УДК: 537.868

О.В. Козак, Л.М. Михайлова, В.М. Дубік, *кандидати технічних наук ПДАТУ*

ВИЗНАЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ІМПУЛЬСУ НВЧ ДІАПАЗОНУ В ГРУНТІ З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Потужні імпульси широкосмугового випромінювання знаходять застосування в радіолокації віддалених об'єктів, дослідженні електромагнітної сумісності та стійкості радіоелектронних систем в умовах впливу сильних електромагнітних полів (ЕМП). У сільському господарстві такі поля можуть бути з успіхом використані для боротьби з шкідниками, що живуть у верхніх шарах ґрунту.

Ключові слова: *Борновске наближення, рівняння Максвелла, перетворення Лапласа, тангенціальні компоненти, прохідна хвиля.*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У даній статті вирішується задача про проходження імпульсного електромагнітного сигналу в ґрунті. Вирішується початково-крайова задача для системи рівнянь Максвелла, що моделює процес впливу послідовності електромагнітних імпульсів на біологічні шкідники (наприклад, личинки хруща), що знаходяться в ґрунті. За допомогою перетворення Лапласа вихідна нестаціонарна задача зводиться до задачі дифракції електромагнітних хвиль на області, що містить біологічні шкідники, які моделюються ізотропним однорідним середовищем. Завдання дифракції вирішується методом об'ємних інтегральних рівнянь у Борновскому наближенні. Результатом досліджень має бути визначення виразу для середньої напруженості електромагнітного поля (ЕП) в області (ґрунті), яка містить біологічні об'єкти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Багаторічні експерименти у виробничих умовах підтверджують ефективність використання електромагнітних імпульсів для пригноблення шкідливих мікроорганізмів. Надвисокочастотний (НВЧ) метод боротьби з бур'янами та хворобами діє на всі види бур'янів і більшість шкідливої мікрофлори ефективніше в порівнянні з хімічними і біологічними методами Електромагнітна енергія знайшла застосування для знезараження насіння перед сівбою замість їх хімічного протравлення. ЕМП практично повністю знезаражує їх від шкідливих мікроорганізмів, а також грибкових, бактерійних і частково вірусних хвороб [6-8]. Електромагнітна енергія є одним з перспективних методів боротьби з шкідливими комахами зернових запасів: борошняним хрущаком і кільчастим шовкопрядом [8, 9].

Дослідження показують, що при НВЧ опромінюванні ґрунту відбувається знищення шкідливих мікроорганізмів на глибині до 10 см і глибше. Основний ефект знищення відбувається із-за вибіркового нагріву мікроорганізмів як вологих діелектриків завдяки наростанню температури цих об'єктів при дії ЕМІ. За одну секунду температура їх підвищується на декілька градусів, причому нагрів йде зсередини організму [6, 8].

Але максимальний ефект можливо досягнути тільки при оптимальному поєднанні біотропних параметрів ЕМП (частота, щільність потоку потужності, експозиція та ін.)

Мета статті: визначення оптимальних параметрів ЕМП для взаємодії з біологічними речовинами вимагає розробки моделей, що враховують параметри ЕМП, яке впливає на мікроорганізми.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження введемо декартову систему координат таким чином, що межа розділу повітря-ґрунт збігається з площиною, а півпростір заповнено ґрунтом (рис. 1).

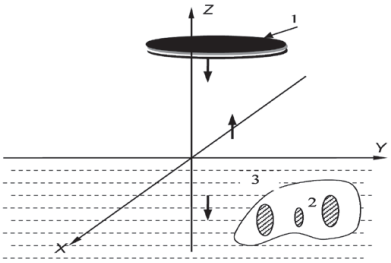

Рис. 1. Геометрична модель для вирішення задачі.
1 – джерело випромінювання, 2 – біологічний об'єкт, 3 – ґрунт.

© О.В. Козак, Л.М. Михайлова, В.М. Дубік, 2013

Для вирішення розглянемо задачу про ЕМП, збуджене джерелом $\vec{j}$, та $F(t)$ у вільному просторі (ґрунт відсутній). Оскільки передбачається, що розподіл щільності поверхневого струму не залежить від просторових змінних x, y, то природно припустити, що шукане ЕМП так само не залежить від цих змінних. У цьому випадку вектори напруженості електричного і магнітного полів будуть мати наступні компоненти:

$$\vec{E}_1 = E_{x1}\vec{e}_x, \quad \vec{H}_1 = H_{y1}\vec{e}_y, \tag{1}$$

де $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – орти декартової системи координат.

Враховуючи це, можна визначити систему рівнянь Максвелла в декартовій системі координат:

$$-\frac{\partial H_{y1}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_{x1}}{\partial t}; \tag{2}$$

$$\frac{\partial E_{x1}}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_{y1}}{\partial t}.$$

Компоненти E_{x1}, H_{y1} ЕМП повинні задовольняти наступним умовам:

$$E_{x1}\big|_{t<0} = H_{y1}\big|_{t<0} = 0, \tag{3}$$

а при $z = h$,

$$H_{y1}\big|_{z=h} = F(t). \tag{4}$$

Умова (4) моделює збудження ЕМП поверхневим струмом, розподіленим на площині розкриву антени, що збігається з площиною $z = h$.

Рішення задачі (2)-(4) може бути отримано за допомогою операційного методу (перетворення Лапласа до тимчасової змінної) [1]. Нехай $\bar{E}_{x1}(z,p)$ і $\bar{H}_{y1}(z,p)$ позначають перетворення Лапласа функцій $E_{x1}(z,t)$ і $H_{y1}(z,t)$, а саме:

$$\bar{E}_{x1}(z,p) = \int_0^\infty E_{x1}(z,t)\, e^{-pt}\, dt;$$

$$\bar{H}_{y1}(z,p) = \int_0^\infty H_{y1}(z,t)\, e^{-pt}\, dt. \tag{5}$$

Тоді, застосовуючи перетворення Лапласа до рівнянь (2), будемо мати:

$$-\frac{\partial \bar{H}_{y1}}{\partial z} = \varepsilon_0 p \bar{E}_{x1}, \quad \frac{\partial \bar{E}_{x1}}{\partial z} = -\mu_0 p \bar{H}_{y1}. \tag{6}$$

Граничну умову (4) можна представити в наступному вигляді:

$$\bar{H}_{y1}(h,p) = \bar{F}(p). \tag{7}$$

Функція $\bar{F}(p)$ є перетворенням Лапласа і має вигляд:

$$\bar{F}(p) = \frac{I\left(1 - e^{-p\tau}\right)\left(1 + 16p^2 f^2\right)}{2p\left(1 - e^{-pT}\right)\left(1 + 16p^2 f^2\right)},$$

де I – амплітуда імпульсу струму,

τ – тривалість імпульсу,

T – період повторення імпульсів.

Отримаємо рішення задачі (6)-(8) в аналітичній формі.

Виключаючи з (6) функцію $\bar{H}_{y1}$, одержимо:

$$\frac{\partial^2 \bar{E}_{x1}}{\partial z^2} - p^2 \varepsilon_0 \mu_0 \bar{E}_{x1} = 0. \tag{9}$$

Загальне рішення рівняння (9) має вигляд:

$$\bar{E}_{x1} = A e^{\gamma_1 z} + B e^{-\gamma_1 z}, \tag{10}$$

де $\gamma_1 = p\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$,

A і B – довільні константи незалежні від змінної z.

Оскільки функція E_{x1} повинна задовольняти умові (4) (принцип причинності), то в (10) випливає $B = 0$. Тоді, підставляючи (10) в граничну умову (7), отримуємо:

$$\left(\frac{\gamma_1}{\mu_0 p} A e^{\gamma_1 h} = \bar{F}(p)\right). \tag{11}$$

З (11) маємо:

$$A = \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\, e^{-\gamma_1 h}\, \bar{F}(p)\right). \tag{12}$$

Таким чином, перетворення Лапласа компоненти ЕП можна представити в наступному вигляді:

$$\bar{E}_{x1} = \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\, \frac{\left(\left(1 - e^{-pt}\right)^2 + 16\pi^2 f^2\right)}{2p\left(\left(1 - e^{-pT}\right)^2 + 16\pi^2 f^2\right)} e^{\gamma_1 (z-h)}\right). \tag{13}$$

Якщо тепер скористатися зворотним перетворенням Лапласа [5], то легко отримати вираз для напруженості ЕП:

$$E_{x1} = \left(\frac{I}{4\pi i}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{\left(\left(1 - e^{-pt}\right)^2 + 16\pi^2 f^2\right)}{p\left(\left(1 - e^{-pT}\right)^2 + 16\pi^2 f^2\right)} e^{\gamma_1 (z-h)} e^{pt}\, dp\right), \tag{14}$$

де $a > 0$ – довільне постійне число.

Інтеграл в (14) можна обчислити за допомогою методу відрахувань [5]. Легко бачити, що підінтегральна функція в (14) має особливості по змінній p у комплексній площині типу полюса в точках:

$$p_n = i\frac{2\pi}{T} n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \tag{15}$$

Тоді, використовуючи метод вирахувань [5], після низки елементарних перетворень, остаточно отримуємо:

$$E_{x1} = \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\, I \left[Q^{-1} + \frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n Q^{-1})}{n} \cos\left(\frac{2\pi n}{T}\left(t - t_0 - \frac{t}{2}\right)\right)\right]\right), \tag{16}$$

де $t_0 = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}\,(z)$;

$Q = T/t$ – шпаруватість імпульсу.

Формула (16) справедлива для моментів часу $t > t_0$, тобто коли перший імпульс приходить в точку спостереження з координатою z (h – відстань від початку координат до джерела). При тимчасових спостереженнях $t < t_0$ випливає:

$$E_{x1} = 0. \tag{17}$$

Розглянемо тепер задачу про проходження ЕМП (16) в ґрунт. Нехай межа ґрунту збігається з площиною XY. У півпросторі t > 0 поле (16) збуджується поверхневою щільністю струму, заданою на площині $z = h$. При зроблених вище припущеннях завдання полягає у визначенні поля, яке пройшло через межу повітря-ґрунт $(z = 0)$. Запишемо рівняння Максвелла в декартовій системі координат і застосуємо перетворення Лапласа за часовою змінною. Тоді в півпросторі $z > 0$ поле можна представити у вигляді:

$$E_{x1} = \bar{E}^{i}_{x1} + R e^{-\gamma_1 z}; \tag{18}$$

$$\bar{H}_{y1} = \left(\frac{1}{\mu_0 p}\left[\frac{\partial \bar{E}^{i}_{x}}{\partial z} - \gamma_1 R e^{-\gamma_1 z}\right]\right),$$

де R – амплітуда відображеної хвилі;

$\bar{E}^{i}_{x1}$ – перетворення Лапласа поля збуджуваного поверхневим струмом (див. формулу (16)).

$$\bar{E}^{i}_{x1} = \Phi(p)\, e^{-\gamma_1 z}; \tag{19}$$

$$\Phi(p) = \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\, I \frac{\left(\left(1 - e^{-pt}\right)^2 + 16\pi^2 f^2\right)}{2p\left(\left(1 - e^{-pT}\right)^2 + 16\pi^2 f^2\right)} e^{-\gamma_1 h}\right).$$

Поле, що пройшло у ґрунт (півпростір z < 0), має задовольняти наступним рівнянням:

$$\left(\frac{\partial \bar{H}_{y2}}{\partial z} = (\varepsilon_0 p + \sigma)\bar{E}_{x2}\right), \tag{20}$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{x2}}{\partial z} = -p\mu_0 \bar{H}_{y2},$$

де ε – відносна діелектрична проникність ґрунту;

σ – питома провідність ґрунту.

На межі розділу середовищ (z = 0) тангенціальні компоненти поля мають бути безперервними:

$$\bar{E}_{x1}\Big|_{z=0} = \bar{E}_{x2}\Big|_{z=0}, \quad \bar{H}_{y1}\Big|_{z=0} = \bar{H}_{y2}\Big|_{z=0}. \tag{21}$$

З (20) маємо:

$$\bar{E}_{x2} = \bar{T} e^{\gamma_2 z}, \quad \bar{H}_{y2} = -\frac{\gamma_2}{\mu_0 p} \bar{T} e^{\gamma_2 z}, \tag{22}$$

де $\gamma_2 = \sqrt{p^2 \varepsilon \varepsilon_0 \mu_0 + p \sigma \mu_0}$;

$\bar{T}$ – амплітуда пройденої хвилі.

У (22) враховано, що при $z \to \infty$ поле повинно зменшуватися, оскільки питома провідність $\sigma \neq 0$.

Підставляючи (18) і (22) в умови спряження (21), визначаємо невідому амплітуду $\bar{T}$ прохідної хвилі. Після ряду перетворень отримуємо наступний вираз для проходження поля:

$$E_{x2} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\, I \frac{\left(1 - e^{-pt}\right)^2 + 16 \pi^2 f^2 \quad e^{-\gamma_2 z - \gamma_1 h}}{\sqrt{p}\left(1 - e^{-pT}\right)^2 + 16 \pi^2 f^2 \left[\sqrt{p} + \sqrt{\varepsilon p + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}\right]};$$

$$H_{y2} = \frac{\gamma_2 I \left(1 - e^{-pt}\right)^2 + 16 \pi^2 f^2 \quad e^{-\gamma_2 z - \gamma_1 h}}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}\, p^{3/2}\left(1 - e^{-pT}\right)^2 + 16 \pi^2 f^2 \left[\sqrt{p} + \sqrt{\varepsilon p + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}\right]}. \tag{23}$$

Якщо тепер застосувати до (23) зворотне перетворення Лапласа, то одержимо вираз для напруженості ЕП в ґрунті:

$$E_{x2}(z,t) = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{I}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{\left(1 - e^{-pt}\right)^2 + 16 \pi^2 f^2}{\sqrt{p}\left(1 - e^{-pT}\right)^2 + 16 \pi^2 f^2}$$

$$\cdot \frac{e^{\gamma_2 z - \gamma_1 h}}{\left[\sqrt{p} + \sqrt{\varepsilon p + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}\right]} dp, \tag{24}$$

де $a > 0$.

Отриманий вираз (24) визначає взаємодію ЕМП з біологічними об'єктами, що знаходяться в ґрунті.

Висновки. Для визначення біотропних параметрів взаємодії електромагнітного поля з біологічними об'єктами необхідно використовувати розроблену модель та одержаний математичний вираз (24) для опису напруженості електромагнітного поля в ґрунті.

Список використаних джерел

1. Cramer H. N. Pflanzenschutz und Welternte / Cramer H. N. // Pflanzenschutz Nachrichten «Bayer». – 1967, Bd. 20, № 1. – S. 513-523.
2. Boyarskii D. A. Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing / Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu // Progress in Electromagnetics Reserch. PIER. 35, 2001. – P. 251-270.
3. Семенов А. А. Теория электромагнитных волн / Семенов А. А. – М.: Изд-во Московского университета, 1968. – 317 с.
4. Лаврентьев М. А. Методы теории функций комплексного переменного / Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 647 с.
5. Дмитриев В. И. Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики / Дмитриев В. И., Захаров Е. В. – М.: Изд-во Московского университета, 1987. – 167 с.
6. Бородин И. Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве / И. Ф. Бородин, Г. А. Шарков, А. Д. Горин. – М.: ВНИИТЭИ Агропром, 1987. – 138 с.
7. Бородин И. Ф. Анализ использования СВЧ-энергии в агропромышленном комплексе / И. Ф. Бородин // В сб.: Использование СВЧ-энергии в сельскохозяйственном производстве. – Зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1989. – С. 5-13.

8. Калинин Л. Г. Научно-технические аспекты широкого применения микроволновых технологий. Состояние вопроса, проблемы, решения / Калинин Л. Г. // В сб.: Микроволновые технологии в народном хозяйстве. – Одесса: ОКФН, 1996. – С. 62-69.
9. Микроволновые технологи в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы: [Сб. научн. работ / Ред. акад. МАИ Калинин Л. Г.]. – Одесса: ОКФА, 1966. – 108 с.

Аннотация. *Мощные импульсы широкополосного излучения находят применение в радиолокации удаленных объектов, исследовании электромагнитной совместимости и стойкости радиоэлектронных систем в условиях воздействия сильных электромагнитных полей (ЭМП). В сельском хозяйстве такие поля могут быть с успехом использованы для борьбы с вредителями, живущими в верхних слоях почвы.*
Ключевые слова: *Борновское приближение, уравнения Максвелла, преобразование Лапласа, тангенциальные компоненты, проходная волна.*

Abstract. *Strong broadband radiation pulses are used in radar remote sites, the study of electromagnetic compatibility and electronic stability systems under the influence of strong electromagnetic fields. In agriculture, these fields can be successfully used to control pests that live in the upper layers of the soil.*
Keywords: *the Born approximation, Maxwell's equations, Laplace transforms, tangential components, checkpoint wave.*

УДК 631.355.2:631.314.1:631.431.7:001.891.3

М.М. Корчак, *кандидат технічних наук ПДАТУ*

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОТКА НА ПРОЦЕС УЩІЛЬНЕННЯ РОЗРІЗАНИХ ТА ЗГОРНЕНИХ РОСЛИННИХ ЗАЛИШКІВ ГРУБОСТЕБЛОВИХ КУЛЬТУР ПО СМУГАХ ОБРОБІТКУ

Проведені теоретичні дослідження впливу котка на процес ущільнення рослинних залишків грубостеблових культур по смугах обробітку
Ключові слова: *коток, рослинні залишки грубостеблових культур, теоретичні дослідження, вплив на процес ущільнення, ґрунт*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Котки при запропонованому комбінованому способі звільнення поля від рослинних залишків грубостеблових культур здійснюють один із найважливіших технологічних процесів – ущільнення розрізаних та згорнених стебел по смугах обробітку, забезпечуючи при цьому більш ефективне протікання наступних процесів запропонованого способу [24]. Тому саме цей робочий орган, який реалізує технологічний процес, що він виконує, потребує теоретичних досліджень впливу на процес ущільнення рослинних залишків.

Теоретичні дослідження технологічного процесу впливу котка на процес ущільнення рослинних залишків дають можливість науково обґрунтувати їх конструктивні параметри. Дослідження потрібні у першу чергу для теоретичного аналізу роботи саме цих робочих органів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Пасивні робочі органи в комбінованих ґрунтообробних машинах удосконалюють фірми зарубіжних країн: Kongskilde, Kvernelend, Dal-Bo, Franquet та ін. Вони впроваджують різні типи котків та вирівнювальні робочі органи із забезпеченням стабільної дії на ґрунт [1-9].

Наукові дослідження взаємодії з ґрунтом ущільнюючих пасивних робочих органів опубліковано в працях [10-12], де досліджуються технологічні параметри та ущільнюючий вплив різних типів котків. Такі котки задовільно працюють, однак є масивними та мають великий тяговий опір [1, 2, 10-12]. Усе це зменшує можливості їх використання в енергоощадних комбінованих ґрунтообробних машинах.

© М.М. Корчак, 2013