

**В. В. Овсяников**

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара  
72, пр. Гагарина, г. Днепропетровск, 49010, Украина  
E-mail: [ovsyau\\_viktor@mail.ru](mailto:ovsyau_viktor@mail.ru)

### ИЗЛУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Рассмотрена актуальная проблема исследования основных свойств и поиска методов совершенствования плазменной решетки излучателей, которая является аналогом антенной решетки из металлических или диэлектрических антенн. Интерес специалистов к излучателям на основе холодной плазмы обусловлен перспективой создания эффективных многолучевых сканирующих селективных плазменных реконфигурируемых систем, или плазменных решеток излучателей (ПРИ). Статья посвящена исследованию основных электродинамических параметров ПРИ в СВЧ-диапазоне, характеризующих ее как нагрузку для генератора (приемника) электромагнитного (ЭМ) сигнала и как излучатель ЭМ энергии с точки зрения ее диаграммы направленности (ДН) и основных параметров излучения. При сканировании луча ДН исследуются искажения импедансов излучателей ПРИ и деформация ДН. Аналогичные исследования для сравнения выполнены для такой же конструкции и конфигурации антенной решетки из металлических антенн. Исследования были выполнены путем моделирования ПРИ и расчетов их параметров в программной среде *FEKO* методом интегрального уравнения и методом моментов для линейной ПРИ из четырех излучателей в виде петлевых диэлектрических трубок, наполненных холодной плазмой при пониженном давлении. Полученные результаты могут быть использованы при расчетах и проектировании ПРИ. Ил. 10. Табл. 3. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** плазменная решетка излучателей; относительная диэлектрическая проницаемость; удельная проводимость холодной плазмы; собственные, взаимные и полные импедансы антенн решетки; коэффициент стоячей волны по напряжению; диаграмма направленности.

В научной литературе представлены результаты исследований и разработки различных антенн на основе холодной плазмы. В работе [1] рассмотрены основные типы плазменных антенн (ПА), в [2] предложена новая разновидность петлевой несимметричной ПА, в [3] реконфигурируемая ПА. Несколько позже в [4] глубже, чем в [2], исследована новая петлевая несимметричная ПА и даны результаты ее электродинамических характеристик в диапазоне СВЧ. Приведены входные сопротивления петлевой ПА; отмечается, что эта антенна обладает расширенным частотным диапазоном в сравнении с металлической антенной (МА) аналогичной конструкции. Отмечается возможность регулирования уровня мощности излучения и коэффициента направленного действия (КНД) в зависимости от тока возбуждения плазмы в ПА. Предложен метод оценки проводимости ПА путем минимизации целевой функции в заданном частотном диапазоне в цепи газового разряда. В [5] изложены результаты расчетов и экспериментальной проверки разнообразных ПА, а в [6] даны краткие результаты исследования электромагнитного (ЭМ) взаимодействия между излучателями в плазменной решетке излучателей (ПРИ). В фундаментальной работе [7] приведены результаты теоретических исследований взаимодействия ЭМ волн с плазмой.

Значительный интерес специалистов к ПА объясняется перспективой создания на их основе многолучевых селективных излучающих систем типа реконфигурируемых плазменных антенн или сканирующих ПРИ. Также ПА обладает свойством при необходимости быть невидимыми для радиолокационных средств обнаружения источников излучения.

Однако, несмотря на актуальность тематики ПА, в известных работах еще недостаточно освещены электродинамические характеристики многоэлементных сканирующих ПРИ, такие как импедансы излучателей, ЭМ взаимодействие между ними, диаграммы направленности (ДН), КПД и другие.

**1. Постановка задачи и исходные соотношения.** В данной работе на примере линейной ПРИ из четырех петлевых излучателей над металлической плоскостью (рис. 1) планируется исследовать их собственные, взаимные и полные импедансы и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в частотном диапазоне 1,2...1,6 ГГц. Исследовать входные сопротивления и ДН ПРИ как при синфазном возбуждении излучателей, так и разных фазах СВЧ-сигналов на их входах и различном расстоянии между излучателями. Для сравнения приведены результаты моделирования аналога ПРИ – металлической антенной решетки (АР) из алюминия.

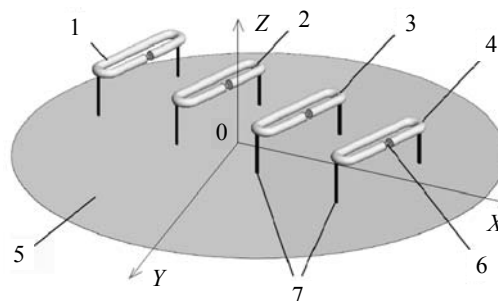


Рис. 1. Общий вид линейной решетки: 1–4 – плазменные (алюминиевые) петлевые излучатели; 5 – металлический диск; 6 – порты возбуждения излучателей; 7 – диэлектрические стойки для крепления излучателей на диске

Излучатели ПРИ представляют собой диэлектрические изогнутые петлевые трубки, заполненные холодной плазмой при пониженном давлении. Излучатели 1–4 решетки установлены на диэлектрических стойках 7 на диске 5 диаметром 500 мм на высоте  $0,1\lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 0,214$  м – средняя длина волны рабочего частотного диапазона при рабочей частоте  $f_0 = 1,4$  ГГц. Длина плазменного излучателя  $0,36\lambda_0$ , алюминиевого –  $0,40\lambda_0$ , ширина излучателя  $0,061\lambda_0$ , диаметр трубки антенн 8 мм. Расстояние между излучателями в горизонтальной плоскости  $0,5\lambda_0$  или  $0,25\lambda_0$ . Излучатели возбуждаются СВЧ-сигналами в узлах возбуждения (портах).

Для оценки электродинамических и радиотехнических характеристик антенн ПРИ в диапазоне СВЧ необходимо вначале определить такие радиофизические параметры плазмы, заполняющей трубки, как удельная проводимость  $\sigma$  и относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ . Это можно сделать приближенно с учетом формул [7]:

$$\sigma = 1,11 \cdot 10^{-10} \frac{e_e^2 N v_{eff}}{m_e (\omega^2 + v_{eff}^2)}, \text{ См/м}, \quad (1)$$

где  $e_e$  – заряд электрона,  $4,80 \cdot 10^{-10}$  ед. СГСЭ;  $m_e$  – масса электрона,  $9,11 \cdot 10^{-28}$  г;  $N$  – эффективная концентрация заряженных частиц,  $\text{см}^{-3}$ ;  $v_{eff}$  – эффективное число столкновений частиц за секунду, которое зависит от  $N$ ,  $T$  и  $T_e$ ;  $T$  – температура внутренней среды ПА, К;  $T_e$  – температура электронной компоненты плазмы, К.

Коэффициент  $1,11 \cdot 10^{-10}$  используем в (1) для перехода из системы единиц СГСЭ в систему СИ. Кроме того, учитывая, что электроны соударяются как с заряженными частицами плазмы, так и с нейтральными молекулами, общую частоту соударений определяем по приближенной формуле

$$v_{eff} = v_{eff,n} + v_{eff,i}, \quad (2)$$

где  $v_{eff,n} = 8,3 \cdot 10^5 \pi a^2 N_n \sqrt{T}$  – частота соударений электронов с нейтральными молекулами;  $N_n$  – плотность нейтральных частиц.

Частоту соударений электронов с ионами определяем по формуле:

$$v_{eff,i} = \frac{5,5N}{T_e^{3/2}} \left\{ \ln \left( \frac{220T_e}{N^{1/3}} \right) + \frac{1}{3} \ln \frac{T}{T_e} \right\}. \quad (3)$$

Относительное значение действительной части комплексной ДП холодной плазмы определяем по формуле:

$$\varepsilon' = 1 - \frac{\omega_{Le}^2}{(\omega^2 + v_{eff}^2)}, \quad (4)$$

где

$$\omega_{Le} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N}{m_e}} - \quad (5)$$

электронная ленгмюровская, или плазменная, частота;  $\omega$  – круговая рабочая частота.

С использованием выражений (1)–(4) была выполнена приближенная оценка параметров холодной плазмы  $\sigma$  и  $\varepsilon$  (действительная часть ДП) для следующих исходных данных:  $T_e = 10^4$  К,  $T = 300$  К,  $N = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

Результаты оценки значений  $\sigma$  и  $\varepsilon$  для частот 1,2; 1,4; 1,6 ГГц и различных  $N$  приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Расчетные значения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  в зависимости от рабочей частоты излучателя и эффективной концентрации заряженных частиц  $N$

№ п/п	Рабочая частота, ГГц	$\sigma$ , См/м		$\varepsilon$	
		$N$ , $\text{см}^{-3}$		$N$ , $\text{см}^{-3}$	
		$10^{13}$	$10^{14}$	$10^{13}$	$10^{14}$
1	1,2	0,94	71,0	-558	-5382
2	1,4	0,69	52,0	-410	-3993
3	1,6	0,53	40,0	-313	-3077

Из табл. 1 следует, что  $\sigma$  ПА с увеличением рабочей частоты уменьшается, а  $\varepsilon$  ПА – уменьшается по абсолютной величине. Также с ростом плотности заряженных частиц  $\sigma$  ПА растет, а  $\varepsilon$  несколько уменьшается по абсолютной величине.

При расчете антенной решетки из алюминиевых антенн использовались обычные параметры алюминия: проводимость  $\sigma = 3,7 \cdot 10^7$  См/м; относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 1$ . Для заданного значения  $N = 10^{13} \text{ см}^{-3}$  проводимость ПА приблизительно на семь порядков ниже, чем алюминиевой.

**2. Электродинамические характеристики синфазной линейной антенной решетки на основе плазменных и алюминиевых антенн.** Полученные данные по  $\sigma$  и  $\varepsilon$  (табл. 1) используем при расчетах в программной среде FEKO [8] параметров одиночных излучателей и линейных решеток ПРИ (металлической АР) из четырех близко расположенных таких антенн (рис. 1). Плазма задавалась как среда с конечной проводимостью  $\sigma$  (См/м) и отрицательной относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ .

Основным методом решения антенных задач в программной среде FEKO является метод моментов, основанный на решении интегральных уравнений для тока. Металлические, диэлектрические и плазменные элементы систем и близко расположенные от излучателей объекты заменяются эквивалентными электрическими поверхно-

стными токами, а затем с учетом этих токов определяются все необходимые параметры исследуемой излучающей системы.

Вначале рассмотрим результаты расчетов одиночного петлевого излучателя, установленного в центре диска 5 (рис. 1). Результаты расчета КСВН на входе питающего фидера с волновым сопротивлением 50 Ом в частотном диапазоне для плазменной и алюминиевой антенн и ДН приведены на рис. 2 и 3.

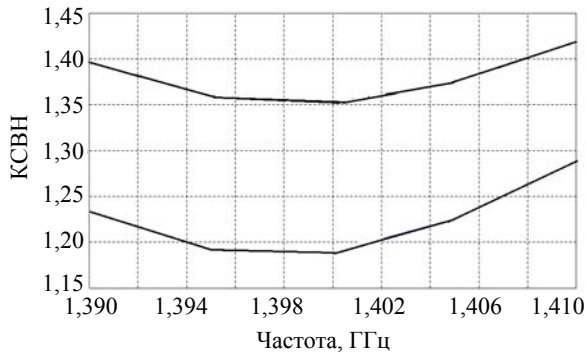


Рис. 2. График зависимости КСВН одиночных излучателей от частоты: 1 – плазменный излучатель; 2 – алюминиевый излучатель

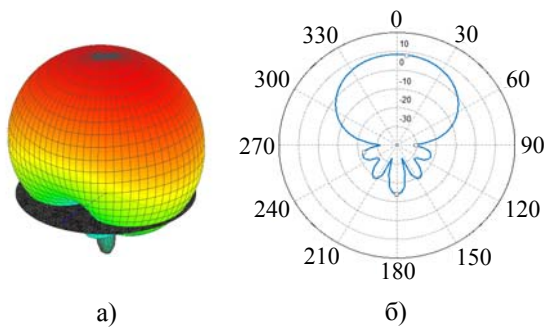


Рис. 3. Трехмерная ДН одиночного плазменного (алюминиевого) излучателя (а) на частоте 1,4 ГГц и ДН того же излучателя в плоскости YOZ (б)

Из графиков (рис. 2) следует, что величина КСВН для заданных размеров антенн у ПА ниже, чем у МА, что является положительным фактором. Результаты расчетов согласуются с данными экспериментов [2, 4].

Расчетные ДН (рис. 3) плазменной и алюминиевой антенн совпадают между собой в пределах погрешности расчетов при максимальном КНД в направлении вдоль оси Z, равном 8 дБ.

На этой же частоте расчетное значение КПД ПА равно 94,5 %, а алюминиевой 99,2 %.

2.1. Исследование ПРИ и металлической AP в синфазном режиме при расстоянии между антеннами  $0,5\lambda_0$ . Рассмотрим характеристики синфазных ПРИ и металлической AP с нулевой разностью фаз  $\Delta\varphi = 0$  между соседними антеннами и одинаковыми амплитудами возбуждающих СВЧ-сигналов на их входах.

Результаты расчетов в частотном диапазоне для каждой из четырех плазменных (алюминиевых) антенн в составе синфазной ПРИ на диске (рис. 1) с учетом их взаимовлияния приведены на рис. 4.

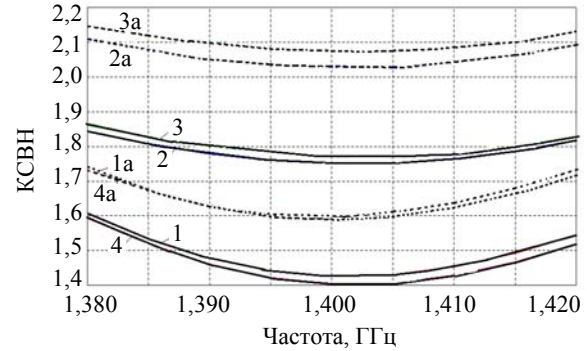


Рис. 4. Сравнительные графики частотной зависимости КСВН каждого излучателя в составе 4-элементных AP: 1–4 – плазменные излучатели; 1a–4a – алюминиевые излучатели

Как следует из графиков (рис. 4), значения КСВН антенн в составе ПРИ значительно ниже, чем в составе металлической AP, что является положительным фактором. Также КСВН каждой AP отличаются друг от друга в связи с различным ЭМ взаимодействием между излучателями 1–4 из-за различных мест расположения на диске 5 относительно его центра и относительно его краев.

Далее рассмотрим ДН ПРИ (металлической AP) на центральной частоте исследуемого диапазона 1,4 ГГц (рис. 5). Отметим, что приведенные ниже расчетные ДН ПРИ в дальней зоне близки по форме и значениям с ДН металлической AP в пределах погрешности расчетов при максимальном КНД в направлении вдоль оси Z, равном 13 дБ.

Учитывая различие КСВН излучателей ПРИ и металлической AP в зависимости от местоположения антенн на диске и материала, из которого они изготовлены (рис. 4), выполним более глубокий анализ взаимовлияния излучателей.

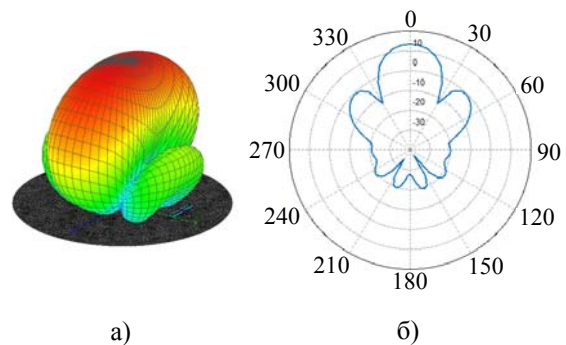


Рис. 5. Трехмерная ДН линейной ПРИ (рис. 1) (а), соответствующая ДН в плоскости YOZ (б), на частоте 1,4 ГГц

Исследуем собственные, взаимные и полные входные сопротивления четырех излучателей АР. С этой целью представим АР в виде системы связанных колебательных контуров [9] и запишем в комплексной форме полные входные сопротивления  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  каждого излучателя АР формулами

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{14}, \\ Z_2 &= Z_{21} + Z_{22} + Z_{23} + Z_{24}, \\ Z_3 &= Z_{31} + Z_{32} + Z_{33} + Z_{34}, \\ Z_4 &= Z_{41} + Z_{42} + Z_{43} + Z_{44}. \end{aligned} \quad (6)$$

В выражении (6)  $Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}, Z_{44}$  являются собственными сопротивлениями каждой антенны, а остальные – взаимными  $Z_{nm}$  в соответствии с нумерацией индексов. Для определения собственных и полных сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ , а также взаимных сопротивлений  $Z_{nm}$  пользуемся программной средой *FEKO*, где вначале решаем задачу определения распределения комплексного тока на вибраторах АР методом интегрального уравнения с последующим определением входных импедансов, ДН и других параметров антенн.

Для примера рассмотрим АР, состоящую из двух близко расположенных линейных симметричных вибраторов. Распределение комплексных токов на такой АР определяется, например, системой двух линейных интегральных уравнений 1-го рода [9], которую для численного расчета приближенно можно представить в виде системы двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N [I_{1n} F_{11}(z_p) + I_{2n} F_{12}(z_p)] - C_1 \cos kz_p &= \\ = -\frac{i2\pi V_1}{W} \sin k|z_p|, & \\ \sum_{n=1}^N [I_{1n} F_{12}(z_p) + I_{2n} F_{11}(z_p)] - C_2 \cos kz_p &= \\ = -\frac{i2\pi V_2}{W} \sin k|z_p|, & \end{aligned} \quad (7)$$

где  $p = 1, 2, 3, \dots, (N-1)$  – номера аппроксимирующих полиномов;  $V_1$  и  $V_2$  – возбуждающие напряжения 1-го и 2-го вибраторов;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $C_1$  и  $C_2$  – константы;  $W$  – волновое сопротивление подводящего фидера.

Входные импедансы вибраторов по известным распределениям токов на них определяются из выражений:

$$Z_1 = \frac{V_1}{\sum_{n=1}^N I_{1n}}, \quad Z_2 = \frac{V_2}{\sum_{n=1}^N I_{2n}}. \quad (8)$$

Для определения собственных и взаимных импедансов двух связанных вибраторов рассмотрим два режима возбуждения вибраторов:

1) синфазный режим  $V^c = V_1 = V_2$ , когда токи в вибраторах синфазны  $I^c = I_1 = I_2$ ;

2) противофазный режим  $V^n = V_1 = -V_2$ , когда токи в вибраторах также противофазны  $I^n = I_1 = -I_2$ .

При этом система уравнений (7) сводится к решению отдельной системы линейных уравнений для синфазного режима и отдельной системы линейных уравнений для противофазного режима.

Входные импедансы вибраторов будут определяться по формулам:

$$Z^c = \frac{V^c}{\sum_{n=1}^N I_n^c}, \quad Z^n = \frac{V^n}{\sum_{n=1}^N I_n^n}, \quad (9)$$

где  $Z^c$  – сопротивление при синфазном подключении источников напряжения к антеннам;  $Z^n$  – сопротивление при противофазном подключении источников напряжения.

Тогда собственный и взаимный импедансы в системе из двух связанных вибраторов могут быть найдены из следующих соотношений:

$$Z^c = Z_{11} + Z_{12}, \quad Z^n = Z_{11} - Z_{12}, \quad (10)$$

откуда

$$Z_{11} = 0,5 (Z^c + Z^n), \quad Z_{12} = 0,5 (Z^c - Z^n). \quad (11)$$

Таким образом, исследуя параметры антенн АР поочередно в синфазном и противофазном режимах, мы получаем соответствующие результаты входных сопротивлений антенн  $Z^c$  и  $Z^n$ , из которых можем приближенно определить по формуле (11) собственные и взаимные сопротивления  $Z_{nn}$  и  $Z_{nm}$  с учетом ЭМ взаимовлияния антенн решетки. Результаты можно получить экспериментально или расчетным путем, моделируя задачу в программной среде, например, *FEKO*. При этом определяем  $Z_{nn}$  или  $Z_{nm}$  поочередно для каждой пары излучателей антенн при условии, что входные разъемы остальных антенн АР для чистоты эксперимента закорочены и излучатели находятся на своих посадочных местах. Полученные 16 значений собственных и взаимных сопротивлений в 4-элементной АР (рис. 1) и затем значения полных комплексных сопротивлений каждой пары излучателей  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ , найденные затем по формуле (6), могут быть полезными при разработке схемы возбуждения АР.

Для примера рассмотрим фрагмент таблицы результатов расчетов  $Z_{nn}$  и  $Z_{nm}$  ПРИ (рис. 1) с использованием формул (10) и (11).

Таблица 2  
Фрагмент таблицы расчетов  $Z_{nn}$  и  $Z_{nm}$  ПРИ

№ ант. $Z_{ант.}$	1-1	1-2	1-3	1-4
$Z^c$	–	$102,0 + i42$	$97,8 + i80$	$97,0 + i66$
$Z^n$	–	$79,0 + i96$	$96,6 + i61$	$98,0 + i74$
$Z_{nm}$	–	$11,5 - i27$	$0,6 + i9,4$	$-0,3 - i4,1$
$Z_{nn}$	$98,0 + i70$	–	–	–

Результаты, полученные для металлической АР из алюминиевых антенн при близких физических размерах антенн ПРИ и металлической АР, существенно отличаются от данных табл. 2, что косвенно было видно из графиков сравнения КСВН антенн (рис. 4).

Более глубокое количественное изучение и сравнение собственных и взаимных импедансных характеристик ПРИ и металлической АР можно выполнить двумя путями: сравнивая, например, комплексные импедансы антенн ПРИ и металлической АР или модули их комплексных импедансов. Однако первый метод весьма затруднителен, поэтому воспользуемся вторым методом. Действуя в соответствии с выражениями (10) и (11), подключая попарно излучатели АР к источнику СВЧ-возбуждения в синфазном и противофазном режимах, получим собственные и взаимные сопротивления антенн АР. Для удобства сравнения входных параметров излучателей решеток металлической АР и ПРИ, представим полученные комплексные сопротивления в виде нормированных модулей относительно их максимальных значений и приведем полученные результаты на рис. 6 в виде гистограмм.

Из рассмотрения рис. 6 следует, что амплитуды нормированных модулей взаимных комплексных импедансов алюминиевых антенн в металлической АР превышают соответствующие значения для плазменных антенн в ПРИ [6, 10, 11]. Кроме того, значения модулей собственных входных сопротивлений  $Z_{11}, Z_{44}$  и  $Z_{22}, Z_{33}$  равны между собой, но попарно неодинаковы в связи с попарно неидентичным расположением на диске 5 (рис. 1) и, следовательно, в связи с различной степенью дифракционного влияния ЭМ поля, переотраженного от краев диска и антенн. Из гистограмм также видно, что попарно модули взаимных импедансов  $Z_{nm}$  и  $Z_{mn}$  соответствующих излучателей несколько отличаются друг от друга, несмотря на то, что в принципе должны быть одинаковыми для диска бесконечного ра-

диуса. Причиной этого является неидентичное размещение антенн на диске 5 и относительно малый его диаметр.

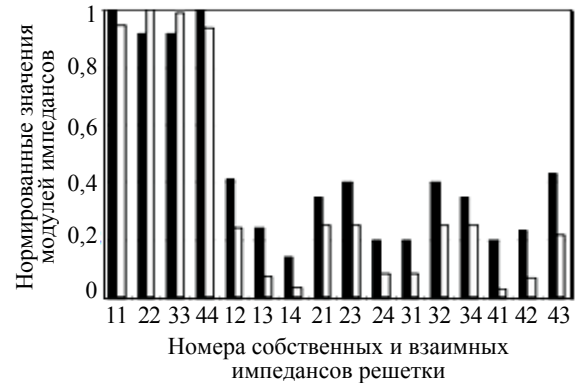


Рис. 6. Гистограммы нормированных модулей собственных и взаимных импедансов излучателей синфазной линейной АР: серый цвет – излучатели из плазмы, черный цвет – алюминиевые антенны

Также по результатам сравнения гистограмм на рис. 6 можно констатировать факт, что ЭМ взаимовлияние между излучателями в ПРИ меньше, чем в металлических АР, что является положительным фактором для ПА и позволит упростить технологию согласования антенн ПРИ с СВЧ-генератором (приемником) при разработке схем питания ПРИ. Уменьшенное ЭМ взаимовлияние между антеннами ПРИ по сравнению с металлической АР также дает возможность уменьшать расстояние между антеннами ПРИ, то есть уменьшить ее объем и массу. Меньшее ЭМ взаимовлияние между плазменными излучателями или между плазменными и установленными близко к ним металлическими конструкциями или антеннами других систем позволит улучшить электромагнитную совместимость радиосистем. Это относится, например, к космическим, воздушным, морским или наземным мобильным объектам компактной конструкции, где излучатели устанавливаются близко друг к другу.

2.2. Исследование в синфазном режиме полных входных импедансов ПРИ и металлической АР для расстояний между излучателями решеток  $0,5\lambda_0$  и  $0,25\lambda_0$ . Среди разработчиков различных металлических АР укоренилось мнение, что расстояние между антеннами решетки не должно быть менее половины длины рабочей волны из-за значительного взаимовлияния между антеннами, что действительно имеет место [9]. Учитывая изложенные выше результаты, представляет научный интерес количественная сравнительная оценка степени ЭМ взаимовлияния в ПРИ и металлической АР при сближении антенн решетки между собой на расстояние менее половины длины рабочей волны, например,  $0,25\lambda_0$ .

В табл. 3 представлены результаты компьютерного моделирования в программной среде FEKO на частоте 2 ГГц изменения расстояния между излучателями в осесимметричных синфазных решетках ПРИ и металлической АР из четырех вертикальных несимметричных петлевых излучателей высотой  $0,2\lambda$ , установленных на диске диаметром 0,5 м [10, 11].

Таблица 3  
Расчетные значения полных входных импедансов излучателей и их модулей в составе 4-элементных ПРИ и металлической АР

$L$	Параметр	Плазменный излучатель	Алюминиевый излучатель
0,5λ	$Z_{вх}$	5,93 + i37,5	37,1 - i74,5
	$ Z_{вх} $	37,9	83,2
0,25λ	$Z_{вх}$	9,47 + i26,5	90,4 - i151,8
	$ Z_{вх} $	28,1	176,9

С учетом данных табл. 3 определим относительное изменение значения модулей входного импеданса каждого излучателя плазменной и алюминиевой АР в зависимости от расстояния  $L$  между антеннами:

$$\Delta_{ПА} = \frac{|Z_{вх}|_{L=0,5\lambda}^{ПА} - |Z_{вх}|_{L=0,25\lambda}^{ПА}}{|Z_{вх}|_{L=0,5\lambda}^{ПА}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где  $|Z_{вх}|_{L=0,5\lambda}^{ПА}$  и  $|Z_{вх}|_{L=0,25\lambda}^{ПА}$  – модули входных импедансов ПА для расстояния между ними  $L = 0,5\lambda$  и  $L = 0,25\lambda$  соответственно;

$$\Delta_{АЛ} = \frac{|Z_{вх}|_{L=0,5\lambda}^{АЛ} - |Z_{вх}|_{L=0,25\lambda}^{АЛ}}{|Z_{вх}|_{L=0,5\lambda}^{АЛ}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где  $|Z_{вх}|_{L=0,5\lambda}^{АЛ}$  и  $|Z_{вх}|_{L=0,25\lambda}^{АЛ}$  – модули входных импедансов алюминиевых антенн для  $L = 0,5\lambda$  и  $L = 0,25\lambda$  соответственно.

После подстановки в формулы (12) и (13) значений модулей входных импедансов из табл. 3 получены следующие результаты:  $\Delta_{ПА} = 25,6\%$  и  $\Delta_{АЛ} = 113\%$ . Они свидетельствуют о том, что уменьшение в 2 раза расстояния  $L$  между антеннами ПРИ и металлической АР значительно меньше влияет на комплексные входные сопротивления плазменных антенн, чем алюминиевых. Это подтверждает вывод о том, что ЭМ взаимодействие между антеннами ПРИ меньше, чем между антеннами металлической АР при расстоянии между антеннами  $L < 0,5\lambda$ .

Очевидно, что сближение излучателей между собой при проектировании ПРИ позволяет уменьшить габариты, размеры и массу данной АР.

### 3. Полные импедансы излучателей и ДН фазированных ПРИ и металлической АР.

В разд. 2 были исследованы собственные, взаимные и полные импедансы антенн ПРИ и металлической АР и ДН антенных решеток в синфазном режиме. В этих АР значения нормированных амплитуд модулей полных входных импедансов антенн (рис. 7) изменяются плавно и незначительно от излучателя к излучателю решетки в пределах от 0,89 до 1,00, в зависимости от места расположения на диске. Можно также отметить, что в данном случае амплитуды модулей импедансов алюминиевых антенн несколько меньше плазменных. Диаграммы направленности таких ПРИ и металлической АР приведены на рис. 5, где максимум ДН точно сосредоточен в направлении оси  $Z$ , а боковые и задние лепестки ДН симметричны относительно этой оси в плоскости  $YOZ$ .

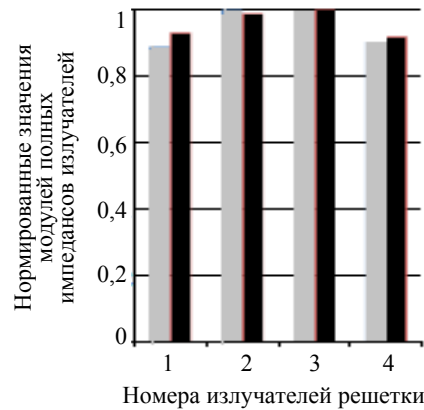


Рис. 7. Нормированные модули комплексных входных импедансов синфазных ПРИ и металлической АР ( $\Delta\varphi = 0^\circ$ ): черный цвет – металлическая АР; серый цвет – ПРИ

Ниже приведены результаты проверки характеристик фазированных антенных решеток ПРИ и металлической АР, где эта симметрия нарушается.

Рассмотрим, как выглядят значения нормированных амплитуд модулей полных входных импедансов антенн для случая решеток ПРИ и металлической АР при одинаковых амплитудах возбуждающих СВЧ-сигналов на входах излучателей, но для примера при разности фаз на этих входах между сигналами  $\Delta\varphi = 30^\circ$  (рис. 8), которая обеспечивает отклонение от оси  $Z$  главного лепестка ДН на  $12^\circ$ .

Из гистограмм на рис. 8 видно, что амплитуды нормированных модулей входных импедансов излучателей в фазированных ПРИ и металлической АР при сканировании луча ДН существенно отличаются друг от друга по сравнению с рис. 7 для синфазных АР. Значения моду-

лей излучателей ПРИ изменяются в пределах 0,81...1,00, тогда как для металлической АР – 0,55...1,00, т. е. «перекося» входных импедансов излучателей при сканировании в металлической АР больше, чем в ПРИ, что необходимо учитывать при создании схем возбуждения АР.

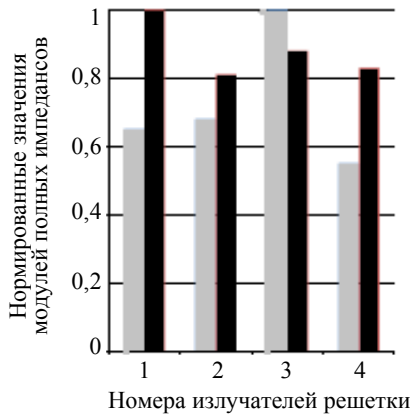


Рис. 8. Нормированные модули комплексных входных импедансов излучателей для фазированных ПРИ и металлической АР ( $\Delta\varphi = 30^\circ$ ): черный цвет – металлическая АР; серый цвет – ПРИ

Соответствующие ДН таких фазированных ПРИ и металлической АР при  $\Delta\varphi = 30^\circ$  приведены на рис. 9 и 10 соответственно.

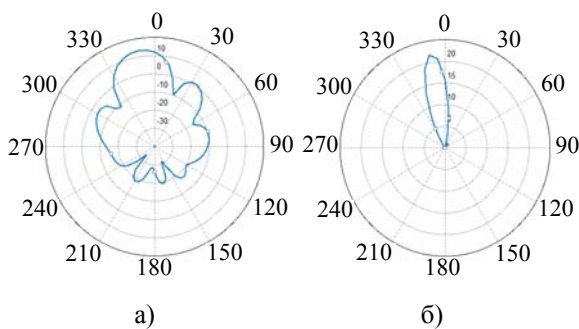


Рис. 9. ДН ПРИ (рис. 1) в плоскости YOZ (а) и соответствующая нормированная ДН (б) на частоте 1,4 ГГц

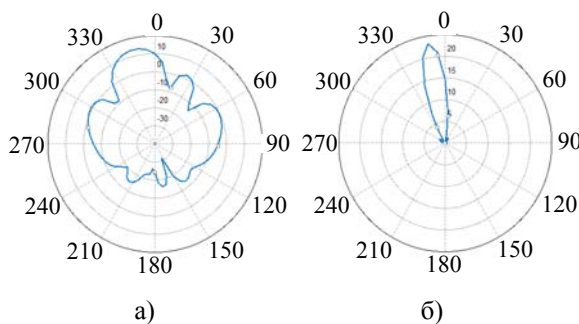


Рис. 10. ДН металлической АР (рис. 1) в плоскости YOZ (а) и соответствующая нормированная ДН (б) на частоте 1,4 ГГц

Из сравнения рис. 9 и 10 видно, что ДН излучающих систем ПРИ и металлической АР по

общему виду подобны между собой и обеспечивают приблизительно одинаковое отклонение главного лепестка ДН от оси Z в плоскости YOZ (на  $12^\circ$ ). В направлении оси Z КНД = 13 дБ, как и для синфазных АР (разд. 2). Однако в боковых и задних лепестках ПРИ и металлической АР можно заметить некоторое различие. Например, для первых правых боковых лепестков ПРИ и металлической АР уровни боковых лепестков (УБЛ) приблизительно одинаковы и равны 0 дБ. Однако для второго правого бокового лепестка для ПРИ УБЛ = -10 дБ, тогда как для металлической АР УБЛ = -3 дБ. У левого первого лепестка для ПРИ УБЛ = -3 дБ, тогда как для металлической АР УБЛ = 1 дБ. Таким образом, УБЛ для ПРИ несколько меньше, чем для металлической АР, что является положительным фактором для ПАР.

**Выводы.** Исследования основных электродинамических параметров ПРИ и алюминиевых АР показали, что несмотря на существенное отличие собственной проводимости и диэлектрической проницаемости плазменных и металлических излучателей, их собственные, взаимные и полные импедансы и параметры излучения (ДН, КНД, УБЛ и КПД) приблизительно подобны, однако по некоторым важным параметрам существенно отличаются, например, по ЭМ взаимовлиянию между излучателями решеток.

Выяснено, что ЭМ взаимовлияние между антеннами в ПРИ меньше, чем в металлической АР, а при уменьшении расстояния между излучателями решетки с  $0,5\lambda_0$  до  $0,25\lambda_0$  относительное изменение значения модулей входного импеданса каждого излучателя ПРИ вдвое меньше, чем для решетки из алюминия, что позволяет сближать излучатели ПРИ между собой без существенного увеличения взаимовлияния.

Уменьшение ЭМ взаимовлияния в ПРИ позволяет упростить согласование излучателей с СВЧ-генератором (приемником) и уменьшить расстояние между излучателями решетки для снижения ее габаритов и массы.

Отметим, что меньшее взаимовлияние между плазменными излучателями в решетке или между плазменными и находящимися поблизости антеннами (например, на мобильном объекте ограниченных размеров) также позволяет улучшить электромагнитную совместимость радиосистем данного объекта.

При сканировании ПРИ и металлической АР наблюдается некоторое искажение входных импедансов излучателей и деформация ДН, включая УБЛ, однако эти явления присущи ПРИ в меньшей степени, чем алюминиевым АР.

Представленные в статье результаты могут быть использованы при расчетах и проектировании новых плазменных сканирующих решеток излучателей.

Автор выражает благодарность ведущему инженеру ДНУ им. О. Гончара Е. Р. Безносовой и магистру Д. А. Душейко за участие в исследованиях и оформлении работы.

#### Библиографический список

1. Jenn D. C. Plasma antennas [Электрон. ресурс]: Survey of Techniques and the Current State of the Art / D. C. Jenn // Naval Postgraduate School. – San Diego, 2003. – 33 p. – Режим доступа: <http://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/778/NPS-CRC-03-001.pdf?sequence=3>. – Загл. с экрана.
2. А. с. 044520 СССР, H01Q 1/00. Плазменная антенна / В. В. Овсяников, А. Г. Литвинов, А. М. Маланчук. – № 3566850/09; 24.03.83.
3. USA Patent No. 6,876,330 B2. Reconfigurable Antennas / I. Alexeff, T. Anderson, E. G. Norris. – April 5, 2005.
4. Овсяников В. В. Широкополосный СВЧ-излучатель на основе плазмы газового разряда / В. В. Овсяников // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – 6, № 3. – С. 261–267.
5. Anderson T. Plasma Antennas / T. Anderson // Library of Congress Cataloging-in-Publication Data [Электрон. ресурс]. – Norwood, 2011. – Режим доступа: <http://bbs.hwrf.com.cn/downmte/Plasma%20Antennas-2011.pdf>. – Загл. с экрана.
6. Ovsyanikov V. V. The electromagnetic mutual influence in metallic and plasma antenna arrays / V. V. Ovsyanikov, S. N. Moroz // Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques: proc. – Kharkov, 2015. – P. 162–164.
7. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. – М., 1960. – 552 с.
8. Банков С. Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2008. – 246 с.
9. Марков Г. Т. Антенны: учеб. для студ. радиотехн. спец. вузов / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
10. Пат. України № 90714. Спосіб випромінювання та приймання електромагнітних хвиль / В. В. Овсяников, В. В. Овсяников. – Бюл. № 11, 10.06.2014.
11. Пат. України № 109710. Плазмова антенна решітка для передавання та приймання електромагнітних хвиль / В. В. Овсяников, В. В. Овсяников. – Бюл. № 18, 25.09.2015.

Рукопись поступила 12.01.2016.

V. V. Ovsyanikov

#### RADIANT SYSTEM BASED ON COLD PLASMA

The actual problem of studying the basic properties and searching for methods of improving the plasma radiator array, which is similar to the array of metal or dielectric antennas, has been considered. This problem is not sufficiently covered in the well-known publications, however, the great interest of professionals to emitters based on cold plasma is due to the prospect of creating effective multi-beam scanning selective plasma reconfigurable systems or the plasma array of radiators (PAR). The article studies the main electrodynamics parameters of PAR in the microwave range, characterizing it on the one hand, as the load for the generator (receiver) of electromagnetic (EM) signal. On the

other hand, PAR is tested as transmitter of EM energy from the point of view of its direction pattern (DP) and the main parameters of radiation of PAR. When scanning DP beam, impedance distortion of PAR transmitters and DP deformation are investigated. For comparison, similar studies were carried out for the same design and configuration of the pattern antenna (PA) of metal antennas. The studies have been carried out by PAR modeling and their parameters calculations on computer in software environment FEKO by integral equation method and method of moments for linear PAR from 4 emitters in the form of loop dielectric tubes filled with cold plasma under reduced pressure. When studying the self and mutual impedances of the PAR and metal PA in common mode for the distance between the transmitters  $0.5\lambda_0$ , where  $\lambda_0$  is the central wavelength of the test range, it has been determined that electromagnetic interference between antennas in PAR is less than in the metal antenna array, and when reducing the distance between transmitters grating with  $0.5\lambda_0 - 0.25\lambda_0$  the relative change in value of units of the input impedance of each radiator of PAR is twice less than for a lattice of aluminum, which allows to bring together the radiator of PAR without a substantial increase in interference between them. From comparison of DP of radiant systems of PAR and aluminum arrays while scanning, it is obvious that DP of PAR are less distorted than aluminum array. The obtained results can be used for calculations and design of plasma array of radiators.

**Key words:** plasma array of radiators, the relative permittivity and conductivity of the cold plasma, the self and mutual impedances and the input impedance of the radiators, VSWR, pattern of arrays.

В. В. Овсяніков

#### ВИПРОМІНЮЮЧА СИСТЕМА НА ОСНОВІ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ

Розглянуто актуальну проблему дослідження основних властивостей і пошуку методів вдосконалення плазмової решітки випромінювачів, яка є аналогом антенної решітки з металевих або діелектричних антен. Інтерес фахівців до випромінювачів на основі холодної плазми обумовлений перспективою створення ефективних багатопроменевих скануючих селективних плазмових реконфігурованих систем, або плазмових решіток випромінювачів (ПРВ). Статтю присвячено дослідженню основних електродинамічних параметрів ПРВ у НВЧ-діапазоні, що характеризують її як навантаження для генератора (приймача) електромагнітного (ЕМ) сигналу та як випромінювач ЕМ енергії з погляду її діаграми направленості (ДН) і основних параметрів випромінювання. При скануванні променя ДН досліджуються спотворення імпедансів випромінювачів ПРВ і деформація ДН. Аналогічні дослідження для порівняння виконані для такої ж конструкції і конфігурації антенної решітки з металевих антен. Дослідження були виконані шляхом моделювання ПРВ і розрахунків їх параметрів у програмному середовищі FEKO методом інтегрального рівняння і методом моментів для лінійної ПРВ з чотирьох випромінювачів у вигляді петльових діелектричних трубок, наповнених холодною плазмою при зниженому тиску. Отримані результати можуть бути використані для розрахунків і проектування плазмових решіток випромінювачів.

**Ключові слова:** плазмова решітка випромінювачів; відносна діелектрична проникність і питома провідність холодної плазми; власні, взаємні і повні входні опори антен решітки; коефіцієнт стоячої хвилі за напругою; діаграма направленості.