



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «СТАНКИН»

**В. А. Кузовкин, В. В. Филатов**

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

**УЧЕБНИК ДЛЯ СПО**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом среднего профессионального образования в качестве учебника для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2016**

УДК 621.3(075.32)  
ББК (31.2+32.85)я723  
К89

**Авторы:**

**Кузовкин Владимир Александрович** — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники, электроники и автоматики факультета информационных технологий и систем управления Московского государственного технологического университета «Станкин»;

**Филатов Владимир Витальевич** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, электроники и автоматики факультета информационных технологий и систем управления Московского государственного технологического университета «Станкин».

**Рецензенты:**

*Енин В. Н.* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана;

*Новожилов О. П.* — доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности Московского государственного индустриального университета.

**Кузовкин, В. А.**

К89 Электротехника и электроника : учебник для СПО / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 431 с. — Серия : Профессиональное образование.

ISBN 978-5-9916-6223-9

Приведены физические основы электромагнитных явлений; рассмотрены электрические и магнитные параметры материальных сред и их влияние на характеристики электромагнитного поля.

Показаны способы математического, электродинамического и схемотехнического описания электротехнических и электронных устройств. Приведены принципы компьютерного моделирования электрических устройств, а также описания типовых программных комплексов.

*Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по инженерно-техническим специальностям.*

УДК 621.3(075.32)

ББК (31.2+32.85)я723

ISBN 978-5-9916-6223-9

© Кузовкин В. А., Филатов В. В., 2012  
© ООО «Издательство Юрайт», 2016

## Оглавление

|                                                                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Предисловие .....</b>                                                                                                        | <b>7</b>   |
| <b>Введение. Электромагнитные явления в технике .....</b>                                                                       | <b>10</b>  |
| <b>Глава 1. Методы исследования электромагнитных устройств .....</b>                                                            | <b>18</b>  |
| 1.1. Электродинамическое описание электротехнических приборов.<br>Основные законы теории электрических и магнитных цепей .....  | 18         |
| 1.2. Электрофизические характеристики материальных сред .....                                                                   | 28         |
| 1.3. Способы описания электротехнических и электронных устройств ...                                                            | 41         |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                                                                      | <i>58</i>  |
| <b>Глава 2. Схемотехническое описание электрических устройств .....</b>                                                         | <b>59</b>  |
| 2.1. Электрическая цепь и ее элементы .....                                                                                     | 59         |
| 2.2. Электрические сигналы и способы их описания .....                                                                          | 63         |
| 2.3. Формирование уравнений электрической цепи .....                                                                            | 69         |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                                                                      | <i>76</i>  |
| <b>Глава 3. Частотный анализ периодических процессов в линейных цепях<br/>    электрических устройств .....</b>                 | <b>77</b>  |
| 3.1. Расчет цепей синусоидального тока .....                                                                                    | 77         |
| 3.2. Трехфазные цепи синусоидального тока .....                                                                                 | 84         |
| 3.3. Линейные цепи с источниками периодических напряжений и токов ...                                                           | 87         |
| 3.4. Частотные характеристики линейных электрических цепей .....                                                                | 88         |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                                                                      | <i>93</i>  |
| <b>Глава 4. Расчет установившихся процессов в нелинейных электрических<br/>    цепях .....</b>                                  | <b>94</b>  |
| 4.1. Описание нелинейных цепей и особенности их расчета .....                                                                   | 94         |
| 4.2. Расчет цепей с нелинейными четырехполюсниками .....                                                                        | 97         |
| 4.3. Амплитудно-частотные методы анализа нелинейных цепей .....                                                                 | 100        |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                                                                      | <i>103</i> |
| <b>Глава 5. Магнитные системы электрических устройств и их моделиро-<br/>    вание магнитными и электрическими цепями .....</b> | <b>104</b> |
| 5.1. Замена магнитной системы эквивалентной цепью .....                                                                         | 104        |
| 5.2. Эквивалентные схемы магнитных систем с синусоидальными ис-<br>точниками .....                                              | 109        |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                                                                      | <i>113</i> |
| <b>Глава 6. Анализ переходных процессов в линейных электрических цепях ...</b>                                                  | <b>114</b> |
| 6.1. Классический подход к расчету переходных процессов .....                                                                   | 114        |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2. Операторный метод расчета переходных процессов. Преобразование Лапласа .....   | 120        |
| 6.3. Динамические характеристики линейных электрических цепей ....                  | 122        |
| 6.4. Анализ динамических режимов с использованием метода переменных состояния ..... | 128        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                          | 131        |
| <b>Глава 7. Анализ динамических режимов нелинейных электрических цепей</b> .....    | <b>132</b> |
| 7.1. Особенности динамических режимов нелинейных цепей и способы их расчета .....   | 132        |
| 7.2. Метод кусочно-линейной аппроксимации характеристик элементов .....             | 134        |
| 7.3. Анализ автоколебаний в нелинейных системах .....                               | 137        |
| 7.4. Переменные состояния нелинейных электрических цепей .....                      | 142        |
| 7.5. Численные методы расчета динамических режимов .....                            | 144        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                          | 149        |
| <b>Глава 8. Электрические цепи с изменяющимися параметрами</b> .....                | <b>150</b> |
| 8.1. Свойства и описание процессов в цепях с изменяющимися параметрами .....        | 150        |
| 8.2. Расчет цепей с изменяющимися параметрами .....                                 | 154        |
| 8.3. Анализ цепей с переключаемыми конденсаторами .....                             | 159        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                          | 161        |
| <b>Глава 9. Дискретно-аналоговые и цифровые цепи</b> .....                          | <b>162</b> |
| 9.1. Структура системы аналого-цифровой обработки электрических сигналов .....      | 162        |
| 9.2. Способы описания цифровых преобразователей .....                               | 165        |
| 9.3. Основные характеристики цифровых преобразователей .....                        | 170        |
| 9.4. Общий анализ аналого-цифровых устройств .....                                  | 174        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                          | 176        |
| <b>Глава 10. Линии передачи электроэнергии и связи</b> .....                        | <b>177</b> |
| 10.1. Моделирование линий цепями с распределенными в пространстве параметрами ..... | 177        |
| 10.2. Анализ аperiodических процессов в однородных линиях .....                     | 179        |
| 10.3. Влияние неоднородностей в линиях на характер аperiodических процессов .....   | 184        |
| 10.4. Установившиеся режимы в линии при синусоидальном воздействии .....            | 188        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                          | 193        |
| <b>Глава 11. Элементная база электронных устройств</b> .....                        | <b>194</b> |
| 11.1. Виды электронных устройств и способы их реализации .....                      | 194        |
| 11.2. Электрические переходы и приборы на их основе .....                           | 197        |
| 11.3. Транзисторные каскады .....                                                   | 201        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                          | 208        |
| <b>Глава 12. Логические и запоминающие элементы</b> .....                           | <b>209</b> |
| 12.1. Элементы цифровых устройств и их основные параметры .....                     | 209        |

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.2. Цифровой элемент памяти .....                                         | 215        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 217        |
| <b>Глава 13. Комбинационные узлы цифровых устройств .....</b>               | <b>218</b> |
| 13.1. Описание и основы синтеза комбинационных узлов .....                  | 218        |
| 13.2. Арифметические устройства .....                                       | 222        |
| 13.3. Преобразователи кодов .....                                           | 226        |
| 13.4. Распределители и коммутаторы .....                                    | 230        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 232        |
| <b>Глава 14. Последовательностные цифровые устройства .....</b>             | <b>233</b> |
| 14.1. Структура и описание последовательностных устройств .....             | 233        |
| 14.2. Структура и описание триггерных систем .....                          | 235        |
| 14.3. Регистры .....                                                        | 239        |
| 14.4. Счетчики .....                                                        | 241        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 244        |
| <b>Глава 15. Запоминающие и программируемые устройства .....</b>            | <b>245</b> |
| 15.1. Типы, структура и параметры запоминающих устройств .....              | 245        |
| 15.2. Виды и организация полупроводниковой памяти .....                     | 248        |
| 15.3. Элементная база оперативных и постоянных запоминающих устройств ..... | 255        |
| 15.4. Интегральные микросхемы с настраиваемой структурой .....              | 263        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 270        |
| <b>Глава 16. Микропроцессорные элементы и системы .....</b>                 | <b>271</b> |
| 16.1. Микропроцессор как элемент цифрового вычислительного устройства ..... | 271        |
| 16.2. Микропроцессорные системы .....                                       | 275        |
| 16.3. Виды и особенности микропроцессорных систем .....                     | 283        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 287        |
| <b>Глава 17. Аналоговые преобразователи сигналов .....</b>                  | <b>289</b> |
| 17.1. Основы построения аналоговых преобразователей сигналов .....          | 289        |
| 17.2. Операционные усилители .....                                          | 293        |
| 17.3. Линейные и нелинейные аналоговые преобразователи .....                | 297        |
| 17.4. Триггерные устройства и генераторы сигналов .....                     | 303        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 309        |
| <b>Глава 18. Элементы сопряжения аналоговых и цифровых устройств ...</b>    | <b>310</b> |
| 18.1. Элементы дискретно-аналоговых систем .....                            | 310        |
| 18.2. Структуры и параметры аналого-цифровых преобразователей ...           | 314        |
| 18.3. Цифро-аналоговые преобразователи .....                                | 319        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 324        |
| <b>Глава 19. Силовые электронные устройства .....</b>                       | <b>325</b> |
| 19.1. Виды силовых преобразователей и элементная база .....                 | 325        |
| 19.2. Типовые энергетические преобразователи .....                          | 332        |
| 19.3. Источники электропитания аппаратуры .....                             | 343        |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> .....                                  | 347        |

|                                                                               |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 20. Оптоэлектронные системы .....</b>                                | <b>348</b> |
| 20.1. Источники и приемники излучения .....                                   | 348        |
| 20.2. Оптоэлектронные приборы и световоды .....                               | 353        |
| 20.3. Устройства отображения информации .....                                 | 356        |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                    | <i>367</i> |
| <b>Глава 21. Электроизмерительные приборы и системы .....</b>                 | <b>367</b> |
| 21.1. Основы экспериментальных исследований методами электроизмерений .....   | 368        |
| 21.2. Электроизмерительные приборы .....                                      | 372        |
| 21.3. Измерительные информационные системы .....                              | 383        |
| 21.4. Электрические датчики физических величин .....                          | 387        |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                    | <i>394</i> |
| <b>Глава 22. Электромагнитные устройства автоматики и электропривод ...</b>   | <b>396</b> |
| 22.1. Исполнительные средства автоматических систем .....                     | 396        |
| 22.2. Электрические машины и их основные характеристики .....                 | 401        |
| 22.3. Основы автоматизированного электропривода .....                         | 409        |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                    | <i>414</i> |
| <b>Глава 23. Электроэнергетические системы и сети электроснабжения ...</b>    | <b>415</b> |
| 23.1. Энергетика, ее структура и развитие .....                               | 415        |
| 23.2. Электрическая энергия и особенности ее производства и потребления ..... | 420        |
| 23.3. Типичная структура электроснабжения .....                               | 425        |
| 23.4. Контроль качества электроэнергии и управление энергопредприятием .....  | 427        |
| <i>Контрольные вопросы и задания .....</i>                                    | <i>430</i> |
| <b>Литература .....</b>                                                       | <b>431</b> |

## Предисловие

В современном производстве нашли широкое применение самые разнообразные электрические и электронные устройства. Использование электрической энергии позволило создать новые технологические процессы в промышленности и автоматизировать производство. Практически любое современное промышленное оборудование содержит встроенные электрические и электронные устройства для измерения, контроля и управления. Проектирование и эксплуатация промышленных агрегатов с электрическими устройствами базируются на совместном моделировании систем с разнообразными электрическими устройствами, которые могут оказывать существенное влияние на работу технологического оборудования. Для этого специалисты технических отраслей должны понимать основы функционирования электротехнических аппаратов, электромеханических преобразователей, электронных устройств и средств электроизмерений, знать подходы к их описанию и уметь формулировать требования к изделиям, в принципы работы которых заложены явления электромагнетизма.

*Электротехникой* принято называть отрасль науки и техники, связанную с применением электрических и магнитных явлений для преобразования энергии, обработки материалов и передачи информации. Эта отрасль науки охватывает вопросы получения, преобразования и использования электроэнергии в практической деятельности. Принципы электромагнетизма лежат в основе функционирования многих устройств, особое место среди которых в настоящее время занимают электронные приборы и системы.

*Электроника* охватывает направления науки, техники и технологии, связанные с созданием приборов, принципы действия которых основаны на взаимодействии электрических зарядов с электромагнитным полем.

Таким образом, интегрированная дисциплина «Электротехника и электроника» фактически имеет единую предметную область изучения, в которую входят технические устройства, базирующиеся на использовании электромаг-

нитных явлений. Для исследования электромагнитных преобразователей в электротехнике и электронике используются идентичные методы, разработанные в теоретической электротехнике.

Настоящий учебник содержит базовые темы, отражающие электротехнические подходы к анализу электромагнитных устройств, применяемых в различных областях науки и техники. Каждая глава посвящена завершённому изложению определенной темы. Задача каждой темы состоит в том, чтобы дать простое и доступное, но достаточно строгое описание совокупности однотипных явлений. Весь материал представлен в одном стиле с единых методических позиций.

Цель изучения дисциплины «Электротехника и электроника» заключается в овладении основами функционирования электротехнических устройств и электронных приборов, а также принципами формирования их моделей для вычисления требуемых для практического использования характеристик и параметров. При этом основное внимание уделяется изложению понятий и методов анализа устройств в объеме, который необходим для последующего изложения специальных (профильных) дисциплин.

Задачи изучения дисциплины состоят в следующем:

- знакомство с основными способами описания процессов в электромагнитных устройствах и построения их математических моделей;
- освоение базовых методов расчета и исследования электрических и магнитных цепей;
- знакомство с элементной базой аналоговых и цифровых электронных устройств информационной и силовой электроники;
- освоение принципов построения и работы типовых электронных преобразователей;
- знакомство с типовыми комплексами программ, применяемых при численном моделировании электромагнитных систем.

По итогам изучения дисциплины студент должен:

**знать:**

- принципы построения эквивалентных схем устройств с использованием базового набора элементов;
- основные методы расчета статических и динамических характеристик электромагнитных устройств во временной и частотной областях;
- типовую элементную базу электронных устройств;

- способы построения и принципы функционирования электронных приборов и систем;
- основы схемотехнического анализа и экспериментального исследования электромагнитных элементов, а также возможности их применения для определения характеристик электротехнических и электронных устройств;
- типовые программные средства схемотехнического моделирования электрических устройств;
- элементную базу и принципы построения информационно-измерительных систем на основе электрических преобразователей и приборов;
- основные типы электромагнитных устройств автоматики и электрических машин;
- особенности получения, хранения, передачи и распределения электрической энергии;

**уметь:**

- построить математическую модель электрического устройства или электронного прибора, составить систему описывающих электромагнитные процессы уравнений;
- выполнить оценочные расчеты характеристик и параметров, а также сформировать совокупность моделей для проведения вычислительного эксперимента с использованием типовых программных средств;
- составить схему экспериментального исследования характеристик электрических устройств с использованием типовых электроизмерительных приборов и провести исследование статических и динамических режимов устройства;
- сформировать эквивалентную электрическую схему электродвигателя в составе привода оборудования;

**владеть:**

- основами терминологии в областях электротехники, электроники, электрических измерений и электромеханики;
- теорией и практикой анализа электромагнитных процессов в электротехнических и электромеханических устройствах, аналоговых и цифровых электронных приборах;
- навыками чтения принципиальных электрических схем, содержащих изучаемые устройства.

Для контроля степени усвоения материала при его самостоятельной проработке в конце каждой главы приведены контрольные вопросы и задания. Формулирование и запись подробных ответов могут также оказаться полезными для приобретения навыков составления технических отчетов.

# Введение

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТЕХНИКЕ

Электромагнитные процессы определяют природные явления и играют важную роль в жизни и деятельности человека. В современном промышленном производстве, на транспорте и в быту широко используются приборы и технологии, базирующиеся на явлениях электромагнетизма (рис. В.1).

В промышленном производстве нашли применение такие эффективные технологические процессы, как гальваническое нанесение покрытий, электроискровые методы обработки материалов и др. Электропривод обеспечивает работу механизмов и транспортных средств. Электрическая энергия используется для освещения производственных и жилых помещений, а в ряде случаев — для их отопления.

Электронные системы управления служат технической базой комплексной автоматизации. С помощью электрических сигналов осуществляются телевизионное вещание и связь, работают устройства вычислительной техники, функционируют системы охранной сигнализации и многое другое. Существенно расширился перечень электрических приборов для диагностики и лечения заболеваний в медицине.

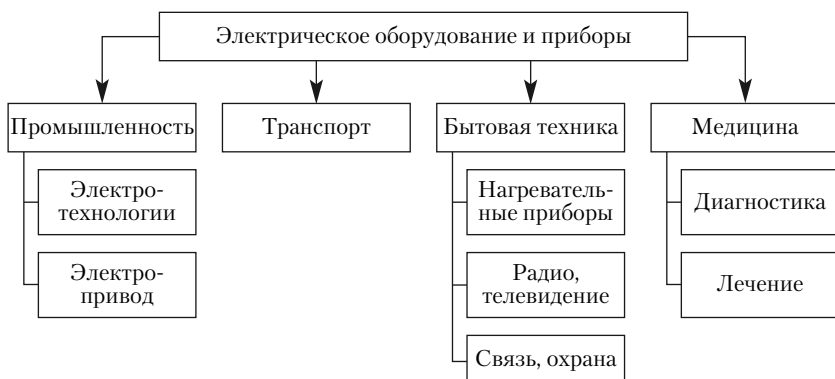


Рис. В.1. Области использования электричества

Электроэнергию можно передавать на большие расстояния, а также просто, быстро и экономично превращать в необходимые пользователю виды энергии: механическую, тепловую, химическую, световую. Вместе с тем практически отсутствуют природные источники электроэнергии, и для ее технического получения применяется превращение других форм энергии: тепловой, химической, механической, атомной. Особенностью электрической энергии является одновременность ее выработки и использования из-за отсутствия достаточно мощных накопителей (аккумуляторов). Потребление энергии человечеством непрерывно растет, и важнейшая задача электротехники заключается в создании устройств, осуществляющих производство электроэнергии, ее доставку пользователю и преобразование в форму с требуемыми для потребителя параметрами.

Для решения проблемы снабжения множества различных потребителей электрической энергией, обладающей заданными качественными показателями, применяют электрические системы и сети. Электрические устройства, предназначенные для преобразования при больших мощностях напряжений и токов, по форме близких к синусоидальным, называют *силовыми*. Электронные средства обработки сигналов контроля и управления, оперирующие с относительно малыми значениями электрического тока, относят к информационным, или *слаботочным*, устройствам. В таких системах информационные сообщения осуществляют модуляцию электрического сигнала, т.е. изменение одного из параметров, например частоты синусоидального напряжения.

Существенный рост насыщенности помещений бытовыми электроприборами, а также значительное повышение энергоемкости электрооборудования в промышленности и на транспорте привели к значительному росту создаваемых ими электрических и магнитных полей. Это ставит сложную проблему электромагнитной совместимости, т.е. обеспечения правильного функционирования электронных приборов в присутствии естественных и техногенных электромагнитных помех, образующихся при работе силовых установок.

Расширение производства разнообразного электротехнического оборудования и электрических приборов (электродвигателей и электрогенераторов, электроэнергетических преобразователей, электрохимических источников и т.п.) привело к образованию отдельных технических отраслей с собственными научными направлениями (электромеханика, электроэнергетика, электрохимия). Создание электронных средств измерения, связи, обработки и отображения информации также способствовало выделению отдель-

ных научно-технических областей (силовые преобразователи, микроэлектронные приборы, оптоэлектронные устройства обработки и отображения информации). В результате появилось большое число отраслей науки и техники, объединенных использованием явлений электромагнетизма (рис. В.2).

Сложность и многогранность проблем разработки и эксплуатации электротехнических приборов и комплексов обусловили создание научного направления, посвященного общим методам описания электромагнитных устройств и названного *теоретической электротехникой*.

Научные направления, имеющие конкретные задачи и области применения, характеризуются своими способами описания явлений и процессов, используемым математическим аппаратом, а также терминологией и обозначениями, с помощью которых формулируются общие методы и правила. В результате одни и те же положения электромагнетизма в разных предметных областях могут иметь отличающиеся формы записи и интерпретацию. Это обусловлено всей многовековой историей развития техники и теории электромагнетизма.

Длительным наблюдениям электромагнитных явлений и накоплению фактов сопутствовало построение гипотез и теоретических обобщений, которые соответствовали существующему объему знаний. Сложность электрических и магнитных явлений, а также невозможность их объяснения на основе механистических представлений привели к тому, что построение теории электромагнетизма началось только в XVII в.

Первые обстоятельные научные исследования магнитных и электрических явлений связывают с именем придворного медика английской королевы У. Гильберта, выход в свет основополагающего труд которого «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» (1600) считают началом эпохи электричества.

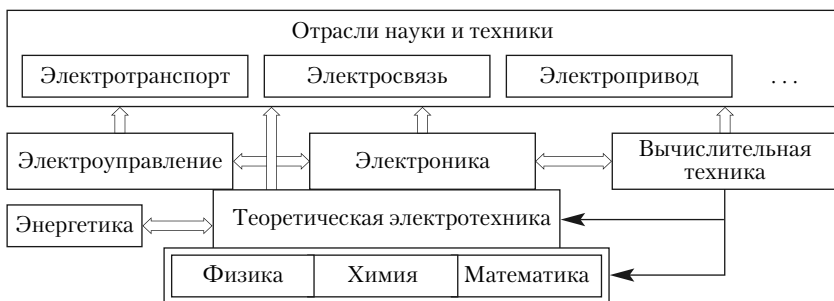
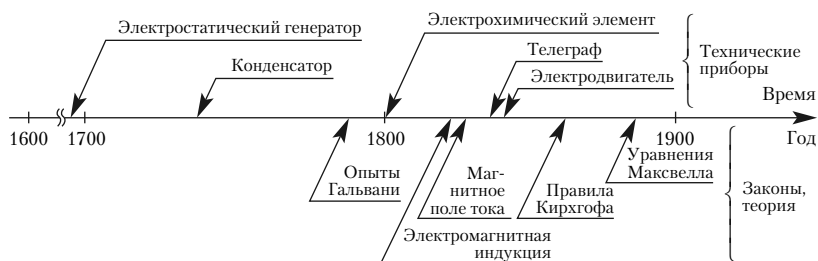


Рис. В.2. Научно-технические направления использования электромагнетизма



**Рис. В.3. Основные вехи становления техники и теории электромагнетизма**

Сочинения Гильберта обусловили интерес к электрическим и магнитным явлениям, что стимулировало разработку технических устройств, создание теоретических гипотез и формулирование законов электромагнетизма (рис. В.3).

Для проведения опытов требовались источники электричества, что привело к изобретению в 1670 г. лордом г. Магдебурга О. Герике электростатической машины для получения зарядов посредством трения. Затем в 1745 г. были созданы устройства для накопления и хранения зарядов (лейденские банки), представляющие собой разновидность конденсатора. Изобретение членом Парижской академии Ш. Кулоном крутильных весов и исследование с их помощью взаимодействия заряженных тел позволило получить (1788) формулу силы взаимодействия двух зарядов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Профессор анатомии Болонского университета Л. Гальвани, специализирующийся в области физиологии нервов и мышц, при проведении опытов с электростатической машиной обнаружил сокращение мышц лапок лягушки и в 1791 г. на заседании научного сообщества объявил об обнаружении источника «живого» электричества. Фактически Гальвани открыл постоянный ток (поток электрических зарядов), что предоставило огромные возможности изучения электромагнитных явлений. Представления Гальвани о роли животного электричества в биологических процессах и многочисленные опыты означали зарождение новой науки — электробиологии.

Соотечественник Л. Гальвани итальянский физик А. Вольта поставил новую серию опытов, в результате которых установил, что если два разных металла, разделенных проводящей жидкостью, соединить внешним проводником, то в нем создается поток электрических зарядов (ток). Согласно разработанной англичанином Г. Дэви теории электрический ток в таком элементе образуется благодаря химической реакции, в которой участвуют оба металла и разделяющий их раствор. Поэтому 1800 г. — год опубликования открытия

А. Вольта — можно считать датой рождения нового научного направления — электрохимии, а также создания источника постоянного тока. Эффект теплового действия тока, т.е. нагревания проводников, был использован академиком В. Петровым для демонстрации возможности плавки металлов (1802). Появляющийся между электродами разряд («вольтова дуга») свидетельствовал о возможности получения света с использованием электрической энергии.

В 1820 г. профессор химии Копенгагенского университета Г. Х. Эрстед установил факт воздействия электрического тока на подвешенную магнитную иглу, т.е. доказал связь силы, действующей на магнит, с электрическим током, что послужило основой разработки приборов для измерения тока. Развивая идеи Эрстеда, французский физик А. Ампер в результате поставленных опытов по исследованию взаимодействия токов между собой показал, что катушка с током (соленоид) эквивалентна по магнитным свойствам плоскому магниту, и сформулировал правило, по которому осуществляется взаимодействие токов. Возможность создания электрического тока под действием магнитных сил исследовал английский физик М. Фарадей, который опытным путем установил, что при движении магнита относительно витка из провода на зажимах последнего индуцируется электродвижущая сила. Этот эффект послужил идеей создания электромеханического генератора (электрической машины).

Таким образом, к 40-м гг. XIX в. была экспериментально доказана неразрывная связь электрических и магнитных явлений, которые стали рассматривать в рамках единой теории электромагнетизма. Описание известных законов в виде системы математических уравнений единого электромагнитного поля предложил в 1862 г. английский ученый Д. К. Максвелл, который предположил существование электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве со скоростью света  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с. В 1886 г. немецкий физик Г. Герц не только экспериментально получил электромагнитные волны, но и опытным путем доказал, что их поведение полностью аналогично световым лучам (прямолинейное распространение, отражение, преломление).

Создание широкой номенклатуры источников электроэнергии способствовало изучению тока в различных материальных средах. Английским ученым химиком Г. Дэви была теоретически обоснована связь химических преобразований с электрическими явлениями, продолжение исследований М. Фарадеем позволило ему получить количественные соотношения электролиза. Анализ полученных выражений позволил обосновать дискретность электрического заряда иона. Ирландский физик Д. Стоней рассчитал минимальное значение электрического заряда  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл и в 1891 г. выска-

зал гипотезу о существовании зарядов внутри атома, а минимальный электрический заряд  $e$  предложил назвать электроном. Факт существования в природе элементарных электрических зарядов был установлен при исследовании электрического тока в разреженных газах английским физиком Дж. Дж. Томсоном в 1898 г. Открытие электрона способствовало созданию моделей атома. В 1911 г. английский физик Э. Резерфорд предложил планетарную модель, состоящую из положительно заряженного ядра, вокруг которого по орбитам вращаются электроны.

Из полученных результатов вытекало важное следствие о строении материальных тел: все вещества в природе, в том числе живая ткань, состоят из огромного количества заряженных частиц. Следовательно, электромагнитные явления участвуют в любых реакциях (химических, биологических). Накопленные экспериментальные данные позволили нидерландскому физiku X. Лоренцу разработать классическую электронную теорию, с помощью которой удалось объяснить многие электрические и оптические явления.

Во второй половине XIX в. практическое использование электромагнетизма приобретает новое качество, характеризующееся переходом от изготовления единичных опытных образцов технических устройств к разработке и выпуску промышленных изделий. Для производства электрических устройств определенных классов (электродвигатели и электрогенераторы, электрический транспорт, электроэнергетические установки) стали выделяться отдельные технические отрасли и научные направления (электромеханика, электроэнергетика, электрохимия и т.п.). В результате к концу XIX в. сформировался ряд отраслей электротехнической промышленности: электроэнергетика, электрические системы и сети, электрические машины и электропривод, электрический транспорт, электромашиностроение.

Становление и развитие машинной индустрии стимулировало разработку электрических двигателей. Электродвигатель постоянного тока был создан в 1838 г. русским ученым Б. С. Якоби. Удобство эксплуатации и экономичность электрических двигателей инициировали работы по их использованию на транспорте. В 1879 г. в Берлине был пущен трамвай с электрической тягой, а в 1890 г. в Лондоне были применены вагоны метро, оснащенные электроприводом.

Создание промышленных электрогенераторов и изобретение французским физиком Г. Планте свинцового аккумулятора предоставили возможность широкого применения электричества в производственных механизмах и бытовой технике. Для производства металлов Э. В. Сименс в 1878 г. разработал конструкцию электроплавильной печи. Начали развиваться гальванотехника, ориенти-

рованная на нанесение упрочняющих металлы покрытий, производство алюминия посредством электролиза, применение электросварки. Весьма перспективным оказалось также использование электричества для освещения. Вначале газовые светильники заменили дуговыми угольными приборами на основе «свечи Яблочкова». На смену им пришли разработанные П. Н. Яблочковым и усовершенствованные Т. А. Эдисоном лампы накаливания.

Дальнейшее развитие электротехнической промышленности столкнулось с проблемой передачи электроэнергии на значительные расстояния при обеспечении приемлемого уровня потерь. Практически в одно время Д. А. Лачинов и М. Депре предложили для передачи заданной электрической мощности использовать высокое напряжение порядка нескольких тысяч вольт. Первая высоковольтная линия длиной около 60 км была построена Депре (1882) в Германии. Широкому использованию систем постоянного тока препятствовали трудности преобразования уровней напряжений и токов при передаче и потреблении. Создание М. О. Доливо-Добровольским трехфазных электродвигателей и промышленных трансформаторов дало возможность разработки эффективных систем электрического привода и использования переменного тока в промышленности. Для передачи электроэнергии стали применять экономичные трехфазные линии электропередач.

На рассматриваемом историческом этапе была разработана широкая номенклатура электромеханических измерительных приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров, фазометров и др.), которые широко использовались до конца XX в. и даже применяются в настоящее время. В этой связи большое значение имело обеспечение единства измерения электрических величин, которое было принято в 1881 г. Первым конгрессом по электричеству. Таким образом, сформировалась отрасль электроприборостроения.

По мере развития техники наряду с преобразованием энергии электричество начинало использоваться в других областях. В 1832 г. П. Л. Шиллинг сконструировал телеграфный аппарат. После создания С. Морзе системы кодирования электрических сигналов телеграфная связь стала весьма быстро распространяться и совершенствоваться в направлении осуществления двухсторонней (дуплексной) связи. Следующий этап становления электросвязи характеризуется изобретением и совершенствованием телефона (Т. Э. Эдисон, Р. Белл). Широкое распространение телеграфной и телефонной связи привело к созданию кабельной промышленности, занимающейся проектированием и изготовлением различных линий электросвязи. Создание на базе изобретения А. С. Поповым и Г. Маркони радиоприемных и передающих устройств послужило основой становления и развития радиосвязи.

Радиотехнические устройства различных видов и назначения получили весьма широкое распространение благодаря созданию электронных компонентов. В результате открытия термоэлектронной эмиссии (испускания электронов из нагретого металла) были изобретены различные типы электровакуумных ламп. С использованием их нелинейных свойств была разработана совокупность преобразователей электрических сигналов. Созданные на их основе электронные блоки стали основой функционирования систем радиотехники и телевидения, средств измерения и управления, вычислительных машин и систем, приборов медицинского диагностирования и лечения.

Новый этап развития и применения электронных систем связан с разработкой и промышленным производством полупроводниковых приборов. Этому предшествовали циклы работ по исследованию процессов в полупроводниках и контактах полупроводников с отличающимися свойствами, а также полупроводника с металлом. Рубежной датой рождения полупроводниковой электроники считают конец 1940-х — начало 1950-х гг., когда были изготовлены биполярный (1948) и полевой (1952) транзисторы. Существенное снижение размеров и потребления транзисторных схем по сравнению с ламповыми аналогами в сочетании со значительным увеличением надежности устройств способствовало увеличению выпуска электронной аппаратуры и ее массовому использованию. Всего за одно десятилетие полупроводниковая технология перешла от изготовления отдельных транзисторов к производству в едином технологическом цикле интегральных микросхем (ИМС), которые в одном корпусе содержат сложнейшие функциональные блоки.

Изготовление в 1971 г. микропроцессора на ИМС ознаменовало начало создания микроэлектронных цифровых вычислительных устройств, которые заняли ведущее место в технике контроля, связи и управления. Развитие микроэлектроники, как цифровой, так и аналоговой, привело к существенному увеличению выпуска и использования бытовых и офисных электрических и электронных приборов (кондиционеров, нагревательных устройств, беспроводных и сотовых телефонов, компьютеров, средств дистанционного контроля и управления).

Высокая концентрация промышленных и бытовых электротехнических приборов и электронных устройств сопровождается созданием электромагнитных полей разной интенсивности в широком диапазоне частот. Это создает проблему электромагнитной совместимости функционирования различных электронных средств в условиях мощных электромагнитных полей, а также их влияния на живые организмы.

# Глава 1

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ

---

В результате изучения данной главы студенты должны:

**знать:** основные законы теории электрических и магнитных цепей; основные формулы, необходимые для исследования электромагнитных устройств;

**уметь:** формулировать постановку задач электродинамики, основные подходы к классификации электромагнитных волн;

**владеть:** терминологией теории электрических и магнитных цепей; различными способами описания электротехнических и электронных устройств.

---

### 1.1. Электродинамическое описание электротехнических приборов. Основные законы теории электрических и магнитных цепей

Электротехнические и электронные изделия, функционирующие на основе эффектов электромагнетизма, описываются с использованием теории электромагнитного поля. Большинство явлений электромагнетизма укладывается в рамки уравнений Максвелла, описывающих электродинамику сплошных сред, состоящих из большого числа элементарных частиц. Важнейшим свойством уравнений Максвелла, записанных в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, является их всеобщность и универсальность, т.е. единообразие записи решений для всех типов электромагнитных устройств. Решение уравнений для конкретного изделия определяется начальными значениями векторов электромагнитного поля (начальными условиями) и их распределениями на границах раздела сред, определяющих детали изделия (граничными условиями).

Теория электромагнитного поля является частью общей теории физических полей, объясняющих механизмы силового взаимодействия материальных тел. При этом под физическим полем подразуме-

мевают механизм передачи силы между объектами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга в пространстве. Постулируется, что любой объект, который может создавать на расстоянии силу, образует в пространстве некоторое поле определенного типа (гравитационное, электромагнитное). Следовательно, теорию электромагнитного поля можно трактовать как удобный и адекватный способ описания силового взаимодействия в пространстве заряженных частиц и тел, расположенных на некотором расстоянии. Электромагнитная сила, имеющая в каждой точке пространства определенное значение и направление действия, может быть описана с помощью векторной функции координат и времени. Приведенную абстрактную интерпретацию понятия векторного поля следует признать наиболее удобной моделью представления электромагнитных процессов.

Единое электромагнитное поле принято представлять в виде совокупности электрической и магнитной составляющих, обладающих собственными характеристиками и свойствами. *Электрическое поле* определяют как отношение силы  $\vec{F}$ , действующей на неподвижный пробный заряд  $q$ , к значению этого заряда и соответствующую векторную величину называют *напряженностью* электрического поля  $\vec{E}(t, x, y, z)$ . *Магнитное поле* определяют как отношение силы  $\vec{F}$ , которая действует на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\vec{v}$ , к значениям заряда и его скорости и соответствующую величину называют *магнитной индукцией*  $\vec{B} = F/(qv)$ . Вектор магнитной индукции  $\vec{B}(t, x, y, z)$  направлен перпендикулярно векторам силы и скорости движения заряда (рис. 1.1, а).

Напряженность электрического поля  $\vec{E}$ , созданного неподвижным и не изменяющимся во времени зарядом  $q$ , удовлетворяет *теореме Гаусса*, описывающей поток  $\vec{E}$  через замкнутую поверхность  $s$

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = q/\epsilon_0,$$

где  $\epsilon_0 \approx 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — электрическая постоянная.

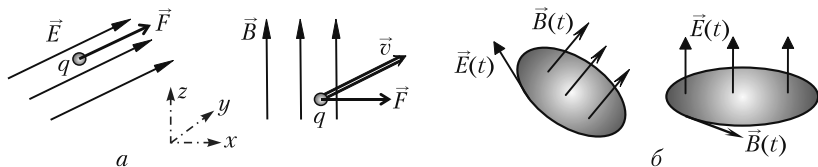


Рис. 1.1. Силовое воздействие на неподвижный и движущийся пробные заряды (а), взаимное преобразование электрического и магнитного полей (б)

Для магнитной индукции справедливо выражение

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = 0,$$

отражающее непрерывность в пространстве линий магнитной индукции, которая является следствием отсутствия магнитных зарядов.

Из опытных данных следует, что изменяющаяся во времени индукция магнитного поля приводит к образованию поля электрического, а электрическое поле создает поле магнитное (рис. 1.1, б). Соответствующие формулы преобразования определяются *законом электромагнитной индукции Фарадея*

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -d \left[ \int \vec{B} d\vec{s} \right] / dt$$

и *законом полного тока Ампера*, определяющим циркуляцию вектора индукции по замкнутому контуру  $l$ ,

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \int (\sigma \vec{E} + \epsilon_0 d\vec{E}/dt) d\vec{s},$$

где  $\sigma$  — удельная электрическая проводимость;  $c$  — скорость света в пустом пространстве.

Приведенные соотношения, описывающие электромагнитное поле в конечной области пространства, представляют собой запись уравнений электродинамики в интегральной форме. Для определения векторов поля  $\vec{E}(x, y, z, t)$  и  $\vec{B}(x, y, z, t)$  в каждой точке пространства переходят к дифференциальной форме записи уравнений:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0; \operatorname{div} \vec{B} = 0; \operatorname{rot} \vec{E} = -d\vec{B}/dt; \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon_0 (d\vec{E}/dt),$$

где  $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$  — вектор напряженности магнитного поля в пустом пространстве;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $\rho$  — плотность электрического заряда в единице объема.

Запись математических операций векторного анализа зависит от выбора системы координат, например для прямоугольной системы имеем

$$\operatorname{div} \vec{B} = \partial B_x / \partial x + \partial B_y / \partial y + \partial B_z / \partial z;$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{e}_x (\partial H_z / \partial y - \partial H_y / \partial z) + \vec{e}_y (\partial H_x / \partial z - \partial H_z / \partial x) + \vec{e}_z (\partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y).$$

Силовое проявление электрического и магнитного полей свидетельствует о наличии в поле энергии. Функционирование электрических устройств связано с созданием электромагнитной энергии, распространение и преобразование которой в другие формы используется для анализа процессов и получения характеристик

различного оборудования. Объемную плотность энергии электромагнитного поля определяет выражение

$$w_{\text{эм}} = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = \varepsilon_0 E^2 / 2 + B^2 / (2\mu_0).$$

Распределение энергии в пространстве принято характеризовать с помощью вектора Пойнтинга  $\vec{\Pi}$ , модуль которого определяет плотность энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени сквозь единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны,  $\Pi = EH$ . Соответственно, мощность электромагнитного поля в пространственной области, ограниченной замкнутой поверхностью  $s$ , определяется по формуле

$$\Pi = - \oint \vec{\Pi} d\vec{s}.$$

Из уравнений классической электродинамики Максвелла следует возможность существования в пространстве электромагнитного поля в форме распространяющейся волны, которая создается изменяющимися во времени электрическими зарядами. Соответственно, в задаче исследования электромагнитных волн принято выделять два аспекта: анализ возбуждения изменяющегося во времени электромагнитного поля посредством излучающей системы и описание распространения электромагнитных волн в пространстве.

Устройства, предназначенные для создания электромагнитных волн, называются излучателями, или антеннами. В системах радиосвязи применяется множество антенн самых различных конструкций. В качестве простейшего излучателя электромагнитных волн используется симметричный электрический диполь, представляющий собой короткий проводящий стержень длиной  $l$ , в средней части которого имеется малый зазор для подключения источника электропитания (рис. 1.2, а).

Под действием подключения к диполю источника переменного электрического тока  $i$  в элементах стержня происходит пере-

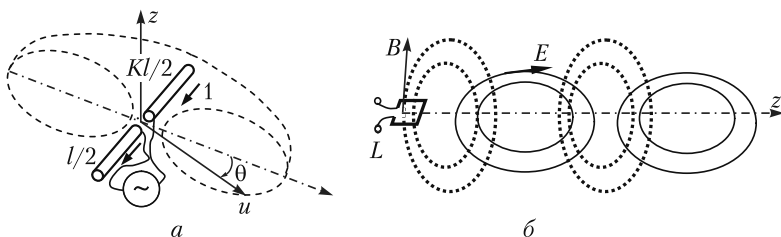


Рис. 1.2. Электрический дипольный излучатель (а) и рамочная магнитная антенна (б)

мещение потока зарядов, и часть подводимой к диполю энергии излучается в окружающее пространство в форме электромагнитной волны. Изменение во времени характера движения зарядов приводит к образованию в окружающем пространстве переменного магнитного поля, которое в свою очередь возбуждает электрическое поле. Пространственные свойства излучателя характеризует диаграмма направленности, определяемая формой поверхности с неизменной мощностью электромагнитного поля. Для рассматриваемой дипольной антенны диаграмма направленности, представленная в цилиндрической системе координат  $r, \theta, z$ , имеет форму тора.

Другой тип излучателя, называемый рамочной магнитной антенной, представляет собой контур с проходящим по нему переменным током, который создает в окружающем пространстве изменяющееся во времени магнитное поле, индуцирующее поле электрическое (рис. 1.2, б), тем самым образуется в окружающем пространстве электромагнитное поле.

При анализе особенностей распределения электромагнитного поля в пространстве удобно рассмотреть плоскую волну, у которой вектор напряженности электрического поля  $\vec{E} = \vec{e}_x E_x$  ориентирован по оси  $x$ , вектор магнитной индукции  $\vec{B} = \vec{e}_y B_y$  — по оси  $y$ , а вектор Пойнтинга, характеризующий направление передачи энергии, будет направлен по оси  $z$  (рис. 1.3, а).

Для электрической составляющей из уравнений Максвелла можно получить волновое уравнение

$$\partial^2 E_x / \partial z^2 - \varepsilon_0 \mu_0 \partial^2 E_x / \partial t^2 = 0.$$

Решение этого уравнения представляет собой волновую функцию, зависящую от времени и пространственной координаты  $E_x(t, z) = E_x(t - z/c)$ , вид которой определяется зависимостью от времени функции  $E_x(t, 0)$ , задаваемой током в антенне. Распределение напряженности вдоль оси  $z$  для разных моментов времени можно получить, зафиксировав в аргументе моменты времени,

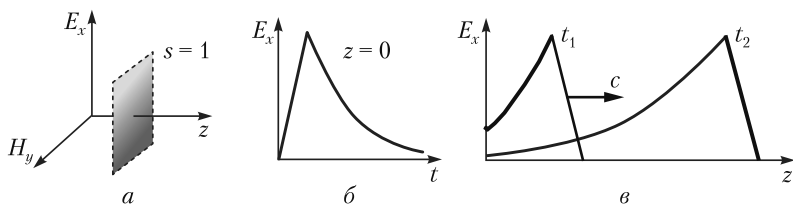


Рис. 1.3. Плоская волна (а), зависимости напряженности от времени (б) и координаты (в)

$t_2 > t_1$  (рис. 1.3, *б*). Для магнитной составляющей справедливо аналогичное уравнение

$$\partial^2 H_y / \partial z^2 - \varepsilon_0 \mu_0 \partial^2 H_y / \partial t^2 = 0,$$

решением которого также является волновая функция  $H_y(t - z/c)$ .

Таким образом, в пустом пространстве созданная плоская электромагнитная волна распространяется без искажений со скоростью света  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с.

Объемную плотность энергии плоской волны несложно вычислить с учетом равенства  $w_{\text{эм}} = \varepsilon_0 E_x^2 = B_y^2 / \mu_0$ . Проходящую через площадку  $s$  электромагнитную энергию определяет соотношение  $\Delta W_{\text{эм}} = s w_{\text{эм}} c \Delta t$ , из которого с учетом единичных значений  $s$  и  $\Delta t$  несложно получить

$$\Pi_z = E_x B_y / \mu_0 = E_x H_y.$$

Соотношение электрической  $E_x$  и магнитной  $H_y$  составляющих волны определяется расстоянием  $r$  от излучателя до точки наблюдения.

В ближней от источника зоне ( $r < \lambda$ ), называемой зоной индукции, их зависимость от расстояния обратно пропорциональна различным степеням  $r$ . В дальней от источника зоне ( $r > \lambda$ ), называемой зоной излучения, составляющие с высокими степенями  $1/r$  существенно уменьшаются (затухают) и зависимость векторов напряженностей электрического и магнитного полей становится обратно пропорциональной первой степени расстояния:  $E_x \sim (1/r)$  и  $H_y \sim (1/r)$ .

Пространственные свойства антенны характеризуются диаграммой направленности, представляющей собой зависимость значения модуля  $\Pi_z$  от угловых координат в сферической системе отсчета. Дипольный излучатель имеет диаграмму направленности в виде тора, или бублика (см. рис. 1.2, *а*). Для формирования одинаковой диаграммы направленности во всех направлениях (всенаправленная антенна) или диаграммы с узкой направленностью применяют сложные конструкции антенн, содержащих совокупность излучателей.

Особенности распределения электромагнитного поля в пространстве принято анализировать при излучаемом синусоидальном сигнале частотой  $f$

$$E_x = E_{xm} \sin 2\pi f t = E_{xm} \sin 2\pi t / T.$$

В пространстве напряженность синусоидальной волны характеризуется амплитудой  $E_m$  и длиной волны  $\lambda = cT = c/f$ , т.е. расстоянием, которое она проходит за цикл колебаний. При синфазном

изменении  $E_x(t)$  и  $H_y(t)$  отношение их амплитуд  $Z_B = E_x/H_y = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377$  Ом называют волновым сопротивлением пустого пространства.

Для сравнения различных излучателей в теории антенн используют величину, называемую *сопротивлением излучения* и определяемую как отношение излучаемой мощности к квадрату действующего значения подводимого к антенне тока. Для стержневой антенны формула сопротивления излучения имеет вид

$$R_\Sigma = (2\pi/3)Z_B(r/\lambda)^2 = (2\pi/3)Z_B(rf/c)^2.$$

Из приведенной формулы следует, что при неизменном значении амплитуды питающего антенну синусоидального тока излучаемая мощность увеличивается пропорционально квадрату частоты. Поэтому значительные мощности излучения антенны в пустом пространстве можно получить на достаточно высоких частотах.

Излучаемые электромагнитные волны принято классифицировать в зависимости от длины волны или частоты излучения (рис. 1.4).

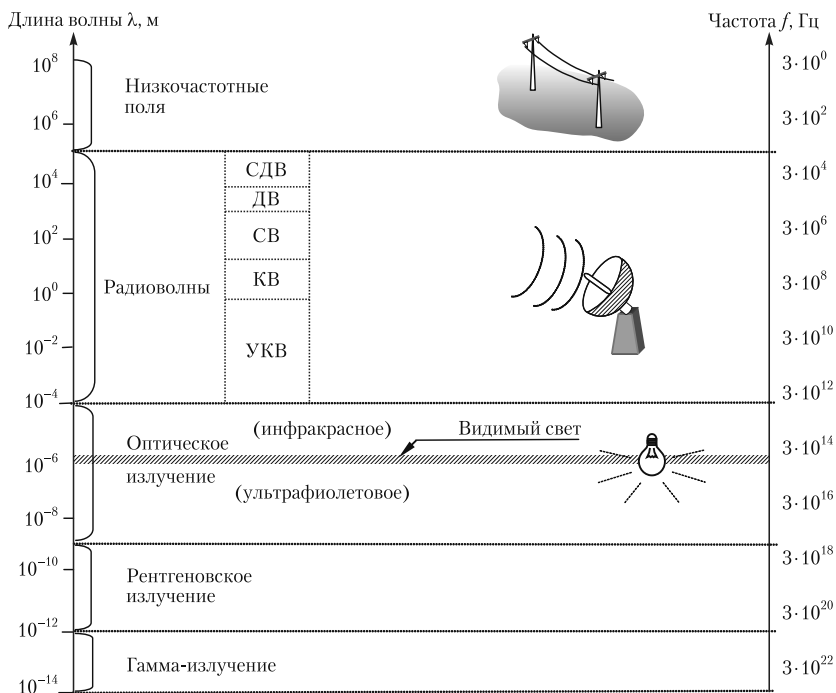


Рис. 1.4. Диапазоны частот и длин электромагнитных волн

Электромагнитные поля крайне низких частот (в диапазоне ниже единиц килогерц), как правило, возбуждаются в результате работы силового электротехнического и энергетического оборудования, а также при прохождении тока в высоковольтных линиях электропередач. В инфранизкочастотном диапазоне используют соотношения, описывающие распределение векторов поля в ближней от излучателя зоне, так как дальней можно считать зону, находящуюся на значительном расстоянии (например, на промышленной частоте  $f = 50$  Гц длина волны составляет  $\lambda = 6000$  км и к дальней следует относить область, расположенную на расстоянии примерно 10 000 км). Если в качестве антенны рассматривать провод длиной около 6 м, то при прохождении синусоидального тока с действующим значением 1000 А в дальней зоне обеспечивается мощность излучения примерно 1 МВт. В ближней зоне на расстояниях от источника порядка нескольких метров электромагнитные поля создают существенные помехи.

*Радиочастотные* сигналы занимают полосу частот от 3 кГц до 3000 ГГц, что соответствует длинам волн от 100 км до 0,1 мм. Механизмы излучения, распространения и применения радиоволн изучаются в различных разделах радиотехники. Особенностью радиоволн является существенная зависимость характера их распространения от длины волны. Длинные радиоволны с частотами до 300 кГц распространяются преимущественно в канале Земля — ионосфера, огибая поверхность Земли. Передачи длинноволновых радиостанций свободно принимаются на расстоянии до нескольких тысяч километров. Среднечастотный диапазон (до 3 МГц) преимущественно используется в местном радиовещании и связи на расстояниях порядка сотен километров. Короткие (декаметровые) волны при распространении многократно отражаются от поверхности Земли и ионосферы, что дает возможность организовать связь между любыми точками при не слишком больших мощностях излучателей. Радиоволны диапазона ультракоротких волн (УКВ) практически не отражаются от ионосферы, не огибают земную поверхность. В диапазоне УКВ работают преимущественно местные радиостанции, так как непосредственная связь на УКВ возможна только в пределах прямой видимости (40—50 км). Эти волны являются единственно пригодными для передачи телевидения и связи с космическими объектами.

Область *оптического излучения* содержит электромагнитные волны, длины которых лежат в пределах от 1 нм до 1 мм. В техническом плане оптический диапазон широко используется для передачи и визуального представления информации. Распространению устройств оптоэлектроники способствуют большая информацион-

ная емкость и высокое быстродействие оптических каналов связи. Разнообразие физических эффектов позволило реализовать опто-электронными средствами множество различных приборов: опто-электронные датчики, оптические вычислительные и запоминающие устройства, индикаторы для отображения информации, волоконно-оптические линии связи.

Группу *ионизирующих излучений*, включающую рентгеновские лучи и гамма-излучения, составляют электромагнитные волны с длиной менее 1 нм. Рентгеновское излучение возникает в результате возбуждения атомов электронами с большой энергией, которые, проникая внутрь атома, вызывают переход его электронов на высокие энергетические уровни с последующим возвращением на низкие, сопровождающимся испусканием квантов. Способность рентгеновских лучей проникать через слои вещества используется для контроля структуры объектов. Электромагнитное гамма-излучение возникает при взаимодействии элементарных частиц. Характеристики гамма-излучений по ряду параметров подобны свойствам рентгеновских лучей.

Реальное пространство, в котором происходят возбуждение, распространение и взаимодействие электромагнитных волн, не является пустым, а содержит различные объекты. Характеристики электромагнитного поля определяются электрофизическими свойствами вещественных сред. Это обусловлено наличием в веществе заряженных элементарных частиц, образующих собственные электромагнитные поля, которые взаимодействуют с внешними полями и изменяют их характеристики.

Для упрощения анализа электромагнитных полей в классической электродинамике уравнения записывают с использованием вспомогательных векторов. Принято в веществе выделять два вида электрических зарядов:

- свободные, способные перемещаться на расстояния, значительно превышающие размеры между молекулами вещества или узлами ионной решетки;
- связанные, входящие в состав электрически нейтральных молекул.

При приложении электрического поля свободные заряды образуют направленный поток, называемый электрическим током, вектор плотности которого считают пропорциональным напряженности приложенного электрического поля:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E},$$

где  $\sigma$  — коэффициент пропорциональности, называемый удельной электрической проводимостью.

Связанные заряды определяют диэлектрические (поляризационные) свойства вещества. Под действием внешнего электрического поля молекулы деформируются (поляризуются), создавая в физически малом объеме вектор поляризации  $\vec{P}(\vec{E})$ , значения которого зависят от напряженности приложенного поля  $\vec{E}$ . Для записи уравнений электромагнитного поля в материальной среде вводят вектор электрического смещения

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.$$

В случае линейной среды получаем соотношение  $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$ , причем величину  $\varepsilon$  называют относительной электрической проницаемостью вещества.

Наличие в веществе элементарных токов, создающих собственные магнитные поля, учитывают с помощью вектора намагниченности  $\vec{M}$ . При записи уравнений электродинамики в веществе вектор напряженности магнитного поля представляют в виде

$$\vec{H} = (\vec{B}/\mu_0) - \vec{M}.$$

В случае линейного характера зависимости  $\vec{M}(\vec{H})$  выражение магнитной характеристики вещества принимает вид  $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ , причем величину  $\mu$  называют относительной магнитной проницаемостью вещества.

Введение новых векторов, учитывающих влияние материальной среды на характеристики электромагнитных полей, дает возможность записать уравнения Максвелла только с внешними источниками поля в виде

$$\oint \vec{D} d\vec{s} = Q; \quad \oint \vec{B} d\vec{s} = 0; \quad \oint \vec{E} d\vec{l} = -d \left[ \int \vec{B} d\vec{s} \right] / dt;$$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int (\sigma \vec{E} + d\vec{D}/dt + \vec{J}_{\text{св}}) d\vec{s},$$

где величина  $J_{\text{св}}$  описывает плотность сторонних токов в излучателе.

Решение уравнений следует выполнять с учетом свойств конкретной среды. Например, для анализа плоского электромагнитного поля в идеальном диэлектрике ( $y = 0$ ) с электрической и магнитной проницаемостями  $\varepsilon$  и  $\mu$  при отсутствии внешних токов и зарядов получим следующие уравнения:

$$\partial^2 E_x / \partial z^2 - \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \partial^2 E_x / \partial t^2 = 0;$$

$$\partial^2 H_y / \partial z^2 - \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \partial^2 H_y / \partial t^2 = 0.$$

Решениями уравнений являются зависящие от координаты и времени функции  $E_x(t, z) = E_x(t - z/v)$  и  $H_y(t, z) = H_y(t - z/v)$ , опи-

сывающие электромагнитные волны, распространяющиеся без затухания со скоростью  $v = 1/\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} = c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ , которая меньше скорости света в пустом пространстве. При этом волновое сопротивление среды зависит от параметров диэлектрика:

$$Z_{\text{в}} = E_x/H_y = \sqrt{\mu\mu_0/\varepsilon\varepsilon_0} = 377\sqrt{\mu/\varepsilon} \text{ Ом.}$$

Реальный диэлектрик всегда в той или иной степени обладает проводящими свойствами, т.е. имеет отличное от нуля значение удельной электропроводности  $\sigma$ , что приводит к более сложному уравнению волны.

## 1.2. Электрофизические характеристики материальных сред

Объяснение свойств различных материалов базируется на атомно-молекулярной теории строения вещества. При этом для большинства приложений можно воспользоваться простой планетарной моделью, согласно которой атом состоит из плотного тяжелого ядра, окруженного совокупностью электронов, вращающихся вокруг него по эллиптическим орбитам. Орбиты движения электронов находятся на значительных расстояниях по сравнению с размерами ядра. В ядре, имеющем размер примерно  $10^{-15}$  м, сосредоточена почти вся масса атома (плотность ядра составляет  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>). В ядре атома существует два типа частиц (нуклонов): положительно заряженные протоны и не имеющие заряда нейтроны. Нуклоны (протон и нейтрон) имеют примерно одинаковые массы. Общее количество частиц в ядре, называемое массовым числом, определяет массу ядра и, следовательно, с достаточным приближением массу атома в целом.

Масса электрона составляет  $9,1 \cdot 10^{-28}$  г, т.е. в 2000 раз меньше массы ядра атома водорода. Электрон имеет неизменный заряд  $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Электрический заряд протона по модулю точно совпадает с зарядом электрона. Электроны могут занимать только определенные орбиты, характеризующиеся минимальными уровнями энергии. На определенном энергетическом уровне может находиться точно определенное число электронов. Внутренние уровни полностью заполнены, а внешний слой образуют электроны, определяющие валентность элемента в химических реакциях. Количество электронов в атомной оболочке совпадает с числом протонов в ядре, и суммарный заряд всех электронов в точности равен положительному заряду ядра. Это обуславливает электрическую нейтральность атома в целом.

Наличие в атомах движущихся заряженных частиц приводит к созданию в веществе собственных магнитных полей. Магнитные