

ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотная (ВЧ) связь по линиям электропередачи (ЛЭП) является распространенным видом телекоммуникаций в электроэнергетике. За более чем 100 лет истории ВЧ связи были разработаны теоретические основы расчета ВЧ каналов, методы определения параметров ВЧ трактов и помех, схемы ВЧ присоединения, принципы построения ВЧ трактов по фазным проводам, проводящим тросам, внутрифазным и внутритросовым присоединениям. Техника ВЧ связи развивалась так, чтобы соответствовать актуальным отраслевым требованиям: существенно менялись принципы построения ВЧ аппаратуры, методы модуляции, развивалась теория устройств обработки и присоединения.

Теоретические основы теории распространения сигналов, используемой в высокочастотной связи, разработал Дж.Р. Карсон, 1927 год. Научные основы отечественных технологий ВЧ связи, включая методики расчетов и проектирования ВЧ трактов, создали советские ученые Г.В. Микуцкий, Я.Л. Быховский, М.В. Костенко, Л.С. Перельман, К.Я. Кафиева, В.С. Скитальцев, Ю.П. Шкарин. Исследование вопросов применения новых систем ВЧ связи и проектирования цифровых сетей с использованием ВЧ оборудования отражены в трудах авторов настоящей книги. Из современных иностранных авторов следует отметить А. Муйчич, Н. Сулянович, М. Заяц, Р. Пиги, Р. Рахели, Э. Фортунатто, А. Равиола.

Каналы высокочастотной связи широко применяются для передачи речи, данных, сигналов ВЧ защит, команд релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА). ВЧ каналы характеризуются высокой механической прочностью, определяемой прочностью линии электропередачи, используемой как среда передачи, низкой стоимостью ввиду отсутствия затрат на специальные линейные сооружения и экономичностью из-за низких эксплуатационных расходов. Напомним, что диапазон частот ВЧ связи в большинстве стран мира ограничен полосой 40...500 кГц, в России и странах СНГ диапазон частот, используемых для каналов ВЧ связи, находится в пределах 16...1000 кГц.

В данной книге рассматриваются системы ВЧ связи с временным разделением сигналов (ВРС), применяемые для построения цифровых каналов ВЧ связи (ЦВЧ), предназначенных для передачи речи и данных. В ЦВЧ оборудовании используются различные методы цифровой модуляции: квадратурно-амплитудная модуляция QAM (Quadrature Amplitude Modulation), мультиплексирование с ортогональным частотным разделением OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing), дискретная многоканальная модуляция DMT (Discrete Multi-tone).

В современной электроэнергетике ЦВЧ оборудование используется для организации каналов связи со скоростью передачи информации от нескольких единиц до сотен килобит в секунду. Последние 20 лет разработки в технике ЦВЧ систем периодически обращаются к применению DMT-модуляции и построению ЦВЧ каналов с номинальной полосой частот передачи/приема в сотни кГц. До сих пор ещё нет опыта практического применения таких каналов и, соответственно, правил их проектирования (например, выбора частот). Тем не менее в главе 2 будут рассмотрены особенности функционирования DMT ЦВЧ систем.

На фоне массового использования цифровых волоконно-оптических и радиосистем связи отношение специалистов к вопросу применения цифровой ВЧ связи в электроэнергетике является двойственным. Одни говорят, что технология является устаревшей, малоприменимой для современных электрических сетей из-за низкой пропускной способности каналов, их подверженности влиянию погодных факторов и коммутационных помех. Вторые утверждают, что ВЧ связь еще долгие годы останется надежным средством телекоммуникаций в электроэнергетике благодаря всеобщему покрытию территории страны ЛЭП, высочайшей надежности среды передачи — фазным проводам ЛЭП и относительно низким капитальным затратам на организацию и эксплуатацию ВЧ каналов большой длины.

На сегодняшний день по грубым оценкам в мире эксплуатируется порядка 250 тысяч ВЧ каналов. По данным Федеральной сетевой компании единой электрической системы «ФСК ЕЭС» число эксплуатируемых в России ВЧ каналов превышает цифру в шестьдесят тысяч.

С точки зрения капитальных затрат, низкой плотности технологических каналов и малых шумов применение цифровых ВЧ каналов может оказаться наиболее удобным для организации связи между подстанциями 35 и 110 кВ. В сегменте ЛЭП 220 кВ, оборудо-

ванных грозозащитным тросом с оптическим волокном и волоконно-оптическими системами передачи, ЦВЧ каналы могут применяться как резервные для телефонии и телеметрии. На линиях классом 330 и 500 кВ применение ЦВЧ систем проблематично. Как правило, такие линии имеют большое затухание и уровень шума. Хотя существуют примеры организации стабильно работающих ЦВЧ каналов на линиях 500 кВ длиной 300...400 км при работе в нижнем диапазоне частот ВЧ связи (ниже 100...150 кГц).

Серьезной проблемой является дефицит специалистов в эксплуатирующих и проектных организациях, имеющих опыт работы с цифровыми ВЧ системами. Обращение с современным оборудованием требует от специалистов знаний сразу в нескольких областях, базирующихся на соответствующей качественной теоретической основе. Во-первых, необходимы знания непосредственно по организации и измерению ВЧ трактов. Каким бы ни было совершенным ЦВЧ оборудование, если есть проблемы в линии, надежный канал связи построить невозможно. Во-вторых, требуются знания в области электросвязи, понимание принципов разделения сигналов, работы модемов, мультиплексоров, блоков абонентских окончаний тональной частоты, различных интерфейсов передачи данных. В связи с тем, что современные системы ВЧ связи часто используются для передачи пакетного трафика IP-сетей, необходимы знания в области информационных технологий (IT). Следует отметить, что в открытых литературных источниках проблемы, связанные с построением ЦВЧ каналов, освещены мало. Целью книги является восполнение этого пробела.

Книга состоит из пяти глав, включающих информацию о построении цифрового оборудования ВЧ связи, модемах, мультиплексорах и сетевых элементах ЦВЧ систем, влиянии параметров ВЧ трактов на работу ЦВЧ каналов, проектировании ЦВЧ каналов. Материал книги основывается на обширном опыте авторов в вопросах организации ВЧ каналов, расчетах ВЧ трактов, разработке и внедрении новых подходов к построению ЦВЧ сетей.

1 ЦИФРОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВЯЗИ

Современные системы ВЧ связи представляют собой сложные программно-технические комплексы, построенные с использованием передовых технологий цифровой обработки сигналов и предназначенные для передачи информации различных видов. Как правило, ВЧ оборудование включает в себя блоки, отвечающие за работу с цифровыми интерфейсами передачи данных RS-232, V.11, E1, Ethernet и др. и выполняющие оцифровку и компрессию аналоговых речевых сигналов, канальное кодирование данных, передачу информации с применением различных методов и схем цифровой модуляции. Неотъемлемой частью ВЧ оборудования являются блоки, предназначенные для усиления модулированного ВЧ сигнала и работы с элементами ВЧ тракта.

В первой главе рассматриваются основы построения цифровых систем ВЧ связи.

1.1. Стандарты и нормативные документы

Первый стандарт Международного электротехнического комитета МЭК 60663 [1], касающийся использования ВЧ оборудования связи, появился в 1980 году. В 1993 году МЭК принял стандарт 60495 «Аппаратура оконечная ВЧ связи с одной боковой полосой» (Single Sideband Power Line Carriers) [2]. Также были выпущены стандарты, касающиеся оборудования ВЧ обработки и присоединения: МЭК 60481 [3], МЭК 60358-2 [4], МЭК 60353 [5].

Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения CIGRE издал два доклада по теме цифровых ВЧ каналов:

- в 2000 году доклад рабочей группы 09 Исследовательского Комитета 35: «SC35.9 CIGRE TB 164 Report on Digital Power Line Carrier» [6] с определением основных принципов построения ЦВЧ оборудования;
- в 2006 году доклад рабочей группы 08 Исследовательского Комитета D2 (ИК D2 — это новое обозначение ИК 35): «D2.08

Таблица 1.1

Стандарты МЭК, определяющие требования к системам ВЧ связи и параметрам ВЧ каналов

Новый стандарт	Старый стандарт	Назначение и год выпуска
МЭК 62488-1	МЭК 60663	Планирование использования аналогового и цифрового оборудования ВЧ связи в сетях высокого/среднего/низкого напряжения (2011 г.)
МЭК 62488-2 МЭК 62488-3 МЭК 62488-4	МЭК 60495	Построение АВЧ (aPLC) оборудования (2013 г.) Построение ЦВЧ (dPLC) оборудования (2019 г.) Построение широкополосных систем ВРЛС для низкого и среднего напряжения (в разработке)

DPLC Present Use and Future Applications» [7] с обозначением областей применения ЦВЧ оборудования, а также освещением общих вопросов проектирования и наладки ЦВЧ каналов.

В 2010 году МЭК начал работы по обновлению стандартов 60663 и 60495 и подготовке стандартов, касающихся применения ВЧ систем в сетях среднего (< 35 кВ) напряжения [8–10]. Данные о новых стандартах содержатся в табл. 1.1.

На сегодняшний день основными стандартами, касающимися ВЧ связи в российской электроэнергетике, являются [11–17]:

1) СТО 56947007-33.060.40.045-2010 — «Руководящие указания по выбору частот высокочастотных каналов по линиям электропередачи 35, 110, 220, 330, 500 и 750 кВ» от 06.05.2010 (далее РУ);

2) СТО 56947007-33.060.40.052-2010 — «Методические указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35...750 кВ переменного тока»;

3) СТО 56947007-33.060.40.108-2011 — «Нормы проектирования систем ВЧ связи» от 06.12.2011;

4) СТО 56947007-33.060.40.125-2012 — «Общие технические требования к устройствам обработки и присоединения каналов ВЧ связи по ВЛ 35...750 кВ» (с изменениями от 30.09.2014);

5) СТО 56947007-33.060.40.134-2012 — «Типовые технические решения по системам ВЧ связи» от 30.10.2012;

6) СТО 56947007-33.060.40.177-2014 — «Технологическая связь. Типовые технические требования к аппаратуре высокочастотной связи по линиям электропередачи» (с изменениями от 22.12.2016);

7) СТО 56947007-33.060.40.178-2014 — «Технологическая связь. Руководство по эксплуатации каналов высокочастотной связи по линиям электропередачи 35...750 кВ».

1.2. Структура ЦВЧ оборудования

Структурная схема ЦВЧ оборудования без передачи сигналов команд РЗ и ПА, описанная в стандарте МЭК 62488-3 и докладах СИГРЭ, представлена на рис. 1.1 (без привязки к конкретному типу оборудования).

Низкочастотные (НЧ) интерфейсы передачи данных (А), аналоговые голосовые интерфейсы (В) и интерфейсы сигнализации телефонии (С) расположены в блоке низкочастотных окончаний. Сигналы с последнего поступают в блок оцифровки и компрессии. К этому же блоку подключаются цифровые голосовые интерфейсы (V). Последовательные интерфейсы передачи данных (S) RS-232/485, X.21/V.11 расположены в мультиплексоре с временным разделением сигналов, а Ethernet-интерфейсы (Т) в сетевом элементе — Ethernet-коммутаторе. Блок оцифровки и компрессии по внутренней шине также подключается к мультиплексору. Блок мультиплексора соединяется с блоком цифрового модема (Y). В сторону передачи модем формирует высокочастотный сигнал, который через линейный интерфейс модема (G1) поступает в линейный блок обработки ВЧ сигнала. Здесь выполняются усиление, фильтрация и согласование ВЧ сигнала для передачи в линию связи через линейный ВЧ интерфейс (G2). Входной/принимаемый ВЧ сигнал поступает в ЦВЧ систему через тот же линейный интерфейс (G2), фильтруется и передается в модем. Также на схеме показаны точки подключения интерфейса параметризации и обслуживания оборудования (M) и порты электропитания (P).

При работе в смешанном аналого-цифровом варианте структурная схема АЦВЧ оборудования усложняется и имеет вид, представленный на рис. 1.2.

В схему добавляется узел АВЧ — аналоговая часть, соответствующая стандарту МЭК 62488-2 и включающая в себя мультиплексор с частотным разделением сигналов. Аналоговые сигналы телефонии и передачи данных с блока НЧ интерфейса могут распределяться либо в блок оцифровки и компрессии ЦВЧ подсистемы, либо в мультиплексор узла АВЧ, сигнал из которого поступает в амплитудный модулятор с одной боковой полосой (SSB — Single Side Band). Сигналы с блоков модемов (G1) и (G3) суммируются в блоке группирования ВЧ сигнала (G4) и далее поступают в линейный блок обработки ВЧ сигнала (G2).

По способу формирования группового ВЧ сигнала оборудование может быть одноканальным либо многоканальным.

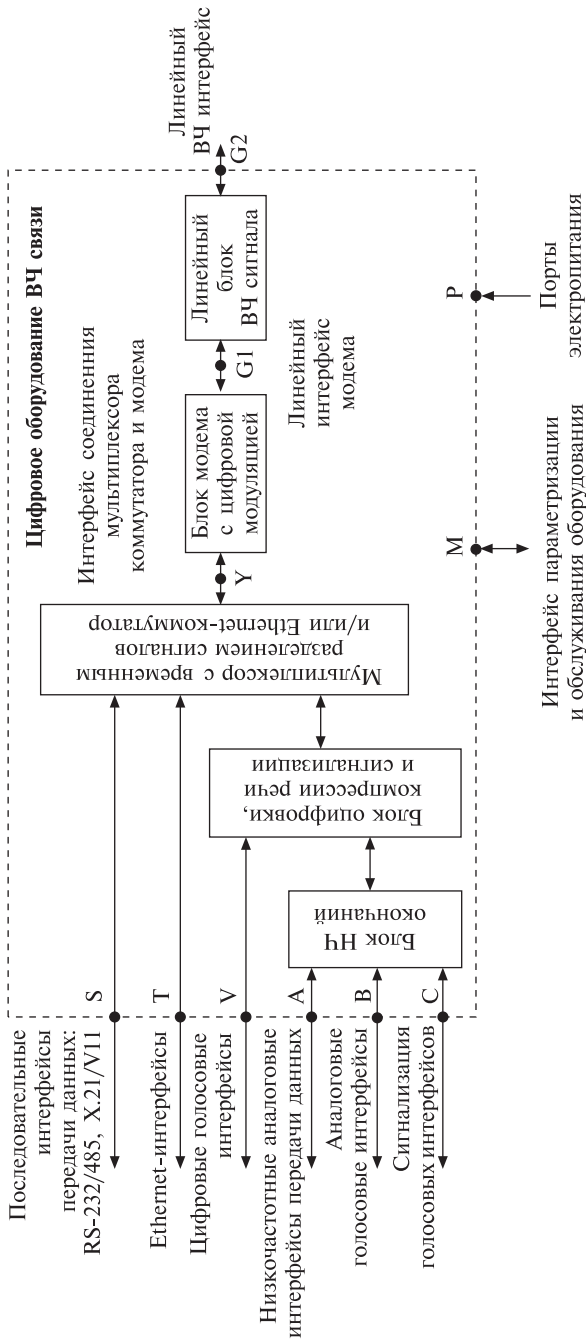


Рис. 1.1. Структурная схема ЦВЧ оборудования

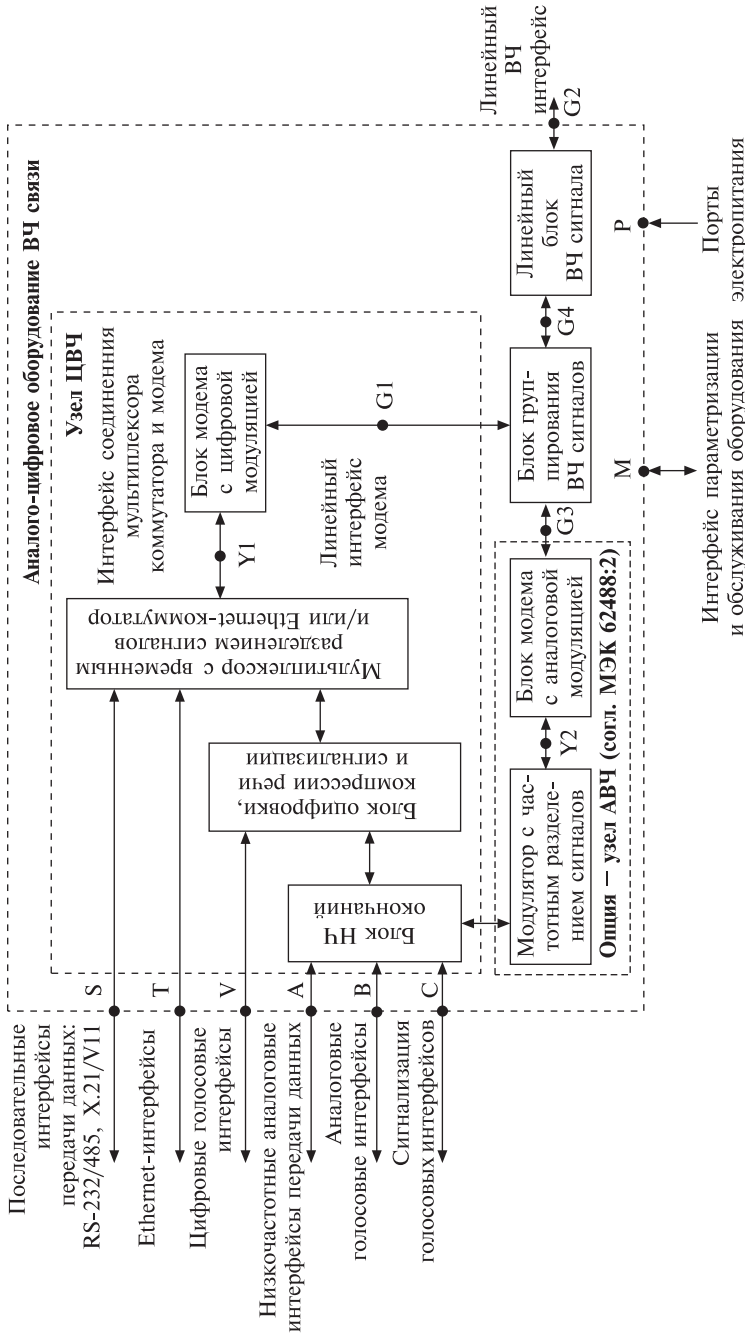


Рис. 1.2. Структурная схема АЦВЧ оборудования