.2–2 нс и частоте повторения 100 Гц с использованием генератора импульсов напряжения СИНУС-160 при запасаемой энергии в формирующей линии генератора 3.2 Дж.



**Рис. 1.** Внешний вид источника излучения. 1 – генератор монополярных импульсов, 2 – формирователь биполярных импульсов, 3 – антенная решетка.



**Рис. 2.** Эквивалентная схема генератора биполярных импульсов.  $FL_0$ – $FL_5$  – коаксиальные линии;  $S_0$ – $S_2$  – разрядники;  $R_0$  – ограничительное сопротивление;  $R_{н}$  – нагрузка;  $R_1$  – дополнительное сопротивление;  $U_1$ ,  $U_2$  – точки вывода расчетных импульсов напряжения.

Целью данной работы было создание высокоэффективного источника с.ш.п.-излучения на основе 4-элементной решетки, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 3 нс, и получение импульсов излучения с  $E_p R \approx 500$  кВ на генераторе СИНУС-160. При разработке использовались новые схема ф.б.и., комбинированная антенна и топология элементов решетки.

### КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА

Источник (рис. 1) состоит из генератора монополярных импульсов СИНУС-160 (1), ф.б.и. 2, делителя мощности (на рисунке не показан) и 4-элементной антенной решеткой 3, возбуждаемой от ф.б.и. через делитель мощности. Импульсы от делителя мощности к элементам решетки передаются по кабелю РК50-17-51 с кордельной изоляцией. Для повышения электрической проч-

ности в кабели закачивался элегаз ( $SF_6$ ) под давлением 4 атм. Измерение характеристик излучения проводилось в безэховой камере.

### ГЕНЕРАТОР БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Генератор биполярных импульсов напряжения состоит из генератора монополярных импульсов, в качестве которого использовался генератор высоковольтных импульсов СИНУС-160, и ф.б.и. На эквивалентной схеме (рис. 2) генератор монополярных импульсов представлен формирующей линией  $FL_0$  и разрядником  $S_0$ . Эта линия может заряжаться от вторичной обмотки трансформатора Тесла до напряжения  $-335$  кВ с частотой следования импульсов 100 Гц. Формирователь биполярных импульсов собран по схеме с разомкнутой линией, в состав которой входят линии  $FL_1$ – $FL_5$ ,

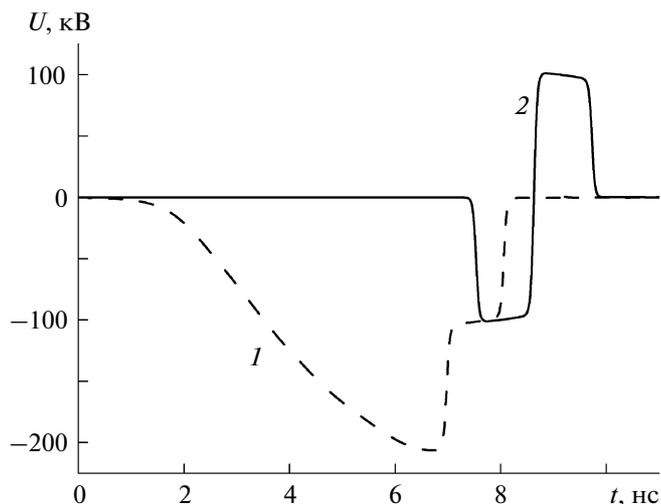


Рис. 3. Расчетные импульсы зарядного напряжения  $U_1$  на линии  $FL_2$  (1) и выходного биполярного импульса напряжения  $U_2$  в линии  $FL_5$  (2).

обостряющий  $S_1$  и срезающий  $S_2$  разрядники и нагрузка  $R_n = 12.5$  Ом.

При коммутации разрядника  $S_0$  импульс зарядного напряжения поступает на линию  $FL_2$  по передающей линии  $FL_1$  через ограничительный резистор  $R_0$ . Использование резистора  $R_0$  позволяет уменьшить осцилляции напряжения в контуре  $FL_0-S_0-R_0-FL_1-FL_2-S_1-S_2$  после формирования биполярного импульса и снизить эрозию электродов разрядников.

При срабатывании разрядника  $S_1$  вблизи максимума зарядного напряжения на линии  $FL_2$ , а  $S_2$  — с относительной задержкой, равной двойному пробегу по линии  $FL_3$ , в передающей линии  $FL_5$ , в конце которой установлена нагрузка, формируется биполярный импульс напряжения. Схема моделировалась с помощью программы PSpice. Разрядники имели коммутацию, близкую к идеальной. Дополнительное сопротивление  $R_1$  необходимо только для обеспечения работы программы. Пере-

дающая линия  $FL_1$  представляет собой набор линий с волновым сопротивлением от 45 до 88 Ом, который эквивалентен конструкции коаксиального перехода от разрядника  $S_0$  до линии  $FL_2$ .

На рис. 3 приведены расчетные импульсы зарядного напряжения  $U_1$  на линии  $FL_2$  (кривая 1) и выходного импульса биполярного напряжения  $U_2$  в линии  $FL_5$  (кривая 2). Максимальное зарядное напряжение на линии  $FL_2$  достигает 206 кВ за время 6.8 нс. Расчетный выходной биполярный импульс  $U_2$  имеет амплитуду 100 кВ и длительность 2.5 нс.

Конструкция ф.б.и. представлена на рис. 4. Внутри латунного корпуса в среде азота под давлением 50–65 атм размещены три коаксиальные линии  $FL_2-FL_4$ , правая часть линии  $FL_1$ , обостряющий  $S_1$  и срезающий  $S_2$  разрядники. Диаметры внутренних проводников линий  $FL_2, FL_3$  равны 70 мм,  $FL_4$  — 55 мм. Изолятор линии  $FL_4$  и проходной изолятор линии  $FL_5$  изготовлены из капролона как единое целое. Параметры линий указаны на рис. 2.

Электроды кольцевого разрядника  $S_1$  являются концы внутренних проводников линий  $FL_2$  и  $FL_3$  толщиной 2 мм, а электродами  $S_2$  — диск 2 толщиной 2 мм и вставка 1 на корпусе. Все электроды разрядников  $S_1$  и  $S_2$  сменные и изготовлены из меди. Зазоры в разрядниках  $S_1$  и  $S_2$  соответственно равны 1.5 и 0.5 мм. Внутренние проводники линий  $FL_2-FL_4$  соединены между собой индуктивностями утечки 3, назначение которых — снимать остаточный заряд на электродах после срабатывания разрядников.

Зарядный импульс на линию  $FL_2$  поступал по линии  $FL_1$  от генератора СИНУС-160 через капролоновый изолятор, не показанный на рис. 4. При последовательном срабатывании разрядников  $S_1, S_2$  формировался биполярный импульс напряжения, который выводился через проходной изолятор по согласованной передающей линии  $FL_5$  в нагрузку (на рис. 4 не показана).

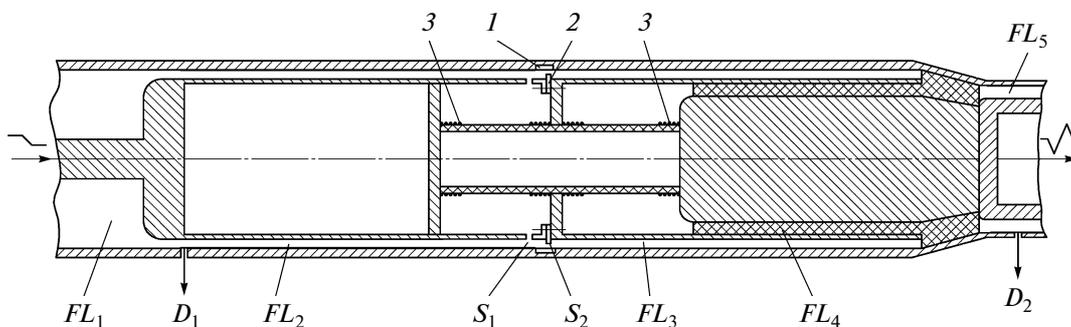


Рис. 4. Конструкция формирователя биполярных импульсов. 1 — вставка; 2 — диск; 3 — индуктивности утечки;  $FL_1-FL_5$  — коаксиальные линии;  $S_1, S_2$  — разрядники;  $D_1, D_2$  — делители напряжения.

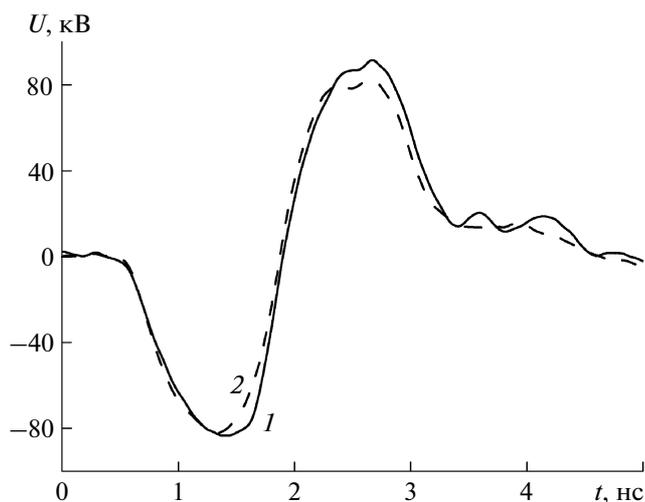


Рис. 5. Выходной биполярный импульс напряжения при работе генератора 1 ч (1) и 5 ч (2).

Для регистрации выходного биполярного импульса напряжения в линии  $FL_5$  установлен делитель напряжения  $D_2$  на связанных линиях. Доверительный временной интервал измерения выходного импульса делителем определяется временем двойного пробега волны по линии  $FL_5$  и составляет 4.7 нс. Делитель калибровался путем подачи биполярного импульса напряжения длительностью 3 нс на вход линии  $FL_5$  от низковольтного генератора. Осциллографом Tektronix TDS 6604 с полосой пропускания до 6 ГГц регистрировались с помощью аттенюаторов импульсы на выходе линии и ослабленный импульс с выхода делителя. Эксперимент показал хорошее согласие форм импульсов на выходе линии и импульса, восстановленного с коэффициентом ослабления 84, с делителя напряжения  $D_2$ .

Емкостный делитель  $D_1$  служит для регистрации зарядного напряжения на линии  $FL_2$ . Регистрация падающей волны напряжения проводилась емкостным делителем (на рис. 4 не показан), установленным на входе передающей линии  $FL_1$ . Этот делитель не калиброван и использовался для измерения стабильности срабатывания разрядника  $S_1$ .

При указанных выше межэлектродных зазорах и давлении в разрядниках  $S_1$ ,  $S_2$  65 атм зарядное напряжение линии  $FL_2$  составило 180 кВ, а время зарядки — 7 нс. Выходной биполярный импульс напряжения (рис. 5, кривая 1) имеет амплитуду отрицательной  $U_-$  и положительной  $U_+$  полувольт  $-83$  и  $+90$  кВ соответственно. Длительность биполярного импульса определялась по уровню  $0.1U_+$  и  $0.1U_-$  при линейной аппроксимации заднего фронта до пересечения с нулевой линией и составила 3 нс.

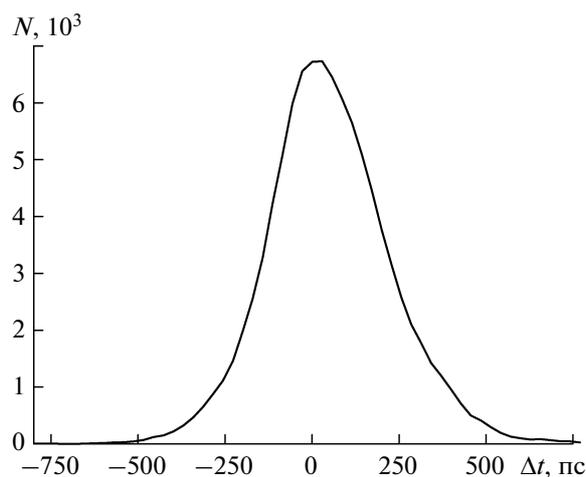


Рис. 6. Гистограмма разброса времени срабатывания обостряющего разрядника  $S_1$  относительно фронта падающей волны зарядного напряжения.

Амплитуда импульса оказалась меньше расчетной, что обусловлено упрощением процесса коммутации тока в расчетах и срабатыванием разрядников при напряжении ниже максимального зарядного. За импульс в нагрузку передается энергия 0.94 Дж, что составляет 30% от энергии, накопленной в формирующей линии  $FL_0$ . Среднеквадратичное отклонение времени  $\Delta t$  срабатывания разрядника  $S_1$  определялось по разбросу фронта биполярного импульса относительно фронта падающей волны зарядного напряжения и составило  $\sim 200$  пс, как это видно из гистограммы, приведенной на рис. 6, где  $N$  — число импульсов. При этом среднеквадратичное отклонение времени запуска развертки осциллографа не превышало 8 пс.

## ИЗЛУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА

Излучающая система представляет собой 4-элементную решетку ( $2 \times 2$ ) (см. рис. 1), элементы которой закреплены на диэлектрической пластине и объединены в вертикальные секции по два элемента в каждой. Соседние элементы в вертикальной секции гальванически связаны между собой. Расстояние между секциями равно 50 см. Такая конфигурация является оптимальной [15] для решетки из комбинированных антенн. Апертура решетки составляет  $95 \times 90$  см.

В качестве элемента решетки использовалась комбинированная антенна (рис. 7) размером  $45 \times 45 \times 47$  см, близкая по конструкции к описанной в [16]. Для подключения антенны к делителю мощности с помощью кабеля РК50-17-51 была изменена конструкция ввода.

Измерения частотных характеристик элемента решетки проводились в безэховой камере с помощью измерителя комплексных коэффициентов

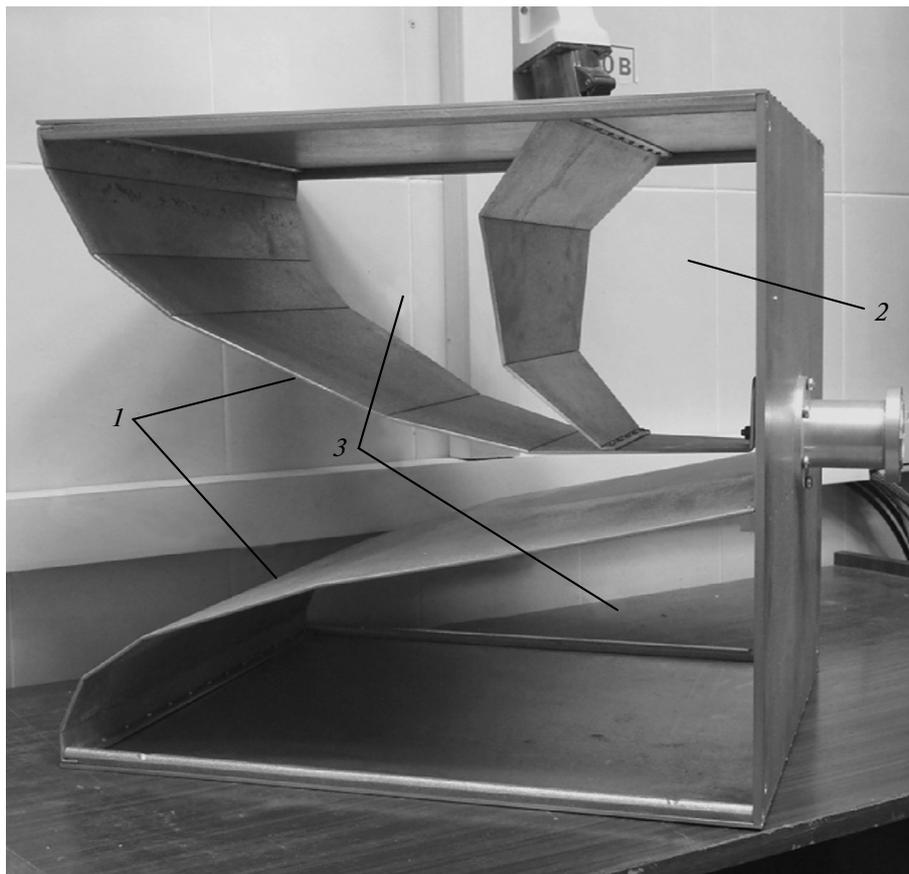


Рис. 7. Внешний вид элемента решетки. 1 – ТЕМ-рупор, 2 – активный магнитный диполь, 3 – пассивные магнитные диполи.

передачи Agilent 8719ET с полосой рабочих частот 0.05–13.5 ГГц. На рис. 8 приведена зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом для элемента решетки от частоты. По сравнению с антенной, описанной в [16], улучшилось согласование на частотах 0.8–0.9 ГГц. КСВН антенны  $\leq 2$  в полосе частот 0.13–1.1 ГГц.

Для системы из двух элементов решетки, один из которых работает как передающая антенна, а другой – как приемная, были проведены измерения амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик (рис. 9). Изменение АЧХ относительно среднего значения не выходит за пределы  $\pm 1.5$  дБ для главного направления ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$ , где  $\varphi$  – азимутальный угол,  $\delta$  – угол места) в диапазоне частот 0.14–0.85 ГГц (рис. 9, кривая 1). Отклонение фазочастотной характеристики от линейной зависимости ( $\Delta\Phi_{ЧХ}$ ) для этого же направления наблюдения не превышает  $\pm\pi/16$  в диапазоне частот 0.14–0.9 ГГц (рис. 9, кривая 2). Относительная полоса пропускания, определяемая одновременным выполнением трех критериев:  $КСВН \leq 2$ ,  $\Delta АЧХ \leq \pm 1.5$  дБ и  $\Delta\Phi_{ЧХ} \leq \pm\pi/16$ , – со-

ставляет 6.1 : 1 (0.14–0.85 ГГц) для главного направления излучения.

Измерения пространственно-временных характеристик элемента решетки проводились с по-

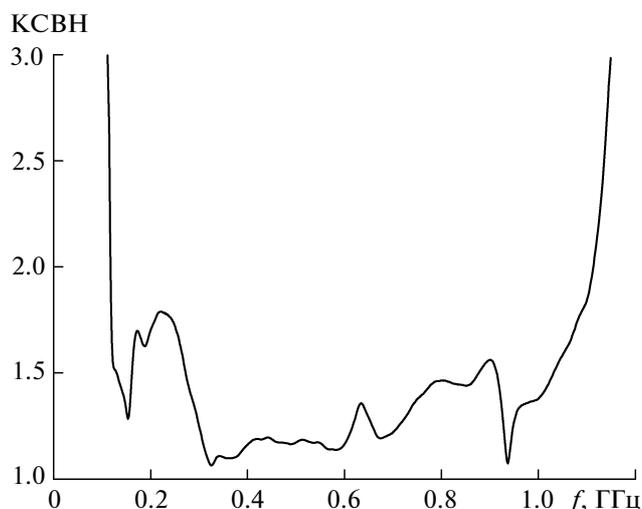


Рис. 8. КСВН элемента решетки.

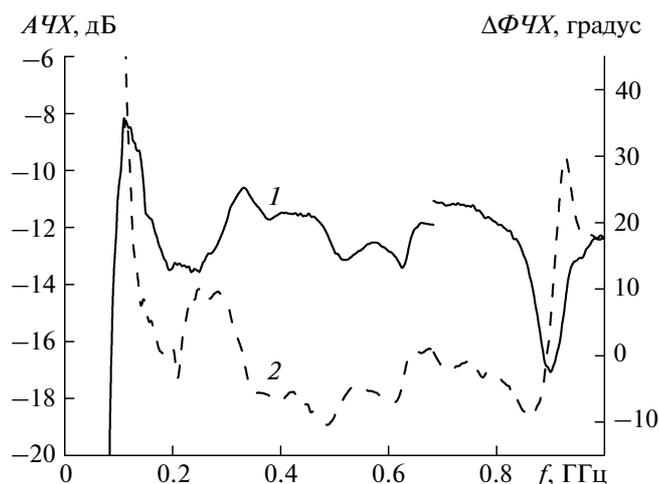


Рис. 9. Измеренные АЧХ (1) и отклонение ФЧХ от линейной (2) элемента решетки.

мощью низковольтного генератора биполярных импульсов напряжения длительностью  $\tau_p = 3$  нс, амплитудой 117 В и нестабильностью  $<1.5\%$ . Для регистрации электромагнитного излучения использовалась приемная *TEM*-антенна, представляющая собой половинку *TEM*-рупора над земляной пластиной (рис. 10). Антенна согласована с волновым сопротивлением фидера 50 Ом. Согласно [8], эффективная длина приемной *TEM*-антенны в области низких частот составляет  $h_e = H/2$ .

Для выявления влияния размеров антенны на искажение принимаемого сигнала было проведено сравнение приемных *TEM*-антенн разных размеров (таблица). Размеры антенн взяты относительно пространственной длительности биполярного импульса напряжения  $\tau_p c$  ( $c$  – скорость света), совпадающей с центральной длиной волны спектра излучения. Значения пиковой напряженности поля импульса излучения измерены разными

*TEM*-антеннами в одной и той же точке наблюдения. При этом полагалось для всех антенн  $h_e = H/2$ . Из таблицы видно, что при изменении длины антенны  $L$  в три раза разброс значений пиковой напряженности поля регистрируемого импульса излучения не превышает 8% и обусловлен конструктивными особенностями антенн.

Значения пиковой напряженности поля импульса излучения при измерениях антеннами разных размеров

Антенна	$L/\tau_p c$	$H/\tau_p c$	$W/\tau_p c$	$E_p$ , В/м
<i>TEM</i> <sub>1</sub>	0.5	0.05	0.22	0.92
<i>TEM</i> <sub>2</sub>	1	0.091	0.44	0.92
<i>TEM</i> <sub>3</sub>	1	0.022	0.11	0.86
<i>TEM</i> <sub>4</sub>	1.67	0.022	0.11	0.85

На рис. 11 представлены нормированные осциллограммы импульсов, принятых антеннами *TEM*<sub>1</sub> и *TEM*<sub>4</sub>. Различие форм зарегистрированных импульсов, определяемое по среднеквадратическому отклонению [14], составляет менее 10%. Во всех последующих измерениях использовалась антенна *TEM*<sub>3</sub> с размерами земляной пластины  $120 \times 20$  см, длиной рупора 90 см и апертурой  $10 \times 2$  см.

На рис. 12 приведены диаграммы направленности элемента решетки по пиковой мощности в *H*- и *E*-плоскостях. Ширины диаграмм на половинном уровне мощности примерно одинаковы и составляют  $80^\circ$ .

По результатам низковольтных измерений коэффициент направленного действия антенны в главном направлении  $D_0 = 5$ . Эффективность по пиковой напряженности поля, определяемая как  $k_E = E_p R / U_g$ , где  $U_g$  – пиковое значение модуля амплитуды напряжения генератора, равна 2. Энер-

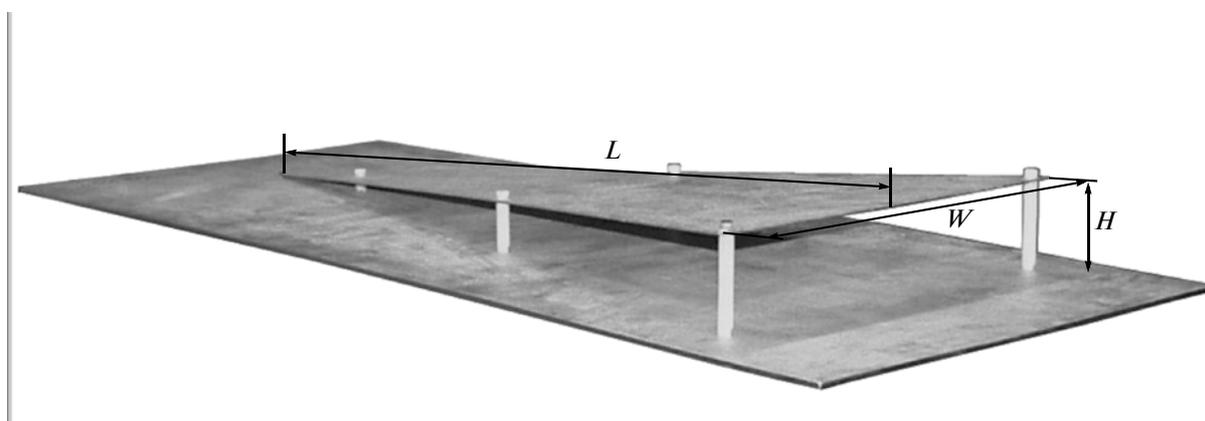


Рис. 10. Внешний вид приемной *TEM*-антенны.  $L$  – длина лепестка рупора;  $W$  – ширина,  $H$  – высота апертуры антенны.

гетическая эффективность, равная отношению излученной энергии к энергии в импульсе генератора (без учета потерь в передающей антенне), примерно равна 0.93. Методики определения этих параметров приведены в работе [10]. Отметим, что для элемента решетки, использованного в источнике [3], величина  $k_E = 0.9$  [17].

Для антенной решетки были проведены измерения диаграммы направленности и зависимости пиковой напряженности поля  $E_p$  от расстояния до точки наблюдения. Ширина диаграмм в  $H$ - и  $E$ -плоскостях на половинном уровне мощности составила  $\sim 35^\circ$  (рис. 13). Коэффициент направленного действия решетки в главном направлении  $D_0 = 18$ . Эффективность по пиковой напряженности поля для решетки составила 8.3.

Расстояние до границы дальней зоны можно оценить из формулы  $R_r = 2D^2/\lambda_0$ , где  $D$  – максимальный размер решетки,  $\lambda_0 = \tau_p c$  – центральная длина волны спектра возбуждающего биполярного импульса напряжения (излучения). В нашем случае  $R_r \approx 3.8$  м. На рис. 14 приведены зависимости эффективного потенциала излучения  $E_p R$  от расстояния между решеткой и приемной антенной для случаев использования в качестве последней  $TEM$ -антенны (кривая 1) и резистивного диполя [18] (кривая 2). Горизонтальный участок кривых соответствует дальней зоне. Различие в поведении кривых объясняется разными размерами апертур антенн. Теоретическая оценка границы дальней зоны согласуется с результатами измерений. Из рисунка видно, что расстояния  $> 3$  м можно считать дальней зоной. Все измерения проводились с помощью  $TEM$ -антенны на расстояниях  $> 3.5$  м.

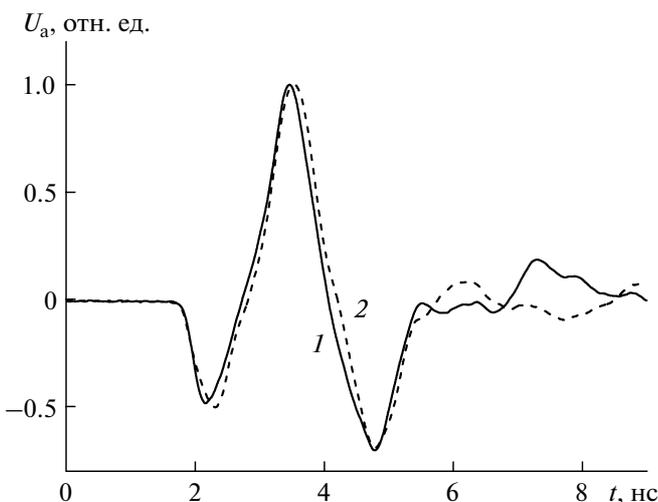


Рис. 11. Осциллограммы импульсов напряжения на выходе антенн:  $TEM_1$  (1),  $TEM_4$  (2).

### ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Были проведены испытания на стабильность и продолжительность работы источника при частоте повторения импульсов 100 Гц. После каждого часа непрерывной работы следовал двухчасовой перерыв для охлаждения генератора монополярных импульсов. В начале испытаний давление азота в разрядниках ф.б.и. установили 62 атм. Далее, для того чтобы скомпенсировать увеличение зазоров в разрядниках вследствие эрозии электродов, давление газа снижали. Изменение величины давления в процессе испытаний показано на рис. 15 (кривая 3). Снижением давления в формирователе в пределах 2–3 атм через каждый час работы удалось поддерживать стабильную работу разрядников.

В эксперименте одновременно измерялись зависимости амплитуд положительной  $U_+$  и отрицательной  $U_-$  полуволн биполярного импульса напряжения (рис. 15, кривые 1, 2), а также амплитуды электромагнитного импульса ( $E_p R$ ) и ее среднеквадратичного отклонения (рис. 16) от числа импульсов. Во всех измерениях усреднение проводилось по 100 импульсам.

Среднеквадратичные отклонения амплитуд биполярного импульса  $U_+$  и  $U_-$  за пять часов работы составили 3% и 1.6% соответственно. При среднеквадратичном разбросе амплитуды падающей волны зарядного напряжения за 100 импульсов 1% среднеквадратичный разброс амплитуд положительной и отрицательной полуволн биполярного импульса составил 3.5–5 %.

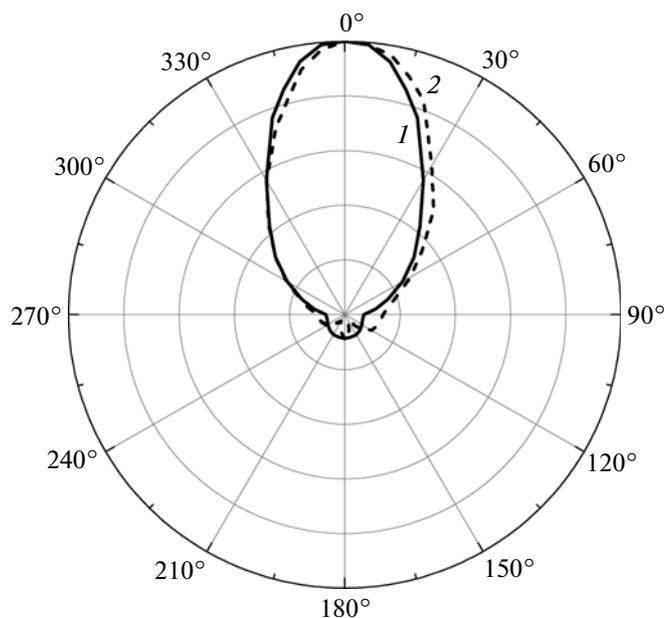


Рис. 12. Диаграммы направленности элемента решетки в плоскостях  $H$  (1) и  $E$  (2).

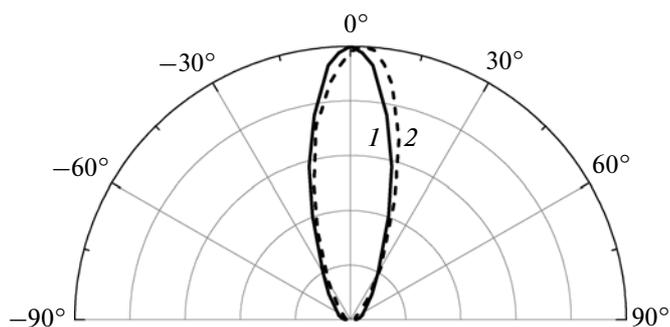


Рис. 13. Диаграммы направленности решетки в плоскостях  $H$  (1) и  $E$  (2).

Длительность биполярного импульса за время работы уменьшилась до 2.7 нс (рис. 5, кривая 2), что обусловлено срабатыванием срезающего разрядника  $S_2$  при временах задержки меньше оптимальных. Среднеквадратичное отклонение времени срабатывания разрядника  $S_1$  относительно фронта падающей волны зарядного напряжения за время работы менялось в пределах 180–250 пс.

Анализ рис. 16 (кривая 2) показывает, что для выхода на уровень стабильной работы при среднеквадратичном отклонении  $\sigma < 5\%$  амплитуды электромагнитного импульса ( $E_p R$ ) в начале каждого часа требуется время 5–10 мин. Средняя величина  $E_p R$  за пять часов работы равна 530 кВ при среднем значении среднеквадратичного отклонения  $\sigma = 5.5\%$ . Эффективность по пиковой напряженности поля источника с.ш.п.-излучения составила 6.2. Отличие значений  $k_E$ , полученных

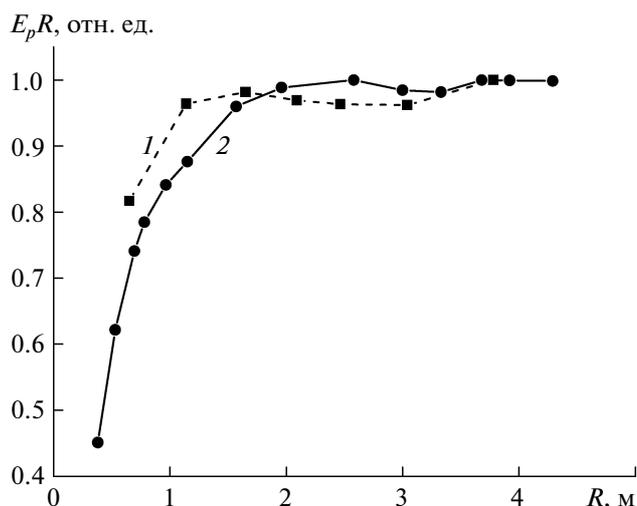


Рис. 14. Зависимости эффективного потенциала излучения от расстояния при использовании  $TEM$ -антенны (1) и резистивного диполя (2).

при низковольтных и высоковольтных измерениях, обусловлено тем, что при низковольтных измерениях не учитывались потери в четырехканальном делителе мощности и фидерах между делителем и входами антенн.

На рис. 17 представлены осциллограммы электромагнитных импульсов, излученных антенной решеткой во время первого (кривая 1) и пятого (кривая 2) часов работы источника. Из рисунка видно, что форма импульса излучения хорошо сохраняется при количестве импульсов практически до двух миллионов.

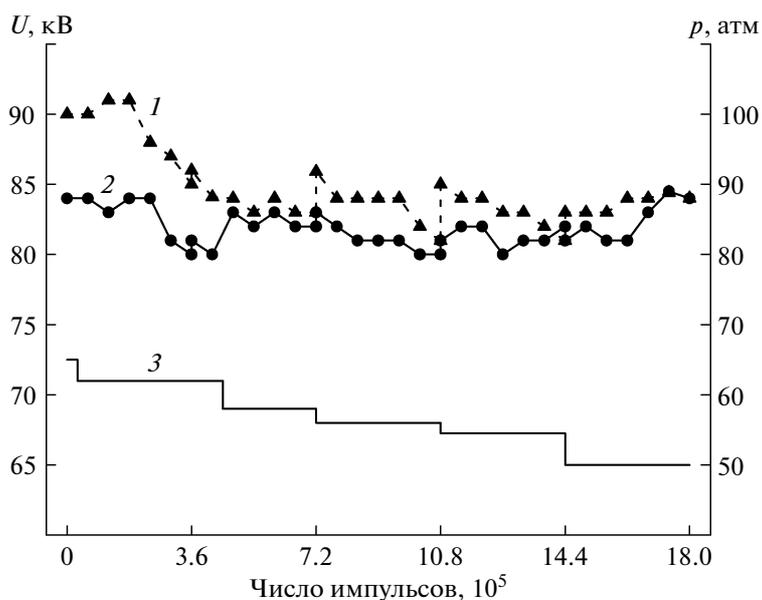


Рис. 15. Зависимости амплитуд положительной  $U_+$  (1), отрицательной  $U_-$  (2) полуволн биполярного импульса, а также давления в разрядниках (3) от числа импульсов.

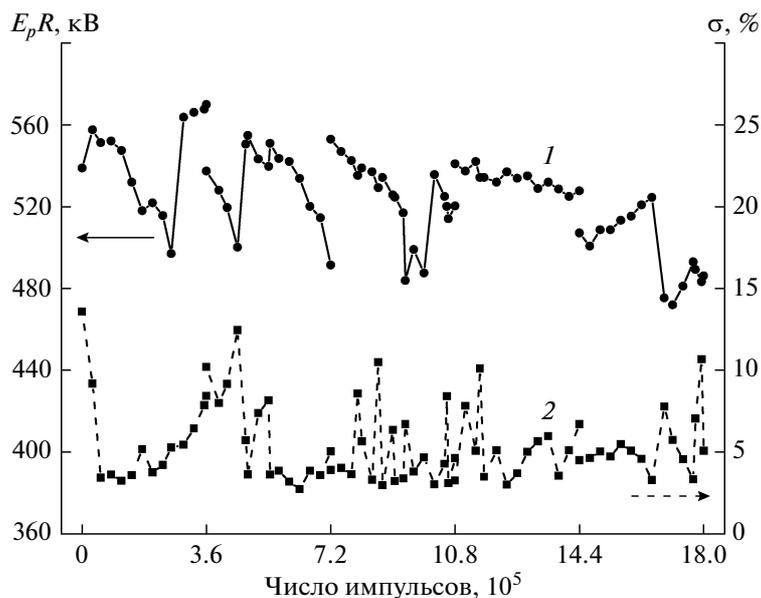


Рис. 16. Зависимости эффективного потенциала излучения (1) и его среднеквадратичного отклонения (2) от числа импульсов.

**ВЫВОДЫ**

Разработанный источник с.ш.п.-излучения на основе четырехэлементной решетки комбинированных антенн, возбуждаемой генератором биполярных импульсов со средним значением амплитуды 85 кВ, длительностью 3 нс и выходным сопротивлением 12.5 Ом, позволяет получать импульсы со средним значением эффективного потенциала 530 кВ при частоте повторения 100 Гц. Ресурс работы источника без смены электродов разрядников формирователя составляет  $\geq 5$  ч. При этом изменение амплитуды импульса напряжения не

превышает 11%, а эффективного потенциала излучения – 17%.

По сравнению с с.ш.п.-источником, описанным в [3], при близких значениях эффективности преобразования энергии, запасенной в формирующих линиях генераторов монополярных импульсов, в энергию биполярных импульсов напряжения эффективность данного источника по пиковой напряженности поля увеличена в 2.5 раз. Это достигнуто благодаря увеличению эффективности по полю используемых комбинированных антенн в 2.2 раза, оптимальной компоновке решетки и уменьшению времени перепада напряжения биполярного импульса в 1.5 раза. Последнее обусловлено отсутствием задержки зажигания катодных пятен при переходе полярности тока через ноль в разрядниках формирователя биполярных импульсов. При близких значениях полученных эффективных потенциалов излучения энергия в формирующей линии данного источника снижена в 4 раза, а время непрерывной работы возросло в 3 раза по сравнению с ранее разработанным.

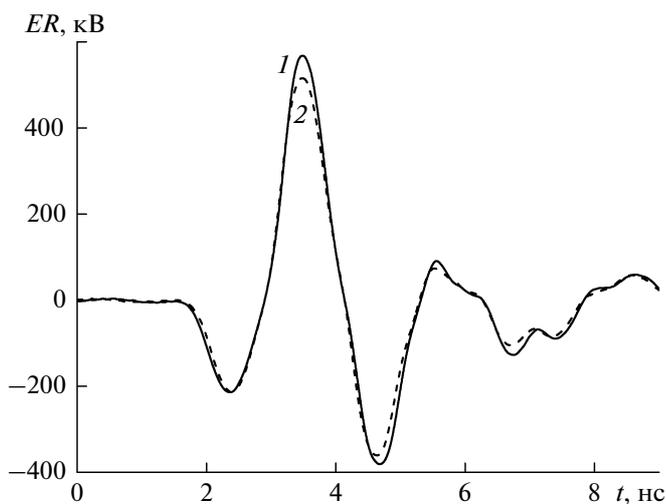


Рис. 17. Осциллограммы импульсов, излученных антенной решеткой во время первого (1) и пятого (2) часов работы источника.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц и генерация электромагнитного излучения в системах большой мощности”, проект “Исследования эффективных механизмов генерации сверхмощных электромагнитных импульсов наносекундной длительности и их взаимодействия с веществом”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morton D., Banister J., DaSilva T. et al.* // Book of Abstracts. Inter. Power Modulator and High Voltage Conf. GA, USA, Atlanta: IEEE, May 23–27 2010. P. 193.
2. *Sabath F., Romer B.* // Book of Abstracts. EURO-EM'2008. European Electromagnetics. Switzerland, Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, July 21–25 2008. P. 30.
3. *Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Визирь В.А. и др.* // ПТЭ. 2000. № 2. С. 82.
4. *Введенский Ю.В.* // Изв. вузов СССР. Радиотехника. 1959. № 2. С. 249.
5. *Efremov A.M., Korolev Yu.D., Kovalchuk B.M.* // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, September 19–24 2010. P. 308.
6. *Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Визирь В.А. и др.* // ПТЭ. 1997. № 5. С. 72.
7. *Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al.* // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. № 2. P. 211.
8. *Andreev Yu.A., Efremov A.M., Koshelev V.I. et al.* // Proc. 15 Inter. Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, September 21–26 2008. P. 447.
9. *Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Andreev Yu.A. et al.* // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. USA, Nevada, Las Vegas: June 17–22 2001. V. 2. P. 1661.
10. *Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 5. С. 585.
11. *Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др.* // ПТЭ. 2005. № 3. С. 46.
12. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 813.
13. *Plisko V.V., Andreev Yu.A., Efremov A.M. et al.* // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, September 19–24 2010. P. 485.
14. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др.* // ПТЭ. 2011. № 1. С. 77.
15. *Koshelev V.I., Plisko V.V.* // Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics. Russia, Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, September 10–15 2006. P. 413.
16. *Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M. et al.* // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. Russia Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, September 19–24 2010. P. 415.
17. *Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.* // Журнал Радиоэлектроники. 2006. (электронный журнал). 2006. № 4; <http://jre.cplire.ru/mac/apr06/1/text.html>
18. *Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.* // РЭ. 2004. Т. 49. № 4. С. 460.