

# ВПЛИВ ЕМП ТА ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

УДК 632.935.4

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НА НАСЕКОМЫХ-ВРЕДИТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, НАХОДЯЩИХСЯ В ПОЧВЕ

Косулина Н. Г.<sup>1</sup>, Козак А. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

<sup>2</sup>Подольский государственный аграрно-технический университет

В данной статье решается начально-краевая задача для системы уравнений Максвелла, моделирующая процесс воздействия последовательности электромагнитных импульсов на вредителей (например, личинки майского жука), находящихся в почве. С помощью преобразования Лапласа исходная нестационарная задача сводится к задаче дифракции электромагнитных волн на области, содержащей биологические вредители, которые моделируются изотропной однородной средой с комплексной диэлектрической проницаемостью. Задача дифракции решается методом объемных интегральных уравнений в борновском приближении. В результате получено выражение для напряженности электрического поля усредненного по области, содержащей биологические вредители.

**Постановка проблемы.** С развитием интенсивного садоводства возрастают требования по защите корневой системы плодовых культур от насекомых-вредителей, так как корневая система влияет на качество и количество урожая. Среди сельскохозяйственных вредителей большую группу составляют почвенные насекомые (личинки хрущей, шелконов, чернотелок и др.), повреждающие корневую систему саженцев плодовых культур. Самыми опасными для корневой системы являются хрущи. В настоящее время в садах Украины для уничтожения почвенных насекомых применяют только химические препараты. Применение химических препаратов вызывает обеднение биоценоза, загрязнение биосферы, появление устойчивых к пестицидам вредителей, повышение плодовитости отдельных насекомых, хрущей и др.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Научные и практические исследования последних лет показывают, что альтернативой химическому методу защиты растений может быть метод на основе экологически безопасной и эффективной импульсной электромагнитной технологии. Угнетение вредителей в почве импульсным электромагнитным излучением связано не только с процессом высокой скорости нарастания температуры в объекте, но и с информационным действием электромагнитного поля на мембраны клеток насекомых.

Практические результаты показывают, что при определенных параметрах импульсного электромагнитного поля (частота следования импульсов, скважность, мощность, частота заполнения импульсов, экспозиция) может происходить разрушение клеточных мембран и гибель личинок насекомых в почве. В тоже время, проведенный анализ литературных источников показывает, что в них недостаточно изучен вопрос создания моделей, способных дать аналитическое описание процессов, происхо-

дящих в насекомых-вредителях корневой системы плодовых культур.

**Цель статьи.** Определение диапазона изменений биотропных параметров импульсного электромагнитного поля, вызывающих уничтожение насекомых-вредителей корневой системы саженцев плодовых культур на основе разработанной модели и получение математических выражений при ее анализе.

**Основной материал исследований.** После ряда преобразований авторами статьи получено интегральное уравнение относительно электрического поля в области  $D$ , содержащей биологические вредители:

$$\begin{aligned} \vec{E}^{\bar{\bar{}}} (M_0) + k_0^2 (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_1) \int_D \vec{G} (M, M_0) \vec{E}^{\bar{\bar{}}} (M) dV_M = \\ = \vec{E}^{\bar{\bar{}}} (M_0). \end{aligned}$$

В общем случае это уравнение может быть решено только численными методами с применением компьютера. Однако, если величина  $|\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_1| < 1$  мала, то для решения этого уравнения можно применить приближение Борна. Анализ имеющихся в научной литературе данных позволяет сделать вывод о том, что величина  $|\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_1|$  достаточно мала, чтобы воспользоваться приближением Борна. Тогда в первом приближении получаем:

$$\begin{aligned} \vec{E}^{\bar{\bar{}}} (M_0) = \vec{E}^{\bar{\bar{}}} (M_0) - k_0^2 (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_1) \times \\ \times \int_D \vec{G} (M, M_0) \vec{E}^{\bar{\bar{}}} (M) dV_M. \end{aligned} \quad (1)$$

Из (1) имеем:

$$\bar{E}_x(M_0) = \bar{E}_{x_2} - k_0^2(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1) \int_D G_{xx} \bar{E}_{x_2}(M) dV ;$$

$$\bar{E}_y(M_0) = -k_0^2(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1) \int_D G_{yx} \bar{E}_{x_2} ; \quad (2)$$

$$\bar{E}_z(M_0) = -k_0^2(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1) \int_D G_{zx} \bar{E}_{x_2} dV .$$

Как следует из (2), доминирующей компонентой электрического поля является  $\bar{E}_x$ . Поэтому в дальнейшем ограничимся вычислением именно этой компоненты. Выберем для определенности в качестве области  $D$ , содержащей биологические вредители куб со стороной  $d$  и расположенной на глубине  $h_1$  от границы раздела воздух – почва. Пусть этот куб задается неравенствами:

$$-\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2} ; -\frac{d}{2} \leq y \leq \frac{d}{2} ; \quad (3)$$

$$-h_1 - d \leq z \leq -h_1 .$$

Тогда для компоненты  $\bar{E}_x$  имеем следующее представление:

$$\bar{E}_x = \bar{E}_{x_2} - k_0^2(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1) \times$$

$$\times \int_{-d-h_1}^{-h_1} \bar{E}_{x_2} dz \int_{-d/2}^{d/2} dx \int_{-d/2}^{d/2} G_{xx} dy . \quad (4)$$

В (4) учтено, что возбуждающее поле  $\bar{E}_{x_2}$  зависит только от переменной  $z$ . Подставляя в (4) выражение для  $\bar{E}_{x_2}$  получаем:

$$\bar{E}_x(x_0, y_0, z_0) =$$

$$= B \left[ e^{\gamma_1 z_0} - k_0^2(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1) \int_{-d-h_1}^{-h_1} e^{\gamma_1 z} dz \int_{-d/2}^{d/2} dx \int_{-d/2}^{d/2} G_{xx} dy \right] , \quad (5)$$

$$\text{где } \gamma_2 = -i k_0 \sqrt{\varepsilon + i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} ;$$

$$B = i \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \times$$

$$\times I \frac{(1 - e^{i\omega\tau})(16\pi^2 f^2 - 2\omega^2)}{2\omega(1 - e^{i\omega T})(16\pi^2 f^2 - \omega^2)} e^{-\gamma_1 h} ; \quad (6)$$

$$G_{xx} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{e^{-ikR}}{R} + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{e^{-ikR}}{R} \right) \right] ;$$

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} ,$$

$(x_0, y_0, z_0)$  – точка, в которой вычисляется поле  $\bar{E}_x$ .

С помощью (5), (6) и обратного преобразования Лапласа, получаем следующее выражение для расчета напряженности электрического поля в области, содержащей биологических вредителей:

$$E_x = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} E_x e^{ipt} dp , \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{E}_x = B \left[ e^{\gamma_1 z_0} - k_0^2(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1) G \right] ,$$

$$G = G_1 + G_2 .$$

$$G_1 = -\frac{1}{4\pi k^2} \int_{-h_1-d_1}^{-h_1} e^{\gamma_2 z} dz \times$$

$$\times \int_{-d/2}^{d/2} \left[ \frac{e^{ikR_+}(d/2 - x_0)(1 + ikR_+)}{R_+^3} - \frac{e^{-ikR_-}(d/2 + x_0)(1 + ikR_-)}{R_-^3} \right] dy .$$

$$G_2 = \frac{1}{4\pi} \int_{-h_1-d_1}^{-h_1} dz \int_{-d/2}^{d/2} dx \int_{-d/2}^{d/2} \frac{e^{-ikR}}{R} dy ;$$

$$R_{\pm} = \sqrt{\pm(d/2 - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} ;$$

$$\gamma_1 = -ik_0 \sqrt{\varepsilon + i \frac{\sigma}{p\varepsilon_0}} ; k = k_0 \sqrt{\bar{\varepsilon}} ; k_0 = p \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} ;$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon + \frac{\sigma}{p\varepsilon_0} ; \bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 + \frac{\sigma_1}{p\varepsilon_0} ,$$

где  $h$  – расстояние от антенны до границы раздела воздух-почва,

$h_1$  – глубина, на которой расположены биологические вредители.

В дальнейшем вместо величины  $E_x$  (7) введем усредненную характеристику напряженности ЭП, а именно:

$$E_x^{cp} = \frac{1}{\tau V} \int_{t_0}^{t_0+\tau} dt \int_D dV , \quad (8)$$

где  $t_0 = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} h + \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} h_1$  – время, за которое импульс доходит до области  $D$ , содержащей биологических вредителей;

$\tau$  – длительность импульса;

$V$  – объем области  $D$ .

С помощью (8) были проведены численные расчеты по определению оптимальных параметров ЭМ импульсного сигнала, при которых среднее значение напряженности электрического поля достигает максимального значения. Исследовалась зависимость  $E_x^{cp}$  от скважности импульса  $Q = T/\tau$ . Предполагалось, что длительность импульса  $\tau = 100$  нс. Величи-

на  $E_x^{cp}$  нормировалась на  $E_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I$ , где  $I$  – амплитуда импульса тока.

Кроме того, предполагалось, что расстояние от излучаемой антенны (плоскость раскрыва) до поверхности почвы ( $h$  изменялось в пределах  $h = 2,0 \dots 2,5$  м, а глубина, на которой располагались биологические вредители  $h_1 = 0,15 \dots 0,2$  м.

На рис. 1 представлены результаты проведенных расчетов для различных типов почв: сухая почва –  $\varepsilon = 2,6 + 3i$ ; влажная почва –  $\varepsilon = 19 + 6i$ ; оттаявшая почва –  $\varepsilon = 24 + 8i$ ; почва с рыхлосвязанной водой –  $\varepsilon = 22 + 10,3i$ .

Как следует из анализа результатов оптимальное значение скважности  $Q = T/\tau$  ЭМ импульса соответствует значению  $Q = 200$ . При этом значении скважности реализуется максимум среднего значения напряженности электрического поля в области, содержащей биологические вредители.

Исследуем теперь зависимость среднего значения напряженности электрического поля от частоты  $f$  заполнения радиоимпульса (8). Будем предполагать, что область  $D$ , по которой производится усреднение электрического поля, совпадает с областью заполненной одним биологическим вредителем.

Предполагается также, что диэлектрическая проницаемость почвы  $\varepsilon = 2,6 + 3i$  (сухая почва), а биологический вредитель находится на глубине  $h_1 = 0,15 \dots 0,2$  м.

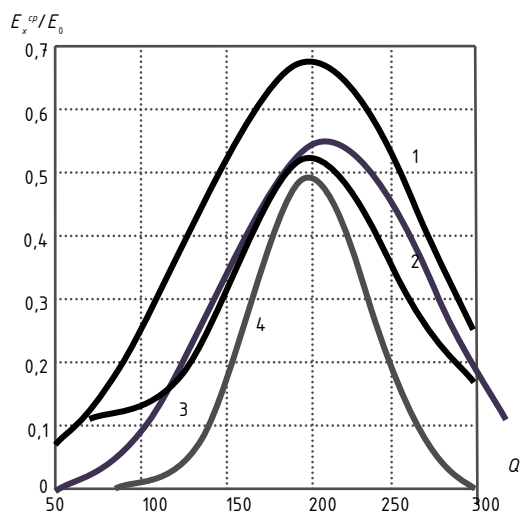


Рисунок 1 – Зависимости среднего значения напряженности электрического поля в области, содержащей биологические вредители, от скважности импульса: 1 – сухая почва; 2 – влажная почва; 3 – оттаявшая почва; 4 – почва с рыхлосвязанной водой.

Скважность электромагнитного импульса  $Q = 200$ , а его длительность –  $\tau = 100$  нс. Частота заполнения импульса изменялась в пределах  $f = 2 \dots 20$  ГГц.

Высота расположения антенны такая же, как при расчетах электрического поля при изменении скважности. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Как видно, для биологических вредителей (личинки хруща разного возраста) различных геометрических размеров оптимальное значение частоты заполнения радиоимпульса составляет  $f_1 = 10$  ГГц. При этой величине частоты среднее значение напряженности электрического поля принимает максимальное значение в области нахождения биологического вредителя.

Разработка метода уничтожения насекомых-вредителей корневой системы плодовых культур импульсным электромагнитным полем связана с разрушением клеточных мембран насекомых за счет наведенного потенциала на мембранах [1, 2].

Наиболее признанным в настоящее время является механизм разрушения мембран, обусловленный дефектами типа сквозной поры [1]. Обычно процесс разрушения мембран связывают с достижением параметрами системы некоторых критических значений, после чего процесс отклонения становится необратимым и наступает разрушение мембран. Отклонение мембран от равновесия можно связать с возникновением дефектов в структуре мембран за счёт локального сжатия в продольном или поперечном направлении. Уменьшение толщины мембраны носит резко выраженный локальный характер, что следует рассматривать как начальный этап формирования локального углубления [1, 2].

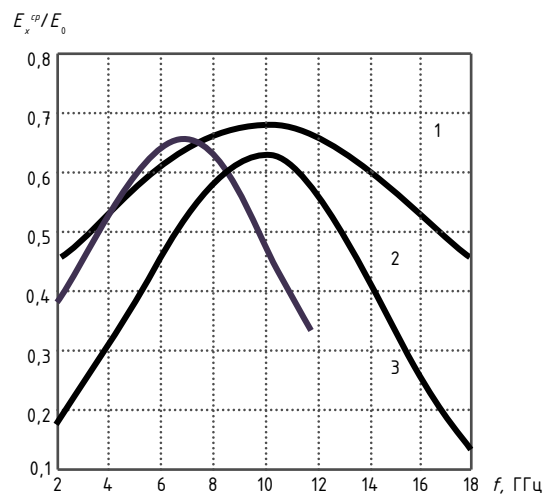


Рисунок 2 – Зависимость среднего значения напряженности электрического поля в области, содержащей биологического вредителя, от частоты заполнения радиоимпульса: 1 – личинка хруща первого возраста; 2 – личинка хруща второго возраста; 3 – личинка хруща третьего возраста

Величина потенциала для разрушения мембран клеток насекомых может быть определена из выражения [1].

$$\varphi > \varphi_{кр} = \sqrt{0,376 E_{np} \frac{d^2}{\varepsilon_m \cdot \varepsilon_0}}, \quad (9)$$

где  $E_{np}$  – модуль упругости мембраны;

$d$  – толщина мембраны;

$\varepsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость мембраны.

Время облучения и напряжённость электромагнитного поля для уничтожения насекомых-вредителей корневой системы плодовых культур определим из выражения для наведенного потенциала на мембране клеток насекомых [2]:

$$\varphi = \varphi_0^2 + P \frac{C_0 V_0 q^2 C_s}{(4\pi\varepsilon\varepsilon_0 d)^2} t e^{-\frac{F\varphi_0}{kT}} + P \frac{qC_s}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 \omega} E \sin \omega t, \quad (10)$$

где  $\varphi$  – наведенный электромагнитный потенциал на мембране клетки;

$\varphi_0$  – потенциал на мембране в начальный момент времени;

$P$  – проницаемость мембран клеток;

$C_0$  – средняя концентрация ионов в клетке;

$V_0$  – средний объем клетки в начальный момент времени;

$q$  – заряд иона;

$C_s$  – концентрация ионов вне клетки;

$\varepsilon_m$  – относительная диэлектрическая проницаемость мембран;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$F$  – число Фарадея;

$R$  – газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$t$  – время экспозиции;

$\omega$  – круговая частота заполнения импульсов;

$E$  – напряженность электрической составляющей электромагнитного поля на мембране клеток насекомых.

Для расчетов были использованы многочисленные данные, взятые из литературных источников [1, 2]:

$$\varepsilon_m = 2,1; h = 10^{-8};$$

$$f = 10 \text{ ГГц};$$

$$C_s = 0,37 \text{ мк·моль}^{-1}/\text{м}^3;$$

$$g = 4 \cdot 10^{-18} \text{ Кл};$$

$$P = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$F = 96484,56 \text{ Кл/моль};$$

$$R = 8,314 \text{ Дж/К·моль};$$

$$T = 300^0 \text{ К};$$

$$\varphi_0 = 60 \text{ мВ};$$

$$\tau = 100 \text{ нс};$$

$$Q = 200.$$

При проведении численных расчетов (9) было получено, что критический потенциал на мембране составляет 110 мВ. Для выполнения условия (9) было принято, что величина наведенного потенциала на мембране клеток насекомых лежит в пределах 300 мВ.

В результате расчетов было установлено, что для наведенного потенциала в пределах 300 мВ время облучения насекомых лежит в пределах 2 с, а величина напряженности электрической составляющей электромагнитного поля равна  $7,4 \cdot 10^3$  В/м, величина источника электромагнитного импульса составляет 1492 Вт.

**Выводы.** В процессе теоретического анализа разработанной модели было установлено, что для уничтожения насекомых-вредителей в почве их сле-

дует облучать импульсным электромагнитного импульса с параметрами: длительность импульсов 100 нс; скважность импульсов 200; мощность источника излучения в импульсе не менее 1492 Вт; частота заполнения импульсов 10 ГГц; время экспозиции 1...2 с.

#### Список использованных источников

1. Велькенштейн М. В. Теория информации и биологические мембраны / В. Ф. Антонов. – М.: Мир, 1982. – 182 с.
2. Справочник по физике / [авт. Яворский Б. М., Детлаф А. А.]. – М.: Наука, 1977. – 942 с.

#### Анотація

### АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ НА КОМАХ-ШКІДНИКІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В ҐРУНТІ

Косуліна Н. Г., Козак О. В.

*У даній статті вирішується початково-краєве завдання для системи рівнянь Максвелла, що моделює процес дії послідовності електромагнітних імпульсів на біологічні шкідники (наприклад, личинки хруща), що знаходяться в ґрунті. За допомогою перетворення Лапласа вихідне нестационарне завдання зводиться до завдання дифракції електромагнітних хвиль на області, що містить біологічні шкідники, які моделюються ізотропним однорідним середовищем з комплексною діелектричною проникністю. Завдання дифракції вирішується методом об'ємних інтегральних рівнянь в борновському наближенні. В результаті отримано вирази для напруженості електричного поля усередненого по області, що містить біологічні шкідники.*

#### Abstract

### ANALYSIS OF PROCESS OF INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC IMPULSIVE SIGNALS ON INSECTS-WRECKERS OF AGRICULTURAL CULTURES, BEING IN SOIL

N. Kosulina, A. Kozak

*In this article an initial-regional task decides for the system of equalizations of Maksvela, designing the process of influence of electromagnetic pulse string on biological wreckers (for example, larvae of may-bug), being in soil. By transformation of Laplace an initial non-stationary task is taken to the task of diffraction of hertzian waves on an area, containing biological wreckers which are designed by an isotropic homogeneous environment with a complex inductivity. The task of diffraction decides the method of by volume integral equalizations in the Born approaching. As a result expression for tension of the electric field is got middle on an area, to containing biological wreckers.*