

На правах рукописи



СОРОКОВИК ДАНИЛ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН
С ПРИМЕНЕНИЕМ КАЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 05.12.07 Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре Радиотехнических приборов и антенных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
ПЕРМЯКОВ Валерий Александрович

Официальные оппоненты: **КРЮКОВСКИЙ Андрей Сергеевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
декан факультета «Информационные системы и
компьютерные технологии» Российского нового
университета (НОВПО РосНОУ)

КЛИМОВ Константин Николаевич,
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник ОКБ ОАО Научно-производственное
объединение «Лианозовский электромеханический
завод» (ОАО «НПО «ЛЭМЗ»)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт»
(государственный университет)

Защита состоится « 18 » декабря 2015 г., в 10⁰⁰, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на официальном сайте: <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>.

Автореферат разослан « » октября 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Потапов
Александр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение. В работе рассматриваются электродинамические задачи формирования нестационарных полей вибраторных антенн в свободном пространстве.

Исследование процессов излучения электромагнитных (ЭМ) полей началось с момента их открытия Г.Герцем. В 1889 году Г.Герц дал решение задачи об излучении электрического диполя и описал структуру силовых линий поля в гармоническом режиме излучения. Результаты этого решения, включая наглядное описание силовых линий поля, излагаются в классических курсах электродинамики. Тем не менее структура силовых линий в подавляющем большинстве изданий приводится для столь небольшого числа моментов времени, что не выявляет тонкие эффекты формирования поля диполя, некоторые из которых отмечались уже Г.Герцем.

Изучение нестационарных процессов излучения антенн в настоящее время стимулируется практическими приложениями сверхкоротких импульсов в подповерхностной радиолокации, импульсной радиолокации высокого разрешения, радиосвязи, радиоизмерениях (Арманд Н.А., Астанин Л.Ю., Гринев А.Ю., Иммореев И.Я., Кардо-Сысоев А.Ф., Костылев А.А., Кошелев В.И., Сарычев В.А., Смирнов В.М., Финкельштейн М.В., Французов А.Д., Баум С.Е., Тейлор Дж. и др.). Анализу нестационарного излучения антенн посвящены работы отечественных ученых Авдеева В.Б., Зернова Н.В., Иммореева И.Я., Ковалева И.П., Кошелева В.И., Крымского В.В., Пономарева Д.М., зарубежных ученых Смита Г.С., Хармута Х.Ф., Шантца Х.Г. и многих других.

Традиционным подходом к анализу характеристик антенн в случае узкополосных сигналов является применение спектрального метода. Для сверхширокополосных и сверхкоротких импульсных сигналов более адекватен альтернативный подход, использующий прямое пространственно-временное представление сигналов. Между двумя указанными подходами существует определенный разрыв, устранению которого может способствовать анализ эволюции силовых линий ЭМ полей методами качественной теории дифференциальных уравнений. Существенно, что методика качественного анализа является единой как для гармонических, так и для негармонических, в том числе импульсных, полей.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что практические приложения импульсных ЭМ полей в радиосвязи и радиолокации требуют дальнейшего развития теоретических исследований.

Целью настоящей работы является **изучение нестационарной структуры электромагнитного поля электрического вибратора с упором на использование методов качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений.**

Качественный анализ излучения антенн представляет научный, учебно-методический и практический интерес, в частности, потому, что численное исследование сталкивается с определенными трудностями в окрестностях особых точек (ОТ) векторного поля, а качественные методы эффективны именно в этих случаях. Поэтому сочетание качественных и численных методов является наиболее целесообразным способом анализа электромагнитных полей.

Решаемые задачи

1. Исследование качественными методами эволюции ЭМ полей электрического диполя в гармоническом и негармоническом режимах возбуждения диполя.
2. Исследование качественными методами эволюции ЭМ полей электрического вибратора конечной длины в гармоническом режиме возбуждения.
3. Изучение условий формирования вблизи системы параллельных вибраторов конечной длины областей с минимальными значениями электрического поля.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались аналитические методы качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений и численные методы интегрирования дифференциальных уравнений.

Новые научные результаты

1. Развита методика качественного анализа силовых линий электрического и магнитного полей и вектора Пойнтинга электрического диполя в гармоническом и негармоническом режимах его излучения в свободном пространстве. Определены условия эволюции ОТ ЭМ полей и вектора Пойнтинга электрического диполя в пространстве и времени, дана классификация ОТ на плоскости r, z цилиндрической системы координат, а также условия бифуркации ОТ, определена локальная структура силовых линий в окрестностях ОТ, проведен качественный анализ в целом структу-

ры силовых линий в гармоническом режиме и в импульсном (для конкретных форм импульсов). Найдены условия формирования нетривиальной вихревой структуры силовых линий электрического поля в зоне индукции диполя. На основе определения мгновенных скоростей нулей и экстремумов нестационарных полей изучен эффект «сверхсветового» движения локальных участков импульсов в зоне индукции диполя.

2. С использованием аналитической модели распределения тока и заряда тонкого симметричного электрического вибратора конечной длины изучена эволюция ОТ ЭМ полей и вектора Пойнтинга вибратора в пространстве – времени в гармоническом режиме возбуждения. Определены условия формирования нетривиальных вихревых структур силовых линий электрического поля в зоне индукции вибратора в зависимости от его длины. Установлена связь нулей и экстремумов диаграмм направленности (ДН) вибратора с траекториями ОТ векторного электрического поля.

3. Предложена методика определения областей с минимальными значениями электрического поля вблизи системы параллельных вибраторов конечной длины, обнаружена возможность формирования экстремумов («горячих точек») поля вблизи полуволновых вибраторов.

Практическая значимость

1. Развитый в работе метод качественного анализа ЭМ полей и вектора Пойнтинга диполя позволяет провести полное исследование эволюции и перестройки структур ЭМ поля, без пропусков структурных перестроек, возможных при расчетах полей с дискретным временным шагом стандартными численными методами. Это качество развитого в работе метода может быть использовано при анализе полей других типов антенн.

2. Разработана учебная программа визуализации силовых линий и других характеристик ЭМ полей электрического диполя при нестационарном возбуждении.

3. С применением качественного анализа предложено объяснение эффекта аномально малого запаздывания экстремумов и нулей поля относительно фронта импульса, что может быть использовано при интерпретации экспериментов.

4. Предложенная методика определения области с заданным числом и расположением нулей электрического поля вблизи системы параллельных вибраторов конечной длины может быть использована при решении практических задач формирования областей с минимальными значениями электрического поля для обеспечения электромагнитной совместимости антенн или реализации минимальных величин полей вблизи пользователя.

Достоверность результатов работы подтверждается согласием результатов качественного и численного анализов ЭМ полей диполя, в том числе с численными результатами, полученными ранее другими авторами на аналогичных моделях, контролем погрешности применяемых численных методов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Развитая методика качественного анализа силовых линий электрического и магнитного полей и вектора Пойнтинга электрического диполя в гармоническом, негармоническом периодическом и импульсном режимах излучения позволяет проанализировать эволюцию ОТ электромагнитного поля и вектора Пойнтинга в пространстве и времени и условия их бифуркации, и тем самым дать полную картину структурной перестройки полей без пропусков, которые возможны при численном исследовании полей с дискретным временным шагом.

2. На основе качественного анализа установлены условия возникновения двух нетривиальных структур электрического поля в зоне индукции электрического диполя в негармоническом режиме возбуждения. Первая структура аналогична обнаруженной Г.Герцем и представляет собой вихревые силовые линии, охваченные силовыми линиями замыкающимися на диполе. Вторая структура соответствует обращению в нуль электрического поля на сферической поверхности и имеет место только в негармоническом режиме.

3. Анализ мгновенных скоростей нулей и экстремумов импульса конкретной формы показал, что в зоне индукции диполя могут реализоваться сверхсветовые режимы движения нулей и экстремумов компонент ЭМ поля и вектора Пойнтинга, при этом скорости характерных точек импульса с удалением от диполя стремятся к скорости света в вакууме, а сами точки не достигают фронта импульса.

4. Качественный анализ эволюции полей тонкого вибратора конечной длины в гармоническом режиме возбуждения показал, что нетривиальная вихревая структура силовых линий электрического поля, выявленная для диполя, имеет место и для вибратора с длиной плеча менее четверти длины волны. Для вибраторов конечной длины установлена связь траекторий ОТ с нулями и максимумами средней за период ДН вибратора, а именно: траектории ОТ типа седла выходят на нули, а траектории ОТ типа центра – на максимумы ДН.

5. Обнаружено, что в системе полуволновых вибраторов при формировании области с заданными нулями электрического поля возникают экстремумы («горячие точки»), отсутствующие вблизи вибраторов малой длины.

Апробация результатов и публикации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 10-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов МЭИ «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2004 г.); 1-й и 2-й всероссийских конференциях «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Муром, 2003 г, 2006 г.; Международной научной конференции к 95-летию академика В.А.Котельникова «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А.Котельникова». М. 2003 г.; международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИР-ЭМВ-2005», Таганрог, 2005 г, третьей международной конференции «Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. UWBUSIS-2006», September 18-22, 2006. Sevastopol, Ukraine, 3-й, 5-й, 6-й Всероссийских научно-технических конференциях «Радиолокация и радиосвязь», М., ИРЭ РАН, 2009, 2011, 2012 гг., международных конференциях «Progress in electromagnetic research», Moscow, 2009, 2012, первой Всероссийской микроволновой конференции, Москва, ИРЭ РАН, 2013 г. Результаты исследований опубликованы в 4-х статьях (из них 3 статьи в журналах из списка ВАК РФ) и 14 докладах на Всероссийских и Международных конференциях.

Использование результатов работы. Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры РТПиАС НИУ «МЭИ».

Объём и структура диссертации. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, четырех приложений и списка литературы, изложена на 204 страницах

машинописного текста, иллюстрирована 52 рисунками. Список цитированной литературы включает 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дано краткое описание проблемы, сформулированы цели работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен обзор методов анализа нестационарных полей антенн. Сделан вывод, что применение методов качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений к анализу процессов нестационарного излучения антенн позволяет выявить закономерности формирования полей антенн с новой точки зрения, существенно дополняющей возможности других известных методов. Отмечено, что совместное использование численных и качественных методов с применением современных математических пакетов для визуализации силовых линий, амплитудных и энергетических характеристик импульсных полей является перспективным инструментом исследований, ценным с учебно-методической, научной и прикладной точек зрения.

Во второй главе проведен качественный анализ структуры полей электрического диполя в гармоническом и негармоническом режимах излучения. В цилиндрической системе координат r, z (Рис.1) получены уравнения силовых линий электрического поля \mathbf{E} (1) и линий вектора Пойнтинга \mathbf{S} (2), дана классификация ОТ и найдены интегралы уравнений (1) и (2):

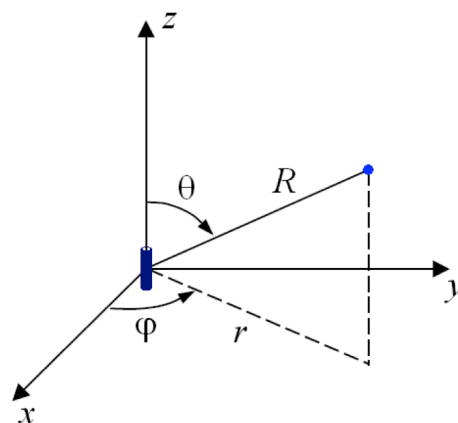


Рис.1

$$\frac{dz}{dr} = \frac{Ez}{Er} = \frac{P(r,z,\tau)}{Q(r,z,\tau)} \quad (1) \quad \frac{dz}{dr} = \frac{Sz}{Sr} = - \frac{Q(r,z,\tau)H\varphi}{P(r,z,\tau)H\varphi} \quad (2)$$

$$\text{где } r = R\sin\theta, z = R\cos\theta, \quad P(r, z, \tau) = 2f_1 \cos^2\theta - f_2 \sin^2\theta,$$

$$Q(r, z, \tau) = \sin\theta \cos\theta (2f_1 + f_2). \quad (3)$$

Компоненты полей в сферической системе координат определены соотношениями

$$E_R(R, \theta, t) = \frac{\cos\theta}{2\pi\epsilon_0 R^3} f_1, \quad f_1 = p(\tau) + Rp'(\tau), \quad (4)$$

$$E_\theta(R, \theta, t) = \frac{\sin\theta}{4\pi\epsilon_0 R^3} f_2, \quad f_2 = p(\tau) + Rp'(\tau) + R^2 p''(\tau), \quad (5)$$

$$H_\varphi(R, \theta, t) = \frac{c}{4\pi} \sin\theta \left(\frac{p''(\tau)}{R} + \frac{p'(\tau)}{R^2} \right), \quad (6)$$

и выражаются через дипольный момент электрического заряда $p(\tau)l$, $\tau = t - ct - R$.

Так как ОТ – это нули векторного поля, анализ их типов и эволюции в пространстве – времени, структуры силовых линий дает глубокую информацию об ЭМ поле.

Для случая произвольного возбуждения диполя результаты локального анализа простых ОТ уравнений (1) и (2) и структуры интегральных кривых (линий векторов \mathbf{E} и $\mathbf{S}=[\mathbf{E}\mathbf{H}])$ даны на Рис.2, под рисунками приведены интегралы уравнений в окрестностях ОТ. Как следует из (1) и (2), положения ОТ векторов \mathbf{E} и \mathbf{S} совпадают, но типы ОТ различаются. Слиянию простых особых точек соответствуют точки бифуркации (нижние Рис.2).

В гармоническом режиме (временные зависимости тока и заряда показаны на Рис.3) проведен анализ динамики возникновения и движения поверхностей $E_R=0$ (штрих-пунктирная линия) и $E_\theta=0$ (штриховая линия) (Рис.4). Поверхности $E_R=0$ и $E_\theta=0$ суть фазовые фронты компонент ЭМ полей и, начиная с пионерской работы Г.Герца, используются при анализе

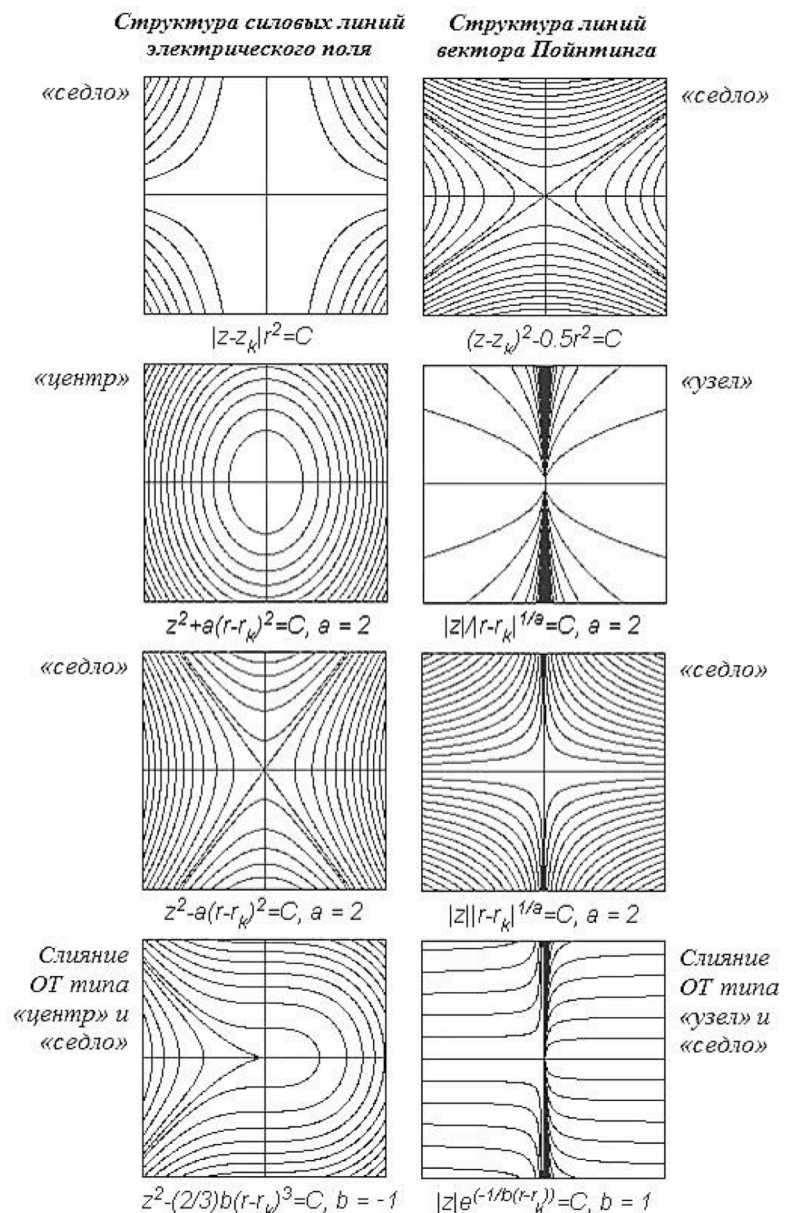


Рис.2

силовых линий поля. При качественном анализе учитывается, что на оси z строго $E_\theta=0$ и пересечение поверхности $E_R=0$ с этой осью дает положение ОТ на оси z , аналогично на оси r строго $E_R=0$ и пересечение поверхности $E_\theta(R,t)=0$ с осью r дает положение ОТ на этой оси (см. формулы (4), (5)).

Качественный анализ в целом проводится путем интегрирования уравнений (1) и (2) с учетом типов ОТ и траекторий их движения в пространстве – времени. Вертикальным линиям $a)$ - $d)$ Рис.4 соответствуют моменты времени для качественно разных картин силовых линий \mathbf{E} (сплошные линии на Рис.5). Кружками на Рис.4 показана точка бифуркации (слияние ОТ типа центра и седла) на оси r (Пермяков В.А. 2001г). Перестройка силовых линий \mathbf{E} вблизи точки бифуркации дана на Рис.6 в моменты времени: $a)$ $\omega t = \omega t_b - \pi/30$, $b)$ $\omega t = \omega t_b$, $в)$ $\omega t = \omega t_b + \pi/100$, $г)$ $\omega t = \omega t_b + \pi/30$.

Эволюция особых точек нестационарного поля изучена для ряда негармонических процессов (бигауссов импульс и другие). На Рис.7 приведена структура импульса заряда $p(t) = \sin^a(\omega t/2)\sin(\omega t)$ (при $a=2$) и его производных, на Рис.8 - эволюция особых точек компонент полей E_R и E_θ , H_ϕ . Из сравнения траекторий ОТ для гармонического режима (Рис.4) с траекториями ОТ (Рис.8) для импульса (Рис.7) следует, что на первом полупериоде импульса траектории ОТ качественно те же, что в гармоническом процессе. Качественные отличия от гармонического режима наблюдаются на втором полупериоде импульса.

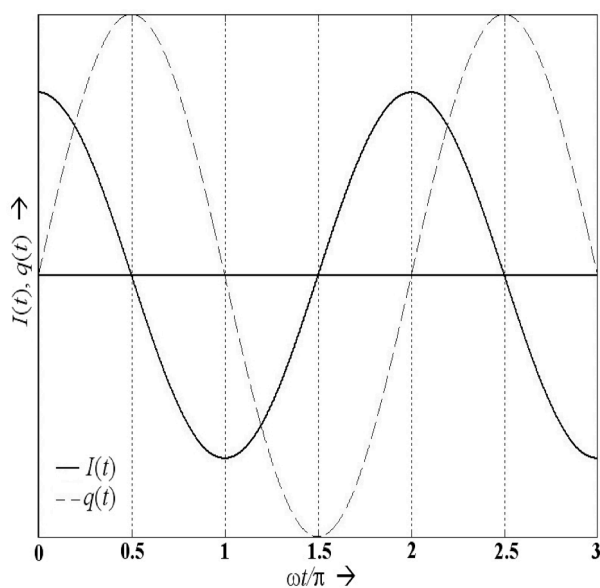


Рис.3

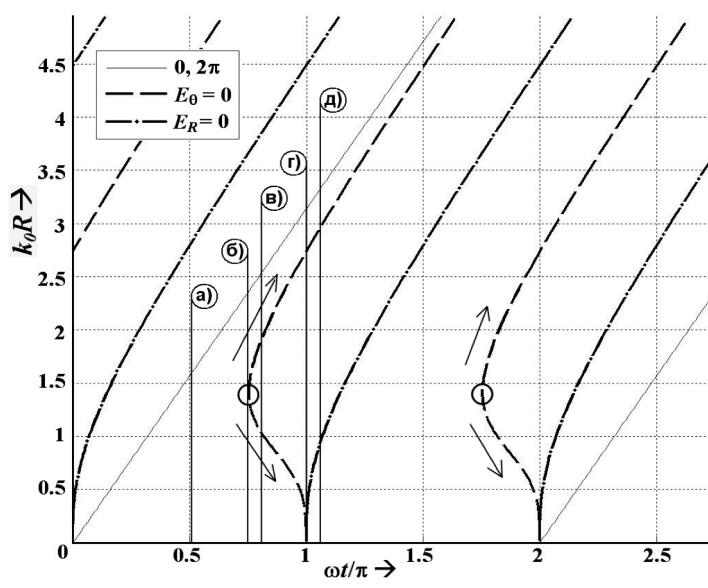


Рис.4

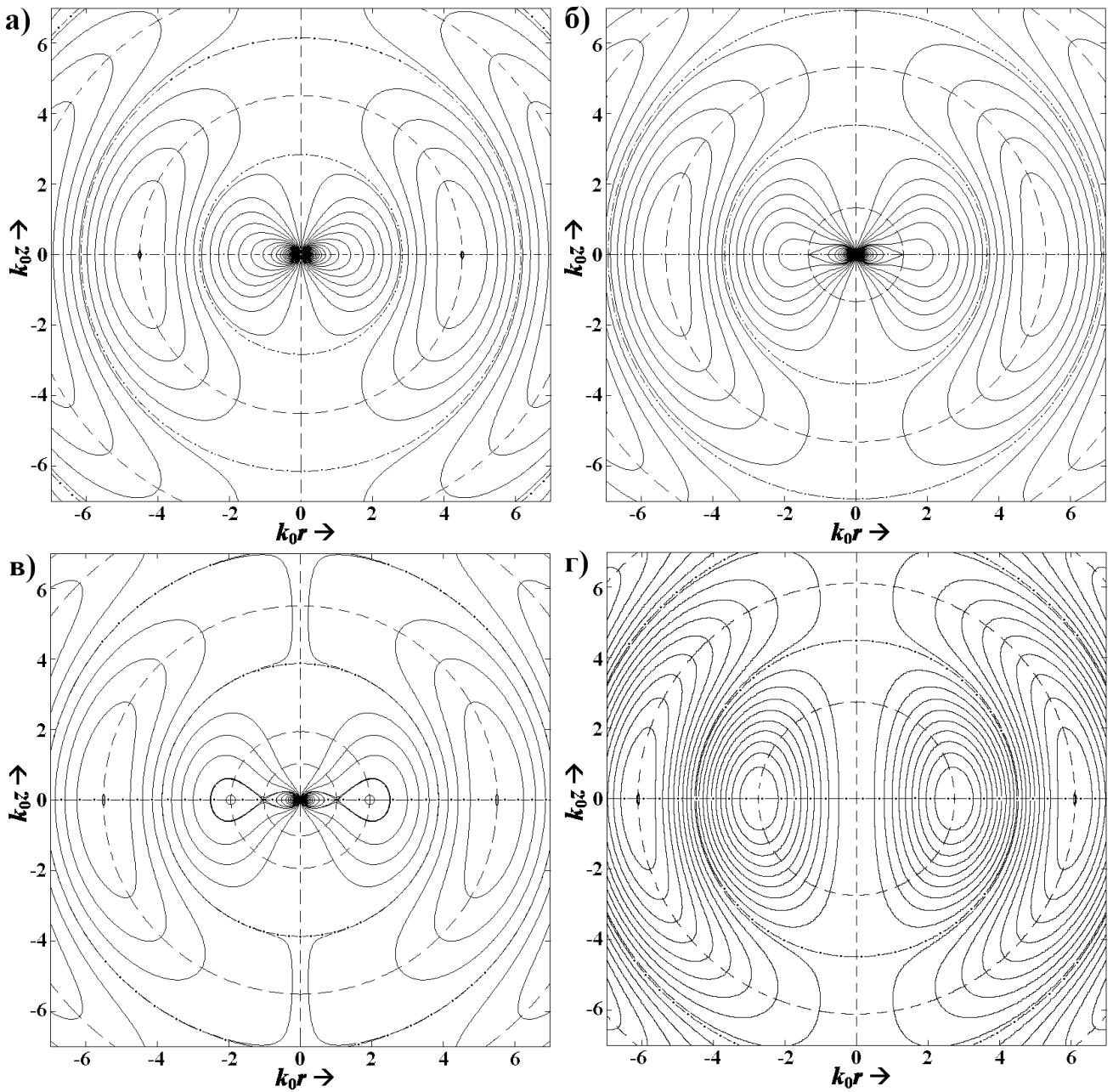


Рис.5 а)-г)

Видно, что поверхности $E_R=0$ и $E_\theta=0$ (сечение з) Рис.8) совпадают при определенных значениях радиуса R и времени t , т.е. на плоскости (r,z) возникает особая линия радиуса R . Этот исключительный случай связан с заменой реального излучателя точечным. Поведение силовых линий электрического поля в окрестности этой особенности векторного поля показано на Рис.9 з).

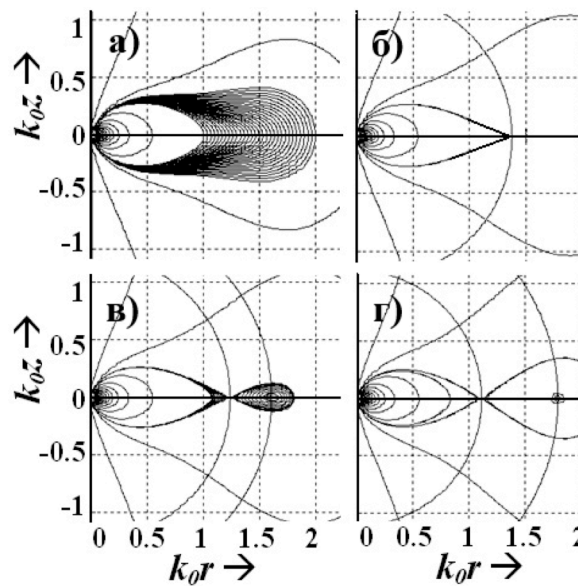


Рис.6

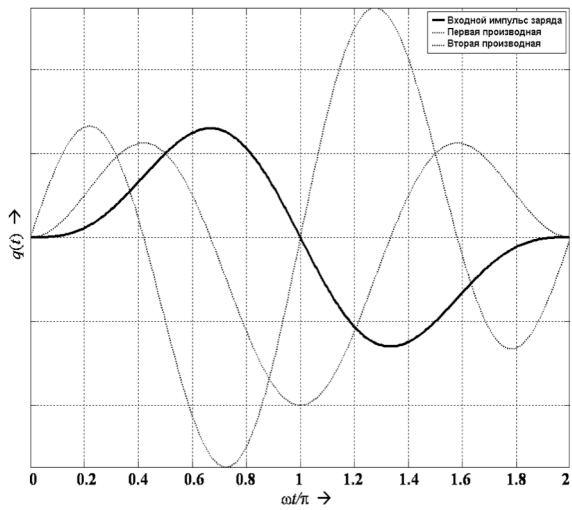


Рис.7

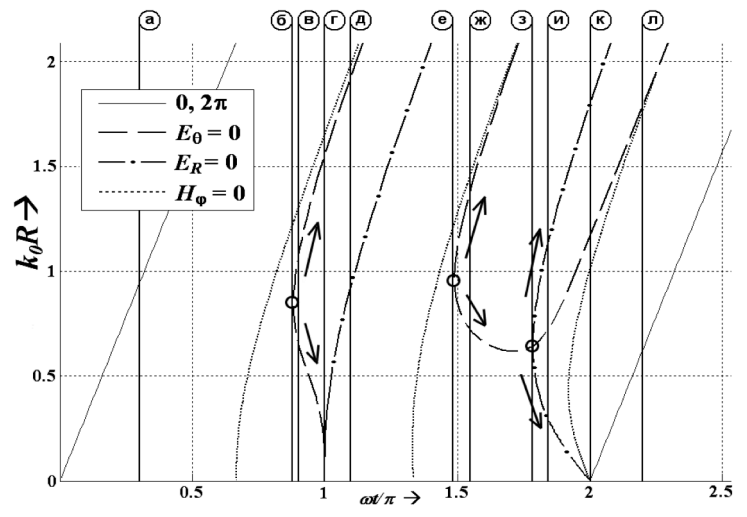


Рис.8

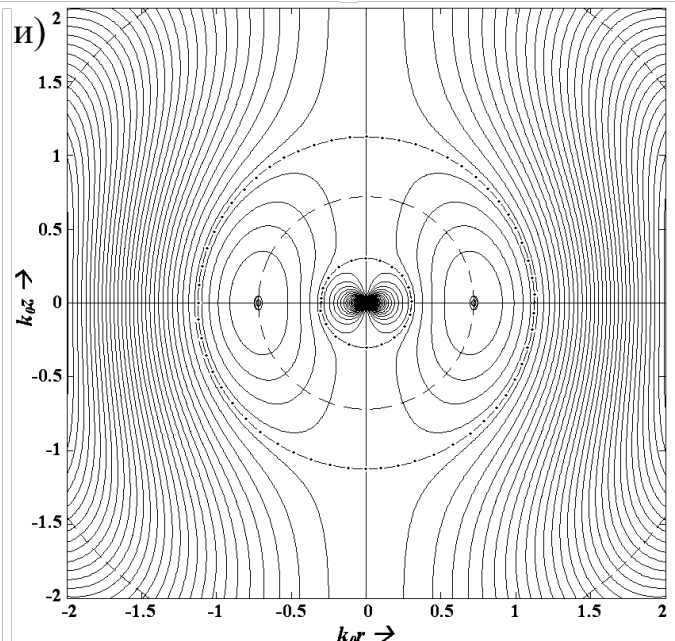
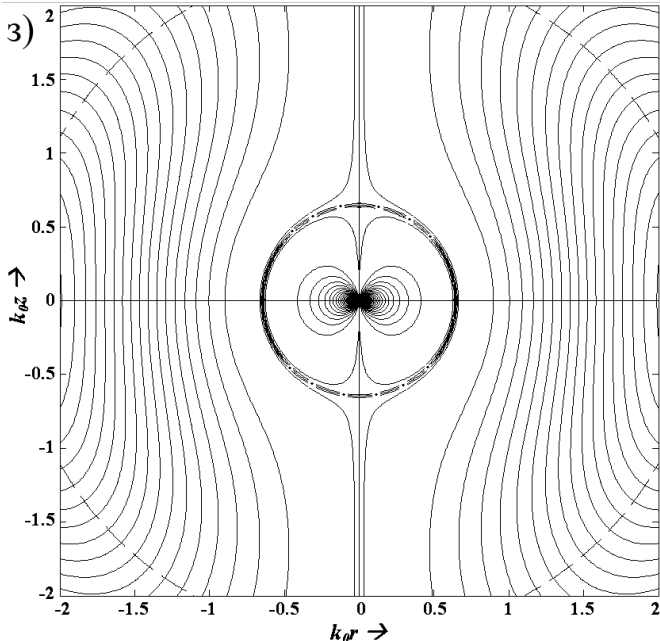
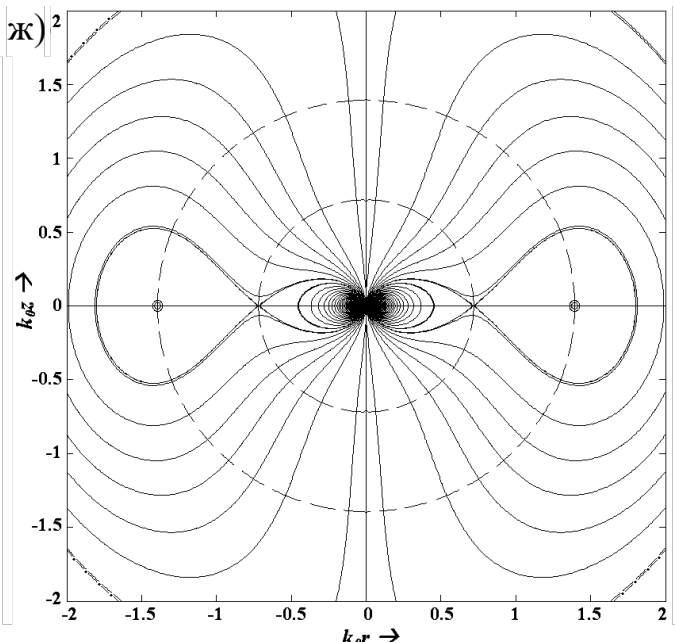
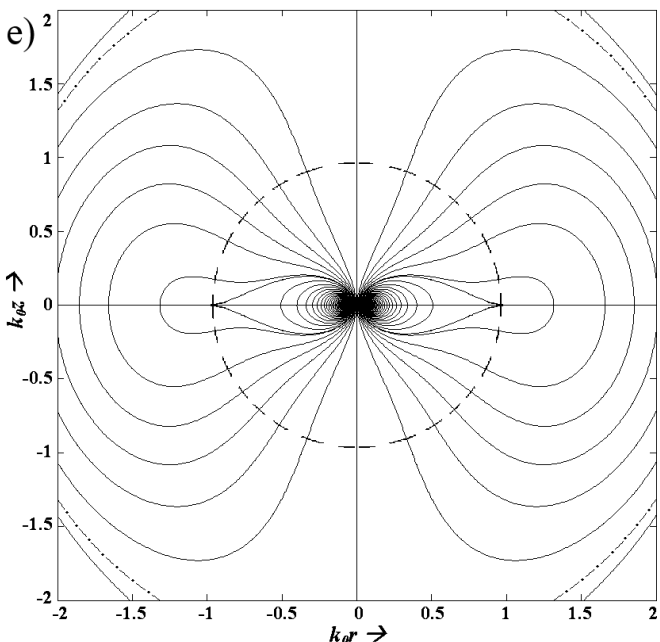


Рис.9 е)-и)

Обозначениям е)-и) – соответствуют моменты времени, в которых рассчитаны кадры качественно отличающихся картин силовых линий на Рис.8 е)-и).

Проведено сопоставление результатов с работой Г.Герца по излучению диполя. Выявлена неточность в расчетах Г.Герца. Силовые линии, показанные на Рис.5в, в работе Г.Герца отнесены к более раннему моменту времени ($t=3/8$ периода T в современных обозначениях), из-за которой, по-видимому, рисунки силовых линий из работы Г.Герца не приводятся в учебной литературе.

Выполнен анализ движения силовых линий с использованием понятий мгновенных скоростей нулей и экстремумов ЭМ полей. Рассчитаны траектории нулей и экстремумов компонент E_r (на оси z), E_z (на оси r), H_ϕ , r -компоненты вектора Пойнтинга (на оси r) и их мгновенных скоростей для диполя, возбуждаемого электрическим зарядом $p(t)=\sin^2(\omega t/2)\sin(\omega t)$. Динамика нулей и экстремумов в зоне индукции (см. Рис.10, на котором приведены траектории (а) и скорости (б) экстремумов компоненты E_z на оси r) оказывается весьма сложной, нули и экстремумы векторов \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{S} могут двигаться как к диполю, так и на бесконечность. Сложное движение характерных точек импульса обусловлено интерференцией квазистатической, индукционной и излучаемой компонент полей и носит динамический характер (см. Давидович М.В., 2009). При этом обязательно формируются ветви уходящих на бесконечность нулей и экстремумов компонент, имеющие сверхсветовую скорость. Однако по мере движения этих точек импульса на бесконечность их скорость падает, не превышая скорости света в вакууме, так что нули и экстремумы полей не могут догнать фронт импульса.

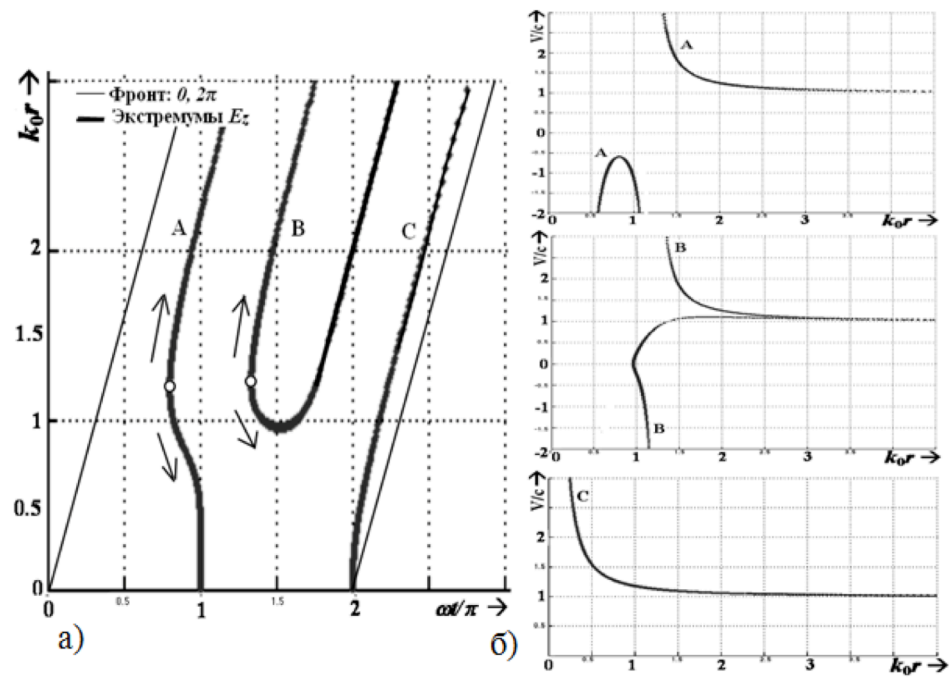


Рис.10

Этот результат дает качественную трактовку «сверхсветового» движения характерных точек импульса в зоне индукции малых антенн и согласуется с экспериментальными данными (Мисевич О.В. с соавторами, 2012г).

В **третьей главе** диссертации проведен анализ пространственно–временной структуры поля тонкого вибратора конечной длины в гармоническом режиме излучения. Для описания эволюции поля в пространстве–времени при синусоидальном распределении тока вдоль вибратора использовались мгновенные значения электрического и магнитного полей (7), полученные из известного приближенного аналитического решения (см. Стрэттон, Теория электромагнетизма, 1948, с.400), при этом уравнения (1) и (2) определяются функциями P и Q , данными в (8).

$$E_z = -AP/r, \quad E_r = -AQ/r, \\ H_\varphi = \frac{-A}{120\pi} (\sin(\omega t - kR_1) + \sin(\omega t - kR_2) - 2\cos(kL)\sin(\omega t - kR_0)) \quad (7)$$

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z - L)^2}, \quad R_2 = \sqrt{r^2 + (z + L)^2}, \quad R_0 = \sqrt{r^2 + z^2}, \quad A = \frac{30I_0}{\sin(kL)}.$$

$$P = -r \left(\frac{\sin(\omega t - kR_1)}{R_1} + \frac{\sin(\omega t - kR_2)}{R_2} - 2\cos(kL) \frac{\sin(\omega t - kR_0)}{R_0} \right), \quad (8)$$

$$Q = \frac{(z-L)\sin(\omega t - kR_1)}{R_1} + \frac{(z+L)\sin(\omega t - kR_2)}{R_2} - 2\cos(kL) \frac{z\sin(\omega t - kR_0)}{R_0}.$$

Аналитически и путем численного решения уравнений (1) и (2) изучены траектории ОТ векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} в пространстве переменных (r, z) и времени. При длине плеча вибратора $L < \lambda/4$ ОТ вектора \mathbf{E} возникают, как и для диполя, только на осях r, z цилиндрической системы координат, при этом имеют место отмеченные выше на Рис.4 и 5б) точка бифуркации и соответствующая ей структура силовых линий. После прохождения точки бифуркации вблизи вибратора возникает структура силовых линий, аналогичная Рис.5в). Увеличение длины плеча свыше $\lambda/4$ приводит к качественному изменению структуры силовых линий – исчезновению бифуркации, появлению ОТ вне осей (r, z) и усложнению их эволюции. Подробно проанализирован вибратор с длиной плеча $\lambda/2 < L = 7\lambda/12 < 3\lambda/4$. Показано возникновение ОТ типа центра на оси вибратора (между точкой питания и концами вибратора), «отрыв» этой точки со временем от оси вибратора и движение на плоскости (r, z) к оси r (см. Рис.11а, на котором приведены проекции траекторий ОТ на плоскостях (z, t) и (r, t)).

Другая точка бифуркации рождается вне осей (r, z) и далее расщепляется на ОТ типа центра и седла, движущиеся со временем на бесконечность (Рис.11б).

Проекции траекторий ОТ типа седла при стремлении к бесконечно удаленной сфере дают положения нулей средней за период ДН, проекции траекторий ОТ типа центра - положения максимумов ДН. На Рис.11б) нулям ДН вибратора ($L=7\lambda/12$) соответствуют траектории ОТ типа седла при $\theta=0$ и $\theta \rightarrow 44,4^\circ$, максимумам ДН – траектории ОТ типа центра при $\theta \rightarrow 30,9^\circ$ и $\theta=90^\circ$.

Отметим, что распределение компонент поля вибратора (7) является нестрогим и не удовлетворяет граничному условию $E_z=0$ на боковой поверхности вибратора. Есть основания полагать, что на расстояниях значительно больше диаметра вибратора результаты качественного анализа должны сохранять смысл. В дальнейшем целесообразно уточнить результаты качественного анализа в сочетании со строгим численным решением интегрального уравнения для тока на вибраторе, обеспечивающим корректное вычисление поля вблизи вибратора (см. работы Неганова В.А.).

Для вибраторов с длинами плеч $\lambda/4 < L = \lambda/3 < \lambda/2$ и $\lambda/2 < L = 7\lambda/12 < 3\lambda/4$ проведен подробный расчет характерных структур силовых линий поля \mathbf{E} , нулей поля \mathbf{H} , поля векторов Пойнтинга, с определением типов ОТ и переходом через точки бифуркации. Силовые линии (СЛ) электрического поля найдены интегрированием уравнения (1) методом Рунге–Кутты, поле вектора Пойнтинга (ВП) \mathbf{S} - средствами машинной графики. Полную картину эволюции полей вибратора с длиной плеча $L=7\lambda/12$ в течение периода дают 12 кадров. На Рис.12 приведены траектории векторных линий \mathbf{E} , \mathbf{S} , нулей E_z , E_r , H_φ в зоне индукции для ряда моментов времени.

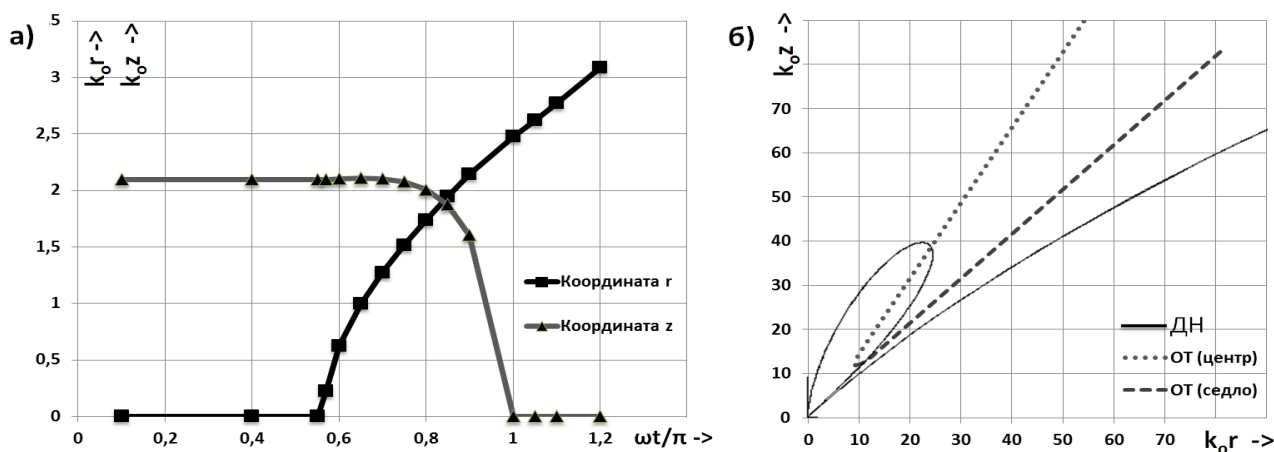


Рис.11

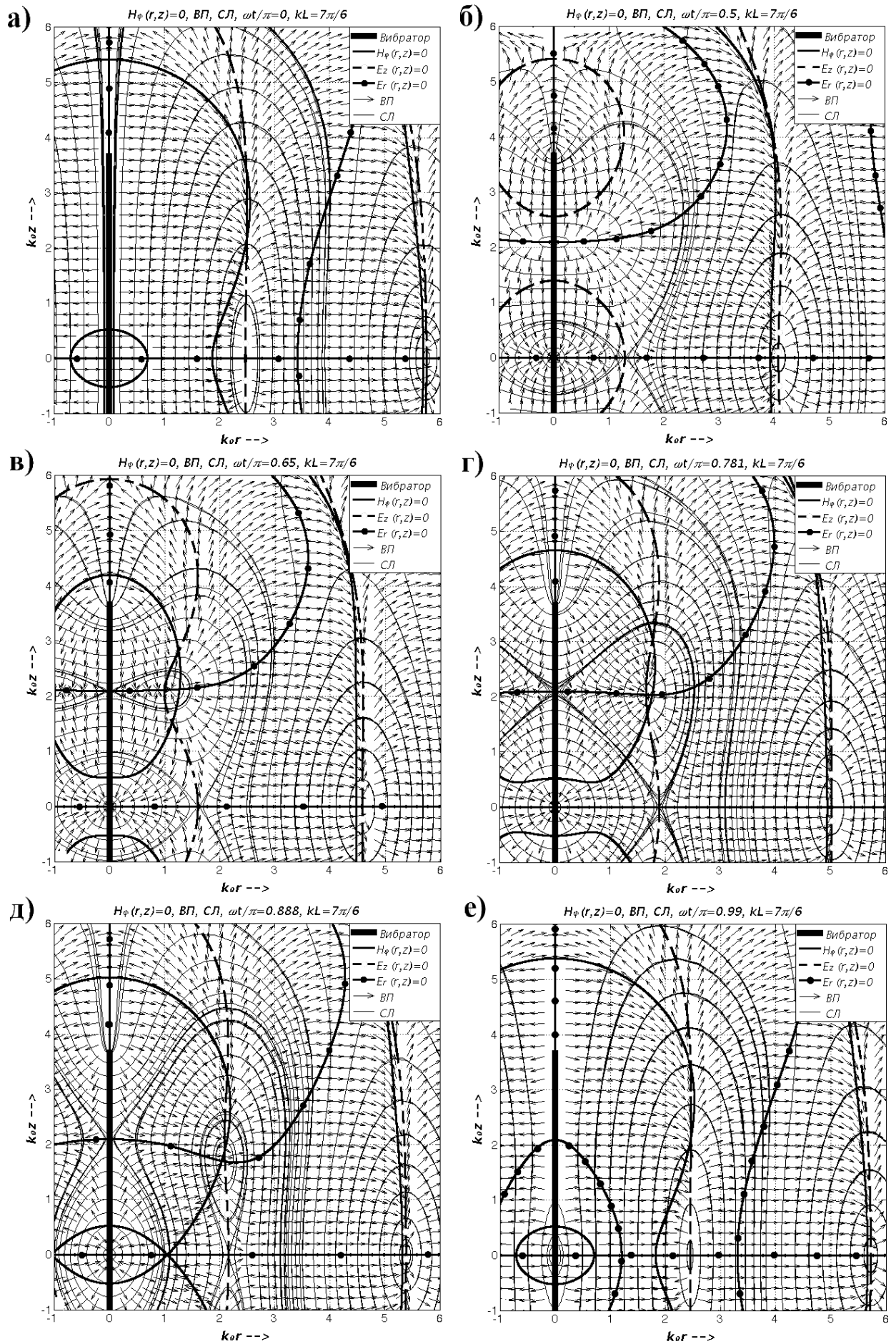


Рис.12

Вторая задача, рассмотренная в 3-й главе - изучение возможности формирования системой электрических вибраторов областей с заданным числом нулей электрического поля (постановка задачи дана на Рис.13). Решение такой задачи представляет интерес для разработки антенн, расположенных вблизи пользователя и обеспечивающих минимальное воздействие на него электромагнитного поля.

Ранее было показано, что вблизи антенн типа элемента Гюйгенса, системы диполей, системы из двух вибраторов конечной длины при определенных условиях можно реализовать область с нулями электрического поля (Пермяков В.А. с соавторами 1999г., 2008г, Левин Б.М. 2005г.).

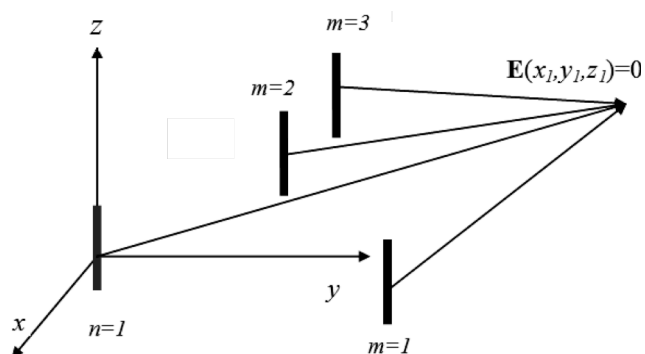


Рис.13

В диссертации рассмотрено формирование таких областей вблизи системы из конечного числа параллельных вибраторов конечной длины. На Рис.14 а)-в) приведены распределения интенсивности электрического поля вблизи трех вибраторов с длинами плеч $L=\lambda/4$.

В диссертации рассмотрено формирование таких областей вблизи системы из конечного числа параллельных вибраторов конечной длины. На Рис.14 а)-в) приведены распределения интенсивности электрического поля вблизи трех вибраторов с длинами плеч $L=\lambda/4$.

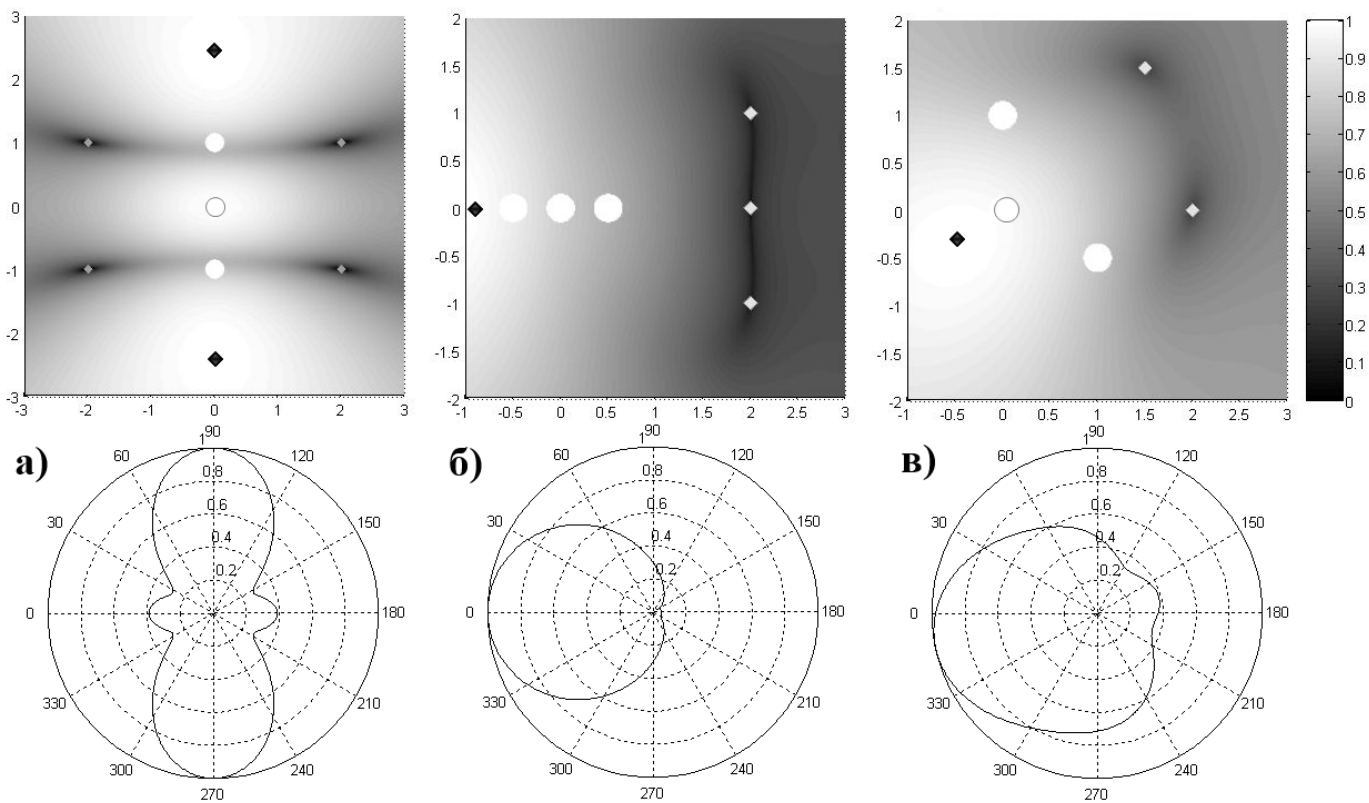


Рис.14

Под рисунками даны диаграммы направленности систем вибраторов. Положения вибраторов показаны на рисунках белыми кружками, нулей электрического поля - белыми ромбиками, максимумов поля вне вибраторов - черными ромбиками. Пример эффективного формирования области с минимальными значениями электрического поля тремя вибраторами приведен на Рис.14 б). Обнаружено, что вблизи вибраторов конечной длины наряду с нулями формируются «горячие точки» с максимальными значениями поля.

В последнем параграфе 3-й главы определены условия распространения сигналов в среде с малыми потерями, при выполнении которых пригодно приближенное описание сигнала, как распространяющегося с экспоненциальным затуханием без изменения формы. Такое приближение позволяет перенести на случай среды с малыми потерями результаты качественного анализа поля в среде без потерь. Согласно оценкам в сухой почве данное приближение оказывается практически приемлемым на достаточно больших расстояниях, что позволяет использовать его в задачах георадиолокации.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, отмечены направления развития представленных в работе исследований.

В приложениях приведены описание учебной программы для визуализации характеристик ЭМ полей диполя, расчетные формулы для определения мгновенных скоростей нулей и экстремумов компонент E , H , S импульса конкретной формы, графики силовых линий ЭМ полей вибраторов конечной длины в различные моменты времени.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1. Пермяков В.А., Сороковик Д.В. Локальный качественный анализ векторной структуры поля электрического диполя в нестационарном режиме излучения. Нелинейный мир, 2007, т.5, №12, с. 757-764.**
- 2. Пермяков В.А., Сороковик Д.В. Качественный анализ в целом векторной структуры поля электрического диполя в нестационарном режиме излучения. Нелинейный мир, 2008, т.6, №4, с.288-295.**
- 3. Пермяков В.А., Корюкин А.Н., Михайлов М.С., Сороковик Д.В. О формировании областей с малым значением электрического поля на конечном расстоянии от системы излучателей. / Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2013. – №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul13/3/text.html>**

4. **O.V. Missevich, A.L. Kholmetskii, V.A. Permyakov, D.V. Sorokovik. On the Velocities of Motion of the Electromagnetic Field in the Near Zone of Elementary Radiators./ PIERs Proceedings, 1191-1195, August 19-23, Moscow, Russia 2012**
5. Пермяков В.А., Сороковик Д.В. Качественный анализ импульсного излучения линейных антенн в свободном пространстве. // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Сборник докладов Всероссийской научной конференции. Муром, 1-3 июля 2003 г. –Муром: Изд. МИ ВлГУ, 2003, с. 43-47.
6. Пермяков В.А., Сороковик Д.В. Качественный анализ нестационарного излучения вибраторных антенн. // Международная научная конференция к 95-летию академика В.А.Котельникова «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А.Котельникова». Москва. 29-30 октября 2003 г. Тезисы докладов, -М.: Издательский дом МЭИ, с.45-47.
7. Корюкин А.Н., Сороковик Д.В. ЭВМ программа для изучения нестационарных процессов излучения простых антенн. / 10 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл. –М: Издательский дом МЭИ, 2004, т.1, с.86
8. В.А.Пермяков, Д.В. Сороковик, А.Н.Корюкин. Применение методов качественной теории дифференциальных уравнений к анализу процессов нестационарного излучения простых антенн. / Излучение и рассеяние электромагнитных волн: материалы международной научной конференции ИРЭМВ-2005. –Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005, с. 31-33.
9. Пермяков В.А., Сороковик Д.В., Корюкин А.Н. Анализ процессов нестационарного излучения простых антенн методами качественной теории дифференциальных уравнений. /Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Сб. докладов. Вторая Всероссийская научная конференция. Муром, 4-7 июля 2006 г. –Муром: МИ ВлГУ, 2006, с. 67-70.
10. Пермяков В.А., Сороковик Д.В., Рукавицын А.А. О приближенном представлении импульсных сигналов в однородной среде с малыми потерями и границах его применимости. /Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Сб. докладов. Вторая Всероссийская научная конференция. Муром, 4-7 июля 2006 г. –Муром: МИ ВлГУ. 2006, с.301-305.
11. Пермяков В.А., Сороковик Д.В., Рукавицын А.А. О приближенном представлении импульсных сигналов в однородной среде с малыми потерями и границах его применимости. /Юбилейная научно-техническая конференция «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях», -М.: МАИ, 2006. Т. 2, с. 290-295.
12. Permyakov V.A., Sorokovik D.V., Korykin A.N. Qualitative analysis of impulse radiation of an elementary antennas./ Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 19-22 September, 2006, Sebastopol, Ukraine, p. 308-310.

13. Пермяков В.А., Сороковик Д.В., Корюкин А.Н. Качественный анализ полей простых антенн. / Международная научно-техническая конференция к 100-летию со дня рождения академика В.А.Котельникова. Москва, 21-23 октября 2008. Тезисы докладов. –М.: Издательский дом МЭИ, 2008, с. 59-61.
14. Пермяков В.А., Сороковик Д.В. О работе Г.Герца «Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла» / Международная научно-техническая конференция к 100-летию со дня рождения академика В.А.Котельникова. Москва, 21-23 октября 2008. Тезисы докладов. –М.: Издательский дом МЭИ, 2008 г., с.63-65
15. Пермяков В.А., Корюкин А.Н., Михайлов М.С., Сороковик Д.В. //О формировании областей с малым значением электрического поля на конечном расстоянии от системы излучателей.//3 Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь» 26-30 октября 2009 г., Москва, Доклады. Том 1, -- М.:, ИРЭ РАН, 2009, с. 17-21.
16. Permyakov V.A., Sorokovik D.V., Korykin A.N. Qualitative analysis of dipole antenna impulse radiation. //Progress In Electromagnetic Research Symposium. Russia, Moscow, 18-21 August 2009 (electron edition)
17. Пермяков В.А., Сороковик Д.В., Степанкова С.В. Качественный анализ электромагнитных полей вблизи линейного электрического вибратора. /5 Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 21-25 ноября 2011г. –М.: ИРЭ РАН, 2011, с. 314-319.
18. Мисевич О.В., Холмецкий А.Л., Пермяков В.А., Сороковик Д.В. О сверхсветовых скоростях движения электромагнитных полей вблизи элементарных излучателей. / 6 Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», Том II. Москва,19-22 ноября 2012 г. –М.: ИРЭ РАН, 2012, с. 98-102.