

10. Прилад побутовий електричний панельний опалювальний із конвекційним ефектом «TermoPlaza» [Електронний ресурс]. – Termoplaza. Energy saving technologies. – Режим доступу: <http://termoplaza.in.ua>

11. Терморегулятор Terneo RZ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://hotcold.com.ua/sites/default/files/inst\\_terneo\\_rz\\_ru\\_web.pdf](http://hotcold.com.ua/sites/default/files/inst_terneo_rz_ru_web.pdf)

12. Инструкция SAMSUNG AQ07UGFN – кондиционер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://manualbase.ru/files/5254\\_samsung-aq07ugfn.html](http://manualbase.ru/files/5254_samsung-aq07ugfn.html)

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Фроловим Є. А.*

*Дата надходження рукопису 24.11.2016*

**Попов Станіслав Вячеславович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, пр. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011  
E-mail: [psv@pntu.edu.ua](mailto:psv@pntu.edu.ua)

**Васильєв Анатолій Володимирович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, пр. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011  
E-mail: [vav@pntu.edu.ua](mailto:vav@pntu.edu.ua)

**Васильєв Євгеній Анатолійович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра будівельних машин і обладнання, Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, пр. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011  
E-mail: [vev@pntu.edu.ua](mailto:vev@pntu.edu.ua)

УДК 621.374

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.86508

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В БОЛЬНЫХ ЯИЧНИКАХ КОРОВ

© В. С. Попрядухин

*Решена задача по распределению электромагнитного излучения внутри яичников крупного рогатого скота. В результате теоретических исследований, с использованием векторных потенциальных полей и интегральных формул теории векторных полей, было получено интегральное уравнение. Решение уравнения позволило получить формулы для расчёта среднего значения электрического поля внутри больных яичников. Среднее значение электрического поля необходимо для определения биотропных параметров при лечении воспалений яичников*

**Ключевые слова:** модель яичников, распределение электрического поля в яичниках животных, биотропные параметры поля

### 1. Введение

Кризисное положение в животноводстве Украины характеризуется спадом производства молока и мяса за счет бесплодия маточного поголовья коров. Основными послеродовыми болезнями у коров являются акушерско-гинекологические болезни, среди которых основное место занимает патология гонад (яичников). Основными болезнями яичников у коров, чаще всего, встречаются: воспаление яичников (овариит) – до 15 %; гипофункция яичников до 30 %; персистентное жёлтое тело – до 90 %; киста яичников – до 30 %; атрофия яичников – до 40 %; склероз яичников – до 10 %, от числа бесплодных коров. Заболевания коров болезнью яичников влечет за собой снижение оплодотворяемости коров на 17–40 %, увеличение от отела до плодотворного осеменения на 40–60 дней, уменьшения выхода приплода и молочной продуктивности на 12–18 % [1].

Проведенный анализ показывает, что экономический ущерб от этого заболевания складывается из низкой молочной продуктивности, не до получения телят, увеличения расхода спермы и ранней выбраковки скота. Быстрое и эффективное лечение патологии яичников крупного рогатого скота (КРС) важнейшая экономическая задача, как в мясной, так и в молочной промышленности [2].

### 2. Литературный обзор

В современных условиях для лечения яичников коров используются антибиотики, гормоны и другие химические препараты, которые являются малоэффективными [3]. Антибиотики и другие медикаменты, попадая в организм человека через молоко и мясо коров, угнетают иммунитет, поражают печень и другие органы, что приводит к различным заболе-

ваниям. Поэтому немедикаментозное лечение яичников у коров является актуальной задачей.

Литературный анализ показывает, что лечение болезней яичников животных возможно на основе применения информационного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с определёнными биотропными параметрами [4]. Электромагнитное излучение при воздействии на патологические процессы в организме животных приводит к гибели патогенных микробов, понижению рецепторной чувствительности, уменьшению длительности фазы восстановления и интерстициального отёка, активизации регенеративных процессов, ускорению и коррекции гормональной и ферментативной систем, улучшению микроциркуляции крови и лимфы [5].

Установить аспекты действия электромагнитных полей, связанных не с мощностью воздействия и поглощённой энергией, а с информацией, закодированной в биотропных параметрах ЭМП, возможно на основе теоретических исследований, которые к настоящему моменту отсутствуют [6]. В настоящее время также отсутствует математический анализ обобщённых моделей гинекологических органов животных на математическом и системно-информационном уровнях [7].

Проведенный анализ показывает, что для создания электромагнитного метода лечения болезней яичников животных необходимы исследования по распределению электрического поля в яичниках при разных частотах излучения.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования является процесс взаимодействия монохроматического электромагнитного излучения с моделью яичников коров.

Целью работы является определения резонансной частоты электромагнитного излучения для лечения заболеваний яичников.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Обосновать модель яичника животных крупного рогатого скота.

2. На основе метода объёмных интегральных уравнений получить выражение для напряжённости электрического поля внутри яичников животных, как функции диэлектрической проницаемости и частоты возбуждающей волны.

### 4. Распределение напряжённости электрического поля в яичниках коров

При анализе процесса воздействия электромагнитного излучения на яичники коровы будем считать, что выполняются следующие основные предположения. Во-первых, в качестве электромагнитного излучения будем рассматривать линейно поляризованную монохроматическую электромагнитную волну, распространяющуюся в среде, где расположены яичники. Во-вторых, яичники коровы модулируются сфероидом вращения, заполненным изотропной средой с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon\varepsilon_0$  и магнитной проницаемостью  $\mu_0(\varepsilon_0)$  и  $\mu_0$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума) (рис. 1).

В-третьих, будем пренебрегать частотной и пространственной дисперсиями диэлектрической проницаемости яичников коровы. Эти предположения являются общепринятыми [8] и позволяют строго в математическом отношении сформулировать задачу о взаимодействии электромагнитного излучения с яичниками коров

Введем декартовую  $x, y, z$  и цилиндрическую  $r, \phi, z$  системы координат с осями  $z$ , совпадающими с осью симметрии сфероида (модель яичника, рис. 1).

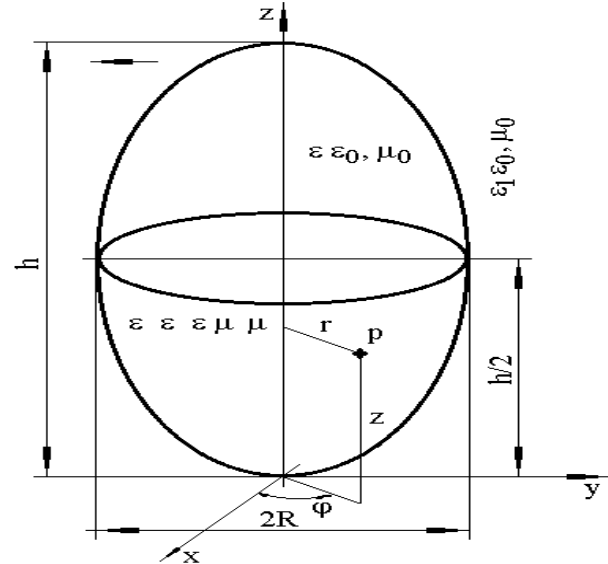


Рис. 1. Электродинамическая модель яичника коровы

Линейно поляризованную монохроматическую электромагнитную волну, распространяющуюся в общем случае в направлении, которое не совпадает ни с одной из осей декартовой системы координат  $x, y, z$  можно представить в виде

$$\vec{E}^{\text{пад}} = E_0 \left( \cos \alpha_1 \vec{e}_x + \cos \beta_1 \vec{e}_y + \cos \delta_1 \vec{e}_z \right) \times e^{ik(x \cos \gamma_1 + y \cos \gamma_2 + z \cos \gamma_3) - i\omega t},$$

$$\vec{H}^{\text{пад}} = \frac{E_0}{W} \left( \cos \alpha_2 \vec{e}_x + \cos \beta_2 \vec{e}_y + \cos \delta_2 \vec{e}_z \right) \times e^{ik(x \cos \gamma_1 + y \cos \gamma_2 + z \cos \gamma_3) - i\omega t}. \quad (1)$$

Здесь  $\alpha_1, \beta_1, \delta_1$  и  $\alpha_2, \beta_2, \delta_2$  – углы, указывающие ориентацию вектора  $\vec{E}^{\text{пад}}$  и  $\vec{H}^{\text{пад}}$  соответственно, а  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  – углы ориентации направления распространения волны,

$$W = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_1 \varepsilon_0}}$$

$W$  – волновое сопротивление среды, в которой находятся яичники,  $\varepsilon_1 \varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость этой среды,  $k = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_0 \mu_0}$  – волновое число,  $\omega$  – круговая частота волны,  $E_0$  – амплитуда волны.

В результате дифракции волны (1) на яичнике коровы возникает вторичное электромагнитное поле (поле дифракции) с векторами напряженностей электрического и магнитного полей  $\vec{E}_{\pm}, \vec{H}_{\pm}$  (знак + отвечает полю внутри яичника, а знак – полю вне яичника). Это поле должно удовлетворять однородной системе уравнений Максвелла как внутри яичника, так и вне.

$$\text{rot}\vec{E}_{\pm} = i\omega\mu_0\vec{H}_{\pm}, \text{rot}\vec{H}_{\pm} = -i\omega\varepsilon_1\varepsilon_0\vec{E}_{\pm}, \quad (2)$$

$$\text{rot}\vec{H}_{\pm} = -i\omega\varepsilon_0\vec{E}_{\pm}, \text{div}\vec{E}_{\pm} = 0, \text{div}\vec{H}_{\pm} = 0. \quad (3)$$

Кроме уравнений (2), (3) поле дифракции должно удовлетворять граничным условиям на поверхности яичников, а вне яичников – условию излучения [8].

Граничные условия на поверхности яичников состоят в непрерывности тангенциальных компонент поля к этой поверхности:

$$\vec{E}_{-\tau} + \vec{E}_{\tau}^{\text{пад}} = \vec{E}_{+\tau}, \quad (4)$$

$$\vec{H}_{-\tau} + \vec{H}_{\tau}^{\text{пад}} = \vec{H}_{+\tau}. \quad (5)$$

Требование, чтобы поле  $\vec{H}_{-}, \vec{E}_{-}$  удовлетворяло условию излучения, состоит в выполнении следующих соотношений [9]:

$$\lim_{\vec{r} \rightarrow \infty} \vec{r} \left( \frac{\partial \vec{E}_{-}}{\partial r} - ik\vec{E}_{-} \right) = 0, \quad (6)$$

$$\lim_{\vec{r} \rightarrow \infty} \vec{r} \left( \frac{\partial \vec{H}_{-}}{\partial r} - ik\vec{H}_{-} \right) = 0, \quad (7)$$

где  $\vec{r} = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ .

Как следует из общих теорем электродинамики [8] задача (1)–(7) имеет единственное решение. Построение этого решения, в общем случае, возможно только с помощью численных методов [9]. Однако, при определенных предположениях можно получить для расчета напряженности электрического поля формулу, как функции диэлектрической проницаемости и частоты возбуждающей волны.

Для распределения электрического поля внутри яичников коров, получим интегральное уравнение эквивалентное задаче (1)–(7). С этой целью воспользуемся представлениями для электромагнитного поля с помощью векторных потенциальных функций и интегральными формулами теории векторных полей [10].

Пусть  $Q$  обозначает область пространства, занимаемую яичниками. Уравнения (2), (3) представим в следующем виде:

$$\text{rot}\vec{H} = -\frac{ik}{W}\vec{E} + \vec{j}, \quad (8)$$

$$\text{rot}\vec{E} = ikW\vec{H}. \quad (9)$$

Здесь введены обозначения

$$\vec{E} = \begin{cases} \vec{E}_{+} + \vec{E}^{\text{пад}}, & p \in Q \\ \vec{E}_{-} + \vec{E}^{\text{пад}}, & p \notin Q \end{cases}$$

$$\vec{H} = \begin{cases} \vec{H}_{+} + \vec{H}^{\text{пад}}, & p \in Q \\ \vec{H}_{-} + \vec{H}^{\text{пад}}, & p \notin Q \end{cases} \quad (10)$$

$$\vec{j} = \begin{cases} \frac{ik}{W}(\varepsilon - \varepsilon_0)\vec{E}_{+}, & p \in Q, \\ 0, & p \notin Q, \end{cases} \quad (11)$$

$k = \omega\sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_0\mu_0}$ ,  $W = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_1\varepsilon_0}}$  – волновое число и волновое сопротивление среды, где распространяется возбуждающая волна,  $p = (x, y, z) = (r, \phi, z)$  – точка пространства.

Уравнения (8), (9) можно рассматривать как неоднородные уравнения Максвелла в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1\varepsilon_0$  и магнитной проницаемостью  $\mu_0$ , а векторную функцию  $\vec{j}$  считать плотностью тока заданного в области  $Q$ .

Предположим, что величина  $\vec{j}$  (11) известна. Тогда решение уравнений (8), (9) удовлетворяющие условию излучения (6) и (7), можно представить с помощью векторной потенциальной функции  $\vec{F}$  по известным формулам [10]:

$$\vec{F}(p) = \int_Q \vec{j}(q)G(|p-q|)dv_q, \quad (12)$$

$$\vec{E} = \frac{W}{ik} \text{grad}\text{div}\vec{F} - ikW\vec{F}, \quad (13)$$

$$\vec{H} = \text{rot}\vec{F}. \quad (14)$$

Функция  $G(|p-q|)$  является функцией Грина трехмерного скалярного уравнения Гельмгольца:

$$G(|p-q|) = \frac{\exp(i\omega\sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_0\mu_0}|p-q|)}{4\pi|p-q|}, \quad (15)$$

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

Подставив (12) в (13), и после ряда преобразований было получено:

$$\begin{aligned} \vec{E}(p) = & \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right) \text{grad div} \int_Q \vec{E}_+(q) G(|p-q|) dv_q + \\ & + k^2 \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right) \int_Q \vec{E}_+(q) G(|p-q|) dv_q. \end{aligned} \quad (16)$$

Следует отметить, что операцию *grad div* нельзя внести под знак интеграла, поскольку функция Грина (15) после дважды дифференцирования по переменной *p* имеет неинтегрируемую особенность порядка  $|p-q|^{-3}$  при совпадении точек *p* и *q* следовательно соответствующий интеграл является расходящимся. Положим теперь в (16), что точка  $p \in Q$ . Тогда из (16) с учетом (10) получаем:

$$\begin{aligned} \vec{E}_+(p) = & k^2 \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right) \int_Q \vec{E}_+(q) G(|p-q|) dv_q + \\ & + \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right) \text{grad div} \int_Q \vec{E}_+(q) G(|p-q|) dv_q + \vec{E}^{\text{над}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Выражение (17) является интегро-дифференциальным уравнением относительно напряженности электрического поля внутри яичников (область *Q*).

Когда точка  $p \notin Q$ , то при известном поле  $\vec{E}_+$  выражение (16) позволяет рассчитать электрическое поле вне яичников. Магнитное поле так же определяется, если известно электрическое поле  $\vec{E}_+$ . Из (14) имеем:

$$\vec{H}(p) = \frac{ik \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right)}{W} \text{rot} \int_Q \vec{E}_+(q) G(|p-q|) dv_q. \quad (18)$$

Таким образом, исходная задача о взаимодействии электромагнитного излучения с яичниками коровы сведена к интегро-дифференциальному уравнению (17).

Построение решения этого уравнения является сложной вычислительной проблемой.

В связи с этим, с помощью интегро-дифференциальных формул теории векторных полей уравнение (17) было преобразовано к более простому виду:

$$\begin{aligned} \vec{E}_+(p) = & k^2 \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right) \int_Q \vec{E}_+(q) G(|p-q|) dv_q - \\ & - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right) \int_{\partial Q} (\vec{E}_+(q), \vec{n}) \text{grad}_q G(|p-q|) ds_q + \vec{E}^{\text{над}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Выражение (19) является искомым уравнением для электромагнитного поля внутри яичника. На основе уравнения (19) были получены формулы для расчета среднего значения электрического поля внутри яичников.

$$U_{\text{cp}} = \frac{E_{\text{ср}}}{E_0} \cong \frac{9\pi kR}{16} \left[ 1 - (kR)^2 \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right) \frac{9ih^4}{16R^4} D_1 \right], \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} D_1 = & 0.5 \int_0^\infty \frac{J_1\left(\frac{x}{2}\right) J_2\left(\frac{x}{2}\right)}{x^3} (1-x^2) dx - \\ & - \frac{4i}{\pi} \int_0^\infty \frac{J_2\left(\frac{x}{2}\right) \sin \frac{x}{2}}{x^3} \left( \cos^2 \frac{x}{2} - x^2 \sin^2 \frac{x}{2} \right) dx. \end{aligned}$$

Из этой формулы следует, что наиболее перспективен для эффективного взаимодействия электромагнитного излучения с яичниками коровы является диапазон частот, где  $kR \sim 10$ ,  $kh \sim 10$ . Учитывая среднестатистические геометрические размеры яичников этот диапазон можно определить как

61 ГГц – 151 ГГц. На рис. 2 представлены результаты расчетов зависимости среднего электрического поля от частоты возбуждающей волны.

Геометрические параметры яичника были следующие:  $2R=20$  мм,  $h=40$  мм. Относительная диэлектрическая проницаемость среды заполняющей яичник  $\varepsilon=8,5$ , потери в среде характеризовались  $tg\delta=0,5$ . Среда внешняя по отношению к яичникам имела материальные параметры:  $\varepsilon=4,5$ ;  $tg\delta=0,5$ . Расчеты проводились в диапазоне частот 61–91 ГГц.

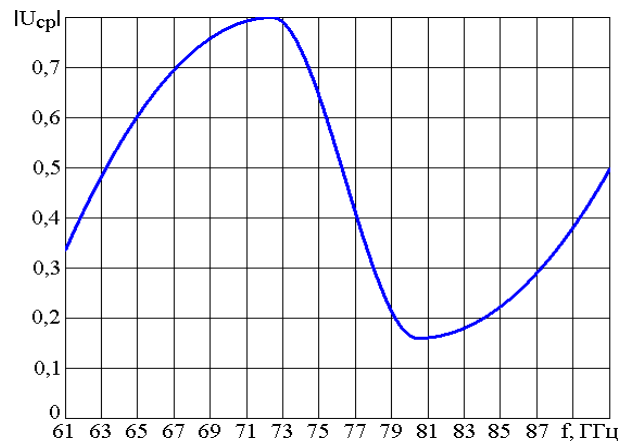


Рис. 2. Зависимости среднего электрического поля от частоты возбуждающей волны

Как видно из рис. 2, частотная зависимость среднего поля имеет резонансное поведение. Максимальное значение среднего поля достигается на частоте  $f = 72,2$  ГГц. Это значение частоты возбуждающей электромагнитной волны является оптимальным для эффективного взаимодействия электромагнитного излучения с яичниками коров.

### 5. Результаты исследования

В результате теоретических исследований было получено интегральное уравнение для определения среднего значения электрического поля в яичниках коров в диапазоне частот 61–151 ГГц. Проведенные расчёты в диапазоне частот 61–91 ГГц показали, что частотная зависимость среднего поля имеет резонансное поведение. Максимальное значение среднего поля достигается на частоте  $f = 72,2$

ГГц. Это значение частоты возбуждающей электромагнитной волны является оптимальным для эффективного взаимодействия электромагнитного излучения с яичниками коровы.

#### 6. Выводы

1. Для анализа распределения электрической напряжённости в яичниках маточного поголовья крупного рогатого скота следует использовать модель яичника в виде сфероида вращения, заполненного диэлектрической изотропной средой.

2. Для анализа распределения монохроматического электромагнитного излучения в яичниках коров следует использовать интегральное уравнение (17).

3. Для лечения заболеваний яичников коров следует использовать электромагнитное излучение на частоте 72,2 ГГц.

4. Полученное нормированное среднее значение напряжённости электрического поля на частоте 72,2 ГГц необходимо использовать для определения плотности потока мощности и экспозиции для лечения яичников коров.

#### Литература

1. Кузьмич, Р. Г. Диагностика, лечение и профилактика патологии яичников и яйцеводов у коров [Текст]: уч.-метод. пос. / Р. Г. Кузьмич, Л. Н. Рубанец, А. А. Гарбузов и др. – Витебск: ВГАВМ, 2010. – 60 с.
2. Карпенко, Т. О. Вітальна оцінка ендоструктури гонад у тварин [Текст]: зб. наук. пр. / Т. О. Карпенко, В. П. Кошевой, С. Я. Федоренко, С. В. Науменко // Проблеми зооінженерії та ветеринарної медицини. – 2011. – Т. 1, № 23. – С. 447–453.
3. Михайлова, Л. Н. Визначення параметрів електродинамічної системи многодіодного генератора крайневисокочастотного діапазону [Текст] / Л. Н. Михайлова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Т. 1, № 9 (55). – С. 36–39. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/3439>
4. Попрядухин, В. С. Інформаційно-хвильова терапія в ветеринарії і медицині в лікувальних цілях [Текст] / В. С. Попрядухин, Ю. М. Федюшко // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2016. – № 175. – С. 158–160.
5. Сасимова, И. А. Обоснование биофизического действия информационных электромагнитных излучений на микробиологические объекты животноводства [Текст] / И. А. Сасимова, Л. Ф. Кучин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Т. 4, № 2 (34). – С. 27–29.
6. Думанский, А. В. Аналіз керуючого впливу інформаційних електромагнітних випромінювань на фізико-хімічні процеси в біологічних об'єктах [Текст] / А. В. Думанский, Л. Н. Михайлова // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2013. – № 142. – С. 83–86.
7. Попрядухин, В. С. Визначення оптимальних параметрів електромагнітного випромінювання для пригнічення патогенних мікроорганізмів, що викликають запалення яєчників ВРХ [Текст] / В. С. Попрядухин // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2016. – № 176. – С. 91–93.
8. Никольский, В. В. Электродинамика и распространения радиоволн [Текст] / В. В. Никольский. – М.: Наука, 1978. – 544 с.
9. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны [Текст] / Л. А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 345 с.
10. Колтон, Д. Методы интегральных уравнений в теории рассеяния [Текст] / Д. Колтон, Р. Кресс. – М.: Мир, 1987. – 311 с.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Черенков О. Д.  
Дата надходження рукопису 18.11.2016*

**Попрядухин Вадим Сергеевич**, ассистент, кафедра теоретической и общей электротехники, Таврический государственный агротехнологический университет, пр. Б. Хмельницкого, 18, г. Мелитополь, Украина, 72310

E-mail: [tte\\_nniect@ukr.net](mailto:tte_nniect@ukr.net)