

УДК 621.396

В.Н.Кострова, Е.А.Рыбальченко  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ  
РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ОБЪЕКТЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ  
ПОД ЗЕМНЫМ ПОКРОВОМ**

*Воронежский институт высоких технологий*

*В статье рассматривается аналитическое решение во временной области уравнения Поклингтона для прямой тонкой проволоки, имеющей конечную длину, находящуюся под земным покровом на определенной глубине. Данная проволока возбуждается электромагнитной волной. Описание перехода земля-воздух осуществляется по упрощенной модели для коэффициента отражения. Аналитическое решение производится на основе использования преобразования Лапласа и теоремы Коши. Приведены результаты численных расчетов возбуждаемого тока во временной области для различных параметров - проводимости среды. Даны рекомендации по использованию метода параллельных вычислений для ускорения численного решения задачи.*

**Ключевые слова:** связь, рассеяние электромагнитных волн, моделирование во временной области, интегральные уравнения.

Анализ переходных процессов при рассеянии электромагнитных волн на тонком проводе представляет значительный интерес для многих исследователей уже в течение нескольких десятков лет. Существует множество возможных применений этих исследований в теории антенн и теории распространения электромагнитных волн, а также в задачах, связанных с электромагнитной совместимостью (ЭМС), например, при рассмотрении силовых и телекоммуникационных кабелей под поверхностью земли, осуществлении заземления, проведения идентификации объектов, стимуляции биологических тканей и т. д. [1-4].

Взаимодействие электромагнитных полей с тонким проводом при процессах рассеивания может быть описано на основе различных подходов.

Переходную характеристику мы можем получить путем прямого моделирования во временной области, или через косвенный подход в частотной области, временной области, где решение получается при использовании определенных процедур обратного преобразования [4-6]. Основное преимущество косвенного подхода является относительная простота, как описания модели, так и реализация численного решения. С другой стороны, моделирование во временной области обеспечивает лучшее понимание физических процессов, точное моделирование критически резонансных структур, возможность расчета уже первичных переходных процессов и облегчается описание нелинейностей.

Постановка задачи по анализу переходных процессов для тонкой проволоки обычно основывается на некоторых вариантах интегральных

или интегро-дифференциальных уравнений (типа Халлена или Поклингтона), соответственно [5].

Решение таких уравнений в большинстве случаев проводится с применением каких-то вариантов численных методов. Численное моделирование широко используется для решения различных сложных проблем.

С другой стороны, аналитические решения могут быть получены при решении канонической задачи, используя тщательно выбранный набор приближений [7-10]. Эти приближения, как правило, определяются заданными предельными значениями параметров, для которых решение допустимо или с помощью аппроксимирующих процедур для упрощения используемых уравнений.

Преимущество аналитических решений над численными состоит в возможности следовать по алгоритму при полном контроле принятых приближений [11-15]. Таким образом, обеспечивается понимание физических характеристик проблемы, что при использовании численных методов является довольно сложной задачей. Кроме того, аналитические решения легко реализуются с целью установления ключевых значений исследуемых характеристик, а также при использовании некоторых инженерных оценок явлений.

Также, аналитические решения могут быть использованы в некоторых гибридных подходах к моделированию сложных структур, где время вычислений может быть значительно снижено [16-19].

На Рисунке 1 изображена схема рассеяния электромагнитной волны на проволоке, находящейся на глубине  $d$  под земным покровом.

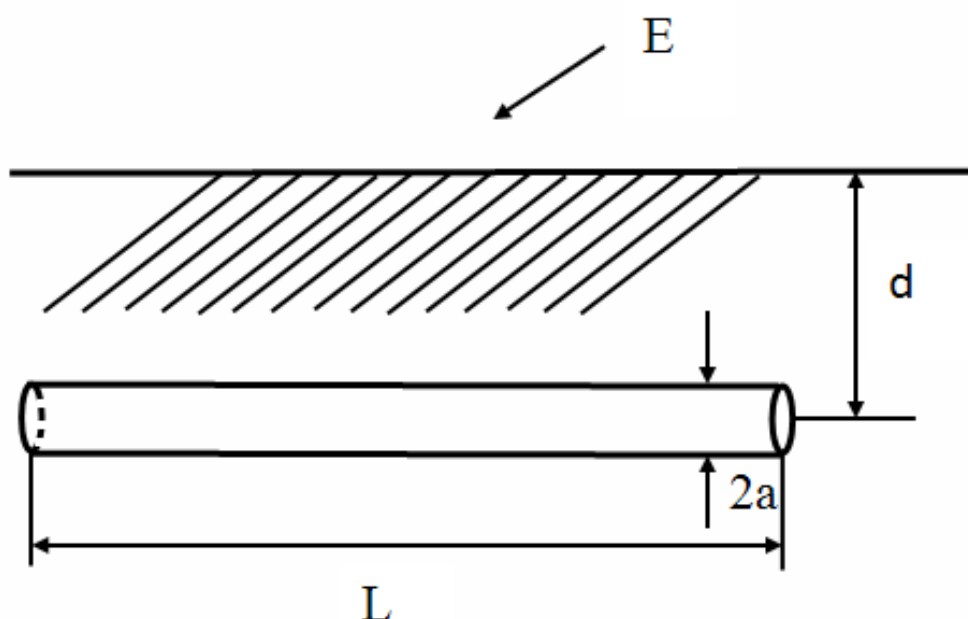


Рисунок 1 – Схема рассеяния электромагнитной волны на проволоке, находящейся на глубине  $d$  под земным покровом.

Во временной области уравнение Поклингтона записывается следующим образом [5]:

$$\left(\mu\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} + \mu\sigma\right) E(t) = -\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \times$$

$$\times \left(\frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I\left(x', t - \frac{R1}{v}\right) \frac{\exp\left(-\frac{1}{\tau_g} \frac{R1}{v}\right)}{R1} dx' -\right.$$

$$\left. - \frac{\mu}{4\pi} \int_0^t \int_0^L G(\tau) I\left(x', t - \frac{R2}{v} - \tau\right) \frac{\exp\left(-\frac{1}{\tau_g} \frac{R2}{v}\right)}{R2} dx' d\tau, (1)\right.$$

где

$$\tau_1 = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_h - 1)}{\sigma}, \tau_2 = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_h + 1)}{\sigma}, G(t) = -\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \delta(t) + \frac{1}{\tau_2} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \exp(-t/\tau_2)\right),$$

$$R1 = \sqrt{(x - x')^2 + a^2}, R2 = \sqrt{(x - x')^2 + d^2}, \tau_g = \frac{2\varepsilon}{\sigma}.$$

При решении интегро-дифференциального уравнения, мы получаем пространственно-временную зависимость тока. Зная распределение тока, мы можем определить другие параметры, представляющие интерес.

Помимо этого особого случая стоит отметить некоторые общие сведения по уравнению Поклингтона.

Уравнение Поклингтона используется для получения тока, наведенного вдоль проволоки. Ток может быть вызван либо падающими электромагнитными волнами или под действием источника напряжения.

Он может быть использован в частотной и временной области, и, вообще говоря, легче решать численным образом именно в частотной области [5]. Уравнение Поклингтона может быть записано различных случаев, таких как: тонкая проволока, толстая проволока, изогнутая проволока, свободное пространство, полупространство с потерями, многослойная среда, массив из проволок, произвольные конфигурации проволок.

В отличие от дифференциальных формул, которые, как правило, используются для решения проблемы во временной области, интегральная запись предназначена для решения проблем с неизвестными источниками, как в этом случае – наведенный ток.

Уравнение Поклингтона получено непосредственно из уравнений Максвелла, при использовании магнитного векторного потенциала в качестве вспомогательной переменной. Из-за этого подход на основе уравнения Поклингтона считается полноволновым подходом, так как используются только предположение о калибровке Лоренца что

необходимо, чтобы определить дивергенцию магнитного векторного потенциала.

Таким образом, результаты решения на основе уравнения Поклингтона считаются наиболее точными.

Первый интеграл из правой части вышеуказанного выражения мы можем записать следующим образом

$$\int_0^L I \left( x', t - \frac{\sqrt{(x-x')^2 + a^2}}{v} \right) \frac{\exp \left( -\frac{1}{\tau g} \frac{\sqrt{(x-x')^2 + a^2}}{v} \right)}{R1} dx' = f(x, t). \quad (2)$$

Нет возможности для получения точного аналитического интегрирования ядра в этом выражении. С другой стороны, к решению можно прийти на основе различных численных методов, которые хорошо известны в литературе [5, 6]. С использованием определенных приближений, можно получить аналитическое решение. В 1938 году, Халлен использовал аппроксимацию для решения соответствующего интегрального уравнения в частотной области [5]. Улучшение этого приближения может быть использовано для получения решения интегрального уравнения во временной области [5].

С учетом приближения

$$I \left( x', t - \frac{R1}{v} \right) = I \left( x', t - \frac{a}{v} \right) = 0, \quad (3)$$

мы получаем

$$\int_0^L I \left( x', t - \frac{R1}{v} \right) \frac{\exp \left( -\frac{1}{\tau g} \frac{R1}{v} \right)}{R1} dx' = \int_0^L I \left( x', t - \frac{a}{v} \right) \frac{\exp \left( -\frac{1}{\tau g} \frac{R1}{v} \right)}{R1} dx'. \quad (4)$$

Несомненным преимуществом этого приближения является проведение замены интегрального уравнения соответствующим обычным дифференциальным уравнением с неизвестным в виде наведенного тока. Недостаток этой аппроксимации заключается в том, что замедление по времени считается  $\frac{a}{v}$  вместо  $\frac{R1}{v}$ , что приводит к потере информации об излучаемой энергии из-за происходящих отражений на свободных концах проволоки. Эта информация имеет значение при анализе свободного пространства. В данной работе, однако, первоочередная задача состоит в том, чтобы рассматривать среду с потерями, где аппроксимация справедлива.

В результате мы получаем следующее выражение

$$\int_0^L \frac{\exp\left(-\frac{1}{\tau_g v} R_1\right)}{R_1} dx' \approx 2 \ln \frac{L}{a}, \quad \int_0^L \frac{\exp\left(-\frac{1}{\tau_g v} R_2\right)}{R_2} dx' \approx 2 \ln \frac{L}{2d}.$$

Тогда мы имеем выражение:

$$(\mu\epsilon p + \mu\sigma)E(p) = -\frac{2\mu}{4\pi} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \mu\sigma p - \mu\epsilon p^2 \right) \times \\ \times I(x, p) \exp\left(-\frac{ap}{v}\right) \left( \ln \frac{L}{a} + \frac{p\tau_1 + 1}{p\tau_2 + 1} \ln \frac{L}{2d} \right). \quad (5)$$

Решение для тока представляется следующим образом:

$$I(x, p) = \frac{4\pi \exp\left(\frac{ap}{v}\right)}{\mu p \left( \ln \frac{L}{a} + \frac{p\tau_1 + 1}{p\tau_2 + 1} \ln \frac{L}{2d} \right)} \times \\ \times E(p) \left( 1 - \frac{\cosh\left(\varphi\left(\frac{L}{2} - x\right)\right)}{\cosh\left(\varphi\left(\frac{L}{2} x\right)\right)} \right), \quad (6)$$

где

$$\varphi = \sqrt{\mu\epsilon(p^2 + \frac{\sigma}{\epsilon} p)}. \quad (7)$$

На основе рассмотренной модели были получены следующие результаты по временной зависимости тока, приведенные на Рисунках 2 и 3.

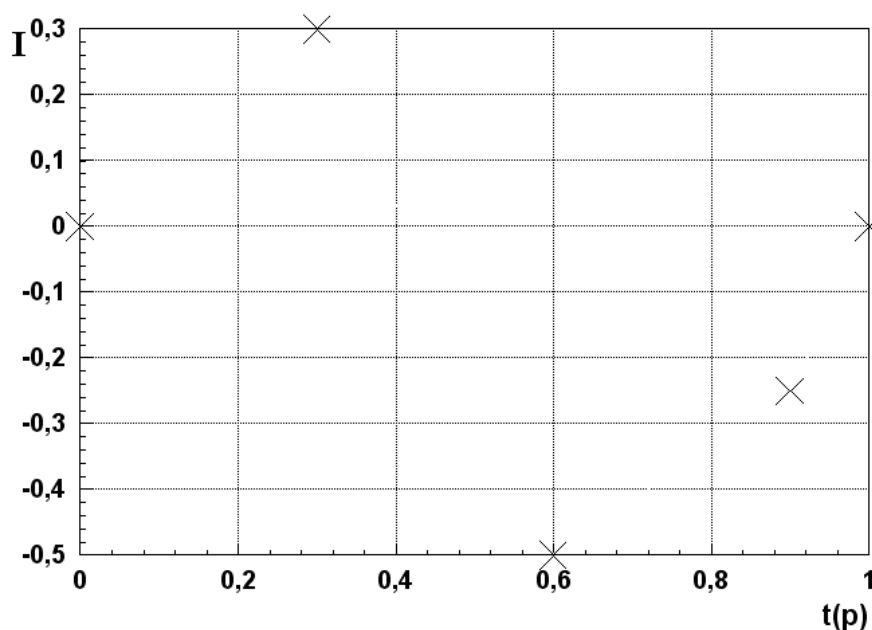


Рисунок 2 – Демонстрация переходного процесса для проволоки длиной L=95 см, d=27 см, σ=0.94 мСм/м

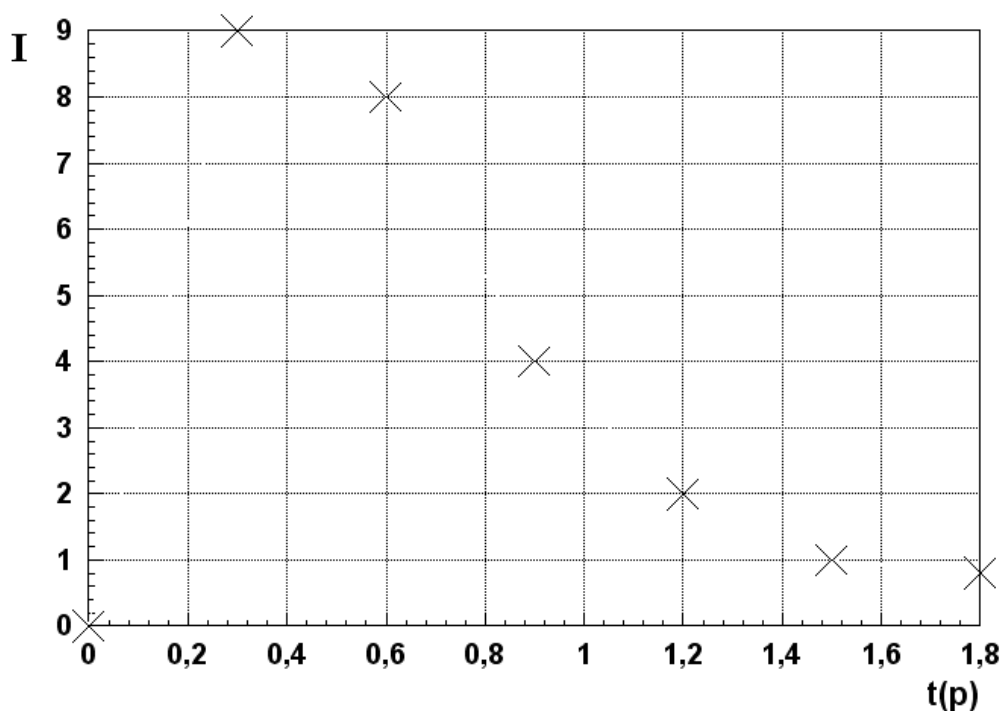


Рисунок 3— Демонстрация переходного процесса для проволоки длиной  $L=95$  см,  $d=27$  см,  $\sigma=93$  мСм/м

Для ускорения численного решения могут быть использованы методы, базирующиеся на параллельных вычислениях [20-22].

Таким образом, в рамках рассмотренного подхода существует возможность анализа токов на проволоке, находящейся под земным покровом при изменении параметров задачи в широких пределах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Махер Х.А. Разработка и использование моделей для прогнозирования качества жизни беременных по их медико-социальным характеристикам / Х.А.Махер, Н.В.Наумов, Г.Я.Клименко, О.Н.Чопоров // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2011. Т. 10. № 4. С. 789-793.
2. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
3. Преображенский А.П. Перспективные методы оптимизации для решения задач проектирования электродинамических объектов и систем связи / А.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2015. № 14. С. 113-115.
4. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. - М.: Мир, 1977. - 485 с.

5. Канавин С. В. Перспективы применения систем мобильного широкополосного доступа в сетях подвижной радиосвязи на основе стандартов mobile WIMAX и LTE / С. В. Канавин, А. С. Лукьянов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 79-82.
6. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / О.В.Милошенко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.
7. Преображенский А.П. Оценка возможностей комбинированной методики для расчета ЭПР двумерных идеально проводящих полостей / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 37-40.
8. Преображенский А.П. Алгоритм расчета радиолокационных характеристик полостей с использованием приближенной модели / А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2005. Т. 21. № 4. С. 17-19.
9. Преображенский А.П. Аппроксимация характеристик рассеяния электромагнитных волн элементов, входящих в состав объектов сложной формы / А.П.Преображенский, Ю.П.Хухрянский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 15-16.
10. Львович И.Я. Построение алгоритма оценки средних характеристик рассеяния полых структур / И.Я.Львович, Я.Е.Львович, А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2014. № 6. С. 2-5.
11. Львович И.Я. Исследование устойчивости беспроводных сетей в условиях блокирования сигнала / И.Я.Львович, О.Н.Чопоров, А.П.Преображенский, В.Б.Щербаков // Информация и безопасность. 2016. Т. 19. № 2. С. 254-257.
12. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах / С.В.Ерасов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 20-26.
13. Максимова А. А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А. А. Максимова, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 53-56.
14. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В.Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
15. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети wi-fi / Е.Н.Казаков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1. С. 13.

16. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн / С.С.Щербатых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1. С. 10.
17. Пекшев Г. А. Гало-система с интерактивным управлением / Г. А. Пекшев // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 67-71.
18. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
19. Лавлинская О. Ю. Технологии облачных вычислений и их применение в решении практических задач / О. Ю. Лавлинская, Т. М. Янкис // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 33-36.
20. Часовской А. А. Оценка перспектив внедрения облачных вычислений на предприятиях и в государственном секторе на примере ФРГ / А. А. Часовской, Е. В. Алференко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 94-97.
21. Lvovich I.Ya. The analysis of scattering electromagnetic waves with use of parallel computing / I.Ya.Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov, K.V.Kaydakova // В сборнике: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015. С. 7147133.

V.N. Kostrova, E.A.Rybalchenko

**THE SIMULATION IN THE TIME DOMAIN FOR SCATTERING  
OF RADIO WAVES ON THE OBJECT LOCATED UNDER THE  
GROUND COVER**

*Voronezh Institute of High Technologies*

*The paper discusses an analytical solution in the time domain Pocklington equation for a straight thin wire of finite length under land cover at a certain depth. This wire is excited by an electromagnetic wave. The description of the transition surface to air is carried out on a simplified model for the reflection coefficient. The analytical solution is based on the use of Laplace transform and Cauchy's theorem. The results of numerical calculations of the excited current in the time domain for different parameters - the conductivity of the medium are given. Recommendations on the use of the method of parallel computing to accelerate numerical solution of the problem are shown.*

**Keywords:** communication, scattering of electromagnetic waves simulation in time domain integral equations.



## REFERENCES

1. Makher Kh.A. Razrabotka i ispol'zovanie modeley dlya prognozirovaniya kachestva zhizni beremennykh po ikh mediko-sotsial'nym kharakteristikam / Kh.A.Makher, N.V.Naumov, G.Ya.Klimenko, O.N.Choporov // Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh. 2011.Vol.10. No. 4. pp. 789-793.
2. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovanie radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami v diapazone dlin voln / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. No. 4. pp. 21-24.
3. Preobrazhenskiy A.P. Perspektivnye metody optimizatsii dlya resheniya zadach proektirovaniya elektrodinamicheskikh ob"ektov i sistem svyazi / A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2015. No. 14. pp. 113-115.
4. Vychislitel'nye metody v elektrodinamike / Pod red. R. Mitry. - M.: Mir, 1977. - 485 s.
5. Kanavin S. V. Perspektivy primeneniya sistem mobil'nogo shirokopolosnogo dostupa v setyakh podvizhnoy radiosvyazi na osnove standartov mobile WIMAX i LTE / S. V. Kanavin, A. S. Luk'yanov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp. 79-82.
6. Miloshenko O.V. Metody otsenki kharakteristik rasprostraneniya radiovoln v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi / O.V.Miloshenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 60-62.
7. Preobrazhenskiy A.P. Otsenka vozmozhnostey kombinirovannoy metodiki dlya rascheta EPR dvumernykh ideal'no provodyashchikh polostey / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. No. 11. pp. 37-40.
8. Preobrazhenskiy A.P. Algoritm rascheta radiolokatsionnykh kharakteristik polostey s ispol'zovaniem priblizhennoy modeli / A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2005.Vol.21. No. 4. pp. 17-19.
9. Preobrazhenskiy A.P. Approksimatsiya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln elementov, vkhodyashchikh v sostav ob"ektov slozhnoy formy / A.P.Preobrazhenskiy, Yu.P.Khukhryanskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005.Vol.1. No. 8. pp. 15-16.
10. L'vovich I.Ya. Postroenie algoritma otsenki srednikh kharakteristik rasseyaniya polykh struktur / I.Ya.L'vovich, Ya.E.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2014. No. 6. pp. 2-5.
11. L'vovich I.Ya. Issledovanie ustoychivosti besprovodnykh setey v usloviyakh blokirovaniya signala / I.Ya.L'vovich, O.N.Choporov, A.P.Preobrazhenskiy, V.B.Shcherbakov // Informatsiya i bezopasnost'. 2016.Vol.19. No. 2. pp. 254-257.

12. Erasov S.V. Optimizatsionnye protsessy v elektrodinamicheskikh zadachakh / S.V.Erasov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No. 10. pp. 20-26.
13. Maksimova A. A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A. A. Maksimova, A. G. Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp. 53-56.
14. Baranov A.V. Problemy funktsionirovaniya mesh-setey / A.V.Baranov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 49-50.
15. Kazakov E.N. Razrabotka i programmnyaya realizatsii algoritma otsenki urovnya signala v seti wi-fi / E.N.Kazakov // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No. 1. pp. 13.
16. Shcherbatykh S.S. Metod integral'nykh uravneniy kak osnovnoy sposob analiza v SAPR antenn / S.S.Shcherbatykh // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No. 1. pp. 10.
17. Pekshev G. A. Galo-sistema s interaktivnym upravleniem / G. A. Pekshev // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp. 67-71.
18. Golovinov S.O. Problemy upravleniya sistemami mobil'noy svyazi / S.O.Golovinov, A.A.Khromykh // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp. 13-14.
19. Lavlinskaya O. Yu. Tekhnologii oblachnykh vychisleniy i ikh primenenie v reshenii prakticheskikh zadach / O. Yu. Lavlinskaya, T. M. Yankis // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp. 33-36.
20. Chasovskoy A. A. Otsenka perspektiv vnedreniya oblachnykh vychisleniy na predpriyatiyakh i v gosudarstvennom sektore na primere FRG / A. A. Chasovskoy, E. V. Alferenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp. 94-97.
21. Lvovich I.Ya. The analysis of scattering electromagnetic waves with use of paraller computing / I.Ya.Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov, K.V.Kaydakova // V sbornike: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015. S. 7147133.