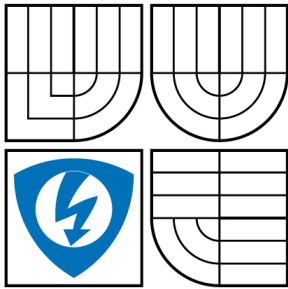


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# PŘENOS DAT PO ROZVODNÝCH ELEKTRICKÝCH SÍTÍCH

DATA TRANSMISSION OVER DISTRIBUTION POWER NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

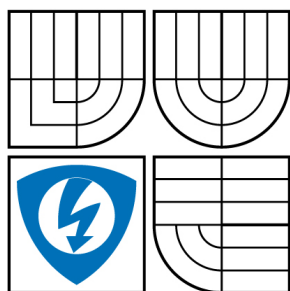
FILIP VAŠÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VÁCLAV ZEMAN, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

## Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Teleinformatika

**Student:** Vašíček Filip

**ID:** 37339

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2007/2008

### NÁZEV TÉMATU:

**Přenos dat po rozvodných elektrických sítích**

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a popište funkci systémů pro vysokorychlostní datovou komunikaci po energetické síti. Rozeberte vlastnosti použitých technologií. Zaměřte se především na širokopásmové systémy PLC. Navrhněte koncepci laboratorní sítě, která umožní provádět zkušební měření a demonstraci tohoto způsobu komunikace.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Feibel, W. Encyklopedie počítačových sítí, Computer Press, 1996, ISBN 80-85896-67-2.

[2] Kirwan, S., South, G. Power Line Networking Technologies Broadband Potential. Dostupné na <http://glasnost.itcarlow.ie/~net4/kirwans/bband.html>. 2003.

**Termín zadání:** 11.2.2008

**Termín odevzdání:** 4.6.2008

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Filip Vašíček  
Bytem: Souhrady 4, 62500, Brno - Bohunice  
Narozen/a (datum a místo): 22.9.1979,

(dále jen "autor")

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

## Článek 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Přenos dat po rozvodných elektrických sítích

Vedoucí/školitel VŠKP: doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě - počet exemplářů 1
- elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## **ANOTACE**

Tato práce se zabývá přenosem dat po rozvodných elektrických sítích se zaměřením na širokopásmové systémy. V práci je uvedeno rozdělení PLC systémů, přiblíženy jsou vlastnosti PLC technologie a prvků PLC sítě, popsána je topologie sítě. Jsou zde také představeny dva nejpoužívanější systémy: HomePlug a DS2. Další část obsahuje rozbor síťové architektury, zejména fyzické vrstvy, vysvětlena je ochrana přenosu dat před chybami a metoda OFDM. Analyzovány jsou i další vrstvy síťového referenčního modelu, mechanismus kvality služeb a šifrování dat pomocí AES. Pozornost je věnována problematice standardizace PLC systémů, elektromagnetické kompatibility a popisu mezinárodního projektu OPERA. V praktické části je zpracován návrh laboratorní PLC sítě s prvky systému Defidev/DS2. Funkčnost sítě byla ověřena měřením rychlosti přenosu dat na fyzické i aplikační vrstvě.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

PLC technologie, rozvodná elektrická síť, přenos dat, technologie DS2, návrh sítě

## **ABSTRACT**

This thesis brings together information about the data transmission over distribution power networks with a view to the broadband systems. The division of PLC systems is mentioned and the principle and characteristics of PLC technology are described. I was also interested in topology and a description of elements of PLC network. There are presented the two most frequently used systems: HomePlug and DS2. Next section contains an analysis of network architecture, especially the physical layer. The protection of data against errors and the OFDM method are described. There are also analyzed other layers of the network reference model, the mechanism of quality of services and the data encryption using AES. I was also focused on the issues of standardization of PLC, the electromagnetic compatibility and a description of the international project OPERA. In the practical part is processed the concept of the laboratory PLC network with elements of the system Defidev/DS2. Functionality of the network has been tested by measuring of the bit rate on the physical and application layer.

## **KEYWORDS**

PLC technology, distribution power network, data transmission, DS2 technology, network design

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Přenos dat po rozvodných sítích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. června 2008

.....  
podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Václavu Zemanovi, Ph.D., za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne 4. června 2008

.....  
podpis autora

## **PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK**

3DES	Triple Data Encryption Standard
4D-TCM	Four Dimensional Trellis Coded Modulation
ABR	Available Bit Rate
ACK	Acknowledgement
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
BH	Burst Header
BPL	Broadband over Power Lines
CAC	Connection Admission Control
CBC-MAC	Cipher Block Chaining Message Authentication Code
CBR	Constant Bit Rate
CCMP	Counter Mode with CBC-MAC Protocol
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CFI	Canonical Format Indicator
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
CPE	Customer Premises Equipment
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CTR	Counter Mode
DES	Data Encryption Standard
DS2	Design of Systems on Silicon
DSL	Digital Subscriber Line
EMC	Electromagnetic Compatibility
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FDR	Frequency Division Repeater
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FIPS	Federal Information Processing Standards
FMN	Flow Master Nodes
HE	Head-End
HURTO	High Ultra Reliable Transmission for OFDM
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IPTV	Internet Protocol Television
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
MIC	Message Integrity Check
MPDU	MAC Protocol Data Unit
NMS	Network Management System
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPERA	Open PLC European Research Alliance
OVLAN	Optimized VLAN
PB	Previous Bridge

PLC	Power Line Communication
PLW	Padding Last Word
PN	Packet Number
PSD	Power Spectral Density
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QC	QoS Controller
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RS	Reed Solomon
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STP	Spanning Tree Protocol
TA	Token Announce
TCI	Tag Control Information
TCM	Trellis Coded Modulation
TDMA	Time Division Multiple Access
TDR	Time Division Repeater
TPID	Tag Protocol Identifier
UPA	Universal Powerline Association
VBR	Variable Bit Rate
VLAN	Virtual Local Area Network
VoIP	Voice over Internet Protocol
VPN	Virtual Private Network
WAN	Wide Area Network



ÚVOD.....	10
1 TECHNOLOGIE PLC.....	11
1.1 Přenosové médium PLC .....	11
1.1.1 Rušení v silovém vedení.....	12
1.2 Topologie PLC sítě.....	13
1.3 Prvky PLC sítě.....	14
1.4 HomePlug .....	15
1.5 Technologie DS2 .....	15
2 SÍŤOVÁ ARCHITEKTURA .....	16
2.1 Fyzická vrstva.....	17
2.1.2 OFDM (Ortogonalní frekvenčně dělený multiplex).....	21
2.2 Vrstva řízení přístupu k médiu (MAC vrstva).....	22
2.2.1 Formát rámce.....	22
2.3 Vrstva řízení logického spoje (LLC vrstva) .....	24
2.3.1 Schéma potvrzování .....	24
2.4 Konvergenční vrstva.....	25
2.5 Přemostňující funkce (Bridging).....	26
2.6 Vrstva řízení sítě.....	26
2.7 Mechanismus kvality služeb.....	27
2.8 Šifrování a integrita dat .....	28
3 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA.....	30
3.1 Mezinárodní standardizace v oblasti PLC .....	30
4 PROJEKT OPERA .....	31
5 KONCEPCE LABORATORNÍ SÍŤE .....	33
5.1 Struktura sítě.....	33
5.2 Zařízení Defidev/DS2.....	35
5.3 Praktické testy .....	36
6 ZÁVĚR.....	41
LITERATURA .....	42

## ÚVOD

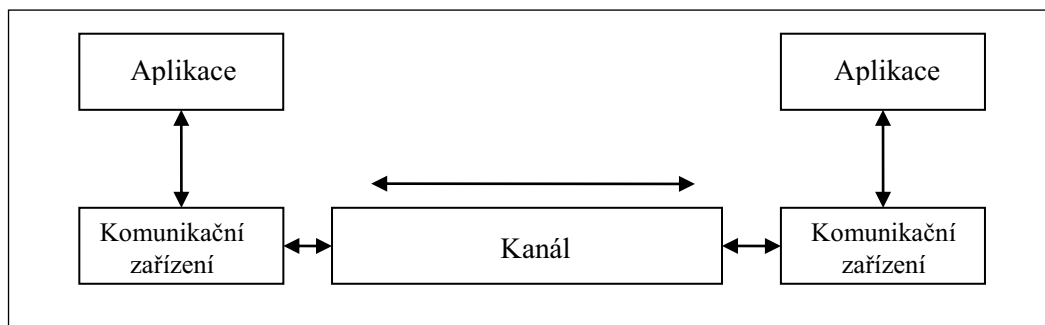
V posledních letech se datové sítě stávají důležitým a nepostradatelným prostředkem ve všech oblastech lidské činnosti. Používají se pro přístup ke zdrojům informací, pro přenos dat a souborů, pro sdílení aplikací i pro sdílený přístup k síťovým zařízením. Většinou bývá požadována vysoká rychlost spojení a při plánování sítě je nutno zvážit několik činitelů, z nichž asi nejdůležitější je velikost datového přenosu a s tím související otázka ceny instalace a hardwaru odpovídajícího druhu sítě, která pokrývá dané potřeby. Řešení datových sítí prostřednictvím systémů PLC (Power Line Communication), které využívají elektrických rozvodů, má v těchto případech velké možnosti využití, vycházející ze skutečnosti, že není potřeba žádné dodatečné budování nových přenosových sítí.

Základy technologie PLC sahají až k začátku dvacátého století, kdy se začaly používat první úzkopásmové systémy, které sloužily k hromadnému dálkovému ovládní [1], [9]. Později se vývoj začal soustředit na oblast automatického distribuovaného řízení a na systémy pro dálkový odečet. Změna nastala v 90. letech, kdy se výzkum zaměřil na oblast širokopásmových přenosů. Přestože některé společnosti v této oblasti ustoupily od dalšího vývoje, technologie zaznamenala i v dalším období velký rozvoj. PLC technologie tak vytvořila další variantu k jiným technologiím (WiFi, DSL) používaným pro distribuci dat.

Tato práce shrnuje současné poznatky o přenosu dat po energetické síti a zaměřuje se na širokopásmové systémy. V úvodní části práce je uvedeno rozdělení PLC systémů, přibližují princip a vlastnosti této technologie, topologii a prvky PLC sítě a uvádím zde dva nejpoužívanější systémy HomePlug a DS2. Druhá část obsahuje analýzu síťové architektury, zejména fyzické vrstvy, ale popsány jsou i další vrstvy síťového referenčního modelu a mechanismy kvality služeb a zabezpečení. V další části se zaměřuji na problematiku normalizace systémů PLC, na elektromagnetickou kompatibilitu a na popis mezinárodního projektu OPERA, jehož cílem je standardizace uzavřených řešení různých výrobců týkajících se technologie PLC. Poslední část popisuje navrženou laboratorní síť s prvky systému Defidev/DS2, která umožňuje realizovat komunikaci a zkušební měření po rozvodné síti.

## 1 TECHNOLOGIE PLC

PLC systémy se obecně neliší od jiných telekomunikačních systémů (obr. 1). V aplikaci je přes uživatelské rozhraní iniciována požadovaná služba. Komunikační zařízení zpracuje požadavek a přenáší signál komunikačním kanálem k cílové aplikaci.



Obr. 1: Schéma popisující telekomunikační systém [20]

PLC systémy můžeme rozdělit do dvou skupin podle využívaného pásma:

- pásmo do 150 kHz (úzkopásmové PLC), které využívají provozovatelé distribučních sítí na řízení elektrické sítě;
- širokopásmové systémy PLC používající frekvence mezi 2 až 34 MHz.

Dále se budu zabývat širokopásmovými systémy. Takto lze PLC vymežit ve dvou formách:

- dálkové PLC (pro překlenutí tzv. poslední míle);

Jedná se o propojení lokality, kde se vyskytuje koncový uživatel, s místem vzdáleným několik kilometrů, kde své služby nabízí poskytovatel služeb.

- domovní PLC (pro překlenutí tzv. posledního metru);

V případě, že je internetová konektivita přivedena až do oblasti, kde se uživatel nachází, jedná se o rozvedení tohoto připojení v objektu k místu, kde je instalováno konkrétní koncové zařízení uživatele (směrovač, počítač).

### 1.1 Přenosové médium PLC

Přenosovým médiem pro PLC je energetická síť. Tato síť se skládá z přenosové a distribuční soustavy. Přenosová soustava je systém zařízení, která zajišťují přenos elektrické energie od elektráren k rozvodnám (tato část sítě se pro PLC nepoužívá). Část

od rozvodu k jednotlivým uživatelům se nazývá distribuční soustava. Střídavé napětí při přechodu mezi jednotlivými napěťovými hladinami se mění v transformátorech.

Přenos dat po rozvodné síti spočívá na vysílací straně v injektování datového signálu namodulovaného na nosnou vyšší frekvence do energetického vedení, a v galvanickém oddělení datového signálu na straně přijímače [16]. Uživatelé připojení na stejný transformátor sdílejí dostupnou kapacitu kanálu, a proto je potřeba rovněž zajistit bezpečnost komunikace prostřednictvím šifrování dat. Většina výrobců se zabývá vývojem technologií, které jsou schopny signálem pokrýt oblast sítě s nízkým napětím.

### 1.1.1 Rušení v silovém vedení

Rušení je jedním z nejvýraznějších problémů datových přenosů po elektrické síti. Elektrorozvodné sítě jsou navrženy na rozvod elektrické energie při frekvenci 50 Hz. Použití tohoto přenosového média na komunikaci při vyšších frekvencích představuje značné technické problémy. Energetické sítě obvykle obsahují různé druhy vodičů zakončených zátěžemi s měnící se impedancí. Taková síť má velmi nerovnoměrnou frekvenční amplitudovou a fázovou charakteristiku. Na některých frekvencích může signál přicházet do přijímače s velmi malými ztrátami, zatímco na jiných frekvencích může být potlačený na úroveň šumu. Charakteristiky přenosového kanálu se mohou značně měnit v závislosti na čase, protože se mění impedanční poměry v síti se změnou připojené zátěže. Komplikacím s rušením lze předejít použitím vyšších kmitočtů pro přenos signálu, tím se ale zase zvyšuje jeho útlum. Proto se pro realizaci komunikace po elektrické síti o vyšších rychlostech musí volit správná rovnováha při volbě přenosového kmitočtu s maximální silou signálu za současného udržení útlumu signálu na nízké úrovni.

Rušení v PLC je vyvoláno především spotřebiči zapojenými nedaleko přijímače a skládá se z následujících šumů [5], [15]:

Šum na pozadí – nachází se v síti pokaždé, jeho spektrální výkonová hustota PSD (Power Spectral Density) se zmenšuje s rostoucí frekvencí. Tento šum vzniká skládáním více zdrojů rušení nižší intenzity. V rozsahu řádově od desítek Hz do 20 kHz jsou hodnoty PSD vysoké.

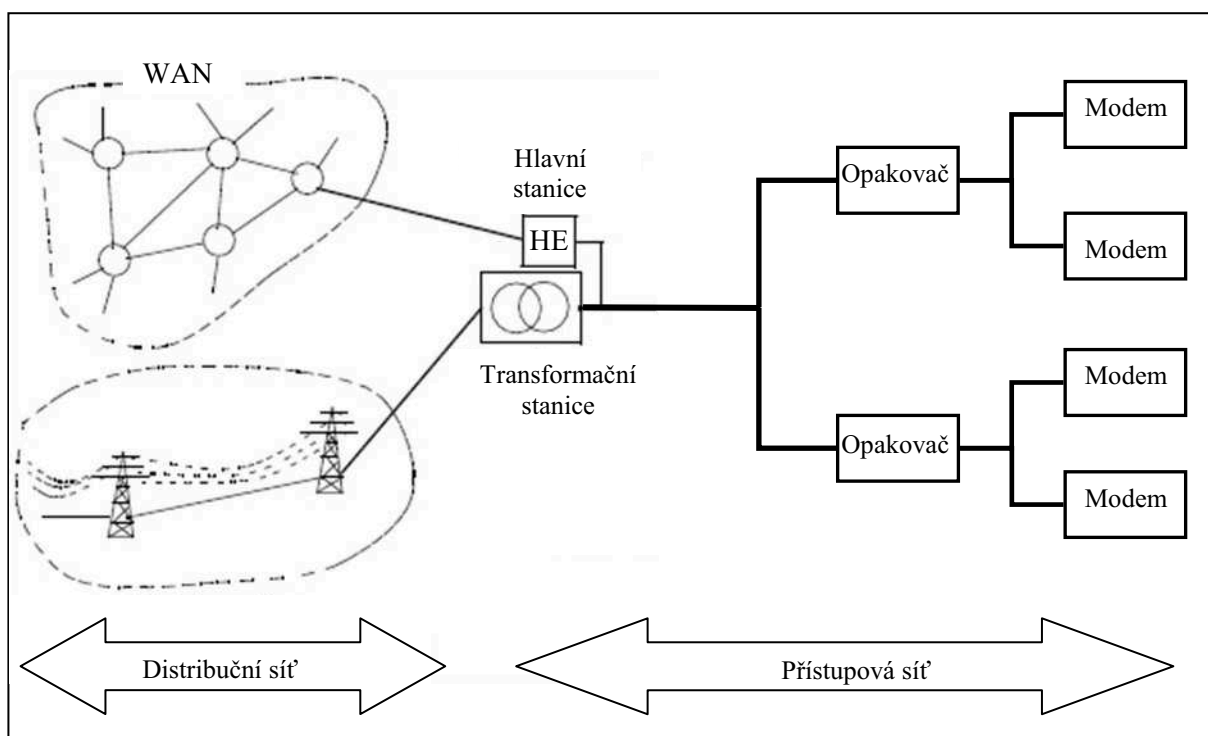
Úzkopásmový šum – průběh má sinusový tvar s vysokou PSD. Na frekvencích do 150 kHz šum způsobují zejména spínané procesy, měniče frekvence, zářivky, televize a počítačové monitory. Na vyšších frekvencích toto rušení pochází od rozhlasových stanic vysílajících v pásmu středních a krátkých vln.

Impulsní šum – tento šum způsobují spínané zdroje, tyristorové regulátory nebo kolektorové elektromotory. Je charakteristický krátkými napěťovými špičkami o délce trvání od jednotek do stovek  $\mu\text{s}$ , někdy až do jednotek  $\text{ms}$ , které běžně dosahují úrovně PSD o 10 dB, někdy až o 50 dB více než šum na pozadí.

## 1.2 Topologie PLC sítě

Základní uspořádání PLC sítě je na obr. 2, kde jsou znázorněné hlavní části sítě a zařízení PLC. Širokopásmová komunikace po elektrické síti zahrnuje dva typy komunikačního systému:

- distribuční sítě vysokého napětí,
- přístupové sítě nízkého napětí.



**Obr. 2: Základní topologie sítě PLC**

Distribuční síť vzájemně připojuje transformační stanice, ve kterých jsou instalována PLC zařízení. Na toto připojení se využívá přímo rozvodná síť vysokého napětí, může se však realizovat i různými jinými technologiemi, jako např. optickým vláknem, rádiovými prostředky, jejich vzájemnou kombinací v závislosti na požadavcích na přenosovou kapacitu. Topologie distribuční sítě PLC může mít lineární strukturu, typická je ale kruhová struktura, při které se okruh sítě vysokého napětí připojuje na datovou síť vyšší úrovně (páteřní síť), realizovanou zpravidla na optických vláknech. Kruhová struktura

poskytuje vyšší stupeň zabezpečení, kdy v případě poruchy na vedení může být příslušná část sítě PLC zásobovaná napájením z jiné transformační stanice.

Přístupová síť připojuje koncová zařízení, kterými mohou být modemy PLC nebo jiná účastnická zařízení, přes vedení nízkého napětí s hlavní stanicí, která zprostředkovává připojení na distribuční síť vysokého napětí. Hlavní stanice se zpravidla instaluje v transformační stanici a její součástí je také vazební jednotka, kterou se převede vysokofrekvenční signál PLC z vedení vysokého napětí. Přístupová síť zahrnuje rozvodné vedení v budově a v některých případech také venkovní rozvod nízkého napětí po transformační stanici. Topologie této části sítě bývá stromová.

### 1.3 Prvky PLC sítě

Soubor koncových zařízení a opakovačů komunikujících s jednou hlavní stanicí tvoří buňku PLC. PLC buňka se skládá z těchto prvků [23]:

Head-End (HE) – je centrální uzel, který řídí celou PLC buňku. Stanovuje prostředky pro všechny uzly v buňce podle požadavků QoS. Je vždy nadřazený jakémukoliv uzlu, se kterým je spojen a propojuje WAN síť s PLC sítí. Přivedenou internetovou konektivitu převádí s pomocí vazebních členů na elektrickou síť.

Opakovač (Repeater) – používá se pro zesílení vysokofrekvenčního signálu. Opakovače rozdělují přístupovou síť na několik segmentů. Používají se dva typy:

- opakovač v časové oblasti TDR (Time Division Repeater) – jeden časový slot je použitý na přenos v rámci segmentu první sítě a další slot pro druhý segment sítě;
- opakovač ve frekvenční oblasti FDR (Frequency Division Repeater) – opakovač přijme přenášený signál na frekvenci  $f_1$ , který zesílí a vkládá ho do sítě na frekvenci  $f_2$ .

CPE (Customer Premises Equipment) – koncový uživatelský modem, zařízení které slouží pro zpětný převod vysokofrekvenčního signálu z elektrické sítě na ethernetové rozhraní.

Dalším potřebným prvkem jsou vazební členy, které se používají pro přivedení vysokofrekvenční modulace na elektrický rozvod. Tyto prvky se dělí na induktivní a kapacitní. Induktivní vazební členy se používají pro připojení centrálního uzlu na nízkonapěťový rozvod. Jsou to dělená feromagnetická nebo železná jádra tvořící vysokofrekvenční transformátor, který přenesou vysokofrekvenční signál na elektrické vedení. Kapacitní vazební členy (malé vazební vysokonapěťové vysokofrekvenční kondenzátory) se používají pro koncové modemy.

## 1.4 HomePlug

Pro instalaci PLC sítě je možné použít několik dostupných technologií, nejpoužívanější jsou technologie HomePlug a DS2.

HomePlug moduly (adaptéry) jsou zařízení pro propojení menšího množství počítačů přes rozvody elektřiny v rámci budovy. Jsou založeny na čipu Intellon, vyrábí je více výrobců a jejich parametry jsou v základu stejné. Výchozím předpokladem rozšíření těchto zařízení bylo, že se prosadil průmyslový standard HomePlug 1.0, který v roce 2001 vytvořilo sdružení HomePlug Powerline Alliance [18]. Tato specifikace využívá systém OFDM v kmitočtovém pásmu 4,5 až 21 MHz, a realizuje komunikaci rychlostí maximálně 14 Mbps. Pásmo 0 až 25 MHz je rozděleno do 128 kanálů, z nichž do daného pásma patří 84 kanálů. V roce 2005 přijalo toto sdružení nový standard HomePlug AV zabezpečující přenos multimediálního obsahu. Fyzická vrstva poskytuje rychlost až 200 Mbps a pracuje v kmitočtovém pásmu 2 až 28 MHz, které je rozděleno na 917 subpásem. Připravuje se další standard HomePlug Access BPL, který se týká přístupových částí sítě.

## 1.5 Technologie DS2

V rámci Evropy má velký význam španělská společnost DS2. Pro budování komunikačních sítí touto technologií jsou určena zařízení, která vyrábí pouze licencovaní partneři DS2. Zařízení jsou postavena na dvou typech čipsetů, na digitálním modelu DSS90xx a analogovém rozhraní DSS7700 [17], [25]. Oba obvody dosahující na fyzické vrstvě přenosové rychlosti až 200 Mbps, používají systém OFDM s 1536 nosnými v kmitočtovém pásmu 2 až 34 MHz. V říjnu 2007 společnost DS2 oznámila, že vyvinula technologii další generace, díky níž je možné po elektrických rozvodech přenášet data rychlostí až 400 Mbps.

Typy čipsetů DS2:

DSS7700 obsahuje sadu zesilovačů s řízeným ziskem, nízkým šumem a malým zkreslením. Je optimalizován pro OFDM s vysokou hustotou nosných frekvencí. Umožňuje volitelně snižovat výkon na každé z nosných frekvencí, používá se v PLC zařízeních s čipy DSS90xx.

DSS9001 je určen především pro realizaci CPE zařízení. Tento čip obsahuje tabulku pro maximálně 64 MAC adres.

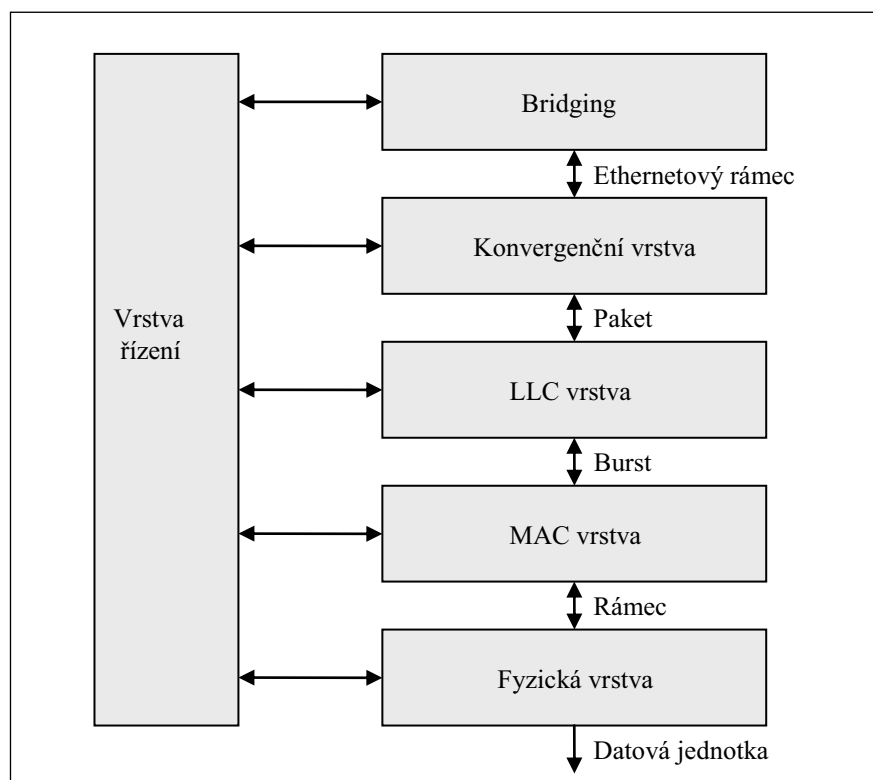
DSS9002 je výkonný čip pro tvorbu PLC zařízení přístupových sítí poslední míle (HE, opakovače). Je určen především pro použití na elektrických rozvodech nízkého napětí. Obsahuje tabulku pro maximálně 1024 MAC adres.

DSS9003 – umožňuje zpracovat přes 260 tisíc MAC adres, má dva gigabitové Ethernet porty s optickým rozhraním. Je určen pro výrobu HE komunikujících po rozvodech vysokého napětí, které jsou připojeny na páteřní sítě, nebo pro výrobu opakovačů umístěných mezi sítěmi vysokého a nízkého napětí.

## 2 SÍŤOVÁ ARCHITEKTURA

Síťová architektura je založena na vrstevném modelu, kde se síťové funkce potřebné pro komunikaci mezi koncovými systémy logicky sdružují do vrstev tak, že funkce každé vrstvy využívá služeb nejbližší nižší a poskytuje své služby nejbližší vyšší úrovni.

PLC používá následující síťový referenční model [8]:



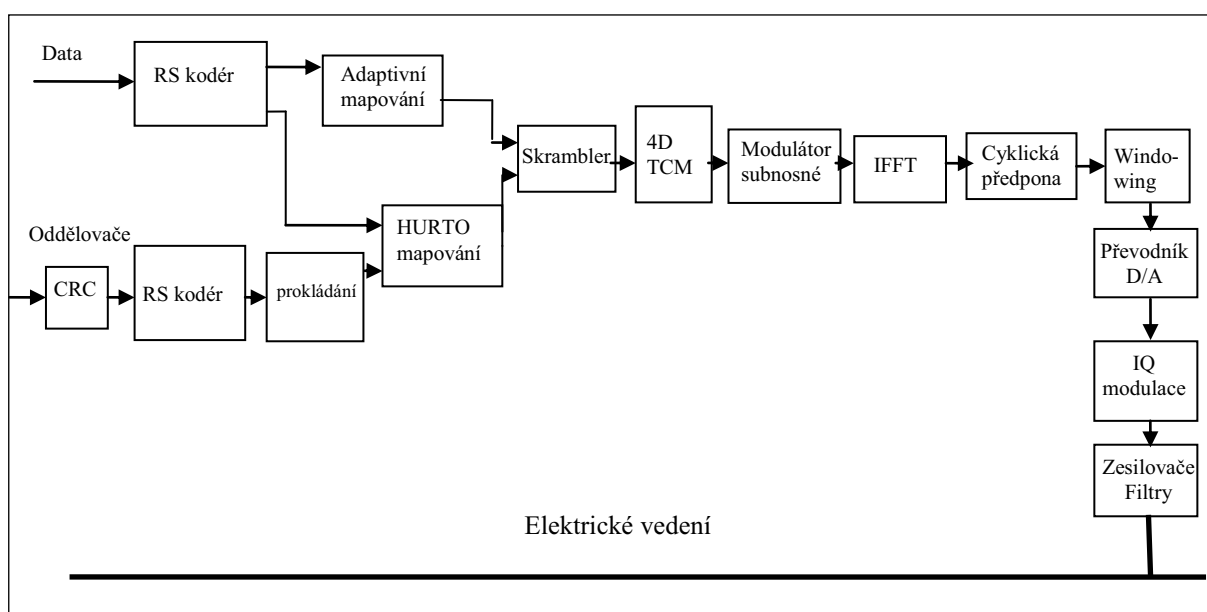
Obr. 3: Síťový referenční model



## 2.1 Fyzická vrstva

Základem fyzické vrstvy je systém OFDM s velkým počtem dílčích, digitálně modulovaných subnosných vln. Používá se z důvodů odolnosti vůči rušivým signálům a vysoké spektrální účinnosti. Čtyřdimenzionální mřížkový (trellis) kód a dopředná chybová korekce FEC (Forward Error Correction) zase zajišťují vysoký výkon ve speciálním PLC prostředí. Tyto mechanismy jsou doplněny skramblováním a prokládáním přenášených burstů za účelem dosažení spolehlivého přenosového mechanismu při zachování minimální složitosti provedení.

Diagram na obr. 4 ukazuje příklad fyzické vrstvy vysílače [7]:



Obr. 4: Fyzická vrstva

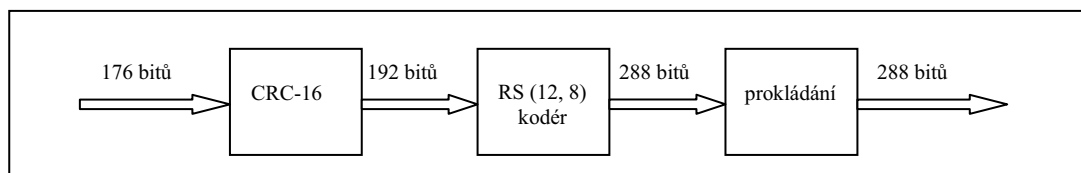
Fyzická vrstva přijímá vstupy z MAC vrstvy. Dva oddělené bitové toky jsou kódovány různým způsobem. Pro získání co nejvyšší propustnosti je na přenášená data použito adaptivní mapování. Spolehlivější mód HURTO, je vyhrazen pro data, která jsou důležitá pro opravné operace a pro řídicí informace. Tento mód je použit v případě, kdy je poměr signál-šum SNR velmi nízký. Výstupy vedou na skrambler, po kterém následuje modulace 4D-TCM. Poté je použit systém OFDM, který je složen z modulace subnosné, inverzní rychlé Fourierovy transformace a generátoru cyklické předpony. Výsledný digitální signál je pomocí D/A převodníku převeden na analogový signál.

### 2.1.1 Dopředná korekce chyb

Ochranu přenosu dat před chybami je možné realizovat pomocí metody dopředné korekce chyb. Je to metoda zjišťování a opravy chyb vzniklých při přenosu, která využívá

vkládání doplňkových kontrolních bitů. Ojedinelé chyby nebo kratší skupina chybných bitů se detekuje a opravuje pomocí Reed-Solomonových blokových kódů. Pokud v kanálu vznikají delší shluky chyb, tak se používá metoda prokládání, pomocí které se přemění dlouhé shluky chyb na kratší nebo osamocené chyby [3].

Při kódování oddělovačů jsou provedeny tři hlavní výpočty (CRC, Reed-Solomonovo kódování a prokládání) [8].



**Obr. 5: Kódování oddělovačů**

### Kontrola cyklickým kódem

Metoda CRC (Cyclical Redundancy Check) se použije na 176 vstupních bitů. Je založena na cyklickém výpočtu zabezpečujícího kódu z dat před přenosem, který se pak připojí za přenášená data.

Standard organizace ITU-T, označený CRC-CCITT, používá vytvářecí mnohočlen, daný funkcí [8]:

$$g(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1. \quad (1)$$

CRC(x) je zbytek po dělení  $I(x) \cdot x^{16}$  a  $g(x)$ , kde  $I(x)$  je mnohočlen bloku nezabezpečených dat:

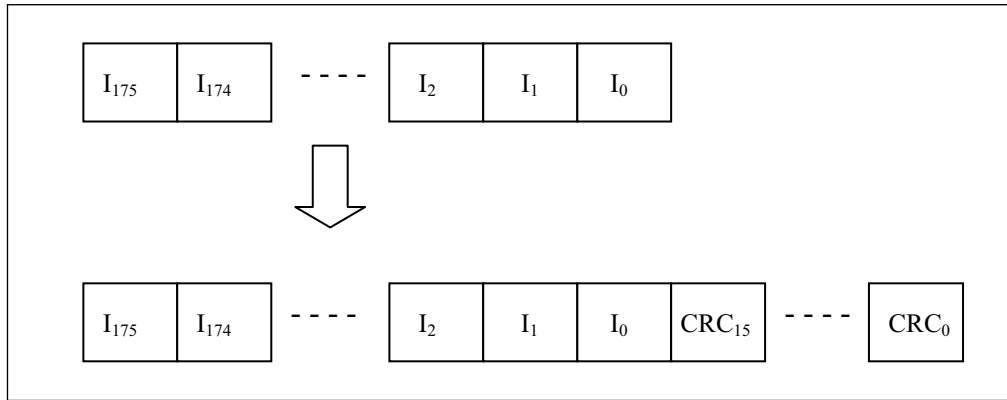
$$I(x) = I_{175}x^{175} + I_{174}x^{174} + \dots + I_2x^2 + I_1x + I_0. \quad (2)$$

CRC(x) je tedy:

$$CRC(x) = CRC_{15}x^{15} + CRC_{14}x^{14} + \dots + CRC_1x + CRC_0 \quad (3)$$

16 získaných bitů je následně připojeno k vstupnímu bloku dat. Transformaci ukazuje obr. 6. Výsledný mnohočlen bude:

$$T(x) = I(x)x^{16} + CRC(x) = I_{175}x^{191} + I_{174}x^{190} + \dots + I_2x^{18} + I_1x^{17} + I_0x^{16} + CRC_{15}x^{15} + \dots + CRC_0 \quad (4)$$



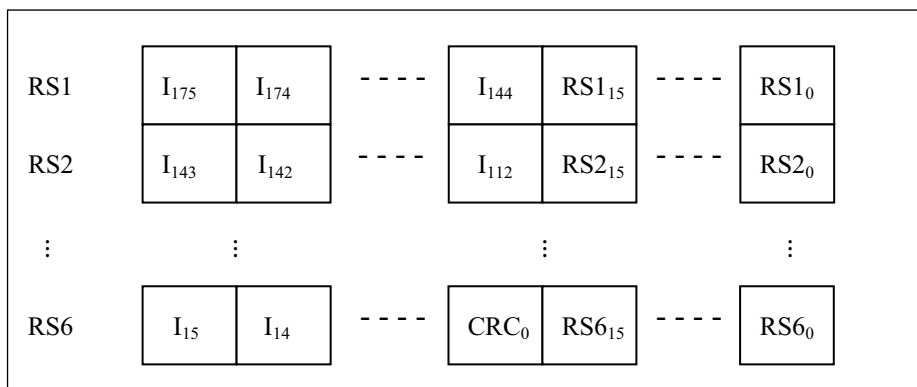
**Obr. 6: Zabezpečení cyklickým kódem**

### Reed-Solomonovo kódování

Reed-Solomonovy kódy jsou symbolově orientované a označují se zkratkou  $RS(n, k)$ , která charakterizuje daný kód. Kódové slovo se získá přidáním  $n - k$  kontrolních symbolů k symbolům datovým, kde  $n$  označuje počet symbolů kódového slova a  $k$  počet symbolů vstupního slova. Pro opravnou schopnost kódu platí  $n - k = 2t$ , kde  $t$  je počet chybných symbolů které mohou být opraveny [3], [8].

Datový tok oddělovačů je složen ze šesti RS kódových slov ( $n = 12, k = 8$ ). Čtyři ( $n - k = 4$ ) paritní symboly  $p_3, p_2, p_1, p_0$  jsou připojeny k datovým symbolům  $m_7, m_6, \dots, m_0$  a tvoří jedno RS kódové slovo  $m_7, m_6, \dots, m_0, p_3, p_2, p_1, p_0$ . Každý symbol je složen ze čtyř bitů.

Např. pro první kódové slovo RS1 je symbol  $m_7$  vyjádřen bity  $I_{175}, I_{174}, I_{173}, I_{172}$ , symbol  $m_6$  je vyjádřen bity  $I_{171}, I_{170}, I_{169}, I_{168}, \dots$ , symbol  $m_0$  je vyjádřen bity  $I_{147}, I_{146}, I_{145}, I_{144}$ , symbol  $p_3$  je vyjádřen bity  $RS1_{15}, RS1_{14}, RS1_{13}, RS1_{12}, \dots$ ,  $p_0$  je vyjádřen bity  $RS1_3, RS1_2, RS1_1, RS1_0$ .



**Obr. 7: Formát Reed-Solomonova kódování**

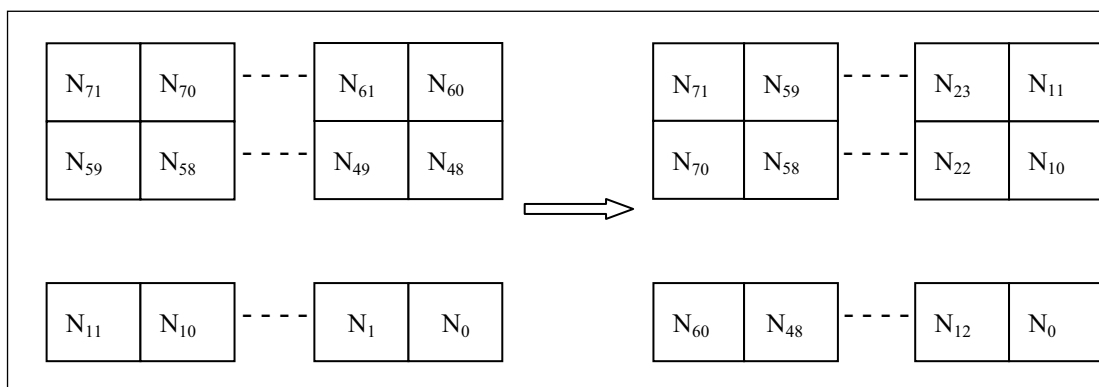
## Prokládání

Prokládání se používá jako ochrana signálu proti skupinovým chybám. Tato metoda záměrně mění v prokladači přirozené pořadí bitů v bitovém toku. Nejdříve jsou proloženy první 4 bity každého RS kódového slova, potom další 4 bity, následujícím způsobem:

$$\begin{aligned}
 N_{71} &= (I_{175}, I_{174}, I_{173}, I_{172}) \\
 N_{70} &= (I_{171}, I_{170}, I_{169}, I_{168}) \\
 &\vdots \\
 N_{64} &= (I_{147}, I_{146}, I_{145}, I_{144}) \\
 N_{63} &= (RS1_{15}, RS1_{14}, RS1_{13}, RS1_{12}) \\
 &\vdots \\
 N_{60} &= (RS1_3, RS1_2, RS1_1, RS1_0) \\
 N_{59} &= (I_{143}, I_{142}, I_{141}, I_{140}) \\
 &\vdots \\
 N_1 &= (RS6_7, RS6_6, RS6_5, RS6_4) \\
 N_0 &= (RS6_3, RS6_2, RS6_1, RS6_0)
 \end{aligned}$$

Bitové sekvence vstupního signálu s pořadím  $N_{71}, N_{70}, \dots, N_2, N_1, N_0$  jsou ve vysílací části ukládány do paměti po řádcích a vyčítány z paměti po sloupcích. Signál na výstupu paměti má ve srovnání se vstupním signálem pořadí bitových sekvencí změněno.

Komunikačním kanálem je přenášén bitový tok v pořadí  $N_{71}, N_{59}, \dots, N_{12}, N_0$ . Základní princip prokládání je naznačen na obr. 8.



**Obr. 8: Princip prokládání**

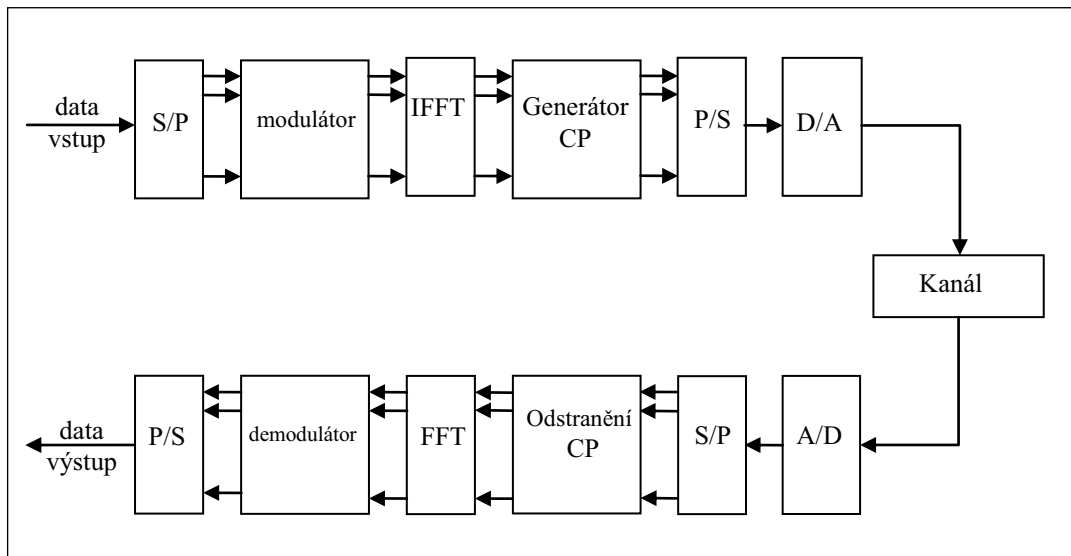
K dalším metodám úpravy modulačního signálu patří skramblování. Pod tímto pojmem se rozumí modifikace bitového toku datového signálu, beze změny jeho rychlosti. Skramblování se řídí jednoznačně definovaným pseudonáhodným algoritmem. Slouží k odstraňování příliš dlouhých sekvencí nul nebo jedniček vyskytujících se v přenášeném signálu. Poté následuje čtyřdimenzionální mřížkově kódovaná modulace 4D-TCM (Trellis-Coded Modulation), která vzniká kombinací konvolučního kódování a některé vícestavové

modulace PSK nebo QAM [3]. Používá se pro zvýšení hranic SNR u víceúrovňových přenosových systémů. Korekční schopnost této modulace se dosahuje přidáním redundantního bitu k sekvenci signálových prvků.

### **2.1.2 OFDM (Ortogonalní frekvenčně dělený multiplex)**

Pro snížení nepříznivého účinku přenosového média musí komunikační zařízení používat účinnou modulaci. Princip OFDM spočívá v tom, že rozsah kmitočtů přenášený po silových rozvodech se rozdělí na větší počet samostatných kmitočtových kanálů. Nosné každého z nich jsou dále modulovány dle potřeby některou z běžných modulačních metod (např. QPSK, QAM). Spektrální účinnost OFDM systému je velmi vysoká díky částečnému překryvu sousedních subkanálů. Použité subnosné vlny vytvářejí ortogonální soustavu, a proto se vzájemně neovlivňují [3].

Blokové schéma systému založeného na principu OFDM je na obr. 9. Na vstup přichází sériový binární datový tok, ten se v sériově paralelním převodníku S/P dělí do většího počtu paralelních složek. Soustava všech paralelních modulačních symbolů vytváří OFDM symbol. Jeho jednotlivé složky se modulují na soustavu subnosných vln. Pro generování signálu OFDM lze využít vlastností inverzní rychlé Fourierovy transformace IFFT. Jednotlivé nosné se namodulují v základním pásmu a poté se aplikuje IFFT, která vygeneruje signál odpovídající svým spektrem i časovým průběhem součtu paralelně pracujících modulátorů na ortogonálně odstupňovaných nosných. Po IFFT je do procházejícího signálu vkládán cyklický prefix. Ten se vytváří tak, že se prázdný ochranný interval před aktivním symbolem vyplní částí průběhu užitečného signálu z konce tohoto symbolu. Tímto způsobem se zvýší odolnost systému vůči mezisymbolovým interferencím ISI. Po paralelně sériovém převodu P/S a digitálně analogovém převodu D/A se získá reálný elektrický signál OFDM situovaný do základního pásma. V přijímači se signál zpracovává inverzním způsobem.



**Obr. 9: Schéma OFDM systému**

## 2.2 Vrstva řízení přístupu k médiu (MAC vrstva)

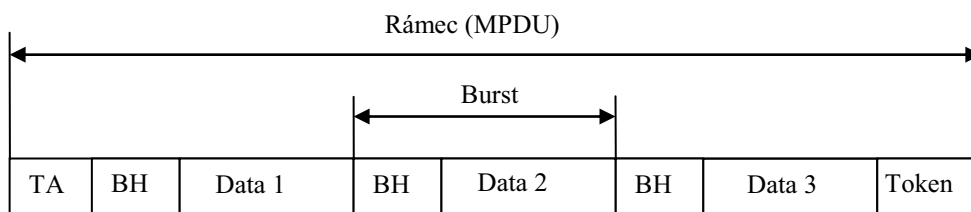
Spojová vrstva je rozdělena na dvě části, a to na podvrstvu řízení přístupu k médiu (MAC), která umožňuje uzlům získat přístup ke sdílenému přenosovému prostředku a je zodpovědná za adresaci typu MAC, a na podvrstvu řízení logického spoje (LLC), která poskytuje rozhraní mezi konkrétním médiem a sítíovou vrstvou.

Prvky sítě sdílející komunikační kanál musí být opatřeny účinným mechanismem, který dovoluje bezkolizní přístup k přenosovému médiu. Na MAC vrstvě jsou systémy PLC navrhované tak, aby mohly pracovat s formáty rámců podle IEEE 803.2, což umožňuje integraci a spolupráci se sítíovými protokoly Ethernetu. Na řízení přístupu používají jednotlivé systémy metody mnohonásobného přístupu CSMA/CA nebo TDMA. Obsahují mechanismy, které umožňují přidělovat příslušnou šířku pásma nebo čas přenosu podle požadavků na kvalitu služby (QoS), které jsou zabudované ve struktuře rámců. Moderní systémy PLC tak umožňují využití pro poskytování služeb, které jsou citlivé na rovnoměrný přenos v reálném čase s malým zpožděním, jako je VoIP nebo videokonference.

### 2.2.1 Formát rámce

Ve vrstvě MAC se používají dva typy rámců (označovaných také jako MPDU), a to běžné rámce a rámce odhadu kanálu. Běžný rámec zabaluje bursty z LLC vrstvy, přenáší data mezi uzly a je zakončen tokenem. Rámce odhadu kanálu jsou vyvolány přímo MAC

vrstvou, nesou specifickou sekvenci signálu generovanou fyzickou vrstvou, tento rámeček neobsahuje žádné bursty ani tokeny. Začíná oddělovačem Token Announce, za kterým následuje sekvence symbolů odhadu kanálu.



**Obr. 10: Formát běžného rámečku**

Běžný rámeček má proměnnou velikost a obsahuje [8]:

Token Announce – oznámení, které určuje vysílače a maximální čas přenosu rámečku (tzv. platnost tokenu);

Sekvenci burstů – každý burst je složen ze záhlaví a z užitečných dat. Burst adresovaný určitému uzlu musí být přenášen v pořadí podle ID burstu. Bursty k různým cílům mohou být přenášeny v jakémkoliv pořadí. Cílový port burstu je obsažen v záhlaví, stejně tak jako informace o řízení přenosu a šifrování.

Podle typu tokenu zakončujícího rámeček, jsou běžné rámečky dále rozděleny na [8]:

Datové rámeček – obsahující token, který určuje, jak dlouho může podřízený uzel vysílat. Po přenosu datového rámečku, přechází token z vysílajícího na přijímající uzel;

Klidové rámeček – jsou podobné datovým rámečkům, token je ponechán vysílajícímu uzlu;

Dotazující se (polling) rámeček – obnovují stav spojení, nečinné uzly jsou pravidelně dotazovány na přenos. Po přijetí rámečku uzel odpovídá krátkým signálem. Nečinné uzly neobdrží token, a proto neplývají kanálovými prostředky;

Přístupové rámeček – řídicí uzel pravidelně vysílá tyto rámečky, které zvou neregistrované uzly k přihlášení do sítě;

Nevratné datové rámeček – umožňují přístup ke kanálu několika uzlům současně;

Časovací rámeček – synchronizují všechny uzly v PLC buňce. Každý uzel má vnitřní časovač. Informace přenášená v tomto rámečku obsahuje zbývající cykly do vypršení nastaveného času a je použita v přijímacím uzlu k výpočtu zpoždění;

CSMA rámeček – umožňují uzlům, které nemají přístup ke kanálu, tento přístup získat. Rámeček je adresován nečinným uzlům, které mají data k odeslání;

Distribuční rámeček – poskytují přístup ke kanálu podle seznamu uzlů.

## 2.3 Vrstva řízení logického spoje (LLC vrstva)

LLC vrstva zajišťuje bezchybný přenos dat mezi dvojicí uzlů. Ten je uskutečněn přenosem kódovaných užitečných dat, poskytnutých konvergenční vrstvou v sekvencích. Tyto sekvence se nazývají bursty a jsou přenášeny za použití potvrzování (ACK).

Úkolem LLC vrstvy je:

- segmentace a seskupování paketů;
- přidání mezipaketového záhlaví ke každému vnitřnímu paketu;
- přidání záhlaví burstu k přenášeným datům;
- přidání CCMP záhlaví na začátek každého burstu v případě, že je burst nastaven jako šifrovaný;
- přidání pole MIC ke každému paketu, když je burst nastaven jako šifrovaný;
- přidání CRC každému fragmentu paketu nebo paketu, když burst není šifrovaný;
- selektivní potvrzování paketů.

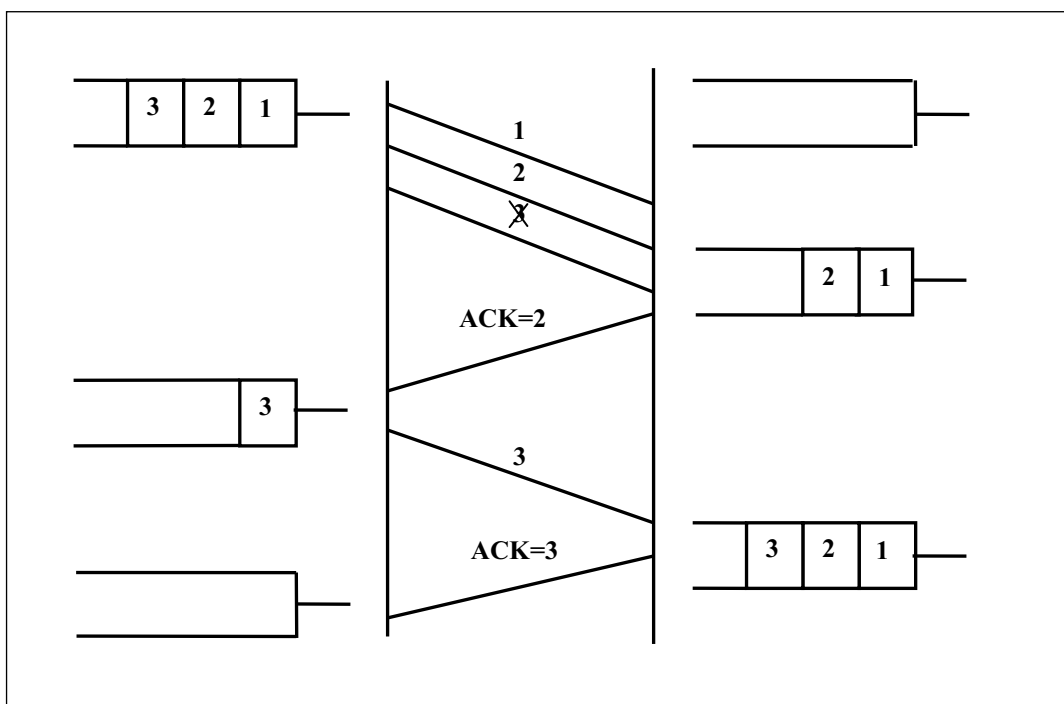
### 2.3.1 Schéma potvrzování

Pro řízení spolehlivosti přenosu paketů je použito klouzavé okno a opětovný přenos. Každý paket má identifikační číslo. Během běžných systémových operací přijímač posílá potvrzení ACK korektně přijatých paketů a vyžaduje opětovný přenos neobdržených nebo poškozených paketů.

Obr. 11 ukazuje princip ACK:

1. Levý uzel vysílá řadu paketů obsažených v burstu (s identifikačními čísly 1, 2 a 3) k pravému uzlu. Levý uzel zachovává tyto pakety ve vyrovnávací paměti, v případě potřeby opětovného přenosu.
2. Rušení v kanálu je příčinou toho, že paket 3 je porušen. Pouze pakety 1 a 2 jsou korektně přijaty.
3. Pravý uzel posílá ACK k levému uzlu, potvrzující pakety 1 a 2, a vyžadující opětovný přenos paketu 3.
4. Levý uzel vymaže pakety 1 a 2 z vyrovnávací paměti a znovu vysílá paket 3.
5. Paket 3 je korektně přijat, pravý uzel posílá kontrolní zprávu potvrzující, že tento paket byl správně přijat.
6. Po přijetí ACK, levý uzel vymaže paket 3 z vyrovnávací paměti.





**Obr. 11: Schéma potvrzování paketů**

## 2.4 Konvergenční vrstva

Konvergenční vrstva slouží k zapouzdření paketů přicházejících z vnějších rozhraní před přechodem do LLC vrstvy. Formát paketu je odvozen z formátu rámce IEEE 802.3 (ale neobsahuje pole Preamble a oddělovač začátku rámce). Další pole jsou naopak přidána a slouží pro podporu přenosu PLC paketů a pro OVLAN.

EXT	PB	OVLAN	Cílová adresa	Zdrojová adresa	TPID	TCI	Délka/typ	Data	PLW
-----	----	-------	---------------	-----------------	------	-----	-----------	------	-----

**Obr. 12: Formát paketu**

Maximální délka paketu je 1536 oktetů, minimální délka je 76 oktetů. Paket obsahuje následující pole [8]:

EXT – rezervováno pro budoucí rozšíření (16 bitů);

PB (Previous Bridge) – identifikátor předchozího mostu (48 bitů);

OVLAN – identifikátor OVLAN (32 bitů);

Cílová adresa – cílová MAC adresa označující, která stanice získá rámec (48 bitů);

Zdrojová adresa – zdrojová MAC adresa označující odesílající stanici (48 bitů);

TPID (Tag Protocol Identifier) – nepovinné pole; indikuje přítomnost VLAN (16 bitů);

TCI (Tag Control Information) – obsahuje pole uživatelské priority, ukazatel CFI (definující v jakém pořadí jsou přenášeny bity v rámci) a identifikátor VLAN ID (16 bitů);  
Délka/typ – délka paketu (16 bitů);  
Data – 42 až 1500 bytů;  
PLW (Padding Last Word) – zarovnání paketu (32 bitů).

## 2.5 Přemost'ující funkce (Bridging)

Přemost'ující funkce vycházejí ze standardů IEEE 802.1D a IEEE 802.1Q. Pro správnou funkci sítě s mosty je požadována stromová struktura sítě uzlů. Ta je řešena pomocí protokolu STP (Spanning Tree Protocol), který vytváří logickou topologii sítě, neobsahující smyčky. Protože komunikační síť tvořenou PLC systémem sdílí vždy více uživatelů, je také potřeba oddělit provoz jednotlivých uživatelů. K tomu se využívá koncepce VLAN (Virtual LAN), pomocí které je možno rozdělit jeden segment sítě na více virtuálních. Jednotlivé uzly označí pakety údajem o členství v dané VLAN tak, aby je pak odpovídajícím způsobem směrovaly nebo filtrovaly mezi hranicemi jednotlivých virtuálních sítí. V PLC je rozšířen na OVLAN (Optimized VLAN) s dodatečnými schopnostmi označování.

## 2.6 Vrstva řízení sítě

Implementací protokolu SNMP (Simple Network Management Protocol) umožňují systémy PLC řízení sítě, jednoduchou instalaci, konfiguraci i upgrade softwaru jednotlivých prvků sítě.

Hlavní řídicí protokoly jsou:

- Protokol adaptivní bitové alokace – používaný k výměně alokačních tabulek pro přizpůsobení přenosových charakteristik kanálu;
- Přístupový protokol – používaný pro přijetí nových uzlů v síti;
- Port solver protokol – používaný pro výměnu adres mezi uzly;
- Protokol pro hledání uzlů, které mohou přenášet současně bez vzájemného rušení;
- CAC protokol – k rezervaci zdrojů pro datový tok;
- Protokol pro automatické řízení přeslechů mezi asynchronními systémy – používaný v případě, kdy se dvě nezávislé sítě navzájem ruší.

## 2.7 Mechanismus kvality služeb

Sítě využívají aplikace vytvářející různé druhy provozu se specifickými požadavky na parametry přenosu (zpoždění, ztátovost, rozptyl zpoždění) a v případě nesplnění těchto nároků dochází k omezení funkčnosti takové aplikace či její nepoužitelnosti. Aby tomu bylo možné předcházet, dochází k implementaci mechanismů kvality služby, tzv. QoS - Quality of Service. Hlavním cílem QoS je garance určité šířky pásma a maximálního zpoždění různým uživatelům podle toho, jaké dostupné služby využívají a podle typu přenášeného datového provozu. Datový provoz je proto označený určitou třídou služby. K popsání třídy služeb jsou potřeba čtyři parametry (viz tab. I):

- 1) Priorita - Priorita jednoznačně určuje servisní třídu. Nabývá hodnot od 0 do 7, přičemž 0 značí nejnižší prioritu. Jestliže musí být zahozen paket z důvodu nedostatku prostředků, potom jsou nejdříve zahozeny pakety s nejnižší prioritou. V případě, že jsou data s různými prioritami adresována ke stejnému cíli, mají přednost data s vyšší prioritou. Prioritu stanovuje třídič provozu. Analyzuje všechny přijaté rámce a přiděluje prioritu každému rámci, který je přenášen na konvergenční vrstvu.
- 2) Maximální zpoždění - jako výchozí je stanovena nejnižší hodnota zpoždění, ze které jsou odvozeny další tři hodnoty, jako násobek 2, 4 nebo 8.
- 3) Rezervace prostředků – tento parametr může nabývat následujících stavů:  
Best Effort - služba s nejlepší snahou, která nepřináší žádné garance pro kvalitu přenosu dat, jen využívá v daném okamžiku volných síťových prostředků;  
Dostupná bitová rychlost ABR (Available Bit Rate) - zdroj vysílání se řídí podle okamžitých možností sítě, používá dostupné šířky pásma bez jakékoliv záruky;  
Proměnná bitová rychlost VBR (Variable Bit Rate) - nezaručuje pevnou šířku pásma, určena pro přenos dat citlivých na zpoždění nebo pro aplikace neběžící v reálném čase;  
Konstantní bitová rychlost CBR (Constant Bit Rate) - zcela garantuje šířku pásma, minimalizuje zpoždění a jeho kolísání v čase;
- 4) Spolehlivost služby – parametr určuje, jestli je povolen mód ACK.

**Tab. I: Vymezení servisních tříd (příklad) [6], [7]**

Třída služby	Rezervace prostředků	Priorita	Max. zpoždění [ms]	Spolehlivost služby (ACK)
7	Best Effort	7	240	Ne
6	CBR	6	30	Ne
5	VBR	5	60	Ano
4	VBR	4	120	Ano
3	VBR	3	120	Ne
2	ABR	2	120	Ano
1	Best Effort	1	240	Ne
0	Best Effort	0	240	Ne

Řídící uzel PLC sítě (HE) má na starosti plánování a zajištění QoS, a musí vyhradit prostředky dalším uzlům v buňce podle nastavené šířky pásma a požadavků na zajištění rezervovaných prostředků. Tento uzel je označován QC (Quality Controller). V PLC buňce jsou další prvky, uzly FMN (Flow Master Nodes), které mají na starosti garanci QoS pro registrovaný tok. Tímto uzlem může být HE anebo PLC opakovač, který rozšiřuje sjednané prostředky dalším, s ním spojeným uzlům. FMN obdrží požadavky na rezervaci prostředků prostřednictvím CAC protokolu a musí určit, jestli jich má dostatek nebo jestli musí žádat QC o další.

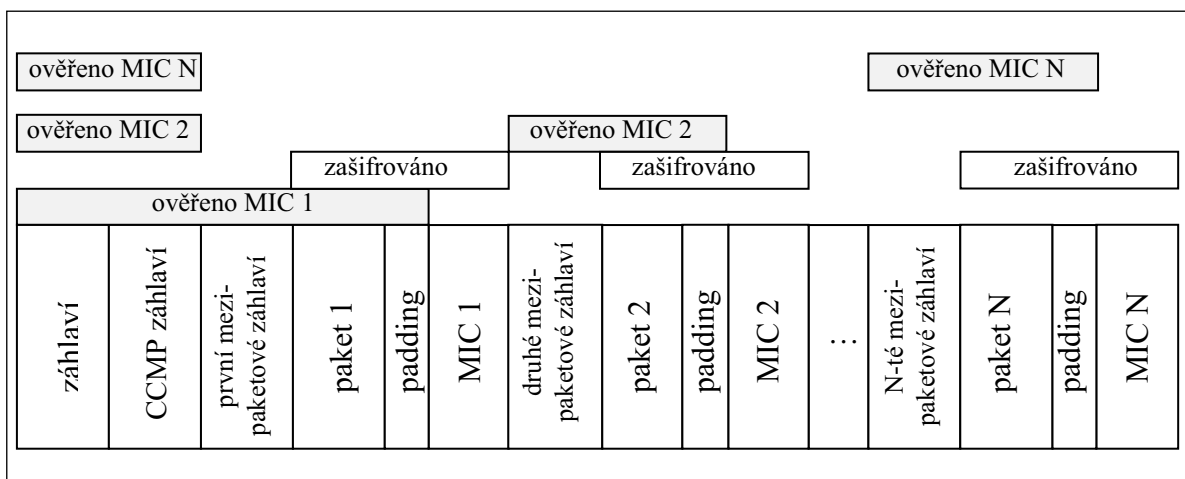
## 2.8 Šifrování a integrita dat

Bezpečnost je založená na standardech IEEE 802.1X a 802.11i. Pro vlastní šifrování přenášených dat se používá algoritmus DES, 3DES nebo AES. DES (Data Encryption Standard) používá blok délky 64 bitů, šifrovací klíč má délku 56 bitů. Zesílená varianta 3DES (Triple-DES) pracuje s trojnásobným klíčem (168 bitů). V současné době se u PLC zařízení používá také šifrování používající metodu AES (Advanced Encryption Standard), která je jako standard definována dokumentem FIPS-197 [19].

AES patří mezi symetrické blokové šifry. Symetrické šifrovací algoritmy používají stejný klíč jak pro šifrování, tak i pro dešifrování. Algoritmus má pevnou velikost bloku dat 128 bitů a šifrovací klíče o velikosti 128, 192 nebo 256 bitů. Velikost klíče a bloku je nezávislá. Šifrovací klíč se rozšíří na tzv. Expanded Key, který se následně užívá pro šifrování bloku v jednotlivých cyklech, tzv. rundách [24]. Počet rund přímo závisí na délce klíče a délce bloku, pohybuje se v rozmezí od 10 do 14.

Pro šifrování paketů s proměnnou délkou a pro zajištění integrity zpráv se používá operační mód CCM, který kombinuje šifrovací CTR mód a ochranu integrity a autentifikaci rámců pomocí CBC-MAC módu [8]. Tento režim má společný počáteční

stav obsažený v CCMP záhlaví, které je přenášeno pouze jednou na začátku každého burstu. Kontrola integrity dat (MIC) je vypočítána ze záhlaví burstu, CCMP záhlaví, mezipaketového záhlaví přidaného LLC vrstvou, a paketu, včetně pole padding (dorovnání), a poté je připojena k této struktuře. Šifrovací algoritmus AES-CTR, který převádí blokovou šifru na synchronní proudovou šifru, je aplikován na paket včetně připojeného MIC. Záhlaví burstu, CCMP záhlaví a mezipaketová záhlaví se nešifrují.



**Obr. 13: Struktura zašifrovaného burstu**

Každá relace vyžaduje čerstvý dočasný šifrovací klíč. Pro každý burst je také vytvořeno unikátní náhodné číslo, tzv. nonce, na základě pořadového čísla paketu. Zjednodušený postup šifrování se dá popsat následovně:

- inkrementace pořadového čísla paketu PN (pro stejný dočasný klíč se PN nikdy neopakuje);
- z informací záhlaví burstu jsou vytvořena doplňková autentizační data pro CCM algoritmus;
- zkonstruování náhodného čísla (pomocí zdrojové adresy, priority a čísla paketu PN);
- sestavení CCMP hlavičky (číslo paketu a identifikátor klíče);
- vytvoření šifrovaného textu a MIC sekvence;
- zformování šifrovaného burstu (spojení původního záhlaví burstu, CCMP záhlaví, šifrovaných dat a MIC sekvence).

### 3 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

Rozvodná síť není pro oblast telekomunikací nejvhodnějším přenosovým médiem, protože jejím hlavním účelem je šíření elektrické energie o kmitočtu 50 Hz. Pokud se použije pro systém PLC, musí přenášet signály o kmitočtech ležících v pásmu do 30 MHz. Jakmile se signály PLC překrývají s bezdrátovými kmitočty, může dojít ke vzájemnému rušení, jehož dopad závisí na vysílacím výkonu, vzdálenosti i specifické struktuře rozvodu.

Mezi prvky regulace EMC patří rozprostření modulace do širokého frekvenčního pásma rozděleného na mnoho nosných frekvencí, což umožňuje použití velmi nízkého výkonu na každé nosné frekvenci a dosahuje se tím nízké výkonové spektrální hustoty. Dalším prvkem jsou filtry typu „notch“, které potlačují určité frekvenční pásmo, frekvence nižší a vyšší než toto pásmo se přenáší bez útlumu. Širokopásmové PLC totiž používá kmitočty, které mohou být licencovány různými rádiovými službami. Právní úpravy v různých státech mohou uložit omezení, na kterých frekvencích smí být tato technologie používána a jaké frekvence musí být vynechány. Tyto regulace se v každém státě mohou lišit, a proto PLC produkty musí používat odlišné kmitočty v závislosti na tom, kde jsou používány. „Notch“ je vytvořený přerušením těch subnosných OFDM, které spadají do vyloučeného pásma.

#### 3.1 Mezinárodní standardizace v oblasti PLC

Významnou normalizační organizací v oblasti elektrotechniky je Mezinárodní elektrotechnická komise IEC. Problémem elektromagnetické kompatibility a rádiového rušení se pod IEC zabývá výbor pro rádiovou interferenci CISPR. Tento výbor vytváří publikace a doporučení, které jsou základem národních a nadnárodních technických předpisů. Pro oblast elektromagnetické kompatibility jsou podstatná doporučení CISPR 11 až 23 (vysokofrekvenční EM rušení), která jsou přebírána jako harmonizované evropské standardy řady EN 55000.

Technologie PLC představuje telekomunikační infrastrukturu schopnou pracovat s informacemi založenými na IP protokolu. Celá PLC síť pracuje jako most přepojující jiné externí sítě a koncová zařízení uživatelů prostřednictvím standardních komunikačních rozhraní, jako je např. Ethernet. Vnitřní rozhraní v rámci sítě PLC jsou však stále založená na řešeních jednotlivých firem. Každý výrobce má vlastní specifikace na úrovni fyzické a spojové vrstvy. Tento nedostatek standardních řešení neumožňuje spolupráci zařízení mezi systémy jednotlivých výrobců.

Nejvíce v oblasti standardizace systémů a zařízení PLC pokročil vývoj v Evropě zásluhou projektu OPERA. Mnoho výstupů tohoto projektu se týká vytvoření technických specifikací, které tvoří základ budoucích norem evropských normalizačních organizací

ETSI (Evropský institut pro normalizaci v telekomunikacích) a CENELEC (Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice). Z mimoevropských institucí, které se podílejí na vzniku doporučení a norem, lze zmínit organizace IEEE a FCC.

Oficiálním standardem pro přenos dat po elektrických rozvodech se již několik měsíců zabývá v rámci IEEE P1901 pracovní skupina pro širokopásmový přístup po silovém vedení, která zveřejnila soubor požadavků na MAC a fyzickou vrstvu. Díky tomu by v oblasti vznikajícího standardu měla být zaručena kompatibilita produktů založených na různých technologiích.

#### **4 PROJEKT OPERA**

V souvislosti s mezinárodními aktivitami v oblasti PLC si pozornost zaslouží projekt OPERA (Open PLC European Research Alliance), který spojuje účastníky v rámci Evropy při rozvoji technologie PLC a jejího využití pro kvalitní širokopásmový přenos dat. Je to projekt, který je financovaný Evropskou komisí v rámci 6. rámcového programu pro vědu a výzkum. Má formu tzv. integrovaného projektu s předpokládanou délkou trvání čtyři roky, přičemž je rozplánovaný na dvě fáze. První fáze řešení projektu probíhala v letech 2004 a 2005 s celkovými náklady cca 20 mil. EUR [6].

Druhá fáze (2007-2008), s odhadovanými náklady 9 mil. EUR, právě probíhá. Na řešení se podílí 26 účastníků, včetně velkých energetických podniků, výrobců PLC zařízení, technologických institucí a univerzit z 10 evropských zemí a z Brazílie, přičemž největší zastoupení (11 společností), včetně koordinátora projektu, má Španělsko.

Strategickým cílem projektu je připravit zdokonalené systémové řešení PLC schopné uplatnit se na trhu, které zabezpečí poskytování levného širokopásmového přístupu s využitím univerzálně rozšířené infrastruktury elektrických sítí. Zveřejněné výstupy jsou dostupné na oficiálních internetových stránkách projektu<sup>1</sup>. Konkrétnější vyjádření cílů a obsahu řešení souhrnně vyjadřuje tab. II, která již zachycuje výsledky dosažené v první fázi a současně naznačuje hlavní zaměření druhé fáze řešení.

Vývojové týmy zaměřují své úsilí do oblasti optimalizace vazeb na energetickou síť a zdokonalení zařízení PLC. Kromě práce na samotné technologii je součástí projektu i tvorba jednotné evropské standardizace. Specifikace přijatá v roce 2006 je založena na 200 Mbps technologii společnosti DS2 a byla vytvořena konsorciem 37 společností. Tato specifikace byla schválena mezinárodní asociací UPA (Universal Powerline Association) a vytvořila základ pro standardizaci PLC.

V následujících letech je úkolem projektu OPERA rozšíření širokopásmového přístupu po elektrické síti pro široký rozsah služeb a aplikací jako jsou:

---

<sup>1</sup> <http://www.ist-opera.org/>

- širokopásmový přístup k Internetu, e-learning, VoIP, inteligentní domácnost (Smart Home), IPTV, video na vyžádání (Video on Demand), zabezpečení, elektronické zdravotnictví (e-health).

**Tab. II: Cíle projektu OPERA [6]**

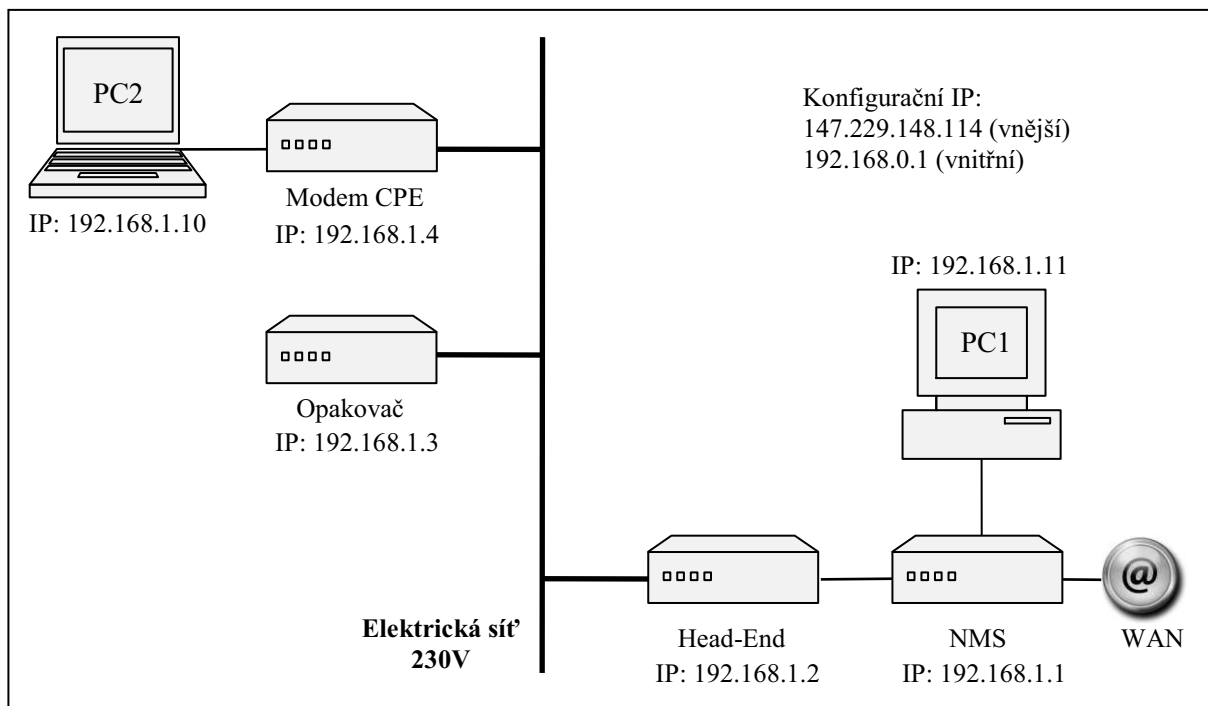
<b>Oblast</b>	<b>Fáze I</b>	<b>Fáze II</b>
Vazební jednotky, filtry	Odzkoušené a certifikované prototypy	Zařízení připravená na hromadnou výrobu
Modelování PLC kanálu	Simulátor kanálu PLC	Emulátor kanálu PLC
EMC v kanálu PLC	EMC měření, databáze výsledků a závěry	Směrnice pro EMC
Propojení PLC s páteční sítí	Optimalizace	Optimalizace ve vztahu k novým technologiím
Integrace na úrovni domácích a přístupových sítí	Zpřesnění, koexistence PLC na úrovni domácích sítí	Implementace standardů, integrace s jinými technologiemi (WiFi, ADSL)
Instalace v prostředí vn a nn	Postupy	Optimalizace
Systemy PLC a koncová zařízení	Odzkoušené prototypy	Zařízení připravená na hromadnou výrobu, integrace čipů do více zařízení
Služby přes PLC	Technické studie	Testování služeb
Norma EMC a soulad s normou	Norma „de facto“ na evropské úrovni	Norma „de iure“ na evropské úrovni
PLC norma	Specifikace	Norma „de iure“ na evropské úrovni



## 5 KONCEPCE LABORATORNÍ SÍTĚ

### 5.1 Struktura sítě

Navrhovaná PLC síť (obr. 14) se skládá z prvků ACPE-200 Defidev/DS2. V uvedené struktuře nemají jednotlivá zařízení předem určenou funkci (HE, opakovač, CPE), ta se definuje pomocí systému NMS.



Obr. 14: Schéma zapojení sítě

Pro vlastní měření byla síť nastavena takovým způsobem, kdy jsou všechny prvky zapojeny na stejné podsíti (192.168.1.x). Směrovač s činností správy sítě NMS je připojen do veřejné sítě, k tomuto zařízení je připojen HE a PC1. PC2 je připojeno do sítě přes koncový modem CPE. U počítačů je nutné nastavit statickou IP adresu, která odpovídá stavu sítě v laboratoři. V přenosové trase mezi HE a CPE je pro zvýšení dosahu vložen opakovač.

Při měření je uvažován počítač PC1 jako konfigurační. Přístup k NMS probíhá pomocí webového rozhraní, přes internetový prohlížeč zadáním IP adresy 192.168.0.1 z vnitřní sítě, nebo zadáním IP adresy 147.229.148.114 z vnější sítě.

System		WAN		LAN	
Wide Area Network interface settings					
WAN interface		<input type="radio"/> DHCP <input checked="" type="radio"/> Static			
	IP address	<input type="text" value="147.229.148.114"/>			
	Network mask	<input type="text" value="255.255.255.0"/>			
	Gateway IP address	<input type="text" value="147.229.148.1"/>			
	DNS IP address	<input type="text" value="147.229.72.10"/>			
Gateway (NAT)		<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No			

**Obr. 15: Nastavení rozhraní WAN pomocí NMS**

System		WAN		LAN	
Local Area Network interface settings					
LAN interface		<input type="text" value="192.168.0.1"/> <input type="text" value="255.255.255.0"/>			
DHCP server		<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No			
Clients IP range		<input type="text" value="192.168.0.2"/> <input type="text" value="192.168.0.50"/>			

**Obr. 16: Nastavení rozhraní LAN pomocí NMS**

Jednotlivá zařízení se přidávají zapsáním MAC adresy, která je uvedena na každém PLC modemu, a nastavením funkce prvku. Zařízení byla nakonfigurována následovně: HE s MAC adresou 00:13:96:00:CA:7D, opakovač s MAC adresou 00:13:96:00:CA:8B a CPE s MAC adresou 00:13:96:00:CA:8D. Je také možné vymezit PLC zařízení jako izolované jednotky nebo definovat virtuální síť. Pomocí NMS dále můžeme nastavit frekvenční mód, který chceme pro síť použít. Zařízení umožňuje definovat hladinu šumu pro každé zařízení a obsahuje také informace o rychlosti přenosu v obou směrech.

## 5.2 Zařízení Defidev/DS2

ACPE-200 (koncový uživatelský modem), zařízení pro zpětný převod vysokofrekvenčního signálu z elektrické sítě na ethernetové rozhraní. Obsahuje také rozhraní RJ11 pro připojení standardního analogového telefonu. ACPE-200 s čipem DSS9001 umožňuje připojení maximálně 64 zařízení.

Vlastnosti [21]:

- protokoly: DHCP, TCP/IP, TFTP, SNMP, VLAN(802.1q), STP, HTTP, QoS;
- VoIP: Codec G.711u/a, G.729a/b, G.723.1, H323 v4, RTP/RTCP;
- porty: 1x 10/100Base-T RJ-45 Port;
  - 1x USB;
  - 1x RJ11 (VoIP);
- rychlost: nominálně 200Mbps;
- šifrování: 3DES;
- VLAN;
- VPN.

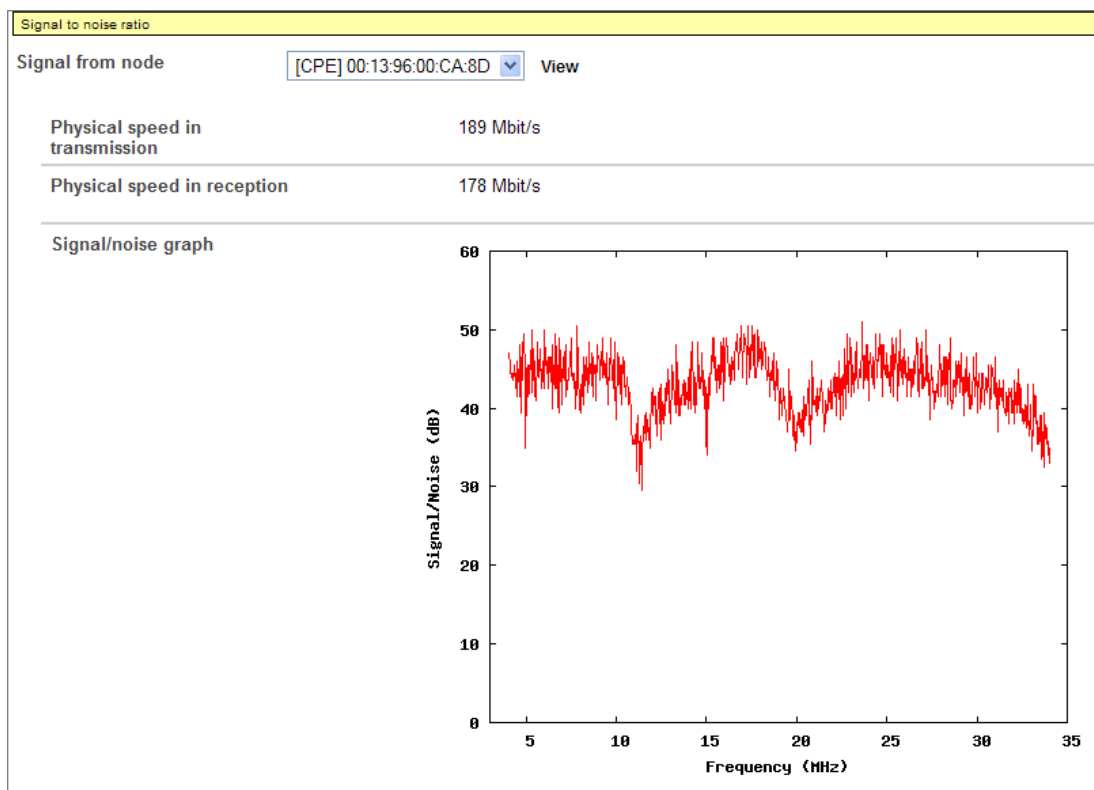
NMS (Network Management System) je systém pro konfiguraci, správu a sledování PLC sítě. NMS je implementován v zařízení AGW-100. Propojením počítače s NMS, který se spojí s HE zapojeným do sítě, je umožněna přímá konfigurace PLC sítě. Následná správa může být prováděna s odstupem přes WiFi signál, nebo přes WAN port. NMS obsahuje funkci směrovače mezi WAN portem a LAN sítí. Konfigurace probíhá přes adresu v internetovém prohlížeči.

Vlastnosti [22]:

- přístupový bod IEEE 802.11g, směrovač;
- Defidev PLC Network Management System;
- RJ-45 rozhraní pro ADSL/kabel/PLC modem;
- WiFi rozhraní;
- 4x LAN, 1x WAN port;
- Podporuje virtuální a globální IP adresu;
- Podporuje SNMP;
- Podporuje Auto Provisioning.

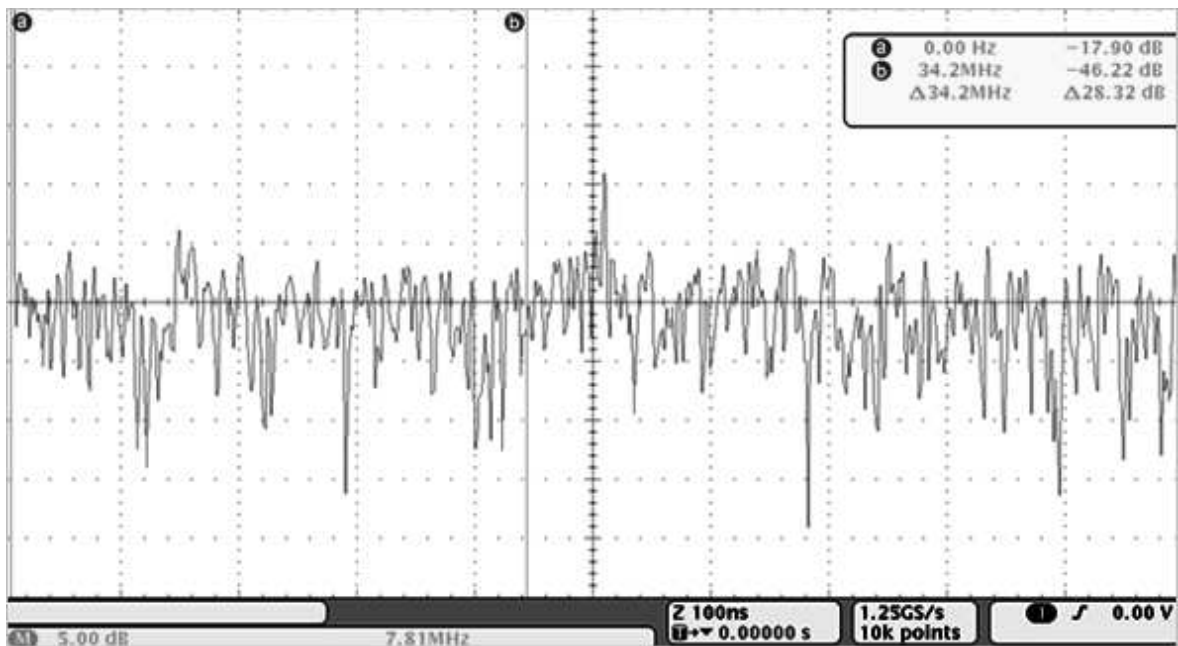
### 5.3 Praktické testy

Pro výše uvedené zapojení bylo provedeno základní měření, které je možno učinit prostřednictvím NMS, a to zjištění rychlosti na fyzické vrstvě a sledování SNR křivky (obr. 17). Všechna měření byla realizována pro kmitočtové pásmo 4 až 34 MHz (mód 6).

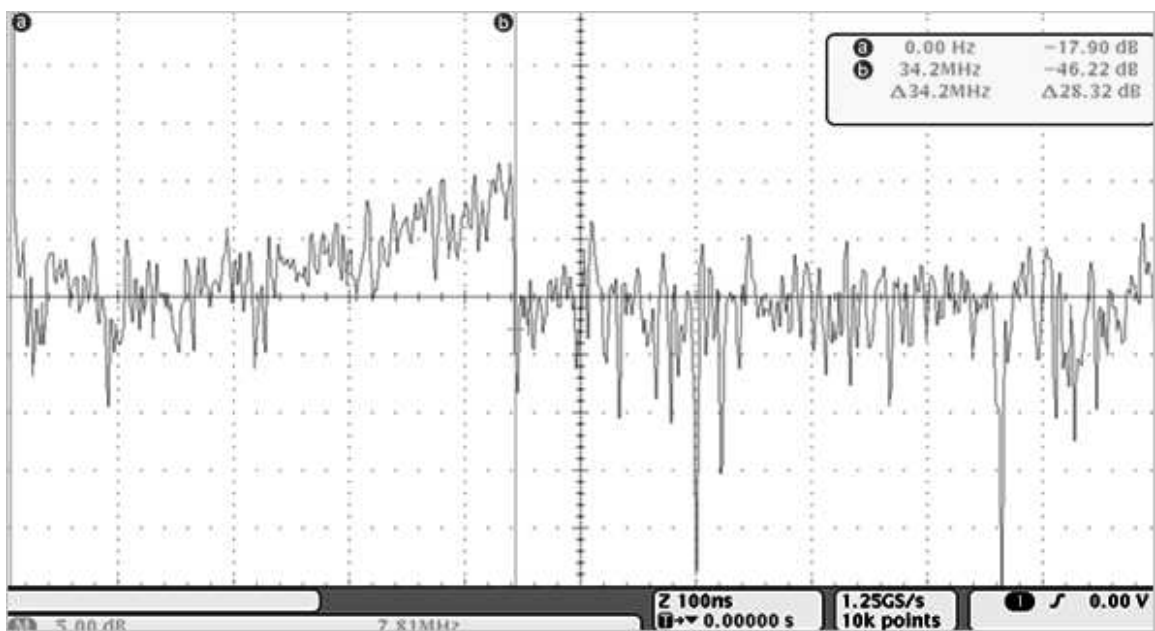


Obr. 17: Průběh SNR a rychlost na fyzické vrstvě

Pomocí digitálního osciloskopu s funkcí FFT jsem zobrazil spektrum signálů přítomných na síťovém rozvodu 230V. Spektrum bez připojených PLC prvků bylo konstantní a neprojevovaly se na něm v celém sledovaném úseku žádné změny výkonu (obr. 18). Pásmo 4-34 MHz ohraničují na obrázku kurzory *a* a *b*. Po zapnutí PLC prvků je vidět, že se v oblasti, která je využívána k přenosu změnila úroveň výkonu (obr. 19).

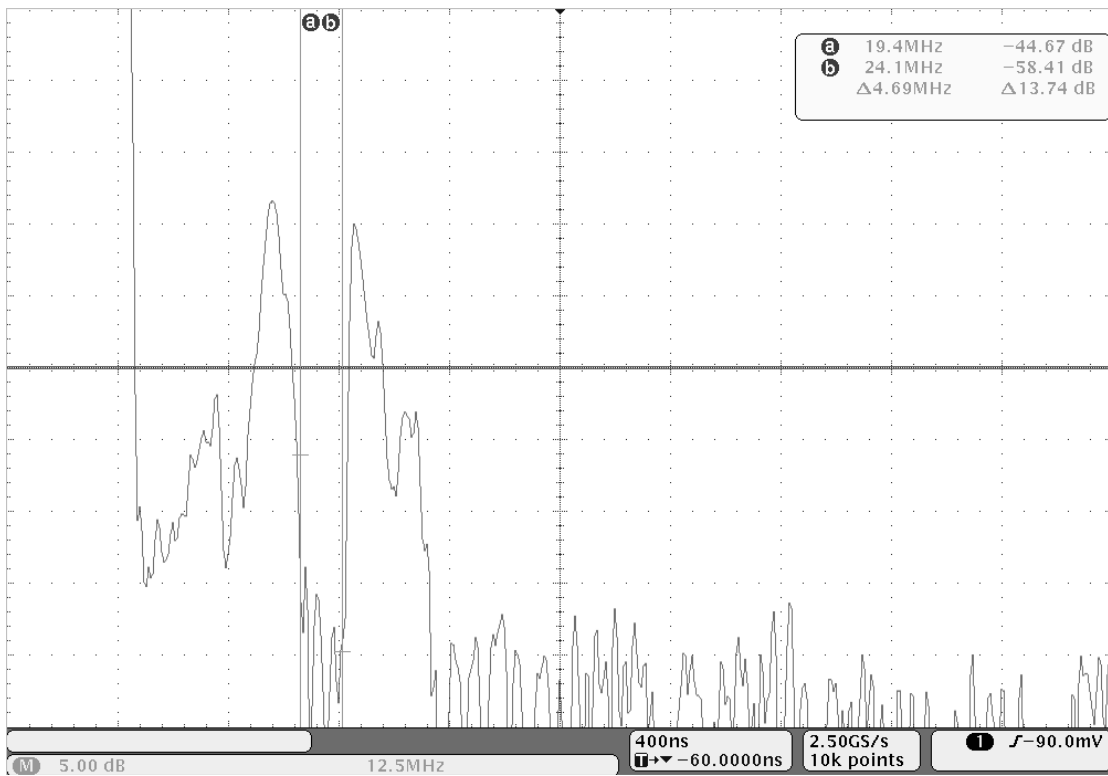


Obr. 18: Spektrum signálů v síťovém rozvodu 230V bez připojených PLC modemů

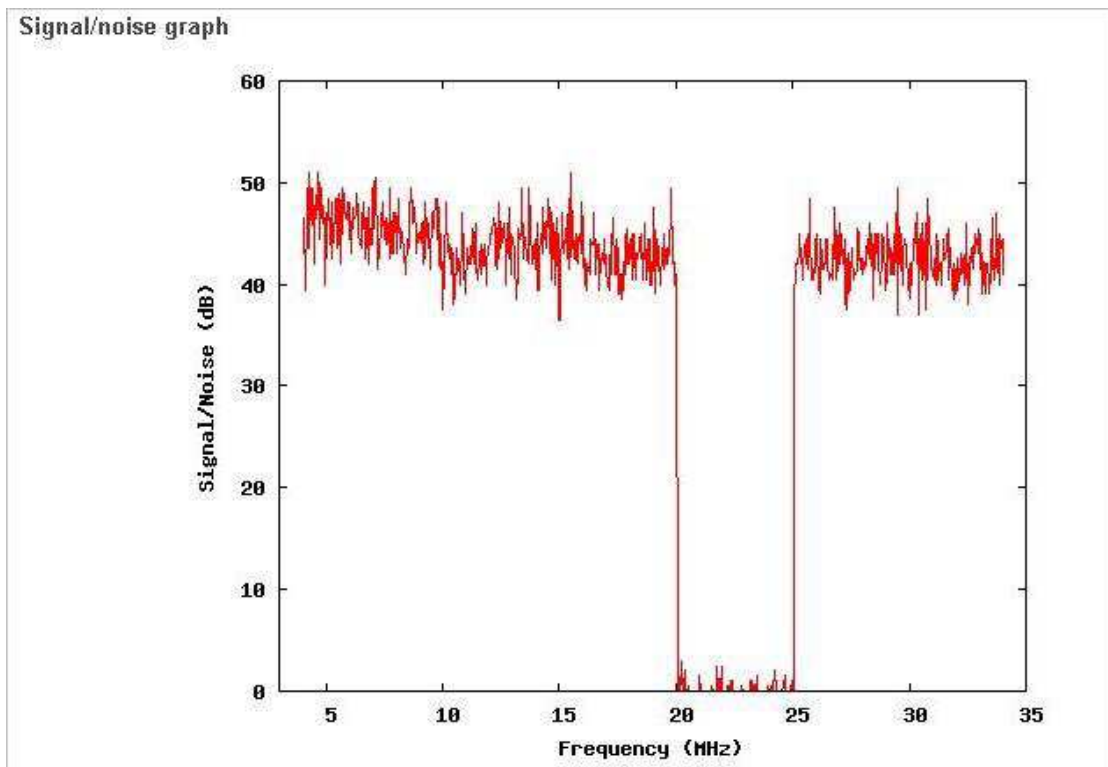


Obr. 19: Spektrum signálu v síťovém rozvodu s připojenými PLC modemy

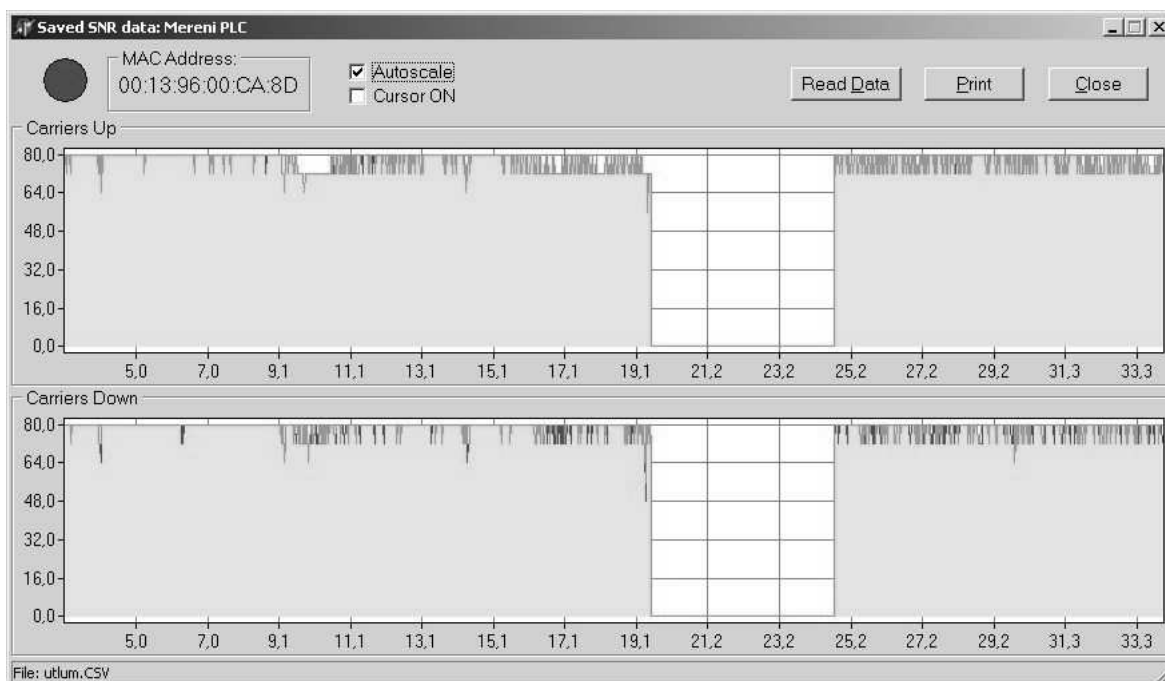
Zařízení NMS umožňuje selektivně vybrat pásmo, ve kterém bude signál utlumen. Pro následující měření bylo vybráno utlumení frekvenčního rozsahu 20 až 25 MHz. Zjištěné spektrum jsem porovnal s průběhy z dat získaných z PLC prvků (obr. 20, 21, 22).



Obr. 20: Spektrum signálu v síťovém rozvodu s utlumeným pásmem 20-25 MHz (zobrazení na osciloskopu)



Obr. 21: Průběh SNR s utlumeným pásmem 20-25 MHz (zobrazení z webového rozhraní NMS na PC1)

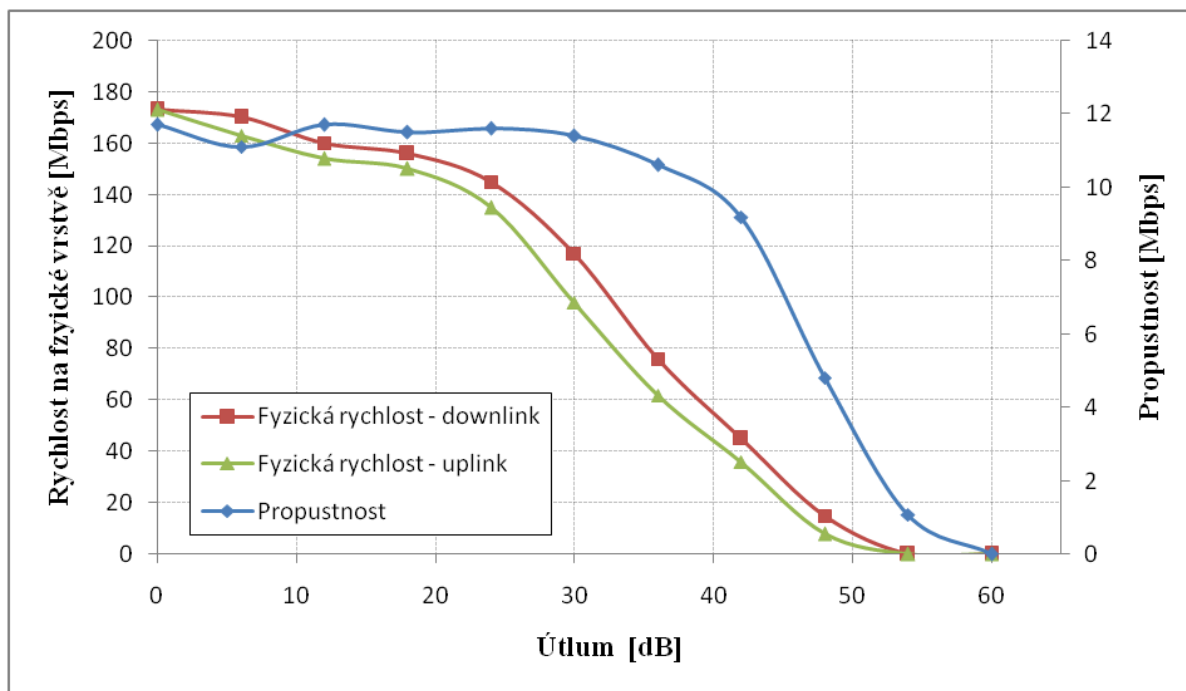


**Obr. 22: Zobrazení SNR s utlumeným pásmem 20-25 MHz (zobrazení z programu DS2Status na PC2)**

Následně byla testována propustnost a rychlost na fyzické vrstvě v závislosti na utlumení kmitočtového rozsahu 4-34 MHz. Útlum byl simulován pomocí NMS. Postupně byla nastavována velikost útlumu v rozsahu od 0 do 60 dB. Rychlost na fyzické vrstvě byla měřena pomocí programu DS2Speed a propustnost pomocí aplikace NetDoppler. Se zvyšujícím se útlumem klesá rychlost na fyzické vrstvě okamžitě. Propustnost, zůstává na stabilní hodnotě až do hodnoty útlumu 30 dB (což je způsobeno modulační technikou OFDM), kdy dochází nejprve k pozvolnému snížení rychlosti a od hodnoty 40 dB k prudkému snížení rychlosti (obr. 23).

**Tab. III: Měření rychlosti na fyzické vrstvě a propustnosti při zarušení kanálu**

Útlum [dB]	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Fyzická rychlost - downlink [Mbps]	173	170	160	156	145	117	76	45	15	0	0
Fyzická rychlost - uplink [Mbps]	173	163	154	150	135	98	62	36	8	0	0
Propustnost [Mbps]	11,7	11,1	11,7	11,5	11,6	11,4	10,6	9,2	4,8	1,0	0



Obr. 23: Závislost rychlosti na fyzické vrstvě a propustnosti na zarušení kanálu



## 6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prostudovat a popsat funkci systémů určených pro přenos dat po energetické síti. Zaměřil jsem se zejména na topologii PLC sítě, prvky PLC sítě, síťový referenční model a na rozbor jednotlivých vrstev. Nejvíce pozornosti jsem věnoval přenosu dat na fyzické vrstvě, která je založena na metodě OFDM. Data mohou při využití PLC technologie proudit rychlostí až 200 Mbps. Bezpečnost přenášených dat zajišťuje kvalitní šifrování (DES, 3DES, AES).

V praktické části byla navržena laboratorní síť s prvky systému Defidev/DS2, umožňující provádět měření základních parametrů tohoto typu komunikace. Počítače propojené pomocí PLC prvků byly začleněny do již existující LAN sítě. Dálková správa PLC prvků prostřednictvím IP adresy byla realizována pomocí NMS brány. Měřením byly zjištěny přenosové rychlosti na fyzické vrstvě a propustnost při utlumení kanálu. Sledována byla také SNR křivka. Provedenými testy byla ověřena funkčnost PLC sítě.

Energetická síť se díky technologii PLC stala komunikační sítí s velkým rozsahem možnosti využití v oblastech, jako je realizace domácích sítí nebo zajištění přístupu na Internet. Mezi přednosti PLC patří využití již dostupné infrastruktury elektrické sítě, rychlá a jednoduchá instalace a nízké náklady. PLC technologie se může uplatnit zejména v místech, kde není možné vést běžné kabelové spojení a je tak konkurenceschopnou technologií, která může přispět k rozšíření širokopásmového přístupu. Na druhou stranu, velké problémy u PLC systémů představují zejména různá rušení a interference. Proto se aplikují takové typy modulací a přenosového protokolu, které jsou schopny i přes tyto rušivé vlivy dosáhnout co nejvyšší přenosové rychlosti při co nejnížší chybovosti a přizpůsobovat se momentálnímu stavu sítě.

## LITERATURA

- [1] KIRWAN, Shane, SOUTH, Greg. *Power line networking technologies broadband potential* [online]. 2003 [cit. 2008-04-20]. Dostupné z: <<http://glasnost.itcarlow.ie/~net4/kirwans/bband.html>>.
- [2] FEIBEL, Werner. *Encyklopedie počítačových sítí*. 1. vyd. Praha : Computer Press, 1996. 1230 s. ISBN 80-85896-67-2.
- [3] DOBEŠ, Josef, ŽALUD, Václav. *Moderní radiotechnika*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [4] PUŽMANOVÁ, Rita. *Širokopásmový internet : přístupové a domácí sítě*. 1. vyd. Brno : Computer Press, 2004. 377 s. ISBN 80-251-0139-8.
- [5] HRASNICA, Halid, HAIDINE, Abdelfatteh, LEHNERT, Ralf. *Broadband powerline communications networks : network design*. Chichester : John Wiley & Sons, 2004. 275 s. ISBN 0-470-85741-2.
- [6] OPERA2. IST Integrated Project No 026920. Funded by EC. *D56 Project presentation* [online]. 2007 [cit. 2008-04-26]. 21 s. Dostupné z: <[http://www.ist-opera.org/drupal2/documents/OP2\\_WP9\\_D56\\_Project\\_Presentation\\_v1.pdf](http://www.ist-opera.org/drupal2/documents/OP2_WP9_D56_Project_Presentation_v1.pdf)>.
- [7] OPERA2. IST Integrated Project No 026920. Funded by EC. *D51 White Paper: OPERA technology* [online]. 2007 [cit. 2008-04-26]. 42 s. Dostupné z: <[http://www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2\\_D51\\_White\\_Paper\\_Opera\\_Technology\\_v1.pdf](http://www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2_D51_White_Paper_Opera_Technology_v1.pdf)>.
- [8] OPERA2. IST Integrated Project No 026920. Funded by EC. *D27 First Draft of the OPERA specification version 2* [online]. 2007 [cit. 2008-04-28]. 447 s. Dostupné z: <[http://www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2\\_D27\\_First draft of the OPERA specification version 2.pdf](http://www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2_D27_First draft of the OPERA specification version 2.pdf)>.
- [9] BAŽANT, Ivo, VANČATA, Pavel. Rozvoj technologie PLC. *Sdělovací technika*. 2006, roč. 54, č. 2, s. 16-18.
- [10] PUŽMANOVÁ, Rita. Data po elektrické síti. *Elektrotechnický magazín*. 2004, roč. 14, č. 1, s. 11-13.
- [11] TRNKA, Miloslav. Komunikace po napájecí (rozvodné) síti. *Slaboproudý obzor*. 2005, roč. 61, č. 2, s. 14-17.
- [12] SVOBODA, Jaroslav. Přenos dat v silových sítích I. *Sdělovací technika*. 2006, roč. 54, č. 6, s. 14-16.
- [13] SVOBODA, Jaroslav. Přenos zpráv v energetických sítích. *Sdělovací technika*. 2006, roč. 54, č. 9, s. 20-21.
- [14] VANČATA, Pavel. Evropský projekt na rozvoj technologie Powerline Communication. *Telekomunikace*. 2004, roč. 41, č. 7-8, s. 13-17.

- [15] VANČATA, Pavel. *Standardizace širokopásmových systémů přenosu po energetickém vedení* [online]. 2005 [cit. 2008-05-06]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2005112801>>.
- [16] VANČATA, Pavel. Širokopásmový přenos po energetických vedeních. *Telekomunikace*. 2004, roč. 41, č. 3, s. 19-24.
- [17] DS2 [online]. c2004 [cit. 2008-05-02]. Dostupné z: <<http://www.ds2.es/>>.
- [18] *HomePlug Powerline Alliance* [online]. c2008 [cit. 2008-05-10]. Dostupné z: <<http://www.homeplug.org>>.
- [19] *Advanced Encryption Standard (FIPS PUB 197)* [online]. 2001 [cit. 2008-05-06]. 47 s. Dostupné z: <<http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>>
- [20] MOHAMAD, Ali Farek. *PLC - the access technology for realizing AMM and broadband* [online]. Kongens Lyngby : Technical University of Denmark, 2006 [cit. 2008-05-06]. 174 s. Dostupné z: <[http://www.elektro.dtu.dk/upload/Institutter/\\_oersted/ELTEK/u-projekter/06/afm\\_thesis.pdf](http://www.elektro.dtu.dk/upload/Institutter/_oersted/ELTEK/u-projekter/06/afm_thesis.pdf)>.
- [21] Defidev/DS2 ACPE-200 datasheet.
- [22] NMS - Network Management System, příručka pro uživatele systému PowerLine - Defidev/DS2.
- [23] *Takyo.net* [online]. c2006 [2008-5-10]. Dostupné z: <<http://www.takyo.net/>>
- [24] ŠVENDA, Petr. *Srovnání standardu AES s algoritmy 3DES a IDEA* [online]. 2002 [cit. 2008-05-10]. 7 s. Dostupné z: <<http://www.svenda.com/petr/docs/AEScomparison2001.pdf>>.