

КАРПЕНКО ЛЕОНИД ВЛАДИМИРОВИЧ

**УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ПЕРЕМЕННОЙ
СКОРОСТЬЮ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.05. – «Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Автор: _____

Москва – 2007 г.

Диссертация выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете)

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
НЕМЧИНОВ Валерий Михайлович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ДОМРАЧЕВ Вилен Григорьевич.

кандидат технических наук
СИРОТКИН Александр Петрович.

Ведущая организация: ФГУП «Научно-исследовательский институт
импульсной техники» (**НИИИТ**).

Защита состоится 23 апреля 2007г. в 16-30 на заседании диссертационного
совета Д212.130.02 при Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете) по адресу: 115409, г. Москва, ул. Каширское шоссе,
д.31. (тел 323-91-67).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу:
115409, г. Москва, ул. Каширское шоссе, д.31, Ученый совет МИФИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан «___» марта 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

_____ Петров Г.В.

Актуальность

В диссертации рассматриваются устройства передачи данных, используемые для организации систем управления (СУ) магистральными нефте-, газопроводами, железными дорогами и т.п. Будем называть рассматриваемые СУ распределенными или технологическими. Рассматриваемые системы передачи данных (СПД) содержат в своем составе модули передачи данных по кабельным линиям на расстояния от 3 до 40 км. Рассматриваются симметричные СПД с одинаковыми скоростями в направлениях приема и передачи данных. Они относятся к классу плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ) по классификации международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

Большинство используемых СПД для СУ было разработано более двадцати лет назад. В настоящее время срок их эксплуатации заканчивается. Кроме того, эти СПД, использующие аналоговые технологии передачи, морально устарели - за последние годы были разработаны новые цифровые технологии, позволяющие упростить эксплуатацию СУ и повысить качество передачи данных. Заметим, что состояние большинства проложенных линейных кабелей является удовлетворительным, а построение новых оптоволоконных или радиорелейных линий экономически не оправдано в большинстве случаев.

Для замены существующих СПД для СУ, в основном, предлагаются модернизированные системы устаревшего, аналогового типа. Такие системы рассчитаны на передачу данных с одной скоростью. Это затрудняет их использование на кабельных участках увеличенной протяженности или на кабелях с плохими характеристиками. При использовании таких кабелей соотношение сигнал / шум на входе приемника становится меньше допустимого. Это приводит к превышению максимально допустимого уровня ошибок в линии. На высоких частотах наблюдается наибольшее затухание в кабеле. Поэтому при ограниченной мощности передатчика для увеличения соотношения сигнал / шум следует уменьшить полосу передаваемого сигнала, убрав из нее наиболее высокочастотную часть. Для такого уменьшения полосы необходимо снизить скорость передачи данных. С появлением цифровых технологий передачи данных адаптивное изменение скорости в соответствии с параметрами используемого кабеля обеспечивается штатными функциями микросхем приемопередатчиков.

В настоящее время разрабатываются модули СПД для СУ на основе микросхем цифровой абонентской линии (англ. digital subscriber line, xDSL). Эти интегральные

микросхемы (ИС) используют современные цифровые технологии передачи и делают возможным построение систем передачи данных с переменной скоростью (СПДПС), передающих данные на скоростях от 208 до 11016 кбит/с. К сожалению, микросхемы xDSL разрабатываются только зарубежными компаниями для организации небольших СПДПС, содержащих до восьми регенераторов. При использовании этих ИС в модулях систем, состоящих из десятков регенераторов, возникают проблемы. **Основной из них является возникновение и усиление фазовых искажений сигналов синхронизации** в каждом модуле СПД. Большие фазовые искажения синхросигналов, в свою очередь, приводят к ошибкам передачи данных, а в худшем случае – к продолжительным перерывам связи, что является неприемлемым для СУ. Для подавления фазовых искажений в модулях СПД требуется использование специальных фильтров. В качестве этих фильтров используются блоки фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которые также выполняют функцию преобразования частот. Задача построения преобразователей частоты (ПрЧ) на основе ФАПЧ является одной из самых сложных для разработчика СПД. Наряду с существованием большого количества теоретической литературы по ФАПЧ, отсутствуют практические методики по проектированию подобных преобразователей.

В диссертации особое внимание уделяется построению блоков ПрЧ. Предлагается **пошаговая методика расчета цифровых ПрЧ** для рассматриваемого класса устройств.

Интерфейсные и xDSL микросхемы часто не снабжаются всеми функциями, необходимыми для построения модулей СПДПС для СУ. Поэтому первостепенное значение приобретает возможность быстрой модернизации решений. Оно дополняется требованиями разных заказчиков, каждому из которых требуется введение специфических функций. Приведенные требования обуславливают необходимость разработки методики проектирования модулей СПДПС, содержащей проверенные универсальные решения ряда задач, возникающих при разработке.

В диссертации предлагается **методика построения модулей СПД** для СУ. Предлагаемая методика рассматривает построение устройств, имеющих несколько разнородных сетевых интерфейсов, работающих на **разных скоростях передачи данных**. Методика предполагает использование программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) в качестве центрального элемента модуля СПД. В ней описываются архитектура типового устройства, основные унифицированные блоки ПЛИС, необходимые для передачи (коммутации) данных, а также подсистема

синхронизации. Применение методики удобно в силу **модульности** и **возможности адаптации** проекта под новые интерфейсные ИС.

В настоящее время приведенные в диссертации методики успешно применяются при разработке серийных СПДПС для СУ. Термин СПДПС в диссертации трактуется двояко: во-первых, рассматриваемые модули имеют возможность адаптивного изменения линейной скорости передачи, а, во-вторых, скорость каждого интерфейса также может настраиваться для обеспечения максимальной совместимости с различными интерфейсными микросхемами.

Цель диссертации

Целью диссертации является разработка методики построения типовых модулей СПДПС и создание методики проектирования цифровых ПрЧ для этих модулей.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- Определение основных параметров модуля СПДПС.
- Классификация и анализ существующих подходов к построению СПДПС.
- Изучение принципов передачи сигналов синхронизации в СПД классов ПЦИ и СЦИ (системы синхронной цифровой иерархии по классификации МСЭ-Т, в основном, класс оптоволоконных систем, англ. SDH).
- Разработка методики построения типового модуля СПДПС.
- Выделение основных параметров ПрЧ для модуля СПДПС.
- Анализ теоретических данных по системам ФАПЧ, составляющим ее блокам, выбор и адаптация необходимых алгоритмов расчета.
- Реализация на основе ПЛИС нескольких управляемых цифровых синтезаторов частоты, цифровых фильтров и фазовых детекторов, входящих в состав ПрЧ, выбор наиболее эффективной реализации ПрЧ.
- Разработка алгоритма выбора типа ПрЧ и синтезаторов частоты.
- Разработка методики проектирования ПрЧ на ПЛИС для СПД.
- Реализация модуля СПДПС на основе разработанных методик.
- Тестирование реализованной СПДПС.

Научная новизна исследования

- **Разработана и апробирована методика проектирования цифровых преобразователей частоты на ПЛИС.** Она позволяет по заданным параметрам проектировать ПрЧ для различных модулей СУ. При помощи разработанной методики возможно проектирование ПрЧ с малыми частотами среза и переключаемыми диапазонами подстройки. В последнее время были опубликованы несколько описаний реализаций цифровых ФАПЧ. Однако ни одна из них не может быть использована в качестве перестраиваемого ПрЧ в системах передачи данных.
- **Предложена схема для предварительного определения АЧХ цифрового ПрЧ на этапе моделирования его работы.** Она позволяет рассчитывать АЧХ цифровых ПрЧ любого типа, реализованных в ПЛИС на этапе моделирования. Рассчитанная АЧХ хорошо согласуется с экспериментальными данными и позволяет предварительно оценить характеристики разработанного ПрЧ. Ранее определение АЧХ ПрЧ было возможно только путем экспериментального исследования, для которого требовалось наличие сложного стенда. Использование этого стенда, в свою очередь, было связано с большими финансовыми и временными затратами.
- **Разработана и обоснована методика построения модулей СПДПС с несколькими разнородными сетевыми интерфейсами.** Известно несколько открытых архитектур построения модулей СПДПС с одинаковыми сетевыми интерфейсами, работающими на одной скорости. При этом задача построения модулей с интерфейсами разных типов не стандартизована, а открытые методики и архитектуры отсутствуют. Автором предлагается гибкая методика построения модулей СПД с сетевыми интерфейсами разных типов, работающими на разных скоростях.

Практическая значимость результатов диссертации

В диссертации приводятся практические рекомендации для построения модулей СПДПС класса ПЦИ. При использовании этих рекомендаций задача разработки новых модулей может быть решена в значительно более сжатые сроки, а полученные СПД с большой вероятностью будут качественными и расширяемыми.

В результате использования приведенных в диссертации данных были разработаны СПДПС Орион-2 и Megatrans-4 производства НТЦ Натекс. Были

реализованы 3 базовых устройства системы Megatrans-4: модуль сетевого окончания и 2 линейных регенератора. Все модули успешно прошли сертификационные испытания, было налажено серийное производство. Суммарный объем выпущенных изделий к концу 2006 года составил 1000 штук. Произведенные системы успешно эксплуатируются как в составе небольших СУ, так и на объектах Российских железных Дорог, ОАО «Транснефть» и др. Имеется 3 акта о внедрении, сертификат и протоколы испытаний.

Пользуясь приведенными в диссертации данными можно провести анализ уже разработанных систем, повысить качество их работы и устранить функциональные дефекты, связанные с подсистемой синхронизации.

Рассмотренные в диссертации блоки ПрЧ могут найти применение при проектировании следующих элементов СУ:

- Контроллеров телемеханики.
- Конвертеров интерфейсов.
- Систем передачи синхронных потоков через Ethernet/IP сети.
- Систем кросс-коммутации синхронных потоков.
- Систем служебной связи.
- Гибких мультиплексоров.
- Систем восстановления качества синхросигнала.

На защиту выносятся следующие положения

- Методика построения цифровых преобразователей частоты на базе ПЛИС.
- Схема для определения АЧХ цифрового ПрЧ на этапе моделирования работы ПЛИС.
- Методика построения модулей СПДПС класса ПЦИ.
- Реализация модулей СПДПС Megatrans-4.

Апробация диссертации

В опубликованных автором статьях были изложены: методика расчета ПрЧ, методика построения СПДПС, а также требования по качеству сигналов синхронизации к оборудованию класса СЦИ и пути достижения этого качества с использованием оборудования класса ПЦИ, снабженного специализированными ФАПЧ. В докладах, сделанных на трех научных конференциях, рассматривались и обсуждались схемотехника устройств СПДПС и методы измерения фазовых искажений сигналов синхронизации.

Публикации

По теме опубликовано три печатных работы и сделано три доклада на научной сессии и конференции МИФИ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Она содержит 134 страницы печатного текста, в том числе 65 рисунков и библиографию, включающую 70 наименований.

Основное содержание диссертации

Как видно на рис. 1, СПДПС, входящая в СУ, содержит следующее оборудование передачи данных по кабельным линиям связи (DSL, англ. digital subscriber loop).

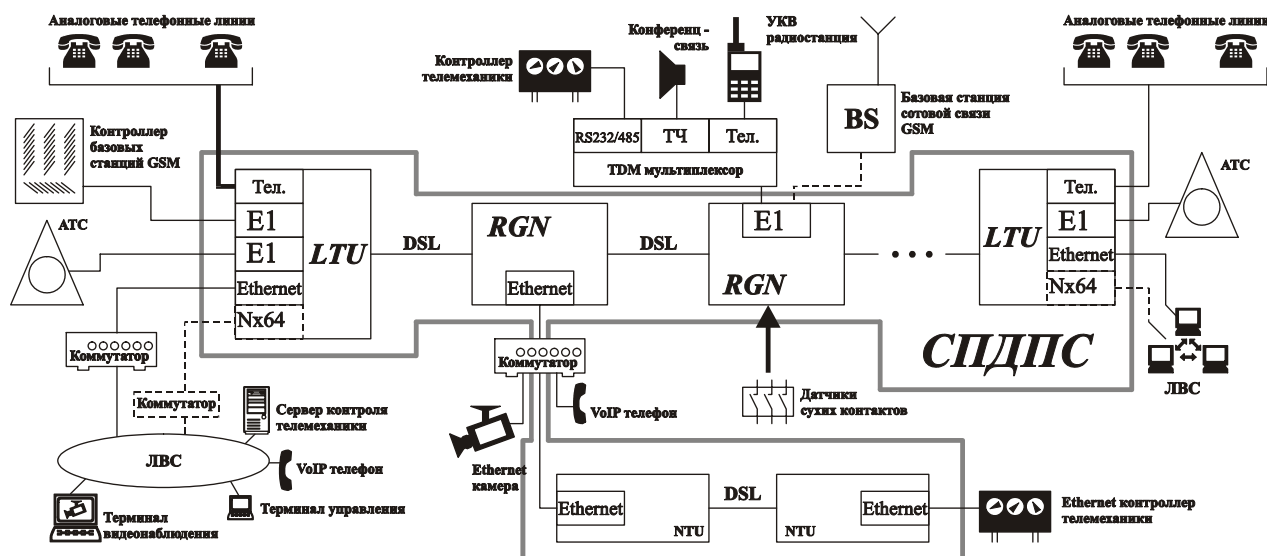


Рис. 1. Типовые применения СПДПС в составе распределенных СУ

- Модули линейных окончаний (LTU, англ. line termination unit), которые устанавливаются в узловых пунктах управления. К LTU подключается различное оборудование обработки данных (ATC, сетевые коммутаторы, телефонные аппараты и т.п.).
- Модули линейных регенераторов (RGN), которые предназначены для восстановления линейного сигнала. Они устанавливаются в необслуживаемых усилительных пунктах. Регенераторы снабжаются различными интерфейсами для подключения внешнего оборудования и датчиков.

- Модули сетевых окончаний (NTU, англ. network termination unit). Они имеют функции, сходные с RGN, но устанавливаются в обслуживаемых пунктах управления.

Основной задачей СПД для распределенных СУ, является обеспечение связи между устройствами съема информации, совмещенными с исполнительными механизмами (контроллерами телемеханики), и пунктами управления. Рассматриваемые СПД обычно также используются и для организации служебной связи различных видов. Кроме того, их пропускной способности часто бывает достаточно для связи ведомственных АТС, расположенных на соседних узловых пунктах. В последнее время усиливается интерес к IP/Ethernet/Internet приложениям, включающим в себя организацию видеоконференций, электронную почту, корпоративные электронные системы управления, охранные системы и т.д. Поэтому требования к современной СПД включают в себя необходимость передачи данных по протоколам Ethernet.

На основе анализа элементов существующих модулей СПД и их архитектур **разработана методика построения модулей СПДПС**. Эта методика содержит собственную архитектуру типового модуля и универсальные реализации блоков синхронизации и коммутации данных.

Современный модуль синхронной системы передачи данных по медным линиям – это цифровая система, имеющая следующие интерфейсы (табл. 1).

Таблица 1

Распространенные интерфейсы СПД

Класс	Описание	Технология передачи
xDSL (DSL)	Линейные интерфейсы передачи по проводной линии. Обеспечивают помехоустойчивую передачу данных по одной или двум кабельным парам на значительные расстояния.	Симметричные СПД (равные скорости приема и передачи): HDSL, SDSL, MSDSL, G.SHDSL
		Асимметричные СПД (не равные скорости приема и передачи, в диссертации не рассматриваются): ADSL, VDSL.
Сетевые интерфейсы	Интерфейсы для подключения внешнего ООД (например, технологического оборудования СУ, АТС, маршрутизаторов, базовых станций GSM и др.)	E1 (МСЭ-Т G.703) – наиболее распространенный синхронный интерфейс 2048 кбит/с. Кодирование HDB3, 2 витые пары.
		Nx64 (МСЭ-Т V.10, V.11, V.28, V.35, V36) – синхронный интерфейс $N * 64$ кбит/с, где $N = 1, 2, \dots, 64$. 2 линии данных, 3 линии синхронизации, 5 линий управления. Вытесняется интерфейсами Ethernet.
		Ethernet (IEEE 802.3x) асинхронный 10/100 Мбит/с. 2 витые пары.

Основными узлами модуля СПДПС являются:

- Линейные xDSL интерфейсы передачи по проводной линии.
- Сетевые интерфейсы для подключения внешнего оборудования обработки данных (ООД).

- Управляющий микроконтроллер (МК).
- Внутренняя транспортная подсистема, обеспечивающая передачу данных между линейными и сетевыми интерфейсами.

Под синхронной СПД, в рамках диссертации, понимается система, у которой средние значения частот следования данных (синхронизации), поступающей на вход приемника, и синхронизации на выходе передатчика точно совпадают. Модули СПД могут быть снабжены несколькими сетевыми интерфейсами. Часто требуется использование нескольких интерфейсов одного типа, например, двух E1.

На настоящий момент существует две стандартные архитектуры построения модулей СПД. Первая состоит в непосредственном подключении к МК всех интерфейсных ИС посредством встроенных в МК контроллеров. При этом все задачи передачи данных из одной интерфейсной шины в другую выполняются самим МК. Вторая стандартная архитектура базируется на использовании единой общей последовательной шины с временным разделением каналов (PCM шины), к которой подключаются все интерфейсные ИС. В соответствии с индивидуальными настройками каждая интерфейсная ИС передает и принимает данные из общей шины в необходимые моменты времени. Данная архитектура является базовой для построения синхронных систем передачи. МК в данной системе не занимает центрального места (в смысле коммутации данных), однако также может подключаться к единой шине и выступать в качестве интерфейсного блока. Преимущества и недостатки приведенных архитектур приведены в табл. 2.

Таблица 2

Преимущества и недостатки стандартных архитектур модулей СПД

Архитектура	Преимущества	Недостатки
Центральный элемент - МК	Хорошо подходит для асимметричных СПД с одним или несколькими интерфейсами.	Несовместимость с большим количеством интерфейсных ИС.
		Слабые возможности построения симметричных синхронных СПД.
	Минимальный размер и стоимость системы. Широко используются в качестве оконечных абонентских устройств для домашнего применения.	Отсутствие возможностей по наращиванию интерфейсных функций и протоколов физического уровня.
	Простота системы.	Возможности строго ограничены количеством и типом встроенных в МК интерфейсов.
Общая PCM шина	Возможность создания больших многоканальных систем на базе ИС одного типа.	Частичная или полная несовместимость с большим количеством интерфейсных ИС.
		Слабые возможности модернизации.
	Наличие стандартов и рекомендаций по реализации от производителей.	Сложность построения перестраиваемой системы синхронизации от нескольких источников. Невозможность использования ИС, не предусматривающих подключение к единой шине.

Предлагаемая архитектура модуля СПД позволяет сохранить преимущества стандартных архитектур и свести к минимуму присущие им недостатки. Методика

построения модулей СПД предполагает использование собственной архитектуры на базе центральной коммутирующей ПЛИС (рис. 2), а также унифицированных реализаций блоков ПЛИС.

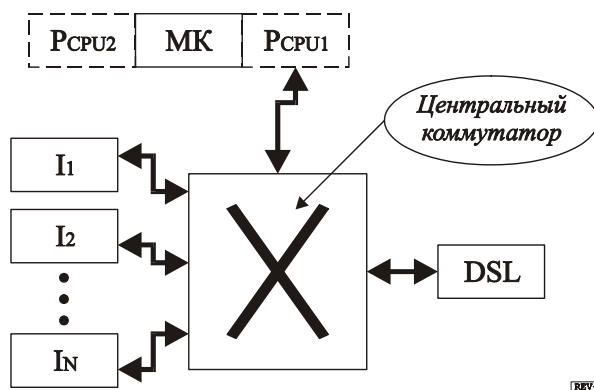


Рис. 2. Архитектура центральной коммутирующей ИС

В ПЛИС интерфейсные блоки подключаются к единой шине, однако для каждого блока реализуется так называемый «аппаратный контроллер», исключающий несовместимость интерфейсных блоков между собой. Реализуется комбинация архитектур «центрального МК» и «общей шины».

МК настраивает ПЛИС на необходимый режим работы, а также осуществляет контроль параметров ее работы через блок управления. Кроме блока управления в ПЛИС реализуются блоки приемника и передатчика (рис. 3).

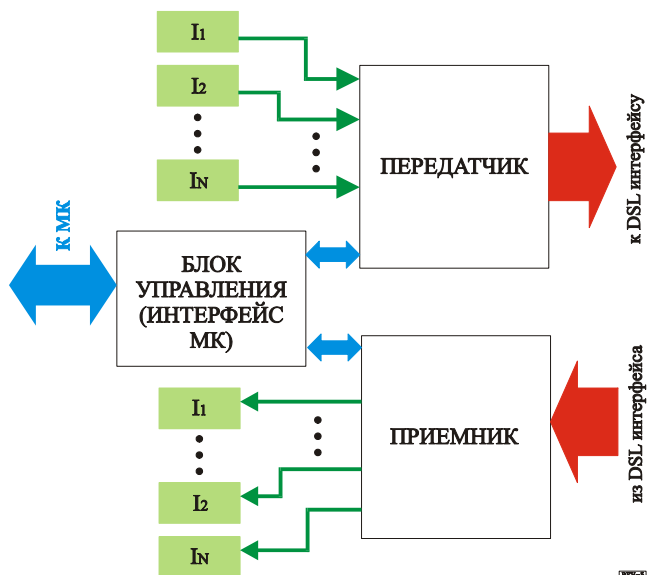


Рис. 3. Структурная схема ПЛИС модуля СПДПС

Блок передатчика (рис. 4) передает данные от сетевых интерфейсов к DSL интерфейсу.

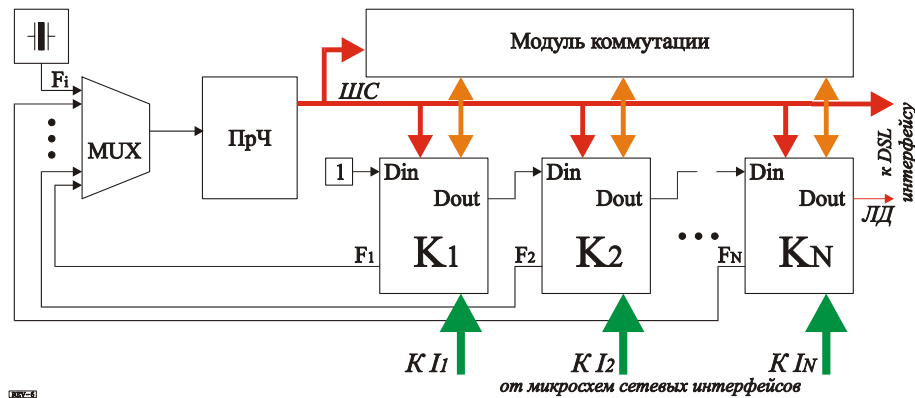


Рис. 4. Структурная схема блока передачи данных в DSL линию

В нем используется PCM шина, которая состоит из шины синхронизации (ШС) и линии данных (ЛД). Передатчики контроллеров интерфейсов (ПКИ) $K_1 - K_N$ подключаются к ШС и соединяются друг за другом в разрыв ЛД. ПКИ предназначены для приема данных от ООД, их передачи во внутреннюю PCM шину, а также для выделения синхронизации F_i из входного сигнала.

На вход преобразователя частоты подается сигнал синхронизации с одного из ПКИ или внутреннего генератора. Интерфейс, с которого снимается сигнал синхронизации, является, таким образом, источником синхронизации для всей передающей части модуля. ПрЧ преобразует частоту источника синхронизации в частоту, необходимую для работы линейного DSL интерфейса. Модуль коммутации предназначен для выдачи сигналов разрешения передачи данных на ПКИ (K_i). Разработана обобщенная структурная схема K_i , содержащая память FIFO и интерфейс управления.

Блок приемника (рис. 5) предназначен для передачи данных из DSL интерфейса в сетевые интерфейсы.

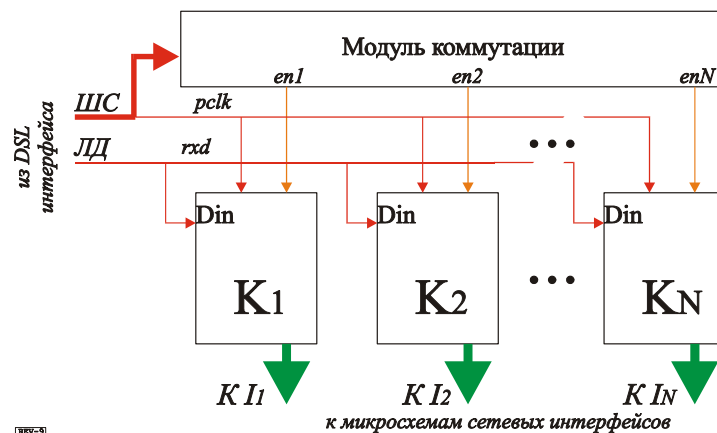


Рис. 5. Структурная схема блока приема данных из DSL линии

Он, также как и блок передатчика, построен на основе общей PCM шины. Все приемники контроллеров интерфейсов (ПрКИ) K_1-K_N параллельно подключаются к

ШС и к ЛД. ПрКИ предназначены для приема данных из РСМ шины, подключенной к выходу DSL интерфейса и передачи полученных данных в интерфейсную ИС на скорости, отличной от скорости РСМ шины. Разработана обобщенная структурная схема ПрКИ, содержащая ПрЧ, FIFO и интерфейс управления.

Итак, ПрЧ используются для преобразования частот синхронизации интерфейсов, работающих на разных тактовых частотах. Помимо преобразования частот ПрЧ выполняют еще одну важную функцию - подавление фазовых искажений. **Ниже кратко рассматриваются теоретические аспекты работы блоков ПрЧ.**

Используют 2 характеристики фазовых искажений: *jitter - фазовое дрожание* с частотой более 10 Гц и *wander – фазовое блуждание* с частотой менее 10 Гц. На рис. 6 показан вид сигнала с фазовым дрожанием. Пиковый jitter определяется как максимальное отклонение показательных участков сигнала от их идеального положения во времени $J = \frac{\Delta T}{T_0}$.

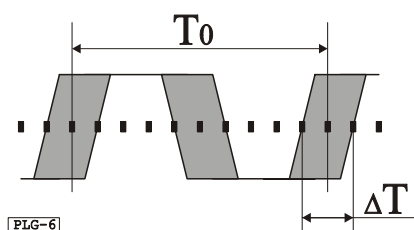


Рис. 6. Осциллограмма сигнала с наличием фазового дрожания

Цифровые синхронные схемы характеризуются минимальным (или инструментальным) фазовым дрожанием, связанным с квантованием выходного сигнала тактовым синхросигналом F_{mclk} .

$$J_{\min} = \frac{T_{mclk}}{T_n} = \frac{F_n}{F_{mclk}}.$$

На рис. 7 приведена схема системы ФАПЧ в режиме ПрЧ. Она содержит фазовый детектор (ФД), управляемый генератор (УГ) и фильтр (Ф), который в ряде случаев может отсутствовать. ПрЧ преобразует частоту входного сигнала к виду:

$$F_{out} = F_{in} \cdot \frac{gen}{ref}.$$

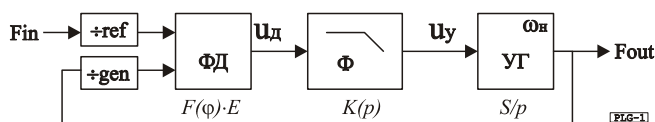


Рис. 7. Структурная схема классической ФАПЧ

В модулях СПД необходимо контролировать следующие характеристики блоков ПрЧ: полосы удержания и захвата, передаточную функцию и уровень вносимых фазовых искажений. Расчет необходимых характеристик выполнен с

использованием основных положений теории систем ФАПЧ и теории автоматического управления. Дифференциальное уравнение ФАПЧ без делителей на входе ФД с фильтром нижних частот первого порядка записывается в виде:

$T \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = \Delta \omega_H - SEF(\varphi)$, где $\Delta \omega_H = (\omega_H - \omega_{in})$ – начальная расстройка частоты ω_H УГ относительно частоты задающего генератора ω_{in} , T – постоянная времени ФНЧ, E – максимальное напряжение на выходе ФД, $F(\varphi)$ – нормированная к единице характеристика ФД, а $S = \frac{\Delta \omega_{out}}{\Delta u_y}$ (отношение приращения выходной частоты $\Delta \omega_{out}$ к

приращению управляющего напряжения на входе УГ Δu_r) – крутизна управления УГ. Максимальная допустимая начальная расстройка ФАПЧ определяется выражением: $\Delta \omega_{Hmax} = ES$. При $\Delta \omega_H < ES$ наблюдается режим захвата, характеризующийся равенством частот F_{out} и F_{in} .

Полоса удержания вычисляется как разница между максимальной и минимальной частотами УГ, при которой еще наблюдается режим захвата: $2\Omega_{y0} = (\omega_0 + \Delta \omega_{Hmax}) - (\omega_0 - \Delta \omega_{Hmax}) = 2 \cdot \Delta \omega_{Hmax} = 2SE$. Приняв во внимание наличие в составе ФАПЧ делителей ($\div ref$) и ($\div gen$), получим формулу для определения полосы удержания:

$$\Omega_{y0} = SE \cdot \frac{ref}{gen}. \quad (1)$$

Для определения **полосы захвата** Ω_z необходимо найти бифуркационное значение нормированной начальной расстройки γ_z , которое свяжет искомое значение с полосой удержания: $\gamma_z = \frac{\Omega_z}{\Omega_y}$. Для этого в диссертации используется метод фазовой плоскости. Автором был реализован модернизированный, по сравнению со стандартным, алгоритм нахождения γ_z на Matlab. Проведенные для исследуемых ПрЧ расчеты показывают, что при $\alpha \geq 1$, где $\alpha = 1/\sqrt{\Omega_{y0}T}$ (коэффициент фильтра), нормированная полоса захвата γ_z равна единице с точностью шага математического моделирования. Следовательно, при выполнении этого условия полосу захвата можно практически считать равной полосе удержания.

Передаточная функция системы ФАПЧ с фильтром нижних частот 1-го порядка равна:

$$K_{\varphi n}(p) = \frac{gen / ref}{p^2 \frac{T}{S_D \cdot E \cdot S_{y_{ГМ}}} + p \frac{1}{S_D \cdot E \cdot S_{y_{ГМ}}} + 1}, \quad (2)$$

где $S_{y_{ГМ}} = \frac{S}{gen}$, а S_D – крутизна характеристики ФД. АЧХ дает ценные сведения о коэффициентах усиления фазовых искажений системой ФАПЧ. Для СПД не допускается усиление фазовых искажений большее 1,02 (+0,2 дБ). Существование большего усиления в системах с последовательным включением нескольких модулей может повлечь за собой существенное усиление искажений фазы, а в некоторых случаях привести к срывам синхронизации. С уменьшением частоты среза F_c ФНЧ (при неизменности остальных параметров блоков ФАПЧ) в АЧХ ФАПЧ (рис. 8) начинают появляться выбросы больше допустимого максимального значения.

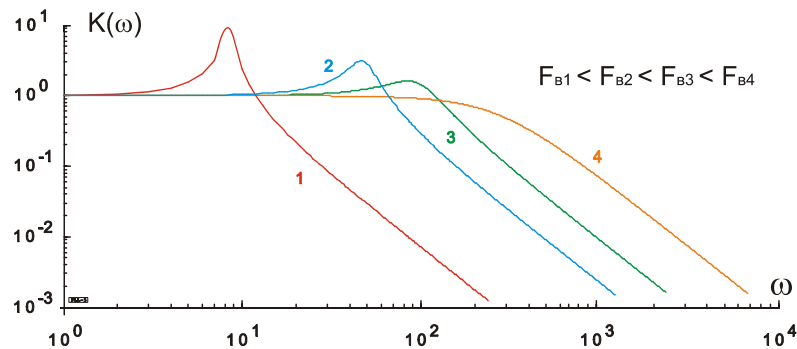


Рис. 8. АЧХ ФАПЧ при разных частотах среза фильтра: $F_{в1} < F_{в2} < F_{в3} < F_{в4}$

Из теории автоматического управления следует, что отсутствие выбросов, больших единицы, в АЧХ описанной системы возможно только в случае, если: $S_D \cdot E \cdot S_{y_{ГМ}} \cdot T \leq 1/2$. Подставив в это уравнение коэффициент фильтра α , получим $\alpha \geq \sqrt{2}$. Данное неравенство удовлетворяет приведенному выше условию равенства полосы захвата и удержания. Сформулируем следующий важный вывод: если в АЧХ рассматриваемого типа ФАПЧ отсутствуют выбросы, большие единицы, то полосу захвата можно считать практически равной полосе удержания.

Реализация ПрЧ для модуля СПДПС в практической части работы сводилась к выбору типа ПрЧ, выбору реализаций входящих в него элементов, расчету и проверке параметров полученного преобразователя.

Для выбора между аналоговой и цифровой реализациями ПрЧ были рассмотрены преимущества и недостатки систем обоих типов (табл. 3).

Таблица 3

Преимущества и недостатки аналоговых ФАПЧ при построении кабельных СПД

Преимущества аналоговых ФАПЧ	Недостатки аналоговых ФАПЧ
Минимально возможный jitter на выходе (единицы ps)	Отсутствие гибкости системы. При возникновении потребности во включении дополнительной ФАПЧ требуется перетрассировка печатной платы (ПП)
Возможность умножения входного сигнала до частот, больших частоты тактирования синхронных схем. Максимальная выходная частота $>6\text{ ГГц}$	Отсутствие возможностями управления параметрами внутреннего ФНЧ. Невозможность захвата синхронизации входного сигнала с большим дрожанием фазы
Легкость применения, нет необходимости расчетов и тестирования	Дополнительная цена
	Дополнительное энергопотребление
	Дополнительный источник ЭМИ
	Дополнительное место на ПП

Было показано, что предпочтительным для модулей СПД является использование цифровых ПрЧ, реализованных на ПЛИС.

В полном тексте диссертации описано несколько реализаций элементов цифровых ПрЧ - фильтров и УГ. Рассчитаны их основные характеристики и размер полученных схем при размещении в ПЛИС. Из приведенных реализаций были выбраны лучшие. Была предложена **методика расчета ПрЧ на ПЛИС** (рис. 9). Она сводится к заданию целевых и вспомогательных параметров ПрЧ, расчету каждого элемента и проверке характеристик полученного преобразователя. Если характеристики синтезированного ПрЧ не удовлетворяют целевым, то необходима коррекция вспомогательных параметров и повторение расчета.

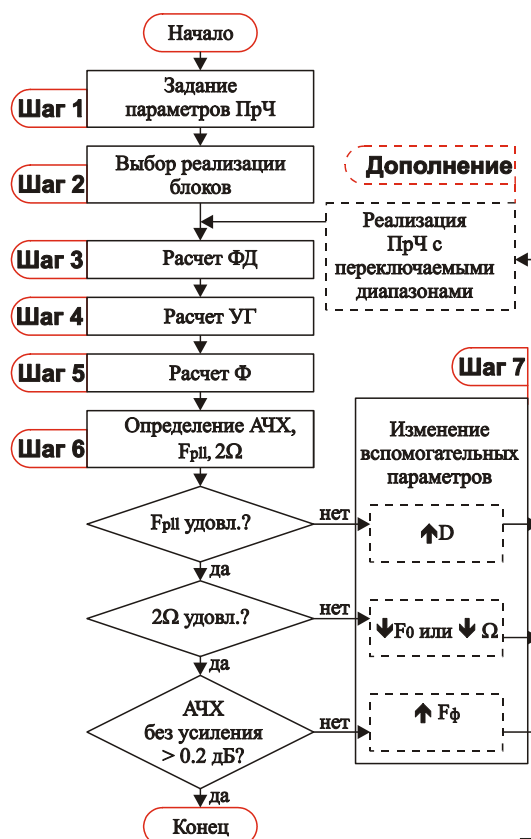


Рис. 9. Методика проектирования ПрЧ

Рассмотрим методику подробнее.

Шаг 1. Зададим следующие параметры проектируемого ПрЧ (табл. 4).

Таблица 4

Параметры проектируемого ПрЧ

Параметр	Ед. изм.	Описание
$\{F_{in}\}$	Гц	Номинальная входная частота или сетка входных частот
$\{F_n\}$	Гц	Номинальная выходная частота или сетка выходных частот
J или F_{mclk}	УП Гц	Предельное неустранимое фазовое дрожание выходного сигнала (инструментальный jitter) Опорная тактовая частота синхронной схемы. Master clock Если задан J , то $F_{mclk} \geq F_{out}/J$
$dF_n M$	ppm	Максимальное относительное отклонение выходной частоты от номинальной
$dF_n L$	ppm	Максимальный относительный шаг перестройки частоты выходного сигнала (шаг перестройки УГ)
F_{pll}	Гц	Максимальная частота среза ФАПЧ
2Ω	Гц	Минимальная полоса удержания (захвата)
В АЧХ преобразователя частоты не должно наблюдаться выбросов, больших 0,2 дБ		
***** Вспомогательные параметры ПрЧ *****		
F_0	Гц	Номинальная частота на входах ФД. Определяется, как НОД(F_{in} и F_n)/ N , где N – целое число.
F_ϕ	Гц	Желаемая частота среза фильтра
2^b		Коэффициент деления делителя на выходе фильтра

Шаг 2. Выберем следующие реализации блоков ПрЧ:

- ФД с предварительными делителями.
- Рекурсивный фильтр 1-го порядка с кратными 2^N коэффициентами.
- Цифровой синтезатор прямого синтеза частот с делителем на входе.

При этом структурная схема ПрЧ будет иметь следующий вид (рис. 10).

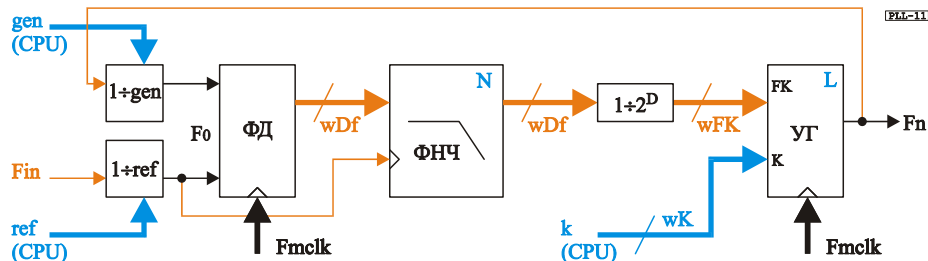


Рис. 10. Структурная схема цифровой ФАПЧ

Шаг 3. Зная номинальную частоту на входах ФД (F_0), частоты на входе и выходе ПрЧ, определим коэффициенты деления делителей, стоящих перед ФД: $gen = F_n/F_0$, $ref = F_{in}/F_0$. Определив максимальные значения коэффициентов деления и выходного значения ФД, рассчитаем разрядности входов gen и ref , а также выхода ФД: $wDf = \text{окр.вверх} \left[\log_2 \left(\frac{F_{mclk}}{F_0} \right) \right] + 1$.

Шаг 4. Найдём максимальный шаг перестройки частоты УГ, зная $dF_n L$:

$$\Delta F_n L = \min(F_n) \cdot dF_n L. \quad \text{Зная формулу определения частоты УГ} \quad F_{out} = \frac{k}{2^L} \cdot F_{mclk},$$

рассчитаем разрядность аккумулятора L , учитывая, что шаг перестройки частоты можно получить из этой же формулы, приняв $k=1$: $\Delta F_n L \geq \frac{F_{mclk}}{2^L}$, отсюда

$L = \text{окр.вверх}(\frac{F_{mclk}}{\Delta F_n L})$. Зная L , рассчитаем числа суммирования $\{k\}$ для заданной сетки

выходных частот $\{F_n\}$: $k = \text{округл}(\frac{2^L \cdot F_n}{F_{mclk}})$, по максимальному из которых определим

разрядность входа wK . Найдем разрядность входа сигнала динамического управления FK (рис. 10): $wFK = wDf - D$.

Шаг 5. Примем частоту дискретизации фильтра равной F_0 . Тогда число N фильтра будет рассчитываться по $N = \text{окр.вверх} \left[\log_2 \left(\frac{F_0}{F_\phi(\text{желаемое}) \cdot \pi} + 1 \right) \right]$. Разрядность элементов задержки фильтра на входе равна разрядности выхода ФД: wDf .

Шаг 6. Полученный ПрЧ соответствует ФАПЧ, описанной выше. Воспользуемся полученными ранее теоретическими результатами.

Передаточная функция ПрЧ определяется (2), а полоса удержания (1),

где $S = \frac{\Delta FL \cdot 2\pi}{2^D} = \frac{F_{mclk} \cdot 2\pi}{2^L \cdot 2^D}$; $S_d = \frac{1}{\pi}$; $S_{УГМ} = \frac{S}{gen}$; $E = \frac{F_{MCLK}}{2 \cdot F_0}$. Период фильтра T

определяется согласно формуле $T = \frac{2^N - 1}{2 \cdot F_0}$,

где N фильтра может быть найдено из условия:

$N = \text{окр.вверх} \left[\log_2 \left(\frac{F_0}{F_\phi(\text{желаемое}) \cdot \pi} + 1 \right) \right]$. После построения АЧХ ПрЧ по

передаточной функции определяется частота среза системы и факт наличия выбросов в АЧХ, больших 0,2 дБ. Если такие выбросы присутствуют, либо частота среза ПрЧ больше заданного значения, то требуется корректировка схемы ПрЧ и проведение повторных расчетов. Как было отмечено выше, после устранения выбросов в АЧХ, полосы удержания и захвата ПрЧ становятся практически одинаковыми.

Шаг 7. Устранение выброса в АЧХ достигается увеличением частоты среза F_ϕ ФНЧ. Однако часто это приводит к синтезу ПрЧ с частотой среза выше заданной F_{pll} . Также устранение выброса в АЧХ достигается увеличением D делителя на входе УГ. При этом уменьшается полоса удержания 2Ω . Если полоса удержания рассчитанного ПрЧ оказалась недостаточной, ее можно увеличить путем уменьшения в целое число раз F_0 - номинальной частоты на входах ФД.

Возможность построения ПрЧ с переключаемыми диапазонами работы. В некоторых модулях СПД необходимо использовать ПрЧ с очень низкой частотой среза ($\sim 10^{-4}$ Гц) и широкой полосой захвата. При этом требуется «быстрый» вход ПрЧ в синхронный режим. Для этого синтезировать ПрЧ по приведенной выше методике невозможно. Данную задачу можно решить путем синтеза ПрЧ с перестраиваемым делителем $1/2^D$ на входе УГ. На первой стадии захвата используется минимальный коэффициент деления D . При этом частота среза ПрЧ достаточно велика, а полоса захвата удовлетворяет необходимым требованиям. После подстройки выходной частоты к входной с некоторой точностью происходит увеличение коэффициента D , при этом частота среза и полоса захвата ПрЧ уменьшаются. Далее происходит более точная подстройка выходной частоты и т.д.

Ограничения методики на проектирование ПрЧ с низкой частотой среза

Приведенная методика подразумевает, что частота генератора F_{mclk} является стабильной. К сожалению, при использовании стандартных генераторов типа СХО (crystal oscillator) наблюдается температурный дрейф выходной частоты с сопутствующими скоростями изменения фазы φ_{mclk} до 300 нс/с. Такой дрейф приводит к невозможности нормальной работы цифровых ПрЧ: схема начинает отслеживать не входной сигнал, а сигнал опорного генератора. Автором было экспериментально установлено, что использование кварцевых генераторов СХО позволяют использовать ПрЧ на ПЛИС с частотами среза до 1Гц. При необходимости использования ПрЧ с более низкими частотами необходимо использовать более стабильные типы генераторов, такие как термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТСХО, англ. temperature compensated crystal oscillator) или термостабилизированные / термостатированные кварцевые генераторы (ОСХО англ. oven controlled crystal oscillator).

На базе приведенной в диссертации методики были **разработаны 3 модуля СПДПС**. Рассмотрим модуль линейного окончания line termination unit (LTU) более подробно. Как видно из его блок-схемы (рис. 11), центральный МК используется для настройки параметров всех интерфейсных ИС. Также МК обрабатывает данные Ethernet и формирует синхронные HDLC (англ. high-level data link control) потоки для передачи нужной части данных Ethernet через линейный или сетевой интерфейсы. В качестве центрального коммутатора данных используется ПЛИС. К ней посредством РСМ шин подключаются ИС сетевых интерфейсов – 2 формирователя E1, chipset xDSL и МК. ПЛИС является коммутатором данных всех сетевых и линейных интерфейсов, а также блоком синхронизации этих интерфейсов.

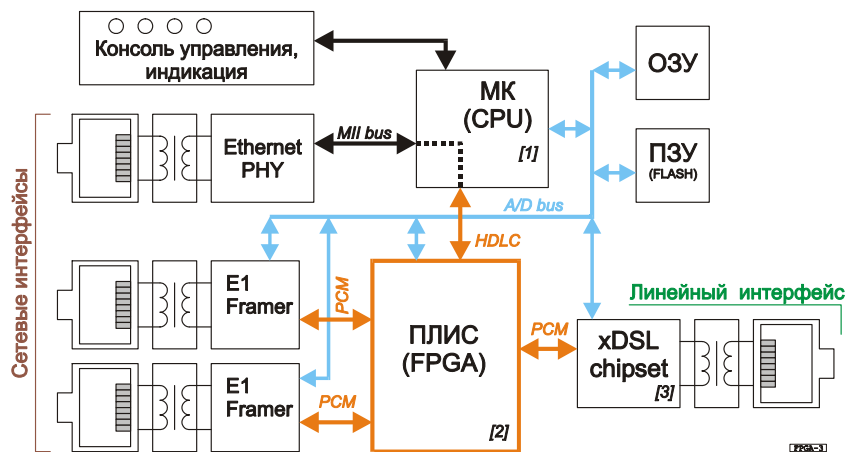


Рис. 11. Архитектура модуля LTU

Код ПЛИС был разработан в соответствии со структурными схемами (рис. 3 – 5) и предложенной методикой. В ПЛИС потребовалась реализация двух ПрЧ. На языке Verilog HDL был создан параметризованный модуль ПрЧ «LPLL». Разрядности шин, объединяющих компоненты этого модуля между собой, а также разрядности выходных портов и некоторых внутренних сигналов были сделаны настраиваемыми. Таким образом, стало возможно быстро изменять его параметры. Был разработан комплект m-файлов для проведения расчета ПрЧ на компьютере с использованием пакета Matlab.

В результате расчета были получены значения параметров модулей LPLL, с необходимыми характеристиками. После расчета было проведено моделирование работы ПрЧ, а также экспериментально проверены характеристики: полоса захвата, фазовое дрожание на выходе ПрЧ при «эталонном» входном сигнале и АЧХ.

Для проверки полосы захвата ПрЧ и измерения фазового дрожания на выходе ПрЧ использовался стенд (рис. 12). Все необходимые измерения и воздействия производились коммуникационным тестером (BER-T) Consultronics PUMA 4300.

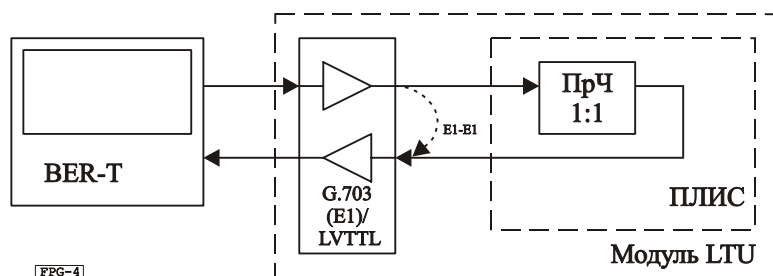


Рис. 12. Структурная схема стенда для проведения комплексных измерений ФАПЧ

В результате испытаний LTU были получены результаты, приведенные в табл. 5 и табл. 6.

Таблица 5

Результаты тестирования полосы захвата ПрЧ LTU

Испытуемая система	Fmin, Гц	Fmax, Гц	Описание
Требования рекомендации G.703	2047897	2048103	Согласно рекомендации МСЭ-Т G.703.
Система Е1-Е1 (оценка фазового дрожания, вносимого приемопередатчиками LVTTL→G.703 без включения ПрЧ)	не удается определить используемым BER-T	не удается определить используемым BER-T	Разрешается использовать в составе оборудования G.703. Система захватывает частоту входного сигнала при отклонениях его частоты более ± 10000 ppm
Система Е1-ПрЧ – Е1	2047860	2048163	Разрешается использовать в составе оборудования G.703.

Таблица 6

Генерация фазового дрожания блоками LTU

Испытуемая система	J, ЕИ	Описание
Предельное значение	0,15	Согласно стандарту МСЭ-Т G.823
Система Е1-Е1	0,059	Удовлетворяет требованиям синхронизации стандарта передачи ПЦИ G.823
Система Е1-ПрЧ – Е1	0,082	

На рис. 13 приведена структурная схема стенда для измерения АЧХ ПрЧ.

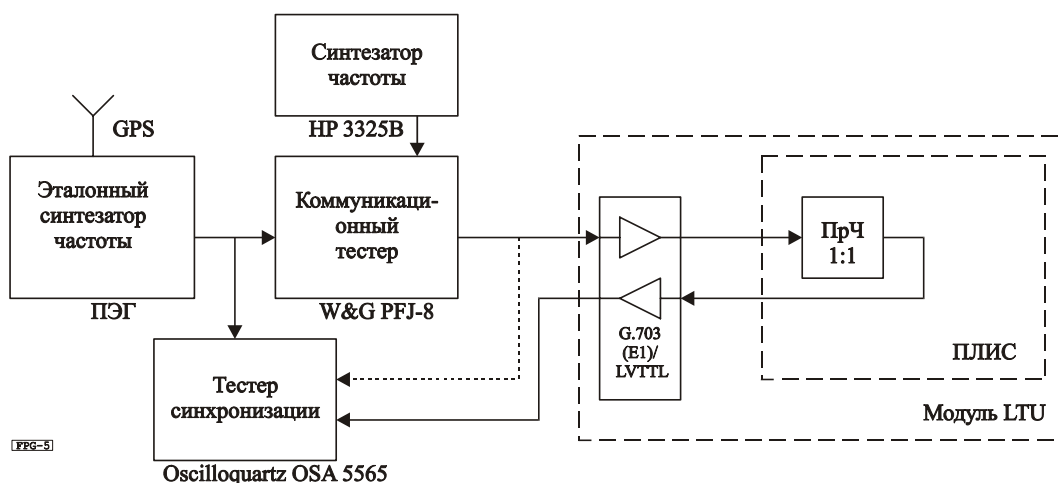


Рис. 13. Структурная схема стенда для измерения АЧХ ПрЧ

Первичный эталонный генератор (ПЭГ), использующий сигналы глобального позиционирования (GPS), генерировал высокостабильный опорный «эталонный» сигнал. Фаза этого сигнала в коммуникационном тестере W&G PFJ-8 модулировалась синусоидальными колебаниями, поступающими от синтезатора частоты HP3325B. Сигнал с выхода PFJ-8 поступал на тестируемую систему, а также на прецизионный тестер синхронизации Oscilloquartz OSA 5565. Пройдя через тестируемую систему, сигнал синхронизации также поступал на OSA 5565. Отношения амплитуд фазовых искажений на выходе и входе системы, на разных частотах, задаваемых HP3325B, являлись точками АЧХ системы. Результаты измерений приведены в табл. 7.

Таблица 7

Измеренная АЧХ преобразователя частоты

Частота вводимых фазовых искажений, Гц	0,001	0,01	0,05	0,2	0,7	1	5	10	20	30	40	100
Подавление фазовых искажений, дБ	-0,007	-0,01	0,07	0,38	3,23	5,51	25,9	37,5	49,5	56,5	>60	>60

Испытания на стенде (рис. 13) проводились во внешней лаборатории. Они занимали значительное время и проводились платно. По этим причинам автором была разработана схема (рис. 14) для предварительного определения АЧХ ПрЧ на этапе математического моделирования ПЛИС.

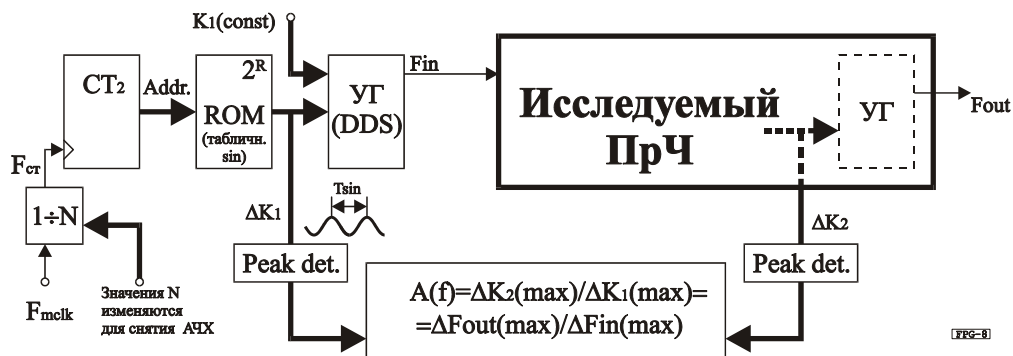


Рис. 14. Испытательная схема математического моделирования для определения АЧХ ПрЧ

Принцип работы схемы состоял в следующем. На исследуемый ПрЧ подавался сигнал F_{in} с синусоидальными фазовыми искажениями. Этот сигнал генерировал УГ типа DDS, на который подавался код центральной частоты K_1 и код синусоидального смещения ΔK_1 . Сигнал ΔK_1 генерировался блоком ПЗУ (ROM), в котором были записаны отсчеты синусоидальной функции. Дрожание сигнала на выходе ПрЧ определялось амплитудой ΔK_2 . Сигналы ΔK_1 и ΔK_2 поступали на пиковые детекторы (Peak det.), которые выделяли амплитуду каждого сигнала. Соотношение амплитуд сигналов ΔK_2 и ΔK_1 (при условии, что используемые УГ в испытательной схеме и ПрЧ одинаковые) давало точку АЧХ на исследуемой частоте вводимых искажений

$$F_{\text{sin}} = \frac{F_{\text{mclk}}}{N \cdot 2^R}.$$

Экспериментальные данные согласуются с результатами математического моделирования АЧХ в пределах погрешности 5%. Полученная погрешность возникла из-за постоянного фазового шума, являющегося следствием инструментального фазового дрожания связанного с квантованием сигнала в ПЛИС и преобразователях Е1, а также из-за температурного дрейфа фазы задающего генератора системы.

Результаты диссертации

Основные теоретические результаты

- Разработана методика построения модулей СПДПС класса плезиохронной цифровой иерархии с несколькими разнородными сетевыми интерфейсами. Эта методика предлагает использование архитектуры на базе центральной коммутирующей ПЛИС, а также унифицированных реализаций блоков ПЛИС. Использование полученных результатов позволяет в несколько раз уменьшить время разработки новых модулей и быстро расширять функциональность уже разработанных изделий.
- Предложена методика расчета цифровых ПрЧ на базе ПЛИС, которая позволяет рассчитывать ПрЧ по заданным характеристикам.

Частный теоретический результат

- Разработана схема для предварительного определения АЧХ цифрового ПрЧ любого типа на этапе моделирования логической схемы ПЛИС.

Основной практический результат

Разработано семейство модулей СПДПС для СУ Megatrans-4: модуль линейного окончания и два модуля линейных регенераторов. В настоящее время **налажено их серийное производство**. На финальной стадии разработки находятся еще 2 устройства СПДПС Orion-2. Гибкость архитектуры позволила «НТЦ Натекс» одной из **первых в мире создать работающий образец** модуля СПД на xDSL микросхеме 2-го поколения Infineon SDFE со скоростью передачи данных до 11.6 Мбит\с.

Частные практические результаты

- Разработан алгоритм выбора типа ПрЧ и синтезаторов частоты для устройств СПД.
- В пакете Matlab разработана программа расчета цифрового ПрЧ по заданным характеристикам.
- На языке Verilog HDL разработан параметризованный модуль ПрЧ. Его параметры настраиваются при помощи коэффициентов, рассчитываемых по программе (см. выше). При этом время синтеза ПрЧ с необходимыми параметрами сокращается на 2 порядка по сравнению с использованием непараметрических схем (с 2 часов до 2-х минут).

- Реализованы несколько типов ФД, фильтров и УГ для работы в составе ПрЧ. Получены данные о характеристиках каждой реализации. Для реализации ПрЧ выбраны наиболее удачные из них. Для ПЛИС Altera Cyclone EP1C3T144C8 синтезирован ПрЧ, работающий на частоте 180 МГц и УГ, работающий на частоте 275 МГц.

Публикации

1. Карпенко Л.В. Реализация модулей передачи данных для систем управления протяженными объектами // Электросвязь. – 2006. № 9. - С. 33-36.
2. Карпенко Л.В. Передача сигналов синхронизации оборудованием PDH // Вестник Связи. – 2005. - №12. - С. 27-32.
3. Карпенко Л.В. Реализация цифрового преобразователя частоты на ПЛИС // CHIP NEWS Инженерная микроэлектроника. - 2005. - №9 (102). - С. 14-18.
4. Карпенко Л.В. Измерение фазового дрожания сигналов синхронизации проводных систем передачи данных // Научная сессия МИФИ-2004: Сб. науч. тр. Т1. Автоматика. Электроника. Микроэлектроника. Измерительные системы. - М: МИФИ, 2004. - С. 245-246.
5. Карпенко Л.В. Цифровой блок понижения частоты для систем связи с переменной скоростью передачи // 5-я научно-техническая конференция Электроника, Микро- и Наноэлектроника: Сб. науч. тр. М.: МИФИ, 2003. - С. 118-121.
6. Карпенко Л.В. Блоки ФАПЧ в проводных системах передачи данных // Научная сессия МИФИ-2003: Сб. науч. тр. Т1. Автоматика. Электроника. Микроэлектроника. Измерительные системы. - М: МИФИ, 2003. - С. 215-216.