

УДК 621.396.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГРАММ РУПОРНЫХ АНТЕНН¹

*Кореновская О. Л., к.т.н. доцент; Манойлов В. Ф., д.т.н., профессор;
Морозов Д. С., ст. преподаватель, Никитчук Т. М., к.т.н. доцент;
Сидорчук О. Л., ст. преподаватель.*

*Житомирский государственный технологический университет,
г. Житомир, Украина, RT_i_T@mail.ru*

MODELING AND RAPID METHOD MEASUREMENT OF HORN ANTENNA DIAGRAM

*Korenovskaya O. L., Ph.D. docent; Manoilov V. F., professor; Morozov D. S.,
senior lecturer; Nikitchuk T. N., Ph.D. docent; Sydorchuk O. L., senior lecturer.
Zhytomyr State Technological University, Zhitomir, Ukraine*

Введение

Современные подвижные образцы военной техники в зависимости от назначения имеет в своём составе большое количество различных антенн [1, 2]. Исследования вклада эффективных поперечников рассеяния (ЭПР) антенных систем в общую заметность радиолокационных объектов показывают, что без оценки их характеристик рассеяния и разработки способов уменьшения проблема её снижения не может быть решена [3, 4]. Не менее важным фактором, определяющим актуальность проблемы изучения процессов рассеяния электромагнитных волн антеннами, является влияние ЭПР антенн на качество функционирования радиоэлектронных средств.

Практика эксплуатации многофункциональных радиосистем показывает, что взаимные влияния между антеннами могут приводить к возникновению радиопомех вследствие их высоких значений ЭПР и ведёт к ухудшению электромагнитной обстановки на объекте [5].

Разработка новой техники и надёжная эксплуатация радиосистем требует знания особенностей рассеяния радиоволн радиолокационными целями. Для тел сложной формы не существует достаточно точных методов расчёта и для них информация о ЭПР может быть получена путём измерений [6]. Поэтому наряду с развитием теории имеет место и широкое экспериментальное изучение рассеяния и дифракции радиоволн, которое ведёт к разработке новых методов измерения ЭПР.

Основное содержание работы

Измерение рассеивающих свойств различных радиолокационных целей в реальных условиях связано с большими затратами времени и средств.

¹ Электронный вариант статті: <http://radar.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1106>

Часто сами измерения ЭПР проводят, как правило, с использованием масштабного электродинамического моделирования [7]. Возможность создания модели заданной электродинамической системы основана на линейности уравнений Максвелла, описывающих поля системы. Условия электродинамического масштабирования действительны только для систем с линейными средами, параметры которых могут быть как однородными, так и неоднородными [8].

При определении величины ЭПР реальную цель заменяют фиктивным рассеивателем, установленным на её место и рассеивающим энергию равномерно во всё пространство и создающим в месте приёма такую же плотность потока мощности, что и реальная цель. Если площадь сечения фиктивного рассеивателя равна σ , а плотность потока мощности, падающей на него волны равна P_1 , то вся мощность, падающая на рассеиватель равна σP_1 . Учитывая, что эта мощность рассеивается равномерно во всех направлениях, найдём, что плотность потока мощности у приёмной антенны равна [6, 9]

$$P_2 = \frac{P_1 \sigma}{4\pi R^2}; \quad (1)$$

Из выражения (1) легко получается условие, определяющее значение ЭПР в следующем виде

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

где R – расстояние до цели.

Величина σ зависит от формы и размеров рассеивателя, свойств материалов из которых он изготовлен, от длины волны и расстояния.

Найдём связь ЭПР модели (м) и образца (о) [10]

$$\sigma_0 = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi \frac{\vec{E}_p^0 \vec{H}_p^0}{\vec{E}_\Pi^0 \vec{H}_\Pi^0} (R_0^2) l_0^2; \quad (3)$$

$$\sigma_m = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi \frac{\vec{E}_p^0 \vec{H}_p^0}{\vec{E}_\Pi^0 \vec{H}_\Pi^0} (R_0^2) l_{0,m}^2; \quad (4)$$

из выражений (3) и (4) следует, что

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_m} = \frac{l_0^2}{l_{0,m}^2}; \quad (5)$$

Если модель выполнена в масштабе $1:N$, то

$$\sigma_0 = \sigma_m N^2; \quad (6)$$

То есть для получения значения ЭПР образца на рабочей длине волны необходимо величину ЭПР, измеренную на модели, умножить на N^2 .

При масштабном моделировании измеряемые величины должны быть геометрически подобны образцу, а все размеры уменьшены в N раз. Часто-

та, на которой производятся измерения моделей, должна быть в N раз больше частоты образца.

Если образец выполнен из металла, то и модель должна быть металлической. Если материал образца не является хорошо проводящим металлом, то диэлектрическая ε и магнитная проницаемость μ в каждой точке модели должны быть равны ε и μ в подобных точках образца, а проводимость в N раз меньше чем проводимость образца.

Применение моделирования целей позволяет получить необходимую информацию в короткие сроки с малыми затратами средств.

Необходимость получения большого объёма информации о рассеивающих свойствах цепей заставила искать новые пути измерений. Большинство измерений было перенесено в наземные условия и стало производиться на полигонах или на установках собранных в безэховых камерах [9]. Широкое применение получили измерения на моделях и натуральных макетах путём снятия зависимости ЭПР от угла поворота цели. Экспериментальные методы измерения ЭПР на специализированных измерительных установках являются достаточно сложными и дорогостоящими, а известные аналитические модели их расчёта во многих случаях не дают удовлетворительных результатов.

Авторами работ [11,12] на основе закона сохранения энергии получена экспериментально-расчётная модель для определения ЭПР апертурных антенн. Недостатком предложенной модели определения ЭПР является большая погрешность его измерения и величины КСВН. В работе [13] предложено улучшить данную схему измерения ЭПР апертурных антенн.

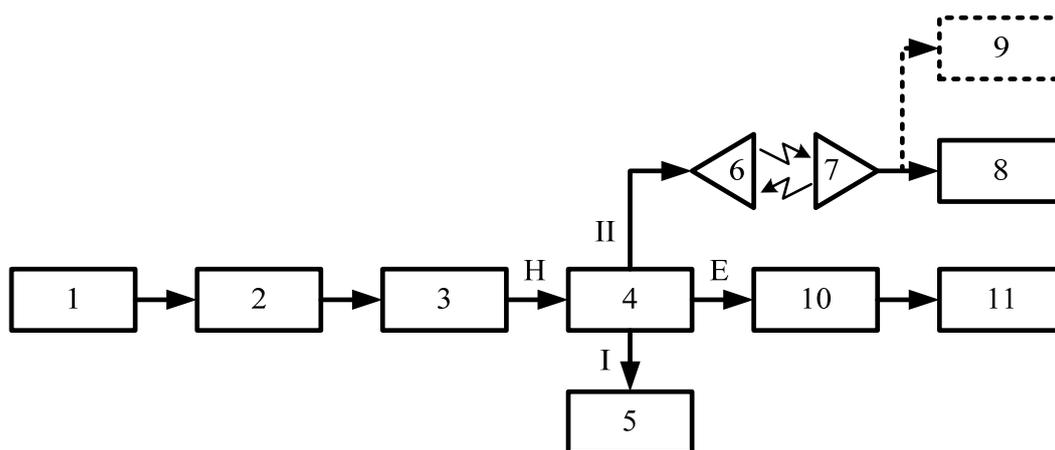


Рис. 1. Блок-схема измерения ЭПР рупорных антенн

Схема для измерения ЭПР апертурных антенн (рис. 1) содержит: 1 – измеритель КСВН; 2 – цифровой частотомер; 3 – поляризационный аттенюатор; 4 – двойной несимметричный тройник (вход Н). Сигнал в тройнике делится между плечами I и II. Плечо I нагружено на образцовую загрузку 5 с КСВН 1,02–1,03, а вход II – на передающую антенну 6, которая излучает

сигнал в направлении исследуемой антенны 7. К плечу Е тройника 4 подключена детекторная секция 10 и измерительный преобразователь 11. Регулируя коэффициент отражения подвижной нагрузки 5 получают нулевые показатели усилителя 11. При этом сумма волн, которые поступают в плечо Е тройника 4 за счёт его асимметрии равна нулю. Несимметричный двойной тройник не требует симметрирования на частоте измерения, а потому равенство показателей измерительного усилителя свидетельствует про равенство полных сопротивлений измерительной и образцовой подвижной нагрузки независимо от степени согласования тройника.

ЭПР апертурных антенн определяется согласно выражению [14]

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{G_A^2 \lambda^2}{4\pi} \left| \frac{\text{КСВН} - 1}{\text{КСВН} + 1} \right|^2 \cos \theta_m \nu \eta; \quad (7)$$

где G – коэффициент усиления антенны; λ – длина волны в воздухе; КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению; θ_m – угол между электрической осью антенны и направлением на антенну (угол наблюдения); ν , η – коэффициенты использования поверхности антенны и потерь в тракте.

Методика измерения ЭПР апертурных антенн следующая. Для начала на месте исследуемой антенны помещают образцовые меры ЭПР (сферы, цилиндры, полосы и т.д.) с известными их значениями и измеряют соответствующие значения КСВН, а потом используя значение коэффициента усиления антенны σ_A и потери в тракте η определяют величину ЭПР по формуле (6).

При исследовании ЭПР антенн миллиметровых волн целесообразно эксперимент провести в области более длинных волн, чтобы увеличить размеры устройства и уменьшить допуски на изготовление образца.

Как известно, значительный вклад в ЭПР объектов военной техники вносят апертурные антенны, в частности рупорные антенны. Они применяются как для приёма и излучения сигналов, так и в качестве облучателей зеркальных и линзовых антенн.

Для проверки достоверности получаемых результатов метода электродинамического масштабного моделирования при исследовании характеристик ЭПР рупорных антенн были изготовлены и проведены измерения этих антенн в десятисантиметровом диапазоне длин волн (для антенн двухсантиметрового диапазона). При этом использовались методы измерения диаграмм ЭПР рупорных антенн с помощью эффекта Доплера [6] и по предложенной методике. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены результаты расчёта ЭПР от измеренных КСВН двух рупорных антенн с согласованной (кривые 1 и 2) и короткозамкнутой (кривые 3 и 4) нагрузкой в Н-плоскости при нормальной поляризации падающей волны на центральной частоте диапазона.

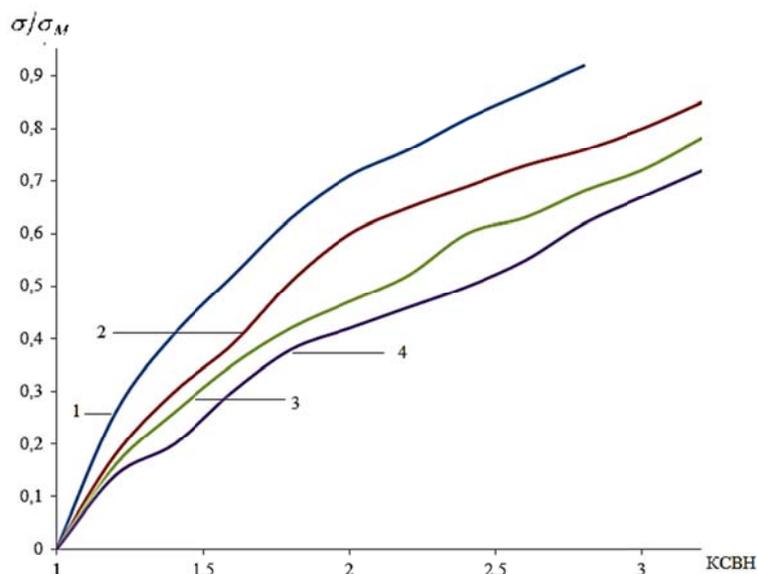


Рис. 2. Расчётные и экспериментальные графики зависимостей ЭПР рупорных антенн от КСВН

4), а длина – 6λ . Калибровка измерительных установок производилась по трёхгранному уголкового отражателю, ЭПР в максимуме основного лепестка равна

$$\sigma_M = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}, \quad (8)$$

где a – размер его ребра.

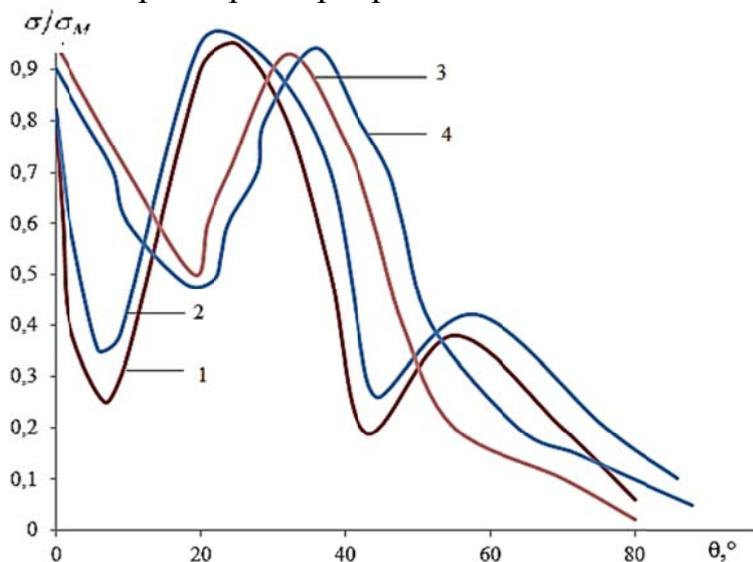


Рис. 3. Графики зависимостей ЭПР двух рупорных антенн при коротком замыкании.

антенн на рабочих длинах волн должны применяться согласованные нагрузки, а на длинах волн, меньших или равных рабочим, могут использоваться различные волноводные фильтры.

Нагрузка находилась в задней стенке прямоугольного волновода, в котором распространялась волна типа H_{10} . Зависимости ЭПР двух рупорных антенн (кривые 2 и 4) сняты с помощью метода Доплера при разных углах поворота стола. Рупорные антенны имели следующие поперечные размеры axb – $(0,7 \times 0,3) \lambda$ (кривые 1 и 3) и $(0,8 \times 0,15) \lambda$ (кривые 2 и

Полученные результаты расчёта и измерения ЭПР двух рупорных антенн показали совпадение с графической точностью, что служит подтверждением приёмной методики расчёта ЭПР на основе измерения КСВН. На рис. 3 и 4 приведены ЭПР двух рупорных антенн с различными соотношениями их размеров к длине падающей волны.

Отметим, что для снижения ЭПР рупорных

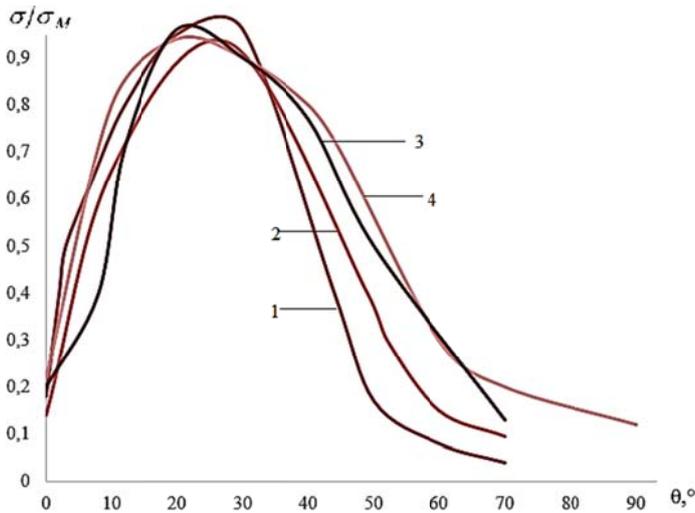


Рис. 4. Графики зависимостей ЭПР двух рупорных антенн при согласованной нагрузке.

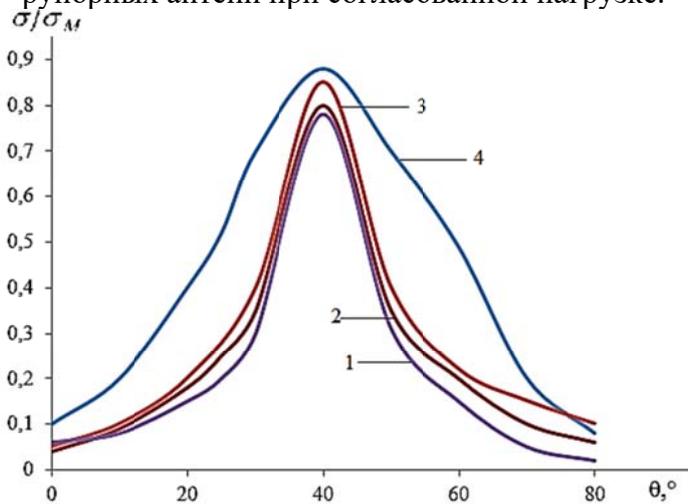


Рис. 5. Графики зависимостей ЭПР рупорной антенны от угла раскрытия рупора при согласованной нагрузке

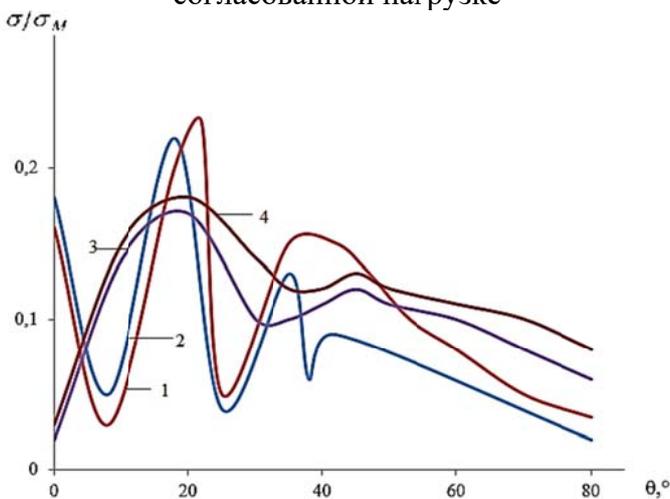


Рис. 6. Графики зависимостей ЭПР рупорной антенны от угла раскрытия рупора

Так, например, в работах [17, 18] предложены две конструкции рупорных антенн с уменьшенной ЭПР и их характеристики сняты на центральной частоте диапазона. Результаты электродинамического моделирования и измерений однопозиционной ЭПР показали, что данные антенны могут работать в двухсантиметровом диапазоне длин волн с величиной потерь 0,5-0,6 дБ. Причём, коэффициент усиления рупорных антенн составлял в среднем 24-25 дБ. На рис. 5 показаны зависимости ЭПР рупорной антенны от угла раскрытия рупора при согласованной нагрузке.

На рис. 6 показаны однопозиционные ЭПР предложенных конструкций антенн (кривые 1, 3 – расчётные, а 2, 4 – измеренные с помощью предложенного метода (рис.1)). Так ЭПР рассматриваемых антенн в области главного лепестка была уменьшена на 12,5 дБ. Антенны имеют размер раскрытия рупора $a_p \times b_p \times l = (1.2 \times 1.5 \times 4) \lambda$, угол раскрытия 20° . В волноводе распространялась волна типа H_{10} , согласованная нагрузка находилась на задней стенке волновода. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных свидетельствует о хорошем их соответствии друг другу.

Выводы

Предложенная методика электродинамического моделирования и метод измерения рупорных антенн позволяет оценивать диаграммы ЭПР в широких секторах углов облучения и приёма. Из сравнения ЭПР рупорных антенн с короткозамкнутой и согласованной нагрузками можно определять потенциально достижимые степени их уменьшения. Значение ЭПР рупорных антенн позволяет использовать их в качестве рабочих мер ЭПР в измерительных установках.

Перечень источников

1. Еремин В.Б. Характеристики рассеяния антенн и ФАР / В.Б. Еремин, С.Н. Паньчев // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 1997. – № 8. – С.61.
2. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design* / C.A. Balanis. – John Wiley & Sons. Inc., 1997. – p.357.
3. Ямпольский В.Г. *Антенны и ЭМС* / В.Г. Ямпольский, В.П. Фролов. – М. : Радио и связь, 1983. – 270с.
4. Астахов В.Н. Пути снижения ЭПР рупорных антенн. Дис. канд. техн. наук. 05.12.21 / В.Н. Астахов, Ленинград, ЛЭТИ, 1989. – 190с.
5. Вакин С.А. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки / С.А. Вакин, Л.Н. Шустов. – М. : Сов. Радио, 1968. – 320с.
6. Майзельс Е.Н. Измерения характеристик радиолокационных цепей / Е.Н. Майзельс, С.К. Торгованов. – М. : Сов. Радио, 1972. – 232с.
7. Фрадин А.З. Измерения параметров АФУ / А.З. Фрадин. – М.: Связь, 1972. – 352с.
8. Красюк А.П. Электродинамика и распространение радиоволн / А.П. Красюк, Н.Д. Дымович. – М. : Высшая школа, 1974. – 526с.
9. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели / В.О. Кобак. – М. : Сов. Радио, 1975. – 246с.
10. Астахов В.Н. К расчёту полного поля рассеивания приёмной рупорной антенны / В.Н. Астахов, В.А. Степанов // *Изв. ЛЭТИ. Научн. труды*. – 1987. – Вып. 388. – С.92-97.
11. Гладышев А.К. Экспериментально-расчётная модель оценки характеристик рассеяния апертурных антенн / А.К. Гладышев, Е.В. Иванкин, С.Н. Паньчев // *Радиопромышленность, НИИЭИР*. – 1995. – с. 51-55.
12. Паньчев С.Н. Косвенный метод определения структурной составляющей рассеяния антенн / С.Н. Паньчев, Э.А. Соломин // *Радиопромышленность. НИИЭИР*. – 1993. – С.60-62.
13. Патент України на винахід №106557 Система для непрямого визначення антеної складової ЭПР апертурных антенн / В.П. Манойлов, О.Л. Сидорчук. – 2014. – Бюл.№17
14. Гладышев А.К. Влияние характеристик рассеивания антенн на показатели качества функционирования РЭС / А.К. Гладышев, Е.В. Иванкин, С.Н. Паньчев. // *Измерительная техника*. – 1995. – №2. – С.48-50.
15. Манойлов В.П. Малогабаритна рупорна антена кругової поляризації зі зменшеною ЕПР / В.П. Манойлов, О.Л. Сидорчук. – *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. – 2006. – №4(50). – С. 147-152.
16. Сидорчук О.Л. Розрахунок ефективності поверхні розсіювання рупорної антени при падінні на неї хвилі довільної форми з застосуванням леми Лоренца / О.Л. Сидорчук. – *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. – 2011. – №2(57). – С.102 – 113.
17. Патент 96661. МПК НО1Q 13/10. Рупорна антена колової поляризації / В.П.

Манойлов, О.Л. Сидорчук ; заявник ЖДТУ: а20103902 заявка 06.04.2010; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22, 3с.

18. . Патент 97037. МПК НО1Q 13/02. Рупорна антена / В.П. Манойлов, О.Л. Сидорчук ; заявник ЖДТУ ; заявка а201008878, 16.07.2010 ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24,3с.

References

1. Eremin V.B. and Panychev S.N. (1997) Kharakteristiki rasseyaniya antenn i FAR [Scattering characteristics of antennas and phased arrays]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, No 8. pp. 61.

2. Balanis C.A. (1997) Antenna theory: analysis and design, 2nd ed., John Wiley & Sons. Inc., p.357.

3. Yampol'skii V.G. and Frolov V.P. (1983) Antenny i EMS [Antennas and EMS]. Moscow, Radio i svyaz', 270 p.

4. Astakhov V.N. (1989) Puti snizheniya EPR rupornykh antenn [Ways to reduce the RCS horn antennas]. Dis. kand. tekhn. nauk., Leningrad, LETI, 190 p.

5. Vakin S.A. and Shustov L.N. (1968) Osnovy radioprotivodeistviya i radiotekhnicheskoi razvedki [Fundamentals of jamming and electronic intelligence]. Moscow, Sov.Radio Publ. 320 p.

6. Maizel's E.N. and Torgovanov S.K. (1972) Izmereniya kharakteristik radiolokatsionnykh tsepei [Measurements of the characteristics of radar chain.]. Moscow, Sov. Radio Publ. 232 p.

7. Fradin A.Z. (1972) Izmereniya parametrov AFU [AFD parameter measurements]. Moscow, Svyaz' Publ., 352 p.

8. Krasnyuk A.P. and Dymovich N.D. (1974) Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln [Electrodynamics and Propagation]. Moscow, Vysshaya shkola, 526 p.

9. Kobak V.O. (1975) Radiolokatsionnye otrazhateli [Radar reflectors]. Moscow, Sov. Radio Publ., 246 p.

10. Astakhov V.N. and Stepanov V.A. (1987) K raschetu polnogo polya rasseivaniya priemnoi rupornoj anteny [Calculation of the total field dissipation receiving horn antenna]. *Izvestiya LETI. Nauchn. trudy*, Vol. 388, pp. 92-97.

11. Gladyshev A.K., Ivankin E.V. and Panychev S.N. (1995) Eksperimental'no-raschetnaya model' otsenki kharakteristik rasseyaniya aperturnykh antenn [Experimental and computational models evaluate the performance of the scattering aperture antennas]. *Radiopromyshlennost', NIIIEIR*, pp. 51-55.

12. Panychev S.N. and Solomin, E.A. (1993) Kosvennyi metod opredeleniya strukturnoi sostavlyayushchei rasseyaniya antenn [Indirect method for determination of structural component scattering antennas]. *Radiopromyshlennost', NIIIEIR*, pp.60 -62.

13. Manoilov V.P. and Sidorchuk O.L. (2014) Sistema dlya nepryamogo viznachennya antenoї skladovoї EPR aperturnykh antenn [The system for indirect determination antenna component RCS horn antennas]. Patent UA 106557.

14. Gladyshev A.K., Ivankin E.V. and Panychev S.N. (1995) Vliyanie kharakteristik rasseivaniya antenn na pokazateli kachestva funktsionirovaniya RES [Effect of dispersion characteristics of antennas on quality of functioning RES]. *Izmeritel'naya tekhnika*, No 2, pp. 48-50.

15. Manoilov V.P. and Sidorchuk O.L. (2006) Malogabaritna ruporna antena krugovoї polarizatsii zi zmenshenoyu EPR [Compact horn antenna with circular polarization reduced RCS]. *Visnik ZhDTU. Tekhnichni nauki*, No 4 (50), pp. 147-152.

16. Sidorchuk O.L. (2011) Rozrakhunok efektyvnosti poverkhni rozsiyuvannya rupornoї anteni pri padinni na neї khvili dovil'noї formi z zastosuvannyam lemi Lorentsa [Calculation of surface scattering efficiency horn antenna in the fall at her waves of arbitrary shape using

Lorentz lemma]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky*, No 2 (57), pp. 102 – 113.

17. Manoilov V.P., Sidorchuk O.L. (2011) Ruporna antena kolovoї polarizatsii [Horn antenna polarization angular]. Patent 96661, 3 p.

18. Manoilov V.P. and Sidorchuk O.L. (2011) Ruporna antena [Horn antenna]. Patent UA 97037, 3 p.

Кореновская О. Л., Манойлов В. Ф., Морозов Д. С., Никитчук Т. Н., Сидорчук О. Л. Моделирование и экспресс-методика измерения ЭПР рупорных антенн.

В работе рассмотрен метод электродинамического масштабирования моделей рупорных антенн, представлены на основании уравнения Максвелла модели для измерения эффективной поверхности их рассеяния (ЭПР). Предложена усовершенствованная методика измерения ЭПР рупорных антенн от угла наблюдения в сантиметровом диапазоне длин волн. Приведены данные измерения ЭПР двух рупорных антенн при короткозамкнутой и согласованной нагрузке в волноводном тракте в зависимости от угла наблюдения.

Ключевые слова: рупорная антенна, ЭПР, моделирование параметров антенн.

Коренівська О. Л., Манойлов В. П., Морозов Д. С., Нікітчук Т. М., Сидорчук О. Л. Моделювання і експрес-методика визначення ЕПР рупорних антен.

В роботі розглянуто метод електродинамічного масштабування моделей рупорних антен, представлені на основі рівнянь Максвелла моделі для вимірювання ефективної поверхні їх розсіювання (ЕПР). Запропонована удосконалена методика вимірювання ЕПР рупорних антен від кута спостереження θ в сантиметровому діапазоні довжин хвиль. Приведені дані вимірювання ЕПР двох рупорних антен при коротко замкнутому і узгодженому навантаженні у хвилеводному тракті в залежності від кута спостереження.

Ключові слова: рупорна антена, ЕПР, моделювання параметрів антен

Korenovskaya O. L., Manoilov V. F., Morozov D. S., Nikitchuk T. N., Sydorchuk O. L. Modeling and rapid method measurement of RCS horn antennas diagram

Introduction. *The development of new technology and reliable operation of radio systems requires knowledge of the scattering of radio waves by radar targets. For solids with complicated form there are no sufficiently accurate calculation methods and their information about the RCS can be obtained by measuring. Therefore, the development of the theory of the case and the extensive experimental study of the scattering and diffraction of radio waves lead to the development of new methods for measuring the RCS.*

Theoretical statement. *Method of scale models of electrodynamic horn antennas is presented on the basis of Maxwell's equations model to measure their radar cross-section (RCS) in theoretical statement. RCS characteristics of horn antennas were fabricated and measured in these antennas in decimeter wavelengths for validation of the results.*

The results of calculating and measuring the two horn antennas EPR are shown agreement with graphic precision. It confirms the receiving calculation by method based on EPR measurements of VSWR.

Conclusion. *The proposed method of electrodynamic simulation and measurement method of horn antennas allows to estimate the RCS chart in broad sector of irradiation angles and reception. The potentially achievable degree of reduction can be determined from a comparison of the RCS horn antenna with a matched load and short-circuited. The value of the RCS horn antennas allows you to use them as measures of operating the RCS measurement units.*

Keywords: horn antenna, RCS, modeling parameters of antennas.