

Романов Сергей Евгеньевич

Цифровые каналы ВЧ связи

Москва, 2006 год

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

AM	- амплитудная манипуляция
BER	- вероятность возникновения ошибок
BW	- полоса частот канала
CDM	- кодовое мультиплексирование
CDMA	- кодовый множественный доступ
COFDM	- кодовая ортогональная многочастотная модуляция
CP	- циклический префикс
DFT	- дискретное Фурье преобразование
DMT	- дискретная многочастотная модуляция
DPLC	- технология передачи цифровой информации по линиям электропередачи
DSP	- цифровая обработка сигналов
DSSS	- дискретная широкополосная модуляция
FDM	- частотное мультиплексирование
FDMA	- множественный доступ с частотным разделением
FEC	- коррекция ошибок
FEQ	- эквалайзер в частотной области
FFT	- быстрое Фурье преобразование
FHSS	- широкополосная модуляция с переключением частот
FSK	- дискретная частотная модуляция
FTDM	- фиксированное временное мультиплексирование
ICI	- межканальная интермодуляция
IDFT	- инверсное дискретное Фурье преобразование
IFFT	- инверсное Фурье преобразование
ISI	- межсимвольная интермодуляция
MCM	- многочастотная модуляция
OFDM	- ортогональная частотная модуляция
PAM	- прямоугольная квадратурно-амплитудная модуляция
PAR	- пик-фактор (отношение пикового уровня к среднему)
PEP	- пиковая выходная мощность
PMEPR	- пик-фактор (отношение пикового уровня к среднему)
PSK	- дискретная фазовая модуляция
QAM	- квадратурно-амплитудная модуляция
QoS	- соглашение о качестве предоставляемого сервиса
QoS	- запрос на предоставление сервиса заданного качества
RMS	- среднеквадратичное значение

RS	- Рид-Соломон кодер
SFDR	- диапазон свободный от любых видов искажений
SNR	- отношение сигнал/шум
SS	- spread spectrum / широкополосный
STDM	- статистическое временное мультиплексирование
TCM	- Треллис кодер / кодовая модуляция
TDM	- временное мультиплексирование
TDMA	- множественный доступ с временным разделением
TEQ	- эквалайзер во временной области
ToS	- количество запросов на предоставление сервиса
VoS	- запрос на предоставление требуемой скорости передачи
АПЧ	- автоматическая подстройка частоты
АРУ	- автоматическая регулировка усиления
АЦВЧ	- аналогово-цифровая ВЧ связь / канал
АЦП	- аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	- амплитудно-частотная характеристика
АЧХ	- амплитудно-частотная характеристика
БПФ	- быстрое преобразование Фурье
ВОЛС	- волоконно-оптическая линия связи
ВОСПИ	- волоконно-оптическая система передачи информации
ВЧ	- высокочастотный
ДП	- диспетчерский пункт
КАМ	- квадратурная амплитудная манипуляция
КЗ	- короткое замыкание
ЛЭП	- линия электропередачи
ОСШ	- отношение сигнал/шум
ПРД	- передатчик
ПРДТ	- передающий тракт
ПРМ	- приемник
ПС	- подстанция
СДТУ	- служба диспетчерского и технологического управления
СПИ	- система передачи информации
СТИ	- система телеизмерений
СТС	- система телесигнализации
СТУ	- система телеуправления
СШ	- сигнал/шум (отношение)
ТИ	- теленформация

ТП	- трансформаторная подстанция
ТС	- телесигнализация
ТУ	- телеуправление
ФМ	- фазовая манипуляция
ФНЧ	- фильтр низких частот
ФЧХ	- фазочастотная характеристика
ЦВЧ	- цифровая ВЧ связь / канал
ЦОС	- цифровая обработка сигналов
ЦПР	- циклический префикс
ЧМ	- частотная манипуляция
ЭМС	- электромагнитная совместимость

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1	13
Технологии ВЧ связи.....	13
ЦВЧ технологии.....	18
QAM	19
OFDM (DMT, MCM).....	22
OFDM (DMT, MCM) для ВЧ связи.....	23
Сравнение QAM/PAM и OFDM (DMT)	39
Выводы по Главе 1	45
ГЛАВА 2	47
Каналы ЦВЧ связи	47
Максимальные скорости передачи ЦВЧ систем	49
Аппроксимация параметров ВЧ тракта.....	50
Предельные характеристики ЦВЧ тракта	61
Параметры OFDM/DMT системы.....	68
Предельные характеристики реальной OFDM/DMT ЦВЧ системы.....	75
Коррекция ошибок, FEC	78
ЦВЧ каналы с FEC	86
Выводы по Главе 2	101
ГЛАВА 3	105
Сети ВЧ связи.....	105
Свойства ЦВЧ каналов, осложняющие построение сети	106
Свойства ЦВЧ аппаратуры, осложняющие построение сети: селективность, искажения и шумы.....	114
Особенности построения ЦВЧ сети	117
Экспериментальная ATM ЦВЧ сеть.....	119
Выводы по Главе 3	123
ГЛАВА 4	127
ЦВЧ каналы. Проектирование	127
Расчет уровня передачи Рпер.....	127
Порядок определения уровня передачи	133
Рекомендации по выбору W	134
Интерпретация результатов расчетов затуханий	136
Схема присоединения	137
Неравномерность частотной характеристики	141
Определение минимального уровня приема Рпр.мин	148
Коррекция уровня помех Рпом	148
Определение оптимальных шагов адаптации.....	152
Выводы по Главе 4	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	163
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:	167
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	177
Формирователи цифровых каналов. Задержка передачи	177
Повышение эффективности цифровых каналов.....	183
Коммутируемые каналы или виртуальные каналы.....	184
Решение с передачей дополнительной информации	184
Решение без оптимизации под передачу дополнительной информации	187
Выводы.....	190

Введение

Связь является неотъемлемой частью комплекса управления работой электрической системы, предоставляющей как административно-хозяйственные, так и технологические каналы передачи информации.

Технологическая связь решает задачи создания каналов связи для нужд генерации и распределения электроэнергии, и является одним из самых благополучных, в смысле научно-технического развития и модернизации, направлений в Российской энергетике. Причин тому несколько:

- Стремление РАО и дочерних компаний, несмотря на общее ухудшение взаимодействия внутри энергетики из-за физического и морального старения используемой техники, сохранить надежность и устойчивость ЕЭС
- Постепенное обновление технологической базы отрасли, за счет привлечения в нее передовых конструкторских и технологических достижений мировых производителей оборудования
- Появление цифровой техники релейной защиты и противоаварийной автоматики с новой функциональностью, требующей для своей работы современных качественных каналов связи
- Появления новых принципов построения аппаратуры и сетей управления, основанных на внедрении систем внутренней диагностики и интеграции различного оборудования в единые системы управления-мониторинга, позволяющих существенно сократить эксплуатационные расходы за счет замены планово-предупредительных ремонтов ремонтами по результатам диагностики, или сократить численность персонала и затрат на ремонтное обслуживание путем увеличения межремонтных сроков работы. При использовании техники, имеющей сроки наработки на отказ, исчисляемые десятками лет, ожидаемый экономический эффект от изменения структуры обслуживания позволяет ускорить темпы реконструкции энергохозяйства
- Огромный научно-технический потенциал отраслевого института ВНИИЭ, и высочайшая квалификация работающих в нем специалистов, разрабатывающих принципиальные основы организации высокочастотной связи и сложных релейных защит и автоматики по линиям электропередачи 110–1150 кВ

Основу технологической связи России традиционно составляют специализированные каналы РЗ и ПА, по которым передается практически 100% необходимой для этих нужд информации. Для основных видов релейных защит ВЛ 110 кВ и выше - дифференциально-фазных (ДФЗ) и дистанционных ВЧ защит - служат выделенные, не совмещаемые с другими, каналы. Для защит ЛЭП напряжением 110 – 1150 кВ, требующих передачи разрешающих или ускоряющих сигналов, а также для передачи сигналов прямого телеотключения, служат каналы передачи сигналов команд. Обычно эти же каналы используются для передачи команд на выполнение заданных, ликвидирующих аварию, воздействий в системах противоаварийной автоматики.

Для управления работой линий, подстанций, энергосистем и объединений энергосистем не только в аварийных ситуациях, но и в нормальных режимах работы по прямым технологическим каналам передаются:

- оперативно-диспетчерские и административно-технологические телефонные переговоры;
- сигналы телемеханики (ТМ) систем АРЧМ, АСУ (АСДУ, АСУ ТП и АСУ П), управление режимами;
- межмашинный и межсистемный обмен АСУ (АСДУ, АСУ ТП и АСУ П);
- данные аварийной и послеаварийной автоматики.

Для административно-хозяйственного управления работой энергосистем и объединений энергосистем в нормальных режимах и для работы с потребителями по коммутируемым каналам передаются:

- телефонные переговоры и факсимиле;
- сигналы или данные телеметрии, сигнализации, управления;
- данные АИИС КУЭ;
- электронную почту, межмашинный и межсистемный обмен данными и т.п.

До недавнего времени в соответствие с решаемыми задачами сети энергетиков строились по трем независимым функциональным критериям: передачи сигналов речи и телемеханики, защиты и автоматики, офисных приложений и данных, с использованием соответствующей аппаратуры.

В последние годы в связи с изменением структуры управления и подчиненности энергетики, ростом надежности аппаратуры и стремлением снизить капитальные затраты наблюдается переход от разделения каналов по функциональному признаку к их административному делению, что приводит не только к смешению парка аппаратуры, но и самих каналов. Так сейчас достаточно активно применяется совмещение функций передачи сигналов речи, ТМ и РЗА – комплексные каналы.

Для офисных приложений, АИИС КУЭ, передачи после аварийной информации, почты и Интернет, обычно используются кабельные или радиоканалы, собственные или арендованные, коммутируемые или с IP технологией. Отдельное приложение образуют радио, спутниковые или транкинговые сети / каналы обслуживания передвижных бригад.

В соответствие с административным делением, современные системы СПИ в энергетике распадаются на два несовместимых класса:

- Первые строятся с учетом всех существовавших ранее и перспективных норм на технологические каналы связи
- Другие решают узкоспециальные задачи, причем во главу угла ставится не функциональная полнота и надежность системы, а стоимость решения. Типичными для них являются массовые телекоммуникационные решения, снижающие аппаратные затраты и допускающие использование привлеченных специалистов

В общем случае, к аппаратуре оперативно-диспетчерского и технологического управления в частях, относящихся к необходимости ее совместной работы в единой электрической сети, к возможности мониторинга и управления параметрами аппаратуры и канала предъявляются те же требования, что и к любой другой современной аппаратуре связи.

Однако требования по ЭМС, надежности электропитания, времени передачи, джиттеру и асимметрии, способности сети к самовосстановлению, устраниению проблем с синхронизацией и ошибочной трассировкой, достижимому параметру не готовности сети и ряду других параметров технологических каналов значительно более жесткие, чем для каналов иного назначения.

В тоже время нелепо отрицать, что для офисных приложений, включая АИС КУЭ до-технологического уровня, передачи после аварийной информации, сигнализации, управления, почты и Интернет коммутационные технологии построения систем в условиях недостатка числа выделенных каналов идеальны.

Таким образом, если решать задачу дальнейшего снижения капитальных и эксплуатационных затрат модернизации систем связи энергетики за счет внедрения конвергированных каналов связи, необходимо «поднять» каналы административно-хозяйственного управления до уровня технологических каналов в части их надежности, устойчивости и защищенности. Особенno это касается каналов передачи данных, без которых невозможно построение полнофункциональных систем управления производством и распределением электроэнергии.

Возможными средствами передачи при этом могут быть: провода / кабели, ВЧ линии, радиосистемы, волоконно-оптические тракты и спутниковые каналы.

В соответствие с «Системным проектом построения цифровой сети связи электроэнергетики» [1,2] и «Основными положениями развития ЕСЭТЭ...» [3,4] основными технологиями, на которых будет строиться инфраструктура сети связи электроэнергетики до 2015 года, являются ВЧ связь и ВОЛС-ВЛ, которые являются взаимно дополняющими технологиями, применимость каждой из которых определяется путем анализа совокупности технических и экономических характеристик. КЛС и радио будут использоваться для создания инфраструктуры предприятий, радио и спутники - для создания инфраструктуры обслуживания и эксплуатации; КЛС, радио и спутники - частично для технологических нужд.

ВЧ связь по ВЛ сохранит свои позиции в сетях связи электроэнергетики из-за своей высокой надежности и сравнительной дешевизны, а так же внедрения новых технологий обработки и передачи ВЧ сигналов. Но, очевидно, что ВЧ сети ни в коем случае не смогут конкурировать с ВОЛС-ВЛ там, где требуются большие объемы передаваемой информации.

Основной и наиболее актуальной задачей развития ВЧ связи в России, определяющей актуальность приведенного документа, будет создание цифровых ВЧ каналов (ЦВЧ)

передачи данных, необходимых, как для реализации функций управления производством и распределения электроэнергии, так и для резервирования, предназначенных для этого, ВОЛС-ВЛ каналов связи.

Среди несомненных и очевидных достоинств ВЧ каналов: надежность ВЛ, как среды передачи; самые короткие и быстрые пути передачи РЗА информации; длинные без промежуточных ретрансляторов с минимальным риском ошибки адресации и коммутации каналы «точка-точка» и «точка-многоточка»; принадлежность среды передачи, аппаратуры и канала энергетике; легкость контроля и обслуживания; выделяется главная проблема ВЧ связи по ВЛ - низкая емкость канала.

Во всем мире уже много лет предпринимаются попытки обойти это ограничение. Например, в Европе в 70-80 годах в качестве среды передачи систем ВЧ связи использовали не провода ВЛ – фазные или грозотросы, а захороненные в грозотросах ВЧ кабели (коаксиальные или четырехпроводные, скрученные «звездой»).

В настоящее время все усилия направлены не на улучшение свойств среды передачи, а на развитие методов и способов передачи информации по ВЛ [5,6,7].

Обычный для ВЧ связи метод передачи - частотный дуплекс в диапазоне частот несущих 20 ... 1000 кГц с шагом перестройки 4 кГц, и основной механизм уплотнения информации – частотное мультиплексирование (FDM), заменяются современными технологиями, основанными на использовании аналогово-цифровых методов модуляции: квадратурной - QAM, многочастотной – MCM / DMT и OFDM, широкополосной - DSSS или FHSS, с временным уплотнением данных.

Первые сообщения о ЦВЧ каналах появились в начале 90-х годов прошлого века (NERA/Teamcom). Проведенные в 1995 году в России испытания показали их низкую устойчивость. Относительно масштабное внедрение ЦВЧ каналов в мировой энергетике началось в 1999-2000 годах. В это время на рынке присутствовали 4 производителя соответствующей аппаратуры: DIMAT, Teamcom, Siemens, ABB. К 2006 году их, как в России (Супертел, Модем, АББ Энергосвязь), так и за рубежом (Нептун, DIMAT, Teamcom, Siemens, ABB, Iskra, Ensico, Alstom, Areva, RFL и другие) стало много больше.

Анализ реализованных проектов и имеющейся литературы [16-39], показывает, что выбор технических решений построения цифровых ВЧ каналов происходит случайным образом – из набора доступных узлов и технологий, чаще всего - телекоммуникационных.

исходя из особенностей ВЧ тракта, как среды передачи:

- нестабильность параметров и дефекты среды во времени
- возможность потери канала из-за прерываний, вызванных физическими и климатическими причинами
- зависимость параметров от техногенной обстановки

- занятость ряда частот в диапазоне несущих различными государственными ведомствами и службами; лицензирование, и возможное отсутствие свободных частот

Распространение сигнала вдоль ВЛ происходит по независимым волновым каналам (модам), число которых равно числу не заземленных проводов ВЛ. Каждая мода характеризуется только ей присущими затуханием и скоростью, статически и динамически определяемыми множеством факторов: конструкцией ВЛ, погодными условиями, местностью, по которой пролегает ВЛ, частотой несущей и т.д. Характерной чертой ВЧ каналов по ВЛ является быстрое изменение затухания в периоды возникновения дефектов ВЛ.

Специфическим отличием ВЧ каналов по ВЛ от других проводных каналов является наличие шумов и помех, порождаемых различными независимыми источниками.

Шум короны – действующий на входе приемника интегральный сигнал от множества распределенных по длине ВЛ электрических разрядов, вызванных ионизацией воздуха в максимумах напряжения промышленной частоты. Имеет широкий (до 10 и более МГц) спектр. Амплитуда шума короны зависит от напряжения ВЛ, ее конструкции, местности по которой проходит ВЛ, климатических условий, загрязненности воздуха и высоты над уровнем моря. Динамический диапазон изменения шума короны во время эксплуатации ВЧ канала может превышать 15 ... 20 дБ.

Другие шумы связаны либо с характеристиками, либо с работой различного силового оборудования на ПС и ВЛ: изоляторами, выключателями, разъединителями и т.д.

Построение ЦВЧ формирователей без учета этих, присущих ВЧ связи, свойств в настоящее время является причиной низкой надежности ЦВЧ каналов и их долговременных выходов из строя.

К одним из достоинств ВЧ каналов по сравнению со всеми другими является их «подготовленность» к различным возмущающим и дестабилизирующим факторам, которая закладывается на этапе проектирования, и является их неотъемлемой частью.

Существующие методики расчета ЦВЧ каналов отрывочны и не позволяют в полной мере реализовать потенциал технологии [11,12,13,14,15].

Здесь впервые будет выполнена оценка предельных возможностей ЦВЧ каналов на основе теоремы Шеннона-Хартли, а так же предложена процедура выполнения инженерных расчетов, направленная на получение максимальных скоростей передачи, и одновременно заданную устойчивость выполняемых сервисов по всем условиям эксплуатации.

Будет качественно и количественно показано, что в отличие от других сред и систем передачи свойства ЦВЧ каналов однозначно определяются не только конструкцией линии связи, но и ее эксплуатационными режимами: технологическими, временными и климатическими. Что при одинаковой конструкции линии связи, определяющими свойства ЦВЧ канала являются следующие ее характеристики: напряжение, схема присоединения и доступная полоса частот ВЧ канала.

Эффективность ЦВЧ систем зависит не только от характеристик среды передачи, но и от методики формирования ВЧ канала.

Простая инженерная методика определения скорости, и надежности ЦВЧ канала, пригодная для проектирования, использовалась при выполнении ряда проектных работ.

В первой главе рассмотрены технологии и способы передачи информации по ВЧ каналам. Выполнена классификация аппаратуры ВЧ связи и каналов. Рассмотрены основные технологии цифровой ВЧ связи. Проведено функциональное и структурное соответствие существующих в ВЧ канале возмущений и технологий ВЧ связи. Сделан вывод о применимости тех, или иных технологий. Определен структурный / функциональный состав оптимальной системы ЦВЧ связи.

Во второй главе рассмотрены вопросы взаимосвязи параметров ВЧ тракта с параметрами формирователя ЦВЧ канала. Выполнено моделирование ВЧ каналов по всем условиям эксплуатации. Определены максимальные идеальные и реальные скорости передачи ЦВЧ каналов. Проведено параметрическое моделирование трех основных архитектур систем ЦВЧ связи. Сделан вывод о применимости тех, или иных решений. Предложен способ выбора оптимальной системы ЦВЧ связи.

В третьей главе рассмотрены особенности построения цифровой сети ВЧ связи, связанные со свойствами составляющих ее ЦВЧ каналов, и используемой для этого ВЧ аппаратуры. Приведен пример реализации ЦВЧ сети, и некоторые полученные экспериментально результаты. Сделан вывод о применимости тех, или иных решений. Предложено оптимальное с точки зрения стоимости и функциональности решение построения системы ЦВЧ связи.

В четвертой главе рассмотрены вопросы проектирования цифровых ВЧ каналов, связанные со свойствами системы модуляции и аппаратуры ВЧ связи, характеристиками ВЧ тракта и системной принадлежности формируемых каналов. Приведены примеры расчетов ЦВЧ каналов, и некоторые полученные экспериментально результаты. Даны рекомендации по построению ЦВЧ трактов.

В заключении