

УДК 621.396.677.8

## АНАЛИЗ ВНЕПОЛОСНЫХ СВОЙСТВ ПАНЕЛЬНОЙ АНТЕННЫ

*Цалиев Т. А., Рудый Е.М., Сиден С.В.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова  
ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029  
antenna@mail.ru, ssiden1@live.com*

## АНАЛІЗ ПОЗАСМУГОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАНЕЛЬНОЇ АНТЕНИ

*Цалієв Т. А., Рудий Є.М., Сідень С.В.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова  
вул. Кузнечна, 1, м. Одеса, Україна, 65029  
antenna@mail.ru, ssiden1@live.com*

## ANALYSIS OF OUT-OF-BAND PROPERTIES OF THE PANEL ANTENNA

*Tsaliev T. A., Rudy E.M., Siden S.V.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunication  
1 Kovalska St., Odessa 65029, Ukraine  
antenna@mail.ru, ssiden1@live.com*

**Аннотация.** На основе компьютерного моделирования исследованы внеполосные характеристики направленности панельной антенны, состоящей из полуволновых диполей и плоского металлического экрана. Рассчитаны частотные зависимости максимальных значений КНД и КУ вне рабочего диапазона. На основе этих данных сделан вывод о том, что при определении условий обеспечения ЭМС вне рабочей полосы частот необходим строгий учёт частотной зависимости входного импеданса антенн и согласования его с фидером.

**Ключевые слова.** панельная антенна, электромагнитная совместимость, антенная решётка

**Анотація.** На основі комп'ютерного моделювання дослідженні позасмугові характеристики спрямованості панельної антени, що складається з півхвильових диполів та металевого екрану. Отримані частотні залежності максимальних значень КСД та КП поза робочого діапазону частот. На основі отриманих даних зроблено висновок про те, що при визначенні умов забезпечення ЕМС РЕЗ поза робочої смуги частот потрібно строго враховувати частотну залежність вхідного імпедансу антен та узгодження його з фідером.

**Ключові слова.** панельна антена, електромагнітна сумісність, антена решітка

**Abstract.** On the basis of computer modeling the out-of-band directional characteristics of the panel antenna, consisting of a half-wave dipoles and flat metal screen are investigated. The frequency dependencies of the maximum values of the directivity and antenna gain outside the operating range are calculated. Based on these results it is concluded that the in determination of the conditions of ensuring EMC outside of operating frequency band is required strict accounting of the frequency dependence of the input impedance and matching it with the feeder.

**Key words.** panel antenna, electromagnetic compatibility, antenna array

Многочисленность и разнообразие функционирующих радиоэлектронных средств (РЭС), часто в ограниченной области пространства, приводит к появлению электромагнитных помех, негативно сказывающихся на эффективности их функционирования.

Как известно [1], уровень электромагнитных помех, создаваемых (и принимаемых) РЭС, зависит не только от параметров приёмного и передающего оборудования, но и от направленных характеристик используемых антенных систем. Следовательно, при анализе условий ЭМС необходимо знание основных характеристик антенн, причем не только в рабочей полосе частот, но и вне ее.

Уровень мощности  $P_R$  на входе приёмника в условиях распространения в свободном пространстве может быть представлен формулой:

$$P_{R[дБ]} = P_{T[дБ]} + G_{T[дБ]}(\theta_{TR}, \phi_{TR}, f) + G_{R[дБ]}(\theta_{RT}, \phi_{RT}, f) - L_{[дБ]}(d), \quad (1)$$

где  $P_T$  – мощность на входе передающей антенны;  $G_T(\theta_{TR}, \phi_{TR}, f)$  – коэффициент усиления (КУ) антенны передатчика  $A_T$ , а углы  $\theta_{TR}, \phi_{TR}$  локальной системы координат определяют направление на приёмную антенну  $A_R$ ;  $G_R(\theta_{RT}, \phi_{RT}, f)$  – КУ антенны приёмника, а углы  $\theta_{RT}, \phi_{RT}$  определяют направление на передающую антенну;  $L$  – потери при распространении;  $d$  – расстояние между антеннами и  $f$  это частота.

Схематически пример взаимодействия РЭС показан на рис. 1

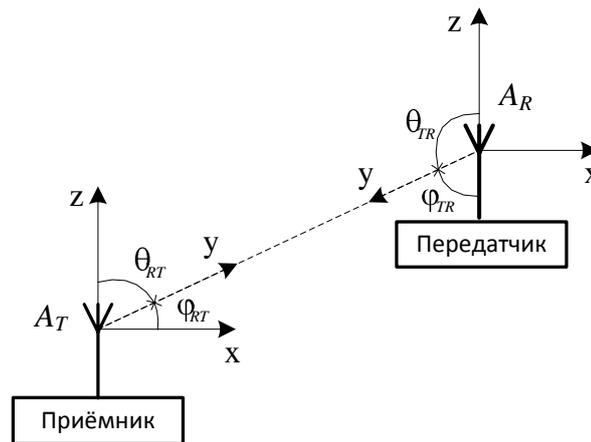


Рисунок 1 – Пример влияния РЭС друг на друга

Особенностью анализа характеристик антенн при оценке условий ЭМС является то, что во многих случаях необходимо знать значение коэффициента усиления антенны в произвольном направлении, которое определяется направлением прихода или излучения помех. Причем большой интерес представляют характеристики направленности антенн за пределами рабочей полосы частот (внеполосные характеристики), во многих случаях на частотах, являющихся гармониками основного излучения.

Основные параметры антенн, такие как коэффициент усиления (КУ), входное сопротивление и другие, указываются в технической документации, причем данные параметры указаны обычно для рабочего диапазона частот. В большинстве случаев параметры антенн за пределами рабочей полосы частот являются приблизительными или просто неточными. Причем в настоящее время внеполосные характеристики антенн не нормируются и не контролируются при их производстве.

Характеристики направленности антенн вне рабочего диапазона частот зависят от множества параметров, к которым можно отнести [1]:

- частотную зависимость распределения излучающих токов и полей в апертуре антенн при неизменных параметрах возбуждения;
- частотную зависимость входного импеданса (возможно приводящую к рассогласованию антенны с питающим фидером).

Для ориентировочной оценки коэффициента усиления антенны за пределами рабочей полосы частот используют упрощенные математические модели, основанные на статистических данных, например такую [2]:

$$G(f) = G(f_0) + C \log(f/f_0) + D, \quad (2)$$

где  $f_0$  – рабочая частота антенны,  $f$  – анализируемая частота, коэффициенты  $C$  и  $D$  определяются с помощью измерений для конкретной конструкции антенны или вычисляются при статистической обработке данных по множеству однотипных антенн.

Во многих случаях при анализе условий ЭМС вне рабочей полосы частот, вместо выражения (2) используют пороговую модель и определяют КУ исходя из этого выражения, положив  $C = 0$ . При этом значение константы  $D$  выбирают, например, из таблицы, приведенной в [2].

Такой подход возможно более приемлем для непрерывных излучающих раскрывов. Однако в случае дискретных антенных решеток, в частности, панельных антенн, на частотах, лежащих вне рабочего диапазона, направление максимального излучения меняется из-за появления побочных главных максимумов диаграммы направленности (ДН).

Поэтому, именно в таком случае представляет особый интерес детальный анализ направленных свойств и коэффициента усиления вне рабочего диапазона частот.

**Особенности представления характеристик антенн вне рабочей полосы частот.** Функциональную зависимость коэффициента усиления можно выразить следующим образом:

$$G(\theta, \phi, f) = D(\theta, \phi, f) \eta(f), \quad (3)$$

где  $D(\theta, \phi, f)$  – КНД антенны, определяемый формулой:

$$D(\theta_0, \phi_0, f) = \frac{4\pi |F(\theta_0, \phi_0, f)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \phi, f)|^2 \sin \theta d\theta d\phi}, \quad (4)$$

где  $F(\theta, \phi, f)$  – амплитудная характеристика направленности (АХН) антенны. В случае панельной антенной решетки АХН может быть представлена выражением:

$$F(\theta, \phi, f) = F_s(\theta, \phi, f) F_c(\theta, \phi, f) F_p(\theta, \phi, f), \quad (5)$$

где  $F_s(\theta, \phi, f)$  – характеристика направленности элемента,  $F_c(\theta, \phi, f)$  – множитель системы и  $F_p(\theta, \phi, f)$  – множитель, учитывающий влияние рефлектора.

Известно, что в большинстве случаев КПД антенны определяется как отношение полной излучаемой мощности антенны  $P_\Sigma$  к мощности, подведенной к антенне,  $P_0$ .

Данное определение КПД является частным, поскольку справедливо только для рабочего диапазона частот, где имеет место практически полное согласование входного импеданса антенны с волновым сопротивлением питающей линии, когда подведенная к антенне мощность и **поступившая** в нее практически равны [3]. За пределами рабочей полосы частот происходит изменение входного импеданса антенны и мощность, подводимую к антенне, имеет смысл представить в виде:

$$P_0 = P_a + P_{omp}, \quad (6)$$

где  $P_a(f) = P_0 (1 - |\Gamma(f)|^2)$  – мощность, поступившая в антенну;  $P_{omp}(f) = P_0 |\Gamma(f)|^2$  – мощность, отражённая от входа антенны. Мощность  $P_{omp}(f)$  характеризует потери, обусловленные рассогласованием антенны с питающей линией.

Тогда, пренебрегая тепловыми потерями в антенне можно записать, с учетом (6)

$$\eta(f) = 1 - |\Gamma(f)|^2, \quad (7)$$

где  $Z_n$  – характеристический импеданс питающей линии,  $Z_a$  – входной импеданс антенны;  $\left| \Gamma(f) \right| = \left| \frac{Z_n - Z_a}{Z_n + Z_a} \right|$  – модуль коэффициента отражения на входе антенны.

**Геометрические параметры исследуемых моделей.** Для анализа внеполосных свойств выберем два конструктивных варианта антенных решеток с вертикальной и горизонтальной ориентацией диполей. Для удобства обозначим их как AP1 (рис. 2,а) и AP2 (рис. 2, б), соответственно. Каждый из них представляет собой синфазную линейную эквидистантную решетку, состоящую из 5 излучающих элементов и металлического экрана (рефлектора). Элементы такой решетки это полуволновые плоскостные симметричные вибраторы длиной  $2l \approx \lambda_0/2$ , где  $\lambda_0$  – рабочая длина волны, соответствующая частоте  $f_0 = 1$  ГГц.

Плоский прямоугольный идеально проводящий экран шириной  $W = 0,75\lambda_0$  и высотой  $H = 4\lambda_0$  располагается на расстоянии  $d_e = 0,25\lambda_0$  от системы диполей.

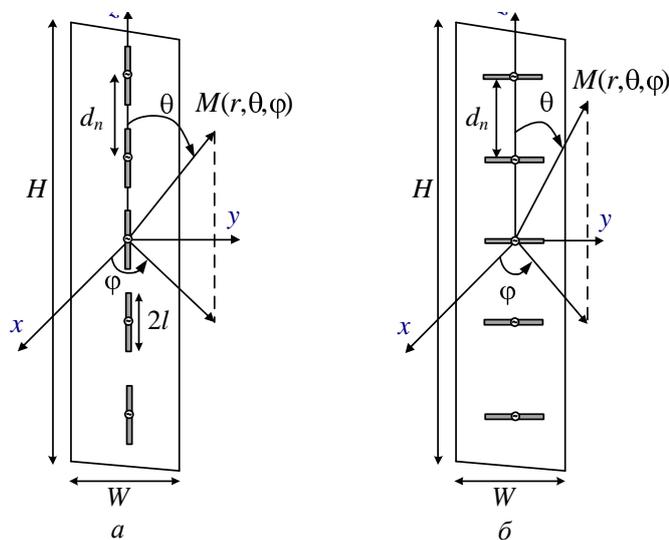


Рисунок 2 – Исследуемые модели антенн

**Методика исследования.** Электродинамическое моделирование осуществлялось в среде *FEKO* с использованием метода моментов, реализуемого в частотной области. При этом, определение входного импеданса и поля излучения антенны основано на численном решении задачи нахождения амплитудно-фазового распределения токов на ее элементах. В процессе дискретизации проводящие поверхности антенны разбиваются на отдельные сегменты и вычисляется распределение плотности поверхностных токов в этих сегментах [4]. Это позволяет определить частотные зависимости входного импеданса, КНД, коэффициента усиления и коэффициента отражения.

Приводимые ниже исследования и анализ характеристик осуществлялись на дискретных частотах в диапазоне 1...6 ГГц с шагом 100 МГц.

**Результаты численного моделирования.** Поскольку диапазонность антенной решетки зависит от частотных свойств образующих ее элементов, то представляет интерес вначале проанализировать свойства одного из них. Рассмотрим частотные зависимости КНД (рис.3, а) и КУ (рис. 3, б) диполя, определяемые направлениями  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ .

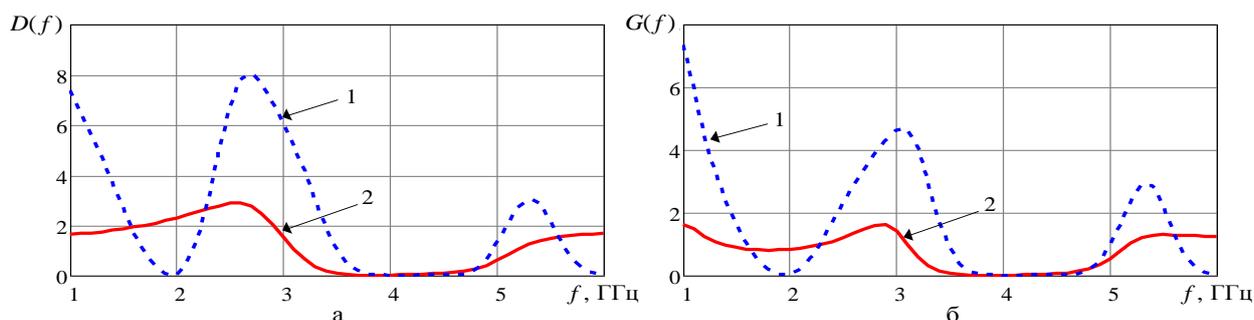


Рисунок 3 – Зависимости КНД и КУ диполя от частоты: 1 – с экраном, 2 – без экрана

Как и следует ожидать, вариации КНД уединённого диполя зависят от характера распределения тока на нем и минимальные значения наблюдаются в области четвертой гармоники рабочей частоты.

Наличие экрана приводит к резкому снижению КНД и КУ в области второй гармоники основной частоты, а также их значительному росту вблизи нечётных гармоник. Причем при отсутствии экрана КНД примерно равен своему значению на основной частоте, а КУ почти вдвое меньше из-за влияния эффекта рассогласования на входе.

При рассмотрении частотных свойств пятиэлементной решётки следует обратить внимание на то, что изменение частоты приводит к появлению побочных главных лепестков диаграммы направленности (ДН). Поэтому при анализе частотных зависимостей КНД (рис. 4) и КУ (рис. 5) для них имеет смысл рассматривать изменения величин, происходящие не только в направлении нормали ( $D_0$ ), но также наблюдаемые в направлении одного из побочных главных лепестков, то есть для их максимальных значений ( $D_{\max}$ ).

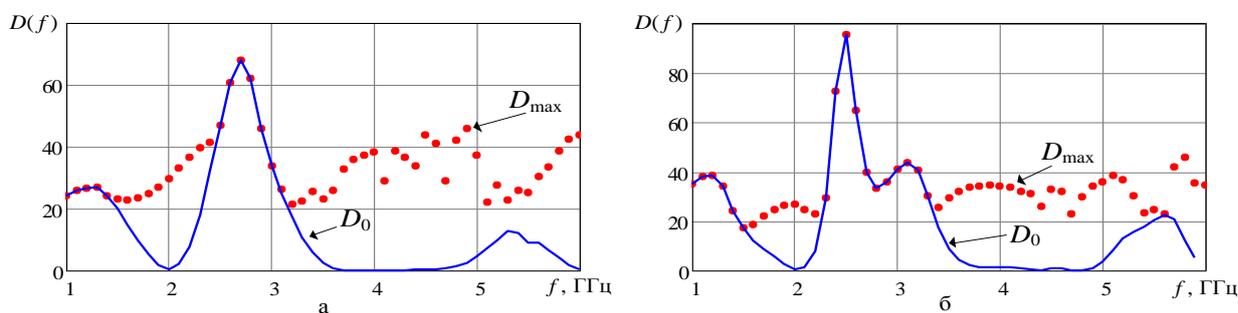


Рисунок 4 – Зависимости КНД решеток от частоты: а – AP1, б – AP2.

Вариации значений КНД решетки в направлении нормали по своему характеру напоминают кривую 1 на рис. 3,а, причём наблюдается значительное превышение КНД в области 3-й гармоники в сравнении с его значением на рабочей частоте, а также имеется небольшой максимум в районе 5-й гармоники. Направление максимального излучения в этих двух случаях совпадает с направлением главного лепестка ДН на рабочей частоте.

В то же время, рассматривая на этих рисунках частотные вариации максимального КНД, можно отметить, что они не имеют явно выраженных минимумов и резких осцилляций, за исключением максимума в области 3-й гармоники. Кроме этого, заметно повышение среднего уровня КНД вблизи четных гармоник появившееся из-за наличия побочных главных лепестков ДН.

**Коэффициент усиления антенны.** Как уже упоминалось, величина коэффициента усиления антенны, в особенности вне рабочего диапазона частот, зависит от согласования входного импеданса с волновым сопротивлением питающей линии. Поскольку входной импеданс каждого элемента решетки зависит от изменений частоты с учетом вариаций взаимного влияния элементов решетки, ориентации и наличия экрана, то для учета влияния этих

факторов вначале был проведен расчет входного импеданса для центрального элемента решетки. В результате установлено, что на частоте резонанса чисто активный входной импеданс при разной ориентации элементов несколько отличается и примерно равен 63 Ом – для AP1 и 75 Ом – для AP2. В дальнейших расчетах эти значения были приняты таковыми для всех элементов соответствующей решетки, чтобы можно было полагать их согласованными с нагрузкой на рабочей частоте.

На рис. 5 представлены частотные зависимости КУ для двух вариантов рассматриваемых антенн, с учетом рассогласования за пределами рабочей частоты, как в направлении  $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$  ( $G_0$ ), так и его максимального значения ( $G_{\max}$ ).

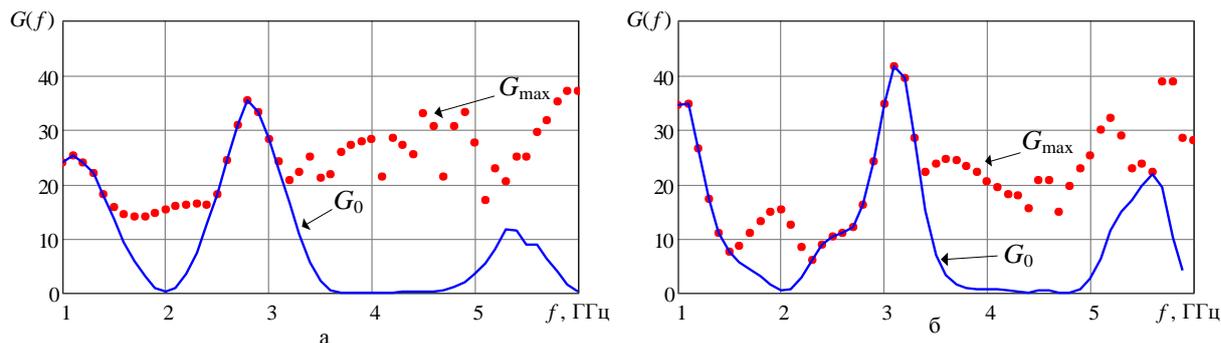


Рисунок 5 – Зависимости КУ решеток от частоты: а – AP1, б – AP2.

Сравнивая приводимые зависимости, следует отметить, что (как следствие учета эффекта рассогласования) вне рабочей частоты наблюдается примерно двукратное снижение значений КУ по сравнению с КНД. При этом, в случае AP2, поскольку взаимное влияние элементов решетки сильнее, наблюдается изменение формы кривой области 3-й гармоники и смещение ее максимума.

**Выводы.** Проведенный анализ показал, что в задачах ЭМС для достаточно корректного применения значений коэффициента усиления антенных решеток панельного типа вне рабочего диапазона частот обязательно требуется (как в режиме приема, так и в режиме передачи) принимать во внимание частотное рассогласование входного импеданса с волновым сопротивлением фидера. Причем, в отличие от большинства типов антенн с излучающим раскрытием, для антенных решеток максимальное значение КУ может иметь место в направлениях не обязательно совпадающих с направлением основного излучения.

На основании приведенных данных, для антенных решеток панельного типа, при оценке ЭМС РЭС в выбранной области частот, считая условия ЭМС неблагоприятными можно принять максимальный КУ примерно в два раза большим, чем на основной частоте. Причем наиболее опасной излучения (или приема) такой антенны является внеполосная область 3-й гармоники частоты основного излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Седельников Ю.Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Учебное пособие. / Ю.Е. Седельников. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2006. – 304 с.
2. Ефанов В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В.И. Ефанов, А.А. Тихомиров. – Томск: ТГУСУРЭ. 2012. – 228 с.
3. Цалиев Т.А. О понятиях коэффициента усиления и КПД антенн в задачах ЭМС / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса. – 2011. - №1. – с. 18–24
4. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. / Банков С.Е., Курушин А.А. – М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2008, 246 стр.

#### REFERENCES

1. E., Sedelnikov Yu. *Electromagnetic compatibility of radio electronic means*. Kazan: Novoe znanie, 2006.
2. Efanov V.I., Tikhomirov A.A. *Electromagnetic compatibility of radio electronic means and systems*. Tomsk: TGUSURE, 2012.
3. T.A., Tsaliev. «About concepts of antenna gain and an efficiency in EMS problems.» *Naukovi pratsi ONAZ* 1 (2011): 18-24.
4. Bankov S.E., Kurushin A.A. *Calculation of the radiated structures using FEKO*. Moscow: NPP Rodnik, 2008.