

Б. И. Крук, О. Б. Журавлева

# ОСНОВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

*Рекомендовано УМО по образованию в области  
Инфокоммуникационных технологий и систем связи  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлению подготовки  
210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
квалификации (степени) «бакалавр»  
и квалификации (степени) «магистр»*

Москва  
Горячая линия - Телеком  
2013

УДК 621.3.01:621.372(075.8)

ББК 32.84

К84

Р е ц е н з е н т ы : доктор техн. наук, профессор *О. В. Горячкин*, канд. техн. наук, доцент *С. Г. Гриненко*, доктор техн. наук, профессор *В. П. Шувалов*

**Крук Б. И., Журавлева О. Б.**

**К84** Основы спектрального анализа. Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия—Телеком, 2013. — 148 с., ил.

**ISBN 978-5-9912-0327-2.**

Изложены основы теории спектрального анализа периодических, непериодических (непрерывных и импульсных), дискретных и модулированных сигналов, применяемых в радиоэлектронике и связи.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

**ББК 32.84**

*Адрес издательства в Интернет [WWW.TECHBOOK.RU](http://WWW.TECHBOOK.RU)*

*Учебное издание*

**Крук Борис Иванович  
Журавлева Ольга Борисовна**

**Основы спектрального анализа**  
Учебное пособие

Компьютерная верстка *Н. М. Гусельниковой*  
Обложка художника *О. Г. Карповой*

Подписано в печать 16.02.2013. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 9,25. Тир. 500 экз. (1-й завод 200 экз.)

**ISBN 978-5-9912-0327-2**

© О. Б. Журавлева, Б. И. Крук, 2013

© Издательство «Горячая линия—Телеком», 2013

## Предисловие

Спектральный анализ сигналов является, пожалуй, одним из наиболее увлекательных разделов теории электрических цепей. Базируясь на строгих математических основаниях, выявленных еще в позапрошлом веке французским ученым Ж. Фурье, он дает в руки инженеров мощный аппарат анализа процессов, происходящих при передаче информации по линиям связи.

В то же время зачастую излишняя «математизация» изложения данного материала в учебниках сталкивает обучаемого с определенными трудностями при его усвоении. Поэтому вполне понятно стремление авторов этого труда собрать все основные сведения о спектрах в одно пособие, изложить их максимально доступно, не поступаясь при этом математической строгостью и вдохнуть идущий от инженерной практики физический смысл в сухие формулы и графики.

Конечно же, никакое детальное описание теоретического материала не заменит живых примеров. Следуя этому правилу, авторы старались насыщать материал книги большим количеством примеров и задач, дающих возможность проверить теорию на практике.

Насколько авторам удалось воплотить свои идеи, судить читателям. Отзывы и пожелания на книгу следует отправлять по адресу: Россия, 630102, Новосибирск, ул. Кирова 86, СибГУТИ, кафедра ТЭЦ или по E-mail: krouk@sibsutis.ru и zhuravleva@neic.nsk.su.

## 1. Физические основы спектрального анализа

---

Спектральный анализ электромагнитных колебаний был открыт почти 150 лет назад ...

В середине позапрошлого века в небольшом немецком городе, профессор химии Роберт Бунзен (1811–1899) изобрел горелку, в которую снизу по трубке поступал газ. Стоило только поднести спичку к верхнему концу трубки, и под горелкой вспыхивало пламя высокой температуры. Сейчас эта горелка называется бунзеновской. Профессор вносил в пламя горелки различные вещества и по цвету пламени определял его химический состав. Но так как разные вещества могли окрасить пламя в один и тот же цвет, Бунзен уже собирался бросить эту затею. Выручила случайность. Как-то во время опыта к Бунзену зашел его коллега по университету профессор физики Густав Кирхгоф (1824–1887). Он принес с собой ящик с линзами и стеклянной призмой, который называл спектроскопом.

Сейчас каждый школьник знает принцип действия спектроскопа. Если, например, пропустить солнечный свет через призму, то получим цветные полосы (помните, как знакомая со школьной скамьи фраза: «Каждый охотник желает знать, где сидит фазан» помогала легко запомнить, на какие цвета разлагается белый свет – красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый!). Набор цветов, на которые разлагается солнечный свет, называется его спектром. Заметим, что луч какого-либо цвета – это электромагнитное колебание со строго определенной частотой. Другой цвет – другая частота колебания. Таким образом, солнечный свет представляет собой сумму простейших электромагнитных колебаний с различными частотами.

Вернемся к опытам Бунзена и Кирхгофа. Когда почтенные профессора решили пропустить окрашенное пламя через линзы и призму, они увидели на стенке ящика разноцветные линии. И каждое вещество, сгорая в пламени горелки, давало на экране только свои линии, не похожие на линии других веществ. Так был открыт спектральный анализ веществ. По календарю шел 1859 год.

Любопытна история открытия газа гелия методом спектрального анализа. Спустя почти десять лет после опытов Бунзена и Кирхгофа, 18

## Оглавление

|   |     |
|---|-----|
| Введение .....  | 3   |
| 1. Физические основы спектрального анализа .....  | 4   |
| 2. Спектральный анализ периодических сигналов .....   | 31  |
| 3. Спектральный анализ непериодических сигналов .....   | 61  |
| 4. Спектральный анализ дискретных сигналов .....  | 86  |
| 5. Спектральный анализ модулированных сигналов .....  | 98  |
| Приложение 1. Задачи на тему «Основы спектрального анализа»<br>с решениями .....                  | 110 |
| Приложение 2. Задачи на тему «Основы спектрального анализа»<br>для самостоятельного решения ..... | 120 |
| Приложение 3. Тестовые задания по теме «Основы спектрального<br>анализа» .....                    | 122 |
| Литература .....  | 147 |