

УДК 621.396

Е.В. Алешкина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА СТРУКТУРАХ С ПОГЛОЩАЮЩИМ СЛОЕМ

*Воронежский институт высоких технологий*

*В данной статье рассмотрена задача рассеяния радиоволны на сложной дифракционной структуре, имеющей отрезок поглощающего покрытия на части своей поверхности. Была сформирована система интегральных уравнений, в рамках нее связываются плотности потенциалов, функция Грина и исходная радиоволна. После того, как решена система уравнений с применением соответствующих базисных функций на основе метода моментов был проведен расчет значений эффективной площади рассеяния при заданных условиях наблюдения. Были сформулированы предложения по тому, как формировать подсистему САПР, которая даст возможности для проведения проектирование объектов техники с необходимыми значениями рассеивающих характеристик. В качестве входных данных в такой подсистеме можно применять размеры рассеивающей структуры, сектор углов наблюдения, требуемое значение уровня для характеристик рассеяния радиоволн.*

**Ключевые слова:** рассеяние радиоволн, поглощение, моделирование, интегральные уравнения.

Введение. Анализ современных технических объектов, на которых происходит рассеянием электромагнитных волн, показывает, что для довольно большого числа практических реализаций они характеризуются сложной структурой [1, 2]. С тем, чтобы эффективным образом осуществлять процессы, связанные с анализом и синтезом таких структур, необходимо применять модели и методов, приводящим при расчетах к небольшим значениям ошибок [3, 4].

Когда получают информацию по разным объектам, функционирующим в радиолокационных диапазонах с применением натурных, и физических экспериментов, то это может быть связано с большими затратами (материальные, организационные, временные) [5, 6]. При этом одни из достаточно эффективных подходов для того, чтобы получать соответствующую информацию о том, какими значениями характеристик рассеяния обладают объекты, являются те, которые базируются на методах математического моделирования [7, 8].

Если применять достаточно широко распространенные асимптотические методы, базирующиеся на высокочастотной дифракции, то не во всех случаях существуют возможности без проведения сложных обобщений и усовершенствований осуществлять расчеты для оценки рассеивающих свойств, когда учитываются многие факторы, например, при рассмотрении степени сложности поверхности тел, когда размещаются разные материалы по поверхностям тел, которые ведут к поглощению радиоизлучений [9]. Также эти материалы могут быть размещены и по

разным изломам поверхности, осуществляется анализ при условиях, когда есть подстилающие поверхности, рассматриваются возможности по разнесенному приему.

Базируясь на вышесказанном, можно сказать, что проведение изучения рассеивающих свойств разных технических объектов ведет к необходимости того, чтобы развивались способы, направленные на оценку уровней электромагнитных рассеяний [10, 11].

Для того, чтобы проводить расчеты, связанные с оценкой рассеивающих свойств тел, характеризующихся сложной формой, необходимо, чтобы были обеспечены условия по подробному математическому описанию особенностей их поверхностей.

По основным способам моделирования поверхностей объектов мы можем отметить такие:

1. Использование метода тел вращения.
2. Применение способов, основанных на аналитическом описании поверхностей [12].
3. Использование подходов, базирующихся на простейших компонентах.
4. Применение представлений объектов на базе проволочных моделей.
5. Использование способов, в которых происходит аппроксимация поверхностей тел на базе элементарных участков.

В современных условиях в связи с тем, что исследуемые объекты весьма сложны и механизмы рассеяния радиоволн тоже являются сложными, когда проводятся исследования по проектированию сложных электродинамических тел, используют системы автоматизированного проектирования (САПР). На их основе можно значительным образом сделать расширение класса объектов, по которым идет постановка и решение разных задач, которые связаны с исследованием электродинамических характеристик тел (ЭМВ) [13].

Когда рассматривается решение задач, связанных с дифракцией радиоволн, и проводится проектирование радиоэлектронных устройств, то в их состав могут входить материалы, позволяющие осуществить поглощение электромагнитных излучений [9].

Для того, чтобы проводить расчет рассеивающих свойств тел, имеющих сложную формы приходится использовать соответствующий математический аппарат, при реализации на компьютерах появляются вычислительные проблемы. Поэтому, если возможно, то эффективным будет рассмотрение асимптотических дифракционных подходов.

Ключевым при этом будет метод краевых волн. С тем, чтобы достичь возможностей моделирования соответствующих геометрооптических

секторов, когда происходят процессы поглощения радиоволн, или формируют в условия по разнесенному приему, стремятся к тому, чтобы провести модификацию такого способа.

Если объекты относятся к резонансной области, то весьма эффективным будет применение метода интегральных уравнений.

В данной статье используется двумерная модель, на основе которой изучаются рассеивающие свойства объектов. Следует понимать, что к двумерному подходу при некоторых условиях сводятся трехмерные задачи.

Цель работы состоит в рассмотрении механизмов рассеяния радиоволн на сложных дифракционных структурах, по поверхностям них распределены поглощающие слои, и определение предложений по формированию программных средств, дающих возможности для проектирования разных объектов [14, 15].

Основы методики. Мы будем проводить анализ того, каким образом идет процесс рассеяния радиоволн на объекте, с поглощающим слоем, приведенным на Рисунке 1.

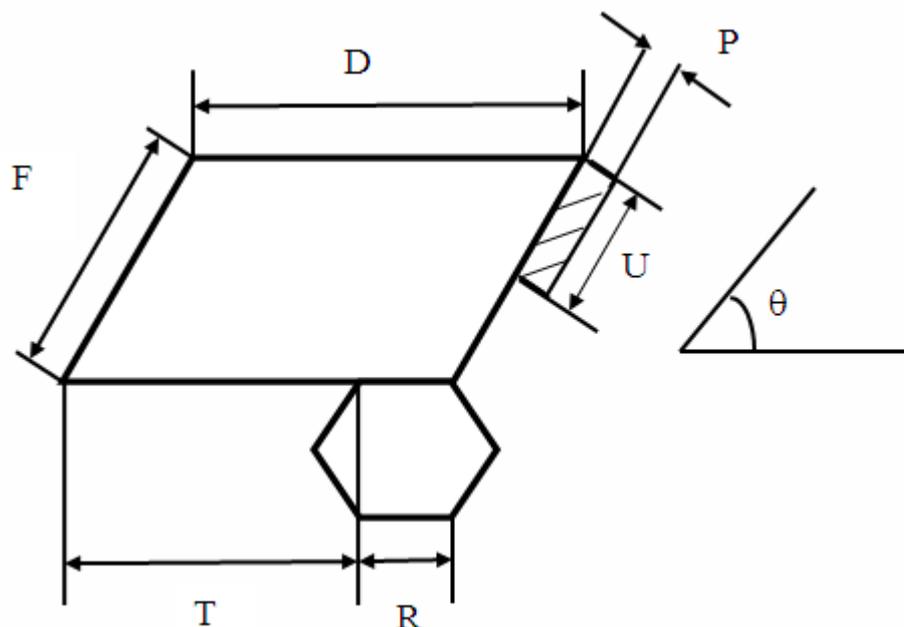


Рисунок 1 – Иллюстрация процесса рассеяния радиоволны на объекте, имеющем поглощающее покрытие, здесь F, D, T, R, U – размеры анализируемой структуры, P – толщина поглощающего покрытия,  $\theta$  – угол падения плоской ЭМВ

Мы исходим из того, что величина электрического поля (когда волна имеет E-поляризацию) в случае размещения приемного устройства в некоторой точке будет равна  $E(x_0, y_0)$ . Мы считаем, что точку  $(x_0, y_0)$  помещаем во внутреннюю область сечения S слоя, который поглощает

радиоволны, кроме этого мы ее помещаем на контур металла. Поскольку рассматривается применение граничных условий, записывается система интегральных уравнений. Эти уравнения – уравнения Фредгольма 1-го рода [16].

$$\begin{aligned}
 E_0(x_0, y_0) + \int_{L_x} j_1(t) G_1(r) h(t) dt + \int_{L_m} m_1(t) G_1(r) h(t) dt &= 0, \text{ для } (x_0, y_0) \in L_x \\
 \int_{L_x} j_2(t) G_2(r) h(t) dt + \int_{L_m} m_2(t) G_2(r) h(t) dt &= 0, \text{ для } (x_0, y_0) \in L_x \\
 - \int_{L_m} m_1(t) G_1(r) h(t) dt + \int_{L_m} m_2(t) G_2(r) h(t) dt - \int_{L_x} j_1(t) G_1(r) h(t) dt + \\
 + \int_{L_x} j_2(t) G_2(r) h(t) dt &= E_0(x_0, y_0), \text{ для } (x_0, y_0) \in L_m \\
 - \frac{1}{2} m_1(\rho) - \frac{1}{2} m_2(\rho) + \int_{L_m} m_1(t) \frac{\partial G_1(r)}{\partial n} h(t) dt - \int_{L_m} m_2(t) \frac{\partial G_2(r)}{\partial n} h(t) dt - \\
 - \frac{i}{4} \int_{L_x} j_1(t) \frac{\partial G_1(r)}{\partial n} h(t) dt - \int_{L_x} j_2(t) \frac{\partial G_2(r)}{\partial n} h(t) dt &= \frac{E_0(x_0, y_0)}{\partial n}, \text{ для } (x_0, y_0) \in L_m.
 \end{aligned}$$

Здесь  $j_1, m_1$  – определяют величины плотностей потенциалов, тогда, когда идет обход по внешним сторонам для  $L_x$  (металлический контур) и  $L_m$  (в случае, если контур относится поглощающему слою);  $j_2, m_2$  – определяют величины плотностей потенциалов тогда, когда идет обход по внутренним сторонам,  $E_0(x_0, y_0)$  – это исходная радиоволна,  $\theta$  – показывает под каким она направляется к объекту (передатчик и приемник совмещены (Рисунок 1)),  $G_1(r)$  – это функция Грина в случае свободного пространства, при этом значение волнового числа  $k=2\pi/\lambda$ , в нем  $\lambda$  – это длина волны,  $G_2(r)$  – это функция Грина, относящаяся к слою поглощения, при этом  $k=(2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon\mu}$ ,  $r$  – показывает расстояние, между точками интегрирования и наблюдения,  $h$  – это коэффициент Ламе, поскольку идет интегрирование по соответствующему контуру.

Указанную выше задачу мы рассматриваем как некорректную.

Когда ее решают, отмечают несколько основных шагов.

- записывают математические выражения, описывающие рассматриваемые физические процессы.
- проводится учет граничных условий.
- на основе соответствующих алгоритмов идет получение численных результатов. При использовании в математических моделях интегральных уравнений для их решения следует применять метод моментов.

На практике может быть использованы системы базисных функций, которые относятся ко всей области, или проводится разложение по базисам подобластей.

Первый вариант эффективен в тех случаях, когда задачи характеризуются гладким решением.

Формирование базисных функции происходит на основе того, что для функций ставится в соответствие в двумерный ряд Фурье, в связи с тем, что базиса характеризуется похожей формой к предсказуемому результату. При численных расчетах используется порядок матрицы импедансов со сниженной размерностью, это ведет к уменьшению требований к аппаратно-программному обеспечению.

Результаты. Были проведены расчеты эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) рассеивающей структуры в рамках предлагаемого подхода. На Рисунке 2 приведены пример результата расчета ЭПР при изменении толщины покрытия  $P$  для угла наблюдения  $\theta=0^\circ$ . Размеры были следующими:  $T=5.1\lambda$ ,  $R=1.1\lambda$ ,  $F=3.2\lambda$ ,  $D=6.2\lambda$ ,  $U=1.2\lambda$ . Значение диэлектрической проницаемости покрытия было следующим –  $14-j\cdot 15.5$ .

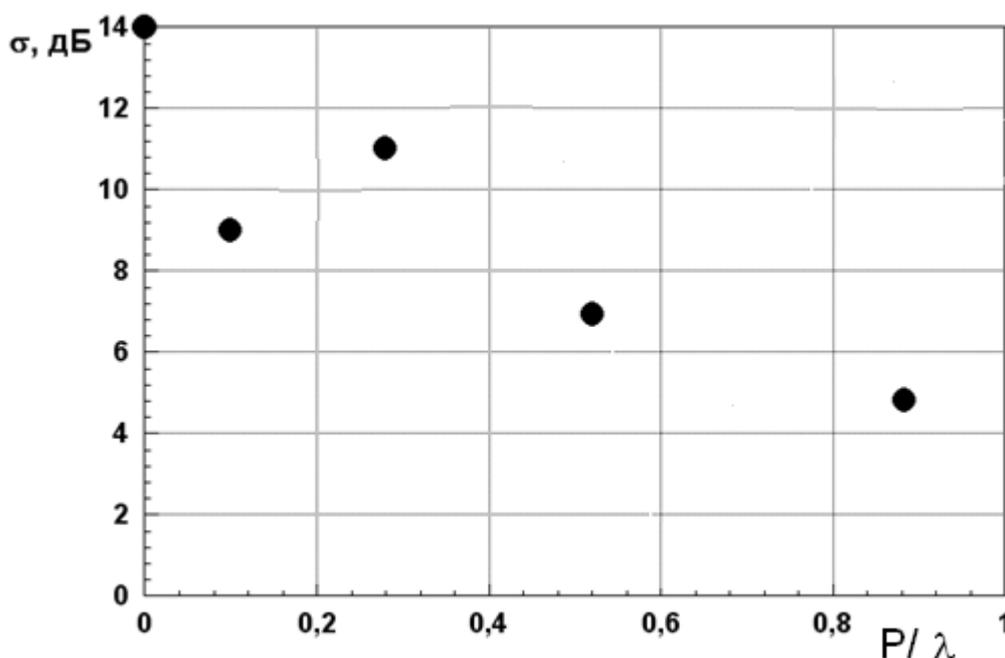


Рисунок 2 – Пример зависимости ЭПР от толщины покрытия

Тогда, рассчитанные зависимости значений ЭПР от толщин разных покрытий, ведущих к поглощению радиоволн, можно хранить в БД, и далее передавать в подсистему САПР для того, чтобы проводить построение структур с заданным уровнем характеристик.

На Рисунке 3 можно увидеть схему подсистемы САПР для того, чтобы определить требуемые размеры и отражающие свойства дифракционной структуры.

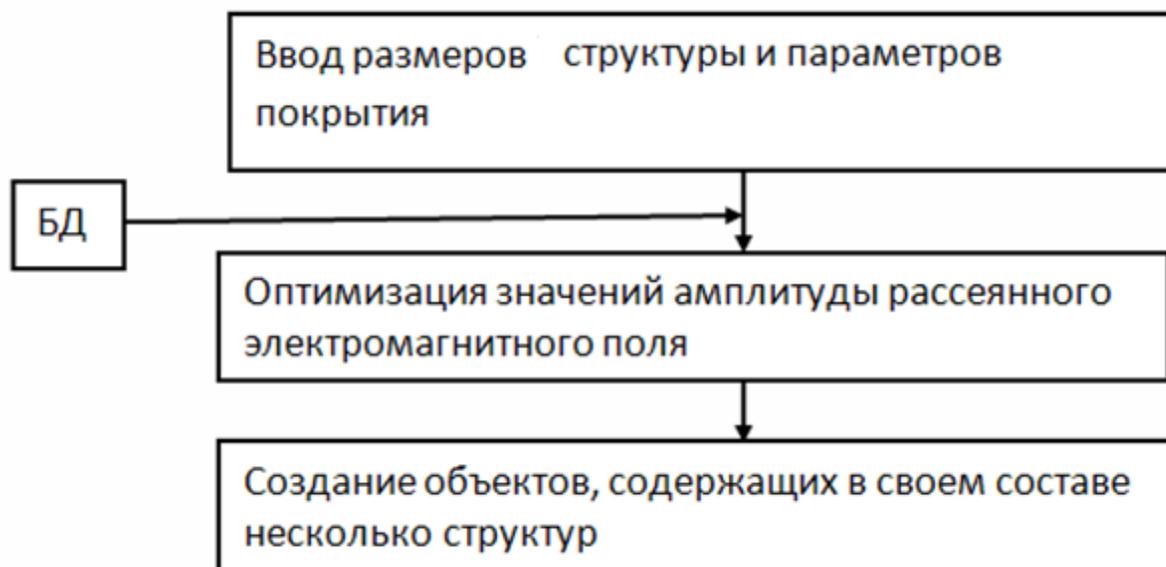


Рисунок 3 – Схема работы подсистемы САПР дифракционной структуры.

Вывод. Таким образом, рассмотренный в статье подход и результаты анализа позволяют говорить о том, что указанная подсистема будет полезна при проведении проектирования дифракционных структур, содержащих покрытия, поглощающие радиоволны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болучевская О.А., Горбенко О.Н. Свойства методов оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн / Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 3. С. 4.
2. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах / Вестник воронежского института высоких технологий, 2013, №10, с.20-26.
3. Захаров Е. В. Пименов Ю.В. Численные методы решения задач дифракции. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
4. Кульнева Е.Ю. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств / Е.Ю.Кульнева, И.А.Гащенко // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 50.
5. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.

6. Авдеев В.В. Использование метода интегральных уравнений в электродинамических задачах / В.В.Авдеев, А.А.Головин // В сборнике: Наука молодых - будущее России сборник научных статей международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 3 томах. Юго-Западный государственный университет. 2016. С. 264-267.
7. Щербатых С.С. О некоторых характеристиках распространения радиоволн / С.С.Щербатых // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3-2. С. 239-240.
8. Глотова Т.В. О некоторых характеристиках методов трассировки лучей / Т.В.Глотова // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3-2. С. 223-224.
9. Головин А.А. Моделирование распространения радиоволн при затухании / А.А.Головин // Форум молодых ученых. 2016. № 4 (4). С. 272-274.
10. Воронов А.А. Обеспечение системы управления рисками при возникновении угроз информационной безопасности / А.А.Воронов, И.Я.Львович, Ю.П.Преображенский, В.А.Воронов // Информация и безопасность. 2006. Т. 9. № 2. С. 8-11.
11. Калашников А.О. Атаки на информационно-технологическую инфраструктуру критически важных объектов: оценка и регулирование рисков / А.О.Калашников, Е.В.Ермилов, О.Н.Чопоров, К.А.Разинкин, Н.И.Баранников // монография / под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. Воронеж, Издательство: ООО "Издательство "Научная книга", 2013, 159 с.
12. Львович И.Я. Основы информатики / И.Я.Львович, Ю.П.Преображенский, В.В.Ермолова / учебное пособие, Воронеж, Издательство: Воронежский институт высоких технологий, 2014, 339 с.
13. Рыжков С.И. Об использовании нейросетевых технологий для оценки сигналов различной формы / С.И.Рыжков, С.А.Харченко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 4(19). С. 103-105.
14. Пахомова А.С.Целенаправленные угрозы компьютерного шпионажа: признаки, принципы и технологии реализации / А.С.Пахомова, О.Н.Чопоров, К.А.Разинкин // Информация и безопасность. 2013. Т. 16. № 2. С. 211-214.
15. Ермилов Е.В. Риск-анализ распределенных систем на основе параметров рисков их компонентов / Е.В.Ермилов, Е.А.Попов, М.М.Жуков, О.Н.Чопоров // Информация и безопасность. 2013. Т. 16. № 1. С. 123-126.

16. Панасюк В. В., Саврук М. П., Назарчук З. Т. Метод сингулярных интегральных уравнений в двумерных задачах дифракции. - К.: Наук. думка, 1984. - 344 с.

E. V. Aleshkina

## THE SIMULATION OF RADIO WAVE SCATTERING ON THE STRUCTURES WITH ABSORBING LAYER

*Voronezh institute of high technologies*

*This paper describes the problem of scattering of radio waves in a complex diffraction structure having a cut absorptive coating on part of its surface. The system of integral equations in the framework of its contact density potentials, green function and the initial frequency was formed. Once solved the system of equations with the application of the relevant basis functions based on the method of moments was calculated values of the effective area of scattering at given conditions of observation. Suggestions were made on how to form a subsystem of CAD, which will provide opportunities to conduct designing of equipment with the necessary values of the scattering characteristics. As input to this subsystem, you can apply the scattering structure, the sector of observation angles, the required value of the level for the characteristics of scattering of radio waves.*

**Keywords:** scattering of radio waves, absorption, modeling, integral equation.

## REFERENCES

1. Boluchevskaya O.A., Gorbenko O.N. Svoystva metodov otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln / Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2013. No. 3. S. 4.
2. Erasov S.V. Optimizatsionnye protsessy v elektrodinamicheskikh zadachakh / Vestnik voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy, 2013, No.10, pp.20-26.
3. Zakharov E. V. Pimenov Yu.V. Chislennye metody resheniya zadach difraktsii. M.: Radio i svyaz', 1986. 184 pp.
4. Kul'neva E.Yu. O kharakteristikakh, vliyayushchikh na modelirovanie radiotekhnicheskikh ustroystv / E.Yu.Kul'neva, I.A.Gashchenko // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. No. 5-2. p. 50.
5. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami v diapazone dlin voln / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. No. 4. pp.21-24.
6. Avdeev V.V. Ispol'zovaniye metoda integral'nykh uravneniy v elektrodinamicheskikh zadachakh / V.V.Avdeev, A.A.Golovin // V sbornike: Nauka molodykh - budushchee Rossii sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh: v 3 tomakh. Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet. 2016. pp.264-267.

7. Shcherbatykh S.S. O nekotorykh kharakteristikakh rasprostraneniya radiovoln / S.S.Shcherbatykh // Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik. 2016. No. 3-2. pp.239-240.
8. Glotova T.V. O nekotorykh kharakteristikakh metodov trassirovki luchey / T.V.Glotova // Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik. 2016. No. 3-2. pp.223-224.
9. Golovin A.A. Modelirovanie rasprostraneniya radiovoln pri zatukhanii / A.A.Golovin // Forum molodykh uchenykh. 2016. No. 4 (4). pp.272-274.
10. Voronov A.A. Obespechenie sistemy upravleniya riskami pri vozniknovenii ugroz informatsionnoy bezopasnosti / A.A.Voronov, I.Ya.L'vovich, Yu.P.Preobrazhenskiy, V.A.Voronov // Informatsiya i bezopasnost'. 2006. Vol. 9. No. 2. pp.8-11.
11. Kalashnikov A.O. Ataki na informatsionno-tekhnologicheskuyu infrastrukturu kriticheski vazhnykh ob"ektov: otsenka i regulirovanie riskov / A.O.Kalashnikov, E.V.Ermilov, O.N.Choporov, K.A.Razinkin, N.I.Barannikov // monografiya / pod red. chl.-korr. RAN D.A. Novikova. Voronezh, Izdatel'stvo: OOO "Izdatel'stvo "Nauchnaya kniga", 2013, p.159
12. L'vovich I.Ya. Osnovy informatiki / I.Ya.L'vovich, Yu.P.Preobrazhenskiy, V.V.Ermolova / uchebnoe posobie, Voronezh, Izdatel'stvo: Voronezhskiy institut vysokikh tekhnologiy, 2014, p. 339.
13. Ryzhkov S.I. Ob ispol'zovanii neyrosetevykh tekhnologiy dlya otsenki signalov razlichnoy formy / S.I.Ryzhkov, S.A.Kharchenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 4(19). pp.103-105.
14. Pakhomova A.S.Tselenapravlennye ugrozy komp'yuternogo shpionazha: priznaki, printsipy i tekhnologii realizatsii / A.S.Pakhomova, O.N.Choporov, K.A.Razinkin // Informatsiya i bezopasnost'. 2013. Vol. 16. No. 2. pp. 211-214.
15. Ermilov E.V. Risk-analiz raspredelennykh sistem na osnove parametrov riskov ikh komponentov / E.V.Ermilov, E.A.Popov, M.M.Zhukov, O.N.Choporov // Informatsiya i bezopasnost'. 2013. Vol. 16. No. 1. pp. 123-126.
16. Panasyuk V. V., Savruk M. P., Nazarchuk Z. T. Metod singulyarnykh integral'nykh uravneniy v dvumernykh zadachakh difraktsii. - K.: Nauk. dumka, 1984. – p.344.