

РАЗРАБОТКА ПЕРЕДАЮЩЕЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ АНТЕННЫ С ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ЗАДАННОГО ВИДА

М.С. Воробьев, Л.П. Кудрин, А.Б. Хашимов

Предложены математические модели панельных излучателей, размещаемых на башне радиотелевизионного передающего центра. Строгие электродинамические соотношения, основанные на интегральных уравнениях Фредгольма II рода, позволяют определить тонкие эффекты взаимного влияния излучателей в антенне. Показано, что применение предложенных математических моделей позволяет получить диаграмму направленности антенны, соответствующую заданным требованиям с высокой точностью.

Ключевые слова: математическая модель, интегральные уравнения, панельная антенна.

При проектировании передающих телевизионных (ТВ) антенн необходимо учитывать ряд требований по согласованию входного сопротивления антенны с фидерным трактом (как правило, это ограничение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) величиной не более 1,2 в рабочей полосе частот), обеспечению необходимого коэффициента усиления в направлении максимума диаграммы направленности (ДН), ограничению массо-габаритных характеристик. Но главным требованием является формирование заданной зоны обслуживания ТВ вещательного центра, которая определяется ДН антенны в горизонтальной плоскости. Зона обслуживания определяется характером рельефа местности, плотностью застройки территории, местом установки ТВ-антенны. При этом нередко возникают проблемы качественного приема телевизионного (ТВ) сигнала при совместном функционировании нескольких радиотелевизионных передающих центров (РТПЦ), работающих в перекрывающихся частотных диапазонах и при относительно близком расположении друг от друга. Следовательно, такая совместная работа требует формирования глубоких провалов (до -30 дБ) ДН в горизонтальной плоскости для угловых секторов с перекрывающимися помехами. Решение такой сложной задачи зависит от очень большого количества внешних и внутренних факторов. Типовой вариант размещения передающей ТВ-антенны на башне (или мачте) РТПЦ предполагает известную геометрию сечения башни, которая выступает в качестве основного ограничения в формировании ДН. Это связано с тем, что элементы башни (пояса, растяжки, кабель-росты с фидерными линиями) вносят в формирование общей ДН антенны значительный вклад, который существенно зависит от рабочей поляризации антенны. Влияние электромагнитных полей рассеяния от этих элементов в ряде случаев значительно превышает заданный уровень поля излучения антенны в зоне подавления. Кроме того, в непосредственной близости от проектируемой антенны часто располагаются другие ТВ-антенны, антенны систем мобильной связи, антенны-ретрансляторы. Влияние таких антенн также приводит к появлению помеховых полей рассеяния. Проектирование антенны с ДН заданного вида требует перехода к многоэлементным антенным системам, так как только с помощью вариации функций амплитудно-фазового распределения (АФР) между отдельными излучателями системы можно решить многопараметрическую задачу оптимизации ДН. К числу внутренних факторов, влияющих на решение задачи, можно отнести взаимное влияние излучателей антенной системы, рассогласование входного сопротивления антенной системы с фидерным трактом вследствие появления в структуре антенной системы делителей с заданными комплексными коэффициентами передачи в полосе частот.

Рассмотрим постановку следующей задачи. Пусть для обеспечения заданных требований электромагнитной совместимости необходимо разработать антенную систему с ДН в горизонтальной плоскости, вид которой показан на рис. 1. Поляризация поля излучения – горизонтальная; частотный диапазон 206...210 МГц; КСВН в полосе частот $K_{свн} \leq 1,2$; коэффициент усиления (КУ) антенной системы $G = 6,3$ дБи; объект установки – мачта РТПЦ, сечение мачты на высоте установки 1750×1750 мм².

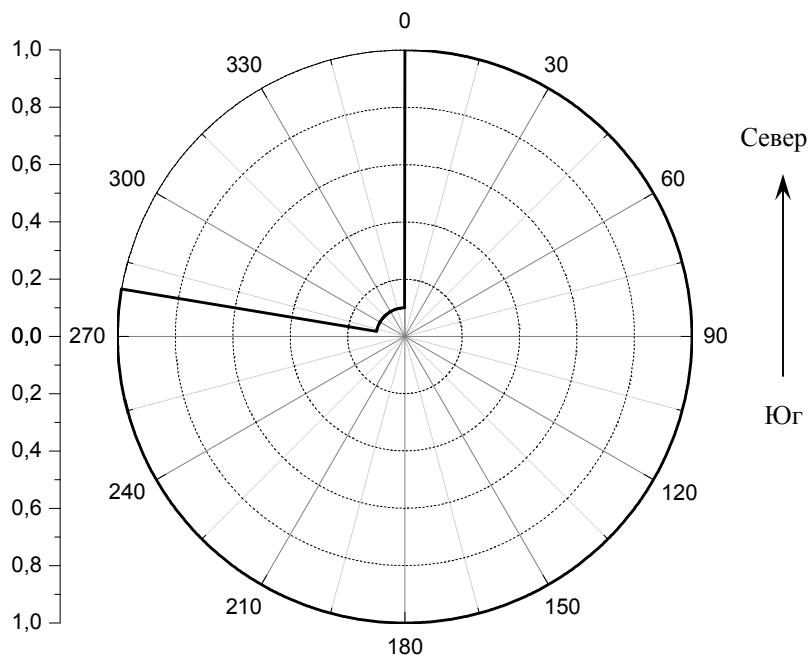


Рис. 1. ДН антенной системы с привязкой к объекту установки

Для получения ДН, максимально приближенной к заданной, и обеспечению требуемого КУ рационально использовать панельные излучатели, которые размещаются на гранях мачты. Панельные излучатели представляют собой полуволновые симметричные вибраторные антенны, расположенные над панелью-рефлектором, которая из соображений минимизации массогабаритных характеристик и уменьшения ветровой нагрузки проектируется решетчатой (рис. 2). Несущий каркас панели-рефлектора и узлы крепления вибраторных излучателей выполняются из углового алюминиевого профиля, ширина и частота расположения полос выбирается из условий необходимого коэффициента экранирования электромагнитного поля в теневой области рефлектора.

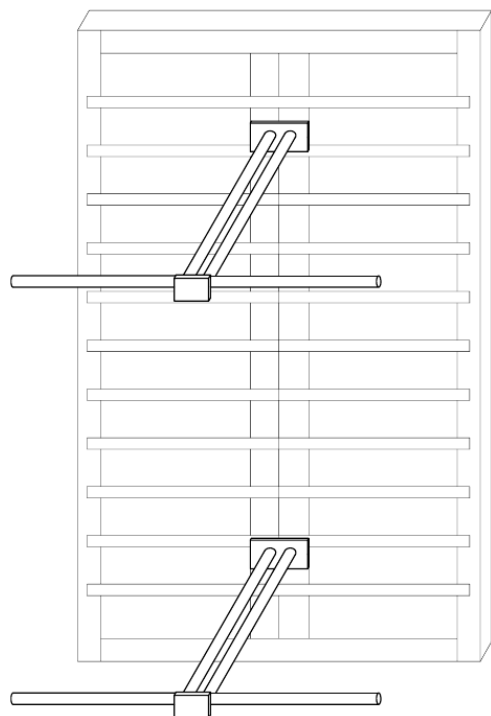


Рис. 2. Панельный излучатель

Для получения необходимого коэффициента усиления антенной системы достаточно использования двух этажей вибраторных излучателей, расстояние между которыми в вертикальной плоскости обычно выбирается в пределах $(0,65 \dots 0,7)\lambda$.

Заданная ДН в горизонтальной плоскости имеет ряд специфических особенностей, главная из которых заключается в очень малом уровне в зоне подавления. Это приводит к необходимости использования строгой электродинамической постановки задачи формирования общего поля излучения антенной системы, так как приближенные методы, использующие концепцию бесконечного идеально проводящего экрана, дают достаточно большие ошибки для поля излучения в теневой области. Необходимо подчеркнуть, что ограниченные размеры

панельного излучателя приводят к тому, что вследствие дифракции электромагнитного поля вибраторных излучателей уровень поля излучения в теневой области (за панельным излучателем) может превышать заданный уровень в зоне подавления. Кроме того, характерной особенностью панельных излучателей является наличие металлической поверхности конечной толщины t ,

в некоторых случаях достаточно малой в сравнении с длиной волны λ . В первом приближении для математического моделирования поля излучения панельного излучателя можно считать, что поверхность панели-рефлектора является сплошной. В работе [1] показано, что переход к обособленной геометрии решетчатой панели-рефлектора не приводит к заметному расхождению результатов, но существенно уменьшает временные затраты математического моделирования. С другой стороны, в ряде случаев толщина металлической поверхности может принимать большие значения, например, для обеспечения заданной механической прочности конструкции антенны. В связи с этим необходимо использование унифицированного подхода к построению математических моделей (ММ) рассматриваемых антенн, общего для металлических поверхностей разной толщины t и произвольной геометрии. Кроме того, ММ рассматриваемых антенн должны учитывать влияние металлических поверхностей сложной формы на характеристики согласования в заданной полосе частот, поляризационные свойства поля излучения, параметры электромагнитной совместимости.

Широко используемый приближенный подход к решению задачи учета влияния металлических поверхностей на поле излучения вибраторных антенн основан на применении метода зеркальных изображений. Этот метод позволяет получить некоторые оценки поля излучения рассматриваемых антенн, но детальные характеристики можно анализировать только на основе строгих электродинамических соотношений. Электрические размеры рассматриваемых панельных излучателей позволяют эффективно использовать метод интегральных уравнений (ИУ). Для тонких поверхностей ($t \ll \lambda$) широко используются ИУ I рода с гиперсингулярным ядром [2]. Для решения таких ИУ разработаны эффективные численные методы выделения особенности в ядре. Необходимо отметить, что неформальная процедура предельного перехода в системе ИУ I рода требует очень точного соответствия погрешностей численного решения, определяемых соответствующим методом дискретизации и детализации геометрии металлической поверхности. Кроме того, процедура проверки устойчивости численного решения системы требует проведения ряда предварительных вычислительных экспериментов. В этом плане для численного исследования ММ рассматриваемых антенн удобнее ИУ II рода, у которых ядро имеет интегрируемую слабую особенность. Вместе с тем, использование ИУ II рода затруднительно для очень малых значений t , особенно для плоских пластин. Это связано с тем, что для определенного расположения точек наблюдения и источников ядро ИУ стремится к нулю, что требует очень высокой точности вычисления подынтегральных функций для выбранного метода перехода к дискретной схеме. В связи с этим большой практический интерес представляет исследование предельной величины t , при которой численное решение ИУ II рода для тонких металлических пластин произвольной геометрии соответствует заданным требованиям к точности решения. В работе [3] такое исследование проведено для двумерных задач, с помощью которого получены важные для практического использования оценки предельной толщины t , при которой наблюдается устойчивое численное решение ИУ II рода. В данной работе получены критерии устойчивого решения ИУ II рода для трехмерных задач. В качестве примера введем систему ИУ II рода для вибраторного излучателя:

$$\begin{aligned} \vec{j}_s = & \frac{1}{2\pi} \vec{n}_p \times \int_S \vec{j}_s \times \text{grad}'\varphi ds' - \frac{1}{2\pi} \vec{n}_p \times \int_{-L/2}^{L/2} I_x \vec{i}_x \times \text{grad}'\varphi dx'; \\ & - \frac{4\pi ik}{Z_c} \int_S (j_{sx} K_{x'p} + j_{sy} K_{y'p} + j_{sz} K_{z'p}) ds' + \int_{-L/2}^{L/2} I_x K_{x'x} dx' = -\frac{4\pi ik}{Z_c} E_x^i, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\vec{j}_s = \vec{i}_x j_{sx} + \vec{i}_y j_{sy} + \vec{i}_z j_{sz}$ – распределение поверхностного тока на рефлекторе; $\varphi = \exp(-ikr)/r$; $k = 2\pi/\lambda$; $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + t^2}$; t – толщина рефлектора; S – поверхность рефлектора; L – длина вибратора; I_x – амплитудно-фазовое распределение (АФР) тока на вибраторе, которое определяется заданным возбуждением E_x^i и решением ИУ Поклингтона – второе слагаемое второго уравнения системы (1); Z_c – волновое сопротивление среды. В первом уравнении системы (1) точка наблюдения располагается на поверхности рефлектора, во втором уравнении – на вибраторе.

ре, при этом АФР тока I_x учитывает влияние поля рассеяния от поверхности рефлектора на возбуждение вибратора. Это дает возможность анализировать характеристики согласования антенны в заданной полосе частот. Конкретный вид компонент ядра ИУ системы (1) определяется строгими соотношениями для векторов напряженности электрического и магнитного поля.

Численное решение системы (1) позволяет определить распределение торцевых токов рефлектора. Кроме того, определение поверхностных токов рефлектора требуется и на «теневой» поверхности, что усложняет вычислительные процедуры анализа ММ антенны. Но если относительная толщина рефлектора t/λ имеет конечное значение, то такой подход соответствует строгой электродинамической задаче, решение которой позволяет оценить тонкие эффекты взаимодействия в рассматриваемой антенне. Определение минимального значения t/λ , при котором не нарушаются физически достоверные результаты моделирования, можно получить с помощью процедуры динамической стабилизации. Для этого выбирается начальное значение параметра t/λ , находится численное решение системы (1). Необходимо подчеркнуть, что для вычислений матричных элементов, следующих из выбранного метода дискретизации задачи, требуется использование квадратурных формул повышенной точности. Вычислительные эксперименты показывают, что приемлемые результаты можно получить с помощью квадратурных формул Гаусса – Лежандра с числом узлов от 16 до 32 в зависимости от величины параметра t/λ . Затем производится пошаговое уменьшение параметра t/λ с одновременным контролем устойчивости численного решения до резкого изменения АФР поверхностных токов рефлектора. Численные эксперименты показывают, что такой пошаговый процесс является достаточно монотонным и нарушения стабильного изменения токовых распределений начинаются со значений $t/\lambda < 0,005$. Эти оценки хорошо согласуются с результатами, полученными в [3]. Например, для диапазона 880...1100 МГц толщина рефлектора составляет от 1,3 до 1,7 мм, что вполне соответствует параметрам практических конструкций антенн.

Для численного решения системы (1) используется метод коллокации на подобластях с импульсными базисными функциями, параметры которых определяются с помощью специальной оптимизационной процедуры. Использование квадратурных формул Гаусса – Лежандра обеспечивает высокую точность и устойчивость численного решения. На рис. 3 приведены результаты расчетов ДН панельного излучателя в вертикальной и горизонтальной плоскости для следующих размеров рефлектора и вибратора: $L_x = 0,7\lambda$; $L_y = 0,62\lambda$; $t = 0,007\lambda$; $L = \lambda/2$.

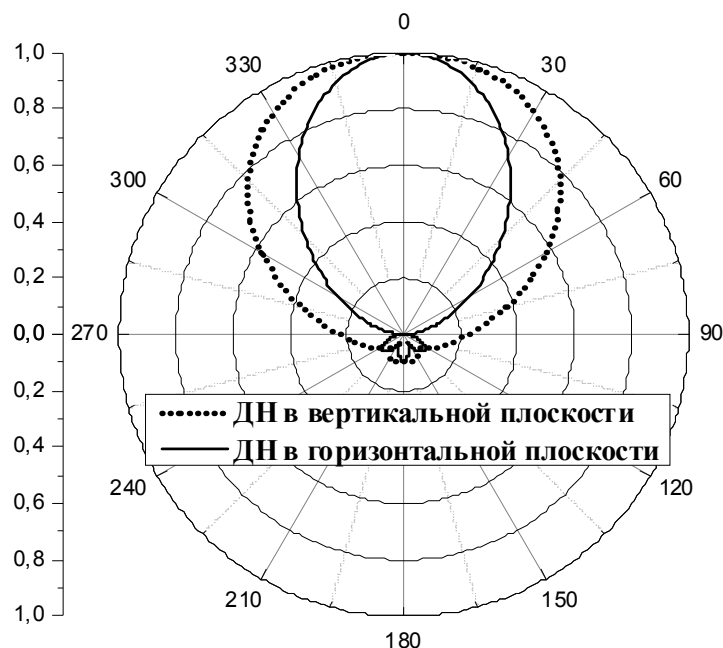


Рис. 3. Точные ДН панельного излучателя

Расчетные ДН, соответствующие строгим электродинамическим соотношениям, отличаются от ДН вибраторных антенн над бесконечным идеально проводящим экраном, которые обычно используют для приближенного определения поля излучения антенной системы. Особенно сильно эти отличия проявляются в угловых областях, соответствующих геометрической тени панельного излучателя, но именно эти угловые области находятся в области подавления поля, поэтому формирование общей ДН антенной системы обязательно должно производиться с учетом точной структуры поля излучения каждого панельного излучателя.

Формирование общей ДН антенной системы производится с учетом геометрических размеров сечения башни на высотной отметке места размещения панельных излучателей [4]. Конфигурация антенной системы с учетом требований к заданной ДН представлена на рис. 4.

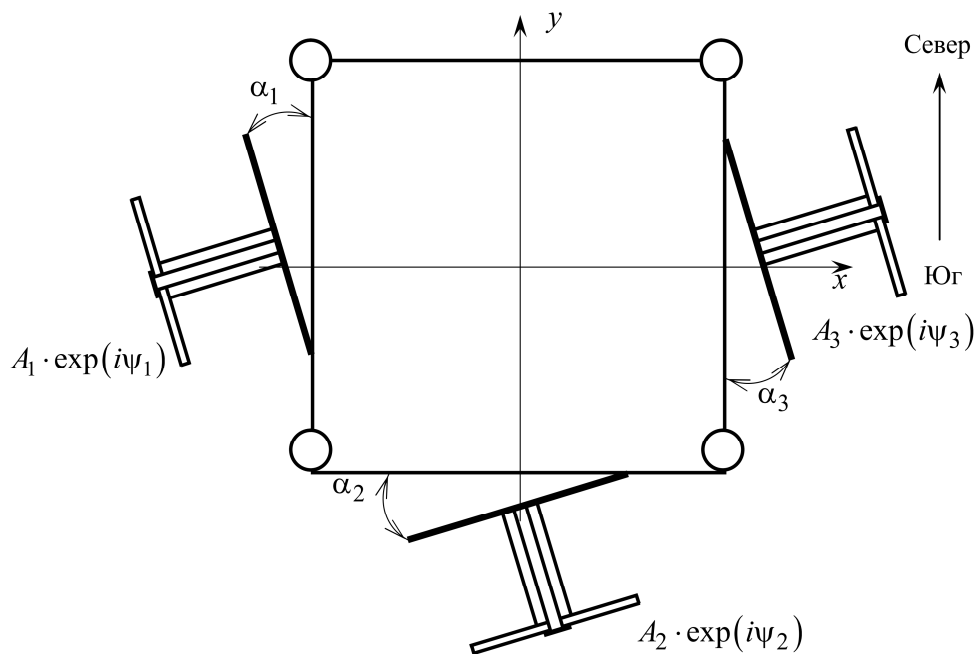


Рис. 4. Размещение панельных излучателей на гранях башни

Для оптимизации ДН антенной системы используются функция АФР возбуждения и углы наклона панельных излучателей относительно граней башни. Ограниченные размеры поперечного сечения башни не дают возможности заметного изменения положения панельных излучателей на гранях, поэтому центры излучателей совпадают с центрами граней. Кроме того, требования унификации узлов крепления панельных излучателей к элементам башни предполагают одинаковые углы наклона $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, что упрощает формулировку целевой функции для оптимизационной процедуры. Структуру целевой функции определяют амплитуды и фазы возбуждения излучателей и угол α , минимизируемый параметр – величина среднеквадратичного отклонения оптимизируемой ДН от заданной. В качестве оптимизационной процедуры используется программный комплекс *fminunc* MATLAB.

Расчет поля излучения антенной системы производится по следующему выражению:

$$E_{\varphi}(\varphi) = F_1(\varphi)f(\varphi - \alpha) + F_2(\varphi)f(\varphi - \alpha - \pi) + F_3(\varphi)f(\varphi - \alpha - 3\pi/2), \quad (2)$$

где $F_{1,2,3}(\varphi) = A_{1,2,3} \exp[i(\psi_{1,2,3} + k[x_{1,2,3} \cos \varphi + y_{1,2,3} \sin \varphi])]$; $f(\varphi)$ – точная ДН панельного излучателя, включающая в себя фазовое распределение поля излучения. На рис. 5 представлены результаты расчета оптимизированной ДН.

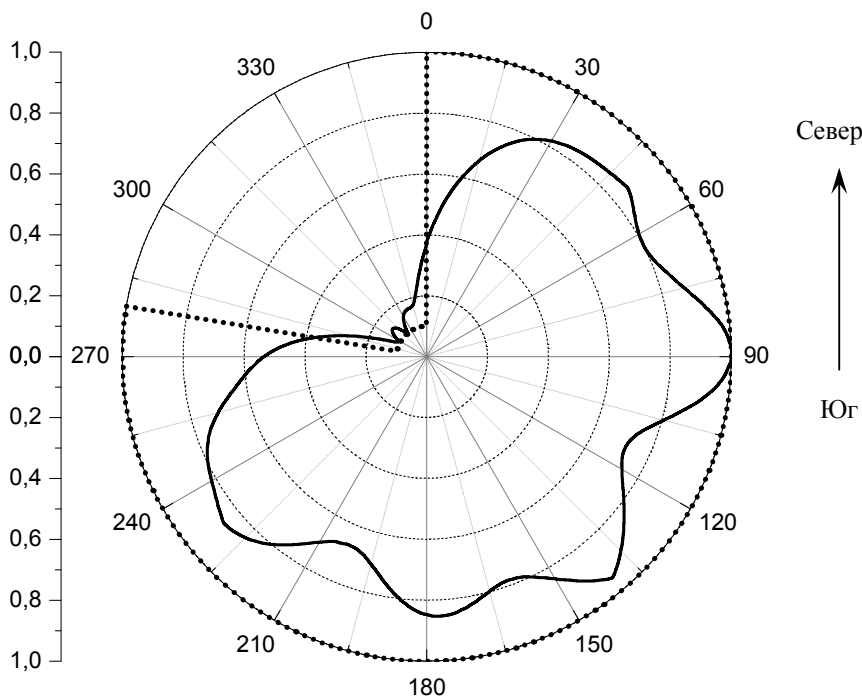


Рис. 5. Оптимизированная ДН антенной системы

Полученная ДН антенной системы соответствует заданным требованиям с необходимой точностью. При этом параметры АФР возбуждения, отвечающие требованиям проектирования широкополосного делителя мощности и в наибольшей степени приближенные к оптимальным, выбраны следующими: $A_{1,2,3} = 1$; $\psi_1 = \pi/2$; $\psi_2 = 3\pi/2$; $\psi_3 = \pi$. Оптимальный угол наклона панельного излучателя к грани башни $\alpha = 25^\circ$. Расчетный КУ $G = 6,9$ дБи;

Выводы

1. Построение математических моделей панельных излучателей с использованием ИУ II рода позволяет исследовать практические варианты антенн с конечной толщиной и произвольной конфигурацией рефлектора. Точные расчеты поля излучения панельных излучателей значительно повышают точность математического моделирования антенных систем, формирующих ДН в горизонтальной плоскости с заданными свойствами.

2. Оптимизационные процедуры с целевыми функциями, в состав которых входят не только функции АФР возбуждения, но и геометрические характеристики антенной системы, существенно расширяют возможности проектирования антенных систем с заданными требованиями к полю излучения.

Литература

1. Воробьев, М.С. Исследование эффективности экранирования панельных излучателей / М.С. Воробьев, Л.П. Кудрин, А.Б. Хашимов // *Цифровые радиоэлектронные системы*. – 2002. – С. 67–73. – <http://www.drts.susu.ac.ru/~rvm/>
2. Пименов, Ю.В. *Линейная макроскопическая электродинамика* / Ю.В. Пименов. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 536 с.
3. Инспекторов, Э.М. *Численный анализ электромагнитного возбуждения проводящих тел* / Э.М. Инспекторов. – Минск: Изд-во Университетское, 1987. – 117 с.
4. Войтович, Н.И. О соответствии асимптотических решений двумерных и трехмерных задач в антенной технике / Н.И. Войтович, А.Б. Хашимов // *Радиотехника и электроника*. – 2010. – Т. 55, № 12. – С. 1471–1476.

Воробьев Михаил Степанович, канд. техн. наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); vms@drts.susu.ac.ru.

Кудрин Леонид Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); klp@kipr.susu.ac.ru.

Хашимов Амур Бариевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); xab@kipr.susu.ac.ru.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics"
2013, vol. 13, no. 3, pp. 23–29**

DESIGN OF RADIATING TV ANTENNA FOR GIVEN PATTERN

M.S. Vorob'ev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
vms@drts.susu.ac.ru,

L.P. Kudrin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
klp@kipr.susu.ac.ru,

A.B. Khashimov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
xab@kipr.susu.ac.ru

The paper presents mathematical models of panel radiators, placed on the tower broadcasting center. The rigorous electromagnetic formulations are based on Frefholm integral equation of II kind and possible to determine the precise effects of mutual coupling of the antenna radiators. It is shown that the application of the proposed mathematical models provides the antenna pattern corresponding high-precision specified requirements.

Keywords: mathematical model, integral equations, panel radiator.

References

1. Vorob'yev M.S., Kudrin L.P., Khashimov A.B. The Investigation of Efficiency of Screening Panel Radiators [Issledovanie effektivnosti ekranirovaniya panelnykh izluchateley]. *Digital Radioelectronic Systems [Tsifrovye radioelektronnye sistemy]*, 2002, pp. 67–73, available at: www.drts.susu.ac.ru/~rvm/
2. Pimenov Yu.V. *Lineynaya makroskopicheskaya elektrodinamika* [Linear Macroscopic Electrodynamics]. Dolgoprudnyi, Publishing House Intellect, 2008. 536 p.
3. Inspektorov E.M. *Chislennyi analiz elektromagnitnogo возбуждения provodyashchikh tel* [Numerical Analysis of the Electromagnetic Excitation of Conducting Objects], Minsk. University P., 1987. 117 p.
4. Voytovich N.I., Khashimov A.B. On the Correspondence of Asymptotic Solutions to 2D and 3D Problems in Antenna Engineering [O sootvetstviy asimptoticheskikh resheniy dvumernykh i trekhmernykh zadach v antennoy tekhnike]. *Journal of Communications Technology and Electronics, [Radio-tekhnika i elektronika]*, 2010, vol. 55, no. 12, pp. 1471–1476.

Поступила в редакцию 11 июня 2013 г.