

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭМИ С БИООБЕКТАМИ ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сформулирована электродинамическая постановка задачи, выбран и обоснован метод ее решения, рассмотрены особенности некоторых вариантов воздействия электромагнитного излучения на водный раствор питательной среды с биологическими объектами in vitro

Ю.Е. Мегель

Доктор технических наук, профессор*

Контактный тел.: 717-42-63

E-mail Khstua@Lin.com.

И.А. Сосимова

Аспирант*

*Кафедра кибернетики

Харьковский национальный технический университет сельского

хозяйства им. П.Василенко

ул. Артема 44, г. Харьков, 61002

1. Введение

Биотехнологические методы, разрабатываемые и применяемые в настоящее время в сельскохозяйственном производстве, требуют создания новых инструментов для повышения их эффективности. Одним из таких методов является морфологический и молекулярно-генетический анализ реализации генетической информации при раннем эмбриогенезе *in vitro*, что способствует решению многих вопросов генетики развития сельскохозяйственных животных [1].

При этом важной задачей во время манипуляций с эмбрионами, вне организма животного, является повышение их жизнеспособности. Особенностью работы с зародышами есть необходимость помещать их в питательную водную среду, где они могут сохраняться на протяжении достаточно продолжительного времени [2].

В настоящее время накоплен большой опыт и статистический материал по эффективному применению низкоинтенсивного ЭМИ, позволяющий использовать данный метод при создании систем, улучшающих характеристики биообъектов.

Много работ посвящено исследованию воздействия миллиметровых волн (КВЧ) на водную среду,

но при этом подчеркивается, что все рассуждения справедливы и для других типов воздействий излучения низкой интенсивности, в том числе и излучение более низких частот, включая механическое воздействие (например, ультразвук) и др. [3,4]. Так установлена возможность дистанционного информационного взаимодействия жидкокристаллической структуры воды с биологическими объектами различной природы при помощи электромагнитных, акустических и других полей [5].

Обеспечение желаемого эффекта от информационного воздействия ЭМИ зависит от технических возможностей генератора излучения и методик его применения при строгом соблюдении основного принципа данного метода - синхронизации ритмов или стойкого эффекта навязывания ритма колебательного процесса биосистеме при оптимально минимальных энергетических параметрах действующего фактора.

Поиски селективных резонансных частот с одновременным существенным уменьшением выходных энергетических параметров действующего фактора позволяют создать новый класс аппаратуры, который во многом отвечает требованиям энергоинформационного воздействия.

Цель работы

Рассмотреть возможность использования электромагнитного излучения в качестве информационного фактора при облучении эмбрионов находящихся в питательной среде и выработка условий эксперимента при необходимости решения следующих задач:

- обосновать выбор длины волны электромагнитного излучения;
- определить параметры амплитудной и частотной модуляции, соответствующие заданной цели воздействия;
- определить для заданной цели величину энергетической облученности и энергетической экспозиции воздействия.

В настоящей работе предпринят первый шаг для решения перечисленных задач, а именно – сформулирована электродинамическая постановка задачи; выбран и обоснован метод ее решения; рассмотрены особенности некоторых вариантов воздействия электромагнитного излучения на водный раствор питательной среды с эмбрионами, которые могут быть основой для реализации экспериментальных устройств энергоинформационного воздействия.

2. Постановка задачи

Анализ предложенных в литературе способов воздействия электромагнитного поля на биологические объекты показал, что в общем случае целесообразной представляется следующая постановка электродинамической задачи.

В ограниченной поверхностью S_Σ области D_3 (рис. 1) с параметрами (ϵ_3, μ_3) , расположено тело D_2 , ограниченное замкнутой поверхностью S_2 , причем параметры среды (ϵ_2, μ_2) в области D_2 отличаются от параметров (ϵ_3, μ_3) области D_3 . Электромагнитное поле в области D_2 обозначим через $\{E_2, H_2\}$, в области D_3 – через $\{E_3, H_3\}$. Внутри тела D_2 имеется, ограниченная поверхностью S_1 , неоднородность D_1 с параметрами (ϵ_1, μ_1) , поле в которой обозначим через $\{E_1, H_1\}$. Электромагнитное поле возбуждается монохроматическим (с частотой ω) сторонним источником j^{ct} , который расположен в объеме $V^{ct} \in D_3$. Требуется определить поле в областях D_1 и D_2 при заданном j^{ct} . В такой постановке это задача для ограниченной области. Удаляя поверхность на бесконечность, данная задача переходит в задачу для неограниченного пространства.

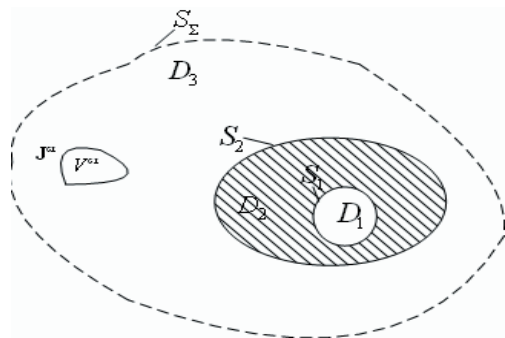


Рисунок 1. К постановке электродинамической задачи

Для определения электромагнитного поля во всем пространстве можно сформулировать следующую краевую задачу для системы уравнений Максвелла. Решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} H_1 &= j\omega \epsilon_1 E_1 \\ \text{rot} E_1 &= -j\omega \mu_1 H_1 \end{aligned} \right\} 2 \quad D_1; \tag{1}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} H_2 &= j\omega \epsilon_2 E_2 \\ \text{rot} E_2 &= -j\omega \mu_2 H_2 \end{aligned} \right\} 2 \quad D_2; \tag{2}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} H_3 &= j\omega \epsilon_3 E_3 + J^{(ct)} \\ \text{rot} E_3 &= -j\omega \mu_3 H_3 \end{aligned} \right\} 2 \quad D_3; \tag{3}$$

при граничных условиях

$$[n, E_1]_{S_1} = [n, E_2]_{S_1} \tag{4}$$

$$[n, H_1]_{S_1} = [n, H_2]_{S_1} \tag{5}$$

$$[n, E_2]_{S_2} = [n, E_3]_{S_2} \tag{6}$$

$$[n, H_2]_{S_2} = [n, H_3]_{S_2} \tag{7}$$

и граничному условию на S_Σ . Если рассматривается задача в неограниченном пространстве, то граничным условием на S_Σ является условие излучения

$$[e_r, E_3] + \sqrt{\frac{\mu_3}{\epsilon_3}} [e_r, H_3] = o\left(\frac{1}{r}\right) \text{ при } r \rightarrow \infty. \tag{8}$$

Следуя изложенной в [6] методике, нетрудно показать, что при наличии проводимости в областях D_1 и D_2 , т.е. при

$$\epsilon_1 = \tilde{\epsilon}_1 + j \frac{\sigma_1}{\omega}, \quad \sigma_1 \neq 0, \tag{9}$$

и

$$\epsilon_2 = \tilde{\epsilon}_2 + j \frac{\sigma_2}{\omega}, \quad \sigma_2 \neq 0, \tag{10}$$

решение данной электродинамической задачи единственно. В приведенных выше соотношениях $\tilde{\epsilon}_1, \sigma_1$ и $\tilde{\epsilon}_2, \sigma_2$ – вещественная диэлектрическая проницаемость и проводимость сред в областях D_1 и D_2 , соответственно.

Наличие неоднородности в области D_2 позволяет отнести сформулированную задачу к классу задач дифракции на прозрачном неоднородном теле, т.е. к одному из самых сложных классов задач электродинамики.

Отметим следующие особенности решаемой задачи применительно к рассматриваемому конкретному случаю:

- область, в которой ищется решение, может быть либо ограниченной, либо неограниченной (в силу неограниченности D_3);
- области D_1 и D_2 – области с некоординатными поверхностями;
- параметры сред в областях D_2 и D_3 существенно различны, особенно это касается их диэлектрических проницаемостей;
- значительно отличаются линейные размеры областей D_1 и D_2 ;

- среды в областях D_1 и D_2 могут обладать дисперсией. Для многих сред материальные параметры имеют ярко выраженную частотную зависимость. К частотно-зависимым материалам относятся, в частности биологические ткани и вода. Так для биологических тканей в диапазоне частот от 40 МГц до 400 МГц диэлектрическая проницаемость уменьшается в 2-3 раза, проводимость возрастает также в 2-3 раза.

Задачи, подобные сформулированной выше, имеют важное прикладное значение в разных областях науки. Для их решения были разработаны электродинамические методы, начиная от метода разложения по собственным функциям и заканчивая современными численными методами (метод интегральных уравнений, метод конечных разностей во временной области, метод конечных элементов) [7]. Естественно, что в силу ограниченности того или иного метода, в ходе решения использовались различного рода приближения и идеализации. Учитывая особенности решаемой задачи можно констатировать, что применение метода собственных функций нецелесообразно, так как границы областей D_1 , D_2 и D_3 в общем случае представляют собой некоординатные поверхности. В силу неоднородности пространства в D_3 затруднительно использование также и метода интегральных уравнений.

В течение последних десятилетий стремительное развитие вычислительной техники стимулировало разработку новых численных методов решения электродинамических задач, обладающих достаточной универсальностью. Как показало дальнейшее развитие численных методов, в настоящее время наиболее перспективными для решения задач подобного класса являются метод конечных разностей во временной области и метод конечных элементов. Эти методы имеют одну общую черту – они базируются на представлении моделируемого объема в виде совокупности некоторых элементарных ячеек. В силу того, что в рассматриваемой задаче предполагается возбуждение монохроматическим источником наиболее целесообразным является использование метода конечных элементов. Этот метод в настоящее время является одним из общепризнанных методов решения дифференциальных уравнений. По своей сути – это вариационный метод с кусочно-полиномиальными пробными функциями, обладающий большой универсальностью. Он позволяет достаточно эффективно решать электродинамические задачи для объектов сложной структуры и сложной геометрической формы. Представленные ниже результаты получены на основе данного метода.

3. Результаты исследования

Исследования, результаты которых описаны ниже, проводились с целью определения частоты и способа внешнего электромагнитного воздействия на биологические объекты находящиеся в жидкой среде (диэлектрический объект). В связи с этим вначале для расположенного в свободном пространстве диэлектрического объекта 1 (рис. 2) были рассмотрены три способа возбуждения:

- полем плоской волны (рис. 2,а);

- полем симметричного вибратора 2 (рис. 2,б);
 - полем щели 3, прорезанной в экране бесконечных размеров и питаемой прямоугольным волноводом 4 (рис. 2,в);

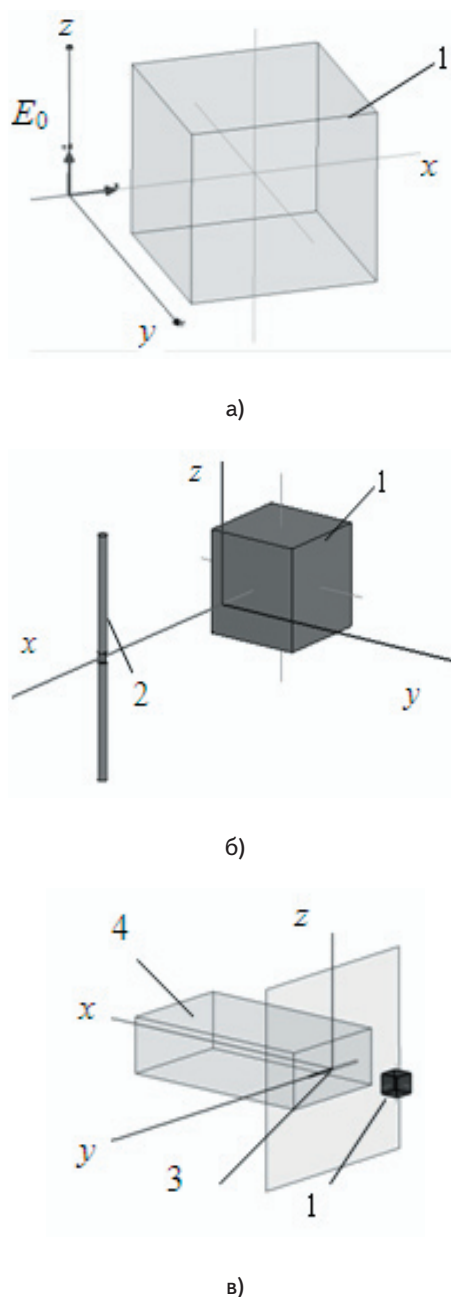


Рисунок 2. Эскизы моделируемых структур
 а) возбуждение полем плоской волны, б) возбуждение симметричным вибратором, в) возбуждение щелью

Кроме этого рассмотрена также задача определения электромагнитного поля внутри и вне такого диэлектрического объекта, расположенного в прямоугольном волноводе и возбуждаемого волной основного типа.

Во всех рассмотренных задачах предполагалось, что объект с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_2 = 81$ и удельной проводимостью $\sigma_2 = 0.0002$ Сим/м (питательный водный раствор [8]) имеет форму куба со стороной $a = 10$ мм .

На рис. 3 приведены результаты вычисления распределения поля вдоль оси x при возбуждении полем плоской волны

$$E = E_{inc} z_0 e^{ik_0 x} \quad (11)$$

в диапазоне частот 4..12 ГГц.

В соотношении (11) E_{inc} - амплитуда напряженности электрического поля плоской волны, z_0 - единичный вектор в направлении оси z, $k_0 = 2\pi / \lambda$ - волновое число свободного пространства. По горизонтальной оси отложено нормированное расстояние x' , равное

$$x' = \frac{(a - x + x_0)}{2a}, \quad (12)$$

где x_0 - координата центра куба.

Таким образом, границам диэлектрика соответствуют значения нормированного расстояния 0.25 и 0.75, а центру - значение 0.5. Как видно из приведенных графиков, наиболее равномерное распределение поля имеет место на самой низкой частоте. На частоте 4 ГГц, в пределах диэлектрического куба наблюдается только один экстремум в его центре, а при приближении к границам диэлектрика амплитуда поля равномерно падает.

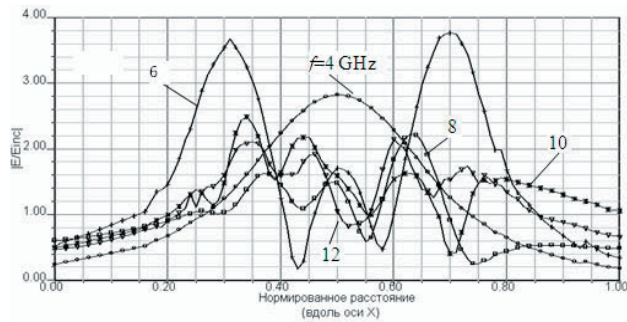


Рисунок 3. Распределение поля вдоль направления распространения плоской волны при различных частотах

С увеличением частоты внешнего воздействия распределение поля внутри диэлектрического объекта вдоль оси x становится осциллирующим, а число осцилляций растет с повышением частоты. Вне диэлектрика осцилляций в распределении поля не наблюдается. Как видно из рис. 4 на котором приведены распределения амплитуды электрического поля на частоте 8 ГГц, осцилляции имеют место вдоль различных осей координат (вдоль осей x, y, z).

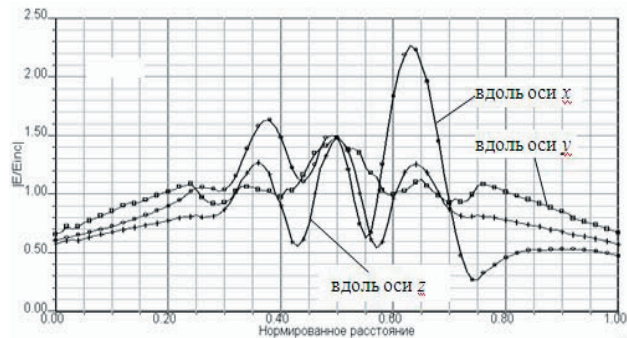


Рисунок 4. Распределение поля вдоль различных осей координат на частоте 8 ГГц

Отличие состоит лишь в том, что из-за симметрии рассматриваемой задачи распределение поля вдоль y и z симметрично относительно центра диэлектрического куба, а распределение вдоль оси x этим свойством не обладает. Очень похожее распределение поля имеет место и при возбуждении диэлектрического куба симметричным вибратором (рис. 2,б). В этом случае длина вибратора была выбрана таким образом, чтобы он имел резонанс на частоте 4 ГГц.

Это подтверждается приведенной на рис.5 частотной зависимостью модуля коэффициента отражения $|\Gamma_{вх}|$ от входа вибратора длиной $2l = 35$ мм и радиусом $\Delta = 1$ мм.

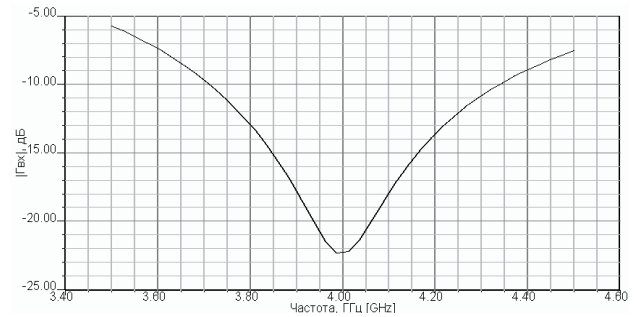
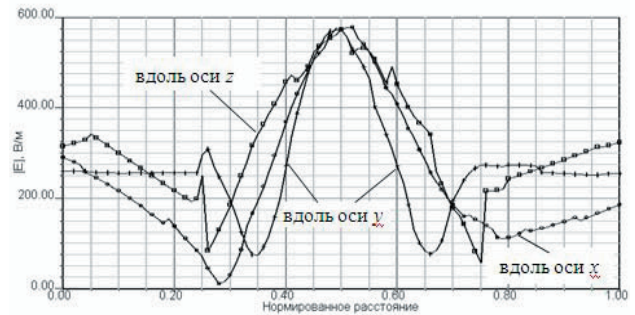
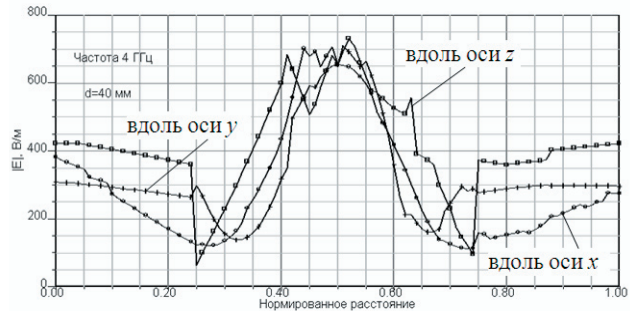


Рисунок 5. Частотная зависимость коэффициента отражения симметричного вибратора, настроенного на частоту $f=4$ ГГц

Видно, что на частоте 4 ГГц $|\Gamma_{вх}| < -20$ дБ. Рассчитанные распределения поля внутри и вблизи диэлектрика показаны на рис. 6,а.



а)



б)

Рисунок 6. Распределение поля вдоль различных осей координат на частоте 4 ГГц при возбуждении вибраторным а) и щелевым б) излучателями

Как и в случае возбуждения, плоской волной, распределение поля на этой частоте имеет один максимум в центре куба и плавно спадает при приближении к его граням. Резкое изменение поля вдоль оси z при $z'=0,25$ и $z'=0,75$ объясняется тем, что поле внутри диэлектрика имеет преобладающую компоненту E_z , которая на верхней и нижней гранях куба, согласно граничным условиям электродинамики, должна претерпевать скачок.

Совершенно аналогичное распределение поля наблюдается и для диэлектрического куба, возбуждаемого щелевым излучателем, также настроенным на частоту 4 ГГц (рис. 6,б).

Таким образом, проведенное исследование распределения поля внутри и вблизи диэлектрического объекта показали, что оно слабо зависит от способа возбуждения. Отмеченный выше факт, что с повышением частоты распределение поля приобретает осциллирующий характер, свидетельствует о том, что существенную роль в формировании поля в диэлектрике играют резонансные свойства объекта. Для подтверждения этого была вычислена частотная характеристика коэффициента отражения от входа волновода, питающего щелевой излучатель, показанная на рис. 7.

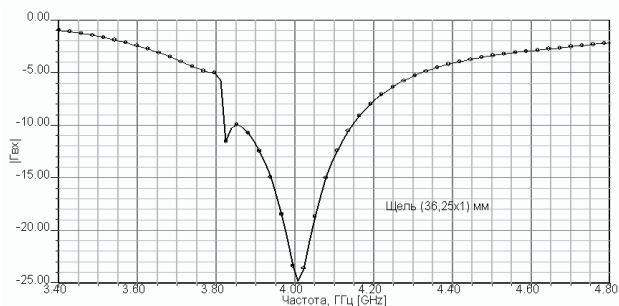


Рисунок 7. Частотная характеристика коэффициента отражения щелевого излучателя, возбуждаемого прямоугольным волноводом

Наблюдаются два резонанса на частотах 3,82 ГГц и 4 ГГц. Резонанс на частоте 4 ГГц обусловлен резонансными свойствами щели. Резонанс на частоте 3,82 ГГц определяется резонансными свойствами диэлектрического объекта (при излучении щели в однородное полупространство резонанс на этой частоте отсутствует). Подтверждается это и распределением электрического поля на частоте 3,82 ГГц, показанным на рис. 8. Сравнивая данные распределения с распределениями на частоте 4 ГГц (рис. 6,б) видим их идентичность, за исключением того, что на частоте 3,82 ГГц амплитуда поля в максимуме практически на порядок больше, чем на частоте 4 ГГц, а сами кривые более сглажены. Вследствие этого можно утверждать, что 3,82 ГГц является частотой собственного резонанса диэлектрического куба.

Одна вариация поля по координатам позволяет предположить, что это резонанс на основном типе колебаний, что подтверждается и результатами расчета для диэлектрического куба, расположенного внутри

отрезка прямоугольного волновода, возбуждаемого основным типом волны и нагруженным на согласованную нагрузку.

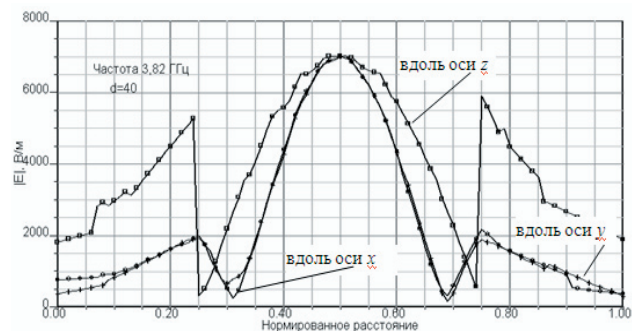


Рисунок 8. Распределение поля вдоль различных осей координат на частоте первого резонанса диэлектрического объекта, возбужденного щелевым излучателем

На рис. 9 показана частотная зависимость коэффициента отражения и коэффициента передачи в диапазоне 3,4...4,8 ГГц для волновода сечением 58×29 мм (волновод МЭК-51).

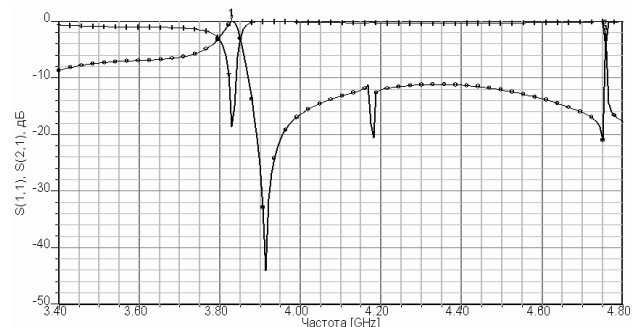
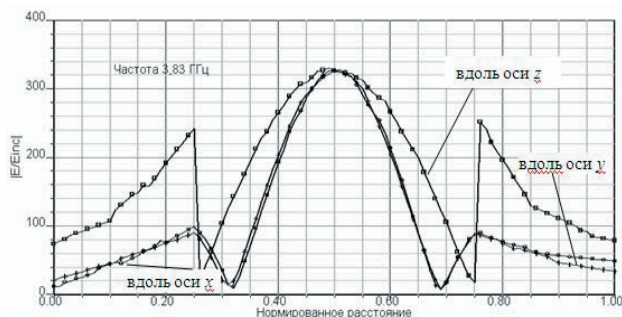


Рисунок 9. Частотная характеристика коэффициента отражения и коэффициента передачи отрезка прямоугольного волновода, нагруженного диэлектрическим объектом

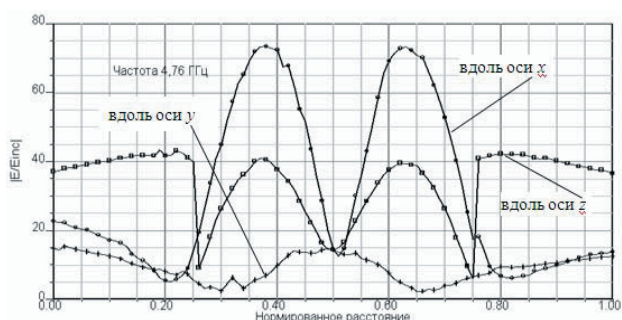
Как следует из характеристики, в этой полосе частот наблюдается два резонанса (на частотах 3,83 ГГц и 3,82 ГГц), которые проявляются в резком увеличении коэффициента отражения и, естественно, в уменьшении коэффициента передачи. На рис. 10,а показано распределение поля вдоль различных осей координат на частоте 3,83 ГГц.

Совпадение распределений поля при различных способах возбуждения позволяет сделать обоснованный вывод о том, что это собственный резонанс диэлектрического объекта (куба). Для частоты ближайшего соседнего резонанса было получено значение 4,76 ГГц.

Распределение поля на этой частоте показано на рис. 10,б. Видно, что оно имеет осциллирующий характер, то есть это резонанс на одном из высших типов собственных колебаний диэлектрического куба.



а)



б)

Рис. 10. Распределение поля вдоль различных осей координат на частотах первого а) и второго б) резонансов диэлектрического объекта, расположенного в прямоугольном волноводе

4. Выводы

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. При выборе частоты электромагнитного воздействия необходимо учитывать наличие собственных резонансов диэлектрической среды, в которой находится биологический объект.

2. Частоту внешнего воздействия целесообразно выбирать равной собственной частоте основного типа колебаний, так как на этой частоте, во-первых, распределение поля не зависит от способа возбуждения электромагнитного поля и, во-вторых, амплитуда электрического поля максимальна в центре диэлектрического объекта и равномерно спадает при приближении к его

граням. Последнее облегчает позиционирование биологического объекта, предназначенного для энергоинформационного воздействия, в окрестности максимума напряженности электрического поля.

3. Независимость на резонансных частотах распределения поля внутри диэлектрического объекта от способа возбуждения позволяет предложить несколько способов реализации устройств электромагнитного воздействия на биологические объекты. Наиболее перспективным представляется реализация устройства закрытого типа, в котором питательная среда с биологическим объектом находится внутри прямоугольного волновода, возбуждаемого волной основного типа, однако этот вопрос требует проведения дальнейших исследований.

Литература

1. Зубець М.В. Сучасний стан та перспективи генетично-селекційного і біотехнологічного моніторингу в тваринництві України / М.В. Зубець, В.П. Буркат, М.Я. Єфіменко, С.І. Ковтун, Б.Є. Подоба // Вісн. Сумського нац. аграр. ун-ту. – 2002. – Вип. 6 – С. 3 – 12.
2. Завертяев Б.П. Биотехнология в воспроизводстве и селекции крупного рогатого скота. / Л.: Агрпромиздат, 1989. – 255 с.
3. Исмаилов Э. Ш. Биофизическое действие СВЧ -излучений. / М., Энергоатомиздат, 1987. – 156 с.
4. Чернова Г. В. Некоторые особенности реагирования модельных объектов на ЭМИ КВЧ ММ-диапазона / Чернова Г. В., Каплан М. А., Арсланов Т. А. // Труды научно - практич. конф. «Река Ока-третье тысячелетие». Калуга, Изд-во КГПУ им. К.Э. Циолковского. – 2001. – С. 14 – 21.
5. Ефремов Ю.И. Воздействие радиоволн крайне высоких частот на биологические объекты и перспективы его применения / Ю.И. Ефремов, М.А. Кревский // Вестник научно – технического развития – 2007. № 4 – С. 34 – 45.
6. Математические модели электродинамики / А.С. Ильинский, В.В. Кравцов, А.Г. Свешников. – М.: Высш. шк., 1991. – 224 с.
7. Matthew N.O. Sadiku. Numerical Techniques in Electromagnetics. – CRC Press. - 2000. - 560 p.
8. Манк М. Биология развития млекопитающих. Методы. / М.: Мир, 1990. – 406 с.