

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.371-373

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ИЗЛУЧАТЕЛЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2020 г. В. Е. Осташев^а, *, А. В. Ульянов^а, В. М. Федоров^а

^аОбъединенный институт высоких температур РАН,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412 Российская Федерация

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

Поступила в редакцию 16.10.2018 г.

После доработки 16.10.2018 г.

Принята к публикации 26.11.2018 г.

Построена расчетная модель плоского апертурного раскрыва, возбуждаемого неоднородно и не синхронно. Показано удовлетворительное соответствие расчетов с результатами экспериментов, полученных на макете сверхширокополосного излучателя. Оценена эффективность преобразования энергии в тракте излучателя от источника электропитания генератора возбуждения антенно-фидерной системы до энергии излучения в главном лепестке энергетической диаграммы направленности антенны. Дана оценка предельных значений этой эффективности, а также удельных весовых параметров излучателя.

DOI: 10.31857/S0033849420030134

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что частотный спектр импульса тем шире, чем короче этот импульс во времени ($\Delta\omega t \sim 1$) [1], а также, что угловая расходимость потока излучения направленной антенны тем меньше, чем больше величина произведения $\sqrt{S}\omega$ (S – площадь аперттуры антенны) [2]. Из этого с необходимостью следует, что сверхширокополосный (СШП) излучатель не может быть эффективной системой формирования направленного потока излучения: энергия, разбросанная в частотной области, не может быть эффективно локализована в пространстве.

Для количественной иллюстрации этого утверждения в данной работе построена расчетная модель излучения плоского однонаправленного раскрыва, а для ее верификации проведено экспериментальное исследование параметров расходимости макета СШП-излучателя с антенной апертурного типа.

Направленные свойства различных антенн при излучении негармонических сигналов, в том числе для задач локации, обсуждались во многих работах [3–10]. В них были вычислены полная энергия излучения, энергетический коэффициент направленного действия антенны (ЭКНД) D_3 и ее диаграмма направленности (ДН). Однако в указанных работах не оценивалась связь ДН антенны с D_3 , а также энергетическая эффективность главного лепестка ДН антенны. В этих работах

излучатель не рассматривался как система преобразования электрической энергии в энергию направленного СШП-излучения, не оценивалась эффективность преобразования энергии от первичного источника электропитания на разных ее стадиях, а также весовая “цена” за 1 Вт средней мощности направленного СШП-излучения.

1. МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛОСКОГО АПЕРТУРНОГО РАСКРЫВА

Пусть плоский апертурный раскрыв, лежащий в плоскости YZ , возбуждается симметрично из точки A , удаленной на расстоянии R_{ex} от него (рис. 1).

Представим раскрыв совокупностью однонаправленно излучающих элементов Гюйгенса. Ось каждого элемента, например элемента B , проходит через точку возбуждения раскрыва A . Поэтому только осевой элемент раскрыва излучает по нормали к его поверхности. Элементы Гюйгенса удалены от точки возбуждения раскрыва A на разные расстояния, поэтому поверхность раскрыва возбуждается не синхронно и неоднородно.

Пусть $\vec{x}$ – ось элемента Гюйгенса B , $\vec{\rho}$ – направление на точку наблюдения T из центра этого элемента, $n_B(t, \rho, 0)$ – значение плотности потока энергии по оси элемента B на расстоянии ρ от не-

го. Проекция вектора плотности потока энергии $\vec{n}_B$ на направление $\vec{R}$ в точке наблюдения T равна

$$n_{BR} = 0.25n_B(t, \rho, 0) \left(1 + \left(\frac{\vec{x}\vec{\rho}}{x\rho} \right)^2 \right) \left(\frac{\vec{R}\vec{\rho}}{R\rho} \right). \quad (1)$$

Пусть элемент B наблюдается из точки возбуждения A в пределах телесного угла $(d\alpha d\beta)_B$, а излучающий раскрыв в целом – в пределах угла Ω . Пусть энергия источника возбуждения распределена внутри Ω с равной угловой плотностью. Если $U_A(t)$ – импульс возбуждения в точке A , а Z_A , Z_B , Z_0 – волновой импеданс фидера, раскрыва и свободного пространства соответственно, то напряжение возбуждения излучающего элемента Гюйгенса B равно

$$U_B \left(t - \frac{\rho_{ex}}{c} \right) = U_A(t) \sqrt{\eta \frac{Z_0 (d\alpha d\beta)_B}{Z_A \Omega} \frac{2\sqrt{Z_B Z_0}}{Z_B + Z_0}}, \quad (2)$$

где произведение $4\eta Z_0 Z_B / (Z_0 + Z_B)^2$ – эффективность транспортировки энергии от генератора возбуждения (ГВ), находящегося в точке A , к раскрыву.

Электрическое поле излучения элемента B по его оси в дальней зоне излучения равно

$$E_B(t - \rho/c, \rho, 0) = \frac{1}{2\pi c} \frac{\sqrt{(dydz)_B}}{\rho} \frac{dU_B(t)}{dt}, \quad (3)$$

где $(dydz)_B = \rho_{ex}^2 d\alpha d\beta$.

Далее вычислим $n_B = E_B^2 / Z_0$, затем n_{BR} в соответствии с (1), а по значению n_{BR} определим напряженность поля излучения E_{BR} элемента Гюйгенса в плоскости поляризации, проходящей через ось Y и в направлении, ортогональном вектору $\vec{R}$.

Поле в заданной точке волновой зоны излучения формируется как суперпозиция излучений элементов Гюйгенса, возбуждаемых не синхронно и неоднородно. При этом учитывается угловое положение точки наблюдения по отношению к оси каждого элемента, расстояние до этой точки, а также различие времени прихода волнового фронта от каждого элемента Гюйгенса. Эффекты дифракции на краях раскрыва в модели не учитываются.

Выходными данными расчета являются: энергия электрического импульса возбуждения антенно-фидерной системы (АФС) $Q_{ГВ}$, энергия импульса возбуждения апертуры $Q_{возб}$, напряженность поля излучения $E(t, R, \varphi)$ в дальней зоне, пиковое значение эффективной мощности излучения $P_{эф}(t) = (ER)^2/30$, эффективная энергия импульса излучения $Q_{эф} = \int P_{эф}(t) dt$, излученная в пространство энергия $Q_{изл}$, энергетический спектр импульса излучения $E(t, R, \varphi)$, коэффициенты усиления (K_y) антенны по пиковой мощности $K_y(m) = P_{эф}/P_{ГВ}$ и по

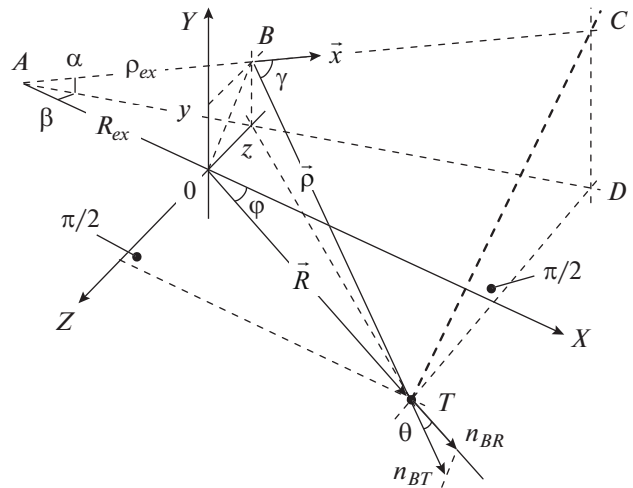


Рис. 1. Схема расчета напряженности поля излучения плоского раскрыва.

энергии $K_y(\varepsilon) = Q_{эф}/Q_{ГВ}$, энергетический коэффициент направленного действия $D_\varepsilon = Q_{эф}/Q_{изл}$, угловая расходимость излучения по плотности энергии и по плотности пиковой мощности, доля энергии излучения в заданном телесном угле $\alpha(\varphi)$ с осью, совпадающей с осью раскрыва. Вычисляется также ширина энергетического спектра в зависимости от угла отклонения точки наблюдения от оси раскрыва. Эффективные параметры излучения – это параметры эквивалентного изотропного излучателя, по которым вычисляются локальные параметры излучения в заданной точке наблюдения.

Вычислительная модель оформлена в компьютерную программу, снабженную интерфейсом в стиле MS Windows. Время расчета одного варианта составляет единицы минут.

Верификация достоверности расчетной модели и ее численной реализации проведена по следующим критериям:

- поле излучения по оси раскрыва совпадает с аналитическим расчетом этого поля при условии синхронного и однородного возбуждения;
- вычисление параметров излучения радиоимпульса согласуется с расчетом;
- результат расчета инвариантен по отношению к перестановке $R_{ex} \leftrightarrow R$ для любого угла φ отклонения точки наблюдения от оси излучателя, т.е. выполняется теорема взаимности;
- вычисляемые значения D_ε , $K_y(\varepsilon)$ и энергетическая эффективность АФС $\eta_{АФС}$ находятся в согласии с каноническим соотношением $K_y(\varepsilon) = \eta_{АФС} D_\varepsilon$;
- в любых режимах расчета энергия импульса излучения не превышает энергию возбуждения излучающего раскрыва;

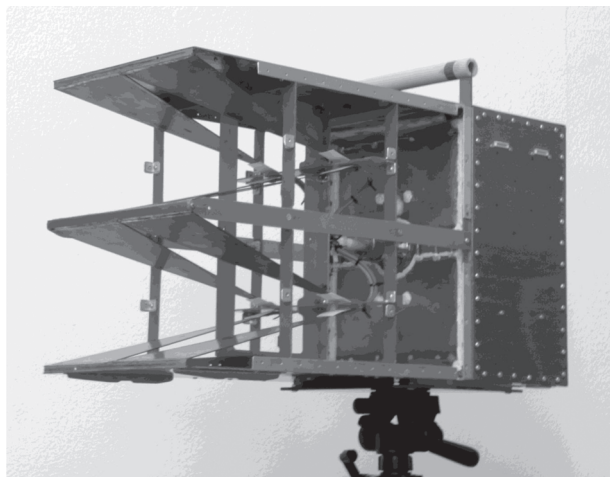


Рис. 2. Макет сверхширокополосного излучателя.

— вычисляемые значения $D_3 < D_0$, где в соответствии с [5] $D_0 = (8R_{ex}/A)^2$ — предельное значение ЭКНД для круглой апертуры с диаметром A ;

— нет обратного излучения по оси однонаправленного раскрыва;

— длительность импульса излучения в направлении вдоль плоскости раскрыва шириной A увеличивается на время A/c (c — скорость света);

— замена элементов Гюйгенса на элементы с изотропным распределением энергии излучения приводит к удвоению поля в точке наблюдения, лежащей в плоскости синхронного раскрыва.

При формировании импульса возбуждения раскрыва учитываются основные импульсные характеристики АФС, а именно: длительность фронта переходной характеристики (ограничение по высокой частоте), а также время отсечки импульса возбуждения, связанное с апертурным временем A/c [2].

3. МАКЕТ ИЗЛУЧАТЕЛЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Антенна макета представляет собой решетку из четырех 200-омных TEM -рупоров. Электроды рупора плоские, треугольного профиля. Угол раскрыва электродов 22° . Каждый рупор соединен с выходом генератора возбуждения отрезком двухпроводной линии с импедансом, согласованным с рупором [8]. Апертура антенны 24×24 см, ее длина 30 см. Импеданс антенны ≈ 50 Ом. Внешний вид макета приведен на рис. 2.

Антенна возбуждается униполярным импульсом наносекундной длительности с фронтом примерно 100 пс (рис. 3, кривая 1).

Импульс возбуждения антенны генерируется компактным полупроводниковым (ПП) генератором (разработка ЗАО “ПК “ФИД-Техника”¹

¹ <http://fidtechnology.com>.

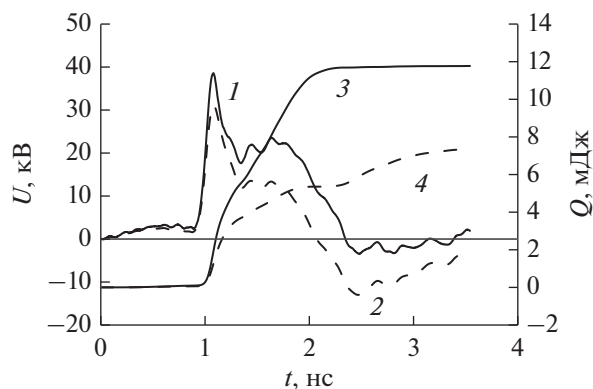


Рис. 3. Импульс напряжения генератора (1), эффективное напряжение возбуждения раскрыва (2) и соответствующие им энергии импульсов (3 и 4).

[11]). Пиковая мощность импульса на фидере генератора равна $P_{ГВ} \approx 30$ МВт, энергия импульса $Q_{ГВ} \approx 11.7$ мДж. При допустимой частоте следования импульсов 10^3 имп/с средняя мощность на фидере генератора составляет примерно 12 Вт, а потребляемая генератором мощность 40 Вт (эффективность преобразования энергии $\eta_{ГВ} \approx 30\%$). Масса генератора 1.5 кг.

Источник автономного энергоснабжения построен на основе шестнадцати мощных литий-ионных аккумуляторов (3.3 В, 2.3 А ч) и импульсного преобразователя постоянного напряжения до 290 В. Время автономной работы источника составляет примерно 2 ч.

Напряженность импульсного электрического поля излучения макета $E(t)$ регистрировалась в дальней зоне излучения. Был использован линейный полосковый датчик с длительностью фронта переходной характеристики 30 пс и электрической длиной 6.4 нс [12, 13]. Регистрация электрического импульса с датчика — стробоскопическая (30 ГГц) или однократная (7 ГГц).

Параметры антенны оценивались по ее излучению при возбуждении импульсом перепада напряжения с фронтом 30 пс [14]. На рис. 3 представлен импульс возбуждения раскрыва (2) и его энергия (4) при учете этих параметров. По этим данным эффективность транспортировки энергии от генератора возбуждения к апертуре антенны равна $\eta_{фид} \approx 63\%$.

4. УГЛОВАЯ РАСХОДИМОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ МАКЕТА

Излучатели мощных импульсов принято характеризовать значением электродинамического потенциала (ЭДП) [15], который определяется как произведение пикового значения электрического поля по оси излучателя E на расстояние R до

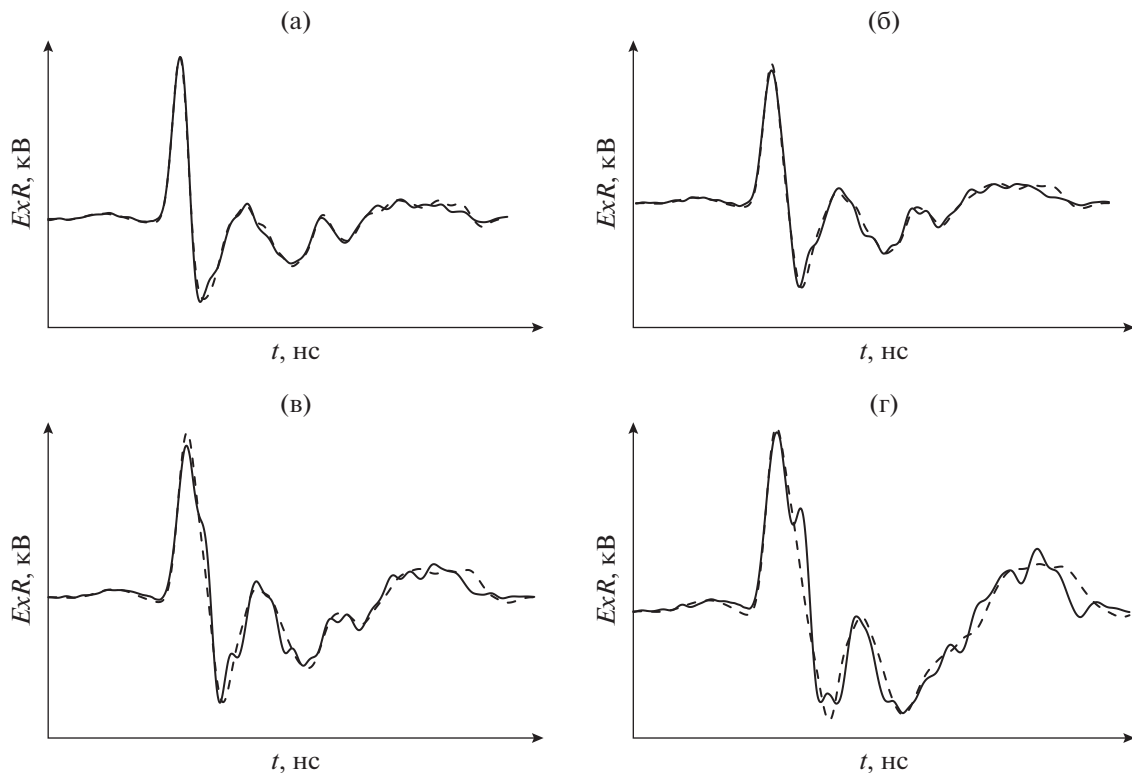


Рис. 4. Экспериментальные (сплошные кривые) и рассчитанные (штриховые) импульсы излучения при углах отклонения от оси раскрыва 10 (а), 15 (б), 20 (в), 30 град (г).

точки наблюдения. Как показали результаты измерения, ЭДП макета излучателя равен $ER \approx 100$ кВ, что соответствует эффективной пиковой мощности излучателя $P_{\text{эф}} \approx 0.3$ ГВт. Эффективная энергия импульса излучения макета равна $Q_{\text{эф}} \approx 42$ мДж, полуширина энергетического спектра импульса $0.5P_{\text{эф}}/Q_{\text{эф}} \approx 4$ ГГц. Коэффициент усиления АФС макета излучателя по пиковой мощности равен $K_y(\text{м}) \approx 10$, а по энергии — $K_y(\text{э}) \approx 3.6$. При частоте следования импульсов 10^3 имп/с эффективная средняя мощность излучателя равна $Q_{\text{эф}} \times 10^3 = 42$ Вт.

Угловая расходимость излучения оценивалась в азимутальной плоскости — поперек вектора поляризации излучения — на основе измерений напряженности импульсного поля излучения. На рис. 4 представлено сравнение экспериментальных результатов и расчетных данных для различных углов отклонения от оси излучателя: 10, 15, 20 и 30 град.

Можно отметить в целом удовлетворительное соответствие измеренных и расчетных результатов. Понятно, что при больших углах отклонения от оси параметры излучения рупорной антенны хуже воспроизводятся в рамках расчетной модели плоского раскрыва.

Полагая соответствие результатов удовлетворительным, реконструируем неизмеряемые пара-

метры излучения антенны макета в свободном пространстве с использованием расчетной модели. На рис. 5 представлена ДН антенны по плотности энергии, а также доля энергии $\alpha(\varphi)$, излучаемой внутри телесного угла в зависимости от значения угла его раскрыва.

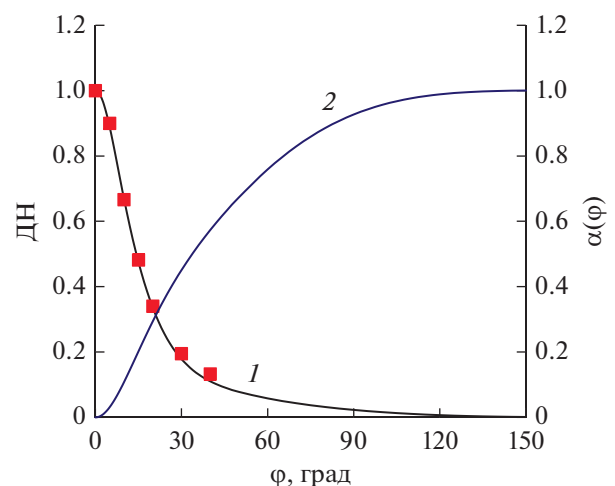


Рис. 5. Диаграмма направленности антенны по плотности энергии (1) и доля энергии излучения внутри заданного телесного угла (2); точки — данные, полученные на основе измерений.

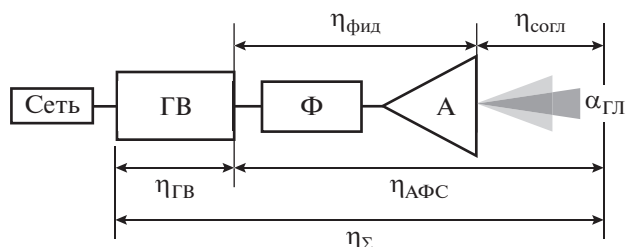


Рис. 6. Схема этапов преобразования энергии в излучателе.

Для заданного импульса возбуждения антенны макета (см. рис. 3) энергетический коэффициент ее направленного действия равен $D_3 \approx 16$, а полная ширина главного лепестка (ГЛ) ДН антенны — $\varphi_{\text{ГЛ}} \approx 28^\circ (\pm 14^\circ)$. При этом D_3 и $\varphi_{\text{ГЛ}}$ связаны зависимостью $D_3(\varphi_{\text{ГЛ}})^2 \approx 12550$. Доля энергии излучения внутри угла $\varphi_{\text{ГЛ}}$ (т.е. энергетическая эффективность ГЛ ДН антенны) в соответствии с расчетом равна $\alpha_{\text{ГЛ}} \approx 18\%$. Для сравнения отметим, что при излучении синусоидального сигнала $\alpha_{\text{ГЛ}} \approx 40...50\%$, а $D_3(\varphi_{\text{ГЛ}})^2 \approx (3...4) \times 10^4$ [2].

На рис. 6 представлена схема этапов преобразования электрической энергии от первичной сети к генератору возбуждения ГВ, фидеру Ф, антенне А и далее в энергию электромагнитного излучения. В рассмотренном макете излучателя энергия первичного источника электропитания генератора возбуждения преобразуется в энергию направленного СШП-излучения внутри главного лепестка ДН антенны со следующей эффективностью:

- от первичного источника до выходного фидера Ф ПП-генератора возбуждения — $\eta_{\text{ГВ}} \approx 30\%$;
- от генератора возбуждения ГВ до раскрытия антенны А — $\eta_{\text{фид}} \approx 63\%$;
- от раскрытия антенны А в излучение — $\eta_{\text{сгл}} \approx 35\%$ (характеристика согласования длительности импульса возбуждения раскрытия с апертурным временем A/c , а также согласования импедансов антенны и свободного пространства);
- доля энергии излучения в главном лепестке энергетической ДН антенны — $\alpha_{\text{ГЛ}} \approx 18\%$.

Таким образом, энергетическая эффективность АФС макета излучателя составила $\eta_{\text{АФС}} = \eta_{\text{фид}} \eta_{\text{сгл}} \approx 22\%$.

Произведение $\eta_{\text{АФС}} \alpha_{\text{ГЛ}}$ характеризует качество АФС как преобразователя энергии импульса возбуждения АФС в электромагнитную энергию направленного излучения. В конкретном случае $\eta_{\text{АФС}} \alpha_{\text{ГЛ}} \approx 4\%$. Первичная электрическая энергия, потребляемая генератором возбуждения, преобразуется в энергию СШП излучения в главном

лепестке ДН антенны макета с эффективностью $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{ГВ}} \eta_{\text{АФС}} \alpha_{\text{ГЛ}} \approx 1\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена модель излучения плоского апертурного раскрытия, возбуждаемого неоднородно и не синхронно. Модель верифицирована на экспериментальных результатах, полученных при исследовании параметров излучения созданного макета излучателя СШП-импульсов субнаносекундной длительности (~ 100 пс).

Получена оценка эффективности преобразования энергии в заданном макете излучателя на разных ее этапах: для тракта АФС — 22%, от фидера генератора возбуждения в излучение в главный лепесток ДН антенны — 4%, от источника электропитания генератора в энергию СШП-излучения в главном лепестке ДН антенны $\approx 1\%$.

Особенность направленного излучателя СШП-импульсов состоит в том, что доля энергии излучения, попадающей в главный лепесток ДН антенны, сравнительно мала. Основная причина этого заключается в том, что излучение не локализовано в частотной области, а значит, не может быть эффективно локализовано в физическом пространстве.

Повышение эффективности преобразования энергии в излучателе может быть достигнуто при согласовании временных параметров импульса возбуждения антенны с размером ее апертуры, повышении выходного импеданса антенны, уменьшении фидерных потерь. Если представить, что при транспортировке СШП-сигнала в тракте АФС фидерные потери можно ограничить на уровне 10% ($\eta_{\text{фид}} \approx 0.9$), импеданс раскрытия довести до 300 Ом ($\eta_{\text{сгл}} \approx 0.88$), а эффективность главного лепестка ДНА до 35% ($\alpha_{\text{ГЛ}} \approx 0.35$), то качество АФС по формированию направленного СШП излучения составит $\eta_{\text{АФС}} \alpha_{\text{ГЛ}} \approx 28\%$.

Энергетическую эффективность излучателя, как преобразователя электрической энергии в энергию электромагнитного поля, распределенную в частотной области и в физическом пространстве, не следует сравнивать с эффективностью электрических и тепловых машин, — там потоки энергии локализованы.

Удельные весовые параметры излучателя определяются в основном параметрами генератора возбуждения. Например, удельная мощность ПП-генераторов субнаносекундных импульсов разработки ПК «ФИД-Техника» составляет примерно 50...70 кг на 1 кВт средней электрической мощности на выходном фидере. Таким образом, удельная мощность СШП-излучателя (по средней мощности) с такими генераторами при эффективности направленного излучения АФС $\eta_{\text{АФС}} \alpha_{\text{ГЛ}} \approx 28\%$ может быть оценена как 200...250 кг/кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и связи. М.: Радио и связь, 1985.
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975.
3. Зернов Н.В. // Радиотехника. 1995. № 3. С. 51.
4. Содин Л.Г. // РЭ. 1998. Т. 43. № 2. С. 166.
5. Авдеев В.Б. // Радиотехника. 1999. № 6. С. 96.
6. Авдеев В.Б. // Антенны. 2002. № 7. С. 5.
7. Костиков Г.А., Одинцов А.Ю., Сугак М.И. // Антенны. 2007. № 6. С. 46.
8. Быстров Р.П., Черепенин В.А. // Журн. радиоэлектроники [Электронный ресурс]. <http://jre-cplce/jre/apr10/5/text.html>.
9. Кошелев В.И., Плиско В.В. // РЭ. 2017. Т. 62. № 6. С. 541.
10. Fedorov V.M., Lebedev E.F., Ostashev V.Ye et al. // PIERS Proc. Moscow, Russia, August 2012. Cambridge MA USA: The Electromagnetics Academy. 2012. P. 1461. <http://piers.org/piersproceedings/2012moscow/contents.pdf>.
11. Efanov V.M., Yarin P.M., Kricklenko A.V. // Proc. IEEE AP-S Intern. Symp. on UNSC/URSI and AMEREM Meetings. Albuquerque, NM USA, July 2006. N.Y.: IEEE, 2006. P. 72.
12. Podosenov S.A., Sakharov K.Yu., Svekis Ya.G., Sokolov A.A. // IEEE Trans. 1995. V. EMC-35. № 4. P. 566.
13. Fedorov V.M., Ostashev V.Y., Tarakanov V.P., Ul'aynov A.V. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. №12/2. С. 21.
14. Fedorov V.M., Ostashev V.Y., Tarakanov V.P., Ul'aynov A.V. // Proc. Joint IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe. Dresden, Germany. Aug. 2015. N.Y.: IEEE, 2015. P. 1127.
15. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015.