

К. т. н. Е. М. КУРИЦЫН, к. т. н. В. В. ПАНТЕЛЕЕВ

Украина, г. Одесса, ООО "Южная энергетическая компания"
E-mail: uek@te.net.ua

Дата поступления в редакцию
13.06 2006 г.

Оппонент О. П. БАСЮК
(г. Одесса)

СЦЕНАРИИ ОРГАНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ТРАКТОВ ДЛЯ ВЧ-СВЯЗИ ПО ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рассматриваются сценарии построения единой высокоскоростной сети доступа с интеграцией служб на высоковольтных линиях электропередачи.

Общие положения

Интенсивное развитие телекоммуникационных технологий цифровой передачи и коммутации, а также компьютерных технологий, привели к изменению характера трафика и запросов пользователей к качеству и разнообразию предоставляемых услуг служб электросвязи [1, 2]. Традиционные границы между различными службами (телефония, тональное и надтоналное телеграфирование, телекс, передача факсимильных сообщений и данных, конференцсвязь, видео и пр.) в настоящее время становятся все более расплывчатыми. В свою очередь, взрывной рост числа пользователей Интернет и бурное внедрение микросетевых сетей для мобильной связи абонентов на территории предприятия в соответствии с европейскими либо международными стандартами (DECT — Digital Enhanced Cordless Telephone) потребовал обеспечения доступа и к широкополосным услугам на любых иерархических уровнях — от основного цифрового канала (ОЦК) DS-0 (Digital Signal 0-level, скорость передачи $B^{DS0}=64$ кбит/с), канала узкополосной цифровой сети с интеграцией служб (N-ISDN — Narrow-Integrated Services Digital Network) с базовым доступом интерфейса ISDN-BRA (Base Rate Access, скорость передачи $2 \times B^{DS0} + D_{16} = 144$ кбит/с) вплоть до трибутарных усеченного первичного FE-1 ($B^{FE1}=64$ кбит/с $\times N_{TS}$) и/или первичного E-1 ($B^{E1}=2,048$ Мбит/с) цифровых каналов/трактов.

Построение единой высокоскоростной сети доступа с интеграцией служб ISAN (Integrated Services Access Network) позволяет создать такую гибкую телекоммуникационную сеть, обеспечивающую предоставление всевозможных и основанных на разных технологиях услуг [3]. Эта сеть способна единым образом транспортировать все виды информационных сообщений с распределением своих сетевых ресурсов оптимальным образом, обеспечивая: гибкость и адаптацию к изменению уровня требований пользователей по объему, скорости и качеству доставки информации; повышение эффективности использования имеющихся транспортных ресурсов путем их утилизации — вторичного использования; сни-

жение общих затрат на проектирование, строительство, техническую эксплуатацию и обслуживание телекоммуникационной подсистемы. При этом образование транспорта интегрированной сети доступа ISAN будет заключаться в организации трактов передачи общих носителей между различными узлами в телекоммуникационной сети и адаптации к используемым средам передачи [4, 5].

Для оптимального построения интегрированной сети доступа на физическом уровне модели взаимодействия открытых систем OSI (Open Systems Interconnection) технологически целесообразно применить новый класс аппаратуры цифрового уплотнения каналов, названной **гибкими мультиплексорами FLEX MUX** [4]. Данные мультиплексоры доступа способны реализовать различные услуги служб электросвязи и конструктивно размещены в едином субблоке. Стоимость такого класса аппаратуры значительно ниже, чем стоимость разнообразного многоаппаратного оборудования с теми же возможностями. Техническое обслуживание аппаратуры гибкого мультиплексирования производится с помощью единой системы управления EMS (Element Management System) по простейшим сетевым SNMP (Simple Network Management Protocol) протоколам, а модульный принцип построения позволяет наращивать возможности аппаратуры с ростом потребностей пользователей, обеспечивая тем самым долговременную защиту инвестиций. Кроме того, гибкие мультиплексоры FLEX MUX позволяют решить такие проблемы транспортных функций интегрированного доступа как: функции мультиплексирования; функции кроссовой коммутации, включая установление соединений по требованию и конфигурацию кроссовых соединений; функции управления; функции физических сред.

Обобщенный сценарий построения сети доступа с интеграцией служб ISAN на существующей корпоративной сети электросвязи Национальной энергетической компании «Укрэнерго» с применением гибких мультиплексоров FLEX MUX приведен на **рис. 1** [6].

Однако сложившаяся структура построения корпоративной сети связи энергопредприятий является в основном аналоговой [7—9]. Здесь долгие годы и успешно используются аналоговые кабельные и радиорелейные системы передачи (АСП). Поэтому на данном этапе построения интегрированной сети доступа ISAN, организации выделенных цифровых зон

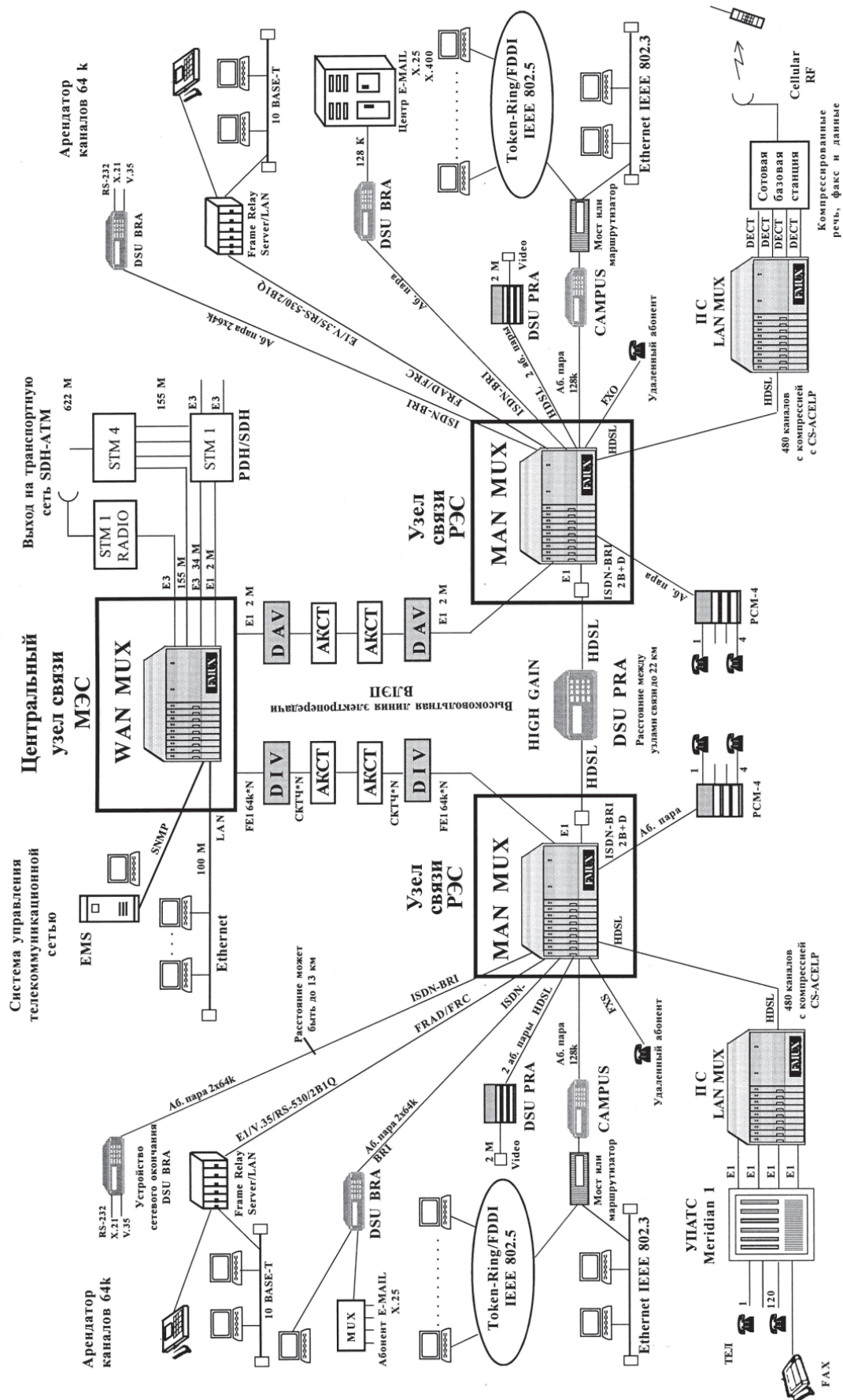


Рис. 1. Сценарий организации интегрированной сети доступа ISAN на корпоративной сети электросвязи НЭК "Укрэнерго"

и локальных цифровых сетей целесообразно широко использовать весь парк АСП на тех направлениях, где переоборудование на цифровые системы передачи (ЦСП) или их строительство на основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) нецелесообразно по технико-экономическим или иным соображениям [2, 5]. Действительно, при кольцевом построении транспортной цифровой сети с применением ВОЛС всегда будут существовать так называемые “тупиковые” ответвления от основных “хребтовых” магистралей, где потребность в высокоскоростном трафике незначительна. Возможное же увеличение цифрового трафика на “тупиковых” направлениях в будущем, через 10—15 лет, потребует безусловной замены оптического кабеля из-за его, как показал зарубежный опыт [10], “помутнения” — физического старения оптических волокон.

К сказанному следует добавить, что построение такой “наложенной” цифровой сети интегрированного доступа ISAN на существующую аналоговую первичную сеть электросвязи даст 100%-ное резервирование цифровых каналов приоритетным пользователям строящихся высокоскоростных сетей на основе синхронной цифровой иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) с асинхронными режимами доставки сообщений от FR (Frame Relay), ATM (Asynchronous Transfer Mode) до IP (Internet Protocol).

Для организации цифровых каналов в линейных трактах проводных и радиорелейных АСП возможно использование устройств преобразования сигналов (УПС) — широкополосных высокоскоростных модемов, предназначенных для преобразования цифрового сигнала в форму, “удобную” для передачи по данной среде распространения [11, 12]. Такие устройства могут работать в основной полосе цифрового сигнала DS0 по плезиохронной иерархии PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) скоростей передачи триба Е/Т непосредственно [2, 13] либо с использованием несущего колебания [1, 14]. В первом случае “цифровые” УПС (DSU/CSU-модемы) нашли применение на физических цепях абонентских и соединительных линий городских телефонных сетей (ГТС), где обеспечение требуемой дальности связи достигается как оптимальным выбором типа линейного сигнала (например, линейные AMI, 2B1Q и блочные 4B3T, 3B2T коды или манипуляции CAP-N, DMT, TC-RAM), так и эхо-компенсационным либо временным методами организации двухсторонней дуплексной связи.

DSU/CSU-модемы (Data Service Unit/Channel Service Units) в основной полосе частот цифрового сигнала DS1 (например, первого иерархического уровня PDH для трибутарного потока Е1/Т1) используют хорошо себя зарекомендовавшие разнообразные технологии xDSL (“x”-any bit rate Digital Subscriber Line) цифровых абонентских линий (ЦАЛ). Из этих технологий, которые позволяют в единицы-десятки мегабит использовать возможности существующей сегодня “последней мили”, наиболее известны: высокоскоростные ВЦАЛ — HDSL (High-bit-rate DSL), симметричные СЦАЛ — SDSL (Symmetrical DSL), асимметричные АсЦАЛ — ADSL (Asymmetrical

DSL), адаптируемые по скорости АЦАЛ — RADSL (Rate Adaptive DSL) и сверхвысокоскоростные СвЦАЛ — VDSL (Very-high-rate DSL) цифровые абонентские линии ЦАЛ [15—17].

В другом случае, при использовании несущего колебания, УПС как “аналоговые” DTE/DCE-модемы (Data Terminal Equipment/Data Circuit-termination Equipment) работают по полосно-ограниченным стандартным широкополосным каналам и групповым трактам АСП [1]. Для высоковольтных линий электропередачи (ВЛЭП) каналы и тракты [8] могут быть образованы, в частности, на базе аппаратуры каналов связи и телемеханики (АКСТ) модели «ЛИНИЯ-М-ПУ-ПК» [18], формирующей стандартные каналы тональной частоты (ТЧ) либо группы каналов ТЧ в стандартизованной [19] полосе частот 20 кГц... 1 МГц. Кроме того, рассматриваемый класс модемов так же эффективно работает по аналоговым линейным трактам (АЛТ) проводных (ПСП) и стволам передачи радиорелейных (РРСР) систем. К указанным технологиям построения DTE/DCE-модемов относятся методы организации цифрового тракта в полосе частот типового широкополосного канала DIV (Data-In-Voice), ниже DUV (Data-Under-Voice) и выше DAV (Data-Above-Voice) плана частот группового линейного сигнала в АЛТ [1, 14].

Рассмотренные способы организации цифровых каналов и трактов при организации мультимедийного доступа нашли свою систематизацию в рабочих материалах 15-го Исполнительного Комитета (SG — Study Group) Международного союза электросвязи [3] по направлению телекоммуникации МСЭ-Т (ITU-T — International Telecommunication Union — Telecommunications) при разработке сценариев построения транспорта сети доступа (ANT — Access Network Transport).

Транспорт сети доступа ANT.

Основываясь на базовых понятиях, определенных в рекомендации ITU-T серии G.902 [3, 15], сеть доступа (AN — Access Network) обеспечивает транспортный канал переноса информации для внутренних сервисных средств телекоммуникаций между ин-

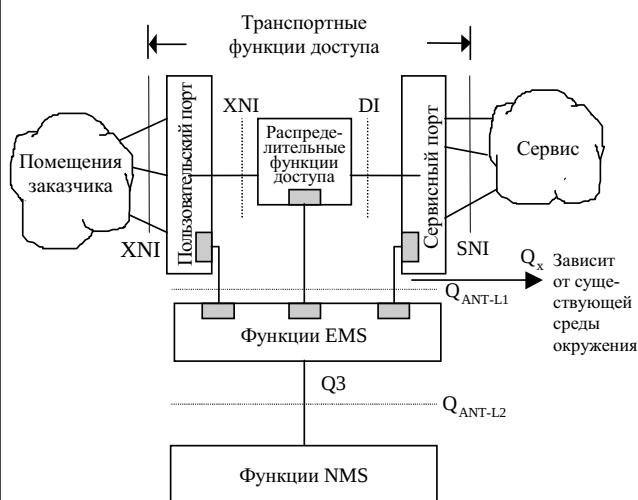


Рис. 2. Модель функционирования транспорта сети доступа ANT

терфейсом сервисного узла (**SNI** — Service Node Interface), необходимого для доступа заказчика к сервисному узлу, и каждым из вспомогательных интерфейсов к сети(ям) помещений заказчика (**CPN** — Customer Premises Network), которые группируются как сетевой интерфейс **XNI** (“x”-any Network Interface).

Реализация AN согласно **рис. 2** включает транспортные среды передачи и доступ по управлению к объектам сетевых элементов NE’s (**NE** — Network Element). Причем элемент сети доступа может быть сконфигурирован через интерфейс Q_x , что производится по эталонной точке q_3 . Эта эталонная точка q_3 , как определено в рекомендации ITU-T [15] серии M.3010, является точкой доступа для информации технологического управления конфигурацией, контроля характеристики и технического обслуживания системы.

Логическое и физическое представление эталонной модели транспорта сети доступа (**ANT RM** — Access Network Transport Reference Model) приведено на **рис. 3**. Эта эталонная модель основывается на обобщенной эталонной модели глобальной информационной инфраструктуры GII AN (**GII** — Global Information Infrastructure) [20] и на базовой модели, представленной в G.902 [15]. Логическое представление (рис. 3, а) показывает взаимоотношения различных сетей доступа AN’s и соотношения с други-

ми участками сети и/или сетями заказчика CPN, соответственно. Здесь логическая эталонная точка L — как физическое представление распределительного интерфейса (**DI** — Distribution Interface) сети доступа. Физическое представление **ANT RM** (рис. 3, б) включает те объекты, которые обеспечивают требуемые возможности транспортного канала переноса информации между интерфейсом сервисного узла (**SNI**) и каждым из вспомогательных интерфейсов сети помещений заказчика (**XNIs**). Сеть доступа может быть сконфигурирована и управляться через интерфейс Q_3 . Сеть доступа представляет собой встроенный распределительный интерфейс **DI** внутренних стыков в AN между доступами сетевых элементов NEs, который в частном случае может быть представлен как интерфейс между двумя сетями доступа ANs.

В эталонной модели **ANT RM** термин **NT** используется для обобщения сетевого окончания (**NT** — Network Termination) различных услуг. Для некоторых сервисов/конфигураций **NT** могло бы быть у заказчика интегрированным в CPN, однако с точки зрения физического функционирования это окончание сети доступа.

Сценарий организации сети доступа по линиям электропередачи.

Линии электропередачи ВЛЭП как высоковольтные терминалы (**PLT** — Power Line Terminals) широ-

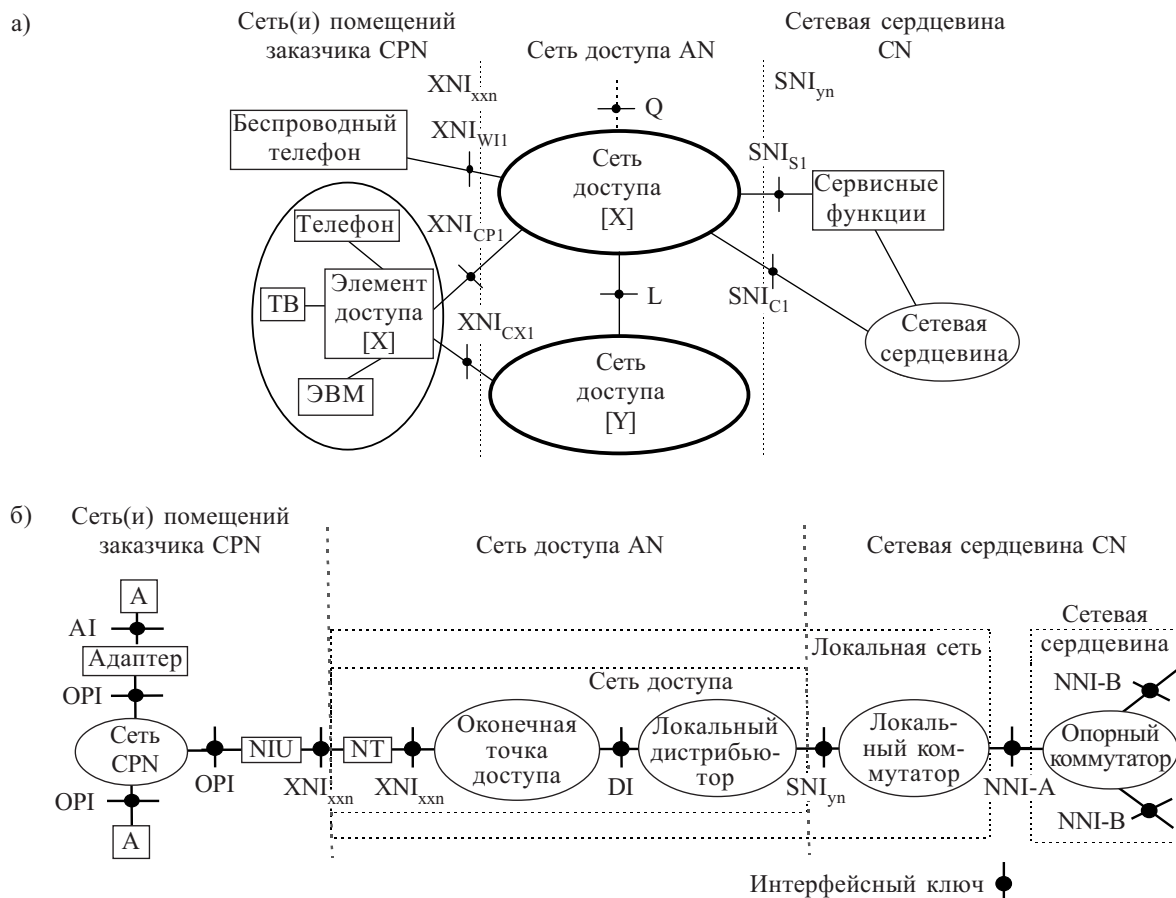


Рис. 3. Эталонная модель транспорта сети доступа ANT RM:
а — логическое представление; б — физическое представление

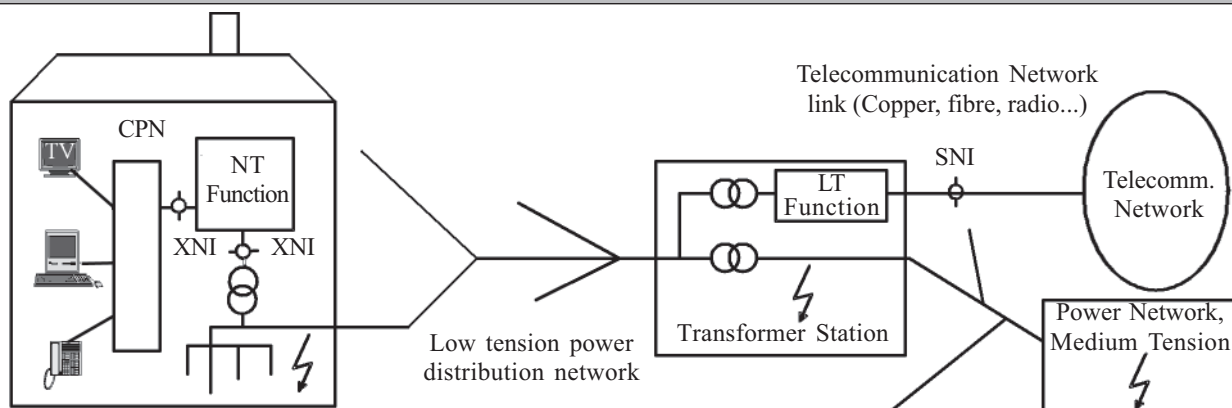


Рис. 4. Передача по высоковольтным линиям электропередачи

ко развернуты во всем мире. Имеются действующие стандартизации внутри Международной электротехнической комиссии (**МЭК**) (**IEC** — International Electrotechnical Commission) [19], Европейского института по стандартизации (**ETSI** — European Telecommunication Standards Institute) [16], а также рекомендации на соответствующих форумах (**PLT-Forum**) и в других стандартизирующих органах [17, 21].

Приведенный на **рис. 4** сценарий изучается в Вопросах Q 1-4/15 Рабочей Группы РГ-5 (**WP** — Working Party) Исполнительного Комитета ИК-15 (**SG** — Study Group) МСЭ-Т (**ITU-T**). Данный сценарий, планируемый ITU-T/SG-15/WP-5, по счету является 8-м и служит в качестве основы организации транспорта сети доступа ANT по ВЛЭП [3], детализация которой определяется существующим телекоммуникационным окружением.

Этапы перехода от аналоговых к цифровым системам ВЧ-связи

Неуклонно возрастающие потоки цифровых сообщений в корпоративной сети НЭК «Укрэнерго» обусловлены расширением инфраструктуры цифрового окружения в виде цифровых станций коммутации HICOM (Siemens), Meridian (Nortel Networks) и систем передачи SMA-1 (Siemens), построением ло-

кальных вычислительных сетей LAN по Ethernet-стандартам IEEE 802.3 [21] и оконечных компьютерных устройств PC по протоколам TCP/IP. Это приводит к необходимости организации высокоскоростных цифровых каналов и трактов по линейным сооружениям высоковольтных линий электропередачи [6].

Безусловно, стратегическим направлением здесь следует считать прокладку ВОЛС — как в непосредственной близости к ВЛЭП, так и по их тросонесущим конструкциям [10]. Однако еще достаточно продолжительное время будут широко использоваться каналы диспетчерской связи, каналы передачи команд радиорелейной защиты и противоаварийной автоматики (**РЗ** и **ПА**), организованные непосредственно на воздушных линиях электропередачи [7, 8]. Поэтому построение предлагаемой "наложенной" цифровой сети интегрированного доступа ISAN позволит обеспечить многократное резервирование приоритетных каналов электросвязи ведомственной взаимоувязанной сети связи объединенной энергетической системы (**ВСС ОЭС**) Украины.

Обобщенное построение корпоративной ВСС ОЭС представлено на **рис. 5**.

Практическая реализуемость предлагаемого пути перехода от аналоговых (**APLC** — Analog Power Line Carrier) к цифровым (**DPLC** — Digital Power Line Carrier) системам ВЧ-связи заключается во вторичном использовании (технологической утилизации сети) существующей аналоговой инфраструктуры. Здесь могут быть предложены следующие варианты этапов (scenarios) "цифровизации" (digitalling).

Первый этап.

Передача цифровых данных выше полосы речевого сигнала по DAV-технологии, которая основана на принципе «надтонального телеграфирования». План распределения частот в данном варианте имеет вид, представленный на **рис. 6**.

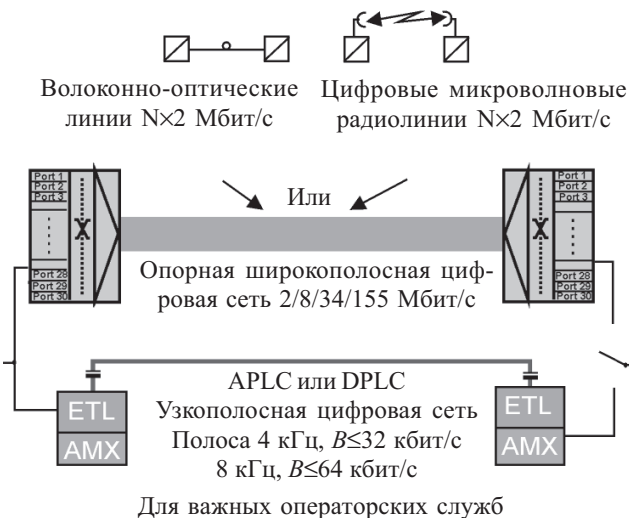


Рис. 5. Обобщенное построение корпоративной сети связи энергетических предприятий

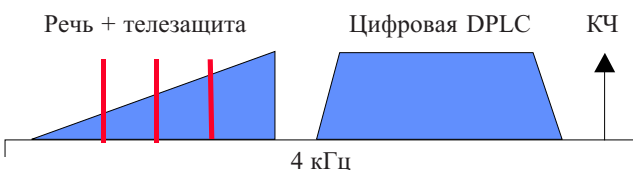


Рис. 6. Передача данных выше полосы речевого группового сигнала и сигнала телезащиты

Технологичность данных систем в аналоговом подканале "речь+телезащита" основана на известной технологии прямого цифрового синтеза. Скорость передачи данных в подканале цифровой DPLC достигается более чем 4,8 кбит/с, что позволяет организовать локальные вычислительные сети и/или до 10 речевых каналов приемлемого качества, основанных на цифровом сжатии с помощью вокодерных (Vocoder — Voice Coder) систем [9, 22].

Второй этап.

На данном этапе сохраняется цифровое формирование аналогового сигнала типового канала технологической связи "речь+телезащита+телеметрия" в полосе частот до 4 кГц и дополняется смежным вторым каналом с той же полосой в 4 кГц, но уплотненной только цифровой информацией (см. **рис. 7**).

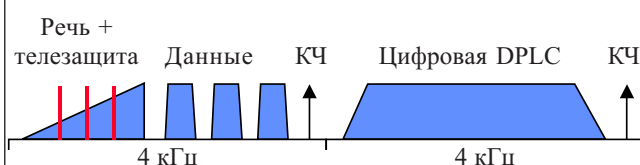


Рис. 7. Передача типового канала технологической связи и смежного высокоскоростного цифрового канала DPLC

Скорость передачи в смежном цифровом канале DPLC реально достигается равной 32 кбит/с, что при использовании гибкого временного мультиплексирования FLEX MUX позволяет как передавать речевые сигналы высокого "цифрового" качества, так и организовывать средне- и высокоскоростные каналы передачи данных, а также факсообщений группы G. III до 14,4 кбит/с [15].

Третий этап.

Этот этап характеризуется полным слиянием типового канала технологической связи и прилегающего к нему высокоскоростного DPLC-канала по спектрам и технологиям. Тем самым используется вдвоенная полоса частот 8 кГц канала, по которой передается агрегатный основной цифровой поток со скоростью передачи 64 кбит/с. Спектральная диаграмма его приведена на **рис. 8**.

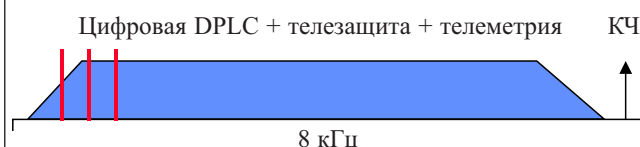


Рис. 8. Полностью цифровая передача DPLC

В сформированном таким образом высокоскоростном цифровом канале DPLC с помощью временного разделения, гибкого мультиплексирования разнородной информации, эффективных методов кодирования речевых сигналов, сжатия сигналов передачи данных и видео возможно транспортирование мультисервисных триединых (Triple Play) сообщений речь/видео/данные единым способом с оптимальным распределением сетевых ресурсов на динамической основе.

Оценка предельно достижимых скоростей передачи в полосно-ограниченных каналах и трактах DPLC-аппаратуры ВЧ-связи по воздушным линиям ВЛЭП

Обеспечение современного инфокоммуникационного сервиса с использованием интегрированного доступа по направляющей среде высоковольтных линий электропередачи, обладающих нестационарными параметрами и специфической помеховой ситуацией, выдвигает в основу "цифровизации" аппаратуры ВЧ-связи метод сетевой технологической утилизации — широкого использования уже существующих полосно-ограниченных стандартных каналов и групповых трактов.

В общих положениях отмечалось, что организация цифровых потоков в аналоговых каналах и/или трактах, сформированных по ВЛЭП аппаратурой ВЧ-связи по DPLC-технологии, производится вторичным уплотнением с помощью высокоскоростных профессиональных УПС. Здесь к УПС как к "аналоговым" широкополосным (Broadband Modem) DTE/DCE-модемам [1], работающим по технологиям DUV/DIV/DAV, предъявляются очень жесткие требования по помехоустойчивости при вторичном уплотнении многоканальных систем передачи (МСП-ЧПК) с частотным разделением каналов (FDM — Frequency Division Multiplexing). Такая высочайшая помехозащищенность DUV/DIV/DAV-модемов достигается комплексом мероприятий по использованию помехоустойчивого кодирования источника сообщений (коды BCH — Bose-Chaudhuri-Hocquenghem, RS — Rid-Solomon, ...), применением многоуровневых протоколов обмена при транспортировании мультимедийной информации (пакетирование по Frame Relay, ATM — Asynchronous Transfer Mode, TCP/IP — Transmission Control Protocol/Internet Program, ...), выбором методов помехозащищенной передачи и оптимального приема (Interleaving, TC — Trellis Coding, ...), а также — и в большей степени — на этапе организации цифроаналогового тракта высокоэффективными методами модуляции (QAM — Quadrature Amplitude Modulation, CAP — Carrierless Amplitude & Phase, DMT — Digital Multi-Tone, ...) с комбинацией всего вышеперечисленного.

Действительно, выбор эффективного метода модуляции является той отправной точкой, первичной ступенью по организации комбинированного цифроаналогового линейного тракта, начиная с которой уже можно заниматься повышением достоверности передачи по ВЛЭП цифровых сообщений ранее известными и будущими методами помехоустойчивого кодирования, эффективного транспортирования, оптимальной передачи и приема сигналов.

Основные понятия.

Предельно допустимые скорости передачи полезной информации B в Кбит/с по полосно-ограниченным каналам и трактам, организованным отечественными системами ВЧ-связи по ВЛЭП при использовании цифровой технологии DPLC, определяются качественными оценками по помехоустойчивости принимаемого сигнала, которые обеспечивают требуемые количественные соотношения по достоверности транспортируемых цифровых сообщений.

Таблица 1

Уровни суммарных помех в полосе Δf 1 кГц

Действующее напряжение, кВ*	6—35 (1)	110 (1)	220 (1)	330 (1)	330 (2)	500 (3)	750** (4)	1150*** (6)
Уровень суммарных помех, $p_{п0}$, дБм0	-50	-40	-30	-15	-30	-25	-20	-20

* В скобках дано число проводов в фазе.

** Расчетные данные для типовых габаритов при проводах 4АСО-600.

*** Расчетные данные для проводов 8АСО-300.

Качественной оценкой помехоустойчивости принимаемого сигнала является защищенность — разность уровней полезного сигнала p_c и помехи p_n , приведенных в относительных логарифмических величинах по мощности с размерностью дБм либо, что полностью эквивалентно, логарифмической мере отношения мощностей сигнал/помеха P_c/P_n (SNR — Signal-to-Noise Ratio)

$$A_z \equiv SNR = p_c[\text{дБм}] - p_n[\text{дБм}] = 10 \lg \frac{P_c}{P_n} [\text{дБ}]. \quad (1)$$

С другой стороны, принято, что количественной оценкой по достоверности информации, содержащейся в принимаемом цифровом сигнале, является вероятность ошибок (BER — Bit Error Rate), которая при нормальном (гауссовском) суммарном шуме связана с защищенностью A_z интегралом вероятности по обратной функции ошибок $\text{erfc}(x)$:

$$P_{\text{ош}} \equiv BER = \text{erfc}[\text{dec}(0,1A_z)],$$

где введено следующее обозначение: $\text{dec}(x) = 10^x$.

Различают ожидаемые $P_{\text{ош.ож}}$ (практически реализуемые) и допустимые $P_{\text{ош.доп}}$ (теоретически нормируемые) вероятности ошибок, причем

$$P_{\text{ош.ож}} \leq P_{\text{ош.доп}},$$

которым соответствуют одноименные защищенности сигнала:

$$A_{z, \text{ож}} \geq A_{z, \text{доп}}.$$

Ожидаемая защищенность сигнала для обеспечения нормируемого качества цифровой связи в реальных условиях должна быть всегда выше допустимой на величину технологического запаса по требуемой помехоустойчивости (NM — Noise Margin) для конкретного вида "аналогового" DUV/DIV/DAV-модема на величину порядка

$$\Delta A_{\text{зап}} \equiv NM = A_{z, \text{ож}} - A_{z, \text{доп}} \cong (3...15) \text{ дБ}, \quad (2)$$

что обеспечивало бы "оптическое" качество связи $P_{\text{ош}} = 10^{-10}$ на высоком по помехоустойчивости уровне работы DPLC-системы в целом

$$SNR(BER = 10^{-10}) \equiv A_z(P_{\text{ош}} = 10^{-10}).$$

Для оценки помехоустойчивости модема при иных пороговых значениях качества связи известна аппроксимационная зависимость защищенности сигнала (с приемлемой для эксплуатации 6%-ной точностью в области практических значений по достоверности $P_{\text{ош.ож}} = BERT = (10^{-4}...10^{-12})$, (BERT — Bit Error Rate Testing)), как функции от вероятности ошибок $A_z \equiv f(P_{\text{ош}})$:

$$A_z(P_{\text{ош}}) = \frac{A_z(P_{\text{ош}} = 10^{-10})}{2} \{1 + \lg[-\lg(P_{\text{ош}})]\}. \quad (3)$$

Безусловно, представляют интерес также и усредненные данные об уровнях суммарных помех $p_{п0}$, дБм0 в точке нулевого относительного уровня ТНОУ (0TLP — Zero Transmission Level Point) для каналов аппаратуры ВЧ-связи, работающей на линиях различных классов по напряжению типовых габаритов ВЛЭП (см. табл. 1) в паспортизируемой полосе частот $\Delta f = 1$ кГц [1, с. 142].

Заметим, что расчет уровней суммарных помех в заданную рабочую полосу частот ΔF аналогового канала/тракта производится как верхняя граница согласно следующему эмпирическому соотношению:

$$p_{п0}(\Delta F) = p_{п0} + 10 \lg \Delta F [\text{кГц}], \text{ дБм0}, \quad (4)$$

а пересчет в иную точку нулевого относительного уровня 0TLP p_0 , по принятому понятию относительных уровней дБм0, имеет вид

$$p_n(\Delta F) = p_{п0}(\Delta F) + p_0, \text{ дБм}. \quad (5)$$

При этом с вероятностью $P = 10^{-4}$ (0,01%) уровень помех при эксплуатации ВЧ-систем связи по ВЛЭП может быть еще на 15 дБм [7, с. 144] выше расчетного (5).

$$p_{п, \text{макс}}(\Delta F) = p_n(\Delta F) + 15, \text{ дБм}. \quad (6)$$

Таким образом, под обобщающим уровнем качества цифровой связи в DPLC-системах будем понимать запас NM ожидаемой в реальных условиях помехозащищенности сигнала $\Delta A_{\text{зап}}$ для конкретных видов модуляций в DUV/DIV/DAV-модемах. Данный уровень качества применительно к нестационарной направляющей среде распространения, к которой относятся открытые физические цепи ВЛЭП, с учетом (6), рекомендуется оценивать субъективными способами. К таким критериям относятся, в частности, экспертные оценки по 5-бальной таблице усредненных мне-

Таблица 2

Пятибальная таблица оценки качества цифровой связи в DPLC-системах

Критерий качества связи	Запас по ожидаемой помехоустойчивости NM "аналогового" модема, дБ	Уровень качества цифровой связи по DPLC-системе
0	Ниже 0	Связь неустойчивая
1	$0 \leq NM < 1,5$ (порог в $\sqrt{2}$ раз по напряжению)	Плохой
2	$1,5 \leq NM < 3$ (порог в 2 раза по напряжению)	Неудовлетворительный
3	$3 \leq NM < 6$ (порог в 2 раза по мощности)	Удовлетворительный
4	$6 \leq NM < 15$ (порог для плохих условий)	Хороший
5	Выше 15	Высокий

ний (**MOS** — Mean Opinion Score) по рекомендациям ITU-T G.108 и P.800 [9, 15], за которые примем уровень запаса ожидаемой помехоустойчивости конкретного типа модема согласно **табл. 2**.

QAM-технология.

Технология квадратурной амплитудной модуляции **КАМ (QAM — Quadrature Amplitude Modulation)** основана на эффективном "обужении" спектра информационного сообщения: работа на сверхнайквистовских удельных скоростях передачи, которые реально достигли 15 бит информации на один герц полосы [14]. Технологический прорыв здесь обусловлен резким увеличением разрешенных точек сигнального созвездия много-М-позиционного QAM-сигнала при формировании найквистовского [1] спектра в полосе занимаемых частот, равной

$$\Delta F^{QAM} \equiv \frac{B_{TX}}{\log_2 M} (1 + \alpha_N), \quad (7)$$

где $B_{TX} = B_{Inf} + \Delta B$ — линейная скорость передачи агрегатного (группового) цифрового потока, состоящая из полезной информационной скорости передачи B_{Inf} и дополнительной скорости $\Delta B \ll B_{Inf}$, отводимой для повышения достоверности методами избыточного помехоустойчивого перемежающегося (Interleaving) кодирования, а α_N — коэффициент сглаживания импульса найквистовской формы ($0 \leq \alpha_N \leq 1$), который в практических условиях находится в пределах $\alpha_N = 0,1 \dots 0,2$.

Заметим, что при использовании помехоустойчивого решетчатого кодирования (**ТС — Trellis Coding**) обеспечивается выигрыш по позиционности сигнального созвездия QAM-сигнала, эквивалентный увеличению на 1 количества информационных битов, т. е. уравнение (7) занимаемой полосы передачи принимает следующий вид:

$$\Delta F^{QAM+TC} \equiv \frac{B_{TX}}{1 + \log_2 M} (1 + \alpha_N). \quad (8)$$

С другой стороны, рост количества разрешенных точек М-позиционного QAM-сигнала уменьшает эвклидово расстояние между ними, что требует значительного увеличения допустимой помехозащищенности $A_{з,доп}(P_{ош})$ "аналогового" модема. Так, допустимая защищенность для обеспечения оптического качества связи $BER = 10^{-10}$ должна быть увеличена на уровень мощности QAM-сигнала и составлять соответствующее значение:

$$\begin{aligned} SNR(BER = 10^{-10}) &\equiv A_{з,доп}(P_{ош} = 10^{-10}) = \\ &= 16,1 + 10 \lg \frac{M-1}{3}, \text{ дБ.} \end{aligned} \quad (9)$$

Полученные выражения (6)–(9) с учетом соотношения пересчета (3) на иной допустимый по норме уровень порога вероятности ошибок позволяет выбрать позиционность вида QAM-модуляции для передачи заданного агрегатного цифрового потока в требуемой полосе частот широкополосного канала/группового DPLC-тракта аппаратуры ВЧ-связи по ВЛЭП. При этом по реальной помеховой ситуации (5), (6) с

учетом табл. 1 можно обеспечить необходимый уровень качества транспортирования агрегатного цифрового потока и субъективно оценить работоспособность DPLC-системы в целом.

В качестве иллюстрации разработанной методики оценки предельно достижимых скоростей передачи в полосно-ограниченных каналах и трактах аппаратуры ВЧ-связи по воздушным линиям ВЛЭП рассмотрим ряд показательных примеров, на основании которых возможна как выработка предварительных условий относительно технических характеристик систем по DPLC-технологии, так и обоснование пакета требований к электрическим параметрам физических цепей ВЛЭП и к частотно-зависимым характеристикам аппаратуры устройств присоединения.

Пример 1. Оценить минимально необходимую позиционность многоуровневой модуляции "аналогового" модема с QAM-сигналом и решетчатым кодированием ТС при транспортировании агрегатного цифрового потока со скоростью передачи $B_{TX} = 16$ кбит/с в полосе частот одного канала аппаратуры ВЧ-связи $\Delta F = 4$ кГц. Определить для предложенного созвездия QAM-М требуемую помехоустойчивость сигнала $A_{з,доп}$ на выходе канала аппаратуры ВЧ-связи для обеспечения достоверности передачи информации не хуже чем $P_{ош,доп} = 10^{-4}$.

В отсутствие полнодоступных сведений и исходных данных о DPLC-аппаратуре (что является ноу-хау любой из энергетических компаний, см., например, технические характеристики системы PLC5000 энергетической группы AREVA T&D [23]) примем верхнюю границу коэффициента сглаживания импульса найквистовской формы равной

$$\alpha_N = 0,2.$$

На основании выражения (8) при условии $\Delta F \approx \Delta F^{QAM+TC} = 4$ кГц определим требуемую позиционность сигнального созвездия М:

$$\begin{aligned} M &= \text{oct} \left[\text{int} \left\{ \frac{B_{TX}}{\Delta F^{QAM+TC}} (1 + \alpha_N) - 1 \right\} \right] = \\ &= \text{oct} \left[\text{int} \left\{ \frac{16000}{4000} (1 + 0,2) - 1 \right\} \right] = 16. \end{aligned}$$

Здесь введены обозначения $\text{oct}[x] = 2^x$; $\text{int}\{x\}$ — оператор округления в сторону увеличения до ближайшего целого кратного четырем значения выражения, стоящего в скобках.

Для выбранного сигнального созвездия амплитудно-фазовой модуляции QAM-16 определим по (9) допустимую защищенность сигнала для обеспечения "оптического" качества связи $BER = 10^{-10}$:

$$\begin{aligned} A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош} = 10^{-10}) &= 16,1 + 10 \lg \frac{M-1}{3} = \\ &= 16,1 + 10 \lg \frac{16-1}{3} = 23,1 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Произведем пересчет по аппроксимации (3) допустимой защищенности сигнала $A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош} = 10^{-10})$ в заданную помехозащищенность $P_{ош,доп} = 10^{-4}$ "аналогового" модема, работающего по одному каналу аппаратуры ВЧ-связи.

$$A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош,доп}=10^{-4}) = \frac{A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош}=10^{-10})}{2} \times \\ \times \{1 + \lg[-\lg(P_{ош,доп})]\} = \frac{23,1}{2} \{1 + \lg[-\lg 10^{-4}]\} = 18,5 \text{ дБ.}$$

Полученные результаты расчета DPLC-системы в полосе одного 4-кГц-канала со скоростью передачи информации 16 кбит/с с помощью 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции КАМ-16 и решетчатым кодированием, действительно, достаточно хорошо коррелируют с декларируемыми техническими характеристиками аппаратуры PLC5000 энергетической группы AREVA T&D [23].

Пример 2. Определить требуемую помехозащищенность системы по DPLC-технологии с модуляцией QAM-64 для организации основного цифрового канала ОЦК (DS0 — Digital Signal 0-level) с достоверностью передачи $P_{ош,доп}=10^{-4}$ в эквивалентной полосе частот четырех каналов аппаратуры ВЧ-связи $4\Delta F=16$ кГц по ВЛЭП.

Убедимся, действительно ли в полосе частот, эквивалентной четырем каналам ТЧ, равной $4\Delta F=16$ кГц, способом модуляции QAM-64 возможна организация основного цифрового канала $B_{DS0}=B_{инф}=16$ кбит/с с введением дополнительной скорости ΔB , отводимой для повышения достоверности передачи. Примем (что широко используется в практических случаях) значение дополнительной скорости передачи известными методами избыточного перемежающегося кодирования кратным 8 кбит/с:

$$\Delta B=8 \text{ кбит/с.}$$

Тогда групповая скорость сформированного агрегатного цифрового потока, равная

$$B_{ТХ}=B_{инф}+\Delta B=64+8=72 \text{ кбит/с,}$$

согласно уравнению (7), будет передаваться "аналоговым" модемом с модуляцией QAM-64 в полосе частот

$$\Delta F^{QAM-64} \equiv \frac{B_{ТХ}}{\log_2 M} (1 + \alpha_N) = \frac{72}{\log_2 64} (1 + 0,2) = 14,4 \text{ кГц,}$$

что, действительно, соответствует эквивалентной полосе частот четырех каналов аппаратуры ВЧ-связи, т. е.

$$4\Delta F = 16 \text{ кГц} > \Delta F^{QAM-64} = 14,4 \text{ кГц,}$$

Для "оптического" качества связи $BER=10^{-10}$ системы по DPLC-технологии с модуляцией QAM-64 допустимая помехозащищенность сигнала, согласно выражению (9), соответствует значению

$$A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош}=10^{-10}) = 16,1 + 10 \lg \frac{M-1}{3} = \\ = 16,1 + 10 \lg \frac{64-1}{3} = 29,3 \text{ дБ.}$$

Аналогично предыдущему примеру, произведем пересчет (3) полученной допустимой защищенности сигнала QAM-64 $A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош}=10^{-10})$ на требуемый уровень достоверности $P_{ош,доп}=10^{-4}$ "аналогового" модема:

$$A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош,доп}=10^{-4}) = \frac{A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош}=10^{-10})}{2} \times \\ \times \{1 + \lg[-\lg(P_{ош,доп})]\} = \frac{29,3}{2} \{1 + \lg[-\lg 10^{-4}]\} = 23,5 \text{ дБ.}$$

Отметим, что полученные расчеты также полностью согласуются с техническими характеристиками аппаратуры Digital PLC модели EBS 2000i корпорации Siemens [24].

Пример 3. Оценить качество цифровой связи в примерах 1 и 2 для DPLC-систем, работающих по воздушным линиям ВЛЭП с действующим напряжением 110 кВ для типовых габаритов при использовании одного провода 4АСО-600 в фазе. Учесть, что для устранения перегрузки линейного усилителя мощности уровень передачи "аналогового" модема устанавливается на 3 дБм ниже нормируемого в точке нулевого относительного уровня 0TLP.

В соответствии с табл. 1 усредненных данных уровень суммарных помех в точке нулевого относительного уровня 0TLP в полосе $\Delta f=1$ кГц для каналов аппаратуры ВЧ-связи, работающей по воздушным линиям ВЛЭП с действующим напряжением 110 кВ, при использовании одного провода 4АСО-600 в фазе равен

$$p_{п0}=-40 \text{ дБм0.}$$

"Аналоговый" модем в примере 1 работает в полосе одного канала аппаратуры ВЧ-связи $\Delta F^{QAM+TC}=3,84$ кГц, а в примере 2 — в полосе четырех каналов — $\Delta F^{QAM-64}=14,4$ кГц. Тогда приведенный уровень шумов для каждого из вариантов в 0TLP (4) равен

$$p_{п0}^{QAM-16+TC}(\Delta F) = p_{п0} + 10 \lg \Delta F^{QAM-16+TC} = \\ = -40 + 10 \lg 3,84 = -34,2 \text{ дБм0}$$

и

$$p_{п0}^{QAM-64}(\Delta F) = p_{п0} + 10 \lg \Delta F^{QAM-64} = -40 + 10 \lg 14,4 = \\ = -28,4 \text{ дБм0,}$$

соответственно.

Определим ожидаемую защищенность (1) при относительном уровне -3 дБм0 передачи "аналогового" модема по мощности в точке 0TLP рассматриваемых вариантов для модуляции QAM-16 с решетчатым кодированием TC —

$$A_{з,ож}^{QAM-16+TC} = p_{с0} - p_{п0}(\Delta F^{QAM-16+TC}) = -3 - (-34,2) = \\ = 31,2 \text{ дБ}$$

и модуляции QAM-64 с перемежающимся кодированием:

$$A_{з,ож}^{QAM-64} = p_{с0} - p_{п0}(\Delta F^{QAM-64}) = -3 - (-28,4) = 25,4 \text{ дБ.}$$

Тогда запас NM (2) ожидаемой в реальных условиях эксплуатации помехоустойчивости сигнала $\Delta A_{зап}$ для каждого из видов модуляции равен:

$$\Delta A_{зап}^{QAM-16+TC} = A_{з,ож}^{QAM-16+TC} - A_{з,доп}^{QAM-16+TC} = 31,2 - 18,5 = \\ = 12,7 \text{ дБ;}$$

$$\Delta A_{зап}^{QAM-64} = A_{з,ож}^{QAM-64} - A_{з,доп}^{QAM-64} = 25,4 - 23,5 = 1,9 \text{ дБ.}$$

Полученные в примере 1 результаты, согласно табл. 2, соответствуют «хорошему» ($NM^{QAM-16+TC}=12,7$ дБ) уровню качества цифровой связи по 5-бальной экспертной оценке ($MOS^{QAM-16+TC}=4,744$) для DPLC-системы с квадратурной амплитудной модуляцией QAM-16 и безыбыточным решетчатым кодированием TC, которая образует в рабочей полосе частот одного канала $\Delta F=4$ кГц аппаратуры ВЧ-связи

цифровой поток со скоростью $B_{TX}=16$ кбит/с при достоверности передачи не хуже чем $P_{\text{ош.доп}}=10^{-4}$. Однако при организации ОЦК с той же достоверностью $P_{\text{ош.доп}}=10^{-4}$ в полосе частот, эквивалентной четырем каналам тональной частоты (ТЧ), равной $4\Delta F=16$ кГц, способом модуляции QAM-64 с введением дополнительной скорости $\Delta B=8$ кбит/с, отводимой для повышения достоверности передачи методом избыточного перемежающегося кодирования (Interleaving), субъективный критерий качества упал до отметки $MOS_{QAM-64}=2,266$, что явно соответствует «неудовлетворительному» уровню качества цифровой связи ($NM_{QAM-64}=1,9$ дБ).

В заключение следует особо отметить, что обобщающие примеры 1—3 относятся исключительно к QAM-Technology так называемого "одноканального" модема, где вся рабочая полоса частот либо одного (пример 1), либо группы из четырех каналов (пример 2) отводится для передачи агрегатных цифровых сообщений. Полученное в первом случае качество связи — «хорошее», а во втором — «неудовлетворительное». Хотя если использовать для второго варианта четыре независимых аналоговых канала (как и в примере 1), в каждом из которых передавался бы 16-килобитный поток DS0/4 на уровне «хорошего» качества, а методом временного гибкого мультиплексирования (временного уплотнения — объединения/разделения цифровых потоков более низкой ступени иерархии) FLEX MUX, то транспортировался бы ОЦК с его агрегатной скоростью $4 \times 16 = 64$ кбит/с, но уже на том же уровне (не худшем, чем «хорошее») качества цифровой связи. Такой метод «многоканального» модема нашел свое непосредственное применение в последней из технологий многотональной модуляции (DMT — Discrete Multi-Tone) [5, 18—21].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bocker P. ISDN: The integrated services digital network — concepts, methods, systems.— Berlin—New York—London: Springer-Verlag, 1992.
2. Durd N. The ISDN subscriber loop.— N.-Y.: Chapman and Hall, 1997.
3. ITU-T, Study Group 15 (Optical and other transport infrastructures). Access Network Transport, <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/com15/ant>.
4. Пантелеев В. В. Организация высокоскоростных цифровых каналов на аналоговой первичной сети связи // Зв'язок.— 1998.— № 1.— С. 32—37.
5. Пантелеев В. В., Громовой А. К. Образование транспорта интегрированной сети доступа на существующей первичной сети электросвязи // Вісник УБЕНТЗ.— 1999.— № 8.— С. 51—55.
6. Курицын Е. М., Малярчук Ю. С., Пантелеев В. В. Пути перехода от аналоговых к цифровым системам ВЧ-связи для высоковольтных линий электропередачи // Моделювання та інформаційні технології.— Київ, 2004.— Вип. 26.— С. 73—81.
7. Микуцкий Г. В. Каналы высокочастотной связи для релейной защиты и автоматики.— М.: Энергия, 1977.
8. Микуцкий Г. В., Шкарин Ю. П. Линейные тракты каналов высокочастотной связи по линиям электропередачи.— М.: Энергия, 1986.
9. Веман Г. В. Передача речи по сетям электросвязи.— М.: Радио и связь, 1985.
10. Chomycz B. Fiber Optic Installations: A Practical Guide, McGraw-Hill Companies, Inc.— 1996.
11. Гамидов Г. С., Пантелеев В. В., Яценко С. Г. Двухпроводное дуплексное устройство преобразования сигналов УПС-64 с эхокомпенсатором // Электросвязь.— 1989.— № 1.— С. 36—39.
12. Брескин В. А., Пантелеев В. В. Адаптивная регенерация цифровых сигналов в проводных ЦСП для абонентских линий // Электросвязь.— 1994.— № 11.— С. 12—14.
13. Pantelev V. V. Estimation's method at most attainable of lengths symmetrical digital subscriber line on xDSL-technologies: engineering-maintenance of the calculation // Inter. Conf. "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science".— Lviv—Slavsko, Ukraine.— 2006.— P. 365—369.
14. Ghamberlin J. W., Hester C. E., Meyers J. J. et al. Design and field test of a 256-QAM DIV modem // IEEE Journal on Selected Areas in Commun.— 1987.— Vol. SAC-5, N 3.— P. 349—356.
15. ITU-T International Recommendations. <http://www.itu.int/rec/T-REC/e>: E.800, G.109, G.902, G.991.1, G.991.2, G.995.1; I.412, I.430, M.3010, P.800, T.38, Y.110, Y.120.
16. ETSI European Standards. <http://www.etsi.org>: TR 102 324, TR 102 269, TR 102 270, TR 102 258, TR 102 259, TR 102 175, TR 102 049, TS 101 896, TS 101 867, TS 101 012, TS 101 135, TS 101 524, TS 101 524-1, TS 101 524-2; TR 101 830-1; ETR 152.
17. ANSI/ATIS (T1) American Standards <http://www.ansi.org>: T1.418-2002, T1.422-2001; T1.TR.28-1994, T1.TR.59-1999; T1.TRQ.06-2001.
18. Аппаратура каналов связи и телемеханики по линиям электропередачи АКСТ «ЛИНИЯ-М-ПУ-ПК» ОАО «Шадринский телефонный завод». http://shtz.shadrinsk.net/pr_akst-m.htm.
19. IEC International Standards. <http://www.iec.ch>: IEC 60353, IEC 60358, IEC 60481, IEC 60495, IEC 60663, IEC 60834-1, IEC 60834-2.
20. Карпишин В. И., Мишляков С. И., Пантелеев В. В. Интеллектуалізація в галузі зв'язку // Вісник УБЕНТЗ.— 2002.— № 1.— С. 34—37.
21. IEEE 802™ Standards Association. <http://standards.ieee.org> IEEE 802.3-2000, IEEE 802.3ab-1999, IEEE 802.3-2002.
22. Карпишин В. И., Мишляков С. И., Пантелеев В. В. Обґрунтування вибору технічних вимог щодо нових технологій транспортування фонових повідомлень у глобальних обчислювальних мережах // Моделювання та інформаційні технології.— Київ, 2005.— Вип. 31.— С. 36—41.
23. Аппаратура PLC5000 группы энергетических предприятий AREVA T&D. http://www.aveva-td.com/servlet/ContentServer?pagename=OpenMarket/Xcelerate/Render&c=AGF_Product&cid=1081165238082&rid=1018348589697&norid=true.
24. Комплект цифровой аппаратуры Digital PLC-Technology моделей POWERLINK, AKE 100 и гибких мультиплексоров PMX 2000/PMX 3000 корпорации Siemens. <http://www.energy-portal.siemens.com>.