

**В. А. НЕГАНОВ, О. В. ОСИПОВ,  
С. Б. РАЕВСКИЙ, Г. П. ЯРОВОЙ**

# **ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

**Изд. 3-е, переработанное и дополненное**

Под редакцией  
Неганова В. А. и Раевского С. Б.

*Рекомендовано УМС по физике УМО по классическому  
университетскому образованию РФ в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по  
специальностям 010701 – физика и  
010801 – радиофизика и электроника (2005 год)*

*Рекомендуется Государственным общеобразовательным учреждением  
«Московский технический университет связи и информатики»  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению 210300 «Радиотехника» и по специальностям  
010701 – «Физика» и 010801 – «Радиофизика и электроника».  
Регистрационный номер рецензии 06  
от 9 ноября 2007 года (2007 год)*

**Издательство «Радиотехника»  
Москва, 2007**

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др

ISBN 978-5-88070-154-4



9 785880 1701544

## Предисловие к третьему изданию

Книга предназначена служить учебником по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн», который написан на основе прочитанных авторами курсов лекций в Поволжской государственной академии телекоммуникаций, Самарском государственном университете и Нижегородском государственном техническом университете. Авторы учебника являются активно работающими учеными в области электродинамики, постоянно следящими за развитием этой области науки. Поэтому настоящее издание является существенно дополненным и исправленным по сравнению с учебными изданиями, выпущенными в 2003 и 2005 годах [1, 2].

Традиционное содержание курса электродинамики для радиофизических и радиотехнических специальностей подлежит постоянному обновлению по мере появления новых идей, новых методов и технических приложений в этой области. Одной из наиболее важных тенденций в электродинамике, как и науки в целом, является все более возрастающее значение вычислительных методов, опирающихся на использование ЭВМ. Поэтому в книгу включена глава «электродинамические методы расчета устройств СВЧ и антенн», содержащая как традиционные методы решения граничных задач (проекционные методы, интегральные уравнения и т.д.), так и метод сингулярных интегральных уравнений (СИУ) применительно к электродинамике, разработанный одним из авторов книги. Особое место отведено некорректным задачам электродинамики, связанным с решением интегральных уравнений Фредгольма первого рода и на которые в учебной литературе по электродинамике долгое время не обращали особого внимания. Оказалось, что причиной появления таких задач часто является некорректность математических моделей задач, которую зачастую можно устранить с помощью метода СИУ.

Практически во всей известной учебной литературе подробно описаны свойства плоских волн, но мало внимания обращается на цилиндрические и сферические волны. Поэтому в новое издание включены п. 12.12, п.12.13, в которых подробно описан математический аппарат, позволяющий исследовать свойства цилиндрических и сферических волн.

В книге обращено внимание на проблему вычисления электромагнитных полей (ЭМП) в ближних зонах излучающих и волноведущих структур, которая является основной в задачах электромагнитной совместимости. В учебной и даже научной литературе эта проблема практически не рассматривалась: считалось, что математический аппарат, использующий интегральные соотношения с традиционными регулярными функциями Грина, и мощные ЭВМ позволяют определить ЭМП в любой точке пространства, в том числе и в непосредственной близости от антенны. Один из авторов книги, Неганов В.А., ввел в электродинамику понятия самосогласованные физическая и математическая модели электродинамических задач. Оказалось, что только для самосогласованной физической модели, используя самосогласованный метод, включающий в себя сингулярное интегральное представление (СИП) ЭМП, содержащее обобщенные функции, и СИУ для определения ЭМП на поверхности излучающей структуры, можно корректно определять ЭМП в ближней зоне. В книге на примерах диполя Герца (раздел 7.8) и полуволнового электрического вибратора (раздел 14.13) показана суть проблемы.

Еще одним новым моментом учебника является описание свойств комплексных волн и их роль в дифракционных задачах (автор — С.Б. Раевский).

В связи с практической необходимостью решения сложных электродинамических задач в настоящее время невозможно обойтись без автоматизированного проектирования устройств СВЧ и антенн. В учебнике дано введение в системы автоматизированного проектирования, основу которых составляет принцип декомпозиции сложного устройства на базовые элементы, расчет которых и составляет основную задачу электродинамики. Объединение же базовых элементов производят на основе матричной алгебры (матрицы рассеяния, передачи и т.д.). Традиционно этот раздел рассматривается в курсе «устройства СВЧ и антенны», причем под устройством СВЧ понимаются и антенны. На наш взгляд, включение глав 12 и 13 позволит студенту четче понять роль электродинамики в проектировании устройств СВЧ и антенн. Таким образом, главы 12 и 13 образуют «мост» от электродинамики к техническим расчетам конкретных устройств СВЧ и антенн.

По мнению авторов, введение двух градаций материала должно способствовать лучшему изучению курса. Разделы, обозначенные звездочкой, — более сложный материал, относительно громоздкие выводы, а также дополнительные компоненты. В разделах без звездочек описан минимально необходимый материал курса.

Материал, включенный в учебник, может быть использован в различных дисциплинах, связанных с электродинамикой. Так, новые электродинамические и достаточно простые методы, устраняющие проблемы некорректных задач в электродинамике, могут быть использованы в дисциплине «Устройства СВЧ и антенны» (метод ортогонализирующей подстановки, метод сингулярных интегральных уравнений). В книге впервые показано, что при расчёте неоднородностей в линиях передачи СВЧ необходимо учитывать комплексные волны (раздел 14.15). В дисциплинах «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных устройств» и «Электромагнитная экология» могут быть использованы физические трубчатые модели диполя Герца и электрического вибратора, а также самосогласованный метод расчёта электромагнитного поля в ближних зонах излучающих структур (раздел 7.8, 14.14). Такой подход к проблеме расчёта «ближних» электромагнитных полей антенн позволяет устранить некоторые старые парадоксы в электродинамике.

Для упрощения понимания содержания книги в ее начале приведены основные обозначения физических величин, несколько отличающиеся от общепринятых. В конце книги приведен достаточно обширный список литературы по теории волн, электродинамике и распространению радиоволн. Причем список литературы разбит на три части: основную литературу, литературу по главам книги и справочники и математическую литературу. Ссылки в тексте учебника на основную литературу обозначаются как [J.N], где N — порядковый номер источника в разделе «Основная литература»; ссылки на литературу по главам — как [JM.N], где M — номер главы, а N — порядковый номер источника в разделе «Литература к главе M».

Новый материал, включенный во второе издание, распределяется между авторами следующим образом: В.А. Негановым написаны п. 7.8 и гл. 12-14 (кроме п. 14.15); О.В. Осиповым написаны п. 12.12, приложения; С.Б. Раевским написан п. 14.15.

Авторы выражают благодарность Панферовой Т.А. за помощь в верстке части материала книги.

## **Предисловие ко второму изданию**

По государственному общеобразовательному стандарту курс «Электродинамика и распространение радиоволн» для радиотехников и радиофизиков является общеобразовательной дисциплиной. Предметом его изучения являются основные закономерности электромагнитных процессов и технических устройств на их основе. Цель преподавания дисциплины — изучение законов электродинамики, процессов излучения и приёма электромагнитных волн, их распространения в различных средах, в направляющих структурах и элементах фидерного тракта, а также вопросов распространения радиоволн вблизи поверхности Земли, в её атмосфере и в космическом пространстве.

В результате изучения курса «Электродинамика и распространение радиоволн» студент должен получить представление об основных законах и положениях электродинамики и особенностях их применения к исследованию электромагнитных явлений, играющих важную роль в радиоэлектронике; должен освоить на основе уравнений макроскопической электродинамики методы анализа полей в линиях передачи, объёмных резонаторах и других элементах фидерных трактов, полей излучения простейших антенн; понять механизмы распространения радиоволн различных диапазонов в свободном пространстве с учётом влияния поверхности Земли, тропосферы и ионосферы; разобраться в методах расчёта характеристик электромагнитных волн в различных средах, а также осознать суть проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и пути её решения. Кроме того, студент должен получить практические навыки проведения простейших измерений характеристик электромагнитных волн в линиях передачи и элементах фидерного тракта.

Курс «Электродинамика и распространение радиоволн» опирается на общенаучные дисциплины: высшая математика и физика. Основой для изучения курса служат знания таких разделов математики, как векторный и тензорный анализ, специальные функции, дифференциальные уравнения, теория вероятности; физики — электричество и магнетизм, колебания и волны, квантовая физика, оптика.

Предлагаемая книга, на наш взгляд, существенно отличается от существующих в настоящее время учебных изданий по электродинамике и распространению радиоволн для радиотехнических и радиофизических специальностей. Во-первых, особое внимание уделяется понятию «электромагнитного поля», которое вводится на основе принципов релятивистской физики и континуального подхода к описанию объектов. Подробно анализируется физический смысл уравнений Максвелла. Во-вторых, книга делает акцент, прежде всего, на изложение фундаментальных принципов и законов современной электродинамики, часто оставляя в стороне подробности второстепенного плана. В-третьих, авторы старались создать свою логику изложения электродинамики, отличную от традиционной для учебной литературы. В частности, подробно излагаются разделы возбуждения и дифракции электромагнитных волн, в рамках которых рассматриваются основы теории антенн. Тем самым учебник можно рассматривать как введение в дисциплину «Устройства СВЧ и антенны».

Учебник составлен на основе прочитанных авторами курсов лекций в Самарском государственном университете, Поволжской государственной академии телекоммуникаций и информатики и Нижегородском государственном техническом университете.

Авторы благодарны проф. Бобрешову А.М. (Воронежский государственный университет), проф. Воскресенскому Д.И. (Московский авиационный институт), проф. Кравченко В.Ф. (Институт радиотехники и электроники РАН), проф. Митрохину В.Н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), проф. Нечаеву Ю.Б. (Воронежский государственный университет), проф. Пономарёву Л.И. (Московский авиационный институт). Их советы и ценные замечания способствовали улучшению качества книги.

**Введение**

$$\mathcal{F} \sim 1/r^2$$

$$\mathcal{F} \sim 1/r^2$$

2

q<sub>1</sub>

$$\mathcal{F} \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$I_1, I_2$ 

$$\mathcal{F}_A \sim \frac{I_1 I_2}{r^2},$$



$$\vec{\mathcal{F}} = q(\vec{\mathcal{E}} + [\vec{v}, \vec{\mathcal{B}}]),$$



$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t + \beta x + \psi),$$

$\omega$   
 $\psi$

$\beta$   
 $v_\phi$

$$\beta = \omega / v_\phi \quad \vec{E}_0$$

$\vec{B}$

**Список используемых сокращений**

- ВДР — волноводно-диэлектрический резонатор  
ВОЛС — волоконно-оптическая линия связи  
ВУ — входное устройство  
ВЩЛ — волноводно-щелевая линия  
ДВ — длинные волны  
ДН — диаграмма направленности  
ДР АК — диэлектрический резонатор на азимутальных типах колебания  
ДР НК — диэлектрический резонатор на низших типах колебания  
ЗДР — закрытый диэлектрический резонатор  
ИКД — инфракрасный диапазон  
ИОС — интегрально-оптическая схема  
ИС — интегральная схема  
ИСО — инерциальная система отсчёта  
КВ — короткие волны  
КВЧ — крайневые частоты  
КНД — коэффициент направленного действия  
КУ — коэффициент усиления  
ЛКП — левая круговая поляризация  
МДР — металлодиэлектрический резонатор  
м.д.с — магнитодвижущая сила  
МЧО — метод частичных областей  
ОДР — открытый диэлектрический резонатор  
ОИС — объёмная интегральная схема  
ПКП — правая круговая поляризация  
ПЭМВ — плоская электромагнитная волна  
РЛС — радиолокационная станция  
САПР — система автоматизированного проектирования  
СВ — средние волны  
СВЧ — сверхвысокие частоты  
СДВ — сверхдлинные волны  
СЛАУ — система линейных алгебраических уравнений  
СУ — согласующее устройство  
УКВ — ультракороткие волны  
э.д.с — электродвижущая сила  
ЭМВ — элементарный магнитный вибратор  
ЭМП — электромагнитное поле  
ЭЩВ — элементарный щелевой вибратор  
ЭЭВ — элементарный электрический вибратор

### Список используемых обозначений

$\vec{A}$   
 $\vec{\vec{A}}$   
 $(\vec{a}, \vec{b})$   
 $[\vec{a}, \vec{b}]$        $[\vec{a} \times \vec{b}]$

$\rho$   $\varphi$   
 $\theta$   $\varphi$

$\vec{0}$

$\nabla$

$\nabla_{\perp}$

$\nabla^2$

$\nabla_{\perp}^2$

$\square$

$\vec{\epsilon}(\vec{E})$

$\vec{H}(\vec{H})$

$\vec{D}(\vec{D})$

$\vec{B}(\vec{B})$

$\vec{J}(\vec{j})$

$\vec{J}^m(\vec{j}^m)$

$\vec{J}^{\text{cr}}(\vec{j}^{\text{cr}})$

$\vec{\eta}$

$\vec{\eta}^m$

$R(\rho)$

$R^m(\rho^m)$

$\sigma$

$\delta$

$\vec{\mathcal{P}}(\vec{P})$

$\vec{M}(\vec{M})$

$\vec{S}(\vec{S})$

$\Phi(\varphi)$

$$\vec{\mathcal{A}}(\vec{A})$$

$$\vec{\mathcal{A}}^m(\vec{A}^m)$$

$$\vec{\pi}^e(\vec{\Pi})$$

$$\vec{\pi}^m(\vec{\Pi}^m)$$

Q

$\epsilon_0$

$$\pi \cdot 10^{-9}$$

$$4\pi \cdot 10^{-7}$$

$\mu_0$

$\epsilon_a$

$\mu_a$

$\sigma$

$\epsilon$

$\mu$

$\epsilon_k$

$\mu_k$

$\chi$

$\chi_m$

$\text{tg } \delta$

$\text{tg } \delta^M$

$n$

$c$

0

$k$

$\kappa$

$\omega$

$f$

$T$

$\lambda$

$\lambda_{\text{кр}}$

$\Lambda$

$f_{\text{кр}}$

$Z$

$$\kappa = \pi$$

$$\gamma = \beta - i\alpha$$

$\beta$

$\alpha$

$v_\phi$

$u$

$\rho, \tau$   
 $\Delta^0$   
 $\bar{\epsilon}$   
 $\bar{\mu}$   
 $\bar{\sigma}$   
 $P_{\text{пот}}$

ВХ

$S_{\text{эф}}$   
 $F(r)$   
 $F(\theta, \varphi)$   
 $\theta \quad \theta \quad \varphi$   
 $F_{\varphi}(\theta, \varphi)$   
 $0$   
 $\delta(x)$   
 $J_n$   
 $H_n^{(1)}(x)$   
 $H_n^{(2)}(x)$   
 $'$   
 $n$   
 $I(\varphi)$   
 $[\bar{Z}]$   
 $[\bar{Y}]$   
 $[S] \quad \bar{S}$   
 $[A] \quad \bar{A}$   
 $[I] \quad \bar{I}$