

УДК 621.341

И. И. СИЛИ**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ Е-СЕКТОРИАЛЬНОГО РУПORA**

В работе проведено теоретическое обоснование параметров широко-полосной антенны для угнетения жизнедеятельности колорадского жука и его личинок. Применение радиоимпульсного электромагнитного излучения для борьбы с колорадским жуком предусматривает использование секториальных рупорных излучателей с расширением в плоскости вектора \vec{E} . Е-секториальный рупор наиболее подходит для решения поставленной в работе задачи, так как обеспечивает более широкую диаграмму направленности в плоскости параллельной поверхности земли, а вектор \vec{E} в излучающем раскрыве будет перпендикулярен поверхности земли.

Ключевые слова: широкополосная радиоимпульсная антенна, диаграмма направленности антенны, колорадский жук, Е-секториальный рупор.

Введение. В сельскохозяйственном производстве Украины важное место занимает выращивание картофеля. Поэтому с повсеместным выращиванием картофеля возрастают и требования по защите его от насекомых-вредителей, которые влияют на качество и количество урожая. Самым опасным вредителем картофеля является колорадский жук [1]. В настоящее время в Украине для уничтожения колорадского жука применяют только химические препараты: хлорофос, полихлорпинен, полихлоркамфен, гамма-изомер, дилор, фталофос и др. Применение химических препаратов вызывает обеднение биоценоза, загрязнение биосферы, появление устойчивых к пестицидам вредителей, повышение плодовитости отдельных насекомых, хрущей и др. Химические препараты, попадая в организм человека через клубни картофеля, снижают иммунитет, поражают печеньку и другие органы, что приводит к разным заболеваниям, раннему старению [2].

Следовательно, для сохранения и повышения урожайности картофеля нужны другие подходы, основанные на применении информационно-энергетической радиоимпульсной электромагнитной технологии для уничтожения колорадского жука [3].

Таким образом, исследования и разработка метода радиоимпульсной электромагнитной биотехнологии и электронных систем, в том числе и Е-секториальной рупорной антенны, для уничтожения колорадского жука и его личинок является, несомненно, необходимой задачей.

Анализ предшествующих исследований и постановка проблемы. Различные типы антенн нашли широкое применение в радиолокации, исследовании электромагнитной совместимости и устойчивости радиоэлектронных систем и в других условиях [4,5]. В радиолокации для передачи широких импульсов применяются антенны поверхностных волн и волноводно-рупорные антенны. К классу излучающих систем поверхностных волн относятся антенны с замедленной фазовой скоростью ($V_{\phi} < c$) [6]. Характерной особенностью таких антенн являются их малые поперечные размеры. В качестве плоских замедляющих систем используются структуры в виде тонкого слоя диэлектрика на металлической подложке и гребенчатые структуры. К недостаткам антенн поверхностных волн следует отнести сравнительно мало

© И. И. Сили, 2015

реализуемое усиление и относительно высокий уровень боковых лепестков. Таким образом, применение антенн подобного типа для решения поставленной в работе задачи нерационально. Волноводно-рупорные антенны, в отличие от рассмотренных выше антенных систем, являются широкополосными устройствами и обеспечивают примерно полуторное перекрытие по диапазону. Различают конические, пирамидальные и секториальные излучатели. Конические рупорные антенны строятся на базе круглого волновода. Они имеют ряд недостатков: у таких антенн плоскость поляризации поля неустойчива и может легко изменяться при незначительных деформациях стенок; поле в раскрытии такого конического излучателя поляризовано неодинаково в различных точках. Поэтому остановимся на пирамидальных и секториальных рупорных антеннах. Подобного типа излучатели строятся на базе прямоугольных волноведущих систем. Так как антенны первого типа используются, как правило, для получения узкой ДН в двух взаимно перпендикулярных плоскостях за счет увеличения поперечных размеров раскрытия рупора, то наиболее приемлемыми для решения задачи по борьбе с колорадским жуком представляются секториальные рупорные излучатели, анализ которых в литературных источниках проведен недостаточно [7]. Поэтому использование такого типа антенной системы для наших конкретных целей требует проведения дополнительных исследований.

Цель статьи. Проведение теоретических исследований по определению параметров и диаграммы направленности E-секториального рупорного излучателя для уничтожения колорадских жуков.

Изложение основного материала. Для определения напряженности электрического поля E-секториального рупора в дальней зоне $E_E(\theta)$ используем правило Бонч-Бруевича [8]. Сначала рассмотрим плоскость xOz (рис. 1).

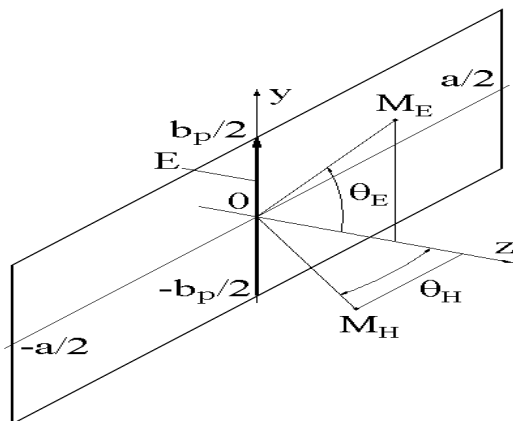


Рис. 1 – Излучающий раскрыт E-секториального рупора

Предполагаем, что значение напряженности электрического поля одиночного излучателя Гюйгенса в дальней зоне нам известно [9]. Поэтому для расчета поля раскрытия в этой зоне представим его заполненным непрерывно расположенными излучателями Гюйгенса, амплитуда, фаза и направление токов которых одинаковы. Таким образом, для расчета функции направленности системы идентичных и одинаково

ориентированных излучателей необходимо функцию направленности одного излучателя $E_r(\theta_H)$ умножить на функцию направленности системы излучателей $E_{cr}(\theta_H)$, рассматриваемых как ненаправленные [9]. Таким образом, напряженность поля раскрытия в плоскости вектора \vec{H} найдем из выражения

$$E_E(\theta_H) = E_r(\theta_H) E_{cr}(\theta_H), \quad (1)$$

$$\text{где } E_{cr}(\theta_H) = E_y(\rho, \phi) = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \exp\left[-i \frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right]$$

С учётом обратного преобразования Фурье от амплитудно-фазового распределения в раскрытии рассматриваемого рупора, соотношение (1) примет вид

$$E_E(\theta_H) = E_r(\theta_H) \times \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b_p/2}^{b_p/2} E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \exp\left(-i \frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right) \exp(ikx \sin \theta_H) dx dy = E_0 E_r(\theta_H) \int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \exp(ikx \sin \theta_H) dx \int_{-b_p/2}^{b_p/2} \exp\left(-i \frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right) dy. \quad (2)$$

Опуская промежуточные выкладки и учитывая, что $\cos(u) = (e^{iu} + e^{-iu})/2$, $\sin(u) = (e^{iu} - e^{-iu})/2i$ [10], запишем выражение (2) в виде

$$E_E(\theta_H) = E_0 E_r(\theta_H) K_2 \frac{2a}{\pi} \frac{\cos\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta_H\right)}{1 - \left(\frac{2a}{\lambda} \sin \theta_H\right)^2}, \quad (3)$$

$$\text{где } K_2 = \int_{-b_p/2}^{b_p/2} \exp\left(-i \frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right) dy. \text{ Этот интеграл в слу-}$$

чае рассматриваемого нами сечения xOz ($y=0$) равен b_p . В направлении, перпендикулярном к раскрытию

рупорного излучателя ($\theta_E = 0^\circ$) $E_E^{\max}(0^\circ) = E_0 \frac{2a}{\pi} b_p$,

$E_r(0^\circ) = 1$. После нормировки

($F_E(\theta_H) = E_E(\theta_H) / E_E^{\max}(0^\circ)$) запишем в окончательном виде выражение, определяющее ДН E-секториального рупора в плоскости xOz (рис. 1).

$$F_E(\theta_H) = \left| E_E(\theta_H) / E_E^{\max}(0^\circ) \right| = \left| F_r(\theta_H) \frac{\cos\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta_H\right)}{1 - \left(\frac{2a}{\lambda} \sin \theta_H\right)^2} \right|, \quad (4)$$

где $F_r(\theta_H) = E_r(\theta_H) / E_r(0^\circ) = (1 + \cos \theta_H) / 2$ - нормированная ДН одиночного излучателя Гюйгенса в дальней зоне [9].

Соотношение, определяющее ДН E-секториального рупора в плоскости yOz , имеет вид

$$F_E(\theta_E) = \left| E_E(\theta_E) / E_E^{\max}(0^\circ) \right|. \quad (5)$$

Для анализа ДН Е-секториального рупора в плоскости yOz запишем выражение, определяющее напряженность электрического поля раскрыва в дальней зоне в плоскости вектора \vec{E}

$$E_E(\theta_E) = E_r(\theta_E) \times \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b_p/2}^{b_p/2} E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \exp\left(-i\frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right) \exp(iky \sin \theta_E) dx dy = E_0 E_r(\theta_E) \int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) dx \int_{-b_p/2}^{b_p/2} \exp\left(-i\frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right) \exp(iky \sin \theta_E) dy \quad (6)$$

При анализе выражения (6) рассмотрим второй интеграл, который запишем в следующем виде

$$E_E^{(2)}(\theta_E) = \int_{-b_p/2}^{b_p/2} \exp\left(-i\frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right) \exp(iky \sin \theta_E) dx = \int_{-b_p/2}^{b_p/2} \exp\left(-i\pi\left(\frac{y^2}{\lambda R_E} - \frac{2}{\lambda} y \sin \theta_E\right)\right) dx \quad (7)$$

В результате преобразования показателя степени экспоненты в выражении (7) было получено уравнение (8)

$$-i\pi\left(\frac{y^2}{\lambda R_E} - \frac{2}{\lambda} y \sin \theta_E\right) = -\frac{i\pi}{2} \left\{ \left[\frac{y\sqrt{2}}{\sqrt{\lambda R_E}} - \frac{\sqrt{2R_E}}{\sqrt{\lambda}} \sin \theta_E \right]^2 - \frac{2R_E}{\lambda} (\sin \theta_E)^2 \right\} \quad (8)$$

После введения новой переменной $u = \left[\frac{y\sqrt{2}}{\sqrt{\lambda R_E}} - \frac{\sqrt{2R_E}}{\sqrt{\lambda}} \sin \theta_E \right]$ выражение (8) принимает вид

$$E_E^{(2)}(\theta_E) = M \int_{-V_2}^{V_1} \exp\left(-i\frac{\pi}{2} u^2\right) du, \quad (9)$$

где, $V_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{b_p}{\sqrt{\lambda R_E}} - 2\sqrt{\frac{R_E}{\lambda}} \sin \theta_E \right],$

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{b_p}{\sqrt{\lambda R_E}} + 2\sqrt{\frac{R_E}{\lambda}} \sin \theta_E \right].$$

На основании определения [10]

$$\int_{-a}^0 f(x) dx = \int_0^a f(-x) dx, \quad (10)$$

выражение (9) принимает вид

$$E_E^{(2)}(\theta_E) = M \left[\int_0^{V_1} \exp\left(-i\frac{\pi}{2} u^2\right) du + \int_0^{V_2} \exp\left(-i\frac{\pi}{2} u^2\right) du \right] \quad (11)$$

Первый и второй интегралы, входящие в (11), с учётом с учетом формулы Эйлера [10] запишутся в следующем виде:

$$\int_0^{V_1} \exp\left(-i\frac{\pi}{2} u^2\right) du = \int_0^{V_1} \cos\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du - i \int_0^{V_1} \sin\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du \quad (12)$$

$$\int_0^{V_2} \exp\left(-i\frac{\pi}{2} u^2\right) du = \int_0^{V_2} \cos\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du - i \int_0^{V_2} \sin\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du \quad (13)$$

Интегралы, входящие в соотношения (12) и (13), называются интегралами Френеля и будут определяться выражениями [11]

$$C\left(\frac{\pi}{2} z^2\right) = \int_0^z \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt, \quad S\left(\frac{\pi}{2} z^2\right) = \int_0^z \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt \quad (14)$$

С учетом соотношений (12)-(14) выражение (11) запишется в следующем виде

$$E_E^{(2)}(\theta_E) = M \left\{ \left[C\left(\frac{\pi}{2} V_1^2\right) + C\left(\frac{\pi}{2} V_2^2\right) \right] - i \left[S\left(\frac{\pi}{2} V_1^2\right) + S\left(\frac{\pi}{2} V_2^2\right) \right] \right\} \quad (15)$$

При рассмотрении первого интеграла, входящего в выражение (6), было установлено, что он определяется равенством

$$E_E^{(1)}(\theta_E) = \int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) dx = 2 \int_0^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) dx = \frac{2a}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos g dg = \frac{2a}{\pi} \quad (16)$$

На основании полученных выражений (15) и (16), определяющих интегралы, входящие в выражение (6), запишем последнее в виде

$$E_E(\theta_E) = E_0 E_r(\theta_E) \frac{2a}{\pi} \left\{ M \left[\left[C\left(\frac{\pi}{2} V_1^2\right) + C\left(\frac{\pi}{2} V_2^2\right) \right] - i \left[S\left(\frac{\pi}{2} V_1^2\right) + S\left(\frac{\pi}{2} V_2^2\right) \right] \right] \right\} \quad (17)$$

Напряжённость поля, в направлении перпендикулярном к раскрыву рупорного излучателя, будет определяться выражением

$$E_E^{\max}(0^\circ) = E_0 E_r(0^\circ) \frac{2a}{\pi} \int_{-b_p/2}^{b_p/2} \exp\left(-i\frac{\pi y^2}{\lambda R_E}\right) dy \quad (18)$$

После введения новой переменной $p = \frac{y\sqrt{2}}{\sqrt{\lambda R_E}}$

выражение (18) примет вид

$$E_E^{\max}(0^\circ) = E_0 E_r(0^\circ) \frac{2a}{\pi} N \int_{-W}^W \exp\left(-i\frac{\pi}{2} u^2\right) du = E_0 E_r(0^\circ) \frac{4a}{\pi} N \int_0^W \exp\left(-i\frac{\pi}{2} u^2\right) du \quad (19)$$

где $N = \frac{\sqrt{\lambda R_E}}{\sqrt{2}}, \quad W = \frac{b}{\sqrt{2\lambda R_E}}.$

Интеграл в выражении (19), с учетом формулы Эйлера [10], примет вид

$$\int_0^W \exp\left(-i\frac{\pi}{2}u^2\right) du = \int_0^W \cos\left(\frac{\pi}{2}u^2\right) du - i \int_0^W \sin\left(\frac{\pi}{2}u^2\right) du. \quad (20)$$

Интегралы, входящие в соотношение (20), как было показано выше, называются интегралами Френеля. Они определяются соотношением (14). Теперь запишем в окончательном виде выражение (18)

$$E_E^{\max}(0^\circ) = E_0 E_\Gamma(0^\circ) \frac{4a}{\pi} N \left[C\left(\frac{\pi}{2}W^2\right) - iS\left(\frac{\pi}{2}W^2\right) \right]. \quad (21)$$

При $\theta_E = 0^\circ$ $E_\Gamma(0^\circ) = 1$, а $F_\Gamma(\theta_E) = E_\Gamma(\theta_E) / E_\Gamma(0^\circ) = (1 + \cos\theta_E) / 2$ - нормированная ДН одиночного излучателя Гюйгенса в дальней зоне. Теперь с учетом (17) и (21) запишем выражение (5), определяющее ДН E-секториального рупора в плоскости yOz (см. рис.1).

$$F_E(\theta_E) = \frac{(1 + \cos\theta_E)}{4} \frac{\left\{ M \left[\left[C\left(\frac{\pi}{2}V_1^2\right) + C\left(\frac{\pi}{2}V_2^2\right) \right] - i \left[S\left(\frac{\pi}{2}V_1^2\right) + S\left(\frac{\pi}{2}V_2^2\right) \right] \right\}}{N \left[C\left(\frac{\pi}{2}W^2\right) - iS\left(\frac{\pi}{2}W^2\right) \right]}. \quad (22)$$

Численный анализ полученных выражений (4,22) показал, что для угнетения репродуктивной способности колорадского жука необходимо применять секториальную рупорную антенну с параметрами: поперечные размеры 40x11мм; длина рупора 40мм; ширина диаграммы направленности по уровню -8дБ в плоскости xOz 800мм; коэффициент отражения от раскрыва антенны не должен превышать величины 310⁻⁴.

Выводы. Полученные выражения (4) и (22) позволяют построить диаграммы направленности для различных параметров E - секториальной антенны.

Список литературы: 1. Hare, J. D. Ecology and management of the Colorado potato beetle [Text] / J. D. Hare // Ann. Rev. Entomol. - 1990. - Palo. 35. - P.81-100. 2. Григорьев, И. В. Опыт борьбы с особо опас-

ными вредителями [Текст] / И. В. Григорьев // Защита и карантин растений. - 2004. - №1. - С. 12-14. 3. Козак, А. В. Применение ЭМП для уничтожения в почве биологических вредителей корневой системы растений [Текст] / А. В. Козак // Вестник Национального технического университета «ХПИ». - 2012. - №14. - С. 13-15. 4. Giri, D. V. Design, Fabrication, and Testing of a Parabolic Reflector Antenna and Pulse System for impulse like Waveforms [Text] / D. V. Giri, H. Lackner, I. D. Smith, D. W. Morton, C. E. Baum, J. R. Marek // IEEE Trans. Plasma Sci. - 1997. - V. 25, № 2. - P. 318-326. 5. Воскресенский, Д. И. Устройства СВЧ и антенны [Текст] / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев // Под ред. Д. И. Воскресенского. - М.: Радиотехника, 2006. - 376 с. 6. Farr, E. G. Impulse radiating antennas [Text] / E. G. Farr, C. E. Baum // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics / Ed. by H. L. Bertoni, L. Karin, and L.B. Felsen.- New York: Plenum Press, 1993. - P. 139-147. 7. Хала, А. В. Алгоритм расчета сверхширокополосной антенны [Текст] / А. В. Хала, А. В. Корольков // Математическая морфология. Электрон. Математический и медико-биологический журнал. - 2010. - Т.9. - Вып. 1. URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/TITL.HTM>. 8. Есютин, Л. С. Элементы антенно-волноводных устройств [Текст] / Л. С. Есютин. - М.: Изд-во МГУ, 1964. - 104 с. 9. Шубарин, Ю. В. Антенны сверхвысоких частот [Текст] / Ю. В. Шубарин. - Харьков: Изд-во ХГУ, 1960. - 284 с. 10. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. - М.: Наука, 1986. - 544 с. 11. Янке, Е. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы): пер. с нем. под ред. Л. И. Седова [Текст] / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. - М.: Наука, 1964. - 344 с.

Bibliography (transliterated): 1. Hare, J. D. (1990). Ecology and management of the Colorado potato beetle. Ann. Rev. Entomol. 35, 81-100. 2. Grigorev, I. V. (2004). Experience in fighting against dangerous pests. Protection and Quarantine of Plants, 1, 12-14. 3. Kozak, A. V. (2012). Application of EMF for killing biological pests in the root system in the soil. Journal of National Technical University "KhPI", 14, 13-15. 4. Giri, D. V., Lackner, H., Smith, I. D., Morton, D. W., Baum, C. E., Marek, J. R. (1997). Design, Fabrication, and Testing of a Parabolic Reflector Antenna and Pulse System for impulse like Waveforms. IEEE Trans. Plasma Sci, 25, № 2, 318-326. 5. Voskresensky, D. I., Gostyukhin, V. L., Maksimov, V. M., Ponomarev, L. I. (2006). Microwave devices and antennas. Ed. DI Resurrection. Moscow: Radio Engineering, 376. 6. Farr, E. G., Baum, C. E. (1993). Impulse radiating antennas. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics. Ed. by H.L. Bertoni, L. Karin, and L.B. Felsen.- New York: Plenum Press, 139-147. 7. Hala, A. V., Korolkov, A. V. (2010). Algorithm for calculating UWB antenna. Mathematical morphology. Electron. Mathematical and biomedical journal, T. 9, Iss. 1. 8. Esyutin, L. S. (1964). Elements of the antenna waveguide devices. Moscow: MGU, 104. 9. Shubarin, J. V. (1960). Microwave antennas. Kharkov: Publishing House of the KSU, 284. 10. Bronstein, I. N., Semendyaev, K. A. (1986). Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges. Moscow: Nauka, 544. 11. Jahnke, E., Emde, F. Lesh, F. (1964). Special functions (formulas, graphs, tables). Moscow: Nauka, 344

Поступила (received) 07.06.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сили Иван Иванович – аспирант, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, кафедра «Технотроники и теоретической электротехники»; e-mail: tte_mnekt@ukr.net.

Сілі Іван Іванович – аспірант, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, кафедра «Технотроніки і теоретичної електротехніки»; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.

Sealy Ivan – postgraduate student, P. Vasilenko Kharkiv national technical University of agriculture named after, Department Technotronic and theoretical electrical engineering; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.