

С.В. АДАМОВА, ас., Таврический государственный агротехнологический университет, Мелітополь

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ВРЕДИТЕЛЯМИ ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР

Отримано інтегральне рівняння для розрахунків електромагнітного поля усереднені біологічних об'єктів.

Получено интегральное уравнение для расчетов электромагнитного поля внутри биологических объектов.

Постановка проблемы. В полноценном пищевом рационе человека важное место занимают фрукты. При этом садоводство занимает важное место среди отраслей сельского хозяйства Украины. Площадь плодово-ягодных насаждений в стране составляет свыше 1,1 млн. га. В связи с развитием интенсивного садоводства возрастают требования к защите растений от вредителей и болезней [1].

В настоящее время в садах Украины для уничтожения вредных насекомых применяют в основном только химические средства. Химическим средствам присущи существенные недостатки: обеднение биоценозов, появление устойчивых к пестицидам вредителей, накопление в плодах остаточного количества химических препаратов [2]. Научные исследования последних лет показывают, что альтернативой химическому методу может быть электрофизический, с применением мобильных агрегатов для уничтожения насекомых-вредителей.

Эффективность мобильных агрегатов может быть осуществлена с применением в поражающем устройстве импульсного электрического поля. В качестве одного из основных механизмов угнетающего действия ЭМИ на насекомых-вредителей используется концепция ведущей роли биологических мембран в реакциях биологических систем на электромагнитное поле [3]. В тоже время отсутствие теоретических методов анализа взаимодействия импульсных ЭМП с насекомыми затрудняет создание эффективных мобильных электрофизических установок для уничтожения насекомых-вредителей урожая плодовых культур.

Анализ предшествующих исследований. По данным литературных источников [4, 5] электромагнитная энергия давно нашла применение для дезинфекции зерна, обеззараживания комбикормов, сте-

рилизации тары, инструментов, одежды. Однако следует отметить, что результаты полученные в этих работах не могут быть использованы для создания эффективных импульсных электрофизических установках для уничтожения насекомых-вредителей в садах.

Цель работы – анализ процесса взаимодействия импульсного электромагнитного излучения с летающими насекомыми-вредителями в садах и получение интегрального уравнения для расчетов распределения электромагнитного поля внутри биологического объекта.

Основная часть. Применение импульсных электромагнитных полей для уничтожения насекомых-вредителей в садах сопровождается нагревом тканей организма вредителя, пробоем мембран биологических клеток. С точки зрения электродинамики все задачи подобного типа сводятся к задачам дифракции электромагнитного поля на диэлектрических телах разной формы.

В качестве модели, летающие насекомые представим цилиндром с размером R и высотой H , который заполнен однородной изотопной средой с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и магнитной проницаемостью μ_0 . Этот цилиндр находится в однородной изотропной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 и магнитной проницаемостью μ_0 .

В качестве источника электромагнитных импульсов выбрана плотность электрического тока, локализованная в среде окружающей биологический объект и имеющая вид

$$\vec{j}(p, p_0, t) = A(t) \delta(p - p_0) \vec{e}, \quad (1)$$

где p и p_0 – соответственно точка наблюдения и точка локализации источника; $\delta(p - p_0)$ – дельта функция Дирака; \vec{e} – единичный вектор; $A(t)$ – амплитуда плотности тока зависящая от времени по закону

$$A(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{i \frac{2\pi n}{T} t}, \quad (2)$$

где T – период повторения импульсов, а коэффициенты A_n зависят от формы и длительности импульса. В дальнейшем будем рассматривать случай видеоимпульсов прямоугольной формы. Тогда для коэффициентов A_n легко получить следующее представление [6]:

$$A_0 = \frac{U\tau}{T}; \quad A_n = \frac{U e^{-i\pi n\tau/T} \sin\left(\frac{\pi n\tau}{T}\right)}{\pi n\tau}, \quad (3)$$

где U и τ соответственно амплитуда и длительность прямоугольного

импульса.

Таким образом, для заданного источника (1), (2) электромагнитных импульсов требуется определить электромагнитное поле как внутри биологического объекта, так и во внешнем пространстве.

Эти поля должны удовлетворять системе уравнений Максвелла.

Действительно, представим искомые электромагнитные поля внутри и вне биологического объекта в виде рядов Фурье типа (2):

$$\vec{E}_1 = \sum \vec{E}_{1n} e^{i\frac{2\pi}{T}nt}, \quad \vec{H}_1 = \sum \vec{H}_{1n} e^{i\frac{2\pi}{T}t}, \quad (4)$$

$$\vec{E}_2 = \sum \vec{E}_{2n} e^{i\frac{2\pi}{T}nt}, \quad \vec{H}_2 = \sum \vec{H}_{2n} e^{i\frac{2\pi}{T}t}, \quad (5)$$

где коэффициенты \vec{E}_{1n} , \vec{H}_{1n} , \vec{E}_{2n} , \vec{H}_{2n} не зависят от времени.

Подставляя (4), (5) в уравнения Максвелла и используя теорему единственности для рядов Фурье [7], получаем:

$$\text{rot } \vec{H}_{1n} = ik_n \varepsilon_{1r} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \vec{E}_{1n}; \quad (6)$$

$$\text{rot } \vec{E}_{1n} = -ik_n \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \vec{H}_{1n};$$

$$\text{rot } \vec{H}_{2n} = ik_n \varepsilon_{2r} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \vec{E}_{2n} + A_n \delta(p - p_0) \vec{e}; \quad (7)$$

$$\text{rot } \vec{E}_{2n} = -ik_n \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \vec{H}_{2n},$$

где $k_n = \omega_n \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ε_{2r} – относительная диэлектрическая проницаемость среды окружающей биологический объект; ε_{1r} – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость биологического объекта.

Уравнения (6) и (7) представим в виде:

$$\text{rot } \vec{H}_n = ik_n \varepsilon_{2r} \vec{E}_n + \vec{j}_n; \quad (8)$$

$$\text{rot } \vec{E}_n = -ik_n \vec{H}_n, \quad (9)$$

$$\text{где } \vec{E}_n = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \begin{cases} \vec{E}_{1n}, & p \in Q; \\ \vec{E}_{2n}, & p \notin Q; \end{cases} \quad (10)$$

$$\bar{H}_n = \begin{cases} \bar{H}_{1n}, & p \in Q; \\ \bar{H}_{2n}, & p \notin Q; \end{cases} \quad (11)$$

$$\bar{j}_n = \begin{cases} ik_n (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \bar{i} \bar{J}_{1n}, & p \in Q; \\ A_n \delta(p - p_0), & p \notin Q, \end{cases} \quad (12)$$

Q – область пространства, которую занимает биологический объект.

Решение уравнений (9), (10), удовлетворяющее условию излучения, можно представить с помощью векторной потенциальной функции $\bar{\Pi}$ по известным формулам [8]:

$$\bar{\Pi}(p) = \int \bar{j}(q) G(|p - q|) dV_q; \quad (13)$$

$$\bar{E}_n = \frac{1}{ik_n \epsilon_{2r}} \text{grad div } \bar{P} - ik_n \bar{P}; \quad (14)$$

$$\bar{H}_n = \text{rot } \bar{\Pi}. \quad (15)$$

В (13) функция $G(|p - q|)$ – функция Грина для трехмерного скалярного уравнения Гельмгольца

$$G(|p - q|) = \frac{\exp(-ik_n \sqrt{\epsilon_{2r}} |p - q|)}{4\pi |p - q|}, \quad (16)$$

где $|p - q|$ – расстояние между точками p и q .

Подставим (13) в (14) тогда получим следующее интегральное представление для \bar{E}_n :

$$\begin{aligned} \bar{E}_n(p) = & k_n^2 (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \int_Q \bar{E}_{1n}(q) G(|p - q|) dV_q + \\ & + (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \text{grad div} \int_Q \bar{E}_{1n}(q) G(|p - q|) dV_q + \bar{E}_n^0. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{Здесь} \quad \bar{E}_n^0 = -ik_n \bar{P}_n^0 + \frac{1}{ik_n \epsilon_{2r}} \text{grad div } \bar{P}_n^0, \quad (18)$$

где $\bar{\Pi}_n^0 = G(|p - q|) A_n \bar{e}$; \bar{E}_n^0 – поле возбуждаемое плотностью

тока $\vec{j} = A_n \delta(p - p_0) \vec{e}$ в свободном пространстве, т.е. когда биологический объект отсутствует.

Далее, если в (17) считать, что точка $p \in Q$, то из (10) имеем:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{1n}(p) = & k_n^2 (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \int_Q \vec{E}_{1n}(q) G(|p - q|) dV_q + \\ & + (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \text{grad div} \int_Q \vec{E}_{1n}(q) G(|p - q|) dV_q + \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \vec{E}_n^0. \end{aligned} \quad (19)$$

Легко видеть, что соотношение (19) является интегродифференциальным уравнением относительно напряженности электрического поля $\vec{E}_{1n}(p)$ внутри биологического объекта Q . Если точка $p \notin Q$, то при известном поле $\vec{E}_{1n}(p)$ соотношение (17) позволяет рассчитать электрическое поле вне биологического объекта. Магнитное поле так же легко определить, если известно электрическое поле внутри биологического объекта. Из (18) и (15) получаем:

$$\vec{H}_n(p) = ik_n (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \text{rot} \int_Q \vec{E}_{1n}(q) G(|p - q|) dV_q. \quad (20)$$

Таким образом, исходная задача дифракции (8), (9) сведена к интегродифференциальному уравнению (19). Отметим, что определение $\vec{E}_{1n}(p)$ является сложной вычислительной задачей, поскольку (19) представляет собой трехмерное интегродифференциальное уравнение. Непосредственная дискретизация, т.е. замена интегралов квадратурными формулами приближенного интегрирования и замена дифференциальной операции (*grad div*) конечными разностями приводит (19) к системе линейных алгебраических уравнений большой размерности.

Тогда уравнение (19) преобразуется к следующему виду

$$\begin{aligned} \vec{E}_{1n}(p) = & k_n^2 (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \int_Q \vec{E}_{1n}(q) G(|p - q|) dV_q - \\ & - (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \int_{\partial Q} (\vec{E}_{1n}(q), \vec{n}(q)) \text{grad}_q G(|p - q|) ds_q + \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \vec{E}_n^0. \end{aligned} \quad (21)$$

Уравнение (21) и является искомым интегральным уравнением для электромагнитного поля внутри биологического объекта. Опреде-

лив из (21) $\bar{E}_{1n}(p)$ можно рассчитать магнитное поле. Действительно воспользуемся формулой (20) получаем:

$$\bar{E}_n(p) = ik_n (\bar{\epsilon}_{1r} - \epsilon_{2r}) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \operatorname{rot} \int_Q \bar{E}_{1n}(q) G(|p-q|) dV_q. \quad (22)$$

Выводы. Предложена модель биологического объекта – насекомого-вредителя, в виде цилиндра и получено интегральное уравнение для расчетов электромагнитного поля внутри него.

Список литературы: 1. *Поспелов С.М.* Защита растений / С.М. Поспелов, Н.Г. Бермин, Е.Д. Васильева. – М.: Агропромиздат, 1986. – 392 с. 2. *Приставка В.Л.* Привлекающие ловушки в защите растений от вредных насекомых / В.Л. Приставка. – М.: ВНИИТЭИСХ, 1974. – 43 с. 3. *Пиротти Е.Л.* Изменение мембранного потенциала клеток биологических объектов находящихся во внешних электромагнитных полях / Е.Л. Пиротти, А.Д. Черенков // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХПГУ. – 2000. – Вып. 92. – С. 96-99. 4. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы: [38 науч. праць / Ред. акад. МАИ Калинин А.Г.]. – Одесса-Киев: ТЕС, 2000. – 192 с. 5. *Десятков Н.Д.* Применение низкоинтенсивных электромагнитных волн в медицине и биологии / Н.Д. Десятков, Ю.А. Арзарманов, О.В. Бецкий, Н.Н. Лебедев – М.: ИРЭ РАН. – 1995. – С. 8-14. 6. *Белицкий Б.Н.* Излучение действия СВЧ-поля на микроорганизмы в импульсном и непрерывном режимах / Б.Н. Белицкий, А.И. Педенко, И.В. Лерика // Биофизика. – 1982. – Т. 27. – Вып. 5. – С. 923-933. 7. *Эдвардс Р.* Ряды Фурье в современном изложении: в 2-х т. / Р. Эдвардс – М.: Мир. 1985. – Т. 1. – 264 с. 8. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 345 с.

Поступила в редколлегию 10.12.2009