

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.371-373

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА  
ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПЕРТУРНОЙ АНТЕННЫ  
ПРИ ЕЕ ВОЗБУЖДЕНИИ ВИДЕОИМПУЛЬСОМ

© 2023 г. В. Е. Осташев<sup>а</sup>, \*, А. В. Ульянов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва 125412 Российская Федерация

\*E-mail: ostashev@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 21.09.2022 г.

После доработки 07.12.2022 г.

Принята к публикации 23.02.2023 г.

Предложена методика эмпирической оценки переходной характеристики антенны апертурного типа при ее возбуждении видеоимпульсом. Оценка проведена на основе сравнения напряжения возбуждения антенны и напряжения возбуждения излучающего раскрыва, которое вычислено по параметрам излученного импульса. Дана оценка энергетической эффективности заданной антенны как преобразователя электрической энергии в энергию излучения при вариации длины антенны, длительности и формы импульса ее возбуждения.

DOI: 10.31857/S0033849423110074, EDN: AWCBYE

ВВЕДЕНИЕ

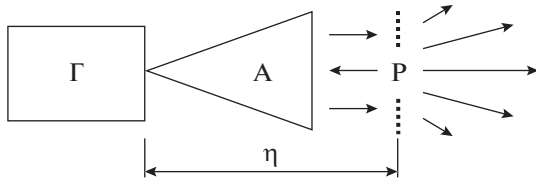
Апертурная антенна на основе симметричного *ТЕМ*-рупора широко используется для создания направленных излучений в широком частотном диапазоне. Размеры рупора характеризуются тремя параметрами: угловой шириной электрода  $\alpha(x)$ , углом их раскрыва  $\beta(x)$  в плоскости поляризации (*E*-плоскости) и длиной ( $x$  – координата на оси симметрии рупора). Параметры излучения определяются размерами рупора, а его волновой импеданс задается отношением  $\beta(x)/\alpha(x)$ . Рупор называют регулярным, если углы  $\alpha$  и  $\beta$  не зависят от  $x$ .

Параметры излучателя характеризуются прежде всего шириной полосы рабочих частот, а в пределах этой полосы – эффективностью антенно-фидерной системы, диаграммой направленности (ДН), энергетической эффективностью главного лепестка ДН и уровнем бокового излучения [1].

Целевой функцией оптимизации параметров *ТЕМ*-рупора были: максимальная амплитуда излучаемого сверхкороткого импульса и минимальная угловая ширина энергетической ДН [2], максимальный угол поворота главного лепестка ДН антенной решетки рупоров [3], минимальная низкочастотная граница рабочей полосы частот рупора [4], параметры согласования регулярного и нерегулярного рупоров в зависимости от их формы [5].

Антенна излучателя – это преобразователь электрической энергии возбуждения антенны в энергию ее излучения в пространство. Любая система преобразования должна быть энергетически эффективной. Поэтому первой задачей оптимизации системы возбуждатель-антенна является согласование элементов системы для достижения ее максимальной эффективности. В [6] на основе экспериментальных и расчетных данных была выполнена оценка эффективности макета излучателя как преобразователя первичной электрической энергии в энергию сверхширокополосного (СШП) излучения в главном лепестке ДН антенны. Системы с низкой энергетической эффективностью могут быть востребованы, если нет альтернативных способов решения практической задачи или если энергетическая эффективность устройства не является определяющим параметром его функциональной эффективности.

Цель данной работы – по параметрам импульса возбуждения антенны и соответствующего импульса излучения оценить параметры переходной (частотной) характеристики антенны и ее энергетическую эффективность как преобразователя электрической энергии импульса возбуждения антенны в энергию СШП-излучения, а также оптимизировать параметры системы антенна–импульс возбуждения для достижения максимальной эффективности.



**Рис. 1.** Схема преобразования энергии импульса возбуждения антенны в излучение: Г – генератор; А – антенна; Р – излучающий раскрыв.

### 1. ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ ПРИ ЕЕ ВОЗБУЖДЕНИИ ВИДЕОИМПУЛЬСОМ

Рассмотрим излучатель с антенной направленного излучения апертурного типа. Измерение ее параметров по главной оси ДН антенны является первой задачей в исследовании характеристик излучателя. На основе этих измерений уже можно получить представление о переходной характеристике (ПХ) антенны как пассивного четырехполюсника, а также оценить эффективность преобразования энергии импульса возбуждения антенны в энергию излучения.

Рассмотрим условную схему излучателя и формирования излучения (рис. 1). Пусть однонаправленный раскрыв (Р) антенны (А) является плоским, возбуждается синхронно и однородно, согласован с пространством свободного распространения излучения (его импеданс  $Z_0 = 120\pi$ , Ом). Согласование раскрыва с пространством означает, что в рабочей полосе частот вся энергия возбуждения раскрыва излучается.

Пусть  $E(t, R, \bar{\varphi} = 0)$  – напряженность поля излучения антенны в удаленной точке пространства на главной оси ДН ( $\bar{\varphi} = 0$ ) и на расстоянии  $R$  от апертуры, а  $I_p$  и  $U_p$  – ток и напряжение возбуждения излучающего раскрыва антенны. Если характерный размер раскрыва прямоугольной формы равен  $A = \sqrt{hw}$  ( $w$  и  $h$  – ширина и высота раскрыва,  $h$  лежит в  $E$ -плоскости), а возбуждение раскрыва однонаправленного излучения синхронно и однородно, то в рабочей полосе частот произведение  $RE(t)$  равно

$$\begin{aligned} RE(t - R/c, R, \bar{\varphi} = 0) &= \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} A \frac{dI_p}{dt} = \frac{Z_0}{2\pi c} A \frac{dI_p}{dt} = \frac{A}{2\pi c} \frac{dU_p(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (1)$$

Откуда по результату регистрации импульса  $E(t, R, \bar{\varphi} = 0)$  может быть восстановлено фактическое напряжение возбуждения раскрыва

$$U_p(t) = \frac{2\pi c}{A} \int_{-\infty}^t RE(t, R, \bar{\varphi} = 0) dt. \quad (2)$$

Поскольку напряжение  $U_p$  вычислено со стороны пространства распространения излучения, обозначим его  $U_{p,0}$ . Функция  $U_{p,0}(t)$  имеет следующие свойства:

- не зависит от  $R$ , так как в дальней зоне излучения произведение  $ER$  от  $R$  не зависит;
- не зависит от  $A$ , так как в рабочей полосе частот антенны  $E \sim A$ ;
- $U_{p,0}(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , так как функция  $E(t)$  финитна;

–  $\int_{-\infty}^{+\infty} U_{p,0}(t) dt = 0$ , это находится в согласии с тем, что спектральная плотность сигнала излучения  $E(\omega = 0) = 0$ .

Следует отметить, что вычисление  $U_{p,0}$  в соответствии с (2) сводит модель реального излучателя к эквивалентной модели, в которой излучает плоский раскрыв, возбуждаемый синхронно и однородно.

Генератор импульсов возбуждения антенны вбрасывает в нее энергию с мощностью  $(U_r)^2/Z_r$  ( $Z_r$  – входной импеданс антенны). Если исходить из предположения, что в пределах рабочей полосы частот антенна есть система частотно-независимая, то напряжение возбуждения излучающего раскрыва, вычисленное со стороны генератора, равно

$$U_{p,r}(t) = 2U_r(t) \frac{\sqrt{\gamma}}{1 + \gamma} \sqrt{\frac{Z_0}{Z_r}}, \quad (3)$$

где  $\gamma = Z_a/Z_0$ ,  $Z_a$  – выходной импеданс антенны. Коэффициент  $2\sqrt{\gamma}/(1 + \gamma) < 1$  обусловлен отражением части потока электромагнитной энергии на границе раздела сред с разным значением волновых импедансов ( $Z_a$  и  $Z_0$ ). За пределами рабочей полосы частот рупора учет отражения энергии на его конце проводится в частотной области в соответствии с [7] или по формулам асимптотической теории отражения [8].

Для функции  $U_r(t)$  произвольного вида, например униполярного видеоимпульса, интеграл  $\int_{-\infty}^{+\infty} U_{p,r}(t) dt \neq 0$ . Частотный спектр такого импульса имеет максимальную плотность на нулевой частоте, в то время как плотность частотного спектра импульса возбуждения раскрыва на этой частоте равна нулю ( $U_{p,0}(\omega = 0) = 0$ ). Прямое сравнение импульсов  $U_{p,r}(t)$  и  $U_{p,0}(t)$  позволяет определить параметры ПХ антенны и оценить ее энергетическую эффективность.

### 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассмотрим рабочий макет излучателя СШП-импульсов наносекундной длительности (рис. 2).

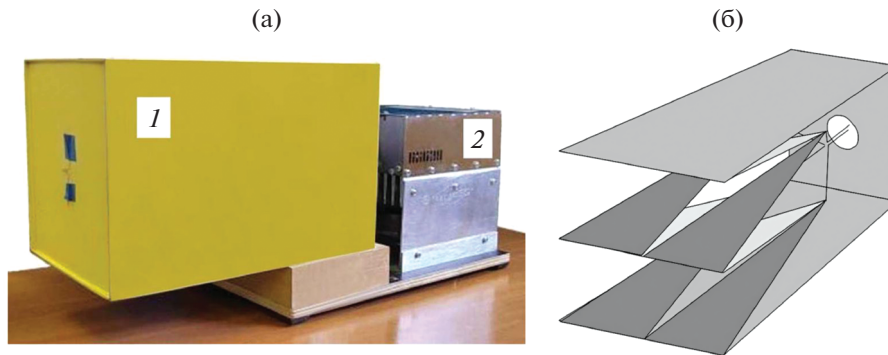


Рис. 2. Макет излучателя: 1 – антенна; 2 – генератор импульсов возбуждения (а); и схема его антенны (б), все поверхности антенны электропроводящие.

Антенна излучателя – синхронная пассивная решетка, состоящая из четырех регулярных симметричных *ТЕМ*-рупоров. Размерность решетки  $2 \times 2$ . Длина электрода  $\approx 16$  см, угол раскрытия электродов  $\beta \approx 28^\circ$ . При соотношении сторон поперечного сечения рупора  $h/w \approx 1.25$  его импеданс равен  $\approx 200$  Ом [9]. Каждый рупор решетки присоединен к фидеру генератора гибкой короткой двухпроводной волновой линией с импедансом  $\approx 200$  Ом. При этом входной импеданс антенны равен  $Z_r \approx 50$  Ом и согласован с генератором, а выходной равен  $Z_a \approx 200$  Ом.

Конструкция представленной антенны технологична в изготовлении (электроды плоские) и компактна: при заданной апертуре длина антенны уменьшена вдвое. В [10] параметры полурупора такой антенны в режиме приема были сопоставлены с параметрами классического полурупора таких же размеров средствами 3D-моделирования процесса во временной области. На примере полурупора с импедансом 120 Ом при его возбуждении плоской волной излучения с фронтом единичного перепада напряженности поля 30 пс было показано, что энергетическая эффективность классического полурупора примерно в 1.4 раза меньше.

### 3. СРЕДСТВА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Регистрация электрических импульсов субнаносекундной длительности проведена с использованием цифрового TDS6604B и стробоскопического TRM7118 осциллографов, частотная полоса регистрации 6 и 18 ГГц соответственно.

Канал регистрации напряженности импульсного поля излучения состоял из приемника на основе микрополосковой линии (тип ИППЛ [11]) и кабеля связи приемника с осциллографом. Длительность фронта ПХ ИППЛ с кабелем связи составляла  $\approx 30$  пс, а всего тракта регистрации с осциллографом TDS6604B – примерно 65 пс.

Результат регистрации видеоимпульса возбуждения антенны  $U_r(t)$  представлен на рис. 3. Там же изображена зависимость энергии этого импульса  $W_r(t)$  на нагрузке  $Z_r = 50$  Ом. Регистрируемые параметры видеоимпульса  $U_r(t)$ : амплитуда  $\approx 9.5$  кВ, энергия  $\approx 0.56$  мДж, фронт быстрого перепада напряжения  $\approx 100$  пс, длительность импульса полная  $\approx 3$  нс (от начала до конца импульса), а по перепаду зависимости в пределах  $(0.1 \dots 0.9) W_r(t) / W_{r,\max}$  – примерно 2 нс. Только 40% энергии импульса находится в пределах длительности быстрого перепада напряжения.

Параметры импульса СШП-излучения на оси антенны в дальней зоне излучения, где  $ER = \text{const}$ , представлены на рис. 4. Импульс излучения характеризуется следующими параметрами: пиковое значение произведения  $ER \approx 15$  кВ, длительность импульса на уровне  $0.5ER \approx 100$  пс. Изотропно-излучаемая энергия импульса равна

$$W_{\text{и}} = \int dt (ER)^2 / 30 \approx 0.92 \text{ мДж.}$$

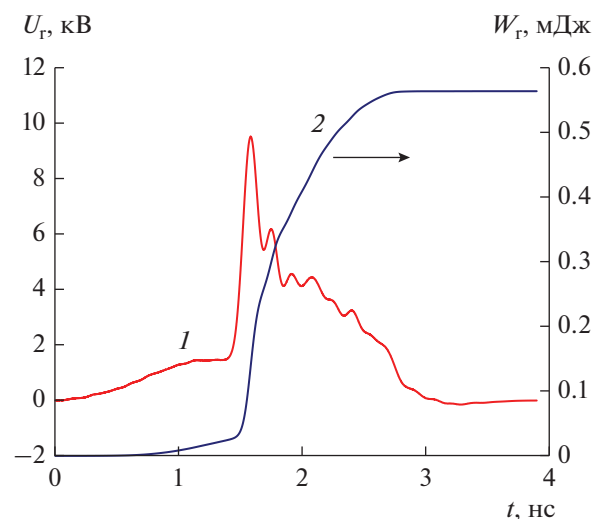


Рис. 3. Импульс генератора возбуждения антенны (1) и его энергия (2).

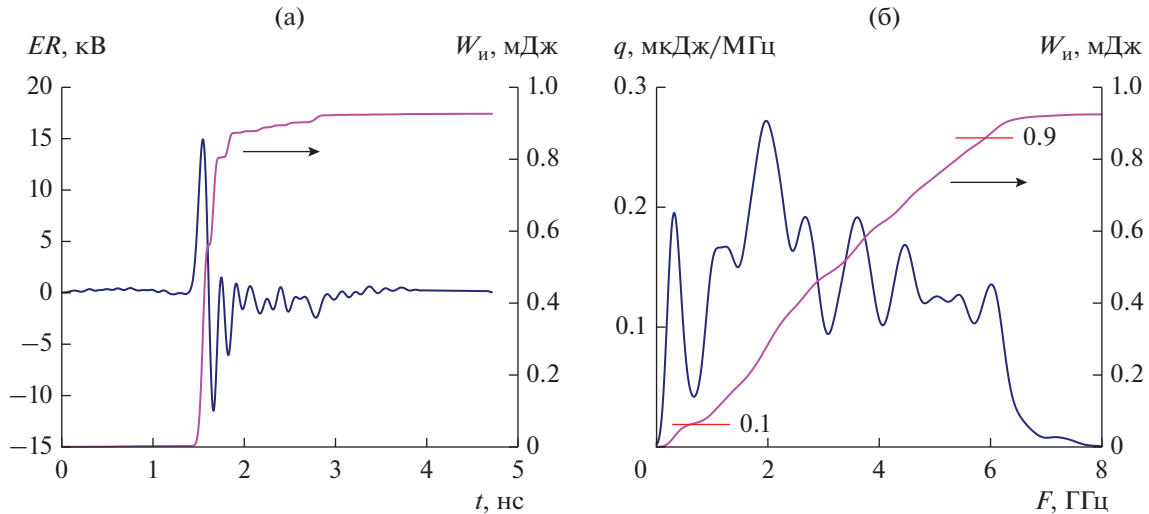


Рис. 4. Импульс напряженности поля излучения (а), его энергетический спектр (б) и изотропно-излучаемая энергия  $W_{и}$  (кривые со стрелкой).

Эта энергия распределена в частотном интервале 0.1...6.5 ГГц, заданном по уровню  $0.1q_{\max}$ . Если границы интервала оценивать по уровню значений 0.1 и 0.9 зависимости  $W_{и}(F)/W_{и,\max}$  то они равны 1 и 5.6 ГГц (см. рис. 4б). В относительно узком частотном интервале, 0...0.5 ГГц, локализована энергия излучения, индуцированная медленно изменяющейся частью видеоимпульса возбуждения, в которой заключено  $\approx 60\%$  его энергии.

По приведенным данным коэффициент усиления антенны по энергии равен

$$G_3 = W_{и}/W_{г} \approx 1.6,$$

а по пиковой мощности —

$$G_M = \frac{[(ER)_{\max}^2/30]}{[(U_{г,\max})^2/50]} \approx 4.2.$$

Различие значений  $G_3$  и  $G_M$  обусловлено особенностью амплитудно-временной формы видеоимпульса возбуждения, которая характеризуется тем, что пиковая мощность этого импульса больше импульсной примерно в десять раз.

Длине максимального перепада напряженности поля импульса СШП-излучения ( $c\tau \approx 3.3$  см) поставим в соответствие эквивалентную длину волны синусоидального сигнала  $\lambda_{\text{эКВ}}$  из условия равенства максимальной крутизны этих сигналов. Из выражения

$$|d(\sin(\omega t))/dt|_{\omega t=\pi} \approx 2/\tau$$

следует, что  $\lambda_{\text{эКВ}} \approx \pi c\tau \approx 10.5$  см ( $c$  — скорость электромагнитной волны). Таким образом, эквивалентный электрический размер апертуры антенны равен  $(2\pi/\lambda_{\text{эКВ}})h \approx 10$ .

#### 4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ

Параметры ПХ антенны характеризуют ее динамические свойства во временной области и границы рабочей полосы частот в частотной области. При отсутствии средств создания ступенчатого возбуждения антенны в режиме излучения или приема параметры ПХ антенны могут быть определены на основе данных, приведенных на рис. 3 и 4, следующим образом.

Вычислим напряжение  $U_{p,r}(t)$  и  $U_{p,0}(t)$  в соответствии с (2) и (3), а также энергию этих импульсов на нагрузке  $Z_0$ . Синхронизируем импульсы по основанию быстрого перепада напряжения. Результат вычислений представлен на рис. 5. В соответствии с этим результатом эффективность антенны по пиковой мощности равна  $\eta_a \approx (U_{p,0}/U_{p,r})^2 \approx 68\%$ . Запишем баланс мощности на входе и выходе антенны в виде

$$\frac{(Eh)^2}{Z_0} \left(\frac{w}{h}\right)_{Z_a} \frac{4\gamma}{(1+\gamma)^2} \eta_a = \frac{(khE)^2}{Z_a}. \quad (4)$$

Здесь  $kh$  — эффективная высота антенны [1],  $(w/h)_{Z_a}$  — отношение сторон рупора, соответствующее значению импеданса  $Z_a$ . Отметим, что при  $\eta_a \approx 68\%$  из (4) следует, что в интервале  $Z_a$  от 50 до 200 Ом значения  $k$  находятся в интервале (0.47, 0.54). В работах [12, рис. 9.3] и в [13, формула (1-53)] показано, что коэффициент  $k \approx 0.5$ .

Отношение энергии импульсов  $U_{p,0}(t)$  и  $U_{p,r}(t)$   $\eta(t) = W_{p,0}/W_{p,r}$  к фиксированному моменту времени есть энергетическая эффективность антенны как преобразователя энергии ее возбуждения в полную энергию излучения. Конечное значение

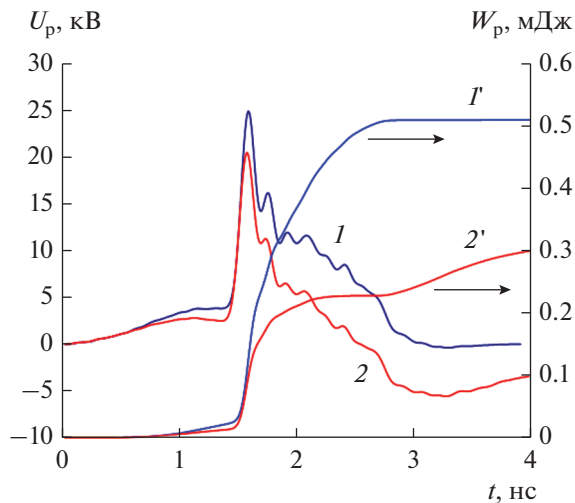


Рис. 5. Напряжение  $U_{p,r}$  (1) и  $U_{p,0}$  (2) и соответствующая энергия этих импульсов ( $W_p$  и  $W'_p$ ).

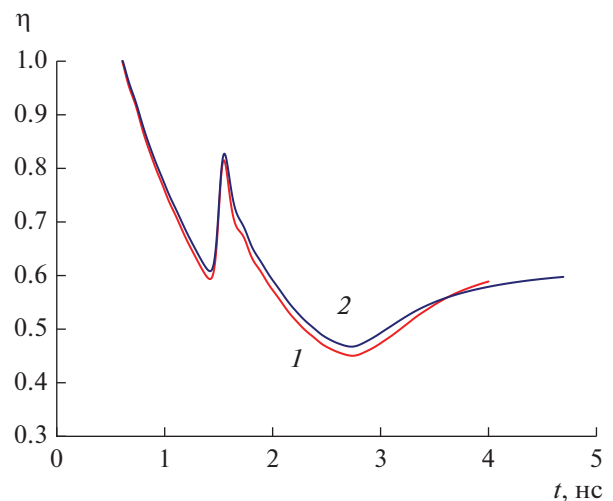


Рис. 6. Динамика изменения параметра  $\eta$ : 1 – эксперимент; 2 – расчет.

$\eta$  не зависит от погрешности синхронизации напряжений  $U_{p,0}$  и  $U_{p,r}$ . Динамика изменения параметра  $\eta$  по данным эксперимента и расчета представлена на рис. 6. Расчет проведен на основе модели односторонне излучающего плоского прямоугольного раскрытия, представленного элементами Гюйгенса [11]. Ось ДН каждого элемента проходит через точку возбуждения раскрытия. Энергия импульса возбуждения  $U_r(t)$  локализована внутри пирамиды, в основании которой находится излучающий раскрыв, а на вершине – точка возбуждения. При этих условиях раскрыв возбуждается не синхронно и не однородно. Поле излучения в произвольной точке пространства в передней и в задней полуплоскости раскрытия формируется как суперпозиция излучений от элементов Гюйгенса с учетом различия ракурса и времени прихода импульсов. Форма и размер пирамиды соответствовали *ТЕМ*-рупору рассматриваемой антенны. Эффекты дифракции на краях раскрытия в модели не учитываются.

Зависимость  $\eta(t)$  немонотонна. Локальный максимум  $\eta(t)$  находится в окрестности точки 1.6 нс ( $\eta \approx 80\%$ ), где расположен фронт видеоимпульса возбуждения  $U_r(t)$  с длительностью  $\approx 100$  пс. Минимальное значение  $\eta(t)$  соответствует концу импульса  $U_r(t)$  ( $\approx 2.7$  нс). После этого момента антенна излучает накопленную в ней энергию. К концу процесса излучается  $\approx 60\%$  энергии, подведенной к раскрытию со стороны генератора. Поскольку реальная антенна представлена моделью плоского односторонне излучающего раскрытия, возбуждаемого синхронно и однородно, то потеря 40% энергии импульса возбуждения обусловлена отражением энергии на апертуре за пределами рабочей полосы частот антенны, а также эффективностью использования поверхности раскрытия

при его сверхширокополосном возбуждении, не синхронном и не однородном. Отметим, что уровень локальной эффективности ( $\eta \approx 80\%$ ) указывает на то, что относительно короткий импульс возбуждения может быть излучен этой антенной более эффективно.

Основываясь на сопоставлении формы и частотного спектра импульсов  $U_{p,r}(t)$  и  $U_{p,0}(t)$ , а также характера зависимости параметра  $\eta(t)$ , преобразуем функцию  $U_{p,r}(t)$  к виду функции  $U_{p,0}(t)$  с использованием бездиссипативных частотных *RC*-фильтров первого порядка, а именно:

высокочастотного (ВЧ, дифференцирующего)

$$\frac{dU_{p,0}}{dt} + \frac{U_{p,0}}{\tau_{\text{ВЧ}}} = \frac{dU_{p,r}}{dt} \quad (5)$$

и низкочастотного (НЧ, интегрирующего)

$$\tau_{\text{НЧ}} \frac{dU_{p,0}}{dt} = U_{p,r} - U_{p,0}. \quad (6)$$

Здесь  $\tau_{\text{ВЧ}}$  – характерное время ослабления напряжения для ВЧ-фильтра, а  $\tau_{\text{НЧ}}$  – характерное время возрастания напряжения для НЧ-фильтра.

Результат сравнения амплитудно-временной формы напряжения  $U_{p,0}(t)$ , вычисленного в соответствии с (2), с напряжением  $U_{p,r}(t)$  после последовательной ВЧ- и НЧ-фильтрации при значении параметров  $\tau_{\text{ВЧ}} \approx 1.6$  нс и  $\tau_{\text{НЧ}} \approx 27$  пс представлен на рис. 7. Полученный результат показывает, что динамика напряжения возбуждающего раскрытия  $U_{p,0}$  удовлетворительно моделируется при преобразовании напряжения  $U_{p,r}$  с использованием ВЧ-фильтрации первого порядка (обозначим этот результат как  $F_{\text{ВЧ}}(U_{p,r})$ ). Согласование амплитуд  $U_{p,0}$  и  $F_{\text{ВЧ}}(U_{p,r})$  достигается при

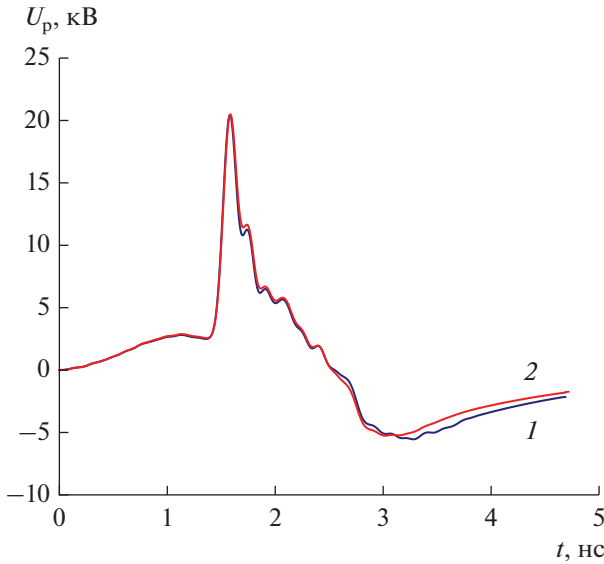


Рис. 7. Напряжение возбуждения раскрыва  $U_{p,0}$  (1) и напряжение  $U_{p,r}$  (2) после ВЧ- и НЧ-фильтрации.

последующей НЧ-фильтрации импульса  $F_{вч}(U_{p,r})$  при вариации значений параметра  $\tau_{нч}$ . Оптимальное значение  $\tau_{нч} \approx 27$  пс соответствует длительности фронта ПХ  $\approx 60$  пс.

Таким образом, результат эмпирической оценки, построенной на предположениях, содержащихся в (2), (3), (5) и (6), показал, что длительность фронта ПХ заданной антенны равна  $\approx 60$  пс, а длительность спада ПХ  $\approx 1.6$  нс. Соответствующие НЧ и ВЧ границы рабочей полосы частот антенны по уровню минус 6 дБм равны  $f_{нч} = (2\pi\tau_{нч})^{-1} \approx 100$  МГц и  $f_{вч} = (2\pi\tau_{вч})^{-1} \approx 5.9$  ГГц.

Длительность фронта ПХ определяется качеством исполнения и согласования волнового тракта от фидера генератора к элементам антенной решетки, а также несинхронностью возбуждения раскрыва. Характерная длительность спада ПХ соответствует длине, равной  $c\tau_{вч} \approx 48$  см. Из рис. 8 следует, что эта длина равна примерно половине длины замкнутой электрической цепи, измеряемой от точек возбуждения электродов рупора разной полярности и проходящей по внешней электропроводящей поверхности антенны (штриховая линия), т.е.

$$c\tau_{вч} \approx \frac{h}{4 \sin(\beta/2)} \times \{1 + \cos(\beta/2) + 2 \sin(\beta/2)[1 + 2d/h]\}. \quad (7)$$

При увеличении угла  $\beta$  длина  $c\tau_{вч}$  по отношению к длине рупора,  $0.25 \text{ctg}(\beta/2)h$ , монотонно увеличивается от значения, равного двум при  $d = 0$ . Таким образом, рассматриваемая антенна имеет

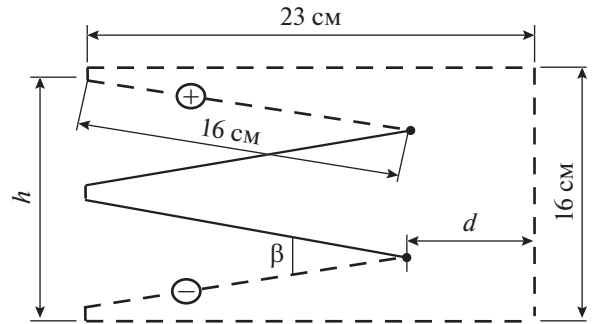


Рис. 8. Схема TEM-рупорной антенны в E-плоскости.

электрическую длину, более чем вдвое превышающую длину рупора.

### 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТЕННЫ КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ВИДЕОИМПУЛЬСА ЕЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ЭНЕРГИЮ СШП-ИЗЛУЧЕНИЯ

В системе “антенна–импульс ее возбуждения” при фиксированных параметрах ( $\beta, Z_a$ ) TEM-рупора и видеоимпульса возбуждения параметром управления эффективностью преобразования энергии является электрическая длина антенны, а если все размеры антенны фиксированы, то длительность и форма видеоимпульса возбуждения. Рассмотрение задачи по оптимизации эффективности преобразования энергии в антенне проведем в заданной последовательности.

1. Пусть антенна возбуждается импульсом, представленным на рис. 3. Рассмотрим две антенны с высотой апертуры  $h$ , равной 10 и 20 см, конструктивно подобные той, что представлена на рис. 8, т.е.  $\beta = 28^\circ$  и  $Z_a = 200$  Ом. В соответствии с (7), время  $\tau_{вч}$  для этих антенн равно примерно 1.1 и 1.9 нс. Алгоритм сравнения этих антенн по параметру  $\eta(t)$  представлен на рис. 5 и 6, а его конечный результат на рис. 9. Результат показывает, что антенна большей длины эффективнее ( $\eta(t)$  больше). Поскольку время  $\tau_{вч}$  для этой антенны вдвое больше, то искажение видеоимпульса ее возбуждения при его преобразовании к импульсу возбуждения раскрыва меньше. Конечное значение энергетической эффективности этих антенн составило примерно 52% и 66%. Отметим, что локальное значение эффективности  $\eta$  при быстром перепаде напряжения возбуждения ( $\approx 80$  кВ/нс) достигает примерно 80%.

На рис. 10 представлен энергетический спектр импульсов, излучаемых по оси ДН этих антенн. Максимумы спектральной плотности приведены к одному значению. Увеличение эффективности преобразования энергии при большой апертуре

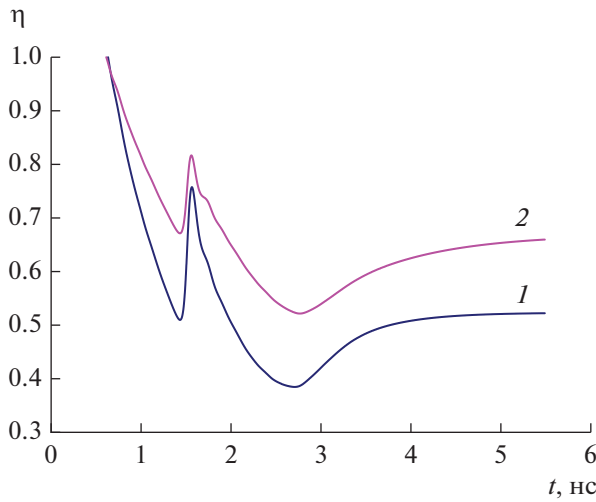


Рис. 9. Динамика изменения параметра  $\eta(t)$  для антенн с высотой апертуры 10 (1) и 20 см (2).

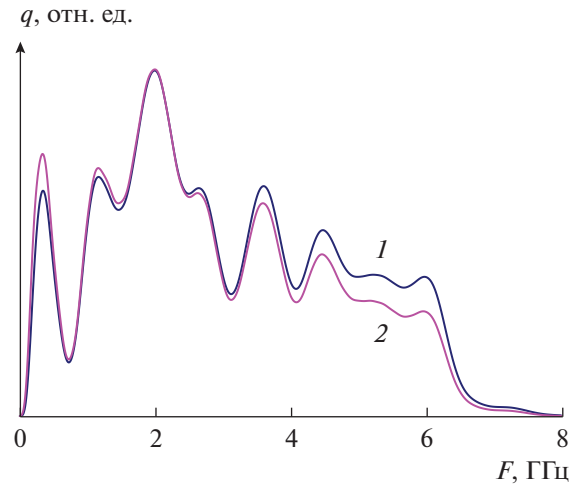


Рис. 10. Энергетический спектр излучения для антенн с высотой апертуры 10 (1) и 20 см (2).

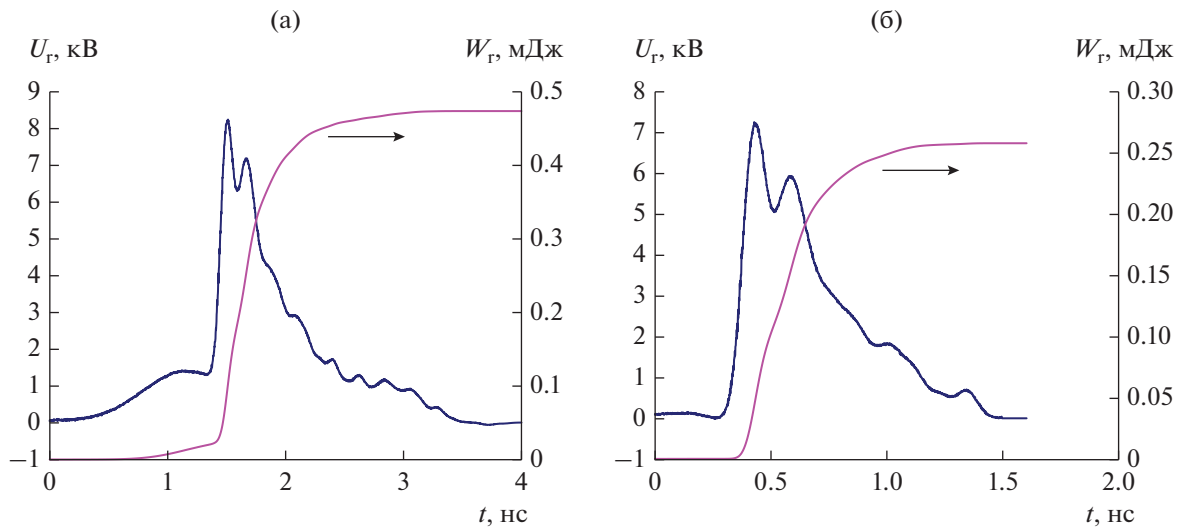


Рис. 11. Импульс возбуждения антенны с пьедесталом (а) и без него (б).

антенны обусловлено расширением частотного спектра излучения в НЧ-область, которая представлена в широкой области пространства распространения излучения. Уменьшение энергии излучения в ВЧ-области спектра относительно мало, поскольку эта энергия локализована в относительно узкой области физического пространства.

2. Пусть теперь фиксированы размеры антенны:  $\beta = 28^\circ$ ,  $Z_a = 200$  Ом и ее электрическая длина,  $\sigma_{\text{ВЧ}} \approx 48$  см. Будем возбуждать антенну видеоимпульсами разной длительности и формы. Рассмотрим два импульса: один с пьедесталом, другой – тот же, но с отсеченным пьедесталом (рис. 11). Полная длительность импульса с пьедесталом  $\tau_r \approx 4$  нс, без

пьедестала  $\approx 1.2$  нс. Для этих импульсов на рис. 12 показана динамика изменения параметра  $\eta(t)$ .

Конечное значение эффективности  $\eta$  при коротком видеоимпульсе возбуждения равно  $\approx 78\%$ , а в локальном максимуме  $\approx 86\%$ . Отметим, что различие этих значений меньше, чем в предыдущих примерах. Понятно, что при уменьшении длительности импульса возбуждения антенны, размеры которой фиксированы, влияние факторов ВЧ- и НЧ-фильтрации импульса на эффективность преобразования энергии изменяется. Действительно, фактор ВЧ-фильтрации ослабляется. Фактор НЧ-фильтрации, наоборот, усиливается, поскольку верхняя граница рабочей полосы ча-

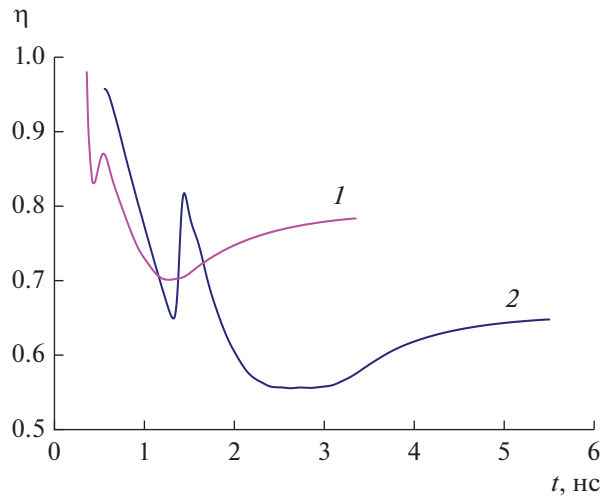


Рис. 12. Динамика изменения параметра  $\eta(t)$  при коротком (1) и длинном (2) импульсе возбуждения антенны.

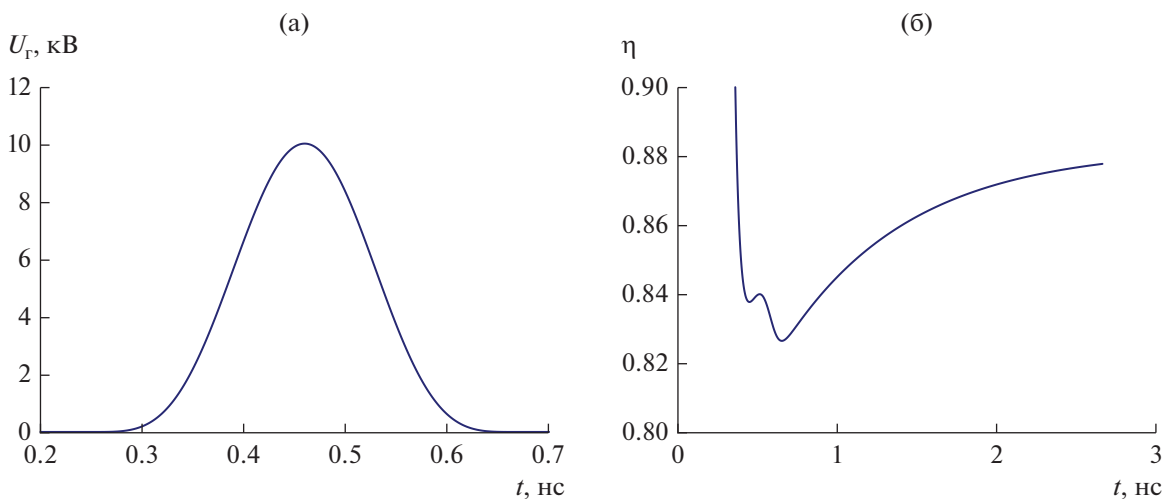


Рис. 13. Модельный униполярный видеоимпульс возбуждения антенны (а) и соответствующая ему динамика изменения параметра  $\eta$  (б).

стот антенны отсекает все возрастающую часть энергии ВЧ-спектра импульса  $U_{p,r}$ .

Рассмотрим модельный видеоимпульс возбуждения  $U_r(t)$  (рис. 13), еще более короткий ( $\tau_r \approx 0.42$  нс, фронт  $\approx 0.1$  нс). В отличие от импульсов возбуждения, рассмотренных ранее, на фронте и на спаде этого импульса генерируется примерно равная энергия. В этом примере конечное значение эффективности  $\eta$  антенны возрастает до  $\approx 88\%$  и оказывается больше, чем  $\eta$  в локальном максимуме.

Как известно, возбуждение антенны униполярным импульсом не рационально, кроме, пожалуй, случая, когда необходимо повысить спектральную плотность импульса излучения в НЧ-

области. Поэтому рассмотрим пример, в котором заданная антенна возбуждается простейшим биполярным импульсом (рис. 14а). Полный перепад напряжения импульса (10 кВ) и длительность этого перепада ( $\approx 100$  пс) те же, что и у видеоимпульса на рис. 13а, но в сравнении с ним длительность биполярного импульса возбуждения больше ( $\tau_r \approx 0.55$  нс). Процесс генерации излучения, инициированного биполярным импульсом, завершается значительно раньше и с эффективностью  $\approx 93\%$  (ср. рис. 13б и 14б).

На рис. 15 представлены все полученные результаты исследования.



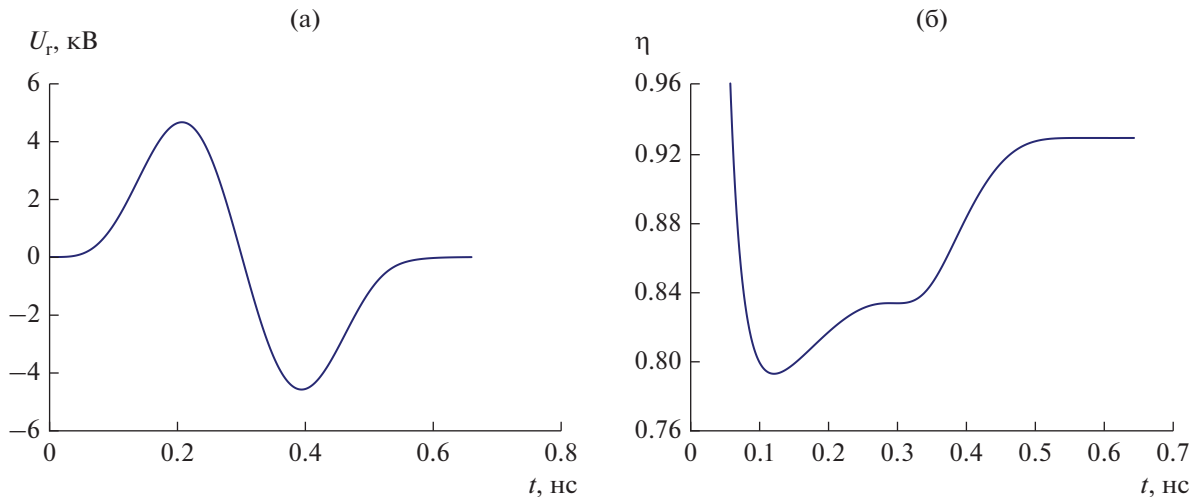


Рис. 14. Модельный биполярный видеоимпульс возбуждения антенны (а) и соответствующая ему динамика изменения параметра  $\eta$  (б).

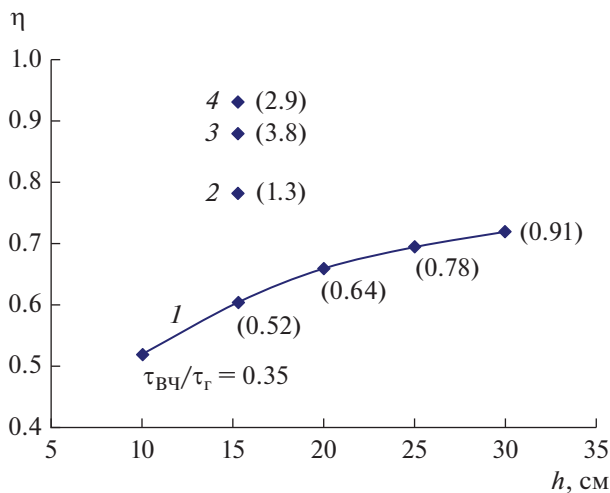


Рис. 15. Зависимость параметра  $\eta$  для импульса возбуждения на рис. 3 (1), 11б (2), 13а (3) и 14а (4).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализован эмпирический способ оценки ПХ *ТЕМ*-рупорной антенны и ее эффективности как преобразователя электрической энергии видеоимпульса возбуждения в энергию СШП-излучения. Оценка построена на сравнении напряжения возбуждения раскрыва со стороны генератора  $U_{p,r}(t)$  и со стороны пространства распространения излучения  $U_{p,0}(t)$ , вычисляемого по параметрам излучения на оси ДН антенны.

На основе экспериментальных данных показано, что импульс возбуждения излучающего согласованного раскрыва  $U_{p,0}(t)$  может быть смоделирован при ВЧ-фильтрации первого порядка импульса возбуждения раскрыва  $U_{p,r}(t)$ , вычисля-

емого со стороны генератора возбуждения. Время  $\tau_{BЧ}$  отсечки фильтра характеризует электрическую длину (не высоту) антенны. Значение  $\tau_{BЧ}$  определяется при приведении формы импульса  $U_{p,r}(t)$  к форме импульса  $U_{p,0}(t)$ .

Если целевой функцией оптимизации системы “антенна–импульс ее возбуждения” является эффективность преобразования электрической энергии возбуждения антенны в энергию СШП-излучения, то полная длительность видеоимпульса возбуждения  $\tau_r$  антенны и ее электрическая длина, характеризуемая временем  $\tau_{BЧ}$ , должны быть согласованы. Условием согласования является отношение  $\tau_{BЧ}/\tau_r \geq 1$ .

Рассмотренный макет антенны плохо согласован со штатным импульсом ее возбуждения (см. рис. 6): конечное значение эффективности  $\eta \approx 60\%$  при отношении  $\tau_{BЧ}/\tau_r \approx 0.52$ . При этом локальный максимум  $\eta$  составляет  $\approx 80\%$ . При сокращении длительности униполярного импульса возбуждения до  $\tau_r \approx \tau_{BЧ}/1.3$  достигается эффективность  $\approx 78\%$ . Биполярный импульс возбуждения при том же перепаде напряжения и его длительности (т.е. крутизне) может быть преобразован в СШП-излучение с эффективностью  $\approx 93\%$ .

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны коллеге В.М. Федорову за продуктивное обсуждение статьи.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках гос. задания на 2023 год (№ 075- 01129-23-00 от 29.12.2022 г.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975.
2. Бобрешов А.М., Мещеряков И.И., Усков Г.К. // РЭ. 2012. Т. 57. № 3. С. 320.
3. Бобрешов А.М., Мещеряков И.И., Усков Г.К. // РЭ. 2013. Т. 58. № 3. С. 233.
4. Ефимова Н.А., Калошин В.А. // РЭ. 2014. Т. 59. № 1. С. 60.
5. Калошин В.А., Нгуен К.З., Нгуен Х.Ш. // Журн. радиоэлектроники. 2015. Т. 60. № 10. <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/2/text.pdf>.
6. Осташев В.Е., Ульянов А.В., Федоров В.М. // РЭ. 2020. Т. 65. № 3. С. 234.
7. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции и метод факторизации. М.: Сов. радио, 1966.
8. Kaloshin V.A. // Russian J. Math. Phys. 2009. V. 16. № 2. P. 246.
9. Lee R.T., Smith G.S. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2004. V. 46. № 1. P. 86.
10. Fedorov V.M., Efanov M.V., Ostashev V.Ye. et al. // Electronics. 2021.10.1011 <https://doi.org/10.3390/electronics10091011>
11. Подосенов С.А., Свекис Я.Г., Соколов А.А. // Измерит. техника. 1994. № 4. С. 45.
12. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015.
13. Milligan T.A. Modern Antenna Design. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.