

М.М. Резинкина

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ ДЛЯ ВЫБОРА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Описаний метод розрахунку електромагнітних полів в неоднорідних середовищах, виконаний в термінах модифікованого магнітного потенціалу при поділі плоскої електромагнітної хвилі на падаючу і відбиту. Для зменшення габаритів розрахункової області на її границях введені додаткові одновісне ідеально поглинаючі шари, що забезпечують швидке і безвідбивне загасання напруженостей електромагнітних полів (ЕМП). Особливістю таких шарів є вибір їх електричних параметрів такими, щоб забезпечити наявність в них не тільки резистивних, але і магнітних втрат. Математичне моделювання процесів при падінні ЕМП на провідне середовище, перед яким поміщені покриття з подібними властивостями показало можливість ефективного загасання в них ЕМП радіочастотного діапазону. В результаті проведених досліджень обрані параметри покриттів, що забезпечують мінімальне відбиття падаючих електромагнітних хвиль. Бібл. 11, рис. 3.

Ключові слова: електромагнітне поле, неоднорідні середовища, модифікований векторний магнітний потенціал, метод кінцевого інтегрування, ідеально узгоджені поглинаючі граничні шари.

Описан метод расчета электромагнитных полей в неоднородных средах, выполненный в терминах модифицированного магнитного потенциала при разделении плоской электромагнитной волны на падающую и отраженную. Для уменьшения габаритов расчетной области на ее границах введены дополнительные одноосно идеально поглощающие слои, обеспечивающие быстрое и безотражательное затухание напряженностей электромагнитных полей (ЭМП). Особенностью таких слоев является то, что их электрические параметры выбраны такими, чтобы обеспечить наличие в них не только резистивных, но и магнитных потерь. Математическое моделирование процессов при падении ЭМП на проводящую среду, перед которой помещены покрытия с подобными свойствами, показало возможность эффективного затухания в них ЭМП радиочастотного диапазона. В результате проведенных исследований выбраны параметры покрытий, обеспечивающих минимальное отражение падающих электромагнитных волн. Библ. 11, рис. 3.

Ключевые слова: электромагнитное поле, неоднородные среды, модифицированный векторный магнитный потенциал, метод конечного интегрирования, идеально согласованные поглощающие граничные слои.

Введение. При решении ряда проблем теоретической электротехники и электрофизики возникают задачи расчета электромагнитных полей (ЭМП), в том числе при падении волны на неоднородные среды с плоскими границами раздела. Такие задачи приходится решать, например, при выборе параметров защитных радиопоглощающих покрытий протяженных проводящих объектов от высокочастотных излучений. Поскольку в этом случае применение аналитических методов [1] невозможно, необходимо развитие численных методов. Учитывая плоскую геометрию рассматриваемых систем, наиболее эффективным представляется использование конечно-разностных методов (см. например [2, 3]). Для снижения порядка решаемой системы уравнений может быть использована постановка задачи в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала [4]. В отличие от традиционной постановки через напряженности ЭМП такой подход позволяет уменьшить требуемые компьютерные ресурсы за счет того, что при расчете неизвестными являются 3 компоненты модифицированного векторного магнитного потенциала, а не 3 компоненты напряженности электрического поля и 3 компоненты напряженности магнитного поля [4].

При наличии нескольких границ раздела сред с плоскими границами раздела эффективным представляется использование численного метода конечного интегрирования (МКИ) [5]. Суть данного метода состоит в наложении на рассматриваемую область прямоугольной расчетной сетки и интегрировании уравнений Максвелла по объемам или граням ее ячеек. Таким образом, решаемые уравнения получают с помощью законов сохранения. Причем, формулировка задачи расчета с помощью метода конечного интегрирования в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала при специальном выборе расчетной сетки обеспечивает автоматическое выполнение условий на границах раздела сред для векторов напряженностей и индукций ЭМП [6, 7].

Для ограничения расчетной зоны при определении ЭМП в открытых областях при формулировке задачи с

помощью напряженностей ЭМП используются так называемые *UPML* (одноосно идеально согласованные слои) [8]. Для решения задач, связанных с распространением высокочастотных колебаний в неоднородных средах с потерями, представляется важным развитие *UPML* применительно к формулировке задач в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала.

Целью работы является разработка метода расчета высокочастотных ЭМП в средах с потерями при использовании модифицированного векторного потенциала и *UPML*.

Постановка задачи расчета процесса падения плоской электромагнитной волны на слоистые среды. Для того чтобы уменьшить число уравнений при решении задачи расчета ЭМП будем использовать так называемый модифицированный векторный магнитный потенциал A [4].

В отсутствие сторонних источников электрического заряда дополнительным условием при работе со скалярным электрическим (φ) и векторным магнитным (A) потенциалами вместо напряженностей электрического (E) и магнитного (H) поля можно выбрать условие нормировки $\varphi = 0$ (см. например [1]). Тогда векторы магнитной индукции B и напряженности электрического поля E выражаются через A в виде:

$$B = \text{rot } A = \mu\mu_0 H; \quad (1)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}. \quad (2)$$

Для того, чтобы при падении на радиопоглощающее покрытие происходило безотражательное затухание ЭМП, необходимо обеспечить наличие потерь не только связанных с активной проводимостью среды, но и магнитных потерь.

Второе уравнение Максвелла с учетом магнитных потерь имеет вид [9, с. 69]:

$$\text{rot } E = -\left(\frac{\partial B}{\partial t} + \gamma_\mu H\right), \quad (3)$$

где γ_μ – эквивалентные магнитные потери [Ω/m].

© М.М. Резинкина

Учитывая (1), перепишем правую часть (3) в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \gamma \mu \mathbf{H} = \text{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\gamma \mu}{\mu \mu_0} \text{rot} \mathbf{A}.$$

Тогда (3) запишем как

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\text{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{\gamma \mu}{\mu \mu_0} \text{rot} \mathbf{A},$$

откуда для кусочно-однородных сред можно выразить \mathbf{E} через \mathbf{A} следующим образом:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{\gamma \mu}{\mu \mu_0} \mathbf{A}. \quad (4)$$

При этом первое уравнение Максвелла

$$\text{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},$$

где \mathbf{D} – индукция электрического поля; γ – удельная электропроводность приобретает вид:

$$\text{rot} \frac{\text{rot} \mathbf{A}}{\mu \mu_0} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} - \frac{\gamma \mu}{\mu \mu_0} \mathbf{A} - \frac{\gamma \mu \varepsilon_0 \varepsilon}{\mu \mu_0} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (5)$$

Для получения численного решения для векторного потенциала рассматриваемая область разбивалась на ячейки-параллелепипеды (рис. 1) так, чтобы узлы расчетной сетки (i, j, k) лежали на границах раздела сред. Полагалось, что электрические свойства среды в пределах каждой из ячеек однородны.

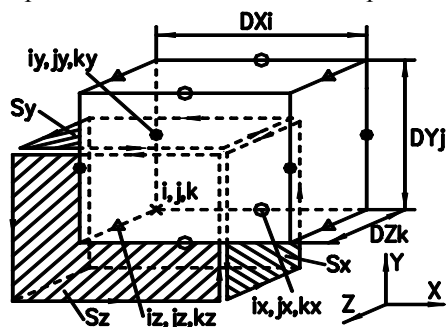


Рис. 1. Ячейка расчетной схемы

Решаемое уравнение было получено в результате интегрирования (5) по сечениям, перпендикулярным координатным осям. Тогда уравнения для компонент вектора \mathbf{A} можно записать в результате интегрирования (5) по сечениям S_x, S_y, S_z (см. рис. 1) и использования теоремы Стокса. Так для A_y – y -ой компоненты вектора \mathbf{A} – получим:

$$\oint_{l_y} \frac{\text{rot} \mathbf{A}}{\mu \mu_0} dl = \int_{S_y} \left(-\gamma \frac{\partial A_y}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} - \frac{\gamma \mu}{\mu \mu_0} A_y - \frac{\gamma \mu \varepsilon_0 \varepsilon}{\mu \mu_0} \frac{\partial A_y}{\partial t} \right) dS, \quad (6)$$

где l_y – контур, охватывающий площадку S_y .

В результате интегрирования (5) по соответствующим площадкам: S_x для A_x и S_z для A_z (см. рис. 1), аналогичные выражения записываются для остальных компонент векторного потенциала. Перейдя к разностной форме записи, получим систему решаемых уравнений.

Особенности численного расчета ЭМП с помощью модифицированного векторного магнитного потенциала. При расчете электромагнитных процессов при падении на объекты плоской электромагнитной волны, имеющей конечную длину и гармоническое заполнение, возникает проблема задания условий для напряженностей и потенциала ЭМП на

границах расчетной области. Для ограничения расчетной области при применении конечно-разностных методов численного расчета обычно используется введение на внешних границах расчетной области так называемых одноосных идеально согласованных слоев (*UPML*), обеспечивающих быстрое и безотражательное затухание ЭМП. Однако при этом для рассматриваемой постановки задачи нельзя задать на внешних границах *UPML* нулевые граничные условия для потенциалов и напряженностей ЭМП. Дело в том, что кроме отраженной волны, которую действительно можно полагать равной нулю на достаточном удалении от вызывающего ее объекта, существует еще падающая волна, которая может с течением времени быть не равной нулю и на достаточном удалении от объекта. Для решения данной проблемы используется представление электромагнитной волны в виде суммы падающей и отраженной волн. Распространение обеих этих волн описывается одними и теми же уравнениями Максвелла. При этом расчетная область также разделяется на две зоны: первую (I), внутреннюю, в которой расположен исследуемый объект, и вторую (II) – наружную, расположенную между границами 1-й области и внутренними границами *UPML*. При этом в зоне I рассчитывается распространение суммарной волны, содержащей и падающую, и отраженную волны. В зоне II рассчитывается распространение только отраженной волны. На границах зон I и II учитывается переход от расчета только отраженной и полной суммарной волны. При этом на внешних границах *UPML* могут быть использованы нулевые условия для потенциалов и напряженностей ЭМП, поскольку они относятся только к отраженной волне.

В [9] приводится решение задачи распространения и отражения электромагнитных волн с помощью описанного подхода при использовании алгоритма Yee для расчета компонент напряженности электрического и магнитного поля. Данный подход был применен для решения задачи, сформулированной в терминах модифицированного векторного потенциала с помощью метода конечного интегрирования. При этом в разностных схемах появляются слагаемые, содержащие известные значения векторного потенциала, соответствующие падающей волне. Прибавление или вычитание данных слагаемых при записи решаемых уравнений для узлов, прилегающих к границе раздела подобластей I и II, позволил реализовать описанный выше подход. Поскольку величины падающей волны в каждый момент времени и для каждого узла расчетной схемы известны, они переносятся в правые части уравнений. Такие слагаемые прибавляются к правым частям разностных уравнений, записанных для узлов, лежащих на границах подобластей I и II, и вычитаются из правых частей разностных уравнений, записанных для узлов, расположенных в II в плоскостях перед границами подобластей I и II.

Введение *UPML* при расчете распространения электромагнитной волны в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала требует иного подхода, чем при решении через напряженности электрического и магнитного поля. Это связано с тем, что параметр s_μ

$$s_\mu = 1 + \frac{\gamma \mu}{j \omega \mu \mu_0}, \quad (7)$$

который выбирают равным s_ε

$$s_\varepsilon = 1 + \frac{\gamma}{j\omega\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (8)$$

при формулировке задачи через \underline{A} оказывается в знаменателе решаемого уравнения. Поэтому его преобразование при переходе из частотной области во временную невозможно. Для использования *UPML* при такой постановке предложено использовать в качестве поглощающих слоев среду, у которой $\varepsilon\omega$ и $\mu\omega$ намного меньше, чем γ и γ_μ соответственно. Для обеспечения условия неизменности скорости распространения электромагнитных волн и отсутствия отражений при падении ЭМП на *UPML* – слои, необходимо соблюдение равенства $s_\mu = s_\varepsilon$. При $\mu\omega \ll \gamma_\mu$ и $\varepsilon\omega \ll \gamma$:

$$s_\varepsilon \approx \frac{\gamma}{j\omega\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (9)$$

$$s_\mu \approx \frac{\gamma_\mu}{j\omega\mu\mu_0}. \quad (10)$$

Тогда из (9, 10) получим:

$$\frac{\gamma_\mu}{\mu\mu_0} = \frac{\gamma}{\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Отсюда соотношение между γ и γ_μ :

$$\gamma_\mu = \gamma \frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0} \approx 0.142 \cdot 10^6 \gamma \frac{\mu}{\varepsilon} [\Omega/\text{m}]. \quad (11)$$

Выражения для ЭМП в *UPML* – слоях получим, записав (6) через комплексы (обозначены подчеркиванием соответствующей величины) и учитывая (7, 8):

$$\oint_{l_y} \frac{\text{rot} \underline{A}}{\mu_0 \mu} dl = \int_{S_y} (-j\omega \underline{A}_y - (j\omega)^2 \varepsilon_0 \varepsilon \underline{A}_y - \frac{\gamma \gamma_\mu}{\mu_0 \mu} \underline{A}_y - j\omega \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu} \gamma_\mu \underline{A}_y) dS = \int_{S_y} [-(j\omega)^2 \varepsilon_0 \varepsilon \underline{A}_y (1 + \frac{\gamma}{j\omega \varepsilon_0 \varepsilon}) - j\omega \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu} \gamma_\mu \underline{A}_y (1 + \frac{\gamma}{j\omega \varepsilon_0 \varepsilon})] dS = - \int_{S_y} (j\omega)^2 \varepsilon_0 \varepsilon \underline{A}_y s_\varepsilon s_\mu dS.$$

Разделив обе части полученного выражения на \hat{s}_μ , запишем:

$$\oint_{l_y} \frac{\text{rot} \underline{A}}{\mu_0 \mu s_\mu} dl = - \int_{S_y} (j\omega)^2 \varepsilon_0 \varepsilon \underline{A}_y s_\varepsilon dS.$$

С учетом (9), (10) преобразуем последнее выражение к виду:

$$\oint_{l_y} \frac{j\omega \cdot \text{rot} \underline{A}}{\gamma_\mu} dl = - \int_{S_y} j\omega \gamma \underline{A}_y dS$$

Затем перейдем в последнем выражении от комплексной формы записи к функциям времени:

$$\oint_{l_y} \frac{\text{rot} [\partial \underline{A} / \partial t]}{\tilde{\gamma}_\mu} dl = - \int_{S_y} \tilde{\gamma} \cdot \frac{\partial \underline{A}_y}{\partial t} ds. \quad (12)$$

Численное решение получено в результате записи уравнений вида (6) и (12) для узлов расчетной сетки и замены дифференциальных операторов в них разностными аналогами. Для решения полученной

системы уравнений использовался метод прогонки (подробнее см. [6, 7]).

Для оценки эффективности предложенного метода введения *UPML* проведены численные эксперименты по расчету электромагнитных процессов при падении плоской электромагнитной волны на идеально проводящий лист. При этом полагалось, что ЭМП с $|\underline{E}|=1$ В/м с момента времени $t=0$ падает в направлении оси Oz , на проводящий лист, толщина которого $d=3\cdot\Delta$ (где Δ – шаг по пространству). Полагается, что данный лист расположен в плоскости $z=\text{const}$ и имеет размеры по координатам x и y на много порядков больше длины волны падающего ЭМП. При расчете на границах расчетной области в направлениях осей Ox , Oy и Oz использовались нулевые условия для векторного потенциала отраженных волн. Частота падающего ЭМП полагалась равной 10 ГГц. При расчетах шаг по времени полагался равным $\Delta t = T/200$, $\Delta = c\cdot T/200$ ($c = 3\cdot 10^8$ м/с). Параметры *UPML* были следующими: число слоев – $N=10$, γ изменялось по показательному закону с показателем 3 [8] от 35 См/м на внутренней границе *UPML* γ_μ изменялась в зависимости от γ в соответствии с (11). Габариты расчетной области в направлении оси Oz – $Z_{\text{max}} = 0.5\cdot\lambda$ (где λ – длина волны), число шагов в зоне отражения $\Pi - 10$.

На рис. 2 представлены рассчитанные временные развертки напряженности отраженного электрического поля $|\underline{E}_{\text{scat}}|$ при падении плоской электромагнитной волны на проводящий лист. Как видно из рисунка, вследствие того, что на границах расчетной области размещены *UPML* слои с описанными выше параметрами, относительная погрешность расчета напряженности $|\underline{E}_{\text{scat}}|$ не превышает 3 %, несмотря на существенное усечение длины расчетной области.

Таким образом, описана методика расчета распространения электромагнитной волны в средах с магнитными потерями в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала. При этом обеспечивается введение *UPML* на границах расчетной области, что было возможно ранее только при формулировке задачи через напряженности ЭМП.

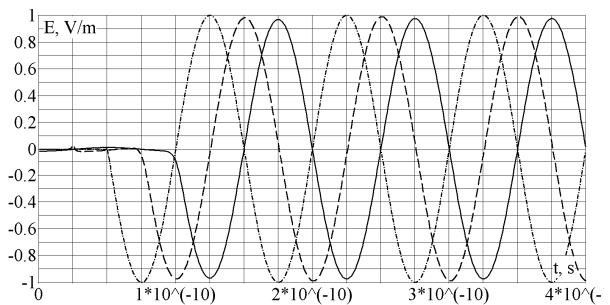


Рис. 2. Рассчитанные зависимости $|\underline{E}_{\text{scat}}|(t)$ для узлов, расположенных на различных расстояниях (z) от проводящего листа: $z = \lambda$ (—), $z = 0.5\cdot\lambda$ (---), $z = 0$ (- · - · -)

Математическое моделирование процессов падения ЭМП на слоистые покрытия с диэлектрическими и магнитными потерями. В качестве защитных покрытий от высокочастотного излучения в ряде случаев используются различные диэлектрики с низкими значениями коэффициента отражения и высокими значениями коэффициента поглощения радиоволн. Области применения радиопоглощающих покрытий различны. Так, они используются для создания экранов радиоприемных устройств, защиты биологических объектов от электромагнитного излу-

чения, оснащения специальных исследовательских камер и др. Данному вопросу посвящено большое число работ (см., например [10, 11]), однако проблема выбора параметров покрытий остается актуальной, поскольку вопрос существенного снижения амплитуды отраженной от проводящих объектов волн полностью не решен.

На рис. 3 представлены рассчитанные временные развертки напряженности электрического поля при падении плоской электромагнитной волны на проводящий лист, перед которым помещено радиопоглощающее покрытие со следующими параметрами: 1-й слой (ближайший к проводящему листу) – $\varepsilon = \mu = 300$, $\gamma = 315$ S/m, следующий слой – $\varepsilon = \mu = 100$, $\gamma = 275$ S/m, последний слой – $\varepsilon = \mu = 60$, $\gamma = 17.5$ S/m (γ_n изменялась в зависимости от γ в соответствии с (11)). Как видно из рисунка, вследствие затухания электромагнитной волны в слоях покрытия отражение от проводящего листа в установившемся режиме не превосходит 10 % от первоначального уровня отражения.

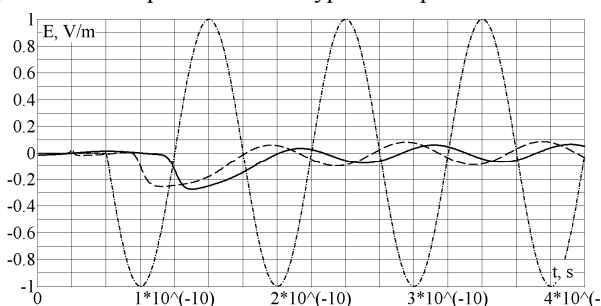


Рис. 3. Рассчитанные зависимости $|E_{\text{scat}}(t)$ при наличии перед проводящим листом радиопоглощающего покрытия для узлов, расположенных на различных расстояниях (z) от проводящего листа:

$$z = \lambda \text{ (—)}, -z = 0.5\lambda \text{ (- - -)}, -z = 0 \text{ (- \cdot - \cdot -)}$$

Выводы.

1. Предложен и апробирован путем сравнения с аналитическим решением метод расчета распространения электромагнитной волны в средах с потерями, расположенных в открытых областях, при формулировке задачи в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала и использовании UPML, реализация которого позволяет уменьшить затраты памяти и времени счетов по сравнению с формулировкой задачи через напряженности ЭМП.

2. Предложенный метод расчета является теоретической основой для разработки методики выбора параметров радиопоглощающих покрытий с электрическими и магнитными потерями, нанесение которых на проводящие объекты обеспечивает существенное снижение амплитуды отраженных радиоволн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Stratton J.A. *Electromagnetic theory*. NJ, IEEE Press, 2007. 614 p.
2. Yee K.S., Chen Jui Shuan, Chang A.H. Conformal finite-different time-domain (FDTD) with overlapping grids. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, vol.40, no.9, pp. 1068-1075. doi: 10.1109/8.166532.
3. Werner D.H., Mittra R. *Frontiers in electromagnetics*. New York, IEEE Press, 1999. 876 p.
4. Biro O., Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite-element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, vol.25, no.4, pp. 3145-3159. doi: 10.1109/20.34388.
5. Clemens M., Weiland T. Discrete electromagnetism with the finite integration technique. *Progress in Electromagnetics Research*, 2001, vol.32, pp. 65-87. doi: 10.2528/PIER00080103.

6. Reznikina M.M., Reznikin O.L. Modeling of the electromagnetic wavefront sharpening in a nonlinear dielectric. *Technical Physics*, 2011, vol.56, iss.3, pp. 406-412. doi: 10.1134/S1063784211030169.
7. Reznikina M.M. Modeling of the dendrite shape variation with applied electric field strength in poly(ethylene). *Technical Physics Letters*, 2000, vol.26, iss.3, pp. 196-198. doi: 10.1134/1.1262789.
8. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 1994, vol.114, no.2, pp. 185-200. doi: 10.1006/jcph.1994.1159.
9. Taflov A., Hagness S.C. *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method*. Boston – London, Artech House, 2000. 852 p.
10. Zhou Z., Chen K., Zhu B., Zhao J., Feng Y., Li Y. Ultra-Wideband Microwave Absorption by Design and Optimization of Metasurface Salisbury Screen. *IEEE Access*, 2018, vol.6, pp. 26843-26853. doi: 10.1109/access.2018.2835815.
11. Bottauscio O., Chiampi M., Manzin A. Numerical analysis of magnetic shielding efficiency of multilayered screens. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, vol.40, iss.2, pp. 726-729. doi: 10.1109/tmag.2004.825171.

Поступила (received) 12.04.2019

Резинкина Марина Михайловна, д.т.н., проф.,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
e-mail: maryna.rezynkina@gmail.com

M.M. Reznikina

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Calculation of electromagnetic fields in inhomogeneous media for selection of protective coatings.

The aim of the work is to develop a method for high-frequency EMFs calculation in terms of the modified vector potential and to use it for choice of the parameters of the layered absorbing coatings that provide effective absorption of radio wave radiation. Methodology. A method for calculation of electromagnetic fields in inhomogeneous media is described. It is performed in terms of the modified magnetic potential at presented a plane electromagnetic wave as an incident and reflected one. To reduce the computational domain size, additional uniaxially perfectly matched layers ensuring fast and non-reflective attenuation of electromagnetic field (EMF) strengths are used at its boundaries. It is supposed that electrical parameters of such layers have not only resistive, but also magnetic losses. **Results.** Modification of the known methods for dividing the wave into the incident and reflected, as well as introducing uniaxially perfectly matched layers at the domain boundaries and formulation of the problem in terms of the modified vector potential, provide a possibility to solve the problem of the electromagnetic wave incidence onto heterogeneous media at reduced memory and counting time compared to the formulation tasks through the EMF strengths. **Practical value.** The described method was used to select parameters of radio-absorbing coatings, application of which on conductive bodies reduces the reflections from them of the incident electromagnetic waves. This provides a possibility to choose the electrical parameters of layered coatings with active losses, as well as magnetic losses, which provide a decrease of the reflected waves amplitude by an order of magnitude or more. **Originality.** For the first time, the problem of calculating the incidence of an electromagnetic wave on an inhomogeneous medium with active electrical and magnetic losses was formulated in terms of the modified vector potential. The parameters of a multilayer lossy coating, which ensures decrease of the reflected EMF wave strengths by an order of magnitude or more are determined. References 11, figures 3.

Key words: electromagnetic field, inhomogeneous media, modified vector magnetic potential, finite integration method, uniaxially perfectly matched layers.