

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Analýza standardů pro smart metering**

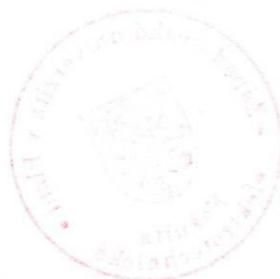
## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin VOTAVA**  
Osobní číslo: **E09B0244P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Analýza standardů pro smart metering**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte problematiku vzdáleného měření.
2. Analyzujte vhodné standardy na základě evropského projektu OPEN Meter.
3. Popište technologii PLC a příslušné standardy.
4. Popište bezdrátové standardy ZigBee a WM-Bus.
5. Diskutujte výstupy projektu OPEN Meter a porovnejte je s ostatními standardizačními projekty v oblasti chytrého měření.

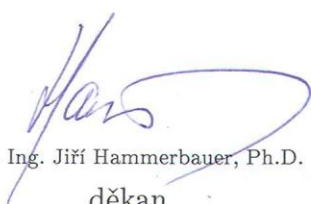


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

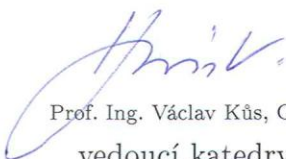
**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Krutina**  
Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na komunikaci uvnitř moderních systémů smart metering. Popisuje standardy a protokoly, které jsou v nich používány nebo by do nich mohly být zavedeny. Součástí práce je i měření těchto standardů při podmínkách, které odpovídají praxi.

## Klíčová slova

Chytrá síť, komunikace, odečet, OPEN meter, PLC, PRIME, G3, ZigBee, Wireless M-Bus

## Abstract

Bachelor thesis is focused on communication within modern smart metering system. Thesis describes standards and protocols, which are used within these systems or which could be implemented into them. The measurement of these standards under real conditions is also part of this thesis.

## Key words

Smart grid, communication, meter reading, OPEN meter, PLC, PRIME, G3, ZigBee, Wireless M-Bus

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 7.6.2012

Martin Votava

.....

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Alešovi Krutinovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Seznam zkratk

2G	druhá generace
3G	třetí generace
ACK	acknowledge
AES	Advanced Encryption standard
APS	pomocná aplikační podvrstva
APP_LAYER	aplikační vrstva
BPSK	dvoustavová fázová modulace
BSN	beacon sequence number
CAP	contention access period
C	řídící pole rámce ZigBee
CC	contention control
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
CFP	Contention free period
CI	Control information
CLU	central low voltage unit
cm	centimetr
CMU	central medium voltage unit
ConvZeros	bity potřebné pro vynulování registrů convolutional encoder
CRC	Cyclic redundancy Check
ctrl	control
CU	Central unit
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple access with Collision Avoidance
ČSN	Česká státní norma
dB	decibel
D8PSK	diferenciální 8stavová fázová modulace
DBPSK	diferenciální dvoustavová fázová modulace
DNS	Domain Name System
DQPSK	diferenciální čtyřstavová fázová modulace
DSL	Digital Subscriber Line
DSN	data sequence number
DT	delimiter Type
FCS	frame check sequence
FCCS	frame control check sequence
FEC	forward error correction
FFD	full function device
FL	frame length
FSK	Frequency Shift keying
FTP	File Transport Protocol
G3	PLC standard
GHz	gigahertz
GPDU	Generic protocol data unit
GPRS	General Packet Radio Service
GTS	guaranteed time slot
H	header
HDR.DO	header downlink/uplink
HDR.HCS	header Check sequence
HDR.HT	header type
HDR.LEVEL	level of PDU in switching hierarchy



---

http	Hypertext Transfer Protocol
Hz	hertz
ID	identification
IEC	mezinárodní elektrotechnická norma
IEEE	institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
IFFT	Inverse Fourier transform
ISDN	Integrated Service Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
kB	kilobajt
kb/s	kilobit za sekundu
kHz	kilohertz
LEN	length
LLC	link sublayer
LSF	last segment flag
m	metr
M-Bus	Meter Bus
MAC	Media Access layer
ManID	manufacture identification
MFR	MAC footer
MHR	MAC header
MHz	megahertz
MOD	modulation type
ms	milisekunda
MSDU	MAC data
NACK	negative acknowledge
nn	nízké napětí
O&M	zařízení určené pro údržbu prvků sítě smart metering
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPEN meter	Open Public Extended Network metering
OSI	Open Systems Interconnection model
P	payload
PAD	padding
PAN	personal area network
PDC	phase detection counter
PDU	protocol data unit
PLC	Power Line Communication
PPDU	promotion needed PDU
PRIME	PoweRline Intelligent Metering Evolution
RFD	reduce function device
RLU	remote low voltage unit
RMU	remote medium voltage unit
RSSI	receive signal strength indicator
SC	segment count
SCP	shared contention period
SET-Plan	The European Strategic Energy Technology Plan
SL	segment length
SNR	signal to noise ratio
TM	tone map
TMR	tone map request
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
vn	vysoké napětí

WiFi	standard bezdrátové komunikační technologie
XOR	Exclusive Logical disjunction
ZigBee	standard bezdrátové komunikační technologie

## Obsah

1	Úvod .....	1
1.1	Metody vzdáleného odečtu.....	2
2	OPEN meter .....	3
2.1	Architektura systému .....	3
2.2	Rozhraní .....	4
3	PLC.....	6
3.1	ISO/OSI v PLC .....	6
3.2	Standard PRIME.....	7
3.2.1	Fyzická vrstva .....	7
3.2.2	Tvorba výsledného signálu .....	8
3.2.3	Datový rámeček .....	8
3.2.4	Hierarchie sítě .....	10
3.2.5	MAC rámeček.....	11
3.2.6	GPDU.....	12
3.2.7	PPDU .....	13
3.3	Standard G3.....	14
3.3.1	Fyzická vrstva .....	14
3.3.2	Vytvoření výsledného signálu.....	15
3.3.3	G3 na hladinách vn .....	17
3.3.4	Datový rámeček fyzické vrstvy .....	18
3.3.5	MAC vrstva.....	19
3.3.6	Obečný MAC rámeček .....	19
3.3.7	Rozlišení typu MAC rámeček.....	23
3.3.8	Beacon rámeček.....	23
3.3.9	Datový rámeček .....	24
3.3.10	Acknowledge rámeček.....	24
3.3.11	Command rámeček .....	24
3.4	ČSN IEC 61334.....	25
4	Bezdrátové standardy ZigBee a Wireless M-Bus .....	27
4.1	Standard ZigBee .....	27
4.1.1	Fyzická a MAC vrstva .....	27
4.1.2	Topologie sítě a zabezpečení .....	27
4.1.3	Aplikační vrstva.....	28
4.2	Standard Wireless M-Bus .....	29
4.2.1	Princip a parametry komunikace.....	29
4.2.2	Formát Packetu .....	30
5	Porovnání projektů OPEN meter a SET-Plan.....	31
5.1	Měření PLC standardu PRIME .....	32
5.2	Porovnání PLC standardů .....	36
	Závěr .....	37
	Seznam literatury a informačních zdrojů .....	39

## 1 Úvod

Vzdálené měření se v současné době uplatňuje zejména v systémech smart metering (chytrého měření). Systém smart metering automaticky sbírá a vyhodnocuje data o spotřebě energií. Díky tomu umožňuje nejenom provádět přesné odečty v reálném čase, ale i řídit a regulovat spotřebu (například řízení teploty budovy, řízení osvětlení budovy atd.). Dále systém umožňuje vyhodnocovat kvalitu dodávky energie a zpětně o tom posílat zprávy distributorovi.

Kromě zefektivnění řízení a regulaci spotřeby energií přináší vzdálený odečet mnoho výhod na straně spotřebitele, ale i na straně distributorů. Mezi výhody spotřebitele dále patří informace o okamžité spotřebě a možnost předplacení energií. Výhodami distributora jsou menší nároky na zaměstnance, snadný přístup k datům o spotřebě, údaje ze všech měřících zařízení lze načíst přímo ze systému. Odečty jsou tak oproti starému způsobu výrazně méně časově náročné.

Dříve odečty prováděla pověřená osoba. Tato osoba přečetla a zapsala stav měřícího přístroje, tímto způsobem musel být získán stav každého měřícího přístroje zvlášť, k tomu byl potřeba přímý přístup ke každému měřícímu zařízení, což vedlo k velkému časovému zatížení zaměstnance a k chybám způsobeným lidskou obsluhou. Navíc tento způsob odečtu byl nevýhodný v rámci řízení a regulace spotřeby budov.

V případě systému budov byly řízení a regulace spotřeby energií prováděny ručně lidskou obsluhou. Špatná regulovatelnost systému a chyby lidské obsluhy (například nesprávné ovládání ventilů), vedly k neefektivnímu využití energií. Další nevýhodou systému byly velké časové nároky na zaměstnance, který musel ručně řídit spotřebu (ovládat ventily), a kontrolovat aktuální stav v budově (například teplotu, stav osvětlení, atd.)

V dnešních systémech se řízení a regulace provádí automaticky centrální jednotkou na základě odečtených údajů z měřících přístrojů, tyto údaje jsou v rámci jedné budovy posílány do jedné jednotky (koncentrátoru). Díky způsobu pořízení a uložení údajů měřících přístrojů je nejenom zlepšena efektivita systému, ale jsou i usnadněny dodavatelům odečty. Dodavatelé pak stačí pouze provést sběr dat jednotlivých měřících přístrojů z koncentrátorů.

Sběr dat může být proveden několika způsoby, pomocí stálých sítí, nejsou-li k dispozici, je proveden pověřenou osobou, k tomu jsou určeny metody Walk-by a Drive-by.

## 1.1 Metody vzdáleného odečtu

Dle metody Walk-by má pověřená osoba přenosný osobní počítač, ze kterého jsou odečtená data z měřících přístrojů stažena na centrálu jedním ze dvou způsobů. Dle prvního způsobu jsou data v počítači uchována a stažena až na centrále. Druhý způsob využívá veřejných 2G/3G sítí mobilních operátorů, jejímž prostřednictvím jsou data posílána přímo na centrálu. Sběr dat měřících přístrojů se do osobního počítače provádí prostřednictvím koncentrátoru, ve kterém jsou data uložena. Ten je většinou umístěn vně objektu, díky tomu není potřeba přímý přístup do objektu. Sběr dat může být proveden bezdrátově, pomocí čtečky, vysílače, případně pomocí kabelového připojení nebo sondy. V případě použití kabelového připojení nebo čtečky musí být zajištěn přímý přístup k zařízení. Proto se nabízí využití vysílače, kterým lze provést odečet až na vzdálenost několika desítek metrů. Metoda Walk-by je kvůli své malé mobilitě spíše vhodná do měst a hustě osídlených oblastí.

Metoda Drive-by je obdobná, oproti Walk-by se však díky vyšší mobilitě, kterou poskytuje, hodí spíše do méně osídlených oblastí, kde je Walk-by neefektivní. Na rozdíl od Walk-by je osobní počítač umístěn v autě, které řídí osoba pověřená odečty. Sběr dat v případě této metody může být prováděn pouze pomocí vysílače, data se na centrálu oproti Walk-by stahují pouze pomocí sítí mobilních operátorů. Nevýhodou těchto dvou metod zůstává potřeba pověřené osoby provádějící odečty.

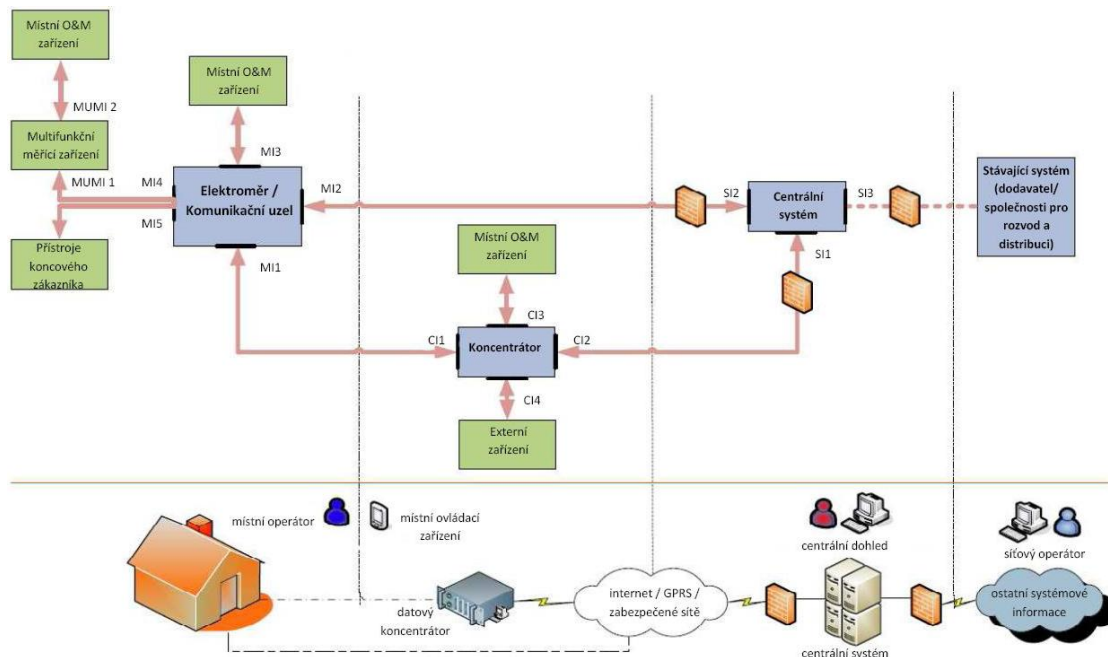
V tomto mají výhodu stálé sítě, kde oproti předchozí dvěma metodám sběr dat na centrálu probíhá automaticky, není potřeba pověřené osoby, nevýhodu mohou přinášet vyšší investiční náklady. Stále sítě mohou být bezdrátové i kabelové. V případě kabelových sítí ke komunikaci lze využít veřejných sítí, případně lze využít vedení vn a nn.

Těmito koncepty se zabývají standardizační projekty, které standardizují strukturu sítě chytrého měření a stanovují způsob vzájemné komunikace jednotlivých zařízení sítě chytrého měření na základě již hotových standardů. Mezi tyto projekty patří projekt Set-Plan nebo OPEN meter.

## 2 OPEN meter

Hlavním cílem projektu OPEN meter je na základě souhlasu relevantních subjektů v oboru specifikovat komplexní soubor norem pro architekturu systému chytrého měření a připravit jej pro skutečné podmínky inženýrských sítí, tak aby byl připravený pro plnou implementaci.[1]

### 2.1 Architektura systému



Obrázek 1 Architektura systému [2]

Dle výše uvedeného obrázku je systém OPEN meter složen z níže uvedených bloků. **Centrální systém** komunikuje přes rozhraní SI3 se stávajícím systémem distributora, dále je zodpovědný za řízení všech informací a dat týkajících se inteligentního měření, konfigurace, řízení a ovládání všech součástí systému pomocí rozhraní SI2 a SI1.[2]

**Stávající systém** je již existující obchodní a technický systém, který řídí obchodní procesy, k tomu využívá komunikace s centrálním systémem pomocí rozhraní SI3.[2]

**Koncentrátor** je článek mezi elektroměrem a centrálním systémem, jeho hlavním úkolem je poskytovat data centrálnímu systému přes rozhraní CI2 získána od měřicích zařízení přes rozhraní CI1, dále umožňuje připojení externího zařízení přes rozhraní CI3.[2]

**Elektroměr / komunikační uzel** je zařízení, které měří spotřebu elektrické energie. Dále slouží jako komunikační uzel, umožňuje připojení multifunkčních měřicích zařízení přes rozhraní MI4 a připojení přístrojů koncového zákazníka přes rozhraní MI5.[2]

**Místní O&M** zařízení jsou přenosné přístroje používané pro interakci s elektroměry, koncentrátory a multifunkčním měřicím zařízením v průběhu instalace a poté pro následnou údržbu, k tomu jsou využívána rozhraní MI3, NUMI2, CI3.[2]

**Multifunkční měřicí zařízení** je elektronické inteligentní měřicí zařízení pro měření elektrické energie, vody, plynu nebo tepla s lokálním provozem. K systému je připojeno přes elektroměr přes rozhraní MI4.[2]

**Externí zařízení** jsou jiné typy zařízení, které lze připojit ke koncentrátoru, mohou být použity například s cílem umožnit využití budoucích funkcí inteligentních sítí, které potřebují kontrolu, monitorování a další senzorové prvky.[2]

**Přístroje koncového zákazníka** jsou pomocná zařízení, která lze připojit k instalaci zákazníka, aby byla možná interakce s celým systémem inteligentního měření nebo aby bylo možné zobrazení spotřeby a jiných informací zajímavých pro zákazníka.[2]

## 2.2 Rozhraní

Rozhraní	Zvolený typ technologie	Zvolená technologie
MI1 – CI1	PLC	PRIME
		IEC 61334-5-1
CI2 – SI1	Wireless	UMTS
		GPRS
MI2 – SI2	Wireless	UMTS
		GPRS
MI3, CI3 – NUMI2	Wireless	IEEE802.15.4
		IEEE802.11
NUMI1 – MI4	Wireless	IEEE802.15.4
		IEEE802.11
CI4	Wireless	ZigBee
		Wifi
MI5	Wireless	Bluetooth
		ZigBee

**Tabulka 1** Technologie použité pro komunikaci [2]

Pro komunikaci mezi koncentrátorem a centrálním systémem (MI2 – SI2) byly uvažovány technologie PLC a veřejné radiové sítě 2G/3G. Veřejné radiové sítě se nakonec ukázaly být výhodnější, ovšem za předpokladu že obě zařízení mají dostatečně silný signál.

Interface MI2 – SI2 slouží pro přímou komunikaci mezi elektroměrem a centrálním systémem, je určen pouze pro architektury systému, které neobsahují koncentrátor. Pro tento druh komunikace jsou opět uvažovány 2G/3G sítě UMTS a GPRS. UMTS nabízí lepší výkon, ale oproti GPRS má vyšší provozní a instalační náklady, navíc UMTS má malé pokrytí

v mimoměstských oblastech. Proto se dnes dává přednost systémům GPRS, které v praxi dosahují téměř stejných provozních výkonů.

Interface MI3, CI3 – NUMI2 slouží pro komunikaci mezi místním O&M zařízením a koncentrátorem, elektroměrem nebo multifunkčním měřicím zařízením. Vzhledem k tomu, že O&M zařízení je mobilní, byly vybrány bezdrátové technologie, konkrétně jsou uvažovány standardy IEEE802.15.4 a IEEE802.11.

Interface NUM1 – MI4 slouží pro komunikaci mezi multifunkčním měřicím zařízením a elektroměrem. V tomto případě jsou z důvodů snadné instalace (odpadá nutnost instalace sítě) uvažovány bezdrátové technologie, konkrétně standardy IEEE802.15.4 a IEEE802.11.

Interface CI4 je určen pro komunikaci koncentrátoru s externím zařízením. Pro daný interface jsou opět voleny bezdrátové technologie. Oproti předešlým případům zde není důležitá spotřeba, ale dosah, proto byly vybrány technologie WiFi a ZigBee.

Interface MI5 je určen pro komunikaci mezi elektroměrem a přístroji koncového zákazníka. Uvažovány jsou opět bezdrátové technologie, konkrétně standardy Bluetooth a ZigBee.

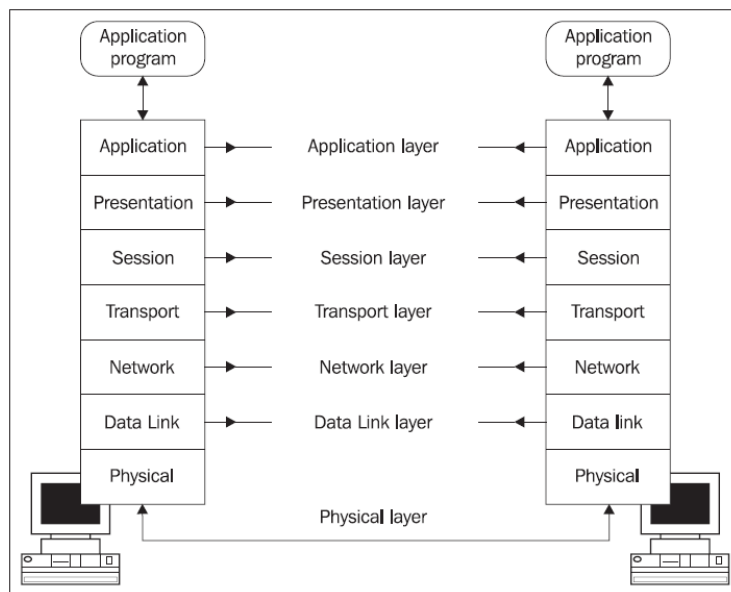
Pro komunikaci mezi elektroměrem a koncentrátorem (interface MI1 – CI1) byla zvolena PLC technologie, uvažovány jsou standardy PRIME a IEC 61334-5-1. S PLC odpadá nutnost instalací dalších sítí. Oproti bezdrátovým technologiím má PLC výhodu, že se nemusí řešit, kde je zařízení umístěno. Zařízení například může být umístěno v místech, kam by se v případě bezdrátových technologií nedostal signál.



## 3 PLC

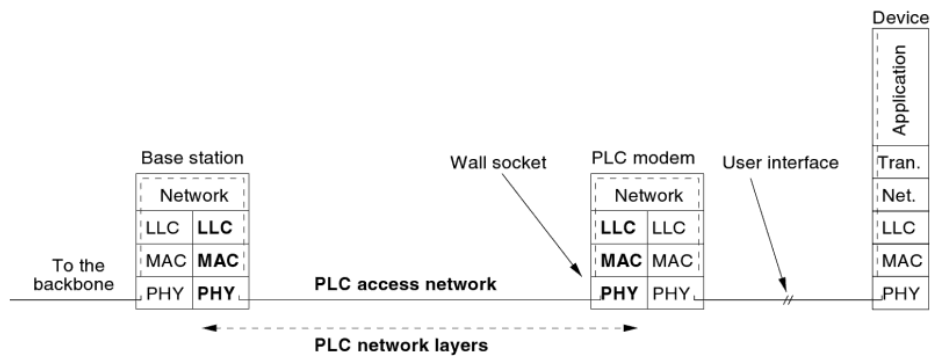
### 3.1 ISO/OSI v PLC

Při popisování standardů vycházíme, z toho že síťová komunikace je rozdělena do několika vrstev, každá vrstva využívá služeb nižších vrstev a poskytuje služby vyšším vrstvám. Rozložení vrstev dle ISO/OSI je zobrazeno na obrázku 2.



Obrázek 2 ISO/OSI model [3]

Nejnižší vrstvou je fyzická vrstva. Fyzická vrstva řeší kódování, modulace, úroveň signálů (log 1 a 0), jinými slovy řeší parametry signálu. Další vrstvou je vrstva linková, která zajišťuje spojení dvou stanic a formuje rámce fyzické vrstvy, dále řídí přístup jednotlivých zařízení k vysílacímu médiu. Síťová vrstva umožňuje komunikaci zařízením, zajišťuje spojení zařízením, která nemají mezi sebou přímá spojení. Jinými slovy síťová vrstva řeší kudy poslat data, aby dorazila k určenému příjemci. Dále sestavuje data vyšší vrstvy do paketů, ve kterých musí být uvedena adresa daného příjemce. Transportní vrstva zajišťuje pomocí služeb síťové vrstvy lepší kvalitu spojení, k tomu může využít několika spojení vytvořených síťovou vrstvou. Relační vrstva navazuje, ukončuje a řídí relace, oproti transportní vrstvě, řeší a zajišťuje spojení na úrovni aplikací. Prezenční vrstva zaručuje „datový kontext“, jinými slovy zajišťuje, aby data měla stejný význam pro aplikace na straně odesílatele i na straně příjemce. Do aplikační vrstvy patří služby a protokoly, které umožňují aplikacím přístup ke komunikačním systémům např. FTP, http, DNS.



Obrázek 3 ISO/OSI v PLC [4]

Příklad PLC sítě využívající architektury ISO/OSI je zobrazen na obrázku 3. Linková vrstva PLC sítě je zde rozdělena na podvrstvy MAC a LLC. MAC řídí přístup k médiu, LLC formuje rámce fyzické vrstvy. V tomto případě PLC síť tvoří pouze infrastrukturu pro uživatelská zařízení, na úrovni PLC sítě se řeší pouze tři nižší vrstvy. Jinými slovy PLC síť poskytuje pouze konektivitu uživatelským zařízením.

## 3.2 Standard PRIME

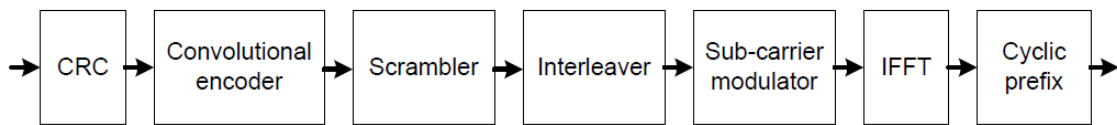
### 3.2.1 Fyzická vrstva

V případě standardu PRIME se využívá frekvenční pásmo CENELEC A. Data se přenášejí pomocí OFDM modulací s 97 nosnými kmitočty, z toho 96 je datových. Pro modulování jednotlivých nosných se oproti níže uvedenému G3 (viz odstavec 3.3) navíc používá D8PSK. Ve srovnání s G3 je šířka pásma menší, přičemž první nosná je na kmitočtu 41,992 kHz a poslední na 88,867 kHz. Výsledný signál na jednotlivých nosných je sestavován pomocí IFFT, používá se vzorkovací kmitočtem 250 kHz.

Parameter	Values	
Base Band clock (Hz)	250000	
Subcarrier spacing (Hz)	488.28125	
Number of data subcarriers	84 (header)	96 (payload)
Number of pilot subcarriers	13 (header)	1 (payload)
FFT interval (samples)	512	
FFT interval ( $\mu$ s)	2048	
Cyclic Prefix (samples)	48	
Cyclic Prefix ( $\mu$ s)	192	
Symbol interval (samples)	560	
Symbol interval ( $\mu$ s)	2240	
Preamble period ( $\mu$ s)	2048	

Tabulka 2 parametry modulátoru a IFFT [5]

### 3.2.2 Tvorba výsledného signálu

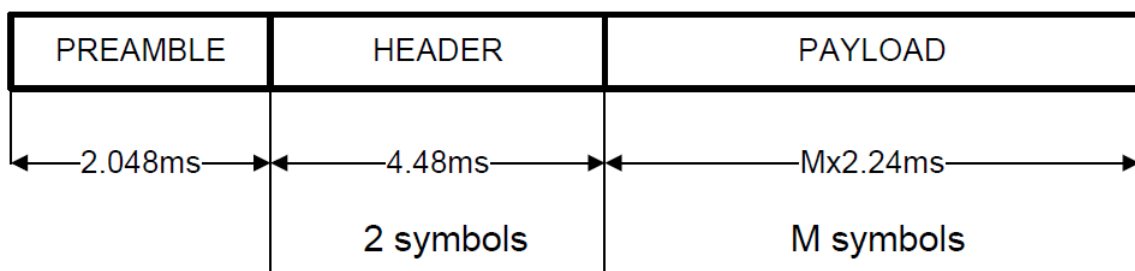


Obrázek 4 blokové schéma PRIME vysílače [5]

Ze schématu je patrné, že PRIME vysílač neobsahuje blok Reed-Solomon kódér, FEC kódér je o tento blok jednodušší. Oproti G3 lze FEC pro některé symboly vypnout. Navíc je obsažen blok CRC, který se využívá pouze pro řídicí část rámce. CRC pro data se vytváří na úrovni MAC vrstvy. Blok Convolutional encoder (konvoluční kódér) pracuje na stejném principu a se stejnou bitovou robustností jako v standardu G3. Bloky Scrambler a Interleaver pracují na stejném principu jako v G3. Výsledný kód je méně odolný proti rušení, naproti tomu lze dosáhnout vyšších teoretických rychlostí. Modulátor jednotlivých nosných může oproti G3 využívat modulace D8PSK. Tím můžeme dosáhnout vyšší přenosové rychlosti. Avšak více stavovou modulací (D8PSK) snížíme odolnost proti rušení a zvýšíme chybovost přenosu. Jinými slovy jejím použitím při nižších úrovních odstupu signálu od šumu naopak reálnou přenosovou rychlost snížíme. Nastavení jednotlivých bloků pro tvorbu výsledného signálu je určeno parametry v header (v řídicí části) datového rámce.

### 3.2.3 Datový rámec

Datový rámec fyzické vrstvy je složen ze dvou prvků konstantní délky preamble a header a jednoho prvku proměnné délky payload.



Obrázek 5 Datový rámec fyzické vrstvy [5]

Preamble slouží k synchronizačním účelům, dále se používá pro zjištění útlumu na jednotlivých nosných. Na základě zjištěného útlumu je určeno zesílení nosných. K tomu je místo OFDM symbolu používán chirp signál, který je za určitou periodu vysílán na všech kmitočtech všech nosných. Signál je matematicky zapsán pomocí rovnice 1.

$$S_{CH} = A \cdot \text{rect}(t/T) \cdot \cos[2\pi(f_0 t + 1/2 \cdot \mu t^2)]$$

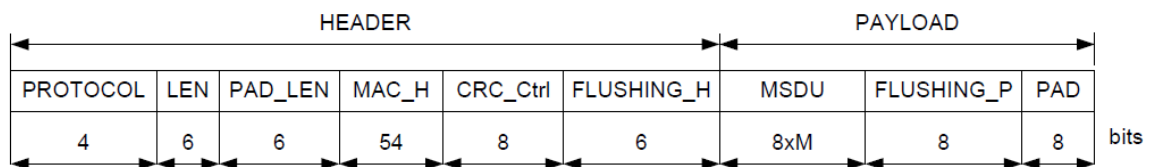
### Rovnice 1 Chirp signál [5]

Kde  $A$  je amplituda,  $\text{rect}$  je funkce dosahující dvou hodnotu v závislosti na parametru, je-li parametr  $\geq 1$ , funkce je rovna 0, je-li v intervalu  $<0;1$ , funkce je rovna 1. Tím funkce omezí dobu trvání signálu na jednu periodu  $T$ .  $\mu$  je konstanta, je určena v rovnici 2. Kde perioda preamble  $T$  je dlouhá 2,048 ms.  $f_f$  a  $f_0$  jsou frekvence poslední a první nosné. První nosná je na frekvenci 41992 Hz, poslední na 88687 Hz.

$$\mu = (f_f - f_0)/T$$

### Rovnice 2 Určení konstanty $\mu$ [5]

Po preambuli následuje dva symboly dlouhý header. Header řídí rámec, určuje payload, jeho délku a typ použitých modulací pro jednotlivé symboly. Pro zabezpečení správnosti přenosu header se využívá 13 pilotních kmitočtů modulovaných pomocí BPSK, na nichž je vysílána 127 bitová řada a 83 datových nosných modulovaných pomocí DBPSK. Po header následuje payload, jedná se o část rámce, kde se přenáší data vyšších vrstev. Oproti header obsahuje pouze 1 pilotní nosnou a 95 datových nosných.



Obrázek 6 Header a Payload datového rámce [5]

Složení header a payload je zobrazeno na obrázku 6. Kde protocol obsahuje vysílací schéma payloadu, dle kterého se upravuje pro jednotlivé symboly typ použité modulace a použití FEC, je určen MAC vrstvou na základě rušení v předchozích OFDM symbolech. LEN definuje délku payloadu v OFDM symbolech. PAD\_LEN definuje délku PAD v bajtech. MAC\_H jsou důležitá řídicí data MAC rámce, které se kvůli zajištění správnosti při přenosu posílají v header fyzického rámce. CRC\_Ctrl je kontrolní součet, který je počítán z pole Protocol, LEN, PAD\_LEN a MAC\_H. FLUSHING\_H jsou vložené bity potřebné pro reset registrů konvolučního kodéru před vysláním payloadu.

FLUSHING\_P slouží pro reset registrů konvolučního kodéru po odeslání dat vyšší vrstvy, využívá se pouze, pokud je zapnut FEC kódér. PAD jsou bity o hodnotě 0 doplňující payload, aby byl dodržen počet OFDM symbolů uvedený v LEN. MSDU jsou data MAC vrstvy, jsou především daná daty vyšších vrstev, řízením přístupu k médiu a změnami v hierarchii sítě.

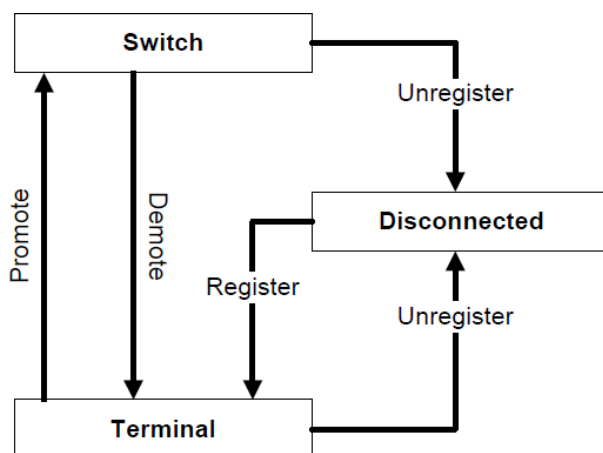
### 3.2.4 Hierarchie sítě

Dle standardu PRIME jsou zařízení rozdělena na dva druhy, base node a service node. Base node řídí síť, asociace service nodů a MAC rámeček. Service nodes jsou zařízení užívající síť, jedná se o PLC modemy. Mohou pracovat ve třech režimech disconnected, terminal a switch.

V režimu disconnected se zařízení snaží asociovat k base nodu, pokud nemají přímý kontakt s base nodem, mohou využít služeb switchu, jehož prostřednictvím se připojí. Když není k dispozici žádný base node ani switch v dosahu, vysílají PPDU všem již asociovaným terminálům v dosahu. PPDU je popsán v odstavci 3.2.7, jedná se o žádost o zprostředkování komunikace mezi base a service node.

V režimu terminal jsou service nody asociovány k base nodu, mohou komunikovat s base nodem a ostatními service nody, které jsou asociovány ke stejnému base nodu.

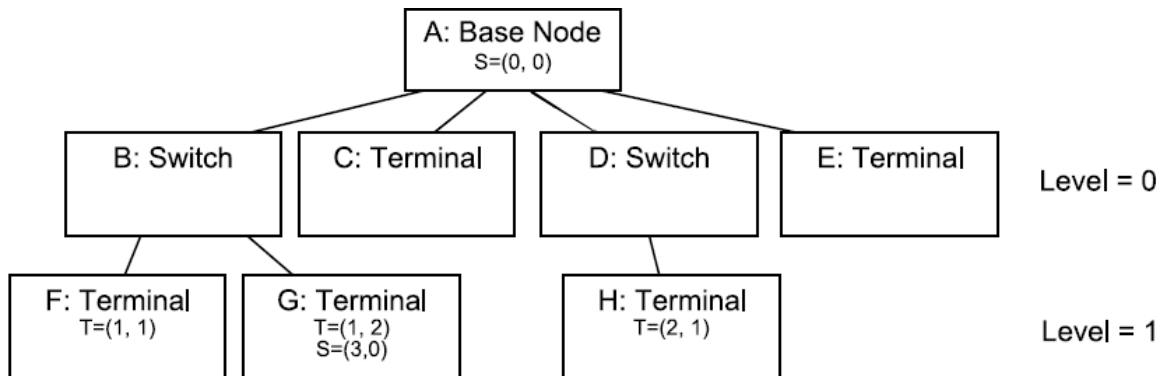
V režimu switch service nody mohou opět komunikovat s ostatními asociovanými service nody a base nodem. Oproti režimu terminal navíc poskytují konektivitu service nodům v nižších úrovních hierarchie sítě (viz obrázek 8).



Obrázek 7 Řízení režimů Service nodů [5]

Na obrázku 7 je zobrazeno, jak jsou jednotlivým service nodům měněny režimy. Po připojení do sítě jsou service nody v režimu disconnected, posílají base nodům žádost o registraci, base nody mohou registraci povolit nebo zamítnout. Terminály se mohou odregistrovat nebo je může odregistrovat base node. Pokud přijmou PPDU od disconnected service nodu, žádají base node o povýšení na switch, případně mohou být base nodem povýšeni bez odeslání žádosti (například service node přebírá funkci jiného switchu, atd.). Pokud už switch neposkytuje konektivitu service nodům, je base nodem degradován zpět na terminal, případně odregistrován do režimu disconnected.

Zařízení jsou dle hierarchie rozdělena do několika úrovní (viz obrázek 8). Nejvýše se nachází base node. Dále následuje nultá úroveň, zde se nachází service nody přímo komunikující s base nodem. Zařízení na nulté úrovni mohou poskytovat konektivitu zařízením o úroveň níž, obdobně fungují zařízení na první a nižších úrovních. Hierarchie může dosahovat až šesti úrovní, přičemž na poslední úrovni by neměl switch využití, proto jsou zde připojeny pouze terminály. Hierarchii sítě řídí MAC, řízení se provádí řídicími příkazy v níže uvedených MAC rámcích.



Obrázek 8 Příklad Hierarchie sítě [5]

### 3.2.5 MAC rámeček

Dle standardu PRIME existuje pouze jeden typ rámce, ve kterém jsou zároveň vysílány beacons, řídicí příkazy MAC vrstvy a data vyšších vrstev. Složení MAC rámce je zobrazeno na obrázku 9. Rámec začíná vysláním beaconu base nodu, dále následují beacons od switchů, po odvyslání beaconů následují části určené pro řízení MAC a přenos dat vyšších vrstev SCP a CFP.



Obrázek 9 Složení MAC rámce [5]

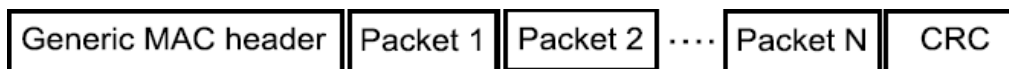
Beacon PRIME je v rámci vyslán několikrát a oproti G3 může být vyslán base nodem i switchy, každé z těchto zařízení může beacon vysílat pouze jednou v rámci. Base nodem je vyslán v každém rámci, switchem dle nastavení. Beacon indikuje složení rámce, určuje počet slotů v SCP a v CFP, počet beacon slotů a slot ve kterém je beacon přenášen.

SCP je vysílací doba, kdy není řízený obsah rámce. SCP je určena pro všechna zařízení, mohou zde být vysílány data i řídicí příkazy, vše se vysílá v GPDU (viz odstavec 3.2.6). Aby se předešlo kolizím, využívá se protokol CSMA/CA. Před vysláním stanice kontroluje, zda jsou nosné frekvence volné, pokud ano zahájí přenos, v opačném případě čeká na konec probíhajícího vysílání. SCP začíná po beaconech a končí před začátkem CFP. Jeho délka je omezena počtem beaconů a délkou CFP.

CFP je vysílací doba, kdy je řízený obsah rámce, v CFP mají určitá zařízení vyhrazený slot pro vysílání. Mohou zde vysílat pouze service nody, které si zažádaly o slot v CFP. Na základě těchto žádostí sestavuje base node CFP. Service node musí vždy být informován, zda mu byl přidělen slot. Pokud base node nepřidělí žádné sloty, rámec nebude obsahovat CFP. Oproti SCP se po dobu CFP mohou vysílat GPDU, které obsahují pouze řídicí packety.

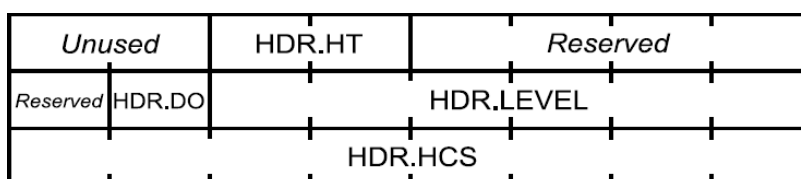
### 3.2.6 GPDU

Jedná se o obecný PDU, který je určen pro odesílání řídicí příkazů a dat vyšších vrstev. Složení GPDU je zobrazeno na obrázku 10, skládá se z řídicího pole Generic MAC header, několika packetů a CRC.



Obrázek 10 GPDU [5]

Generic MAC header je 3 bajty dlouhé pole, které řídí PDU, určuje jeho typ a směr komunikace. Oproti packetům je kladen větší důraz na správném přijetí této části GPDU, proto se z této části počítá kontrolní CRC zvlášť.



Obrázek 11 složení MAC header [5]

Pole Generic MAC header je zobrazeno na obrázku 11, kde Unused jsou nevyužívané bity, všechny jsou nastaveny do nuly. HDR.HT určuje druh rámce, aby se jednalo o popisovaný GPDU, musí být roven 0. Reserved jsou bity rezervované pro budoucí užití, tyto bity jsou nastaveny do 0. HDR.DO určuje směr komunikace, může nabývat dvou hodnot 0 a 1, v případě 0 se jedná uplink, base node je příjemcem packetů, v případě 1 se jedná o downlink, příjemcem packetů jsou service nody uvedené v packet headrech. HDR. LEVEL

určuje úroveň hierarchie switche, jehož prostřednictvím komunikuje base node s danými terminály. HDR.HCS je 8bitový opravný kód CRC, který je počítán pouze z MAC header.

Packet se dál dělí na packet header a packet payload. Packet header řídí packet, tzn. indikuje jeho druh a service node, který je původcem nebo příjemcem packetu. Dále přiřazuje prioritu packetu při odesílání. Rozlišujeme dva typy packetů datový a řídicí. Oba tyto packety se liší obsahem, prioritou a částí rámce, kde mohou být vysílány. Řídicí packet má vždy nastavenou nejvyšší prioritu a může být vysílán pouze v SCP, zatímco datový packet má nastavenou prioritu dle důležitosti a může být vysílán v CFP i v SCP.

CRC je pole kontrolního součtu, které slouží k detekci chyb, CRC pracuje na stejném principu jako v G3. Oproti G3 se liší částí rámce, ze které je počítán a funkcí pomocí které se počítá. Výpočet se provádí ze všech packetů rámce a adresy podsítě pomocí níže uvedené rovnice.

$$G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

**Rovnice 3 funkce pro výpočet CRC**

### 3.2.7 PPDU

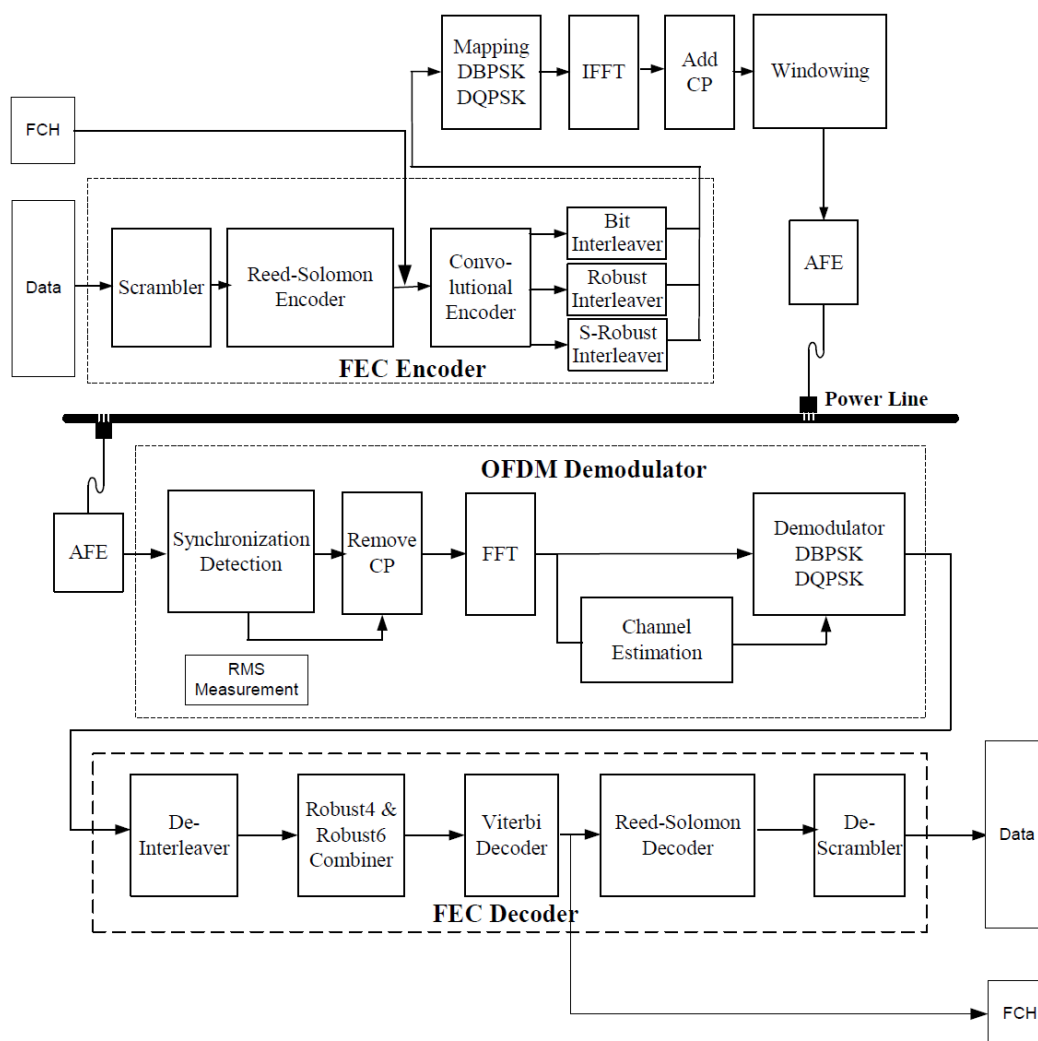
Existuje ještě jeden typ PDU, který je vysílán service nody v režimu disconnected, pokud nemají konektivitu s base nody nebo se switchem. Je určen pro všechny terminály, které jsou v dosahu service nodu a jsou asociovány k base nodu. Jedná se o žádost o vytvoření přemostění mezi daným service nodem a base nodem. Přemostění se zajistí povýšením příjemce PPDU na switch.



### 3.3 Standard G3

#### 3.3.1 Fyzická vrstva

Dle standardu G3 se využívá k přenosu frekvenční pásmo CENELEC A, využívá se OFDM s 36 nosnými, jednotlivé nosné jsou modulovány DBPSK, DQPSK modulacemi, přičemž první nosná je na frekvenci 35,9 kHz a poslední na 90,6 kHz. Je zde potenciál využívat frekvence až do 180 kHz, a proto se volí vzorkovací frekvence IFFT 0,4 MHz. Bloky pro tvorbu výsledného signálu dle výše uvedených parametrů jsou zobrazeny na obrázku 12.



Obrázek 12 blokové schéma G3 vysílače a přijímače [6]

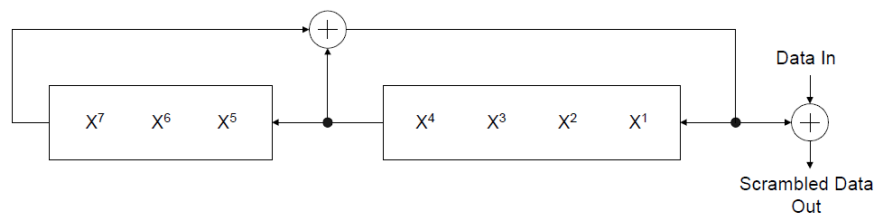
### 3.3.2 Vytvoření výsledného signálu

Vstupní data přivádíme do FEC kodéru, FEC kodér pracuje ve dvou režimech normal a robust. V robust režimu jsou navíc data několikrát zopakována.

Blokem scrambler je nejprve datům dávaná různá distribuce, k tomu se používá funkce XOR (viz rovnice 4) a posuvné registry. Pro správné dekódování přijímačem musejí být registry před začátkem rámce nastaveny na 1.

$$S(x) = x^7 \oplus x^4 \oplus 1$$

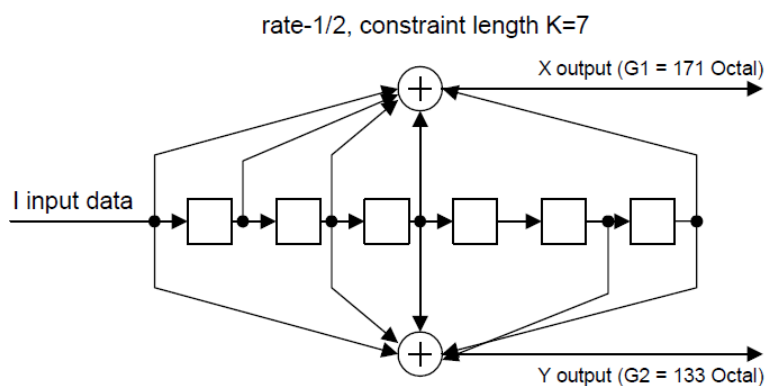
Rovnice 4 funkce XOR používaná ve scrambleru [6]



Obrázek 13 Scrambler [6]

Dále se data přivádí na vstup Reed-Solomon kodéru, kde je k datům přidáno 8bitové slovo, který zaručuje opravitelnost až 8 chyb pro režim normal, v robustním režimu je slovo širší a zaručuje opravitelnost až 14 chyb.

Poté jsou data kódovány blokem convolutional encoder složeným ze 7 posuvných registrů a dvou funkcí XOR, jeho výstupem jsou dvě funkce  $x = 0b1111001$ ,  $y = 0b1011011$  (viz obrázek 14), díky tomu mají data na výstupu dvojnásobnou robustnost. Po přenesení posledních bitů rámce je nutno provést vynulování registrů, za tímto účelem se na konci rámce přivádí 6 nul na vstup bloku.



Obrázek 14 convolutional encoder [6]

Data jsou následně prokládány blokem interleaver, který jim poskytuje ochranu proti dvěma typům chyb.

První chyba, která postihuje jednotlivé OFDM symboly, tuto chybu vyvolává krátkodobé širokopásmové rušení.

Druhá chyba, která je postihuje jednotlivé nosné a je vyvolána dlouhodobými útlumy a rušením v úzkém pásmu.

Data se prokládají ve dvou krocích. V první kroku se každý sloupec posune dle rovnice 5. Jednotlivým bitům se tím změní nosné, na kterých jsou přenášeny v OFDM symbolu. Díky tomuto proložení nebude chyba v každém OFDM symbolu na stejném modulačním symbolu. Ve druhém kroku se každý řádek posune dle rovnice 6, bity OFDM symbolu jsou vyměněny za bity jiného OFDM symbolu. Tím se zamezí chybě, která postihuje celé OFDM symboly. Jinými slovy interleaver dané bity zamění s bity na různých nosných a v různých OFDM symbolech (viz obrázek 15).

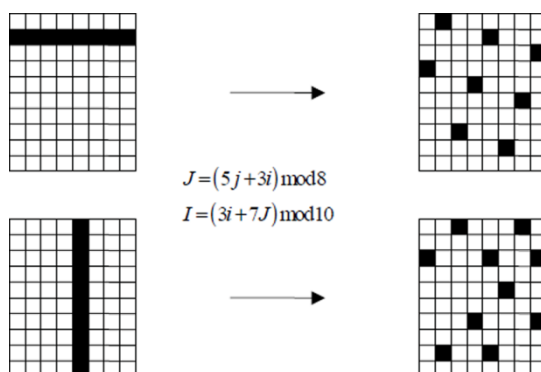
$$J = (j * n_j + i * n_i) \% n$$

**Rovnice 5 Nová pozice v sloupci [6]**

$$I = (i * m_i + J * m_j) \% m$$

**Rovnice 6 Nová pozice v řádku [6]**

Kde  $i, j$  je pozice bez proložení,  $m_i, m_j, n_i, n_j$  jsou parametry proložení,  $m$  je počet nosných,  $n$  je počet symbolů.



**Obrázek 15 Proložení symbolů blokem interleaver [6]**

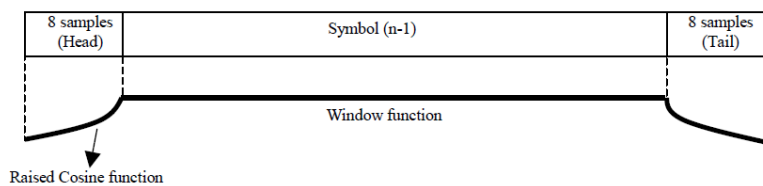
Blok mapping DBPSK, DQPSK je modulátorem jednotlivých nosných. Každá nosná je modulována diskrétními fázovými modulacemi. Používá se modulace DBPSK a DQPSK, v robustním režimu se používá DBPSK s delší vysílacím časem jednoho symbolu. V případě DBPSK, měníme fázi nosné o  $180^\circ$ , pouze když na vstup přivedeme bit s hodnotou 1. Za referenční fázi považujeme fázi předchozího modulačního symbolu. V případě DQPSK se fáze mění obdobně jako v případě DBPSK, mění se při symbolech 01,11,10 o  $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ .

Dále modulátor zajišťuje, aby amplituda jednotlivých nosných odpovídala Tone mask a Tone map (viz odstavec 3.3.11).

OFDM signál je sestavován pomocí IFFT. Do bloku vstupují vektory vytvořené modulátorem, vektory jsou sestavovány do výsledného signálu. Výsledný signál se skládá z 256 vzorků na OFDM symbol. Dále je každý symbol následován 30 vzorkovým CP. 30 posledních vzorků daného symbolu je vloženo před daný symbol.

Pro zlepšení spektrální čistoty a potlačení postranních pásem je na výsledný signál aplikována windowing funkce raised cosine. Funkce se aplikuje na první a posledních 8 vzorků symbolu. Poslední vzorky symbolu se překryjí s prvními vzorky následujícího symbolu, vznikají tzv. overlap samples. Výjimky tvoří pouze začátek prvního symbolu a konec posledního symbolu. Začátek prvního symbolu je překryt preambulí a konec posledního symbolu překryt není.

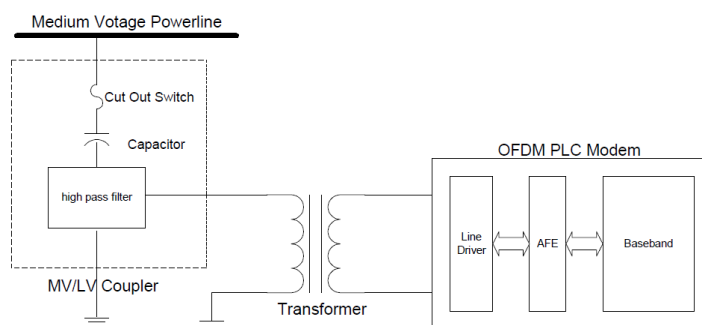
Vysílač musí být nejenom schopen komunikace na stejných napěťových hladinách, ale i mezi hladinami vn/nn. K tomu musí nastavit parametry výstupního signálu, tak aby byl rozeznatelný od šumu i přes transformátor představující značný útlum.



Obrázek 16 funkce windowing [6]

### 3.3.3 G3 na hladinách vn

G3 PLC systém by měl být schopen komunikace na nn a vn. Zařízení na vn musí být schopna komunikovat se zařízením na nn. Přijímače a vysílače musí být schopny kompenzovat útlumy zejména vyšších kmitočtů při průchodu transformátorem. K tomu je využito automatické nastavení amplitudy dle rušení a útlumu. G3 PLC vn modem není k síti připojen přímo, ale musí být oddělen přes coupling device.

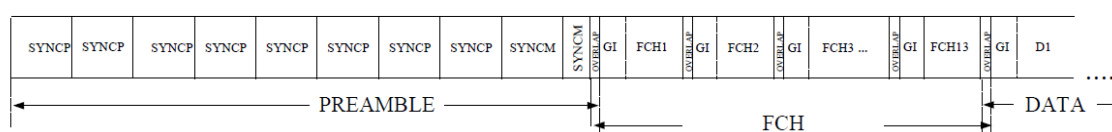


Obrázek 17 coupling device [6]

Coupling device je složen z vn/nn coupler a transformátoru (viz obrázek 17). Coupler vn/nn je v podstatě horní propust, která slouží k odfiltrování síťových kmitočtů. Transformátor slouží ke galvanickému oddělení, impedančnímu přizpůsobení a převodu signálu mezi úrovněmi vn a nn. Coupler vn/nn spolu s transformátorem představují pro signál útlum, tomuto útlumu se musí nastavením datového rámce přizpůsobit výsledný signál vysílače.

### 3.3.4 Datový rámec fyzické vrstvy

Datový rámec je zobrazen na obrázku 18, je složen ze tří po sobě jdoucích částí preamble, frame control header (řídící část rámce) a dat.



Obrázek 18 Datový rámec [6]

Preamble slouží k synchronizaci a k získání údajů pro nastavení AGC, k tomu využívá osm synchronizačních P symbolů následovaných 1,5 synchronizačního M symbolu. P symbol je složen ze všech nosných, každá nosná má různý fázový posun. V případě symbolu M se jedná o totéž, jen nosné M jsou oproti nosným P o  $\pi$  posunuté. Dále po Preambuli následuje frame control header, obsahuje řídicí údaje pro demodulování symbolů.

Field	Byte	Bit number	Bits	Definition
PDC	0	7-0	8	Phase detection counter
MOD	1	7-6	2	Modulation type: 0 – ROBO; 1 – DBPSK 2 – DQPSK
FL	1	5-0	6	PHY frame length in PHY symbols
TM[0:7]	2	7-0	8	TM[0:7] – Tone map
TM[8]	3	7	1	TM[8] – Tone map
DT	3	6-4	3	Delimiter type: 000: Start of frame with no response expected; 001: Start of frame with response expected; 010: Positive acknowledgement (ACK) 011: Negative acknowledgement (NACK) 100-111: Reserved
FCCS	3	3-0	4	Frame Control Check Sequence (CRC5)
	4	7	1	
ConvZeros	4	6-1	6	6 zeros for convolutional encoder

Tabulka 3 Frame control header [6]

Frame control header je zobrazen v tabulce 3, kde:

- PDC je stav čítače fáze vysílače.
- MOD udává druh modulace. Je-li roven 0, udává robustný mód.
- FL je počet symbolů rámce.

- TM je tone map. Představuje úroveň vysílaných nosných frekvencí.
- DT určuje typ rámce.
- FCCS je CRC řídicí části datového rámce.
- ConvZeros jsou potřebné nulové bity pro vynulování registrů bloku convolutional encoder.

Teprve po řídicí části rámce následují data. Existuje ještě ACK/NACK frame, ten je složen pouze z preamble a z řídicí části rámce.

Data fyzického rámce jsou sestavovány MAC vrstvou. MAC vrstva dále na základě rušení, důležitosti dat a dalších aspektů volí řídicí bity rámce, tj. volí se modulace, a zda je vyžadováno potvrzení správnosti, atd.

### 3.3.5 MAC vrstva

MAC vrstva standardu G3 je z velké části převzata s částečnými modifikacemi ze standardu IEEE 802.15-4.2006. IEEE 802.15-4.2006 je standard popisující komunikaci po bezdrátových sítích.

Složení sítě je jednoduché, obsahuje dva typy zařízení, řídicí stanici (PAN coordinator) a uživatelské stanice. Řídicí stanice řídí síť, tzn. řídí asociaci zařízení k síti a frekvenci nosných, na kterých se v dané síti vysílá. Díky nastavení nosných frekvencí je zajištěna existence více sítí na jednom komunikačním médiu, aniž by docházelo ke konfliktům. S tím souvisí i možnost komunikace některých zařízení se zařízením v jiné síti. Uživatelské stanice jsou koncová uživatelská zařízení, která v rámci sítí mezi sebou a řídicí stanicí komunikují.

PAN coordinator neřídí vysílání jednotlivých uživatelských stanic, tzn. do G3 nejsou implementovány super rámcové struktury určující čas vysílání jednotlivých MAC rámců. MAC rámce jsou vysílány dle potřeby jednotlivých zařízení. Aby se zabránilo konfliktům, používají se CSMA/CA mechanismy. Dále je zde potřeba rozlišovat důležitost jednotlivých dat, to se provádí určením priority v MAC rámci.

### 3.3.6 Obecný MAC rámec

Obecný MAC rámec je jednotka určená pro přenos dat a řídicích příkazů MAC vrstvy. Jeho složení je zobrazeno v tabulce 4, je složen z MHR (řídicí část MAC rámce), z MAC payload (část rámce kde se přenáší příkazy nebo data vyšších vrstev) a z MFR.

Octets: 3	2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10	Variable	2
Segment Control	Frame Control	Sequence Number	Destination PAN	Destination Address	Source PAN	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame payload	FCS
MHR								MAC payload	MFR

Tabulka 4 složení MAC rámce [7]

MHR řídí rámec, adresování a kódování, je složen z polí Segment Control, Frame Control, Sequence Number, Destination PAN, Destination Address, Source PAN, Source Address a Auxiliary Security Header. MAC payload závisí na typu rámce, jedná se o část rámce, která přenáší požadovanou informaci. MFR zajišťuje, aby příjemce přijal rámec bez chyb.

Field	Byte	Bit number	Bits	Definition
TMR	0	3	1	Tone map request 1: Tone map is requested 0: Tone map is not requested
CC	0	2	1	Contention Control: 0: contention is allowed in next contention state 1: contention free access
CAP	0	1	1	Channel access priority: 0: Normal 1: High
LSF	0	0	1	Last Segment Flag 0: Not last segment 1: Last segment
SC	1	7-2	6	Segment Count
SL[9-8]	1	1-0	2	Segment Length of MAC frame
SL[7-0]	2	7-0	8	Segment Length of MAC frame

Tabulka 5 parametry Segment control [7]

V tabulce 5 je zobrazeno 3bajtové pole Segment Control. Pole řídí přenosy segmentů a rozdělení dat do MAC segmentů, k tomu využívá následujících parametrů:

- TMR indikuje, zda vysílač vyžaduje Tone map response od příjemce.
- CC indikuje, zda je umožněno řízení obsahu segmentů. CC je připraven k budoucímu použití, zatím musí být vždy nastaven na 0.
- CAP indikuje vysílací prioritu jednotlivých segmentů při vysílacích kanálech jednotlivým segmentům MAC rámce.
- LSF indikuje poslední segment.
- SC indikuje číslo přenášeného segmentu.
- SL indikuje délku MAC rámce v segmentech.

Bits: 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Ack. Request	PAN ID Compression	Reserved	Dest. Addressing Mode	Frame Version	Source Addressing Mode

Tabulka 6 parametry Frame control [8]

V tabulce 6 je zobrazeno 3bajtové pole Frame Control. Pole řídí rámeček, udává jeho typ, zabezpečení, způsob zadání adresy odesílatele a příjemce, definuje typ frame, definuje, zda je po přijetí rámce vyžadována odpověď, udává informaci o verzi rámce. K tomu využívá následující parametry:

- Frame type indikuje o jaký typ rámce se jedná, druhy rámců jsou uvedeny v tabulce 7.
- Parametr Security Enabled indikuje, zda je rámeček zabezpečený. Pokud je rámeček nezabezpečený, parametr je roven 0 a MHR neobsahuje pole Auxiliary Security Header.
- Frame pending v G3 nemá využití, posílání rámců zařízením, které momentálně nepřímají není v G3 povoleno, proto musí být vždy nastaven na 0.
- Acknowledge Request indikuje, zda je vyžadována odpověď udávající správnost přijetí.
- Parametr PAN ID Compression určuje, zda MHR obsahuje pole Destination PAN a Source PAN. Jsou-li odesílatel a příjemce ve stejném PAN, pole nejsou zobrazena.
- Destination Addressing Mode specifikuje způsob zadání adresy příjemce, adresa může být zadána 16b nebo 64b.
- Frame version indikuje kompatibilitu rámce, v G3 nemá význam, je připraven pro budoucí využití. Dle IEEE indikuje, jestli je rámeček kompatibilní s IEEE Std. 802.15.4-2003 nebo s IEEE 802.15.4.
- Source addressing mode určuje bitový parametr specifikující způsob zadání adresy odesílatele, pokud je roven 0 a nejedná se o acknowledge rámeček, poté MHR neobsahuje pole source address a odesílatelem musí být PAN coordinator s PAN identifikátorem příjemce.

Pole Sequence Number udává, ke které sekvenci rámce patří, čímž zaručuje správné přiřazení rámce k dané komunikaci. K beacon rámečku je přiřazováno BSN (identifikátor beaconu), což zajistí správné přiřazení k beacon requestu. K acknowledge, datovému rámečku nebo MAC command rámečku je přiřazováno DSN (identifikátor dat), což zajistí správné přiřazení acknowledge rámce k MAC command rámečku nebo datovému rámečku.



Destination PAN je dva bajty dlouhé pole, které specifikuje síť příjemce. Je-li jeho hodnota 0xffff, rámec je určen pro všechna zařízení, která poslouchají daný kanál.

Destination Address je pole obsahující adresu příjemce, může být 2 nebo 8bajtový, dle hodnoty parametru destination addressing mode uvedeným v frame control. 16bitová hodnota 0xffff je považována za adresu všech zařízení poslouchajících daný kanál.

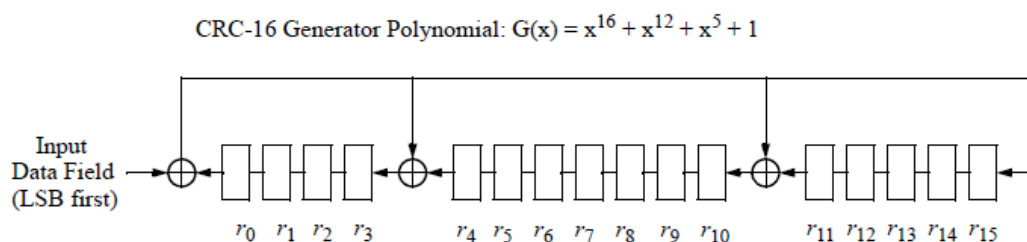
Pole Source PAN specifikuje síť, ke které je připojen odesílatel rámce. Pole není zobrazeno, pokud odesílatel a příjemce jsou ve stejném PAN.

Pole Source Address obsahuje adresu příjemce, může být 2 nebo 8bajtový, dle hodnoty parametru source addressing mode uvedeném v frame control.

Auxiliary Security Header je 5bajtové pole nesoucí informaci o zabezpečení frame. Ve frame je obsaženo pouze, pokud je parametr security enable nastaven na hodnotu 1.

Frame payload je pole proměnné délky, obsahující klíčové informace, dle různých typů MAC rámce může obsahovat data vyšších vrstev, řídicí příkazy a informace o existujících PAN.

FCS je dva bajty dlouhé pole obsahující 16bitový opravný CRC. CRC je počítán z MHR a frame payload, způsob jeho vypočtu je uveden na obrázku 19.



**Obrázek 19** průběh implementace CRC kódu [8]

Před vytvořením výsledného kódu je nejprve nutno vynulovat registry  $r_0 \dots r_{15}$ . Poté jsou do kodéru přivedeny jednotlivě bity v obráceném pořadí (první je poslední bit frame payloadu), dle těchto bitů a vnitřní funkce jsou nastaveny postupné registry. V nich je uložen po zpracování posledního bitu výsledný CRC kód.

### 3.3.7 Rozlišení typu MAC rámce

V MAC vrstvě existuje několik typů rámců, dle kterých se liší nastavení MHR, zejména frame control a složení frame payload. Typy jednotlivých rámců jsou zobrazeny v tabulce 7. Hodnoty 100–111 jsou vyhrazeny pro budoucí použití. Hodnota 010 není implementována, MAC vrstva nevyužívá acknowledge rámeček.

Frame type value b <sub>2</sub> b <sub>1</sub> b <sub>0</sub>	Description
000	Beacon
001	Data
010	Acknowledgment
011	MAC command
100–111	Reserved

Tabulka 7 typy rámců a hodnoty jejich parametru frame type [8]

### 3.3.8 Beacon rámeček

V G3 se beacon rámeček využívá při asociování zařízení do sítě, nese informaci o existující PAN a zda mohou být do sítě asociována další zařízení. Složení beacon rámečku odpovídá obecnému rámečku. V poli frame control musí být obsažen parametr Frame type o hodnotě, která indikuje, že se jedná o beacon rámeček.

2	variable	variable	variable
Superframe Specification	GTS fields (Figure 45)	Pending address fields (Figure 46)	Beacon Payload
MAC Payload			

Tabulka 8 Složení MAC beacon rámečku [8]

Složení MAC Payload beacon rámečku je zobrazeno v tabulce 8. Rámeček je složen ze superframe specification, GTS fields figure, Pending address fields a Beacon Payload. Protože G3 nepodporuje superrámeček, jsou pole Pending address, GTS, Superframe Specification a Beacon Payload bezvýznamná, jsou připravena pro budoucí využití a prozatím jsou nastavena na konstantní hodnotu nebo vynechána.

### 3.3.9 Datový rámec

Datový rámec je rámec přenášející sekvenci bajtů nadřazené vrstvy. Složení datového rámce odpovídá složení obecného rámce. Ve frame controlu je kladen důraz na parametr frame type, jehož hodnota musí indikovat datový rámec. Security enable se nastaví do hodnoty 1, je-li datový rámec chráněn. Zbytek polí v frame controlu je nastaven dle potřeby užití datového rámce. MAC Payload datového rámce obsahuje pouze data, tedy sekvenci bajtů, které si vyžádala k odeslání vyšší vrstva.

#### 3.3.10 Acknowledge rámec

Acknowledge rámec se využívá pro ověření správného doručení rámce příjemci, vždy jej odesílá příjemce odesílateli. Dle G3 se řeší acknowledge na úrovni fyzické vrstvy. Jedná se o rámec fyzické vrstvy. Existují dva typy tohoto rámce ACK a NACK (viz rámec fyzické vrstvy). ACK je odeslán, pokud příjemce přijal neporušená data fyzického rámce, NACK pokud přijal data porušená. Acknowledge rámec je odeslán, pouze pokud je vyžádán (viz nastavení parametru DT ve frame control header, viz tabulka 3).

#### 3.3.11 Command rámec

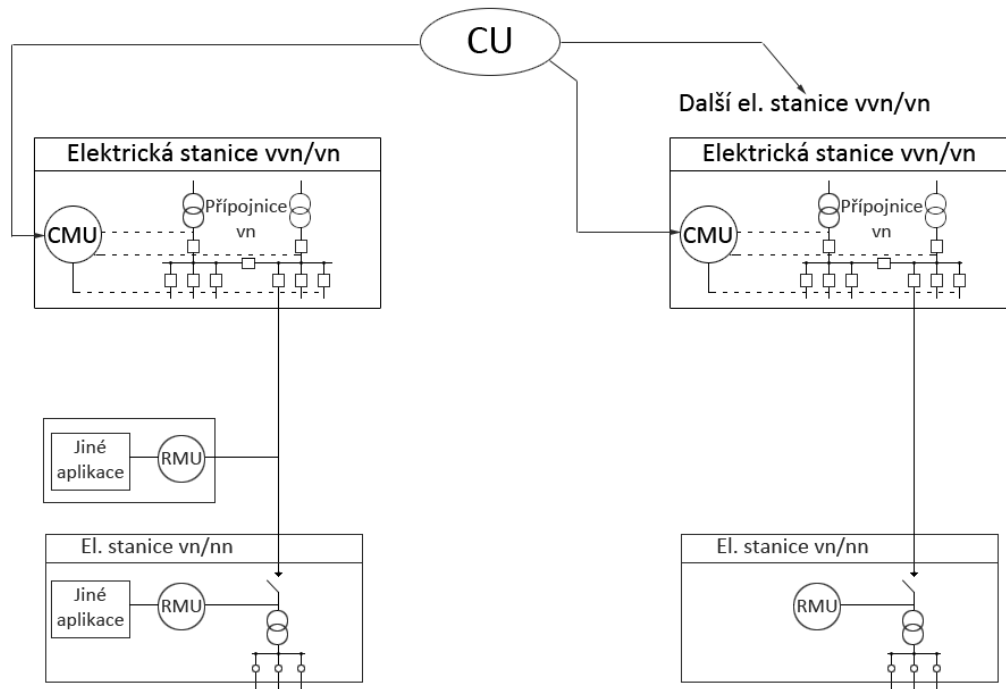
Pomocí command rámců se řídí MAC vrstva. Složení odpovídá obecnému rámci. V poli frame control musí být nastaveny parametry, tak aby indikovaly command rámec. MAC Frame payload je složen z pole Command frame identifier, který indikuje druh MAC commandu a z polí daného commandu. V G3 máme pouze 2 commandy. Beacon request, v poli Command frame identifier musí být hodnota 0x07 a Tone map response, pole o hodnotě 0x0a. Command payload obsahuje samotný command.

Beacon request command je používán za účelem zjištění všech coordinatorů. V případě beacon requestu je source address mode nastaven do hodnoty 0, pole source PAN identifier a source address nejsou součástí MHR. Destination address mode musí být nastaven do hodnoty 2, pole destination address je tedy 16bitový, obsahuje hodnotu 0xffff, destination PAN address obsahuje 0xffff, jinými slovy rámec je určen pro všechny PAN coordinatory.

Tone map response je odpověď přijímače na TMR, počítá SNR na jednotlivých nosných frekvencích a udává na kterých nosných frekvencích nevysílat a s jakou amplitudou je potřeba zesílit jednotlivé nosné na straně vysílače TMR.

### 3.4 ČSN IEC 61334

Mimo standardů G3 a PRIME existuje norma IEC 61334 převzatá ČSN. Záměrem této technické zprávy je poskytnout užitečné informace při navrhování systému automatizace dodávky elektrické energie využívající vysokofrekvenční přenosy po distribučním vedení pro zvláštní aplikace. Dle normy je pro přenos využívána FSK modulace.[9]



Obrázek 20 Struktura automatizovaného systému dodávky elektrické energie [9]

Na obrázku 20 je zobrazena struktura sítě. Nejvýše se nachází CU. CU řídí dílčí CMU. CMU řídí distribuční síť vn a RMU. Pro komunikace mezi zařízeními je médiem elektrické vedení vn. Dle normy mohou být ještě používány další dvě struktury sítě. První z těchto struktur navíc využívá oproti struktuře uvedené na obrázku 20 vedení nn jako komunikační médium. Na hladině nn se nachází CLU a RLU (jedná se o CMU a RMU pro hladinu nn). Druhá struktura je obdobná první struktuře. Oproti první struktuře je ke komunikaci na hladině vn, využívána cizí telekomunikační síť.

Oproti G3 a PRIME, které jsou určeny pro přenosy větších objemů dat, jsou dle IEC 61334 tyto přenosy dat určeny pro zajištění funkce automatizovaného systému elektrické sítě, k tomu stačí příkazy a údaje o stavu sítě. Díky tomu se v IEC 61334 počítá pouze s menšími datovými toky. Navíc v případech sledování sítě nejsou velké nároky na časové odezvy, proto je náročnost na parametry modemu IEC 61334 oproti G3 a PRIME nižší (viz tabulka 9).

Charakteristická kritéria	Snímat dálkově parametry	Vypínat dálkově vypínače
a) Typická perioda očekávaného použití	24 hod	24 hod
b) Existují denní transakce?	Ano	Ano
c) Očekávaná četnost denního použití plné kapacity	$\leq 96$	$1 <$
d) Požadovaný průnik	Přípojnice el. stanice	Jednotlivý vypínač
e) Cílová doba odezvy	1–2 min	5 s
f) Priorita transakce	Střední	Vysoká
g) Druh transakce	Získej (L1 P1 V1)	Proveď (L1 S1 O1)
h) Velikost údaje jedné transakce v bajtech	3 až 4	3 až 4

**Tabulka 9 Parametry typického FSK úzkopásmového modemu [9]**

Za cílovou dobu odezvy je považována doba mezi odesláním a vykonáním. Druh transakce udává, co se má vykonat. A v případě dálkového snímání parametrů dále udává, že se má získat hodnota V1 parametru P1 v místě L1. V případě dálkového vypínání vypínače udává, že se má provést operace O1 v místě L1 na spínači S1.

## 4 Bezdrátové standardy ZigBee a Wireless M-Bus

### 4.1 Standard ZigBee

„ZigBee je jednoduchý bezdrátový komunikační standard, který umožňuje bezdrátovou síťovou komunikaci mnoha zařízení na vzdálenosti stovek metrů.“[12] Je složen z fyzické vrstvy, MAC vrstvy, síťové a aplikační vrstvy. „ZigBee je vyvíjen mezinárodním konsorciem firem ZigBee Alliance a mezi hlavní účastníky jeho vývoje je možné jmenovat například nadnárodní firmy a korporace Freescale Semiconductor, Honeywell, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips, Samsung, Invensys a další.“[13] “Vyznačuje se takovými vlastnostmi, jako jsou jednoduchost, velmi nízká spotřeba energie, schopnost vytvářet statickou síťovou strukturu, spolehlivost a především příznivá cena.“[12]

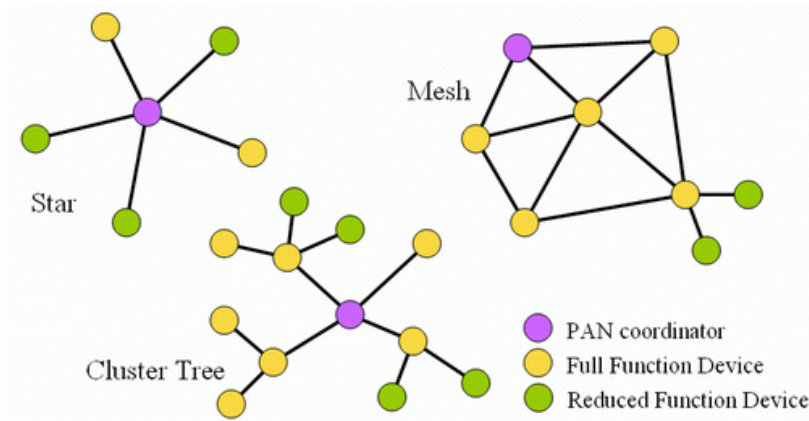
#### 4.1.1 Fyzická a MAC vrstva

Fyzická a MAC vrstva vychází ze standardu IEEE 802.15.4. Dle ZigBee se vysílá na nelicencovaných kmitočtech 2,4 GHz, 900 MHz, 868 MHz. Přenášený signál se moduluje pomocí QDPSK modulace s využitím DSSS. ZigBee dosahuje různých přenosových rychlostí pro jednotlivá pásma 250 kb/s, 40 kb/s, 20 kb/s. Rozdíl přenosových rychlostí pro jednotlivá pásma je dán různým počtem kanálů těchto pásem.

Dle ZigBee se vysílá tzv. superrámce. Superrámce jsou složeny beaconu, CFP, GTS. Beacons řídí superrámec a synchronizují zařízení. Po beaconu následuje doba CFP, kdy se odesílají rámce dle důležitosti. Po CFP následuje GTS. GTS jsou vyhrazené sloty pro zařízení s prioritními přenosy.

#### 4.1.2 Topologie sítě a zabezpečení

Dle standardu ZigBee je síť složena z PAN coordinatoru, FFD, RFD. Kde PAN coordinator určuje, na kterých frekvencích se bude vysílat. Na základě jiných běžících sítí určuje PAN Id, tak aby nedocházelo ke konfliktům. Řídí asociace dalších zařízení do sítě. RFD jsou zařízení využívající danou topologii ke komunikaci. FFD jsou zařízení obdobná RFD, oproti RFD mohou poskytovat konektivitu dalším FFD a RFD.



Obrázek 21 Topologie sítě dle ZigBee [12]

Jednotlivé topologie jsou zobrazeny na obrázku 21. Základní je topologie typu hvězda (star topology), v níž je vždy definováno jedno zařízení, které přebírá funkci koordinátora sítě, a ostatní zařízení působí ve funkci koncových zařízení. V topologii typu strom (tree topology) slouží jedno zařízení jako koordinátor a ostatní jako koncová zařízení. Na rozdíl od topologie hvězda však nemusí všechna zařízení komunikovat přímo s koordinátorem, ale mohou využít jiné koncové zařízení v konfiguraci FFD ve funkci směrovače jako prostředníka. Díky tomu umožňuje uvedená konfigurace zvětšit vzdálenosti mezi koncovým zařízením a koordinátorem. Poslední definovanou topologií je topologie typu síť (cluster tree), která kombinuje vlastnosti topologií strom a hvězda (tzv. hybridní topologii strom a hvězda). Typ síť nabízí větší dosah, ale přináší sebou i mnoho nevýhod, například zvýšení odezvy, zvýšení chybovosti a zvýšení ztrátovosti dat.[13]

Jelikož data v bezdrátové síti jsou komukoliv volně dostupná, je zde nutnost data šifrovat. Zabezpečení se aplikuje do síťové vrstvy, využívá se AES. AES je složen ze 128 bitů bloku dat a z klíče o velikosti 128, 196 nebo 256 bitů.

### 4.1.3 Aplikační vrstva

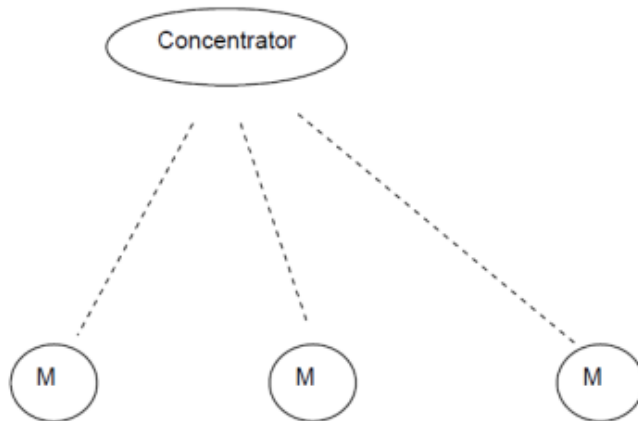
Aplikační vrstva je složena z několika podvrstev, z pomocné aplikační podvrstvy APS, ze ZigBee objektů a uživatelsky aplikačních objektů. Úkolem APS je zajišťovat tabulky spárovaných zařízení na základě poskytovaných služeb a požadavků zařízení. ZigBee objekt určuje na základě architektury roli zařízení v síti. Zařízení může být koordinátor, router nebo koncové zařízení. Aplikační objekty jsou koncová zařízení, pro která je navržena architektura sítě. V každé radiové jednotce (jeden přijímač/vysílač) může být až 240 aplikačních objektů, každý objekt musí mít své aplikační číslo.

## 4.2 Standard Wireless M-Bus

Wireless M-Bus je „bezdrátovou“ verzí sběrnice M-Bus, vychází ze standardu M-Bus. M-Bus (Meter-Bus) je určena k přenosu dat a řízení v oblasti měření a regulace topných systémů, plynu, odběru vody a elektrické energie. Hlavní rozdíl spočívá ve způsobu přenosu. Zatímco u M-Bus se využívá asynchronního přenosu po dvou vodičích. U Wireless M-Bus je přenosovým médiem vzduch. Wireless M-Bus má oproti M-Bus rozdílnou linkovou a fyzickou vrstvu. Díky tomu má Wireless M-Bus snadnější instalaci a postupně vytlačuje M-Bus.[13]

### 4.2.1 Princip a parametry komunikace

Síť Wireless M-Bus má hvězdicovou strukturu. Struktura je složena z měřících jednotek (zařízení typu slave/klient), z jedné centrální jednotky, obvykle koncentrátoru.



Obrázek 22 Struktura Wireless M-Bus[15]

Koncentrátor přijímá a uchovává data z měřících jednotek, oproti měřícím jednotkám neinicializuje komunikaci a obvykle jen naslouchá, jedná se o jednocestnou komunikaci. Koncentrátor vysílá řídicí signály, vysílat může, pouze pokud měřící jednotka inicializuje obousměrnou komunikaci. V tomto případě se vysílá v poloduplexním režimu (dvoucestná komunikace), jinými slovy měřící jednotka přechází na krátkou dobu z vysílacího režimu na přijímací.

Vysílá se ve výše uvedených dvou režimech, kde každý režim má tři rozdílné rychlosti přenosu (viz tabulka 10). T1 a T2 jsou určeny pro systémy s častým přenosem (několikrát do hodiny), jejich vysoká vysílací rychlost zaručí oproti režimů S1, S2 kratší vysílací dobu, tím se sníží též spotřeba energie. Jednosměrný režim T1 se hodí pro odečty hodnot z měřících zařízení, například měření odběru vody, tepla, elektřiny. Obousměrný režim T2 je oproti T1



navíc vhodný pro řízení akční členů (ventilů). Režimy S1, S2 lze použít pro systém s méně častým přenosem (s přenosem několikrát denně). Režim R2 je spíše vhodný pro speciální případy tam, kde je nutné přenášet jen velmi malé množství dat a informací na velkou vzdálenost.[15]

Přenosová rychlost	Označení jednocestné komunikace	Označení dvoucestné komunikace
4,8 kb/s	neexistuje	R2
32,768 kb/s	S1/S1m	S2
100 kb/s	T1	T2

**Tabulka 10 Režimy komunikace [15]**

Bezdrátová komunikace Wireless M-Bus fyzicky probíhá ve 12 kanálech v bezplatném vysílacím pásmu okolo frekvence 868 MHz (2 kanály 868.3 a 868.95 MHz jsou využívány režimu S a T, 10 uživatelem volitelných kanálů  $868.03 + n \times 0.06$  MHz v režimu R2). V případě použití čtvrtvlnné antény (délky 8,2 cm), tak na přímou viditelnost vysílací a přijímacího modulu je komunikační dosah 500 až 600 m.[14]

#### 4.2.2 Formát Packetu

Zařízení Wireless M-Bus je složeno z centrální/měřicí jednotky (koncentrátor/snímač) a radiového modulu (modem). Packety jsou nejprve posílány z centrálních či měřících jednotek do radiového modulu. Formát těchto packetů je zobrazen v tabulce 11.

1 byte	1 byte	n bytes
Length	CI	APP_LAYER

**Tabulka 11 Packet vyslaný z centrální/měřicí jednotky[15]**

Kde Length udává délku APP\_LAYER. CI udává typ komunikace, udává, jestli se jedná o odečet či řídicí příkaz a jejich druhy. APP\_LAYER jsou data aplikační vrstvy.

1 byte	1 byte	2 bytes	6 bytes	1 byte	n bytes	1 byte
Length	C	ManID	Address	CI	APP_LAYER	RSSI (opt)

**Tabulka 12 Packet vysílaný z radiového modulu[15]**

Packet vysílaný radiovým modulem jinému radiovému modulu je rozšířen o pole přidáné vysílacím radiovým modulem. Mezi tyto pole patří C, ManID, Address, RSSI (opt). C je řídicí pole. ManID udává výrobce zařízení, Address je označení komunikační adresy, RSSI je nepovinné pole udávající sílu signálu v místě příjmu.

## 5 Porovnání projektů OPEN meter a SET-Plan

Mimo projektu OPEN meter existuje mnoho dalších standardizačních projektů zabývajících se oblastí smart metering, k těmto projektům patří evropský projekt SET-Plan. Mezi hlavní cíle projektu SET-Plan patří snížení emisí skleníkových plynů do roku 2020 o 20%, do roku 2050 až o 80%, čehož se především docílí pomocí obnovitelných zdrojů. Výroba elektrické energie bude rozdělena mezi více decentralizovaných zdrojů (například fotovoltaické pole či elektrárny), směr toku elektrické energie bude v tomto případě z distribučních soustav do soustav přenosových. Takovéto zdroje bude potřeba v moderních sítích řídit.

K tomu účelu se zavádějí smart grids (chytré sítě). Chytré sítě nejenom umožňují lépe řídit výrobu elektrické energie, ale i řídit spotřebu jednotlivých objektů. SET-Plan v případě těchto sítí dává spíše přehled, jaké prvky by měla obsahovat síť. Udává doporučení jakou technologií použít pro dané typy komunikací, a které jsou ve výhledu do budoucna perspektivní a zda jsou výhodné pro využití. Dle SET-Plan existují dva typy těchto komunikací:

Pod první typ se řadí komunikace v rámci objektů (chytrých budov). Je určen pro přenos dat udávajících spotřebu energií, výrobu energie obnovitelnými zdroji, atd. V rámci OPEN meter se pro tento typ používají bezdrátové technologie WiFi, bluetooth a ZigBee. Bluetooth se kvůli malému dosahu téměř nevyužívá a dle SET-Plan není uvažován. WiFi nabízí nejlepší výkon, ale pro svou velkou spotřebu se nevyplatí pro zařízení napájená z baterií. ZigBee sice nenabízí největší výkon, ale nabízí delší životnost baterií. V oblasti spotřeby má velkou výhodu těmito projekty neuvažovaný standard Wireless M-Bus. Avšak žádná z těchto technologií není uzpůsobena pro přenos dat na větší vzdálenost.

Pro přenosy na větší vzdálenost se využívá druhý typ, tím je komunikace širokopásmová, která je určena pro obousměrné přenosy dat na velké vzdálenosti. Patří sem především komunikace mezi řídicími zařízeními v síti distributora a komunikace distributora se zařízeními na straně zákazníka, například informace o ceně energie, odečty spotřeby, atd. V případě projektu OPEN meter se jedná o komunikaci mezi elektroměrem a koncentrátorem, případně pokud architektura sítě neobsahuje koncentrátor, jedná se o přímou komunikaci mezi elektroměrem a centrálním systémem. Dále se může jednat o komunikaci mezi stávajícím a řídicím systémem. Dle OPEN meter jsou pro tuto komunikaci uvažovány bezdrátové technologie a PLC. SET-Plan kromě bezdrátové technologie a PLC ještě doporučuje využití pevných sítí.

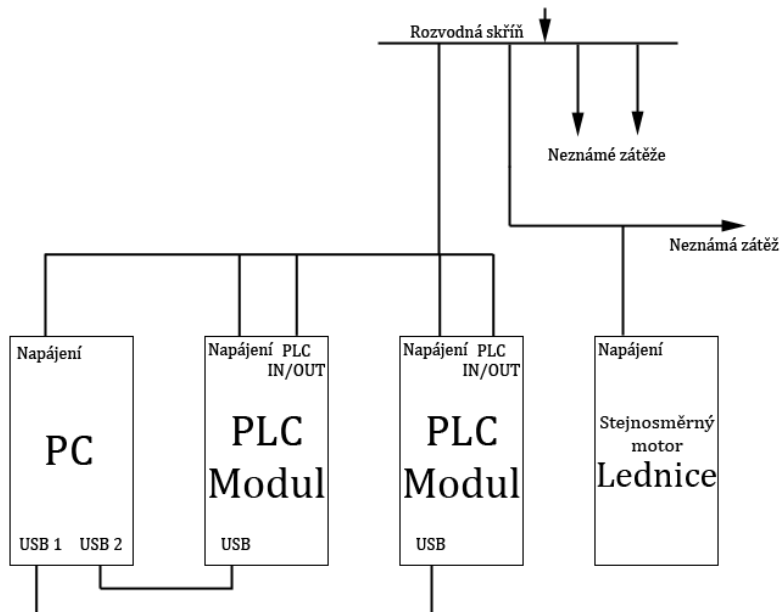
Mezi pevné sítě řadíme telefonní síť. V úvahu připadá vytáčené připojení, ISDN a DSL. Výhodou vytáčeného připojení je jeho dostupnost, je dispozici v každé budově připojené k telefonní síti. Nevýhodou je možnost konfliktů s hovory zákazníka, během odesílání dat nemůže zároveň probíhat hovor. Tento problém lze vyřešit použitím technologií ISDN nebo DSL, tyto nejsou však vždy dostupné. Alternativní řešení mohou nabídnout mobilní sítě.

V případě mobilní sítě jsou dle OPEN meter uvažovány technologie GPRS a UMTS. Mezi přednosti těchto technologií patří jejich malé náklady na instalaci a pokrytí. Zde není zaručen dosah signálu k zařízením umístěným za překážkami, řešením může být použití PLC technologií.

Využitím PLC odpadá nutnost instalace další infrastruktury, další výhodou je snadná dostupnost. PLC mohou využívat veškerá zařízení připojená do elektrické sítě. Dle OPEN meter se využívají standardy PRIME a IEC 61334. Z důvodu velké chybovosti standardu PRIME a malé přenosové rychlosti IEC 61334 se začíná uvažovat o standardu G3.

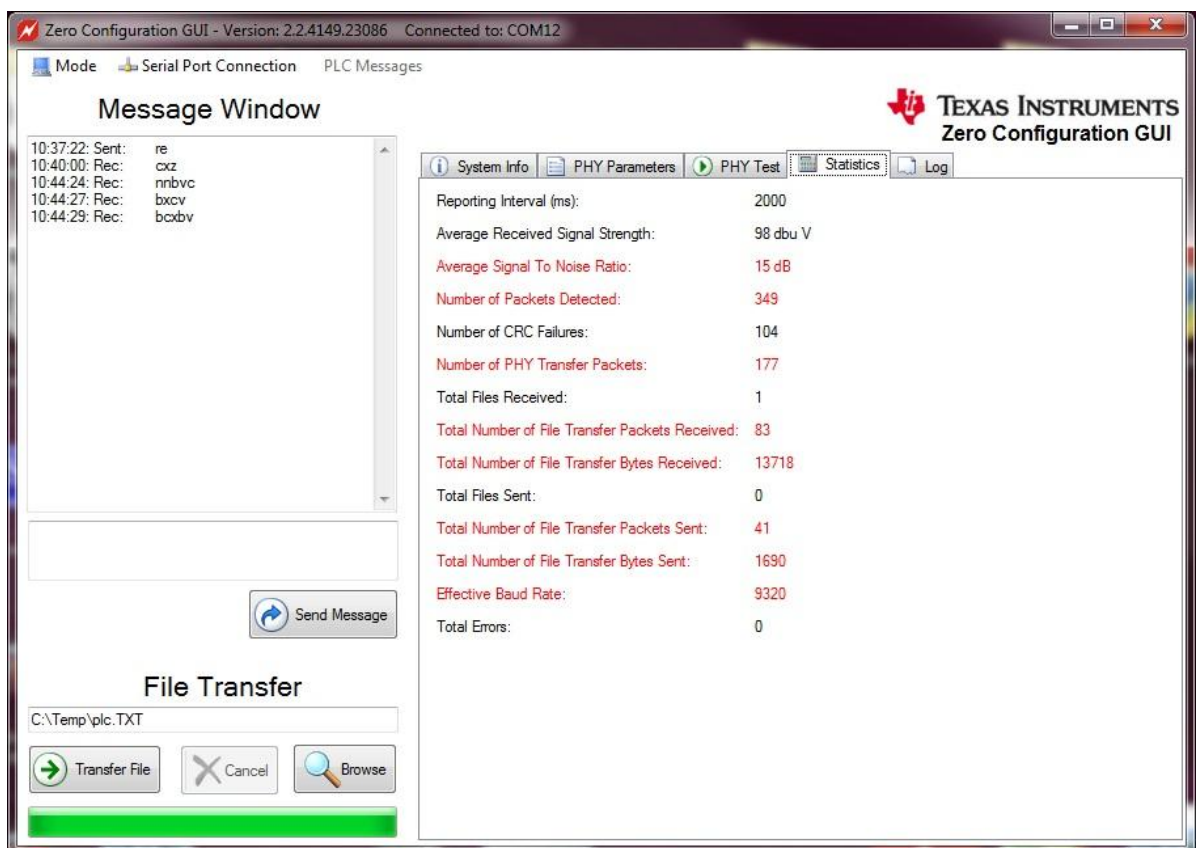
## 5.1 Měření PLC standardu PRIME

Chybovost dále prokazuje i provedené měření. Měření bylo provedeno pomocí počítače a dvou testovacích PLC modulů firmy Texas Instruments, na nichž byl nahrán standard PRIME. Pro zobrazení hodnot měření a komunikaci mezi počítačem a PLC modemem byl využit program Zero Configuration GUI společnosti Texas Instruments. Toto měření bylo provedeno autorem třikrát s různou konfigurací sítě a různými modulacemi, přičemž ve všech případech byla obě zařízení připojena k síti pomocí stejného rozvodu. Měřila se chybovost při posílání 11 kB velkého textového souboru.



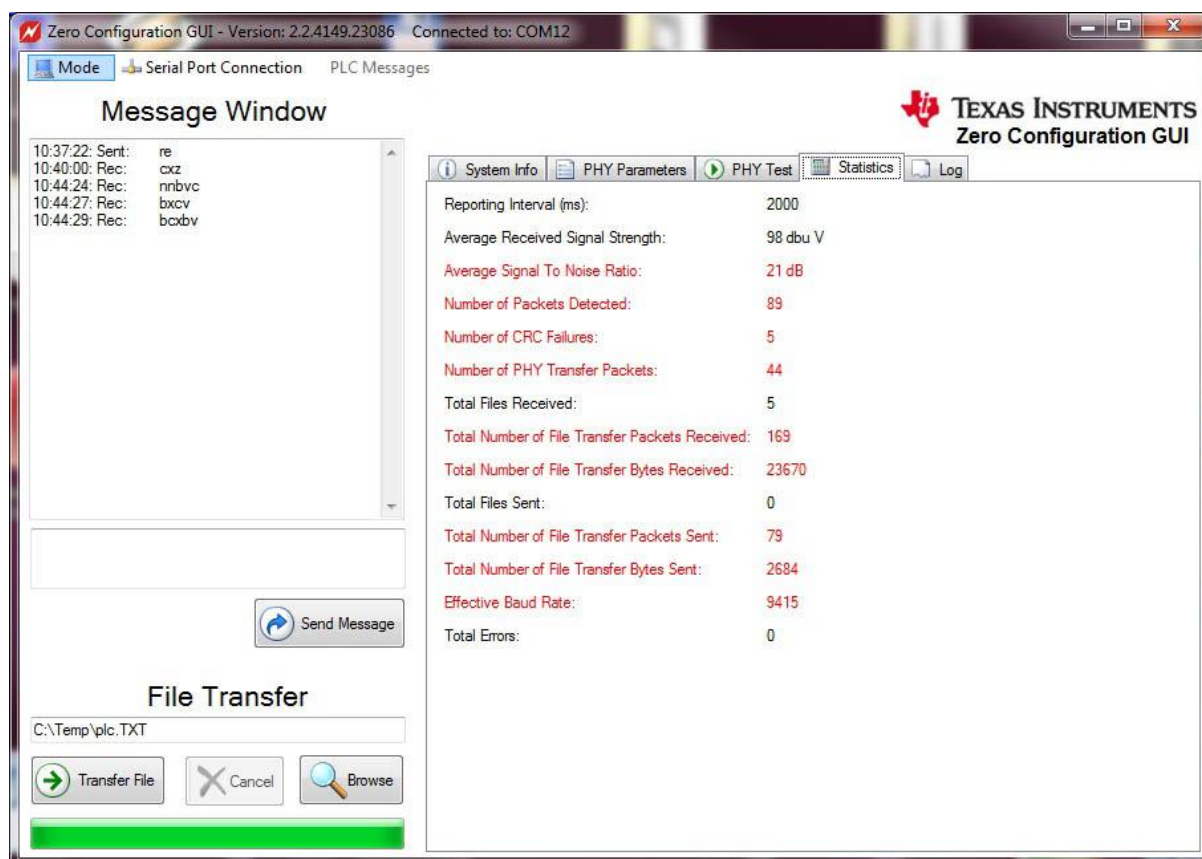
Obrázek 23 Schéma zapojení I. a II. měření

V prvním a druhém případě byl k stejnému rozvodu úmyslně připojen spínaný zdroj (viz obrázek 23). Spínaný zdroj zatěžuje síť nesinusovým průběhem proudu. Je zdrojem vyšších harmonických frekvencí, které mohou způsobovat rušení na nosných frekvencích PLC signálu. Navíc pro PLC signál představuje útlum.



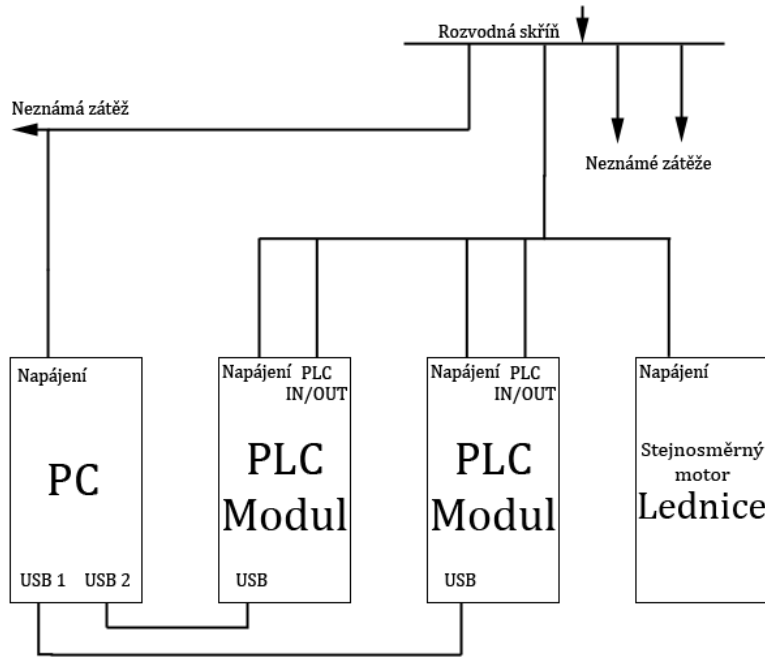
Obrázek 24 Naměřené hodnoty I. měření

Naměřené hodnoty prvního měření jsou zobrazeny na obrázku 24. Nejprve bylo navázáno spojení mezi moduly. Z důvodu velkého odstupů signálu od šumu (15 dB) byla zvolena modulace D8PSK. Posílaný soubor byl rozdělen do 83 packetů, z toho 0 packetů bylo ztraceno a 10 jich bylo přijato s chybou a muselo být odesláno znovu. Celkové množství přenesených bajtů (data a režie datových rámců) bylo při použití D8PSK nejmenší, 13 kB.



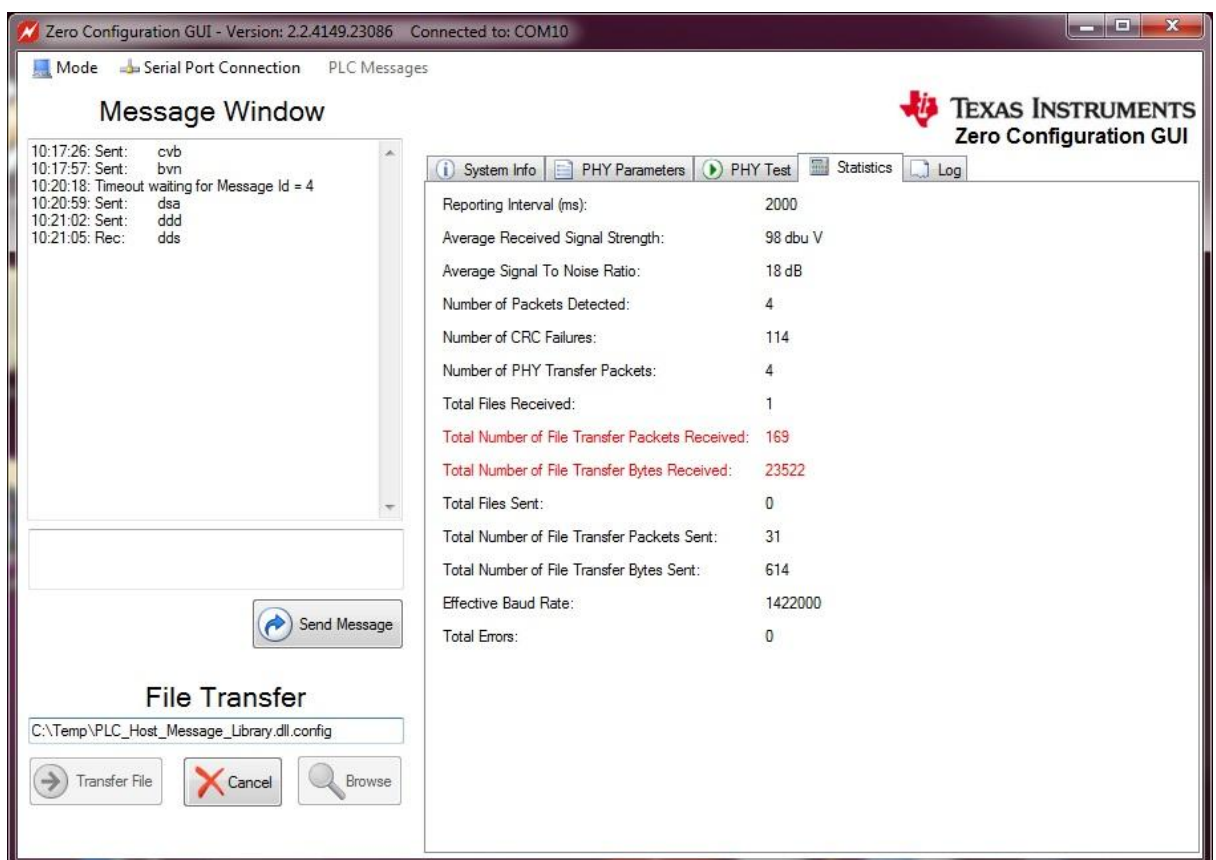
Obrázek 25 Naměřené hodnoty II. měření

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na obrázku 25. Pro přenos dat byla použita modulace DBPSK. Díky tomu se zvýšil odstup signálu šum na 21 dB. Za cenu nižší teoretické rychlosti se dle očekávání (méně stavová modulace) snížila chybovost. Dále se zvětšil počet packetů na 169, tím se zvedla režie datových rámců a celkové množství přenesených bajtů na 23 kB. Z toho 0 packetů bylo ztracených a v 5 byla zjištěna chyba.



Obrázek 26 Schéma zapojení III. měření

Pro další měření byla změněna konfigurace sítě PLC moduly byly zapojeny do rozvodu s lednicí a počítač byl zapojen do jiného rozvodu (viz obrázek 26).



Obrázek 27 Naměřené hodnoty III. měření

Naměřené hodnoty III. měření jsou zobrazeny na obrázku 27. Přenos dat byl realizován modulací DBPSK. Měření probíhalo na rozvodu, kde byl připojen stejnosměrný motor. Motor oproti spínaným zdrojům způsobuje menší rušení vyššími harmonickými, naopak ale představuje větší útlum pro PLC signál. Díky tomu odstup signál šum byl při použití stejné modulace nižší, 18 dB. Počet packetů a přenesených bajtů byl stejný jako u předchozího měření. Z toho 0 packetů bylo ztraceno a v 5 byla zjištěna chyba.

## 5.2 Porovnání PLC standardů

Z měření a analýzy (málo robustní fyzická vrstva) je zřejmé, že standard PRIME má velkou chybovost i při velkém odstupě signálu od šumu. V sítích s větším útlumem, rušením (například podnik nebo větší firma) a při komunikaci na delší vzdálenosti může být odstup signálu od šumu ještě menší. Což má za následek ještě větší chybovost a snížení reálné přenosové rychlosti.

Do sítí s menším odstupem signálu od šumu se spíše hodí standard G3, který má robustnější fyzickou vrstvu. Jeho nevýhodou je MAC vrstva, která neobsahuje zařízení v režimu switch, tedy všechna zařízení musejí být připojena k řídicí stanici přímo. Problém s komunikací na delší vzdálenosti lze vyřešit opakovačem signálu. PRIME oproti G3 nepřímé připojení k řídicí stanici umožňuje, nicméně díky malé odolnosti fyzické vrstvy proti rušení je nepřímá komunikace téměř nepoužitelná.

## Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá, jak již bylo výše zmíněno standardy smart metering. Tyto standardy jsou aplikovány do různých standardizačních projektů, jedním s těchto projektů je OPEN meter. Bakalářská práce se zabývá tímto projektem. Popisuje a porovnává jeho výstupy na základě měření a analýzy. Hlavní zaměření práce je na PLC standardy, které jsou nebo by mohly být do tohoto projektu implementovány.

První kapitola popisuje odečty, které prováděla pověřená osobou a metody vzdálených odečtů. Dále popisuje stav systému řízení a regulace spotřeby objektů před a po zavedení vzdálených odečtů.

Druhá kapitola práce je zaměřena na projekt OPEN meter. OPEN meter standardizuje systémy smart metering. Projekt určuje z jakých prvků je systém složen. Stanovuje technologie a standardy, které je výhodné použít pro komunikaci jednotlivých zařízení v rámci tohoto systému. Práce ukazuje jak je složité pro jednotlivé komunikace mezi prvky navrhnout správné technologické řešení, které bude zároveň ekonomicky výhodné a bude mít dostatečné přenosové rychlosti.

Třetí kapitola práce je zaměřena na technologií PLC. Popisuje PLC standardy, jejich zabezpečení přenosu proti chybám, hierarchií a jakým způsobem je v nich řízen přístup k médiu.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na bezdrátovou komunikační technologii. Popisuje standardy této technologie. Oproti PLC standardům je navíc zde řešeno šifrování a šetření baterií.

V páté kapitole jsem mezi sebou porovnal jednotlivé uvažované technologie a standardy v projektech SET-plan a OPEN meter. Dle analýzy v předchozích kapitolách a dle výstupů zmíněných projektů jsem zjistil, že v oblasti bezdrátových technologií jsou pro smart metering perspektivní standardy Wireless M-Bus a ZigBee. Wireless M-Bus nabízí jednosměrnou komunikaci s nízkou spotřebou energie. Vyplatí se tam, kde není potřeba obousměrná komunikace. Obousměrnou komunikaci poskytuje standard ZigBee, ale oproti Wireless M-Bus má vyšší spotřebu. Dalším uvažovaným standardem je WiFi. Nabízí nejlepší vysílací výkon. Nevýhodou je velká spotřeba energie. Hodí se spíše pro zařízení, pro které není důležitá nízká spotřeba energie (například zařízení napájené ze sítě).

Pro oblast PLC technologií jsem prováděl měření a analýzu standardů. Analýzou jsem zjistil, že data přenášená pomocí standardu PRIME jsou méně zabezpečená proti chybě. Z toho vyplývá vyšší teoretická rychlost a zároveň vyšší chybovost. Měření ukázalo že zvýšená chybovost standardu PRIME nastává i při velkém SNR. Řešení chybovosti poskytuje



standard G3. Fyzická vrstva G3 oproti PRIME využívá Reed-Solomon kódy (samoopravné kódy), které zajišťují větší odolnost proti rušení a menší chybovost.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] OPEN meter [online] [cit. 2012-04-20 ] About OPEN meter.  
Dostupné z: <http://openmeter.com/?q=node/8>
- [2] LIĐÁKOVÁ J. Uplatnění konceptu Smart Grids v distribuci a spotřebě elektrické energie. Diplomová práce. ZČU, 2011. vedoucí práce Hejtmánková P.
- [3] CodeGuru [online]. [cit. 2012-04-08]. Introduction to Network Protocols Dostupné z: [http://www.codeguru.com/cpp/sample\\_chapter/print.php/c12219](http://www.codeguru.com/cpp/sample_chapter/print.php/c12219)
- [4] HENDRIK C. Ferreira. Power Line Communications. Oxford: Wiley, John & Sons, 2010. ISBN 9780470740309 0470740302.
- [5] PRIME specification revision v1.3.6. PowerLine Intelligent Metering Evolution. Brusel: Prime Alliance, 2006.
- [6] G3-PHY-Layer. G3 Physical layer specification. Francie: ERDF, 2008
- [7] G3-MAC-Layer. G3 MAC layer specification. Francie: ERDF, 2008
- [8] IEEE 802.15.4-2006. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. New Jersey (USA): IEEE, 2006
- [9] ČSN IEC 61334-1-2. Automatizace dodávky elektrické energie s použitím vř přenosových systémů po distribučním vedení - Část 1-2: Všeobecné zásady - Návod pro specifikace. Praha: ČSN, 1998.
- [10] Síťová komunikace. [online]. [cit. 2012-04-08]. Referenční model ISO/OSI  
Dostupné z: <http://pc-site.owebu.cz/?page=ISO-OSI-1>
- [11] PLC Manual [online]. [cit. 2012-04-09]. ISO/OSI model.  
Dostupné z: <http://www.plcmanual.com/isoosi-model>
- [12] HW.cz [online] [cit. 2012-04-08]. ZigBee - novinka na poli bezdrátové komunikace.  
Dostupné z: <http://www.hw.cz/Rozhrani/ART1299-ZigBee---novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html>
- [13] AUTOMATIZACE [online]. [cit. 2012-04-08]. Bezdrátový komunikační standard ZigBee. Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=638>
- [14] VYČÍTAL, M. Systémy vzdálených odečtů. Bakalářská práce. ZČU, 2011. Vedoucí práce Ing. Aleš Krutina.
- [15] Automatizace.HW.cz [online]. [cit. 2012-04-10]. Sběrnice wireless M-Bus - jde to i bezdrátově. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/sbernice-wireless-mbus-jde-i-bezdratove>

- [16] EUROPA [online]. [cit. 2012-05-25]. Towards a low carbon future  
dostupné z: [http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/07/493  
&format=HTML&aged=1&language=EN&guiLanguage=en](http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/07/493&format=HTML&aged=1&language=EN&guiLanguage=en)
- [17] Deliverable D1.2. Technology Trends for SmartHouse/SmartGrid. Brusel: SAP 2010