

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ
имени проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА

На правах рукописи

О. В. КУСТОВ

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ПОСТРОЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ
МОДЕМОВ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ
ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

№ 290 — Теоретическая радиотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1969

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ
имени проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА

На правах рукописи

О. В. КУСТОВ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ПОСТРОЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ
МОДЕМОВ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ
ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ

№ 290 — Теоретическая радиотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1969

Работа выполнена на кафедре теоретической радиотехники Ленинградского электротехнического института связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор А. М. Заездный

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор А. П. Мановцев,
- кандидат технических наук Н. А. Гуревич.

Ведущее предприятие — _____

Автореферат разослан 12 I 1970 года.

Защита состоится 19 II 1970 года на заседании
Ученого совета факультетов РТ, РК, РС и РВ Ленинградского электро-
технического института связи имени профессора М. А. Бонч-Бруевича,
гор. Ленинград, Д-65, наб. реки Мойки, 61, аудитория № 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СОВЕТА
доцент

(Р. Г. ЦАТУРОВА)

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы передачи дискретной информации отличаются опромным разнообразием как принципов построения аппаратуры, так и схемных решений, реализующих эти принципы. Характеристики канала связи, вид модуляции сигнала, метод обработки сигналов в приемнике, назначение системы связи, опыт разработчиков — эти и другие факторы накладывают свои отпечатки на каждую конкретную аппаратуру, делая ее «непохожей» на другие.

В современной системе передачи дискретной информации можно выделить три основные группы разнохарактерных устройств. Первую группу образуют устройства, преобразующие сообщения в код и наоборот. Это кодирующие и декодирующие устройства (кодеки). Вторую группу составляют устройства, преобразующие дискретные символы кода в аналоговые сигналы и сигналы в код — модулирующие и демодулирующие устройства (модемы). И, наконец, в третью группу входят каналные устройства: радиопередатчики, антенно-фидерные устройства, радиоприемники в радиоканалах и аппаратура уплотнения в проводных каналах связи.

Устройства третьей группы уже давно строятся как универсальные: они позволяют согласовывать с требованиями канала и передавать по нему самые разнохарактерные сигналы, несущие произвольную (дискретную или непрерывную) информацию.

В настоящее время наметилась явная тенденция к универсализации устройств первой группы — кодеков. Как правило, эти устройства строятся по однотипным функциональным блок-схемам с использованием логических элементов. В дальнейшем предполагается возложить выполнение операций по кодированию и декодированию сообщений на цифровые электронно-вычислительные машины, являющиеся, в основном, источниками и потребителями дискретной информации.

Иначе обстоит дело с устройствами второй группы — модемами; эти устройства весьма разнообразны. Прежде они вообще не составляли заметной части системы связи ни по объему оборудования, ни по влиянию на характеристики системы связи. Их роль выполняли модуляционные устройства в передатчиках и детекторы (амплитудные, частотные) в приемниках. Однако с внедрением в практику оптимальных методов передачи и обработки сигналов, с развитием высокоэффективных, в смысле пропускной способности и помехоустойчивости, систем связи положение изменилось. В современных системах передачи дискретной информации модемы составляют значительную часть оборудования и, что главное, определяют все основные характеристики системы. В качестве примеров достаточно упомянуть модемы «Кинеплекс», «МС-5», «Мультилок», «Рейк» и другие. Разнообразие модемов в современных системах связи объясняется тем, что каждый конкретный модем оказывается эффективным лишь в конкретном канале связи, при определенном виде передаваемой информации.

В связи с этим актуальной представляется задача создания универсального модема, способного осуществлять преобразование сообщения в сигнал и сигнала в сообщение, адекватные назначению системы связи и характеристикам канала.

Цель данной диссертационной работы, прежде всего, состоит в том, чтобы показать, что в настоящее время имеются теоретические и технические предпосылки создания универсальных, в указанном смысле, модулирующих и демодулирующих устройств; имеется возможность создания типовых функциональных узлов, из которых можно комплектовать модемы систем связи различного назначения.

Теоретические предпосылки построения универсального модема заключаются в существовании обобщенных алгоритмов формирования и приема сигналов, т. е. таких алгоритмов, которые охватывают преобразования сигналов произвольного вида и по различным методам. Построение обобщенных алгоритмов обработки сигналов позволяет выявить типовые математические операции и, следовательно, типовые функциональные узлы, реализующие эти операции. Эти вопросы рассмотрены в первой главе диссертационной работы.

В основу реализации универсального модема должны быть положены такие принципы, которые позволяли бы из сравнительно небольшого числа типовых функциональных узлов осуществлять все предусмотренные в аппаратуре режимы работы.

Здесь оказывается вполне уместной аналогия с универсальной электронно-вычислительной машиной, в которой решение всего многообразия математических задач достигается путем расчленения алгоритма на ряд элементарных операций, выполняемых с помощью арифметических и логических устройств.

Функциональные узлы должны отвечать современным требованиям конструирования и технологии производства радиоаппаратуры. Важность данного положения связана, прежде всего, с тем, что универсальность, как правило, достигается ценой значительного усложнения аппаратуры. Перспективная же технология производства радиоэлектронной аппаратуры — интегральная микроэлектроника — позволяет преодолеть технические и экономические трудности создания сложных электронных систем. При этом она налагает свои, иногда очень специфические, требования на принципы построения электронных устройств.

Реализационным основам функциональных узлов универсального модема посвящена вторая глава диссертационной работы. В этой главе показано, что в наибольшей степени сформулированным требованиям удовлетворяют методы аналоговой электронно-вычислительной техники. Метод реализации функциональных узлов, основы которого излагаются во второй главе, получил название метода электронного моделирования.

Экспериментальные работы по функциональным узлам, приведенные в третьей главе работы, позволяют сделать вывод о том, что в задаче создания функциональных узлов универсального модема, а также в задачах построения типовых функциональных узлов современной радиоэлектронной аппаратуры метод электронного моделирования будет играть существенную роль.

В четвертой главе работы собран материал по лабораторному макету универсального модема «МС-У», разработанному под руководством автора в научно-исследовательской лаборатории передачи дискретной информации ЛЭИС им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

1. ОБОБЩЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УНИВЕРСАЛЬНОМ МОДЕМЕ

Под обобщенными алгоритмами обработки сигналов понимается совокупность математических операций, выполняемых над сигналами, отображающими передаваемую информацию в процессе их формирования, передачи и приема.

Для построения обобщенных алгоритмов, прежде всего, необходимо формализовать само понятие «сигнал», а также такие широко используемые понятия: «информационный параметр сигнала», «парциальный канал», «ветвь разнесения» и т. п. С этой целью в первой главе обсуждаются вопросы, связанные с аналитическим представлением сигналов, помех и характеристик каналов связи.

Наиболее конструктивным представлением сигналов и аддитивных помех в универсальном модеме является представление сигналов в виде линейной комбинации ортогональных функций. Например, l -й вариант сигнала модема представляется в следующем виде:

$$S_r(t) = \sum_l^N a_{r,l} f_l(t). \quad (1)$$

где $a_{r,l}$ — l -й информационный параметр сигнала;
 $f_l(t)$ — l -я координатная функция, с помощью которой представляются сигналы модема.

Ортогональность координатных функций позволяет определить информационный параметр сигнала как величину скалярного произведения сигнала и координатной функции

$$a_{r,l} = \frac{1}{Q_l^2} \int_{-\infty}^{\infty} S_r(t) f_l(t) dt, \quad (2)$$

где

$$Q_l^2 = \int_{-\infty}^{\infty} f_l^2(t) dt.$$

В качестве координатных функций можно использовать различные системы ортогональных функций. Выбор коор-

динатных функций сигнала модема непосредственно определяется характеристиками канала связи.

К каналу связи при построении обобщенных алгоритмов можно отнести как физическую среду, используемую для передачи информации, так и каналообразующее, обычно высокочастотное, оборудование. Общими свойствами используемых в настоящее время каналов связи является линейность, наличие аддитивной помехи и изменение характеристик канала во времени.

Преобразование сигналов модема в линейном канале связи, если не учитывать влияние аддитивной помехи, описывается с помощью интегрального оператора:

$$y_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t, \lambda) S_r(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $g(t, \lambda)$ — реакция канала связи на дельта-функцию, поданную на вход канала в момент времени λ .

Сигнал (1) на выходе линейного канала связи может быть представлен в виде:

$$y_r(t) = \sum_i^N a_{r,i} \varphi_i(t), \quad (4)$$

где $\varphi_i(t)$ — преобразованная в соответствии с (3) координатная функция $f_i(t)$.

Следовательно, можно считать, что на выходе линейного канала связи информационные параметры сигнала не изменяют своего значения, а преобразуются координатные функции сигнала модема.

Целесообразно считать согласованными с линейным каналом связи такие сигналы, координатные функции которых не нарушают своей ортогональности после преобразования (3), т. е.:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_i^2(t) dt \neq 0, \\ \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_i^2(t) \cdot \varphi_j(t) dt &= 0 \quad (i \neq j). \end{aligned} \quad (5)$$

В диссертационной работе показано, что такие функции всегда существуют и они являются решениями однородного интегрального уравнения:

$$\gamma_i f_i(\lambda) - \int_{-\infty}^{\infty} B_g(\lambda, z) f_i(z) dz = 0, \quad (6)$$

в котором функция

$$B_g(\lambda, z) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t, \lambda) \cdot g(t, z) dt \quad (7)$$

содержит всю необходимую информацию о характеристиках канала связи, а $\gamma_i = \tilde{Q}_i^2 / Q_i^2$.

Решение интегральных уравнений, как правило, является сложной математической задачей. Поэтому в ряде практических случаев целесообразно полученные в работе соотношения использовать для анализа пригодности выбранных координатных функций для передачи информации по заданному линейному каналу связи.

Для количественной оценки пригодности координатных функций предлагается использовать величину

$$\underline{\underline{\xi}}_i = \frac{\sqrt{\sum_j \xi_{ij}^2}}{\tilde{Q}_i^2}, \quad (8)$$

где

$$\xi_{ij} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt \quad \text{при } i \neq j,$$

представляющую собой нормированную величину энергии «переходных» помех от соседних координатных функций на i -ю координатную функцию. Эта оценка, в основном, совпадает с имеющимися оценками аналогичного назначения.

Вычисление величин \tilde{Q}_i^2 и ξ_{ij} для линейного канала со

стационарными характеристиками удобно производить по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\tilde{Q}_i^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} B_{ii}(\lambda) B_g(\lambda) d\lambda, \\ \xi_{ij} &= \int_{-\infty}^{\infty} B_{ij}(\lambda) B_g(\lambda) d\lambda,\end{aligned}\tag{9}$$

где функция

$$B_g(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot g(t - \lambda) dt$$

является автокорреляционной функцией импульсной характеристики канала связи, а функция

$$B_{ij}(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t) \cdot f_j(t - \lambda) dt$$

— взаимно-корреляционной функцией координатных функций $f_i(t)$ и $f_j(t)$ при $i \neq j$ и автокорреляционной функцией i -й координатной функции при $i = j$.

Несомненными реализационными преимуществами в настоящее время обладают ортогональные функции:

- неперекрывающиеся по времени;
- неперекрывающиеся по частотному спектру;
- ортогональные на некотором интервале времени гармонические колебания.

Сигналы, образованные с помощью указанных функций, формируются и разделяются с помощью простых технических средств: ключевых схем, частотных фильтров, генераторов гармонических колебаний и т. п. Выбором характеристик указанных функций удастся эффективно согласовать сигналы модемов с существующими каналами связи. При этом оказывается возможным описывать преобразование сигналов модема в каналах связи с помощью матричного оператора, элементы которого являются, в общем случае, случайными величинами. Использование матричного оператора в качестве математической модели канала связи позволяет определить, в дальнейшем, различные оптимальные методы приема сигналов.

На основе выбранного представления сигналов (1) в работе решена задача определения алгоритмов работы универсального модулирующего устройства.

Алгоритм работы передатчика обычно задается в виде логической таблицы соответствия вариантов сигнала модема комбинациям двоичных символов информации (манипуляционный код модема). Следовательно, отыскание функциональной схемы модулирующего устройства, реализующего заданный манипуляционный код, относится к задаче синтеза устройства по алгоритму его работы.

Подлежащий передаче вариант сигнала модема обрабатывается непосредственно по формуле (1). Основными элементами функциональной схемы передатчика являются генератор координатных функций и преобразователь двоичных символов в информационные параметры сигналов модема.

Преобразователь представляет собой, в общем случае, линейный многополюсник с переменными характеристиками, на вход которого поступает комбинация величин ± 1 , соответствующая двоичным символам информации, а на выходе образуются требуемые значения параметров сигнала модема.

Предлагаемый метод построения преобразователей двоичных символов в информационные параметры основывается на свойствах матриц Адамара, составленных из элементов ортогональных векторов. Эти матрицы могут быть получены на основе кодов Рида — Мюллера первого порядка.

В качестве примеров в работе получены алгоритмы работы модулирующих устройств, формирующих сигналы с двойной частотной модуляцией, двухкратной и трехкратной фазоразностной модуляцией.

Алгоритмы работы приемника универсального модема должны соответствовать «оптимальным» по конкретному статистическому критерию, методам обработки сигналов. В задачах связи, где все варианты сигнала равновероятны и имеют одинаковую ценность, предпочтительным представляется критерий идеального наблюдателя, минимизирующий полную вероятность ошибки. Согласно этому критерию за принятый сигнал следует считать тот, для которого условная плотность вероятности наибольшая.

По общепринятой методике в первой главе диссертационной работы определены некоторые оптимальные, в указанном смысле, алгоритмы обработки сигналов. При вы-

воде алгоритмов предполагалось, что преобразование сигналов в канале связи описывается с помощью матричного оператора, а аддитивная помеха представляется в виде линейной комбинации координатных функций сигнала модема, причем ее параметры являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальным законам с нулевыми математическими ожиданиями и различными дисперсиями. Для «белого» шума и канала со стационарными характеристиками полученные алгоритмы приводятся к известному виду, соответствующему когерентному, корреляционному, энергетическому, автокорреляционному и т. п. методам приема.

Отличительной особенностью рассматриваемого приемника является то, что при определении переданной информации он оперирует с информационными параметрами принимаемых сигналов

$$X_{n,i} = \frac{1}{\tilde{Q}_i^2} \int_{-\infty}^{\infty} x_n(t) \varphi_i(t) dt, \quad (10)$$

где $x_n(t)$ — n -я реализация принимаемого сигнала.

Координатные функции служат для выявления этих параметров в месте приема.

Полученные алгоритмы работы приемника позволяют выявить структуру общей функциональной схемы демодулирующего устройства универсального модема и определить основные математические операции, необходимые при приеме сигналов.

Основными математическими операциями, описывающими преобразования сигналов в модулирующем и демодулирующем устройствах являются: суммирование (вычитание), интегрирование, умножение, запоминание. В заключительном параграфе первой главы обсуждаются возможные пути реализации функциональных узлов универсального модема, выполняющих требуемые преобразования сигналов.

2. ОСНОВЫ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ В ВИДЕ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

В универсальном модеме требуются универсальные, в смысле выполнения математических операций, функциональные узлы. Выполнение этого требования одновремен-

но позволяет решить задачу унификации и стандартизации типовых элементов модема.

Требование универсальности приводит к мысли о возможном пути реализации основных функциональных узлов модема как узлов, подобных элементам аналоговых электронно-вычислительных машин. Так появился способ реализации функциональных узлов, основанный на принципах электронного моделирования.

Сущность использования электронного моделирования в приложении к реализации функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры состоит в разбиении требуемого алгоритма работы устройства (функциональной характеристики) на элементарные математические операции, и последующая реализация устройства в виде совокупности типовых элементов, соединенных определенным образом и реализующих указанные математические операции.

Во второй главе диссертационной работы излагаются основы метода электронного моделирования в приложении к реализации линейных функциональных узлов, преобразования сигналов в которых описывается с помощью линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

При построении функциональных узлов, помимо реализации функциональной характеристики устройства, необходимо учитывать так называемые «критерии качества реализации», позволяющие сравнивать различные устройства, обладающие одинаковыми функциональными характеристиками. К критериям качества реализации относятся различные технико-экономические, конструкторско-технологические, эксплуатационные и т. п. показатели, большинство которых в настоящее время еще не выражаются в количественных оценках.

В диссертационной работе на основе использования таких критериев качества, как «запас устойчивости»

$$G_{\alpha_i} = 20 \lg \left(\frac{\alpha_{i, \text{кр}}}{\alpha_{i, \text{ном}}} \right), \quad (11)$$

где $\alpha_{i, \text{ном}}$ — номинальное значение параметра устройства,
 $\alpha_{i, \text{кр}}$ — критическое значение параметра, приводящее к потере устойчивости (самовозбуждению), и «чувствительности»

$$S_{\alpha_i}^{W(x_i)} = \frac{\partial W(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{W(\alpha_i)}, \quad (12)$$

где $W(\alpha_i)$ — функциональная характеристика устройства,
 α_i — параметр устройства,
являющиеся основными в современной теории линейных цепей, выбраны структурные схемы построения линейных узлов в виде электронных моделей.

Использование предлагаемых структурных схем основано на знании полюсов и нулей передаточных функций, т. е. непосредственного продукта решения аппроксимационной задачи современного синтеза линейных устройств.

Реализованные на основе предлагаемых структурных схем линейные функциональные узлы обладают неограниченным запасом устойчивости и содержат в своем составе два типа операционных звеньев: интеграторы и инверторы.

Основным элементом функциональных узлов в виде электронных моделей является операционный усилитель постоянного тока (УПТ). Идеальным операционным усилителем называется четырехполюсник, обладающий бесконечно большим усилением в неограниченной полосе частот, бесконечно большим входным сопротивлением и бесконечно малым выходным сопротивлением.

Все реальные операционные УПТ лишь определенным образом приближаются к идеальному, что требует постановки и решения задачи по определению влияния характеристик реальных усилителей на качество реализации узлов в виде электронных моделей.

В работе выполнен анализ влияния на характеристики реализуемых устройств следующих параметров операционного УПТ: коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот, входного сопротивления, выходного сопротивления усилителя, граничной частоты усиления. В частности, показано, что при определенных условиях, когда частота полюса превосходит граничную частоту усилителя система теряет устойчивость.

Как известно, в настоящее время существует достаточно большое число отечественных и зарубежных операционных усилителей с различными характеристиками, выполненными в виде интегральных микросхем. Проведенный анализ позволяет правильно оценивать характеристики таких усилителей с точки зрения их пригодности для реализации функциональных узлов в виде электронных моделей.

Для построения функциональных устройств с переменными характеристиками на основе метода электронного моделирования требуется множительное устройство. К сожа-

лению, в настоящее время не существует простых и универсальных перемножителей, и разработчики аппаратуры вынуждены при построении конкретных устройств использовать различные заменители.

В специальном параграфе второй главы дан краткий обзор устройств, пригодных для использования при реализации алгоритмов работы универсального модема: перемножитель постоянных величин на интеграторах, ключевой перемножитель, дискретно-аналоговый делитель, резисторно-диодный делитель.

Полученные в первом и во втором параграфе расчетные формулы позволяют производить основные расчеты конкретных функциональных узлов, реализованных на основе метода электронного моделирования.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ УЗЛАМ

Целью экспериментальных работ по функциональным узлам являлась практическая проверка метода электронного моделирования в приложении к реализации узлов модема «МС-У».

Во время экспериментальных работ естественным образом рождались основы проектирования разрабатываемых функциональных узлов. Поэтому целесообразно было изложить в данном разделе работы наряду с экспериментальным материалом и теоретический, связанный с проектированием функциональных узлов в виде электронных моделей.

В третью главу диссертационной работы вошли лишь оригинальные узлы модема «МС-У», реализованные на основе метода электронного моделирования. Алгоритмы работы этих узлов хорошо известны, однако их обычная реализация основывается на совершенно иных схемных базах.

Рассматриваемые функциональные узлы содержат линейные четырехполюсники в виде электронных моделей, центральным элементом которых является операционный усилитель постоянного тока. В работе анализируется связь частотных характеристик операционных УПТ с частотными свойствами транзисторов, используемых при реализации усилителя. Целью анализа является выбор транзисторов, пригодных для построения усилителя с заданными харак-

теристиками. Получена оценочная формула, связывающая граничную частоту усилителя с граничной частотой транзисторов.

Для иллюстрации схемной сложности требуемых операционных УПТ приведены принципиальная схема четырехкаскадного усилителя на транзисторах П-416Б и схема операционного УПТ на интегральных схемах «Д2222», разработанных автором и используемых в лабораторном макете универсального модема «МС-У». Параметры реальных операционных УПТ удовлетворяют требованиям на операционные усилители, сформулированным во второй главе.

Приведены результаты расчета и эксперимента по полосовому частотному фильтру со следующими характеристиками: полоса пропускания 200 *гц*, средняя частота 1000 *гц*, неравномерность амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания не более 2 *дб*, затухание при расстройке от границ полосы пропускания в обе стороны на 100 *гц* не менее 30 *дб*. Характеристики данного фильтра являются типовыми для модемов систем передачи дискретной информации. Реализация подобных фильтров на основе РС-активного схемного базиса является, по общему мнению разработчиков модемов, перспективной.

Основным узлом приемника универсального модема «МС-У» является коммутируемый согласованный фильтр (КСФ). Реализация КСФ обычно основывается на использовании электромеханических и пьезоэлектрических резонаторов. В диссертационной работе изложены основы проектирования и экспериментальной проверки КСФ в виде электронной модели, работающего в диапазоне звуковых частот. Показано, что стабильность резонансной частоты КСФ теоретически и практически определяется стабильностью частото задающих РС-цепочек. Начальная добротность реальных резонаторов КСФ не менее 1000. При использовании лучших отечественных РС элементов можно получить температурный коэффициент частоты КСФ порядка 10^{-5} *град*⁻¹.

При построении модемов систем передачи дискретной информации, как правило, необходимы генераторы гармонических колебаний. Несомненным достоинством генераторов в виде электронной модели следует признать простоту изменения в широких пределах параметров генерируемых колебаний. Это позволяет одновременно использовать подобные генераторы и в качестве модуляторов, например,

частотных. В работе рассмотрена схема управляемого генератора гармонических колебаний в виде электронной модели. Стабильность частоты генератора определяется, так же как в КСФ, стабильностью частотоподающих РС-цепочек.

Теоретические и экспериментальные работы по исследованию метода электронного моделирования позволили сформулировать основные возможности, ограничения и перспективы этого метода реализации функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры. В целом можно сказать, что метод электронного моделирования при реализации функциональных узлов, работающих в инфразвуковом и звуковом диапазоне частот, не уступает, а в некоторых отношениях и превосходит другие известные методы, базирующиеся на РС-активном схемном базисе. Использование схемного базиса, состоящего из РС элементов и операционных усилителей для реализации функциональных узлов хорошо согласуется с требованиями современной технологии производства радиоэлектронной аппаратуры, — микроминиатюризации на основе пленочных и твердых схем.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО УНИВЕРСАЛЬНОМУ МОДЕМУ «МС-У»

С целью экспериментального исследования целесообразности применения универсального модема на существующих каналах связи, а также практической проверки электронного моделирования как метода реализации функциональных узлов систем связи в научно-исследовательской лаборатории передачи дискретной информации ЛЭИС им. проф. М. А. Бонч-Бруевича был разработан действующий макет универсального модема «МС-У».

Макет универсального модема «МС-У» предназначается для передачи двоичной информации как от нескольких (до шести) независимых источников информации, работающих со скоростями до 200 *дв. ед./сек.* каждый, так и для передачи информации от одного высокоскоростного источника, работающего со скоростью до 2400 *дв. ед./сек.* В качестве основных источников информации выбраны типовые источники, существующие в современных отечественных системах передачи дискретной информации, передающих информацию по стандартному телефонному каналу проводных и радиолиний связи.

Материал четвертой главы работы иллюстрирует теоретические результаты, полученные в первой главе.

Координатными функциями в модеме «МС-У» являются:

— функции с практически неперекрывающимися спектрами;

— функции, неперекрывающиеся по времени;

— ортогональные на интервале посылки гармонические колебания.

Пространство сигналов модема «МС-У» состоит из шести частотно-временных подпространств, формирование которых осуществляется с помощью полосовых частотных фильтров. Внутри каждого частотно-временного подпространства сигналы представляются на интервале рабочей посылки в виде усеченного ряда Фурье. Основные частоты сигналов во всех подпространствах одинаковы и равны 120 гц, что облегчает переход от режима передачи информации от независимых источников к режиму передачи информации от одного высокоскоростного источника.

В настоящее время для передачи дискретной информации принято считать наиболее перспективными частотную и фазоразностную модуляции. Именно этим видам модуляции соответствуют алфавиты сигналов модема «МС-У». При этом для передачи информации от независимых источников используется частотная, однократная и двухкратная фазоразностная модуляция, а для передачи информации от высокоскоростного источника — однократная и двухкратная фазоразностная модуляция. Модем «МС-У» имеет большое число режимов работы, связанных с различными видами источников информации. При изменении скорости работы источников в модеме «МС-У» изменяется алфавит сигналов и осуществляется тем самым обмен пропускной способности на достоверность.

Формирование сигналов в модеме «МС-У» происходит в полном соответствии с изложенным в первой главе теоретическим материалом. Поступающая от источников информация регенерируется и перераспределяется; при этом из приходящей информации выделяются необходимые для работы передатчика импульсы управления. При этом длительность рабочих посылок всегда жестко связана со скоростью работы источников. В передатчике использованы разработанные функциональные узлы, реализованные на основе метода электронного моделирования: генераторы

гармонических колебаний, полосовые частотные фильтры, высокодобротные резонирующие устройства и т. п.

При проектировании универсального модема «МС-У» в качестве основного вида аддитивной помехи выбрана нормально-флуктуационная помеха типа «белого шума». Для таких помех приемник модема «МС-У» позволяет осуществлять обработку сигналов по различным оптимальным методам: когерентному, оптимальному некогерентному, автокорреляционному и т. д.

Использование функциональных узлов в виде электронных моделей позволило предложить новые схемы построения приемников, которые оказались удобными не только в универсальном модеме, но и в специализированных модемах систем передачи дискретной информации. Так, например, в универсальном модеме «МС-У» полосовые фильтры передатчика и приемника совершенно одинаковые, так как в приемнике используется фильтрующая способность коммутируемых согласованных фильтров; в приемник введена автоматическая регулировка усиления, позволяющая увеличить динамический диапазон приемника и т. д.

При испытаниях современных модемов систем передачи дискретной информации принято проводить экспериментальное исследование достоверности передаваемой информации при воздействии на сигнал аддитивного «белого шума». Результаты подобного эксперимента позволяют сравнить разработанный модем с идеальным, характеристики которого по вероятности ошибки получены в теории передачи дискретной информации.

В диссертационной работе приведены результаты соответствующих испытаний модема «МС-У» в основных режимах работы. Полученные результаты по вероятностям ошибок хорошо совпадают с теоретическими; проигрыш модема «МС-У» идеальным модемам по отношению удельной энергии сигнала к спектральной интенсивности помехи сравнительно невелик (менее 1 дБ при вероятностях ошибок $10^{-2} \div 10^{-4}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы следующие.

1. Разработаны общие теоретические основы построения

ния универсальных модемов систем передачи дискретной информации.

2. Предложен критерий «согласованности» сигналов модема с линейным каналом связи и получены необходимые условия, которым должны удовлетворять сигналы модема, согласованные с характеристиками такого канала.

3. Предложен регулярный метод построения модулирующих устройств модемов систем передачи дискретной информации по заданному манипуляционному коду.

4. Разработаны основы метода реализации функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры, базирующегося на принципах аналоговой электронно-вычислительной техники.

5. Определен комплекс основных технических требований, предъявляемых к операционному усилителю, используемому при реализации линейных радиотехнических цепей в виде электронных моделей.

6. На основе метода электронного моделирования реализованы и экспериментально исследованы основные функциональные узлы модемов систем передачи дискретной информации: коммутируемый согласованный фильтр, частотные фильтры, генератор гармонических колебаний и т. д.

7. Предложены новые блок-схемы построения модемов, основанные на использовании разработанных функциональных узлов в виде электронных моделей.

8. С целью экспериментального исследования предложенных принципов построения универсальных модемов разработан и испытан лабораторный макет универсального модема «МС-У».

9. Разработанные схемы функциональных узлов в виде электронных моделей внедряются на ряде предприятий радиопромышленности и связи.

По материалам диссертационной работы автором (частично в соавторстве) опубликованы следующие работы:

1. Активный фильтр для многоканальных систем связи с ОФМ. В информационном сборнике «Фазовая телеграфия», Связь, 1967.

2. Кинематический фильтр в виде электронной модели. Материалы юбилейной научно-технической конференции ЛЭИС, вып. 1, 1967.

3. Управляемый генератор гармонических колебаний. Материалы научно-технической конференции ЛЭИС, вып. 1, 1968.

4. Электронное моделирование в приложении к реализации линейных радиотехнических цепей.— «Радиотехника», т. 24, 1969, № 1.

5. Теоретические основы построения универсальной системы связи.— «Электросвязь», 1969, № 5.

6. Пассивный фильтр в виде электронной модели. В кн. А. М. Заездного и др. «Фазоразностная модуляция», Связь, 1967, § 3.4.

Основные результаты диссертационной работы докладывались:

— на научно-технических конференциях ЛЭИС 1967—1969 гг.;

— на ленинградском семинаре по теории электрических цепей в феврале 1968 г.;

— на московском семинаре по теории радиотехнических цепей в марте 1968 г.;

— на всесоюзной конференции «Прикладная теория информации» в МВТУ им. Н. Э. Баумана в апреле 1969 г.