

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

**Ю.А. БРЮХАНОВ**

## **ЦИФРОВЫЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ**

Издание второе, переработанное и дополненное

***Учебное пособие***

Ярославль 2005

УДК 621.37 (075.5)  
ББК 3841-01я73  
Б 89

Рецензенты:

кафедра основ радиотехники Московского энергетического института  
(технического университета); доктор технических наук,  
профессор А.А. Ланнэ

**Брюханов Ю.А.** Цифровые цепи и сигналы: учеб. пособие /  
Б 89 Ю.А. Брюханов; Яросл. гос. ун-т. -2-е изд., перераб. и доп.  
– Ярославль: ЯрГУ, 2005. – 154 с.  
ISBN 5-8397-0377-X

Приводится математический аппарат для анализа сигналов и цепей дискретного времени. Излагаются спектральная теория периодических и непериодических цифровых сигналов, теория цепей дискретного времени, частотные свойства и временные характеристики базовых нерекурсивных и рекурсивных линейных цепей первого и второго порядков. Рассматриваются эффекты квантования в цифровых сигналах и цепях.

Во втором издании материал подвергнут методической переработке с учетом опыта преподавания соответствующей дисциплины.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 013800 Радиофизика и электроника (дисциплина «Цифровые цепи и сигналы», блок общепрофессиональных дисциплин) и направлению 550400 Телекоммуникации (дисциплина «Основы теории цепей», блок общепрофессиональных дисциплин).

Может использоваться студентами, обучающимися по направлениям подготовки специалистов 653700 Приборостроение, 654200 Радиотехника и 634400 Телекоммуникации.

Ил. 89. Библиогр.: 17 назв.

УДК 621.37 (075.5)  
ББК 3841-01я73

© Ярославский  
государственный  
университет, 2005  
© Брюханов Ю.А., 2005

ISBN 5-8397-0377-X

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

С момента выхода в свет первого издания прошло шесть лет. Автором получены многочисленные отзывы коллег, читателей. Советы, замечания и пожелания, содержащиеся в них, существенно помогли переработать текст.

Во втором издании общий план книги и ее объем сохранены неизменными. Некоторые объемы переработаны как в научном, так и в методичном отношении.

В первом разделе переработан и расширен материал, относящийся к дискретному преобразованию Фурье, по-другому изложена свертка периодической последовательности. Во втором разделе уточнены выражения для спектров прямоугольного импульса и периодической последовательности таких импульсов, а также цифрового единичного импульса и единичного скачка. Методически более удачно изложен содержащийся в третьем разделе материал о временных характеристиках рекурсивных и нерекурсивных цепей второго порядка. Значительные изменения претерпел материал четвертого и пятого разделов, посвященный эффектам квантования. Уточнены основные положения, отдельные формулировки, удачней выбраны обозначения физических величин, устранена излишняя детализация изложения ряда вопросов, исключены и заменены новыми потерявшие актуальность примеры. Список литературы существенно дополнен новыми источниками.

г. Ярославль, 2005

Ю.А. Брюханов

## ВВЕДЕНИЕ

Последние годы отмечены бурным развитием информационных технологий. Главенствующую роль в этом развитии играют цифровые методы формирования и обработки сигналов. Появилась новая область науки и техники – цифровая обработка сигналов, включающая общие для разных областей применения методы, алгоритмы и средства переработки сигналов на основе принципов вычислительной математики с использованием средств цифровой вычислительной техники. Идеология, методология и технология новой области получили широкое распространение в обработке речи, телевидении, передаче данных, радиоприеме и радиопередаче, построении медицинской аппаратуры, геологии, робототехнике, радиолокации и др.

К главным достоинствам средств цифровой обработки сигналов относятся многофункциональность, реализация произвольных преобразований сигналов, высокая стабильность и повторяемость характеристик, уникальные возможности для адаптации, высокая точность реализации алгоритма обработки, реализация с помощью больших и сверхбольших интегральных схем, высокая надежность, малые масса, габариты и энергопотребление, широкие возможности унификации и диагностики. Однако в технике достоинств без недостатков не бывает. Главными из них являются эффекты аппроксимации (эффекты квантования), возникающие из-за конечной точности представления чисел и явления переполнения, обусловленные нелинейностью вход-выход основных элементов схем. Поскольку цена достоинств выше, да и меры борьбы с недостатками разработаны, внедрение цифровых технологий является магистральным направлением развития информационных систем. В радиоэлектронике и телекоммуникациях с их помощью решаются следующие задачи: модуляция и демодуляция, разделение сигналов, генерация, формирование и коррекция, фильтрация и оценивание, анализ спектров, сжатие, обнаружение и распознавание, кодирование и декодирование.

Дисциплина “Цифровые цепи и сигналы” является базовой для изучения теории и методов цифровой обработки сигналов. Здесь изучаются спектральная теория периодических и непериодических сигналов и линейная теория цепей дискретного времени. Рассматриваются способы построения цифровых цепей, частотные и временные характеристики базовых звеньев первого и второго порядков. Изучаются эффекты квантования и переполнения в цифровых сигналах и цепях. Большую часть этого материала можно найти в

известных монографиях Л. Рабинера и Б. Гоулда (1978 г.), А.В. Оппенгейма и Р.В. Шафера (1979 г.), В. Каппелини, А.Дж. Константиноидиса и П. Эмилиани (1983 г.).

Компактное изложение дисциплины осуществлено в 1991 г. в книге “Теория дискретных и цифровых сигналов и цепей”. С той поры автор выполнил и опубликовал в центральных научных изданиях цикл исследований, посвященный временным характеристикам и частотным свойствам базовых цифровых цепей первого и второго порядков, что позволило в значительной мере достроить теорию цифровых цепей. Эти результаты отражены в настоящей книге. Полностью переработан и материал, посвященный сигналам дискретного времени. По-другому излагаются некоторые вопросы квантования в цифровых сигналах и цепях.

Пособие состоит из пяти разделов. Математические методы и приемы, используемые в теории дискретных процессов (дискретный ряд Фурье,  $z$ -преобразование, дискретное преобразование Фурье, теория сверток, разностные уравнения) изложены в первом разделе. Прочное овладение ими совершенно обязательно, поскольку они служат логической основой изучения последующего материала.

Второй раздел посвящен спектральной теории сигналов дискретного времени. Приведены полученные с помощью дискретного преобразования Фурье спектральные характеристики типовых периодических и непериодических сигналов: гармонического колебания, показательных и прямоугольных импульсов, прямоугольных радиоимпульсов, цифрового единичного импульса, единичного скачка. Рассматривается связь между спектрами сигналов непрерывного и дискретного времени.

В третьем разделе излагается теория цепей дискретного времени, принципы и способы построения цифровых цепей. Подробно описаны частотные свойства и временные характеристики (импульсная и переходная характеристики, реакция на воздействие прямоугольного импульса) базовых звеньев – нерекурсивных и рекурсивных цепей первого и второго порядков.

Эффекты, обусловленные аппроксимацией отсчетов сигнала, описываются в четвертом разделе. Здесь же рассмотрены вопросы аналогово-цифрового и цифроаналогового преобразований сигналов.

Пятый раздел посвящен эффектам квантования и переполнения в цифровых цепях. Рассматриваются квантование арифметических операций в БИХ- и КИХ-цепях, квантование коэффициентов, предельные циклы и вызванные переполнением ограничения и