Smart Grid

Komunikační sítě pro energetiku

Doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
Katedra telekomunikační techniky
ČVUT v Praze, FEL
vodrazka@fel.cvut.cz
www.comtel.cz

Co je Smart Grid?

- „Smart Grid je elektrická síť, která umí sofistikovaně integrovat veškeré funkce všech připojených zařízení – generátorů i spotřebičů tak, aby byla zajištěna efektivní, ekonomická a bezpečná dodávka elektrické energie“.

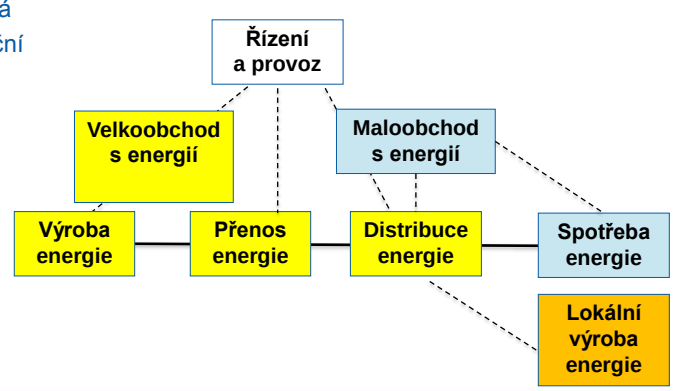
Co rozumíme pod pojmem Smart Grid

- Inteligentní energetické sítě
- Technologie
  - Podpora obousměrného toku energie
  - Vysoká míra podpory ICT
  - Flexibilní řízení sítě
  - Zasíťování odběrných míst za účelem měření, řízení, regulace
- Služby
  - Efektivní podpora alternativních zdrojů energie
  - Podpora inteligentní domácnosti
  - Flexibilní účtování energie
  - Měření jiných typů médií
  - Podpora elektromobility a dalších aplikací

4

Interoperabilita Smart Grid

- Standard IEEE P2030
- Entity sítě
- Definice rozhraní a procesů:
  - Energetická
  - Komunikační
  - Informační



8

Současný stav ICT podpory

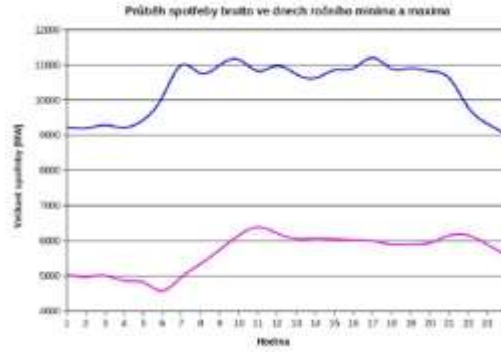
- **Řídicí a dispečerské systémy**
  - Centrála – SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)
- **Vysoký stupeň automatizace:**
  - Elektrárny
  - Rozvodny a transformovny přenosové soustavy
  - Transformovny 110 kV distribuční soustavy
- **Nižší stupeň:**
  - Měřicí body v síti VN
  - Rozpínací stanice v síti VN
- **Odběrné místo** – systémy HDO („noční proud“)
  - Dálkové odečty velkoodběratelů (příp. dodavatelů) energie

Rozšiřování ICT podpory

- **Elektronizace na úroveň Tr VN/NN**
- **Podpora obousměrného toku energie (stabilita)**
- **Decentralizace – Smart Regiony**
  - Ostrovní provoz (omezení dodávky, start ze tmy)
  - Lokální (regionální) zdroje energie
  - Lokální (regionální) řízení
- **AMM (Automated Meter Management)**
  - Inteligentní elektroměry
  - Měření odběru energie, případně dalších médií
  - Ovládání odběrného místa
  - Podklady pro detailní analýzu rozložení spotřeby

Vyrovnávání spotřeby

- **Velké zdroje**
  - Obtížná regulace
- **Alternativní zdroje**
  - Záleží na přírodních podmínkách
- **Akumulace energie**
  - Přečerpávací elektrárny
- **Vyrovnávání spotřeby**
  - Pružné tarify a inteligentní spotřebiče
  - Elektromobilita

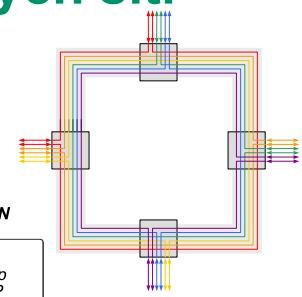


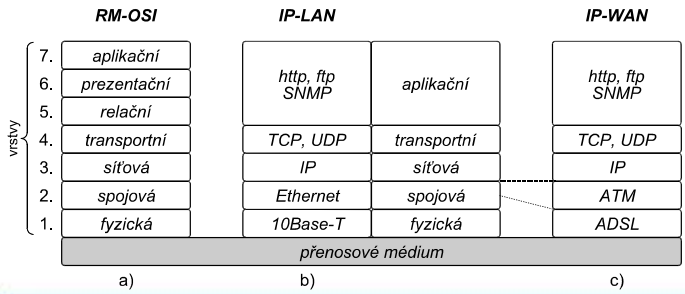
Smart region v ČR

- Oblast Vrchlabí – ČEZ – budováno 2010 – 16
- 2 etapy: Liščí kopec a zbytek Vrchlabí
- Řeší se zejména tyto aspekty:
  - Alternativní zdroje
  - Zapojení kogenerační jednotky (ostrovní provoz)
  - Automatizace na úrovni VN (zálohovaná distribuce)
  - Elektromobilita
  - AMM
  - Dopady na ICT

Možnosti řešení komunikační podpory energetických sítí

- Klasické telekomunikační sítě
- Průmyslové sítě
- Ethernet a TCP/IP





Komunikační síť

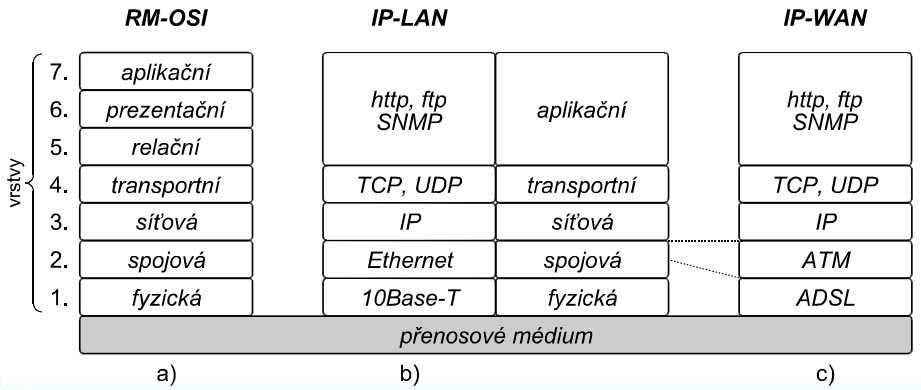
- Uzly (síťové prvky) a spojnice (přenosové cesty)
- Dělení sítí podle rozsahu (Area Network)
  - **PAN** (Personal) – v SG odpovídá domácí síti
  - **LAN** (Local) – v SG odpovídá rozvodům NN, může se dále dělit
    - HAN (Home), BAN (Bussines), IAN (Industrial)
  - **MAN** (Metropolitan) – v SG odpovídá distribuční síti VN ve městech
  - **WAN** (Wide)
    - Přístupová síť (Access) – v SG odpovídá distribuční síti VN
    - Páteřní síť (Backbone) – v SG odpovídá distribuční síti VVN a přenosové soustavě

Způsoby komunikace a přenosu

- **Komunikace**
  - Se spojováním (PCM-TS, X.25–pakety, ATM-buňky)
  - Bez spojování (IP-datagramy)
- **Přenosový mód**
  - Synchronní (STM, TDM)
  - Asynchronní (paketový, ATM, statistický MX)
- **Bitový tok**
  - Arytmický (start-stop)
  - Izochronní (kontinuální)

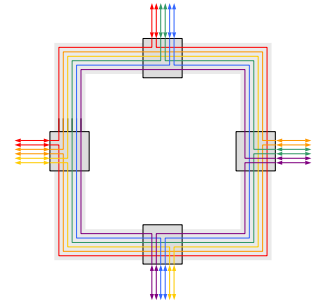
Vrstvové modely komunikace OSI a TCP/IP

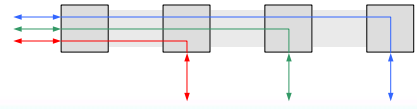
- Datové jednotky (rámce, pakety, segmenty, zprávy)
- Komunikační protokoly (vrstvové, mezivrstvové)



Topologie sítě

- Spojení bod-bod
- Mnohabodová síť
  - Hvězda (Star)
  - Kruh (Ring)
  - Sběrnice (Bus)
  - Polygon (Mesh)





Přenosová média

Radiový kanál

- **mobilní sítě**
  - **GSM/GPRS, UMTS, LTE**
- **družicová komunikace**
- **FWA, WiFi, WiMAX**

Metalické vedení

- **symetrické páry**
  - **telefonní přípojky – xDSL**
  - **sítě LAN Ethernet**
- **koaxiální kabely**
  - **CATV**
  - **původní LAN**
- **energetická vedení**
  - **PLC, PDSL**

Optické prostředky

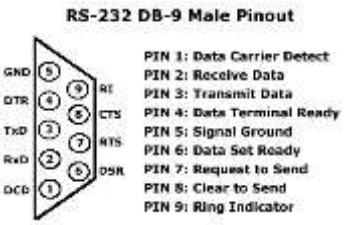
- **optická vlákna**
  - **SDH, OTH, Ethernet**
- **směrové spoje - FSO**

Průmyslová rozhraní

- Požadavky:
  - Spolehlivost komunikace
  - Obvykle více bodů – sběrnice
- „Klasická“ datová rozhraní RS-232, 422, 485
- Sběrnice
  - Fieldbus
  - Profibus
  - Modbus

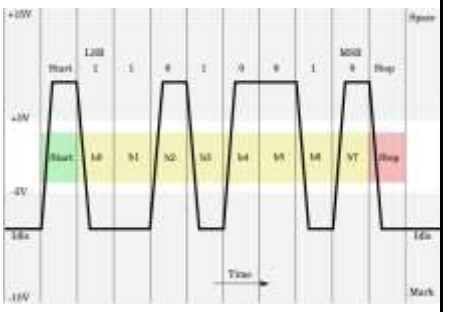
Rozhraní RS-232

- Datové rozhraní bod – bod DCE-DTE (modem-terminál)
- „Sériový“ port PC
- Doporučení ITU-T V.24/V.28
- Konektor 25 pinů/9 pinů
- Vysílání a příjem
- Řídicí obvody rozhraní



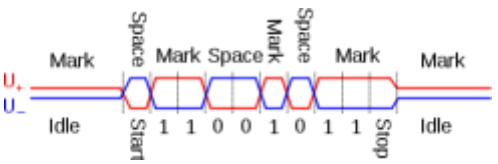
Rozhraní RS-232

- Asynchronní přenos dat
  - 300 Bd až 19,2 Bd
  - Rozšířeno do 115,2 kbit/s
- Značky start-stop
- ASCII znaky 7 bitů + parita
- Bipolární signál
- Úrovně napětí naprázdno
  - ±5 V, ±10 V, ±12 V, ±15 V
- HW řízení toku RTS/CTS
  - Request to send/Clear to send



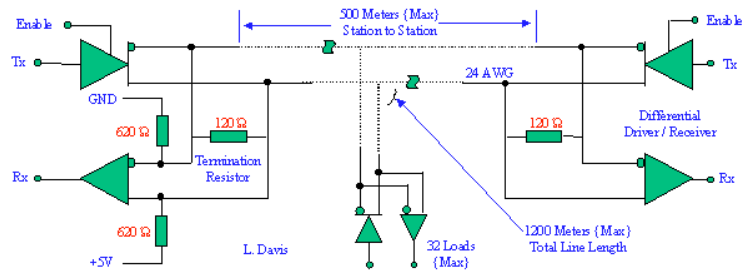
Rozhraní RS-422

- Symetrické rozhraní dle ITU-T V.11
- Maximální úrovně −6V až +6V (0,3 V práh)
- Rychlost 0,1 až 10 Mbit/s
- Asynchronní / synchronní přenos – obvody taktu

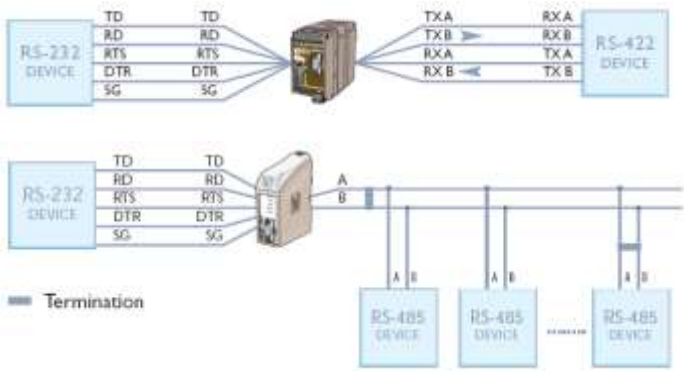


Rozhraní RS-485

- Vychází z RS-422
- Sběrnice (2 nebo 4 drát)
  - mnohabodová komunikace master-slave
  - Impedanční přizpůsobení na koncích vedení



Konvertory rozhraní



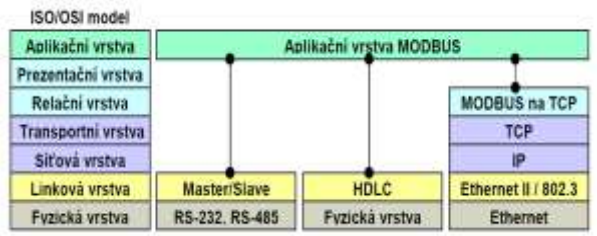
- Také se používají médi-konvertory na optické vlákno
  - Galvanické oddělení
  - Prodloužení dosahu

Průmyslové sběrnice

- **Fieldbus** - IEC 61158 – více typů a variant
  - **Typ 1 - Foundation Fieldbus H1 (RS-485)**
  - Typ 2 – ControlNet (koax.)
  - **Typ 3 – Profibus**
  - Typ 4 - P-Net
  - **Typ 5 - HSE (High Speed Ethernet)**
  - Typ 6 – SwiftNet (Boeing)
  - Typ 7 – WorldFIP
  - Typ 8 - Interbus

Průmyslové sběrnice

- **Profibus** (Process Field Bus) – RS-485, optika
  - 9 kbit/s až 12 Mbit/s (100 m až 1,2 km, 80 km)
  - Přístup k médiu - Token ring, komunikace master-slave
- **Modbus** – varianta RS-485, Ethernet, TCP/IP
  - HDLC (High-level Data Link Control)



Základní úkoly telekomunikačních přenosových systémů

- Přenos na požadovanou vzdálenost (regenerace signálu)
- Přizpůsobení přenosovému médiu
- Sdružování přenášených signálů (FDM, TDM, WDM)
- Pomocné funkce:
  - Distribuce taktovacího signálu
  - Přenos služebních signálů
  - Zajištění spolehlivosti přenosu
  - Dohled nad kvalitou přenosových cest
  - Management sítě

Hierarchie telekomunikačních přenosových systémů

- Od TDM …….k WDM

PDH

E1 2 Mbit/s
E2 8 Mbit/s
E3 34 Mbit/s
E4 140 Mbit/s

SDH (SONET)

STM-0 52 Mbit/s
STM-1 155 Mbit/s
STM-4 622 Mbit/s
STM-16 2,5 Gbit/s
STM-64 10 Gbit/s
STM-256 40 Gbit/s

Ethernet

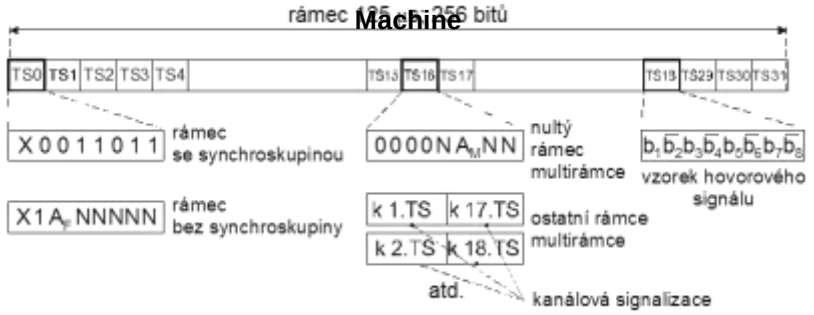
10 Mbit/s
100 Mbit/s
1 Gbit/s
10 Gbit/s
40 Gbit/s
100 Gbit/s

OTH

OTM-n.1 n x 2,5 Gbit/s
OTM-n.2 n x 10 Gbit/s
OTM-n.3 n x 40 Gbit/s
OTM-n.4 n x 100 Gbit/s

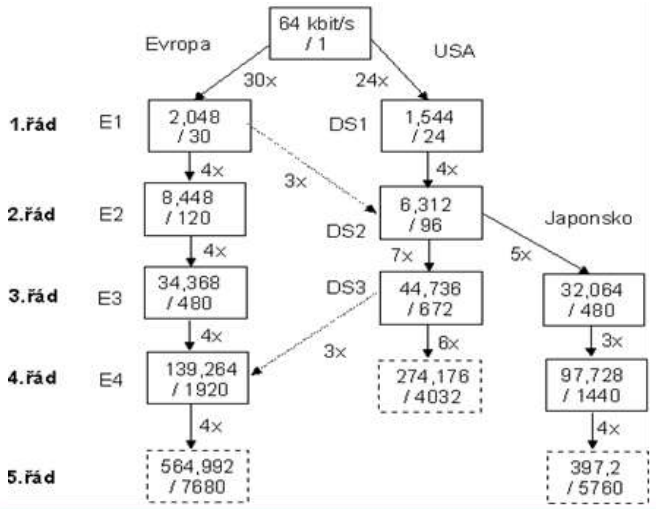
Digitální tok PCM 1. řádu

- Původně digitální telefonie (300-3400 Hz), data n x 64 kbit/s (n x TS)
- PCM 30/32 (ITU-G.704 + CRC – G.706), časoprostorové spojování
- E1 – 2048 kbit/s (ITU-T G. 703), linkový kód HDB-3
- PCM30, PCM30C, PCM31, PCM31C, -- PCM24



Plesiochronní digitální hierarchie

- PDH
- Volné prokládání po bitech
- Vyrovnávání přenosových rychlostí
- Rozdíly USA/ Evropa

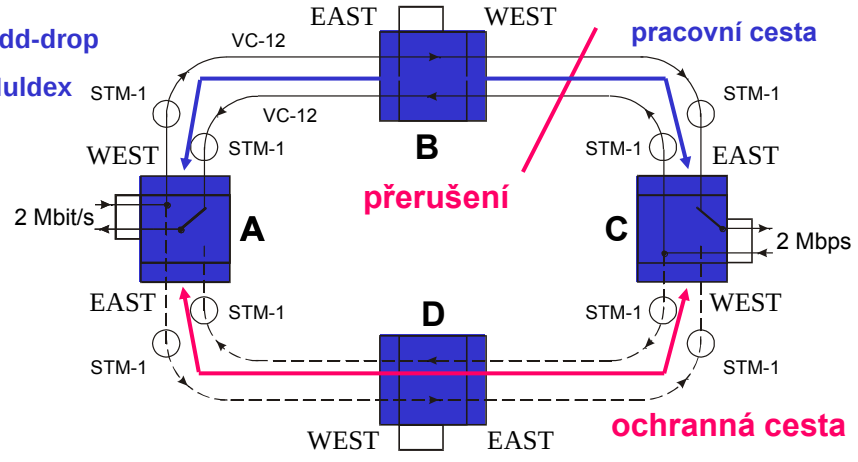


SDH - kruhová topologie

ADM

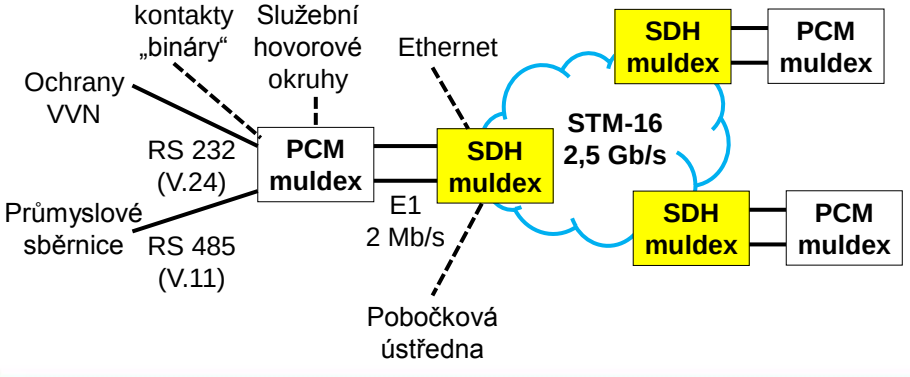
Add-drop

Muldex

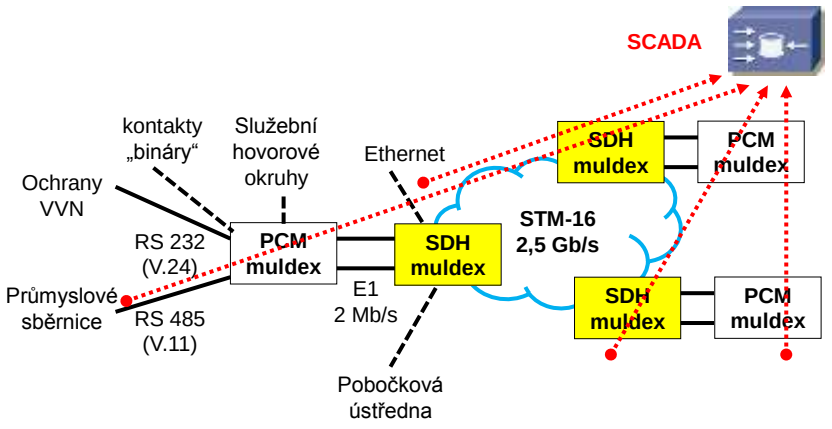


PCM/PDH/SDH v průmyslovém prostředí

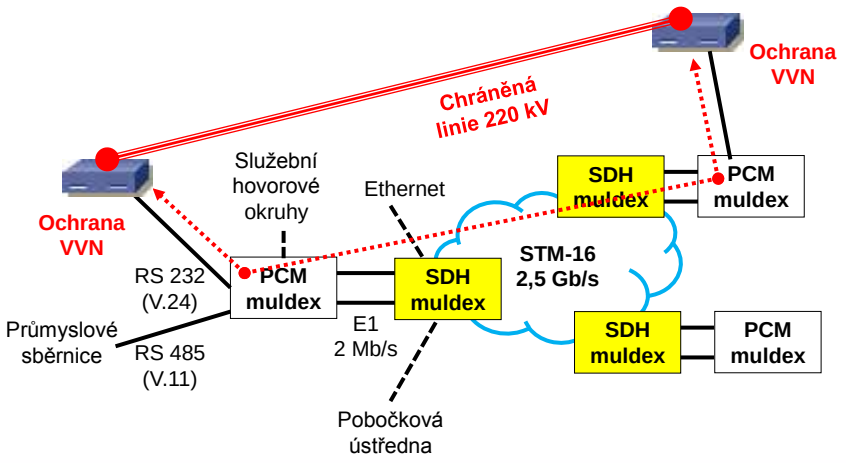
- Vysoká spolehlivost, léty ověřeno, nízké přenosové zpoždění
- Vyhrazená přenosová kapacita, oddělení toků (bezpečnost)



PCM/PDH/SDH – sběr dat do centrály



PCM/PDH/SDH – komunikace rozdílových ochran VVN

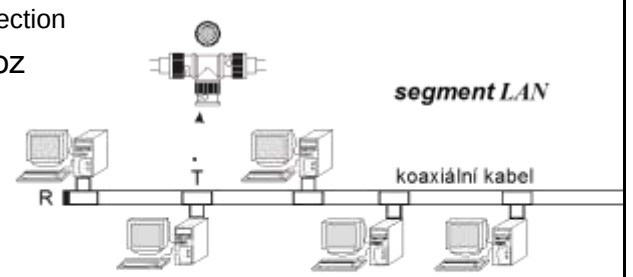


Ethernet - Skupina IEEE 802

- **Institute of Electrical and Electronics Engineers**
- **skupina 802: standardy pro lokální sítě**
  - 802.3 CSMA/CD (Ethernet)
  - 802.5 Token Ring
  - 802.11 bezdrátové sítě WLAN
  - 802.16 bezdrátové sítě WMAN
- **Podvrstvy spojové vrstvy**
  - **LLC** – Logical Link Control (802.2)
  - **MAC** – Medium Access Control, konkrétní technologie
- **Fyzická vrstva**

Historická východiska Ethernetu

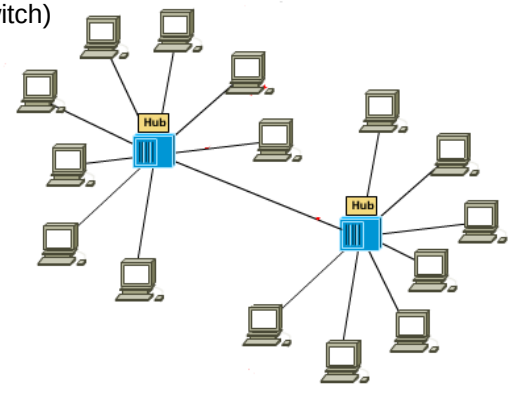
- **Lokální síť LAN**
  - sdílené médium (sběrnicová topologie – koaxiální kabel)
- Přístupová metoda **CSMA/CD**
  - **CS** – Carrier Sense
  - **MA** – Multiple Access
  - **CD** – Collision Detection
- Poloduplexní provoz



T – T rozbočovač
R – zakončovací zátěž 50 ohmů ("terminátor")

Vývoj technologie Ethernet

- Topologie hvězda
  - spoje bod-bod PC-Hub (Switch)
  - symetrické páry UTP/STP
- Přepínané sítě
  - duplexní přenos
  - vyšší propustnost
- Zavedení tříd služeb
  - garance QoS
- Virtuální sítě VLAN
- Využití napříč WAN



Rámec Ethernet

Rámec Ethernet

Preambule / Start	DA	SA	Type	Data MAC	FCS
8	6	6	2		4

- Ethernet rámec
  - **preambule**: 10101010...10101011
  - cílová adresa DA (Destination Adress)
  - zdrojová adresa SA (Source Adress)
  - **typ**: druh přepravovaných dat (Ethernet 2)
  - **délka**: délka nesených dat (IEEE 802.3)
  - kontrola chyb FCS (CRC)
  - IFG (InterFrame Gap) – 10M bez signálu, výše - 12 bajtů 1010..

Adresní pole

- **48 bitů** - 6 dvojic HEX - např.: 00-02-C3-67-A8-3F
- celosvětově jednoznačné
  - první polovinu přiděluje výrobci centrální autorita
  - druhou polovinu přiděluje výrobce a ručí za její jednoznačnost
- Adresa odesílatele:
  - Vždy adresa vysílající stanice
- Cílová adresa:
  - Unicast - adresa jediné cílové stanice
  - Multicast - adresa skupiny cílových stanic
  - Broadcast - všeobecné oslovení všem stanicím (FF FF FF FF FF FF)

52

Rozhraní 10 Mbit/s

- Přenos v základním pásmu
- **10BASE-5**
  - Max. délka segmentu 500 m, 1024 stanic
  - Medium: tlustý koaxiální kabel
  - Topologie: sběrnice
- **10BASE-2**
  - Max. délka segmentu 185 m
  - Medium: tenký koaxiální kabel
  - Topologie: sběrnice
- **10BASE-T**
  - Max. délka segmentu 100 m
  - Medium: symetrický pár (UTP Cat 3, 4, 5)
  - Topologie: strom

53

Rozhraní 100 Mbit/s

- IEEE 802.3u (1995)
- **100BASE-Tx**
  - Max. délka segmentu 100 m
  - Medium: symetrický pár (UTP Cat 5, STP type 1)
- **100BASE-Fx**
  - Max. délka opt. vlákna
    - Full duplex 2000 m
    - Half duplex 412 m
  - Medium: multimodové optické vlákno

54

Rozhraní 1 Gbit/s

- **1000BASE-T**
  - IEEE 802.3ab
  - Max. délka segmentu 100 m
  - Medium: symetrický pár (UTP Cat 5 a lepší, 4 páry)
  - Full duplex
- **1000BASE-X**
  - IEEE 802.3z
  - Max. délka vlákna 5000 m
  - Medium: optické vlákno
    - singlemod (LX)
    - multimod (LX i SX)
  - Full duplex

55

Rozhraní 10GbE

- Ethernet 10 Gbit/s IEEE 802.3.ae
  - 10GBASE-SR – MM 850 nm, 300 m, LAN
  - 10GBASE-SW – MM 850 nm, 300 m, WAN
  - 10GBASE-LR – SM 1310 nm, 10 km, LAN
  - 10GBASE-LW – SM 1310 nm, 10 km, WAN
  - 10GBASE-ER – SM 1550 nm, 40 km, LAN
  - 10GBASE-EW – SM 1550 nm, 40 km, WAN
  - 10GBASE-LX4 – MM (300 m), SM (10 km), WDM-4 kolem 1310 nm, 8B/10B

R – kód 64B/66B

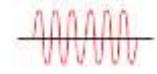
W – WIS – WAN Interface Sublayer – rámcování STM-64

Průmyslový Ethernet

- Dlouhá životnost a spolehlivost
- Zvýšená odolnost
  - EMC
  - Přepěťová ochrana
  - Rozsah provozních teplot
    - Vnitřní prostředí 0 - 70°C, krytí IP20
    - Vnější prostředí -20 - 80°C, krytí IP67
  - Mechanické namáhání (montáž 19“ a na DIN lištu)
  - Galvanické oddělení
  - Zálohování napájení
  - Zálohování komunikace
  - Šifrování – zvýšená ochrana proti kyberútokům

Testy odolnosti

- Působení silných magnetických polí (EMC/EMS)
- Napájecí napětí
  - Přepětí a napěťové pulsy
  - Elektrická pevnost proti zemi AC/DC
- Signálová rozhraní
  - Elektrická pevnost AC/DC
    - signálových vodičů mezi sebou
    - signálové vodiče proti zemi
    - signálové vodiče proti napájení
  - Napěťové pulsy
- Vyzařování – limity EMC/EMI



Prvky do extrémních podmínek

- Provedení „Military“
- Odolnost proti vlhkosti
- Zvláštní typy konektorů
  - metalické
    - M12D
    - IP67 RJ45
  - Optické
    - IP67 LC

Prvky průmyslového Ethernetu

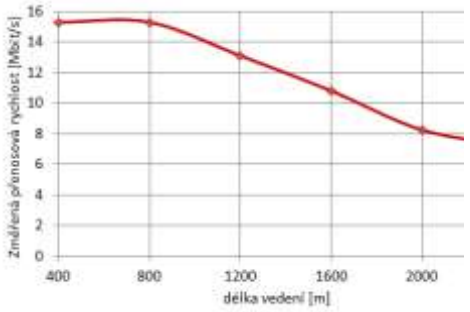
- Rozhraní
  - Metalická 100 Mbit/s
  - Optická 100/1000 Mbit/s
  - Metalická SHDSL, VDSL
  - RS 232/485, průmyslová síť WiFi
- Topologie
  - Hvězda
  - Linie
  - Kruh
- Synchronizace, SyncE, PTP

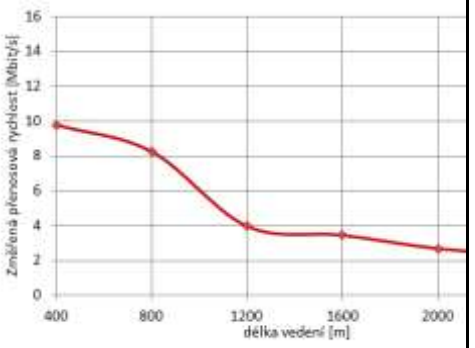
Síť většího dosahu

- Linie pro podporu rozvodu energie apod.
- Kombinace optického vlákna a metalického vedení

Využití metalických rozhraní

- SHDSL rozhraní
- Rozšíření pásma oproti ITU-T G.991.2 – až 15 Mbit/s na pár
- TCEPKPFLE 75x4x0,4, bílý šum, rušení ETSI B





Porovnání TDM vs. pakety

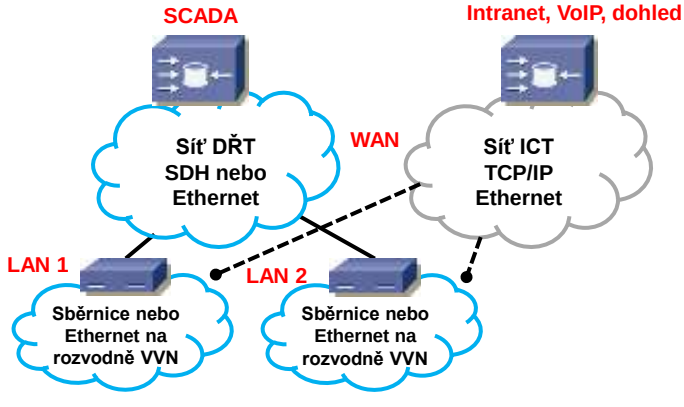
	SDH	Ethernet
multiplexování	po bajtech	po rámcích
rozsah rychlostí	52 M – 40 Gbit/s	10 M – 100 Gbit/s
oddělení provozu	striktní – cesty VC	VLAN, priority QoS
sdílení provozu	omezené - LCAS	statistické multiplexování
škálovatelnost	omezená - VCAT	vysoká
monitorování a dohled	SOH, POH	OAM rámce
zálohování	APS, SNCP, MSSPRing	STP, E-APS, Ethernet Ring
synchronizace	výběr taktu SEC	PTP, SyncE, EEC

Přechod k TCP/IP/Ethernet

- Konvergence sítí (VoIP, IPTV)
- Telekomunikační sítě nové generace NGN
- Průmyslové sběrnice Ethernet
- Standardy
  - Ochrana a automatizace rozvoden - IEC 61850 – Ethernet
    - Využití VLAN dle IEEE 802.1Q
    - Využití QoS dle IEEE 802.1P
    - Topologie hvězdy nebo kruhu
    - Zprávy GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) IEC 61850-8-1
  - Komunikace mezi řídicími centry - IEC 60870-5-104 TCP/IP

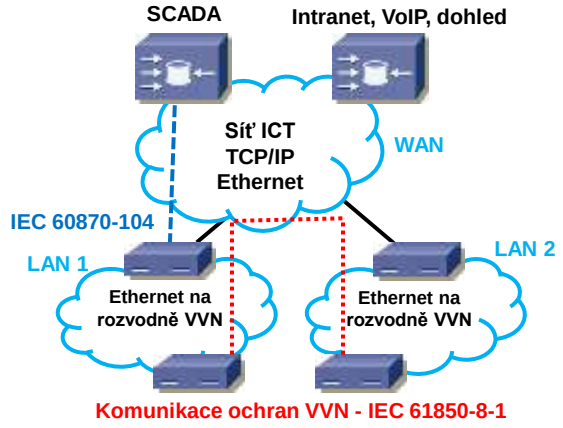
67

Hierarchie sítě – oddělené řízení a ICT

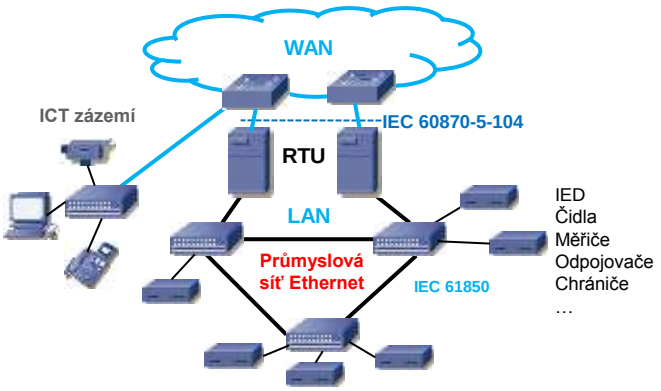


68

Konvergovaná síť



LAN na rozvodně



Hierarchie v Smart Grid

DŘS – centrální řízení

- WAM síť
- Datacentrum (zálohováno)

LŘS – regionální řízení SR

- MAN
- Ostrovní provoz
- Vazby na sousední SR

TS přenosové a distribuční soustavy

- Průmyslová LAN
- Subsystémy ochran

Dvě strany konvergence

Úspora nákladů	• Média, zařízení, řízení, údržba sítě
Nutnost řešit QoS při sdílení toků a prostředků sítě	• Zpoždění, ztrátovost, spolehlivost, bezpečnost • Rizika kybernetických útoků!
Striktní fyzické oddělení – LAN průmyslové sítě	• Realizovatelné bez větších nákladů
Fyzické či virtuální oddělení – MAN a WAN	• Fyzické oddělení je značně nákladné

Příklad kritérií QoS

Parametr		Klasifikace			
		4	3	2	1
1	Zpoždění	4 ms	20 ms	200 ms	2000 ms
2	Propustnost	20 Mbit/s	2 Mbit/s	0,2 Mbit/s	0,02 Mbit/s
3	Ztrátovost paketů	0,01 %	0,1 %	1 %	10 %
4	Spolehlivost	99,999 %	99,99 %	99,9 %	99 %
5	Bezpečnost	Velmi vysoká (přísně tajné)	Vysoká (předmětem obchodního tajemství)	Střední (důvěrné)	Nízká (veřejné informace)

Zajištění QoS

- Poskytovatel komunikačních služeb musí zajistit odpovídající stupeň **SLA** (Service Level Agreement) podle typu služby
  - Řízení
    - Kritická přenosy pro ochrany a řízení rozvoden VVN
    - Monitorování a dohledy
  - Telemetrie
    - Měření na rozhraních soustav
    - AMM
  - Data
    - Kritická data mezi datovými a aplikačními centry
    - Podpora obchodování s energií
    - Běžné ICT služby (kancelářské aplikace, telefonie, web)

AMM – sběr dat z elektoměrů

- Advanced Metering Management
- Smart Metering
- **Nejen měření - i ovládání odběrných míst**
  - Možnost řízení spotřeby, ovládání tarifů
  - Inteligentní spotřebiče a domácnost
- Bezpečnost a spolehlivost
- **Mnoho koncových bodů**
  - Koncentrátory
  - Bezdrátové technologie GSM/GPRS, ZigBee, RF
  - PLC

85

AMM a EU

- Zavedení chytrých elektroměrů dle EU
- **Vize 20-20-20**
  - Osazení 80% odběrných míst chytrými elektroměry do roku 2020
  - Členské státy - analýza AMM do 2. pol. 2012
  - snížení emisí s povolenkami o 20%
  - dosažení 20% podílu obnovitelných energií v EU

86

Přínosy AMM

Distribuce

- vyhledávání poruch a výpadků
- spolehlivost a efektivita distribuce
- optimalizace zatížení

Obchodník

- nabídka nových tarifů a nových doplňkových služeb
- aktivní zapojení zákazníka

Spotřebitel

- aktivní zapojení, možnosti výběru tarifů a úspora el. energie
- zvýšení komfortu
- informovanost o vlastních tocích spotřeby

88

Hierarchie v AMM

Odečtová centrála

- Vazba na obchodníky, fakturaci
- Vazba na distribuci, hlášení poruch apod.

Koncentrátory dat

- Možnost agregace, dočasného ukládání
- Možnost vazby na lokální řízení (SR)

Elektroměry

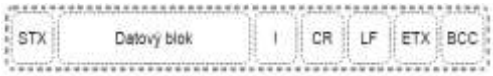
- Elektroměr s lokálním rozhraním IR
- Komunikační jednotka

89

Lokální vyčítání dat

- Infračervené rozhraní (IR) – EN 62056-21
  - Sériová asynchronní komunikace (připojení přes RS 232)
  - Základ 300 Bd, typicky 4,8 nebo 9,6 kBd
  - Obecný dotaz

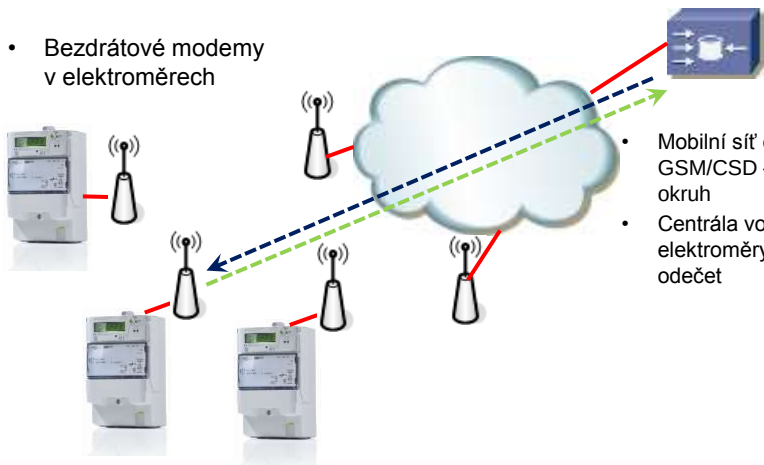
  - Datový blok



  - Protokol se může použít i pro dálkové čtení (např. GSM/CSD)

Příklad řešení s přímou bezdrátovou komunikací - CSD

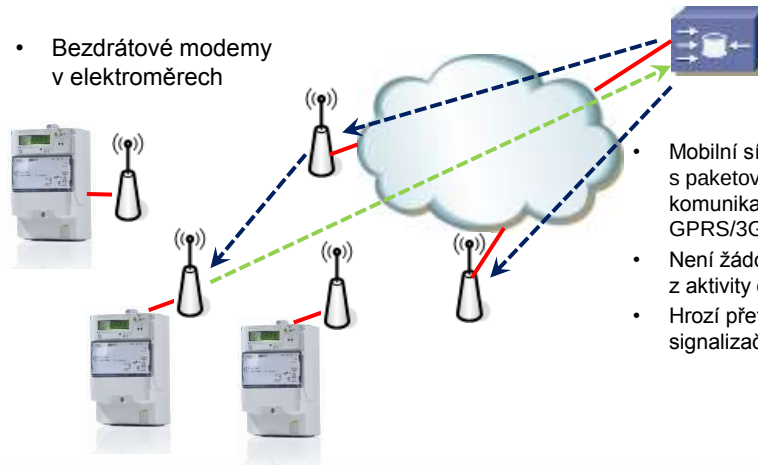
- Bezdrátové modemy v elektroměrech



- Mobilní síť operátora GSM/CSD – datový okruh
- Centrála volá elektroměry a žádá odečet

Příklad řešení s přímou bezdrátovou komunikací - GPRS

- Bezdrátové modemy v elektroměrech

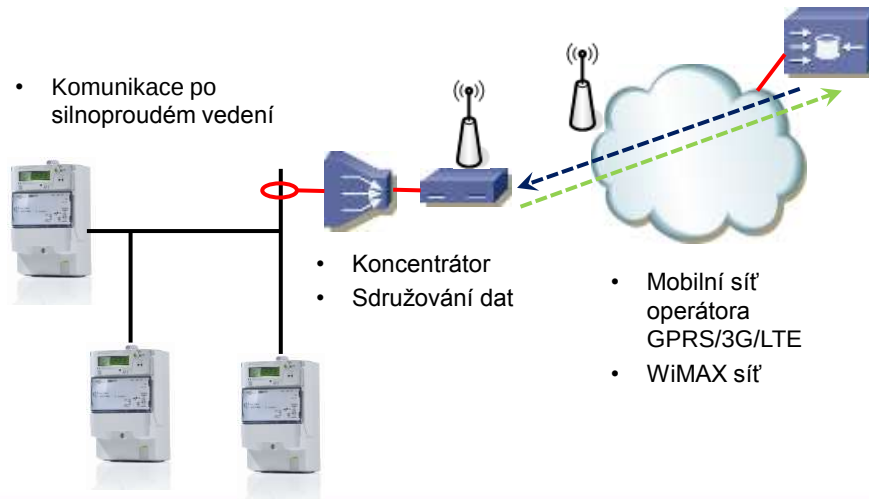


- Mobilní síť operátora s paketovou komunikací GPRS/3G/LTE
- Není žádoucí odečet z aktivity centrály
- Hrozí přetížení signalizační sítě

92

Příklad řešení s PLC

- Komunikace po silnoproudém vedení



- Koncentrátor
- Sdružování dat

- Mobilní síť operátora GPRS/3G/LTE
- WiMAX síť

93

Parametry přenosového prostředí

- Útlum vedení A
- S – signál (střední výkon)
- N – šum (střední výkon)
- SNR – poměr - odstup S/N
- Logaritmické poměrové jednotky deci-Bell

Veličina	Hodnota	Výkon
Vysílaný signál	0 dBm	1 mW
	10 dBm	10 mW
	20 dBm	100 mW
Útlum	10 dB	10x nižší
	20 dB	100x nižší
Přijímaný signál	-10 dBm	0,1 mW
Šum	-30 dB	0,001 mW
SNR	20 dB	100

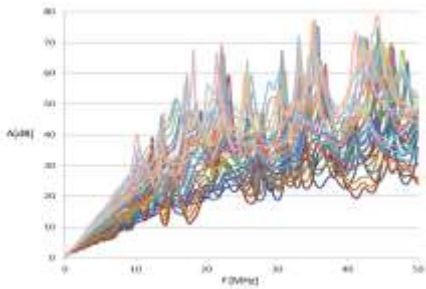
$$A = 10.\log\frac{P_{in}}{P_{out}} = L_{m-in} - L_{m-out} \ldots [dB; W, W]$$

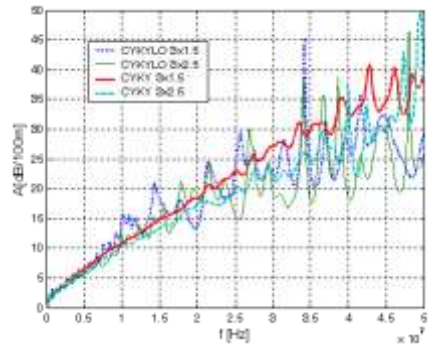
$$L_m = 10.\log\frac{P_x}{1mW} \ldots [dBm; W]$$

95

Vlastnosti silového vedení

- Pro vyšší oblasti kmitočtů (BPL)
- Nehomogenity, odrazy
- Teplotní závislost (30 až 100°C)





96

Modelování parametrů

$$\alpha(f) = k_1\sqrt{f} \qquad \alpha(f) = k_1 \cdot \sqrt{f} + k_2 \cdot f$$

- Sekundární parametry vedení
  - Měrný útlum [dB/km] …. útlum vedení $A = \alpha \,.\, l$ [dB]
  - Měrný fázový posuv [rad/km]
  - Charakteristická impedance [Ω] –impedanční přizpůsobení

$$\beta(f) = b \cdot f = \frac{2\pi}{v} f = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}}{c} f \qquad Z_c(f) = z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

97

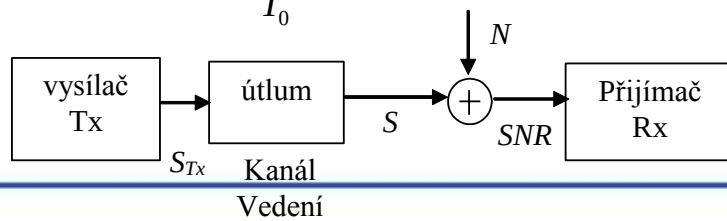
Kapacita kanálu

- S – signál (střední výkon)
- N – šum (střední výkon)
- SNR – odstup S/N

$$C_i = B.\log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)...[bit/s; Hz, W, W]$$

- Kapacita kanálu podle Shannona (teoretická informační propustnost)
- v_p – přenosová rychlost v bit/s
- v_m – modulační, též symbolová rychlost [Bd] (doba trvání symbolu T_0)
- M - počet úrovní digitálního signálu (stavů modulace)

$$v_p = v_m \cdot \log_2 M = \frac{\log_2 M}{T_0} \quad [\text{bit /s}]$$



98

Informační propustnost

- Teoretická informační propustnost v bit/s se získá podle Shannona z poměru SNR pro frekvenčně závislý kanál

$$C_i = \int_0^B \log_2\left(1 + \frac{S(f)}{N(f)}\right) df$$

- *B* - šířka pásma v Hz
- *S(f)* - spektrální hustota výkonu přijímaného signálu
- *N(f)* - spektrální hustota výkonu šumu na vstupu přijímače

Reálná rychlost - alokace bitů pro modulaci s více nosnými (OFDM – DMT)

Počet bitů na i-té nosné
Počet stavů modulace $M=2^{bi}$

$$b_i = \log_2\left(1 + \frac{SNR_i(f)}{k_b}\right)$$

- k_b - Shannon Gap - pro bitovou chybovost 10^{-7} vychází hodnota k_b = 9,55 (9,8 dB)
- šumová rezerva (Noise Margin) 6 dB - k_b = 38,02
- SNR + 3 dB … přidání jednoho bitu
- Kódový zisk (použitím korekce chyb)

$$v_p = \sum_i v_{pi} = v_m \sum_i b_i$$

Modulační rychlost pro ADSL a VDSL2 - 4 kBd (šířka subkanálu 4,3125 kHz)
Modulační rychlost pro PRIME- 400 Bd (šířka subkanálu 488 Hz)

Komunikace po silovém vedení

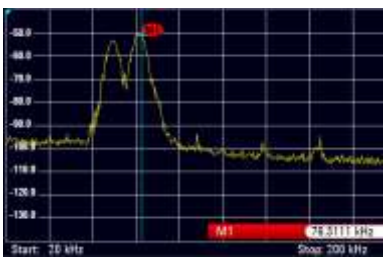
- **Úzkopásmová** (PLC, NPL, NB-PLC)
  - 4 pásma dle normy CENELEC 50065-1
  - Jednotky až desítky kbit/s

Pásmo	Kmitočtový rozsah [kHz]	Poznámka
A	3 - 95	pro účely dodavatele elektrické energie
B	95 - 125	pro privátní účely odběratelů
C	125 - 140	jen pro odběratele - vyžadován protokol o přistoupení k dohodě
D	140 - 148,5	pro privátní účely odběratelů

- **Širokopásmová** (BPL)
  - Jednotky až desítky MHz
  - Mbit/s až do 1 Gbit/s
- Vnější / vnitřní (adaptéry v LAN)
- Podle **napěťové hladiny**
  - NN – řešení LAN, sběr dat z elektroměrů (AMM)
  - VN / VVN – signalizace a povely z trafostanic

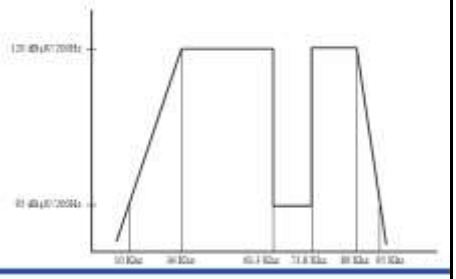
První generace PLC

- Fyzická vrstva IEC 61334-5-1 - modulace FSK
  - Frekvence f_M = 63,3 kHz a f_S = 74 kHz + / - 0,5%
  - Přijímané efektivní hodnoty napětí mezi 2 mV a 2 V
  - Modulační rychlost 2,4 kBd
- Alternativně
  - D-BPSK (Differential Binary Phase Shift Keying)
  - Typicky modulační rychlost 10 kBd



Druhá generace PLC

- Modulace OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)
  - Specifikace PRIME (PoweRline Intelligent Metering Evolution)
  - Technologie G3 - ERDF France
- Rozdíly v přístupové metodě, adresaci, opravě chyb, zabezpečení
- Obdobné řešení fyzické vrstvy
- Snahy o sjednocení NB-PLC
  - Spektrální masky
  - ITU-T G.9955 – fyzická vrstva
  - ITU-T G.9956 – spojová vrstva



Druhá generace PLC

	PLC G3	PRIME
Frekvenční pásmo	35-91 kHz	42-89 kHz
Vzorkovací frekvence	400 kHz	250 kHz
Počet subkanálů	256	512
Délka cyklické předpony	30	48
Metoda okna	ano	No
Sub-kanálová rozteč	1,5625 kHz	488 Hz
Počet použitých subkanálů	36	97
Zabezpečení FEC	Reed-Solomon, konvoluční kód	Konvoluční kód
Prokládání	po datových paketech	po OFDM symbolech
Modulace	DBPSK, DQPSK	DBPSK, DQPSK, D8PSK
Differenční kódování	v časové oblasti	ve frekvenční oblasti
Max. velikost paketu	235 B	2268 B
Max. přenosová rychlost	33,4 kb/s	128,6 kb/s
Délka ochranného intervalu	0,035 ms	0,192 ms

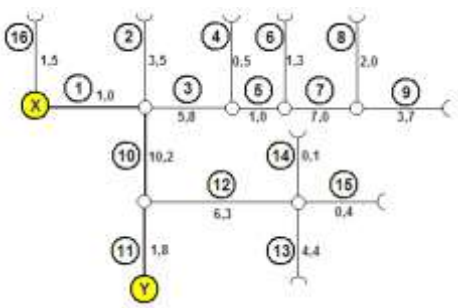
Komunikace BPL

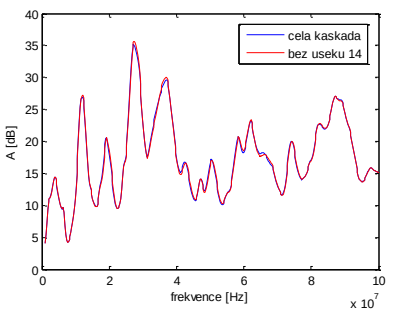
- ITU-T G.hn (G.996x) - Home network
  - Motivací je řešit sjednocení specifikací pro domácí sítě
    - IEEE 1901
    - HomePlug
    - HomePlug AV2
    - MoCA (Coax Alliance)
  - Aplikuje se i v AMM
  - Rychlost až 1 Gbit/s
  - OFDM (až 4096-QAM)
  - Rozteč subkanálů 24 kHz
  - Korekce chyb - LDPC (Low Density Parity Check)
  - Kódový poměr 1/2, 2/3 až 16/15
  - Problém vyzařování – limity EMC

Parametr	Standard		
	Home Plug 1.0	Home Plug AV	OPERA
Přenosová rychlost [Mbit/s]	až 14	až 200	až 205
Frekvenční pásmo [MHz]	4,5 - 21	2 - 28	3 - 34
Modulace	OFDM	OFDM	OFDM
Počet subpásem	84	917	1536

Přenosové médium

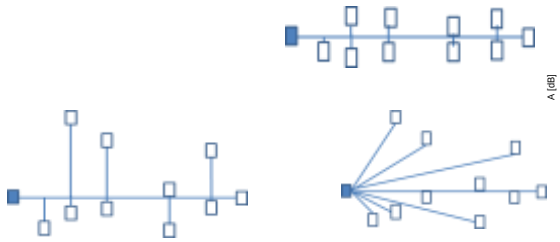
- Rušení, vysoký útlum, odrazy na odbočkách

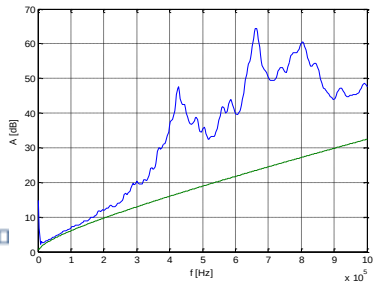


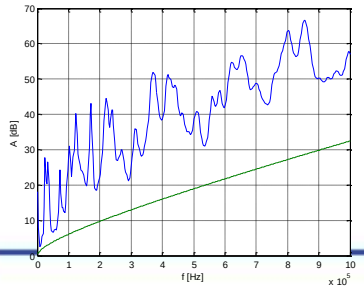


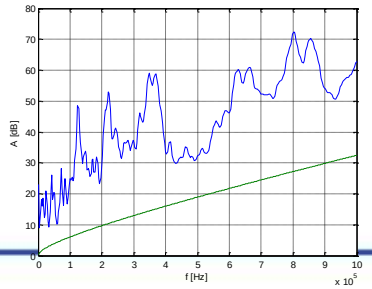
Modelování komunikace po VN

- Modelové topologie









Protokoly pro AMM

- OBIS kódy (OBject Identification System) – pro rozsáhlou škálu odečítaných údajů (datové položky)
- Komunikace DLMS/COSEM
  - DLMS (Device Language Message Specification)
  - COSEM (COmpanion Specification for Energy Metering)
    - IEC 62056-42: fyzická vrstva DLMS
    - IEC 62056-46: spojová vrstva DLMS (HDLC)
    - IEC 62056-53: aplikační vrstva DLMS (COSEM)
  - Relace dle jazyka ASN.1 - k přehlednému zápisu se používá jazyk XML (Extensible Markup Language)
  - Komunikace typu **klient-server** (elektroměr je server)

Připojení vzdálených bodů

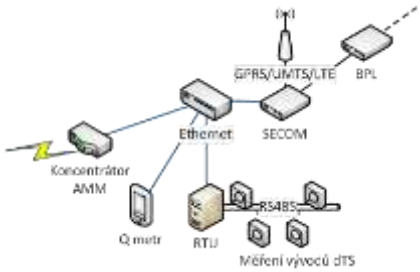
- Telemetrie, sledování, sběr dat
- Bezdrátové technologie ZigBee (senzorové sítě)
  - Průmyslová síť Wi-Fi (LAN)
  - Průmyslová síť WiMAX (MAN)
  - Mobilní sítě GPRS/3G/LTE (WAN)
- Zvýšené požadavky
  - Obecné pro průmysl
  - Bezpečnost (šifrování)
  - Spolehlivost (zálohování přes dvě sítě)

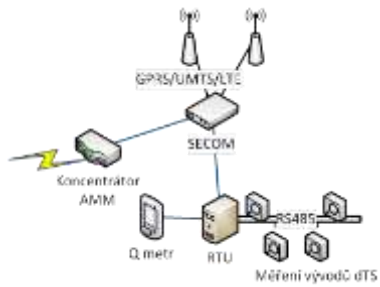
Zálohování a zvyšování propustnosti

- Řešení pro navýšení přenosové rychlosti a spolehlivosti
- Inverzní multiplex na IP vrstvě
- Paketový regulátor pro optimalizaci zpoždění

Příklad připojení dTS VN

- Zálohování komunikace po VN vedeních
- Zálohování komunikace pomocí sítí dvou mobilních operátorů





Prostor pro dotazy

- vodrazka@fel.cvut.cz
- www.comtel.cz
- access.feld.cvut.cz
- matlab.feld.cvut.cz