

На правах рукописи

Попов Алексей Леонидович

**ПЛАНАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ  
РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена на кафедре физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Вендик Орест Генрихович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Мироненко Игорь Германович, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», заведующий кафедрой микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры

кандидат технических наук Барский Илья Викторович, ООО «Симикон», генеральный директор

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт радио»

Защита состоится «    » ноября 2012 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «    » октября 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций,  
д. т. н., доцент

Баруздин С. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Радиочастотная идентификация (RFID – Radio Frequency Identification) – это стремительно развивающаяся технология, позволяющая производить бесконтактную передачу информации об объекте, хранящейся в памяти прикрепляемой к нему радиочастотной метки. RFID открывает широкие возможности по созданию автоматических систем на производстве, в цепях поставок и хранения товаров, розничной торговле, системах контроля доступа и оплаты и многих других областях нашей современной жизни.

Некоторые из ключевых параметров RFID системы – максимальная дистанция и надежность регистрации радиочастотных меток, форма и размеры идентификационной зоны – в существенной степени определяются конструкцией используемых антенн считывающего устройства и радиочастотных меток. Поэтому вопросам конструирования этих компонентов в RFID технологии отводится особое внимание.

К настоящему моменту конструкции антенн считывающих устройств УВЧ диапазона (860 – 960 МГц) получили развитие по двум основным направлениям: микрополосковые антенны (и их модификации) и рамочные антенны в печатном исполнении.

Микрополосковые конструкции антенн активно исследуются и развиваются в последние два десятка лет. Это объясняется их популярностью во многих других областях: мобильная связь, навигационные системы, беспроводные интернет-технологии и многое другое. Однако RFID технология предъявляет специфические требования к их характеристикам и поэтому требует дополнительного исследования и адаптации конструкций антенн, которые могут быть использованы как в качестве антенн считывающих устройств, так и радиочастотных меток.

Развитие рамочных антенн в области RFID технологии УВЧ диапазона открыло относительно новое направление, требующее существенных модификаций классических конструкций рамочных антенн и методик их расчета.

Вопросам адаптации конструкций микрополосковых и рамочных антенн для наиболее эффективного их функционирования в составе RFID систем УВЧ диапазона, а так же разработке методик расчета рассматриваемых конструкций и посвящена настоящая диссертационная работа.

**Цель работы и задачи исследования.** Основная цель диссертационной работы заключается в разработке новых планарных антенн, исследовании и оптимизации характеристик известных конструкций планарных антенн с целью их эксплуатации в RFID системах УВЧ диапазона, а так же разработке аналитических моделей для расчета исследуемых структур.

Цель диссертационной работы была достигнута путем решения следующих задач:

- 1) разработка компактной конструкции микрополосковой антенны для RFID метки и методики ее согласования с радиочастотным чипом;
- 2) анализ и оптимизация основных характеристик антенны PIFA (Planar Inverted-F Antenna) с использованием аналитических моделей и электродинамического моделирования с целью оптимизации характеристик антенны для использования в составе оборудования RFID систем УВЧ диапазона;
- 3) разработка конструкции рамочной антенны электрически большого диаметра с квазистационарным распределением тока по периметру рамки и аналитических моделей для расчета ее входного сопротивления и напряженности магнитного поля в ближней зоне.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач были использованы численные методы расчета структур на основе их аналитических моделей, а так же электродинамическое моделирование антенных конструкций на основе метода конечных элементов (МКЭ). Проверка теоретических положений выполнялась экспериментально посредством измерения входных характеристик антенн и оценки дистанции взаимодействия считывающих устройств с радиочастотными метками.

**Научная новизна.** В работе получены следующие новые научные результаты:

- 1) Предложена новая конструкция антенны радиочастотной метки с повышенной дистанцией регистрации и возможностью размещения на металлических поверхностях.
- 2) Исследована зависимость характеристик направленности излучения антенны PIFA от размеров ее экрана, и предложен вариант конструкции, позволяющий оптимизировать ДН антенны для практического применения с минимальным увеличением ее размеров.
- 3) Разработана аналитическая модель для расчета входного сопротивления рамочной антенны электрически большого диаметра с разбиением контура антенны планарными конденсаторами.
- 4) Разработана аналитическая модель для оценки напряженности магнитного поля в ближней зоне рамочной антенны с квазисинфазным распределением тока по контуру при ее расположении над экраном.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- 1) При интеграции радиочастотного чипа с микрополосковой антенной, имеющей соотношение между шириной и длиной излучателя менее  $1/10$ , комплексно-сопряженное согласование сопротивлений радиочастотного чипа (с большой емкостной составляющей и относительно невысокой активной частью импеданса) и антенны обеспечивается без использования дополнительных согласующих элементов на частотах ниже резонансной частоты антенны. Получаемая в результате интеграции пассивная радиочастотная метка имеет увеличенную на не менее чем 40% дистанцию регистрации по сравнению с другими конструкциями радиочастотных меток аналогичных размеров.
- 2) При условии сохранения минимальных размеров антенны типа PIFA с шириной замыкающей стенки равной ширине излучателя минимальный уровень заднего лепестка диаграммы направленности обеспечивается увеличением длины экрана со стороны замыкающей стенки на  $\lambda/8$ .
- 3) Входной импеданс рамочной антенны электрически большого диаметра с включенными планарными конденсаторами рассчитывается при помощи аналитической модели, представляющей рамку над эк-

раном в виде полосковой линии передачи, погонная индуктивность которой скомпенсирована последовательно включенными конденсаторами. Расчет активной части входного импеданса рамки производится с использованием выражения для сопротивления излучения рамки большого диаметра с равномерным распределением тока.

- 4) Аналитическая модель рамочной антенны над экраном с квазисинфазным распределением тока по контуру определяет характер зависимости и количественное соотношение напряженности магнитного поля рамочной антенны для различных расстояний между плоскостью антенны и экраном.

#### **Практическая значимость результатов работы:**

- 1) Разработана конструкция антенны радиочастотной метки, способствующая увеличению дальности действия пассивных систем RFID и повышающая надежность их работы при маркировке объектов с металлическими поверхностями.
- 2) Проведена оценка точности аналитической модели для расчета входного сопротивления антенны PIFA. Проведен анализ влияния размеров экрана на характеристики излучения антенны. Полученные результаты использованы при разработке конструкции антенны для настольных RFID считывателей.
- 3) Разработаны аналитические модели для рамочной антенны электрически большого диаметра с квазисинфазным распределением тока по контуру, предназначенные для оценки входного сопротивления и напряженности магнитного поля в ближней зоне антенны, расположенной над экраном. Предложенные модели позволяют произвести быструю предварительную оценку основных размеров и параметров структуры при разработке рамочных антенн аналогичной конструкции.

#### **Реализация и внедрение результатов исследований:**

- 1) Разработанная конструкция антенны радиочастотной метки была запатентована и использована компанией «Систематика» для производства специализированных радиочастотных меток под торговой

маркой «PatchTag». Метки данного типа нашли применение в проектах компании по автоматизации промышленного производства, учету передвижения транспортных средств и железнодорожного подвижного состава.

- 2) На основании результатов исследования конструкции антенны PIFA была разработана модель антенны для настольных считывающих устройств, которые использовались компанией «Систематика» в составе автоматизированных библиотечных систем на основе технологии RFID.
- 3) Разработанная конструкция рамочной антенны для систем радиочастотной идентификации УВЧ диапазона используется компанией «РСТ-Инвент» для выпуска промышленных образцов антенн данного типа, применяющихся в проектах по автоматизации промышленного производства и в розничной торговле.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: 15-ый международный студенческий семинар «Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena», 19-21 мая, Санкт-Петербург, 2008; 38-я международная европейская научная конференция «European Microwave Conference», 27-31 October 2008, Amsterdam.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 6 статьях и докладах, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 2 международных научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата. Основные положения защищены 1 авторским свидетельством на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения. Работа изложена на 119 страницах машинописного текста, включает 64 рисунка и содержит список литературы из 67 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные направления в решении задач по рассматриваемой тематике и выделены те из них, рассмотрение которых проводится в работе.

В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертации. Кратко упоминается история появления систем радиочастотной идентификации. Приводится обзор основных характеристик систем RFID и принципов их функционирования. Дается описание основных компонентов RFID системы, среди которых особое внимание уделяется конструкциям радиочастотных меток и антенн для считывающих устройств RFID систем УВЧ диапазона. При описании меток рассматриваются особенности их современных конструкций и основные требования, эти особенности определяющие. При рассмотрении конструкций антенн считывающих устройств приводится обзор наиболее важных их характеристик с точки зрения использования в RFID системах и примеры современных конструкторских решений в этой области. Кратко отмечаются направления, рассматриваемые автором в работе, и даются ссылки на соответствующие главы.

Во второй главе рассматривается конструкция антенны радиочастотной метки УВЧ диапазона, получившей наименование «PatchTag» (рис. 1). В ее основе лежит хорошо известная конструкция микрополосковой антенны. Для адаптации структуры к требованиям, предъявляемым к радиочастотным меткам, и достижения максимальной эффективности антенны было произведено несколько модификаций:

- 1) существенное (более чем в 10 раз) уменьшение линейного размера одной из сторон антенны;
- 2) смещение точки возбуждения антенны (точки подключения радиочастотного чипа) к краю излучателя для удобства монтажа метки;
- 3) максимальное удешевление конструкции антенны за счет использования воздушной прослойки в качестве диэлектрика;
- 4) согласование антенны с комплексным входным сопротивлением ра-



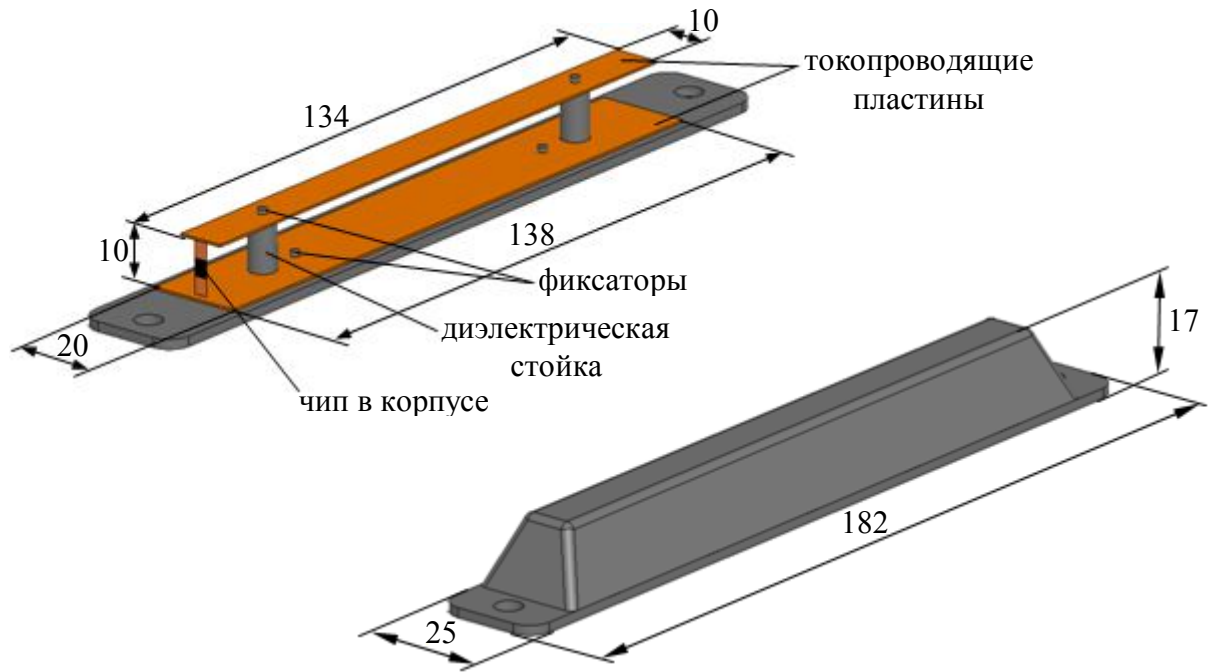


Рис. 1. Конструкция метки «PatchTag» (размеры указаны в мм).

диочастотного чипа Philips RFID ASIC SL3S3001FTT в корпусе TSSOP8 (на частоте 868 МГц составляет  $Z_c = 13 - j457$  Ом) без использования дополнительных согласующих элементов (рис. 2, а).

В результате расчета антенны с использованием метода конечных элементов (МКЭ) были получены характеристики, согласно которым на частоте 870 МГц антенна имеет входное сопротивление  $Z_a = 47 + j456$  Ом и коэффи-

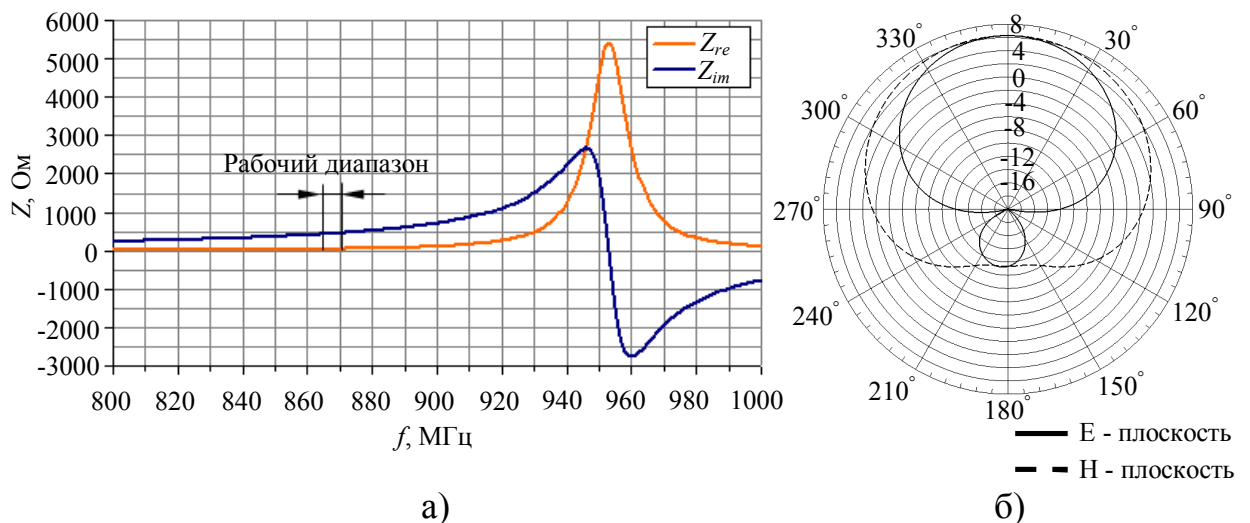


Рис. 2. Характеристики антенны радиочастотной метки: а) зависимость входного сопротивления от частоты; б) диаграмма направленности (дБ).

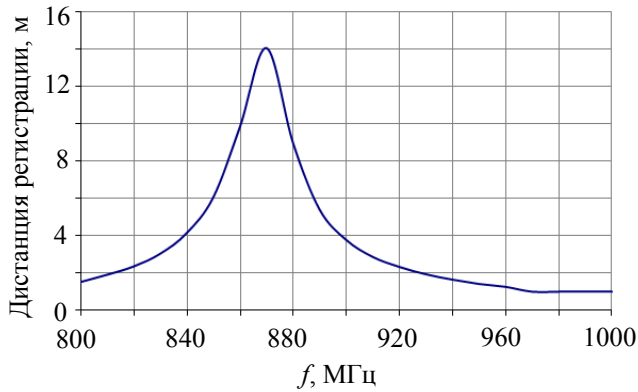


Рис. 3. Результаты измерений дистанции регистрации метки.

Измерения при размещении радиочастотной метки на металлических поверхностях показали, что дистанция ее регистрации в этом случае увеличивается в среднем на 20%. В сравнении же с другими радиочастотными метками схожих размеров, предназначенными для маркировки металлических поверхностей, увеличение дистанции регистрации метки «PatchTag» составило от 8 до 30% в воздухе и от 40 до 65% при размещении на металле.

Результаты измерений показывают, что использование рассматриваемой антенны позволяет существенно увеличить дистанцию регистрации метки, что повышает дальность действия пассивных RFID систем УВЧ диапазона и надежность их работы.

В третьей главе диссертации проводится исследование конструкции антенны PIFA (Planar Inverted-F Antenna, рис. 4, а) и методик оценки ее основных характеристик, целью которого является оптимизация параметров антенны с точки зрения ее использования в RFID системах УВЧ диапазона. Для расчета входного сопротивления антенны используется ее модель в виде отрезка микрополосковой линии (МПЛ) передачи с волновым сопротивлением  $Z_0$ , короткозамкнутой с одной стороны, и нагруженной на эквивалентное сопротивление щели  $Z_{щ}$  с другой (рис. 4, б). Целью расчетов является определение расстояния  $l_2$  между точкой подключения линии питания ( $U_{ген}$ ) и короткозамкнутым краем излучателя, при котором входное сопротивление в данной точке наиболее близко к 50 Ом (волновому сопротивлению коаксиальной линии питания антенны).

коэффициент усиления 6,2 дБ (рис. 2). При этом теоретическая оценка максимальной дистанции регистрации метки, произведенная с использованием формулы Фриса для свободного пространства [1], составила 14,4 метра, что хорошо согласуется с результатами эксперимента, приведенными на рис. 3.

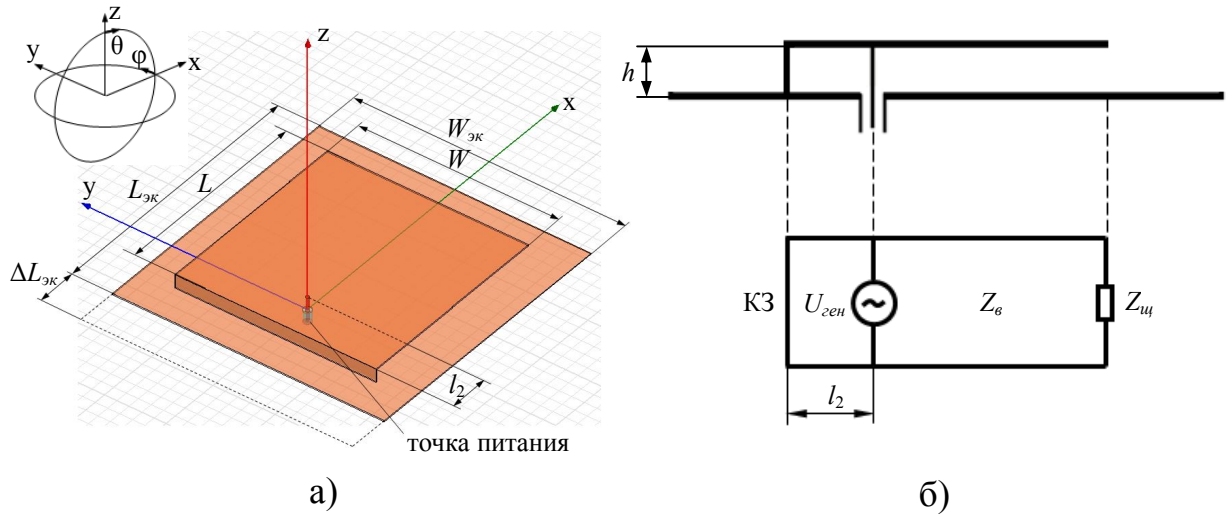


Рис. 4. Конструкция антенны PIFA (а) и ее эквивалентная модель в виде линии передачи (б).

Сопоставление результатов аналитических расчетов (рис. 5, а) с данными моделирования антенны с использованием МКЭ (рис. 5, б) показывает, что для антенны рассматриваемой конструкции аналитическая модель позволяет определить оптимальную точку подключения линии питания с высокой степенью точности.

На следующем этапе анализа конструкции проводится оценка влияния размеров экрана на диаграмму направленности антенны. Минимальные на-

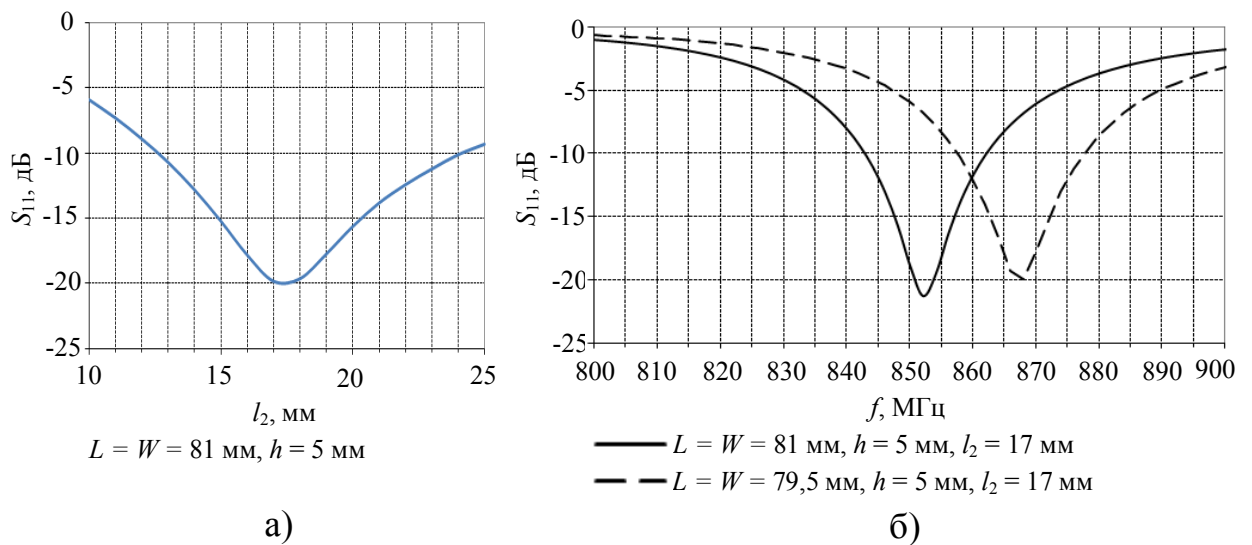


Рис. 5. Модуль коэффициента отражения на входе антенны: а) аналитическая модель; б) моделирование МКЭ.

чальные размеры экрана при этом устанавливаются равными  $L_{\text{эк}} = W_{\text{эк}} = L + 6 \cdot h$  (см. рис. 4, а), предельные значения размеров экрана –  $L_{\text{эк}} = W_{\text{эк}} = \lambda/2$  (170 мм). Результаты расчетов диаграммы направленности антенны для  $\theta$ -компоненты поля ( $D_\theta$ ) показывают, что сокращения уровня заднего лепестка и симметрии диаграммы направленности (относительно центральной оси антенны  $Z$ ) можно добиться путем увеличения длины экрана лишь со стороны замыкающей стенки (рис. 6).

Полученные в результате проведенного анализа данные используются при расчетах промышленного образца антенны, характеристики которого приводятся в заключительной части главы.

В четвертой главе диссертации рассматривается конструкция рамочной антенны электрически большого диаметра с разбиением контура антенны на отрезки с использованием планарных конденсаторов (рис. 7, а). Данная конструкция обеспечивает квазистационарное распределение тока по контуру рамочной антенны (рис. 7, б), что является оптимальным условием для формирования равномерного распределения магнитного поля над поверхностью

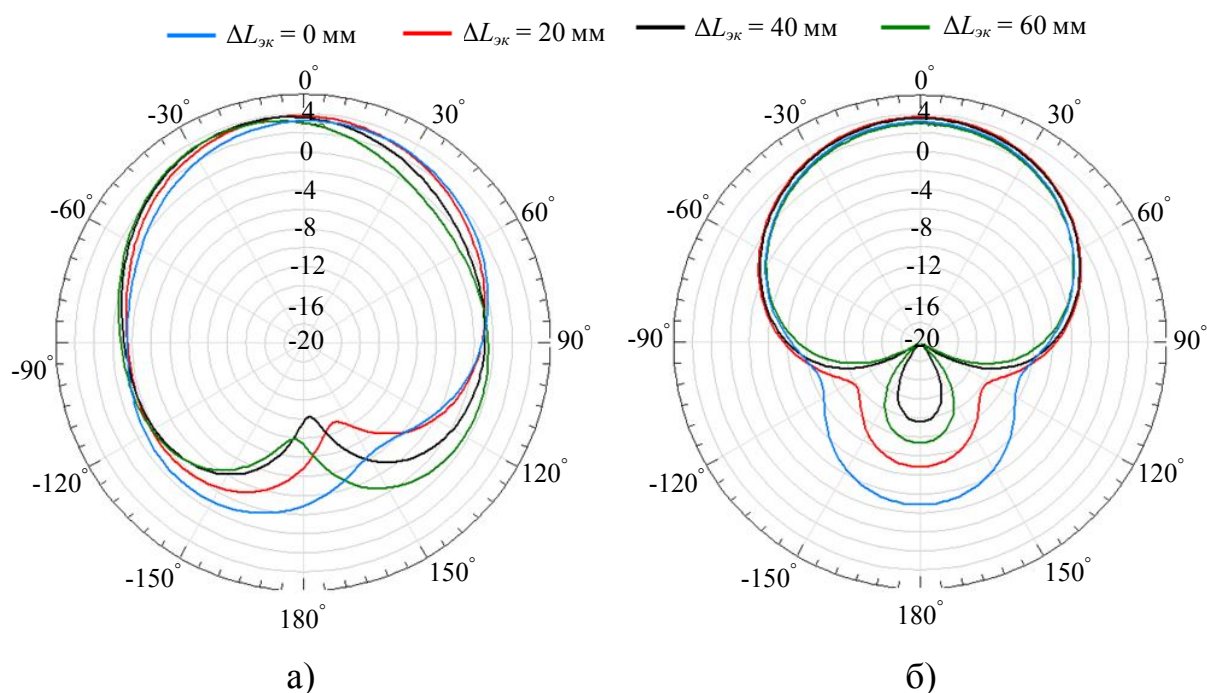


Рис. 6. Зависимость ДН PIFA ( $D_\theta$ ) от длины экрана  $\Delta L_{\text{эк}}$ , дБ:

а) в плоскости XZ ( $\varphi = 0$ ), б) в плоскости YZ ( $\varphi = 90^\circ$ ).

( $L = W = 79,5$  мм,  $l_2 = 17$  мм,  $L_{\text{эк}} = W_{\text{эк}} = 110$  мм).

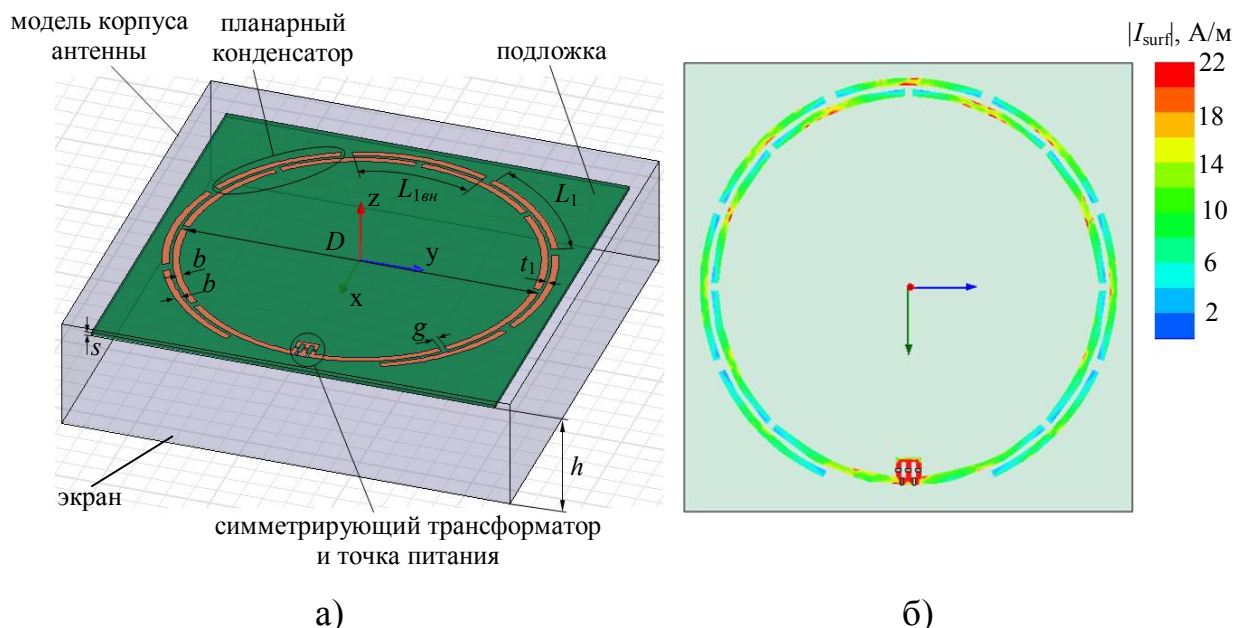


Рис. 7. Конструкция рамочной антенны (а) и распределение поверхностного тока по контуру антенны (б).

рамочной антенны и регистрации радиочастотных меток в этой зоне посредством индуктивной связи. Данный тип взаимодействия используется в RFID системах УВЧ диапазона при регистрации меток в сложных условиях: плотное размещение меток или маркировка объектов, содержащих жидкости.

Первоначальный анализ рамочной антенны производится с использованием метода конечных элементов. Антенна в электродинамической модели (рис. 7, а) строится в виде структуры печатных проводников шириной  $b = 3$  мм на подложке из стеклотекстолита ( $\epsilon_r = 4,7$ ;  $\text{tg}\delta = 0,025$ ) толщиной  $s = 3$  мм. Для уменьшения излучения антенны в сторону, противоположную основной зоне регистрации, с нижней стороны подложки на расстоянии  $h = 40$  мм располагается экран с размерами  $200 \times 200$  мм. В проводнике антенны сделано 7 вырезов длиной  $g = 3$  мм. Подстройка реактивной части входного сопротивления антенны производится в процессе моделирования варьированием диаметра антенны ( $D = 159$  мм), длины дополнительных линий, образующих конденсатор ( $L_1 = 61$  мм) и расстояния между дополнительными линиями и основным контуром антенны ( $t_1 = 1,5$  мм). Для согласования симметричного входа антенны, имеющего входное сопротивление  $Z_0 = 220$  Ом, с

50-Ом коаксиальным кабелем в конструкции используется LC-симметрирующий трансформатор.

Для ускоренного предварительного расчета основных размеров антенны разработана аналитическая модель, в которой контур рамки над экраном рассматривается в качестве микрополосковой линии. При этом импеданс рамки выражается через погонные параметры линии как:

$$Z_{ex} = i \left( \omega L_1 \cdot l - \frac{n}{\omega C_{нк}} \right) + R_1 \cdot l, \quad (1)$$

где  $L_1$  и  $R_1$  – погонная индуктивность и емкость линии,  $l$  – ее длина,  $C_{нк}$  – емкость планарного конденсатора,  $n$  – число планарных конденсаторов ( $n = 7$  в рассматриваемом случае).

Индуктивность рамки можно определить как [2, с. 216]:

$$L = L_1 \cdot l = \mu_0 R \left[ \ln \left( \frac{8R}{b_1} \right) - 2 \right], \quad (2)$$

где  $R$  – радиус рамки,  $b_1$  – эквивалентный радиус печатного проводника.

Для расчета емкости планарного конденсатора используется выражение из [3]:

$$C_{нк} = \frac{1}{2} \left( \frac{L_{16H} - g}{2} \cdot \varepsilon_0 \frac{2}{\pi} \ln \left( 4 \frac{2b + t_1}{t_1} \right) + \frac{L_{16H} - g}{2} \cdot \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \frac{1}{\pi} \ln \left( 16 \frac{s}{\pi \cdot t_1} \right) \right), \quad (3)$$

где  $L_{16H} = 59$  мм.

Сопротивление излучения рамки ( $R_1 l$ ) вычисляется при помощи выражения для мощности излучения рамки, приведенного в [2, с. 221]. При этом влияние экрана на сопротивление излучения рамки учитывается делением полученного результата пополам:

$$R_{изл} = R_1 l = \frac{1}{2} \left( \frac{2P_{изл}}{I_0^2} \right) = \frac{\pi (R \omega_0 \mu_0)^2}{4\eta} \frac{1}{k \cdot R} \int_0^{2kR} J_2(x) dx, \quad (4)$$

где  $\omega_0 = \left( L_1 \cdot l \cdot \frac{C_{нк}}{7} \right)^{-\frac{1}{2}}$  – резонансная частота,  $\eta = 120\pi$  Ом,  $J_2(x)$  – функция Бесселя второго порядка.

Вычисление модуля коэффициента отражения (относительно  $Z_0 = 220$  Ом) и сравнение полученного результата с данными электродинамического



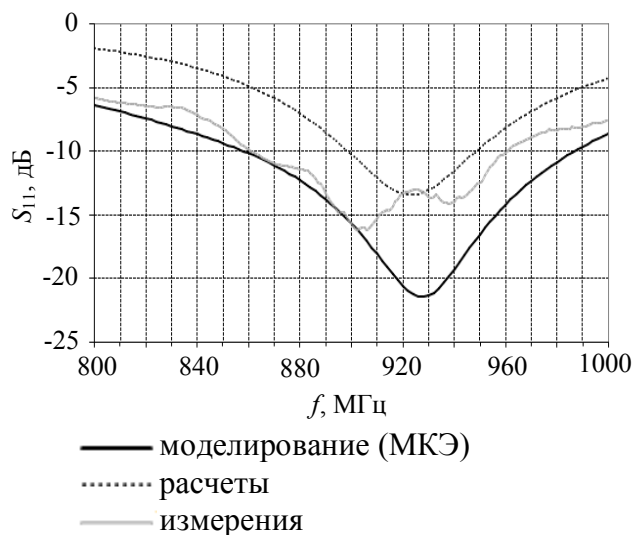


Рис. 8. Модуль коэффициента отражения на входе антенны.

моделирования и измерений показывает достаточно хорошее совпадение полученных характеристик с точки зрения резонансной частоты (рис. 8). Наблюдаемое различие в уровне коэффициента отражения и ширине полосы пропускания может объясняться тем, что в аналитической модели не учитывается частотная зависимость сопротивления элементов, образующих симметрирующий трансформатор, и используется

достаточно приближительная оценка влияния экрана на характеристики антенны. Однако аналитическая модель может быть использована для предварительного расчета входного сопротивления антенны рассматриваемой конструкции и оценки влияния на характеристики антенны физических размеров элементов рамки.

Вопросу аналитической оценки напряженности магнитного поля рамочной антенны с экраном посвящена последняя часть четвертой главы. Известно,

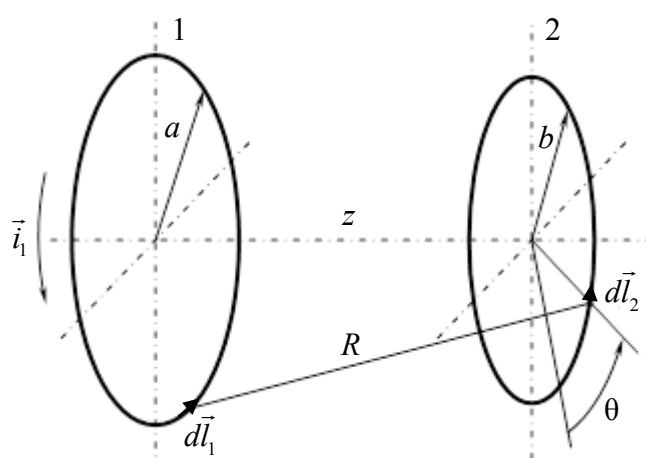


Рис. 9. Взаимодействие двух замкнутых контуров.

но, что если рассматривать два замкнутых контура 1 и 2 с радиусами  $a$  и  $b$ , расположенными на одной оси на расстоянии  $z$  (рис. 9), то суммарный векторный потенциал, создаваемый первым контуром в элементе  $dl_2$  второго контура, определяется выражением [4, с. 303 – 304]:

$$A = \frac{a \cdot i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \alpha d\alpha}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2 - 2ab \cos \alpha}}, \quad (5)$$

где  $i = \int_S \vec{J} d\vec{s}$  – ток в проводнике первого контура.

Предполагается, что задан ток в рамке 1. Магнитное поле в плоскости рамки 2 имеет две составляющие  $H_z$  и  $H_r$ . Учитывая, что  $\vec{H} = \text{rot}\vec{A}$ :

$$H_z(r, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\alpha(r, z))}{\partial r}; \quad H_r(r, z) = -\frac{\partial(rA_\alpha(r, z))}{\partial z}. \quad (6)$$

В результате корректировки (5) с учетом того, что в этом выражении представлена только  $A_\alpha$  компонента векторного потенциала и  $b = r$  есть радиальная координата точки, лежащей на поверхности, стягивающей рамку 2, получаем:

$$A_\alpha(r, z) = \frac{a \cdot I_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \alpha d\alpha}{\sqrt{a^2 + r^2 + z^2 - 2ar \cos \alpha}}. \quad (7)$$

Здесь  $I_0$  – полный ток, текущий через рамку 1.

После подстановки (7) в (6), вычисления производных и упрощения вычислений для случая, когда  $r \ll a$  имеем:

$$H_z(r, z) = \frac{a \cdot I_0}{4\pi r} \left[ 2 \cdot \int_0^{2\pi} \frac{ar \cos^2 \alpha d\alpha}{(a^2 + z^2)^{3/2}} - \int_0^{2\pi} \frac{3ar(r^2 - ar \cos \alpha) \cos^2 \alpha d\alpha}{(a^2 + z^2)^{5/2}} \right]. \quad (8)$$

В результате дальнейших преобразований с учетом, что  $r \ll a$ , и пренебрежения вторым слагаемым выражение (8) упрощается до следующего вида:

$$H_z(r, z) = \frac{a^2 \cdot I_0}{2(a^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (9)$$

С учетом того, что нормальная компонента магнитного поля на экране равна нулю, наличие экрана можно представить как наличие двух рамок с противофазными токами в них. В результате выражение (9) преобразуется к следующему виду:

$$H_z(r, z) = \frac{I_0}{2a} \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{(z-h)^2}{a^2}\right)^{3/2}} - \frac{1}{\left(1 + \frac{(z+h)^2}{a^2}\right)^{3/2}} \right]. \quad (10)$$



Приведенное на рисунке 10 сравнение графиков напряженности магнитного поля в ближней зоне рамочной антенны, полученных с использованием выражения (10), с данными электродинамического моделирования двух вариантов конструкции рамочной антенны с квазисинфазным распределением тока по контуру показывает, что на стадии первоначальных расчетов аналитическая модель может дать приемлемое описание зависимости напряженности магнитного поля в ближней зоне рамочной антенны от ее расстояния до экрана: расположение точки максимума, соотношение между значениями напряженности магнитного поля для различных расстояний между рамкой и экраном.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, описаны примеры практического использования полученных результатов и перспективы развития рассматриваемых в работе конструкций антенн.

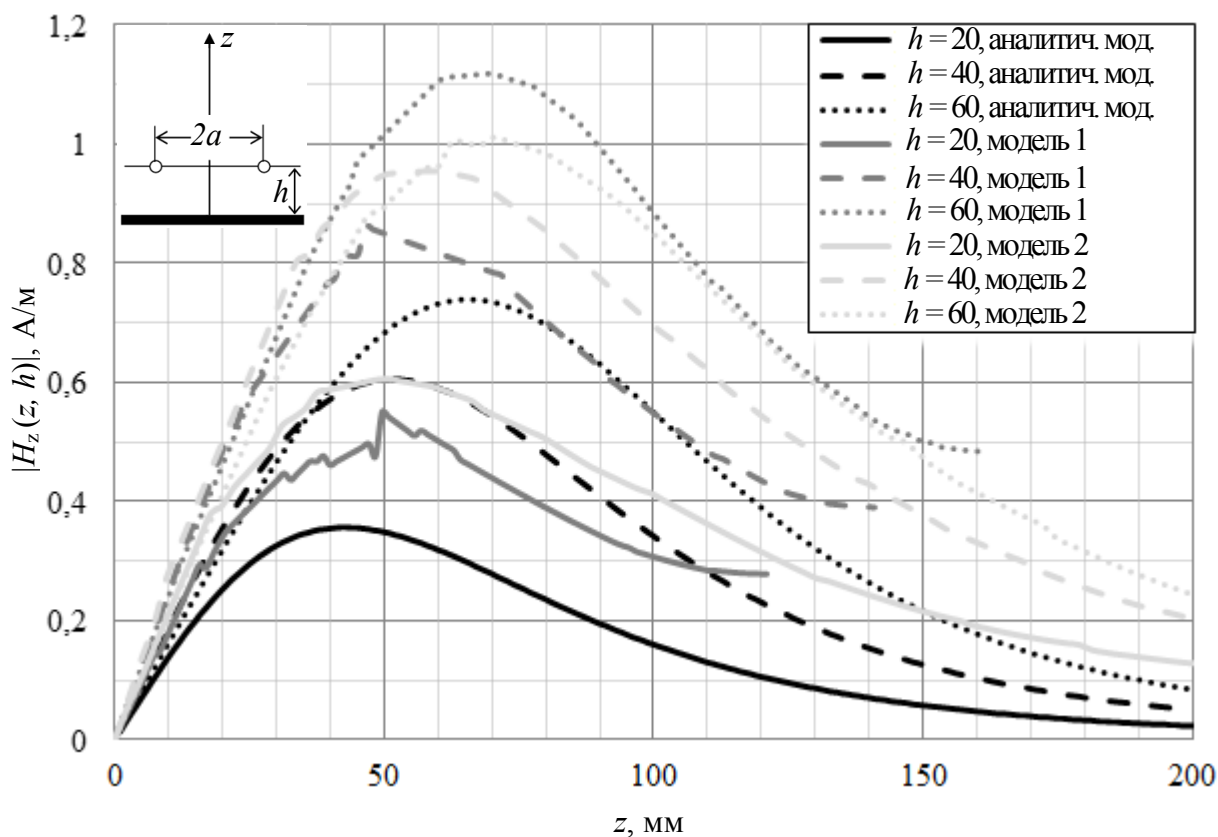


Рис. 10. Зависимость напряженности магнитного поля от высоты рамочной антенны над экраном (модель 1 – с разделительными конденсаторами; модель 2 – с планарными конденсаторами (рис. 7, а)).

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Rao, K. V. S. Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application [Текст] / K. V. S. Rao, P. V. Nikitin, S. F. Lam // *Antennas and Propagation*. – 2005. – V.53, № 12. – P. 3870 – 3876.
2. Balanis, C. A. Antenna theory: analysis and design [Текст] / C. A. Balanis. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, 1997. – 960 p.
3. Вендик, О. Г. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика [Текст] / О. Г. Вендик, С. П. Зубко, М. А. Никольский // *Журнал Технической Физики*. – 1999. – Том 69. – Вып. 4. – С. 1 – 7.
4. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники [Текст]: учебник для вузов, в 2-х т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. – Т.2. – 416 с.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Попов, А. Л. Напряженность магнитного поля в ближней зоне рамочной антенны для систем радиочастотной идентификации [Текст] / А. Л. Попов, О. Г. Вендик, Н. А. Зубова // *Письма в Журнал Технической Физики*. – 2010. – Т. 36. – Вып. 19. – С. 16 – 22.
2. Попов, А. Л. Модель рамочной антенны для систем радиочастотной идентификации [Текст] / А. Л. Попов, О. Г. Вендик // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2010. – Вып. 7. – С. 3 – 7.
3. Попов, А. Л. Планарная антенна для настольных считывающих устройств систем радиочастотной идентификации [Текст] / А. Л. Попов, О. Г. Вендик // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2011. – Вып. 2. – С. 3 – 8.

Другие статьи и материалы конференций:

4. Popov, A. High gain antenna for passive UHF RFID tags (Антенна с высоким коэффициентом усиления для пассивных RFID меток УВЧ диапазона) [Текст] / A. Popov, S. Dudnikov, A. Mikhaylov // *Proc. of 15th Anniversary International Student Seminar on Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena*. – 2008. – P. 35 – 38.
5. Popov, A. Passive UHF RFID tag with increased read range (Пассивная RFID метка УВЧ диапазона с увеличенной дистанцией регистрации) [Текст] / A. Popov, S. Dudnikov, A. Mikhaylov // *Proc. of the 38th Microwave Conference*. – 2008. – P. 1106 – 1108.
6. Метка для радиочастотной идентификации [Текст]: патент на полезную модель № 62723 Рос. Федерация: МПК G 08 B 13/00/ Попов А. Л., Михайлов А. Б.; заявитель и патентообладатель ООО «Аэро Солюшенз СПб». – № 2006136537/22; заявл. 18.10.2006; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.