

#### 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2024-2-197-202

УДК 537.874.82

### Развитие подхода к математическому моделированию электромагнитной обстановки с учетом мощности поглощенной дозы

А. С. Соловской<sup>✉</sup>, старший преподаватель, аспирант кафедры «Электрификация производства и быта»

Е. В. Титов, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научного управления, профессор кафедры «Электрификация производства и быта»

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

<sup>✉</sup>solovskoyas@mail.ru.

**Резюме.** В эпоху интенсивной автоматизации технологических процессов в производственной и бытовой сферах агропромышленного комплекса остро ставится вопрос соблюдения требований электромагнитной безопасности. В связи с этим актуальной проблемой является оценка опасности электромагнитной обстановки в условиях нестабильности воздействующих составляющих электромагнитного поля. Математическое моделирование позволяет определять значения параметров электромагнитного поля в произвольной точке исследуемого пространства в произвольный момент времени. Повышение наглядности результатов моделирования электромагнитной обстановки обеспечивается за счет использования новых принципов и алгоритмов формирования электромагнитных портретов и картин опасности контролируемого пространства с объемными структурами сложной геометрической формы с учетом комплексного влияния на человека с учетом дозиметрических параметров. В статье рассмотрены особенности математического моделирования электромагнитной обстановки посредством метода конечного интегрирования с учетом такого дозиметрического параметра электромагнитного поля, как мощность поглощенной дозы, а также обобщенная конечно-разностная схема для решения уравнений Максвелла. Подход к решению электромагнитных задач методом конечного интегрирования связан с матрично-векторной формулировкой, позволяющая использовать значительные средства для анализа, согласованности и устойчивости задач, что приводит к возможности всестороннего расширения FIT метода. Представлены управляющие и определяющие выражения для математического моделирования методом конечного интегрирования, характеризующие свойства конкретных материалов на исследуемом объекте. Предложена пространственно-временная схема вычисления параметров электромагнитного поля для одномерного пространства FIT методом. Представлены выражения для определения напряженности электрического и магнитного полей для одномерного и трехмерного пространств в терминах конечного интегрирования с учетом мощности поглощенной дозы.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, математическое моделирование, уравнения Максвелла, конечное интегрирование, SAR, электромагнитная обстановка, FIT метод, мощность поглощенной дозы.

**Для цитирования:** Соловской А. С., Титов Е. В. Развитие подхода к математическому моделированию электромагнитной обстановки с учетом мощности поглощенной дозы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №2 (66). С. 197-202. doi:10.18286/1816-4501-2024-2-197-202

### Development of an approach to mathematical modelling of the electromagnetic environment taking into account the specific absorption rate

A. S. Solovskoy<sup>✉</sup>, E. V. Titov

FSBEI HE Altai State Technical University named after I.I. Polzunov

656038, Barnaul, 46 Lenina Ave.

<sup>✉</sup>solovskoyas@mail.ru

**Abstract.** The issue of compliance with electromagnetic safety requirements is acute in the era of intensive automation of technological processes. In this connection, the actual problem is the assessment of the electromagnetic hazard in the conditions of instability of the influencing components of the electromagnetic field. Mathematical modelling allows to determine the values of electromagnetic field parameters in any point of the investigated space at any time. The improvement of the results of the modelling of the electromagnetic situation is provided by the application of new principles and algorithms of the formation of electromagnetic portraits and hazard pictures of the controlled space with

volumetric structures of complex geometric shape, taking into account the complex influence on biological objects in terms of dosimetric parameters. The article describes the peculiarities of the mathematical modelling of the electromagnetic situation by means of the finite integration method taking into account such dosimetric parameters of the electromagnetic field as the specific absorption rate, as well as the generalised finite difference scheme for the solution of Maxwell's equations. The finite integration approach to solving electromagnetic problems is related to the matrix-vector formulation, which allows significant facilities for the analysis, consistency and stability of the problems, leading to the possibility of a comprehensive extension of the FIT method. The governing and defining expressions for mathematical modelling by the finite integration method are presented, characterising the properties of specific materials at the investigated object. A spatio-temporal scheme for calculating the electromagnetic field parameters for one-dimensional space by the FIT method is proposed. Expressions are given for specification of electric and magnetic field strengths for one-dimensional and three-dimensional space in terms of finite integration, taking into account the specific absorption rate.

**Keywords:** electromagnetic field, mathematical modelling, Maxwell's equations, finite integration, SAR, electromagnetic environment, FIT method, specific absorption rate.

**For citation:** Solovskoy A. S., Titov E. V. Development of an approach to mathematical modelling of the electromagnetic environment taking into account the specific absorption rate // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2024;2(66): 197-202 doi:10.18286/1816-4501-2024-2-197-202

#### Введение

Интенсивное использование электромагнитной энергии в производственной и бытовой сферах агропромышленного комплекса приводит к ухудшению электромагнитной обстановки (ЭМО) [1, 2]. Энергия электромагнитного поля (ЭМП) часто применяется при воздействии на продукцию сельскохозяйственного производства для повышения ее качественных характеристик и снижения потерь посадочного материала в растениеводстве, при профилактическом облучении в животноводстве и птицеводстве для оздоровления, повышения продуктивности и снижения уровня падежа сельскохозяйственных животных и птиц [2, 3], что повышает актуальность оценки электромагнитной обстановки.

Оценка ЭМО основывается на результатах математического моделирования и позволяет прогнозировать ее состояние в условиях нестабильности воздействующих составляющих электромагнитного поля [1]. Инструментальный контроль необходимо проводить в строгом соответствии с действующей нормативно-методической документацией по осуществлению электромагнитного мониторинга [2, 3].

Одной из основных задач мониторинга ЭМО является обеспечение электромагнитной безопасности при неопределенности характера распределения в пространстве интенсивности и частотных характеристик ЭМП в условиях одновременного воздействия его составляющих [2]. Как известно, электромагнитный мониторинг включает в себя измерение воздействующего фактора, оценку состояния среды по нормируемым критериям и прогнозирование состояния электромагнитной обстановки по воздействующему фактору [2, 3].

Критериями оценки электромагнитной обстановки, установленными в [4], для различных частотных диапазонов являются напряженность постоянных и переменных магнитных и электрических полей, а также плотность потока энергии. При этом в отличие от европейского подхода в России критерием оценки ЭМП в частотном диапазоне 300 МГц - 300 ГГц считается только плотность потока энергии,

не позволяющая полно охарактеризовать опасность воздействия ЭМП на людей [4-6].

В соответствии с ранее разработанным способом [1, 6] компьютерное моделирование электромагнитной обстановки внутри производственных и коммунально-бытовых объектов проводилось с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD). Однако, несмотря на широкие возможности этого метода, можно выделить его существенный недостаток, заключающийся в ограниченном расчетном объеме моделируемого пространства, что в большинстве случаев достигается за счет задания искусственных граничных условий. Многократное использование граничных условий приводит к существенным искажениям картины моделируемой обстановки вследствие увеличения расчетной области [1]. В соответствии с этим целью работы является развитие подхода к математическому моделированию ЭМП в условиях комплексного влияния его составляющих внутри и вне исследуемых объектов для повышения объективности оценки опасности электромагнитной обстановки.

#### Материалы и методы

Плотность потока энергии является характеристикой поля в определенной точке исследуемого пространства [3, 7]. В связи с этим данный параметр полностью не отражает степень опасности воздействия ЭМП на человека, поскольку не учитывается взаимодействие энергии поля с его биологическими тканями, что обосновывает целесообразность применения интегральной оценки электромагнитной обстановки [6]. При этом Международная электротехническая комиссия (IEC), членом которой является Россия, уже приняла решение по введению в регламентирующие документы мощности поглощенной дозы (SAR) как одного из основных критериев оценки электромагнитной безопасности [2, 3].

Контроль нормируемых параметров электромагнитного поля не позволяет учитывать поглощение его энергии биологическими тканями [4-7]. Это связано с тем, что ЭМП оказывает воздействие не только на полярные молекулы (молекулы воды), но

и на свободно движущиеся заряженные частицы. В этом случае происходит вращение молекул и движение заряженных частиц, взаимодействующих с другими молекулами и заряженными частицами, преобразуя полученную кинетическую энергию в тепловую, которая, как известно, выполняет важную функцию при протекании реакций в биологических тканях [8]. Длительное влияние переменного электромагнитного поля высокой интенсивности в частотном диапазоне до 10 МГц приводит к электрической стимуляции нервов [8, 9]. При его кратковременном воздействии образуется электрический пробой клеточных мембран с дальнейшей дезинтеграцией цитоплазматической мембраны, что приводит к развитию клеточного патологического процесса [9]. В соответствии с этим, контроль электромагнитной обстановки должен осуществляться с учетом степени поглощения энергии ЭМП биологическими тканями человека.

В соответствии со стандартами IEC в области дозиметрии неионизирующих электромагнитных полей [2-3] одним из основных параметров является мощность поглощенной дозы, обозначаемая в международных документах как SAR (specific absorbed rate) [9]. Под величиной SAR принято понимать количество энергии электромагнитного поля, поглощенной единицей объема или массы тела (ткани) в единицу времени [8]. Определяется этот параметр чаще всего с использованием выражения (1) [9, 10]

$$SAR_{\text{лок}} = \frac{\sigma E^2}{\rho} = \frac{J^2}{\rho\sigma} = c_i \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

где  $\sigma$  – электрическая проводимость, См/м;  
 $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  
 $\rho$  – плотность биологических тканей, кг/м<sup>3</sup>;  
 $J$  – плотность электрического тока, А/м<sup>2</sup>;  
 $c_i$  – теплоемкость среды, Дж/(кг·К);  
 $dT/dt'$  – временная производная температуры человеческих тканей, К/с.

### Результаты

Для формирования картин распределения ЭМП используются результаты математического моделирования на основе уравнений Максвелла. Современный подход к решению системы уравнений Максвелла заключается в использовании численных методов [11, 12]. В зависимости от математического аппарата, особенностей моделируемых объектов и решаемых задач в области вычислительной электродинамики можно выделить широко применяемые в настоящее время для моделирования электромагнитной обстановки методы расчета, подробно рассмотренные в [1, 11, 12]: метод конечных разностей во временной области (FDTD) и метод конечного интегрирования (FIT).

Метод конечного интегрирования представляет собой схему пространственной дискретизации для численного решения задач электромагнитного поля во временной и частотной областях, при котором физические свойства полей сохраняются в дискретном пространстве [13-15]. Уравнения Максвелла и связанные с ними дополнительные уравнения преобразуются из непрерывного в дискретное пространство путем распределения электрических напряжений по краям и

электрических потоков на гранях первой сетки (первичной), а также магнитных напряжений по краям и магнитных потоков на гранях второй сетки (дуальной). Область вычисления FIT метода, являющегося частным случаем метода конечных разностей во временной области, разбивается на конечное число объемных ячеек (FIT-ячейки), что приводит к конечной вычислительной сетке интегрирования [13].

Особенность расчета методом конечного интегрирования заключается в отсутствии ограничений на тип используемой сетки разбиения [13]. Уравнения Максвелла, полученные с помощью метода конечного интегрирования, задаются в следующем виде [14, 15]:

$$\int_{\partial A} E \cdot ds = - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dA \rightarrow C\hat{e} = - \frac{d}{dt} \hat{b} \quad (2)$$

$$\int_{\partial A} H \cdot ds = - \int_A \left( \frac{\partial D}{\partial t} + J \right) \cdot dA \rightarrow \hat{C}\hat{h} = \hat{j} + \frac{d}{dt} \hat{d} \quad (3)$$

$$\int_{\partial V} B \cdot dA = 0 \rightarrow S\hat{b} = 0 \quad (4)$$

$$\int_{\partial V} D \cdot dA = \int_V \rho dv \rightarrow S\hat{d} = q \quad (5)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;

$D$  – электрическая индукция, Кл/м<sup>2</sup>;

$J$  – плотность электрического тока, А/м<sup>2</sup>;

$\hat{C}$  – топологическая матрица, представляющая собой матрицу пересечения ребер с гранями на дуальной сетке;

$\hat{j}$  – плотность электрического тока через грань ячейки, А/м<sup>2</sup>

$\hat{d}$  – величина электрической индукции через грань ячейки, Кл/м<sup>2</sup>;

$V$  – двумерная замкнутая поверхность, ограничивающая объем;

$\rho$  – объемная плотность электрического заряда, Кл/м<sup>3</sup>;

$S$  – топологическая матрица, представляющая собой матрицу дискретной дивергенции на первичной сетке;

$\hat{S}$  – топологическая матрица, представляющая собой матрицу дискретной дивергенции на дуальной сетке.

Управляющие уравнения электромагнитных волн для метода конечного интегрирования представляются в виде (6) и (7) [14].

$$\frac{\partial}{\partial t} B(R, t) = -\nabla \cdot E(R, t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} D(R, t) = \nabla \cdot \tilde{H}(R, t) - \tilde{j}_e(R, t) \quad (7)$$

где  $\tilde{B}$  – вектор плотности магнитного индукции на первичной сетке, В·с/м<sup>2</sup>;

$\tilde{R}$  – вектор положения в декартовых координатах;

с тремя ортонормальными единичными векторами  $\hat{e}_i$ ;

$t$  – время, с;

$\nabla$  – оператор Гамильтона;

$E$  – вектор напряженности электрического поля, В/м;

$\tilde{D}$  – вектор электрической индукции, А·с/м<sup>2</sup>;

$\tilde{H}$  – вектор напряженности магнитного поля на дуальной сетке, А/м;

$\vec{j}_e$  – вектор плотности электрического тока на дуальной сетке, А/м<sup>2</sup>.

При моделировании электромагнитной обстановки управляющие уравнения (6) и (7) дополняются определяющими выражениями, характеризующими свойства исходных материалов и записываемые в виде (8) и (9) [14].

$$D(R, t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(R) \cdot E(R, t) \quad (8)$$

$$B(R, t) = \mu_0 \mu_r(R) \cdot \vec{H}(R, t) \quad (9)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная (8,85·10<sup>-12</sup> Ф/м);  
 $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\mu_0$  – магнитная постоянная (1,26·10<sup>-6</sup> Гн/м);

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды.

#### Обсуждение

В соответствии со схемой интегрирования по времени FIT метода управляющие уравнения (6) и (7) необходимо представлять в интегральной форме, используя интегральные теоремы Гаусса и Стокса и вводить определяющие уравнения (8) и (9) [13-15]. Учитывая

представление структуры вокселя в виде первичной и дуальной ячеек, вектор плотности магнитной индукции на первичной сетке  $\vec{B}$  можно преобразовать в вектор напряженности магнитного поля на дуальной сетке  $\vec{H}$ .

$$\iint_S \mu_0 \mu_r(R) \cdot \vec{H}(R, t) = - \oint_{C=\partial S} E(R, t) \cdot dR \quad (10)$$

$$\vec{H}(R, t) = \vec{H}(R, t_0) + \int_{t_0}^t \vec{H}(R, t') dt' \quad (11)$$

$$\iint_S [\varepsilon_0 \varepsilon_r(R) \cdot E(R, t)] \cdot dS = \oint_{C=\partial S} \left[ \frac{B(R, t)}{\mu_0 \mu_r(R)} \right] \cdot dR - \iint_S \vec{j}_e(r, t) \cdot dS \quad (12)$$

$$E(R, t) = E(R, t_0) + \int_{t_0}^t E(R, t') dt' \quad (13),$$

где  $S$  – замкнутая поверхность объема.

Уточненная пространственно-временная схема вычисления значений напряженностей электрического и магнитного полей в одномерном пространстве в соответствии с FIT методом представлена на рисунке 1. При этом неизвестные величины фиксируются поочередно во времени как в последовательном алгоритме вычисления составляющих ЭМП во временной области.

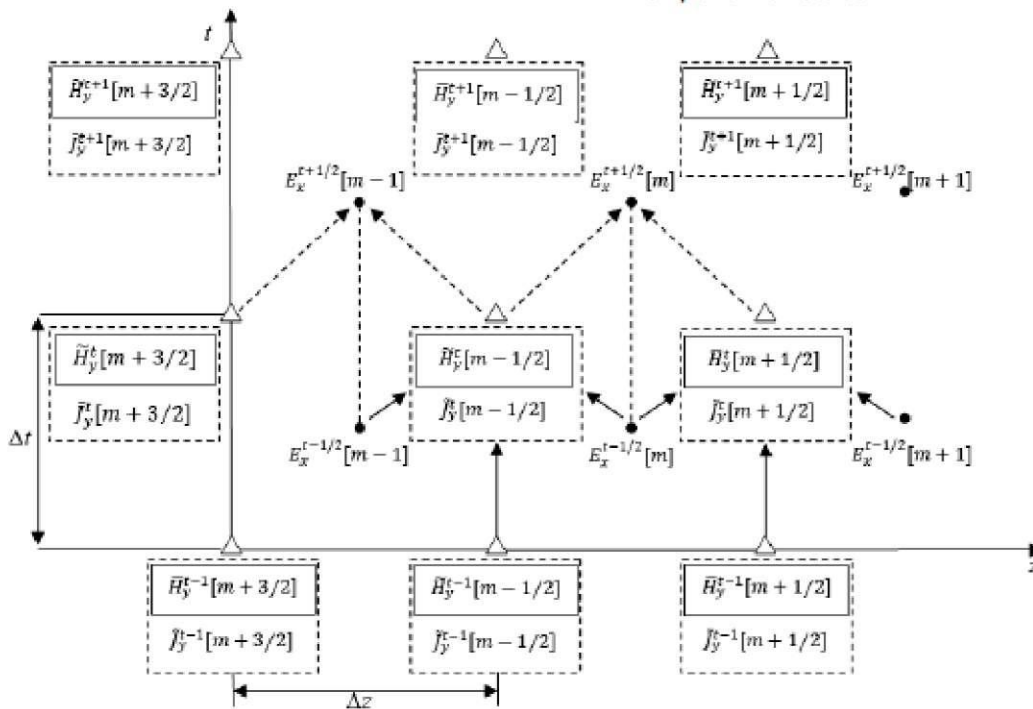


Рис. Расчетная структура FIT метода для случая с одномерным пространством

В соответствии с алгоритмом вычисления значение напряженности магнитного поля  $\vec{H}_y$  в момент времени  $t$  на дуальной сетке вычисляется в зависимости от значений напряженности магнитного поля  $\vec{H}_y$  на предыдущем временном шаге  $t-1$  в этой же ячейке и напряженности электрического поля  $E_x$  в середине предыдущего такта на первичной сетке в период времени  $t+1/2$  в соседних ячейках пространства. Напряженность электрического поля  $E_x$  на первичной сетке в момент времени  $t+1/2$  рассчитывается на основании значений напряженности электрического поля  $E_x$  на предыдущем временном

шаге  $t-1/2$  в этой же ячейке и напряженности магнитного поля  $\vec{H}_y$  и плотности электрического тока  $\vec{j}_y$  в соседних ячейках пространства на дуальной сетке в середине предыдущего такта в момент времени  $t$ . Вычисления для трехмерного случая строятся либо на таком же принципе, либо с учетом вектор-столбцов составляющих ЭМП.

В соответствии с пространственно-временной схемой вычисления (рис.) и с учетом поглощения энергии ЭМП биологической тканью (мощности поглощенной дозы) в широком частотном диапазоне, составляются уравнения (14) и (15), позволяющие определить напряженность электрического и

магнитного поля для одномерного случая в терминах конечного интегрирования.

$$\vec{H}^{(t+1)} = \vec{H}^{(t)} - \Delta t M_{\mu}^{-1} \alpha C E^{(t+1/2)} \quad (14)$$

$$E^{(t+3/2)} = E^{(t+1/2)} + \Delta t M_{\varepsilon}^{-1} \left( \beta \left( \vec{C} \frac{H^{(t+1)}}{z} - M_{\sigma}^{-1} \vec{j}^{(t+1)} \right) \right) \quad (15)$$

где  $\xi = \frac{z^{(2t+1,2t)} \sigma}{\rho}$  – коэффициент связи мощности поглощенной дозы с напряженностью электрического поля;

$$\beta = \frac{\left( \frac{H^{(2t+1)}}{z} \right) \sigma}{\rho} \text{ – коэффициент связи мощности по-}$$

глощенной дозы с напряженностью магнитного поля;

$Z$  – волновое сопротивление вакуума, 377 Ом.

Определить параметры ЭМП с учетом обобщенных материальных матриц, описывающих свойства используемых на исследуемом объекте материалов, можно с помощью уравнений для одномерного случая (14) и (15). В случае с трехмерным пространством магнитную составляющую ЭМП можно определить с использованием формулы (16), электрическая составляющая определяется аналогично.

$$\vec{H}_x \left| \begin{matrix} t+1 \\ x, y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2} \end{matrix} \right. = \vec{H}_x \left| \begin{matrix} t \\ x, y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2} \end{matrix} \right. - \Delta t M_{\mu}^{-1} \alpha \left( \frac{E_y \left| \begin{matrix} t+\frac{1}{2} \\ x, y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2} \end{matrix} \right. - E_y \left| \begin{matrix} t+\frac{1}{2} \\ x, y + \frac{1}{2}, z \end{matrix} \right.}{\Delta z} + \frac{E_z \left| \begin{matrix} t+\frac{1}{2} \\ x, y + 1, z + \frac{1}{2} \end{matrix} \right. - E_z \left| \begin{matrix} t+\frac{1}{2} \\ x, y, z + \frac{1}{2} \end{matrix} \right.}{\Delta y} \right) \quad (16)$$

### Литература

1. Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот / Е. В. Титов, А. А. Сошников, В. Ю. Васильев и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 3(209). С. 102-108. doi: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-102-108.
2. Ершова И. Г. Обоснование параметров размораживателя молозива животных с СВЧ-энергоподводом в коаксиальный резонатор // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 3(101). С. 179-184. doi: 10.37670/2073-0853-2023-101-3-179-184.
3. Научно-технические основы разработки установок с СВЧ-энергоподводом для переработки сырья агропредприятий / Г. В. Новикова, В. Ф. Сторчевой, М. В. Просвирякова и др. // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 1(50). С. 18-27. doi: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-18-27.
4. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Москва: Роспотребнадзор, 2021. 469 с.
5. Влияние электромагнитных полей крайне низких и сверхнизких частот и биопрепарата витаглан на активность пероксидазы, полифенолоксидазы и содержание полифенольных веществ в яблоках в процессе хранения / С. М. Горлов, Т. В. Першакова, В. В. Лисовой // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК - продукты здорового питания. – 2020. № 1. С. 59-69.
6. Titov E. V., Soshnikov A. A., Migalev I. E. Computer Imaging of Electromagnetic Environment in Air Space with Industrial Electromagnetic Field Sources in Conditions of Combined Influence of EM Radiation // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. 2022. Vol. 22. No. 1. P. 34-40. doi: 10.26866/jees.2022.1.r.58.
7. Соловской А. С. Развитие принципов контроля электромагнитной обстановки с учетом дозиметрических параметров // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 1. С. 72-79. doi: 10.24143/1812-9498-2023-1-72-79.
8. Jagetia G. C. Genotoxic effects of electromagnetic field radiations from mobile phones // Environmental Research. 2022. Vol. 212. P. 113321. doi: 10.1016/j.envres.2022.113321.
9. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) / G. Ziegelberger, R. Croft, M. Feychting et al. // Health Physics. 2020. Vol. 118. No 5. P. 483-524. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.

где  $\vec{H}_x \left| \begin{matrix} t \\ x \end{matrix} \right.$  – значение напряженности магнитного поля  $H_x$  в момент времени  $t$  в ячейке пространства под индексом  $x$  на дуальной сетке;

$\Delta t$  – временной шаг моделирования;

$\Delta x$  – шаг моделирования по оси  $x$  в первичной и дуальной сетках соответственно;

$E_x \left| \begin{matrix} t \\ x \end{matrix} \right.$  – значение напряженности электрического поля  $E_x$  в момент времени  $t$  в ячейке пространства под индексом  $x$ .

### Заключение

Расширяя возможности метода конечных разностей во временной области, FIT метод позволяет моделировать электромагнитную обстановку при отсутствии ограничений на тип используемой сетки разбиения, поддерживает возможность построения неортогональной и структурированной сеток, а также обеспечивает высокую эффективность расчета при нестационарных процессах в неоднородном и анизотропном пространстве для объектов с произвольной формой границ. За счет возможности добавления в расчетную структуру метода конечного интегрирования дозиметрических параметров ЭМП, в частности мощности поглощенной дозы, может быть повышена вычислимость компьютерной модели, адекватность моделирования электромагнитной обстановки и точность оценки опасности воздействия электромагнитного поля на людей, профессионально связанных и несвязанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников.

10. Перов С. Ю., Белая О. В. Электромагнитная обстановка, создаваемая базовыми станциями сотовой связи в пилотной зоне 5G // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 6. С. 538-543. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-6-538-543.
11. The Electromagnetic Characteristics of the Four-Stage Series-Connected Fast Linear Transformer Driver Based on Time-Domain Finite Integration Technique / H. Qiu, S. Wang, Z. Wang, et al. // Transactions of Chinese Electrotechnical Society. 2022. Vol. 37. No. 4. P. 816-826. doi: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90321.
12. Rezinkina M. Simulation of Electromagnetic Waves Propagation in the Radio Electronic Systems // Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. 2022. P. 206-209. doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766964.
13. Radil R., Barabas J., Judakova Z. Comparison of Chosen Electric and Magnetic Field Parameters Influence on Biological Samples Using Numerical Modelling and Simulation Methods // Proceedings of 2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. 2020. P. 9238687. doi: 10.1109/CPEE50798.2020.9238687.
14. Automated netlist generation for 3D electrothermal and electromagnetic field problems / T. Casper, D. Duque, S. Schöps, et al. // Journal of Computational Electronics. 2019. Vol. 18. No. 4. P. 1306-1332. doi: 10.1007/s10825-019-01368-6.
15. Influence of Electromagnetic Fields and Microbial Pesticide Vitaplan on Stability of Apples During Storage / T. V. Pershakova, S. M. Gorlov, V. V. Lisovoy, et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. P. 022053. doi: 10.1088/1755-1315/640/2/022053.

#### References

1. Computer modelling of superimposed electromagnetic waves from electromagnetic field sources in a wide frequency range / E. V. Titov, A. A. Soshnikov, V. Y. Vasiliev, et al. // Vestnik of Altai State Agrarian University. 2022. No. 3(209). P. 102-108. doi: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-102-108.
2. Ershova I. G. Substantiation of the parameters of an animal colostrum defroster with microwave energy supply to a coaxial resonator / I. G. Ershova // Proceedings of Orenburg State Agrarian University. 2023. No 3(101). P. 179-184. doi: 10.37670/2073-0853-2023-101-3-179-184.
3. Scientific and technical bases for development of installations with microwave power supply for processing raw materials of agricultural enterprises / G. V. Novikova, V. F. Storcheva, M. V. Prosviryakova, et al. // Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture. 2023. Vol. 70. No. 1(50). P. 18-27. doi: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-18-27.
4. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness for humans of habitat factors. – Moscow: Rospotrebnadzor, 2021. 469 p.
5. Gorlov S. M., Pershakova T. V., Lisovoy V. V. The influence of electromagnetic fields of extremely low and ultra-low frequencies and vitaplan biopreparation on the activity of peroxidase, polyphenol oxidase and the content of polyphenolic substances in apples during storage // Technologies of food and processing industry of the agro industrial complex - healthy food products. 2020. No. 1. P. 59-69.
6. Titov E. V., Soshnikov A. A., Migalev I. E. Computer Imaging of Electromagnetic Environment in Air Space with Industrial Electromagnetic Field Sources in Conditions of Combined Influence of EM Radiation // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. 2022. Vol. 22. No. 1. P. 34-40. doi: 10.26866/jees.2022.1.r.58.
7. Solovskoy A. S. Development of the principles of electromagnetic situation control taking into account dosimetric parameters // Oil and gas technologies and environmental safety. 2023. No. 1. P. 72-79. doi: 10.24143/1812-9498-2023-1-72-79.
8. Jagetia G. C. Genotoxic effects of electromagnetic field radiations from mobile phones // Environmental Research. 2022. Vol. 212. P. 113321. doi: 10.1016/j.envres.2022.113321.
9. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) / G. Ziegelberger, R. Croft, M. Feychting, et al. // Health Physics. 2020. Vol. 118. No. 5. P. 483-524. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
10. Perov S. Yu., Belaya O. V. Electromagnetic environment created by cellular base stations in the pilot zone of 5G // Hygiene and Sanitation. 2023. Vol. 102. No. 6. P. 538-543. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-6-538-543.
11. The Electromagnetic Characteristics of the Four-Stage Series-Connected Fast Linear Transformer Driver Based on Time-Domain Finite Integration Technique / H. Qiu, S. Wang, Z. Wang, et al. // Transactions of Chinese Electrotechnical Society. – 2022. Vol. 37. No. 4. P. 816-826. doi: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90321.
12. Rezinkina M. Simulation of Electromagnetic Waves Propagation in the Radio Electronic Systems // Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. 2022. P. 206-209. doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766964.
13. Radil R., Barabas J., Judakova Z. Comparison of Chosen Electric and Magnetic Field Parameters Influence on Biological Samples Using Numerical Modelling and Simulation Methods // Proceedings of 2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. 2020. P. 9238687. doi: 10.1109/CPEE50798.2020.9238687.
14. Automated netlist generation for 3D electrothermal and electromagnetic field problems / T. Casper, D. Duque, S. Schöps, et al. // Journal of Computational Electronics. 2019. Vol. 18, No. 4. P. 1306-1332. doi: 10.1007/s10825-019-01368-6.
15. Influence of Electromagnetic Fields and Microbial Pesticide Vitaplan on Stability of Apples During Storage / T. V. Pershakova, S. M. Gorlov, V. V. Lisovoy, et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. P. 022053. doi: 10.1088/1755-1315/640/2/022053.