

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Kateřina Dobešová



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## **INTELIGENTNÍ SYSTÉM PRO DÁLKOVÝ SBĚR DAT PO PLC**

PLC SYSTEM FOR SMART METERING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Kateřina Dobešová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**  
Ústav telekomunikací

**Studentka:** Kateřina Dobešová

**ID:** 147672

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### Inteligentní systém pro dálkový sběr dat po PLC

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Rozeberte současné možnosti PLC komunikace pro dálkový sběr dat. Seznamte se s dostupnými modemy firmy ModemTec, vývojovými kity Atmel a širokopásmovými modemy. Realizujte sadu měření PLC komunikace. Zaměřte se na možnosti měření přenosové funkce, vlivu rušení na komunikaci a možné vzdálenosti komunikace, či vliv topologie distribuční sítě na komunikaci. Navrhněte laboratorní úlohu s vybraným PLC modemem.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Hrasnica, H. Broadband Powerline Communications Networks. John Wiley & Sons, Chichester 2004. ISBN 0-470-85741-2.

[2] Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines. 1st ed. Editor Hendrik Ferreira. Chichester: John Wiley, 2010, 507 s. ISBN 978-047-0740-309.

**Termín zadání:** 1.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá PLC komunikací, rozebírá výhody a nevýhody této technologie. Popisuje významné standardy úzkopásmové komunikace a zmiňuje taktéž širokopásmový standard HomePlug AV2. Uvádí rozdělení PLC technologie dle šířky pásma, ve kterém působí. Zahrnuje současný přehled síťových prvků technologie PLC pro komerční využití či ve formě vývojových kitů. Dále práce obsahuje popis testů aktivních síťových prvků dle doporučení RFC 2544 a aplikaci těchto testů pomocí NetBlazer testeru na širokopásmových PLC modemech Linksys PLEK500 v laboratoři Ústavu telekomunikací VUT BRNO. Tytéž PLC modemy byly použity také k experimentálnímu měření v domácím prostředí. Práce se také zabývá srovnáním úzkopásmových PLC standardů PRIME a G3 za různých podmínek definovaných v předem připravených scénářích. Pro účel tohoto srovnání bylo provedeno měření s kitem SAM4CP16C-EK od firmy Atmel, pracujícím s více nosnými. V závěrečné části práce jsou výsledky diskutovány ve srovnání s dostupnou literaturou.

## KLÍČOVÁ SLOVA

PLC, RFC 2544, datový přenos, úzkopásmová komunikace, širokopásmová komunikace, HomePlug AV2, NetBlazer, Linksys PLEK500, PRIME, G3, PSK, SAM4CP16C-EK

## ABSTRACT

This thesis deals with PLC communication, presents pros and cons of this technology. The thesis describes several basic standards of the narrowband communication and broadband HomePlug AV2 standard. It groups the technology according to frequency band. Also, it brings summary of commercial products and development kits which are using PLC technology. The thesis contains the description of network testing to RFC 2544 recommendation and its application onto narrowband Linksys PLEK500 modems using NetBlazer tester which took place in laboratory of Brno University of Technology's Department of Telecommunications. The same PLC modems are used in a second series of experimental measurements in home environment. This thesis also deals with comparison of narrowband PLC standards PRIME and G3 whilst exposed to different transmission conditions as defined by pre-established measurement scenarios. Said comparison was attained by measurements using Atmel's multi-carrier PLC kit SAM4CP16C-EK. In the closing section of the thesis the results obtained by said measurements are consulted with conclusions provided by contemporary PLC-oriented publications.

## KEYWORDS

PLC, RFC 2544, data transfer, narrowband communication, broadband communication, HomePlug AV2, NetBlazer, Linksys PLEK500, PRIME, G3, PSK, SAM4CP16C-EK

DOBEŠOVÁ, Kateřina *Inteligentní systém pro dálkový sběr dat po PLC*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 65 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Inteligentní systém pro dálkový sběr dat po PLC“ jsem vypracoval(a) 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petrovi Mlýnkovi, Ph.D. za odborné vedení, přínosné konzultace, trpělivost a cenné rady.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Purkynova 118, CZ-61200 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj  
pro inovace

# OBSAH

Úvod	12
<b>1 Technologie PLC</b>	<b>13</b>
1.1 Princip	13
1.2 Výhody	13
1.3 Problémy	14
1.4 Standardy	14
1.4.1 Úzkopásmové	15
1.4.2 Širokopásmové	16
1.5 Frekvenční pásma	16
1.5.1 Pro úzkopásmovou PLC	17
1.5.2 Pro širokopásmovou PLC	17
<b>2 Typy PLC</b>	<b>18</b>
2.1 Dle kmitočtového pásma	18
2.1.1 Velmi úzké kmitočtové pásmo	18
2.1.2 Úzké kmitočtové pásmo	18
2.1.3 Široké kmitočtové pásmo	18
2.2 Dle napětí elektrického vedení	19
2.2.1 Velmi vysoké napětí	19
2.2.2 Vysoké napětí	19
2.2.3 Nízké napětí	19
<b>3 PLC modemy</b>	<b>20</b>
3.1 Komerční řešení	20
3.1.1 ModemTec	20
3.1.2 Yitran	20
3.1.3 Devolo	21
3.1.4 Texas Instruments	21
3.2 Vývojové kity	21
3.2.1 Devolo	21
3.2.2 Texas Instruments	22
3.2.3 Atmel	22
<b>4 Měření se širokopásmovými modemy</b>	<b>23</b>
4.1 Linksys PLEK500 HomePlug AV2 Kit	23
4.2 Tester NetBlazer	23
4.2.1 Testování	23

<b>5</b>	<b>Výsledky měření se širokopásmovými modemy</b>	<b>26</b>
5.1	Měření s modemy Linksys PLEK500 . . . . .	26
5.2	Měření s testerem NetBlazer . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Experimentální měření PLC komunikace s více nosnými</b>	<b>31</b>
6.1	Použité kity a technologie . . . . .	31
6.1.1	SAM4CP16C-EK Kit . . . . .	31
6.1.2	Modulace . . . . .	31
6.2	Topologie a nastavení měření . . . . .	32
6.2.1	Topologie . . . . .	32
6.2.2	Nastavení měření . . . . .	33
<b>7</b>	<b>Výsledky měření PLC komunikace s více nosnými</b>	<b>34</b>
7.1	Měřené parametry . . . . .	34
7.2	Získané hodnoty . . . . .	34
7.2.1	G3-PLC . . . . .	35
7.2.2	PRIME . . . . .	40
7.2.3	Srovnání výsledků G3-PLC a PRIME . . . . .	42
7.2.4	Měření maximálních rychlostí . . . . .	44
7.3	Srovnání vlastních výsledků s dostupnou literaturou . . . . .	47
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>50</b>
	<b>Literatura</b>	<b>52</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>58</b>
<b>A</b>	<b>Výsledky měření</b>	<b>59</b>
A.1	Powerline HomePlug AV2 Kit . . . . .	59
A.2	Tester NetBlazer . . . . .	60
A.3	Atmel SAM4CP16C-EK Kit . . . . .	62
A.3.1	G3-PLC . . . . .	62
A.3.2	PRIME . . . . .	64

## SEZNAM OBRÁZKŮ

4.1	Schéma měření. . . . .	23
5.1	Výsledky měření na vzdálenost 30 m. . . . .	27
5.2	Výsledky měření na vzdálenost 60 m. . . . .	29
5.3	Výsledky měření pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 100 %. . . . .	30
6.1	Schéma topologie č. 1. . . . .	32
6.2	Schéma topologie č. 2. . . . .	32
6.3	Schéma topologie č. 3. . . . .	33
7.1	Srovnání naměřené efektivní rychlosti pro scénář 1A a 1B. . . . .	35
7.2	Srovnání naměřené fyzické rychlosti pro scénář 1A a 1B. . . . .	35
7.3	Srovnání naměřeného využití kanálu pro scénář 1A a 1B. . . . .	36
7.4	Grafické znázornění správnosti doručených dat pro jednotlivé topologie dle užití modulace. . . . .	36
7.5	Grafické znázornění správnosti doručených dat pro různá nastavení impedance. . . . .	37
7.6	Grafické znázornění efektivní rychlosti pro jednotlivé topologie dle užití modulace. . . . .	38
7.7	Grafické znázornění efektivní rychlosti srovnané s úspěšností správně doručených dat ve 3. scénáři (s rušením). . . . .	38
7.8	Grafické znázornění fyzické rychlosti pro jednotlivé topologie dle užití modulace. . . . .	39
7.9	Grafické znázornění indikátoru kvality linky pro jednotlivé pakety ve všech třech scénářích (modulace ROBO). . . . .	39
7.10	Grafické znázornění správnosti doručených dat pro jednotlivé topologie dle užití modulace. . . . .	40
7.11	Grafické znázornění odstupů signálu od šumu a velikosti odchylky vektoru pro jednotlivé pakety ve scénáři 1A. . . . .	40
7.12	Grafické znázornění odstupů signálu od šumu a velikosti odchylky vektoru pro jednotlivé pakety ve scénáři 1B. . . . .	41
7.13	Grafické znázornění indikátoru kvality linky pro jednotlivé pakety ve všech třech scénářích. . . . .	41
7.14	Grafické znázornění naměřeného využití kanálu pro jednotlivé topologie dle užití modulace. . . . .	42
7.15	Srovnání naměřeného využití kanálu pro standardy G3 a PRIME. . . . .	43
7.16	Srovnání maximální úspěšnosti doručení a bezchybnost zpráv pro standardy G3 a PRIME (robustní modulace ROBO, RQPSK a RBPSK). . . . .	43
7.17	Srovnání naměřené maximální efektivní rychlosti pro 1. a 2. scénář. . . . .	44

7.18	Srovnání naměřené maximální fyzické rychlosti pro 1. a 2. scénář. . .	45
7.19	Srovnání naměřeného maximálního využití kanálu pro 1. a 2. scénář.	45
7.20	Srovnání naměřené maximální efektivní rychlosti pro 1. a 2. scénář. . .	46
7.21	Srovnání naměřené maximální fyzické rychlosti pro 1. a 2. scénář. . .	46
7.22	Srovnání naměřeného maximálního využití kanálu pro 1. a 2. scénář.	47
A.1	Výsledky měření pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 0%.	60
A.2	Výsledky měření pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 50%.	61
A.3	Grafické znázornění efektivní rychlosti pro jednotlivé topologie dle užité modulace (PRIME). . . . .	65
A.4	Grafické znázornění fyzické rychlosti pro jednotlivé topologie dle užité modulace (PRIME). . . . .	65

# SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled světových kmitočtových pásem. . . . .	17
5.1	Zpoždění v závislosti na délce rámce pro měření na vzdálenost 30 m. . . . .	28
5.2	Zpoždění v závislosti na délce rámce pro měření na vzdálenost 60 m. . . . .	28
5.3	Zpoždění v závislosti na délce rámce pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 100 %. . . . .	30
7.1	PRIME – srovnání vlastních výsledků se článkem [30] . . . . .	48
7.2	G3 – srovnání vlastních výsledků se článkem [30] . . . . .	48
A.1	První měření – vzdálenosti v rámci pokoje č.1. . . . .	59
A.2	Druhé měření – mezi routerem a zásuvkami v pokoji č. 2. . . . .	59
A.3	Třetí měření – vliv rušení. . . . .	59
A.4	Čtvrté měření – mezi routerem a zásuvkami v pokoji č. 3. . . . .	59
A.5	Páté měření – mezi routerem a zásuvkami v pokoji č. 1. . . . .	59
A.6	Zpoždění v závislosti na délce rámce pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 0 %. . . . .	60
A.7	Zpoždění v závislosti na délce rámce pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 50 %. . . . .	61
A.8	Scénář č. 1A . . . . .	62
A.9	Scénář č. 1B . . . . .	62
A.10	Scénář č. 2 . . . . .	62
A.11	Změna rozestupu mezi rámci pro modulaci 8PSK . . . . .	63
A.12	Změna rozestupu mezi rámci pro modulaci QPSK . . . . .	63
A.13	Změna rozestupu mezi rámci pro modulaci ROBO . . . . .	63
A.14	Změna impedance pro modulaci QPSK . . . . .	63
A.15	Scénář č. 3 . . . . .	63
A.16	Scénář č. 1A . . . . .	64
A.17	Scénář č. 1B . . . . .	64
A.18	Scénář č. 2 . . . . .	64
A.19	Scénář č. 3 . . . . .	64



# ÚVOD

V dnešní době, kdy moderní technologie pronikají do čím dál větší části každodenního života, je kladen stále větší důraz na dostupnost a kvalitu datových přenosů. K naplnění těchto nároků je třeba markantně síť rozšířit a integrovat novou technologii, lze ale také využít stávající infrastrukturu všestranněji.

Tuto možnost představuje technologie přenosu dat po silových rozvodech, jež je označována zkratkou PLC (PowerLine Communication). Zrod PLC komunikace je uváděn již na prahu 20. století [1] a v dnešním světě je její využití výhodné především z důvodu pokrytí větší části obývaného povrchu planety právě elektrickou sítí.

Tato bakalářská práce se zabývá srovnáním komerčních a vývojových řešení PLC komunikace dostupných na trhu a jejím hlavním cílem je série měření ověřující přenosové parametry a možné vlivy ovlivňující přenos touto technologií. Po domluvě s vedoucím práce byla práce zaměřena na rozšíření topologií a hledání maximálního výkonu pro vybraný modem namísto navržené laboratorní úlohy s vybraným modemem, které není do této práce zahrnuto.

První kapitola představuje princip a vlastnosti PLC technologie, rozebírá hlavní výhody a problémy s ní spojené. Kapitola druhá se zaměřuje na hlavní dělení PLC technologie, a sice podle kmitočtového rozmezí, ve kterém působí, a dle napětí elektrického vedení, po němž komunikace probíhá. Předmětem třetí kapitoly je přehled aktuálních komerčních PLC řešení a vývojových kitů.

Výstupem práce jsou sady měření, jež jsou popsány v následné druhé části práce. Ve čtvrté kapitole jsou představena měření se širokopásmovými modemy a testerem a v kapitole páté výsledky tohoto měření, analyzovány na základě teoretických poznatků z první části práce. Předmětem šesté kapitoly je měření úzkopásmové PLC komunikace s více nosnými, jsou zde uvedeny použité přístroje a technologie a představeny měřené scénáře a samotné nastavení měření. Poslední, sedmá kapitola vysvětluje související parametry, zahrnuje výsledky měření úzkopásmové komunikace pro jednotlivé použité standardy, jejich srovnání, měření maximálních rychlostí pro vybraný modem, a následně srovnává dosažené výsledky s odbornou literaturou.

# 1 TECHNOLOGIE PLC

## 1.1 Princip

Technologie funguje na principu přenosu datových toků po silnoproudém vedení. PLC zařízení jsou připojena k elektrické síti pomocí vazebních členů, a sice kapacitních či indukčních. PLC využívá faktu, že elektrická distribuční síť dodržuje jmenovitou frekvenci 50 Hz a data tedy můžeme přenášet na podstatně vyšších frekvencích. Odesílaná data je nutné nejprve modulovat, přijímač poté příchozí signály oddělí a data demoduluje.

## 1.2 Výhody

Jak už bylo zmíněno v úvodu k PLC, tato technologie poskytuje řadu nepřehlédnutelných výhod vyplývajících z podstaty jejího fungování. Zde budou shrnuty nejmarkantnější z nich [2].

- (a) Dostupnost – elektrické vedení je v zabydlených oblastech dnes naprosto běžně dostupné a lze z toho tedy těžit, aniž bychom museli vynakládat další prostředky na budování nové kabeláže. V tomto směru se tedy PLC může rovnat bezdrátové síti. Problémem jsou však stále komunikační vzdálenosti, v některých místech je třeba použít opakovače, a tam je tento přínos značně snížen.
- (b) PLC modemy umí skloubit měření a komunikaci – tradičně jsou obě služby rozdělené, PLC přijímače však umožňují přepínat mezi funkcemi senzoru a modemu a tím předestírají nové možnosti, kupříkladu smart metering.
- (c) Umožňují redundanci kanálu – technické aplikace např. na dálkový sběr dat často vyžadují nadbytečné cesty pro komunikaci, aby byly schopny zajistit dálkové ovládání a také dostatečnou ochranu.
- (d) Přímá cesta mezi ovládacími prvky a koncovými uzly – oproti jiným formám telekomunikace vykazuje PLC nejmenší zpoždění v předání údajů mezi kontrolním rozhraním a koncovými zařízeními.
- (e) Kontrola dodavatelů elektrické energie – PLC nabízí komunikační linku, jež je v jejich plné moci. To také znamená, že s ní mohou přímo pracovat bez komplikací způsobených nutností zajištění distributorů datových služeb.
- (f) Rozmanitost PLC technologie – od velmi úzkého kmitočtového pásma až po široké, takováto variabilita umožňuje velmi rozsáhlé uplatnění technologie pro Smart Grid aplikace.

## 1.3 Problémy

Stejně jako přináší PLC technologie mnoho výhod, pojí se s ní také několik zásadních problémů, jež jsou tudíž hlavním předmětem zájmu, uvažujeme-li o rozšíření technologie do širšího okruhu využití [3].

- Komunikační vzdálenosti – vyšší dosah umožňují PLC technologie, pracující ve velmi úzkém kmitočtovém pásmu, nazývané jako UNB<sup>1</sup>, ale na úkor přenosové rychlosti. Naopak širokopásmová neboli také BB<sup>2</sup> zařízení mají jen velice krátké komunikační vzdálenosti a proto lze použít jen např. v domácím prostředí na dohledné vzdálenosti.
- Rušení – stejně jako v jiných komunikačních technologiích přenos závisí na trase, kterou musí urazit. V případě PLC je tok dat veden po silových rozvodech a ovlivňují jej proto všechny změny na elektrickém vedení v celé délce jeho trasy, jako např. spínání spotřebičů.
- PLC charakteristiky jsou proměnné – a sice v čase (se skokovou či plynulou změnou), v závislosti na kmitočtu a na místě. Spolehlivost technologie a její atributy lze proto zaručit jen do určité míry.
- Standardizace – především pro technologii širokopásmové PLC komunikace, kde zatím vývoj standardů nedospěl k přehlednému řešení, či pro UNB technologii, kde standardizace chybí.
- Nutný kompromis dosahu a rychlosti – jak je v širším rozsahu vysvětleno v kapitole 2.1, PLC se potýká s dvěma protipóly, kdy je buď docíleno velkého komunikačního dosahu, nebo vysoké přenosové rychlosti. Snahou je dosáhnout přijatelného kompromisu.
- Chybovost – silové rozvody nebyly navrženy pro přenos komunikačních signálů a při překonávání rušení elektrickým vedením dochází mnohdy k chybovosti přenosu.

## 1.4 Standardy

Narůstající nároky na vyšší datovou rychlost PLC stejně jako ostatních komunikačních technologií vedly k zavedení určitých standardů, podle kterých by se měl PLC provoz řídit. Dle typů PLC, blíže rozebraných v kapitole 2.1, jsou definovány různé standardy, jež si berou za úkol sjednotit datový přenos podporovaných zařízení.

---

<sup>1</sup>Ultra Narrow Band

<sup>2</sup>Broad Band

### 1.4.1 Úzkopásmové

Pro tento přehled, čítající hlavní čtyři úzkopásmové<sup>3</sup> (NB) standardy, byly použity zdroje [4] a [5].

#### PRIME

První pokusy o uvedení adekvátní standardizace vedly k utvoření v roce 2007 aliance PRIME (PowerLine Related Intelligent Metering Evolution) s DSO (Spanish Distribution System Operator) jako jedním ze zakládajících členů.

PRIME upřesnila profil založený na pravoúhlém multiplexu s kmitočtovým dělením (OFDM – Orthogonal frequency division multiplexing) ve snaze omezit negativní účinky atypického přenosového média [6]. Pracuje v pásmu CENELEC<sup>4</sup> a s přenosovou rychlostí až 128 kb/s bez použití korekčního mechanismu FEC (Forward Error Correction), případně 61,4 kb/s za použití FEC.

ITU-T (Standardizační sektor Mezinárodní telekomunikační unie) publikoval specifika standardu PRIME jako ITU-T doporučení G.9904.

#### G3-PLC

Další iniciativy ve prospěch standardizace vyústily v založení roku 2011 aliance G3-PLC. Zakládajících členů bylo 12, mezi nimi také Maxim Integrated Products, a cíle se poněkud lišily od předchozí aliance uvedené v oddílu 1.4.1, spíše než na datovou rychlost se orientovala G3-PLC na spolehlivost zajištěnou robustností fyzické vrstvy, zřetězení kódu a použitím také robustní modulace (ROBO).

Standard umožňuje přenos ve všech třech světových povolených kmitočtových pásmech (evropském CENELEC, japonském ARIB<sup>5</sup> a americkém FCC<sup>6</sup>) s maximální rychlostí až 46 kb/s.

ITU-T taktéž publikoval doporučení zahrnující komunikaci dle standardu G3-PLC jako doporučení G.9903.

#### IEEE 1901.2

Zvyšující se zájem také ze strany průmyslu vytvořil prostor pro hledání dalších standardů, do něhož vstoupil IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) v roce 2010 se svým projektem IEEE P1901.2 sponzorovaným IEEE Communications Society.

---

<sup>3</sup>Narrow Band

<sup>4</sup>Comité européen de normalisation électrotechnique

<sup>5</sup>Association of Radio Industries and Businesses

<sup>6</sup>Federal Communications Commission

Výsledný standard vychází z G3-PLC a má proto mnoho společných znaků, nejmarkantnější rozdíl oproti standardu předchozímu je však doložka o koexistenčním mechanismu, jenž umožňuje zařízením se vzájemně nekompatibilními PLC technologiemi, aby sdílely totéž kmitočtové pásmo.

### **ITU-T G.hnem**

Následkem vzniku předchozích tří standardů je roztržštění trhu s úzkopásmovou PLC technologií, poněvadž zmíněné standardy nejsou mezi sebou kompatibilní. Se záměrem vyřešit tuto situaci rozpracoval v lednu 2010 ITU-T projekt G.hnem, jenž si kromě zmíněného cíle vytyčil také přidání nových možností pokrytí, rychlosti a spolehlivosti NB-PLC přenosu.

Výsledný standard vychází z G3 i PRIME a zaručuje tak kýženou kompatibilitu mezi zařízeními. Podporuje tisíce komunikačních uzlů pracujících současně, ve vhodných podmínkách lze dosáhnout rychlosti přesahující 1 Mb/s a je schopen přenosu na vedení NN a VN.

## **1.4.2 Širokopásmové**

### **HomePlug AV2**

V roce 2000 vytvořila aliance HomePlug 1. (stejnojmenný) standard, po němž následoval roku 2005 druhý produkt, a sice HomePlug AV (Audio, Video). Ten se stal zakrátko nejrozšířenějším standardem pro domácí PLC komunikaci. Aby však aliance splnila nejnovější požadavky rychle vyvíjející se technologie, přišla v lednu 2012 s nejpokročilejším standardem HomePlug AV2.

Modemy pracující na základě tohoto standardu dosahují na fyzické vrstvě datové rychlosti 500 Mb/s, v ideálních případech na TCP/IP vrstvě pak 140 Mb/s. K přenosu využívají modulace OFDM a mechanismus komunikace na sdíleném přenosovém médiu pomocí CSMA/CD. Oproti specifikaci HomePlug AV 1. generace zde máme navíc možnost využít MIMO<sup>7</sup>, tedy odesílání signálů na více vstupů, a rozšířené kmitočtové pásmo od zhruba 1 MHz až po 86 MHz, které umožňuje vyšší propustnost přenosu [7].

## **1.5 Frekvenční pásma**

Jak již bylo řečeno, při realizaci silových rozvodů nebyla zahrnuta do návrhu možnost přenosu dat po elektrickém vedení, a tedy PLC technologie naráží na problémy způsobené sdílením média a dalším rádio-frekvenčním rušením.

---

<sup>7</sup>multiple inputs multiple outputs

Aby se takové vlivy minimalizovaly, vznikla omezení kmitočtových pásem pro NB-PLC a další pro širokopásmovou technologii.

### 1.5.1 Pro úzkopásmovou PLC

Omezení úzkopásmové technologie zahrnuje kmitočty v rozmezí 3–500 kHz a liší se dle světových oblastí. Přehled kmitočtových rozmezí přiřazených k danému omezení je uveden v tabulce 1.1.

Pásmo Evropského výboru pro normalizaci v elektrotechnice CENELEC lze ještě rozdělit na čtyři podkategorie dle stanovených možností použití každého typu pásma CENELEC [8].

- Typ A – právo přenášet v tomto pásmu má pouze dodavatel elektrické energie a pouze ti, jimž udělí licenci k užívání.
- Typ B – může být volně užíváno odběrateli.
- Typ C – může být taktéž užíváno odběrateli elektrické energie, ale zařízení pracující v tomto pásmu musí dodržovat CSMA/CA (carrier sense medium access/collision avoidance) protokol, aby se zabránilo kolizím.
- Typ D – může být opět volně užíváno odběrateli.

Tab. 1.1: Přehled světových kmitočtových pásem.

Oblast	Kmitočtové pásmo [kHz]	Institut	Typ
Evropa	3–95	CENELEC	A
	95–125		B
	125–140		C
	140–148,5		D
USA	10–490	FCC	–
Japonsko	10–450	ARIB	–

V současné době je také snaha přistoupit k povinnému dodržování CSMA/CA protokolu i v pásmu FCC. Umožnilo by to větší pružnost výrobcům zařízení, dodávajícím zboží evropskému i americkému trhu (a dalším zemím podléhajícím některému z těchto dvou standardů).

### 1.5.2 Pro širokopásmovou PLC

Pro širokopásmovou PLC technologii platí pouze dvě kmitočtová rozmezí, která omezují její působení [8].

- 1–30 MHz – toto frekvenční pásmo je zaměřeno na dálkovou regulaci.
- 30–100 MHz – v tomto rozmezí je vysílán ostatní datový přenos.

## 2 TYPY PLC

PLC technologii dělíme do tří základních kategorií dle šířky frekvenčního pásma, ve kterém působí, ale také do tří kategorií rozdělujících PLC technologie na základě hodnot napětí v užívaném elektrickém vedení. Následující kapitola čerpá údaje ze zdroje [3], [8] a [9].

### 2.1 Dle kmitočtového pásma

#### 2.1.1 Velmi úzké kmitočtové pásmo

Anglicky nazýváme tento typ PLC technologií Ultra narrow band (zkráceně UNB). Působí v kmitočtovém rozmezí 30–300 Hz a 0,3–3kHz, podporuje pouze nízkou datovou rychlost, zato mívá velký komunikační dosah. Pro PLC komunikaci v tomto kmitočtovém rozsahu neexistují adekvátní standardy. Příkladem využití je např. systém hromadného dálkového ovládání (HDO), který na dálku reguluje odběr elektrické energie.

#### 2.1.2 Úzké kmitočtové pásmo

Anglický termín zní Narrow band (zkráceně NB), PLC zařízení tohoto typu komunikují v pásmu 3–500 kHz. Využívá se např. pro ovládání zařízení elektroinstalace (klimatizace, topení, atd.) či centralizované řízení a zabezpečení. Dle datové rychlosti lze úzkopásmovou PLC technologii dále dělit na:

- S nízkou přenosovou rychlostí – neboli také LDR (low data rate) přenášející rychlostí odpovídající jednotkám kb/s. Mezi standardy určující LDR komunikaci patří např. LonWorks, HomePlug C&C, IEC 61334.
- S vysokou přenosovou rychlostí – či HDR (high data rate), zařízení komunikují na více nosných frekvencích rychlostí v desítkách až cca pěti stech kb/s. Příklady standardů kompatibilních s HDR zařízeními jsou PRIME, G3-PLC, IEEE 1901.2 a ITU-T G.hnem.

#### 2.1.3 Široké kmitočtové pásmo

Tento typ nazýváme také jako Broad band (zkráceně BB). Komunikace probíhá v kmitočtovém pásmu 1,8–500 MHz, oproti UNB představené v části 2.1.1 vykazuje vyšší datovou rychlost a naopak má krátký dosah. Přenosová rychlost se pohybuje v řádu desítek až stovek Mb/s, zařízení spadající do této kategorie podléhají standardům jako kupříkladu HomePlug Green PHY, HomePlug AV, HD-PLC, IEEE 1901. Výzkumem širokopásmé PLC technologie se zabývala OPERA (Open PLC

European Research Alliance) s rozporupnými výsledky. Využívá se převážně pro HAN (home area network) a domácí aplikace.

## 2.2 Dle napětí elektrického vedení

Chceme-li uvažovat o využití PLC v širším měřítku v různých oblastech Smart Grid (Inteligentní sítě), je třeba rozlišit jednotlivé možnosti použití v závislosti na tom, o jaký typ elektrického vedení se jedná.

### 2.2.1 Velmi vysoké napětí

Vodiči prochází napětí v řádu stovek kV, je vedeno nadzemně (ochrana polohou) na velké vzdálenosti s malým počtem vedlejších větví, tj. v rámci celého státu či dokonce mezinárodně. Z hlediska malého útlumu v závislosti na délce trasy je využití vedení VVN (velmi vysokého napětí) pro PLC výhodné, výhradně však pro UNB či NB.

Tento druh PLC přenosu je vhodný pro zajištění ochrany vodičů, vzdálené monitorování zkratových proudů či poruch.

### 2.2.2 Vysoké napětí

Vedení VN (vysokého napětí) je napojeno na VVN okruh prostřednictvím primárních transformátorových stanic, pokrývá výrazně menší vzdálenosti než VVN, např. mezi městy, a je realizováno nadzemně i podzemně. Napětí v soustavě se v tomto případě pohybuje v hodnotě desítek kV.

Lze je využít pro NB-PLC aplikace typu monitorování, měření a ovládání na dálku, k jejich provozu stačí totiž i relativně nízká odpovídající datová rychlost.

### 2.2.3 Nízké napětí

Jmenovité napětí je rovno 110 až 400 V, s VN soustavou je vedení propojeno pomocí sekundárních transformátorových stanic a překonává vzdálenosti několika set metrů. Pro potřeby PLC je kvůli velkému útlumu vedení nutné dodat opakovače či vazební členy, aby bylo možné dosahovat rychlého datového přenosu.

Nejrozsáhlejší využití PLC komunikace je v dnešní době právě na hladině nízkého napětí, kupříkladu pro HAN, ovládání domácích elektronických zařízení, zobrazení a řízení spotřeby energie.



## 3 PLC MODEMY

S postupným rozšířením technologie PLC se na trhu objevilo velké množství zařízení umožňující její využití. V tomto rozboru jsou zahrnuta širokopásmá komerční řešení mimo modemů typu plug-in.

Po zmíněné specifikaci požadavků na kýžená zařízení byl výběr zúžen na produkty české firmy, zabývající se PLC komunikací, ModemTec, a dále zahraničních výrobců, jmenovitě Yitran, Devolo a Texas Instruments.

Nejprve budou v této kapitole představena komerční řešení od zmíněných výrobců, a poté vývojové kity od firmy Devolo, Texas Instruments a Atmel.

### 3.1 Komerční řešení

#### 3.1.1 ModemTec

Z nabídky produktů byly zvoleny pouze modemy pro přenos sériovou linkou.

- (a) MT49R – 1 fázový modul dosahující rychlosti 10 kb/s na vzdálenost několika kilometrů. Přenáší datagramy o max. velikosti 520 b v kmitočtovém pásmu 60–145 kHz [10].
- (b) MT39-L1-ver. R – 1 fázový modem s přenosovou rychlostí 10 kb/s. Pracuje na vzdálenost několika kilometrů v kmitočtovém pásmu 60–145 kHz [11].
- (c) MT34A-ver. R – 3 fázový modul přenáší data rychlostí 300–115200 Bd, je vhodný k použití v režimu master-slave a zajišťuje komunikaci mezi elektroměry s PLC jednotkami a centrálou pomocí LAN/WAN/GPRS [12].
- (d) MT23-B – Komunikační modul řídící max. 10 jednotek až do celkové délky vedení 500 m, dosahující přenosové rychlosti 300–9600 Bd [13].
- (e) MT23-S – Modul pracující v kmitočtovém pásmu 80–145 kHz k použití v NN rozvodné síti s přenosovou rychlostí 19200 Bd [14].

#### 3.1.2 Yitran

Výrobce má centrálu v Izraeli a vyvíjí výhradně čipové, v originále System on a Chip (zkráceně SoC), systémy. V této práci jsou uvedeny tři řady jeho PLC řešení.

- (a) IT700 IC – Obvod přenášející rychlostí 2,5 kb/s v robustním módu (0,625 kb/s v extrémně robustním módu) obsahuje algoritmy pro opravu chyb vzniklých modulací a přenáší zabezpečeně 128 bitovým AES šifrováním s 32 bitovou autentizací. Je schopen pracovat se sítěmi čítající až 2000 uzlů v kmitočtovém pásmu 9–95 kHz a 95–125 kHz [15].

- (b) IT800 Legacy – Modem s přenosovou rychlostí 2,5 kb/s v robustním módu (0,625 kb/s v extrémně robustním módu), obsahuje algoritmy pro opravu chyb vzniklých modulací. Je použitelný pro sítě čítající až 2047 uzlů, pracuje v kmitočtovém pásmu 9–95 kHz a 95–125 kHz [16].
- (c) IT900 – Modem přenášející rychlostí 150 kb/s v robustním módu (0,625 kb/s v extrémně robustním módu) podporuje protokol IPv4, taktéž IPv6, vykazuje téměř 60x větší propustnost než předchozí řada a lze využít pro sítě o max. 2000 uzlů [17].

### 3.1.3 Devolo

Rakouský výrobce Devolo uvádí na trh několik plug-in modemů, které ve výčtu nejsou zahrnuty, ale také další dLAN moduly a modemy.

- (a) dLAN® Green PHY Module – Přenosová rychlost modulu je až 10 Mb/s, dosah 300 m, zařízení je kompatibilní se standardy HomePlug Green, PHY a HomePlug AV a podporuje 128 bitové AES šifrování přenosu [18].
- (b) devolo G3-PLC Modem 500k – Modem je kompatibilní se standardy G3-PLC, přenáší rychlostí 240 kb/s v dosahu až 1700 m šifrovaná data 128 bitovým AES šifrováním v kmitočtovém pásmu 150–490 kHz [19].

### 3.1.4 Texas Instruments

Americká firma Texas Instruments (zkráceně TI) specializující se na výrobu polovodičů a integrovaných obvodů má v nabídce také PLC řešení, která byla přidána do tohoto přehledu.

- (a) AFE030 – Zařízení přenáší data rychlostí 1,5 MS/s v pásmu 8–12 MHz, je chráněno proti přehřátí a zkratu a podporuje standard IEC 61334 [20].
- (b) AFE031 – Modem taktéž přenáší datový tok rychlostí 1,5 MS/s v kmitočtovém pásmu 8–12 MHz, je chráněn proti přehřátí a zkratu a podporuje standardy PRIME, G3-PLC a IEC 61334 [21].

## 3.2 Vývojové kity

### 3.2.1 Devolo

dLAN® Green PHY eval board II – Deska obsahuje Green PHY Module, integrované rozhraní pro UTP, koaxiální kabely i elektrické vedení a také softwarové zázemí SDK (software development kit) pro vývoj aplikací [22].

### **3.2.2 Texas Instruments**

C2000 Power Line Modem Developer's Kit – Vývojový kit obsahuje 2 modemy řady AFE031, podporuje modulace dat typu OFDM a SFSK (spread-frequency shift keying) a standardy PRIME/G3-PLC and IEEE 1901.2 [23].

### **3.2.3 Atmel**

Americký výrobce orientovaný na mikrokontrolery, radiofrekvenční a další technické komponenty.

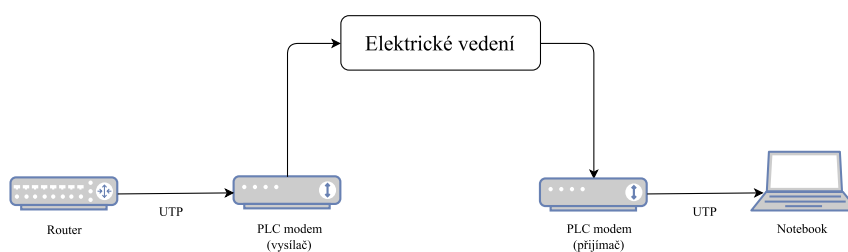
dLAN® Green PHY eval board II – Deska obsahuje Green PHY Module, integrované rozhraní pro UTP, koaxiální kabely i elektrické vedení a také softwarové zázemí SDK (software development kit) pro vývoj aplikací [24].

## 4 MĚŘENÍ SE ŠIROKOPÁSMOVÝMI MODEMY

Následující kapitola se zabývá praktickou částí bakalářské práce za použití širokopásmových modemů. Jsou zde představena realizovaná měření, použité přístroje a sestavené topologie.

### 4.1 Linksys PLEK500 HomePlug AV2 Kit

Pro účely této práce byla realizována série měření v domácím prostředí, která si kladla za cíl prozkoumat závislost datové rychlosti na vzdálenosti a vliv rušení na přenos. Použita byla dvojice PLC modemů značky Cisco Linksys PLEK500, pracující dle standardu HomePlug AV2, a schéma zapojení viz obr. 4.1.



Obr. 4.1: Schéma měření.

### 4.2 Tester NetBlazer

#### 4.2.1 Testování

Měření je realizováno za pomoci multifunkčního testeru ze série NetBlazer a probíhá dle doporučení RFC 2544 za použití odborných termínů definovaných specifikací RFC 1242 a zahrnuje testování šesti charakteristik ovlivňující výraznou měrou datový přenos daným aktivním prvkem. Tyto vlastnosti jsou následující [25]:

1. **Propustnost (Throughput).** Představuje maximální možnou rychlost, při které však ještě nedochází k zahazování odeslaných rámců.

Testování sestává z přenášení rámců při postupném zvyšování datové rychlosti, a to až do bodu, kdy je počet přijatých a odeslaných rámců rozdílný. Měření probíhá pro různé velikosti rámců a výstupem testu je grafická závislost rychlosti na délce odesílaných rámců.

2. **Zpoždění (Latency).** Pro jeho změření potřebujeme nejprve určit propustnost pro konkrétní délku a zařízení, poté můžeme nechat proudit tok dat o minimální délce 120 s. Po první minutě se do něj přidá sledovaný rámec a výsledné zpoždění určujeme na základě typu zařízení dle způsobu zpracování rámců:
  - (a) store-and-forward – načítá celý rámec a pak jej teprve odesílá. Zpoždění je pak definováno jako interval mezi odesláním posledního bitu rámce ze vstupního portu a příchodem prvního bitu na výstupní port.
  - (b) bit forwarding – rámce jsou okamžitě odesílány na výstupní port, zpoždění tohoto typu zařízení je popsáno jako časový rozdíl mezi odchodem prvního bitu vstupního rámce a příchodem prvního bitu na výstupu.
  - (c) cut-through – kompromis mezi (a) a (b), zařízení načte pouze hlavičku a hned přeposílá rámec na výstupní port. Zpožděním označujeme pak interval od odchodu posledního bitu hlavičky na vstupu do příchodu prvního bitu na výstup.Výsledkem měření je tabulka a také aritmetický průměr alespoň 20 měření pro každou délku rámce.
3. **Ztrátovost (Frame lost).** Test probíhá tak, že posíláme datový tok o určitém počtu rámců předem danou rychlostí do testovaného přístroje a porovnáváme počet přijatých a odeslaných rámců. Frame lost pak charakterizuje počet rámců, co nebyly odeslány z důvodu nedostatku prostředků a uvádíme jej v procentech. Zmíněný test provádíme pro maximální rychlost, kterou přenosový kanál dovoluje, a dále pro postupně snižující se rychlost (90 % maximální rychlosti, 80 %, atd . . . ), dokud nepotvrdíme dvěma testy, že nedošlo ke ztrátě žádného rámce. Test je možno provádět pro různé velikosti rámců a výsledkem by měla být grafická závislost ztrátovosti na užití datové rychlosti.
4. **Back-to-back rámce.** Vysíláme rámce pevné délky vyslané za sebou s minimálními rozestupy (nazýváme je jako back-to-back rámce) a hledáme počet rámců v nejdelším shluku, kde nedošlo ke ztrátě rámce. Test tedy provádíme pro zvyšující se počet rámců za sebou, vždy padesátkrát za sebou po dobu alespoň dvou sekund, dokud dosahujeme nulové ztrátovosti. Výslednou hodnotou je průměr z naměřených hodnot.
5. **Zotavení se po přetížení (System recovery).** Test probíhá formou zaslání toku rámců 110% rychlostí po dobu minimálně 60 sekund, a následného snížení rychlosti na polovinu. Hledáme časový rozdíl posledního ztraceného rámce a prvního přijatého rámce po změně rychlosti. Výstupem je tabulka, zahrnující délky rámců, propustnost a čas potřebný k zotavení.
6. **Zotavení se po restartu (Reboot recovery).** Čas nutný pro zotavení je testován tokem nejmenších možných rámců zasílaných datovou rychlostí určenou v testu propustnosti a následným restartem přístroje po dobu deseti

sekund. Výsledkem je interval mezi přijetím posledního rámce před a prvního rámce po restartu, nesmí do něj být však zahrnut čas potřebný pro obnovu směrovacích tabulek [25].

## 5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ SE ŠIROKOPÁSMOVÝMI MODEMY

V této kapitole jsou představeny samotné výsledky měření se širokopásmovými modemy, jejich zpracování a analýza.

### 5.1 Měření s modemy Linksys PLEK500

Měření probíhalo v několika směrech a vzdálenostech. Rychlost, která dle standardu představeného v příslušné části 1.4.2 může dosáhnout na aplikační vrstvě až 140 Mb/s, byla také omezena maximální rychlostí stahování od internetového providera, a sice 150 Mb/s, reálně však tento strop nelze garantovat a je tedy možné, že omezení od providera mělo vliv na možnou naměřenou rychlost.

Aplikační rychlost pro konkrétní vzdálenost a scénář byla změřena pomocí webového nástroje Speedtest.net od společnosti Ookla<sup>1</sup>, a to pokaždé 3–4×, a z těchto údajů byl následně vypočítán aritmetický průměr uvedený v tabulce výsledků.

V **prvním měření** byl jeden z PLC modemů připojen nataženým zhruba 10 metrovým UTP kabelem k routeru a 2. byl přepojován do různých elektrických zásuvek, oba se však pohybovaly v rámci jedné místnosti, a sice ve vzdálenostech 2,5 až 10,5 m s hodnotami přenosové rychlosti pro download začínající na 47 Mb/s a se vzdáleností klesající až na 29 Mb/s, detailnější rozpis viz příloha A.1. Výsledky tedy slouží jako praktické ověření hlavního problému širokopásmové PLC komunikace – poklesu datové rychlosti s rostoucí komunikační vzdáleností.

Ve **druhém měření** byl první modem připojen přímo krátkým 1 m kabelem k routeru a s druhým bylo manipulováno jako v předchozím bodě, modemy přenášely mezi chodbou a pokojem. Stejně schéma je pak opakováno i v následujících bodech měření. V tomto scénáři bylo dosaženo vzdáleností 6 a 13,5 m a datová rychlost downloadu odpovídala 57 Mb/s pro bližší zásuvku, 35 Mb/s pro vzdálenější. Podrobnější výsledky jsou uvedené v příloze A.2. Měření opět podpořilo závěr získaný prvním měřením.

**Třetí měření** bylo zaměřeno na pozorování vlivu rušení na přenos po elektrické síti. Rušení bylo simulováno přenosem po vedení, na jehož trase byla spuštěna pračka. Před zmíněným rušením byla naměřená rychlost downloadu pro stejnou trasu 38 Mb/s. Vliv na datovou rychlost měla až v době ždímání, kdy zintenzivnila odběr prostředků pro své mycí procesy a datová rychlost poklesla na zhruba 2 Mb/s. Výsledné srovnání je uvedeno v příloze A.3.

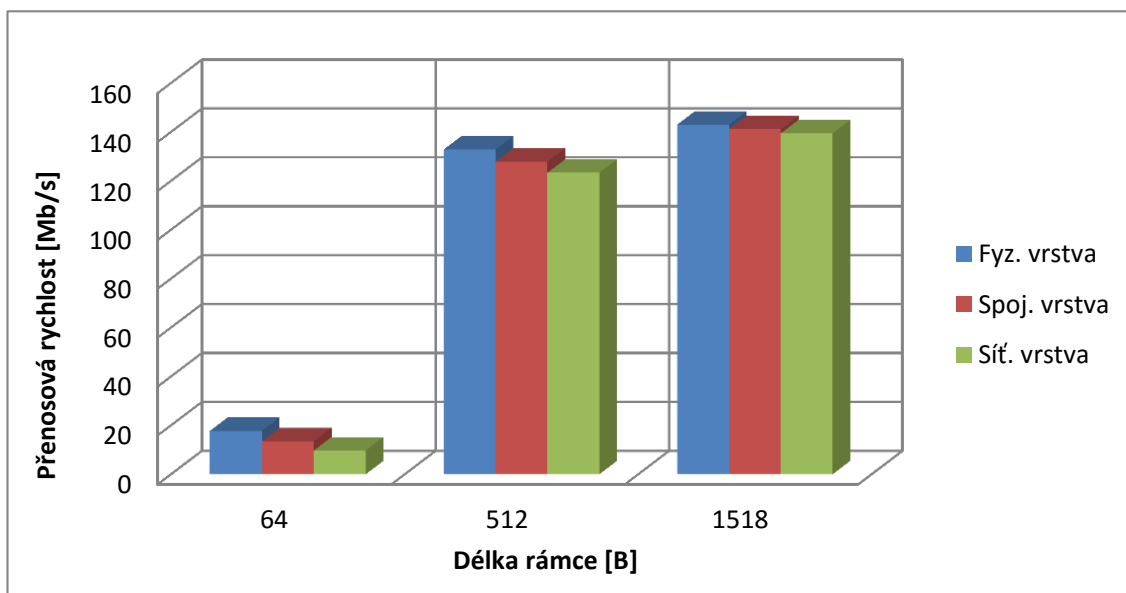
<sup>1</sup>Je dostupný z <http://www.speedtest.net/>.

Ve **čtvrtém měření** byl opakován postup z 2. měření, tentokrát pro jiný pokoj na vzdálenost 7, 12,5 a 16 m. Získané hodnoty ukázaly opět pokles přenosové rychlosti se zvyšující se vzdáleností, jmenovitě od 49 Mb/s přes 31 Mb/s až k 20 Mb/s, viz příloha A.4.

V **pátém měření** bylo následováno schéma z předchozího bodu pro pokoj z prvního měření. Na rozdíl od předcházejících výsledků v tomto případě vykazoval přenos na nejdelší vzdálenost (20,5 m) také nejvyšší přenosovou rychlost (32 Mb/s), na rozdíl od hodnot pro bližší přenos na 13 metrů a jemu odpovídající rychlost 28 Mb/s, což ovšem neodráží realitu běžného širokopásmového provozu. Tato odchylka mohla být způsobena špatným odhadem délky a trasy vedení či nepozorovaným a tudíž do analýzy nezahrnutým rušením. Výsledky jsou uvedeny v příloze A.5.

## 5.2 Měření s testerem NetBlazer

Druhá část praktické části sestává z měření pomocí testeru aktivních síťových prvků společnosti EXFO z řady NetBlazer v laboratoři VUT FEKT. Opět byly použity modemy Cisco Linksys PLEK500 stejně jako v první části 4.1. První z modemů byl zapojen přes UTP kabel k testeru, druhý taktéž přes UTP kabel ke smyčce (Ethernet loopback) ETS-1000L od společnosti EXFO, která přichází signál vyslaný z testeru, putující po vedení mezi modemy, posílá stejnou cestou nazpět. Tento obousměrný provoz je třeba mít na paměti při analýze výsledků. Pro měření propustnosti byla zvolena maximální rychlost 500 Mb/s dle specifikací modemů PLEK500, pro měření zpoždění byla určena metoda zpracování rámců cut-through.



Obr. 5.1: Výsledky měření na vzdálenost 30 m.



**V prvním bodě** měření je délka elektrického vedení, kterou musí datový tok urazit, 30 metrů. Pomocí testů RFC 2544 byla změřena propustnost pro datový tok o nejmenší, střední a maximální délce rámců, a to na první až třetí vrstvě ISO/OSI síťového modelu. Na obrázku č. 5.1 lze vidět výsledné srovnání naměřených hodnot, jejichž analýzou je možné konstatovat, že čím delší rámce posíláme, tím větší propustnost přenos vykazuje. Je to logické, poněvadž při kratších rámcích musí aktivní síťové prvky zpracovávat více rámců (a jejich hlaviček) na stejný objem dat. Naopak přímo úměrně s délkou rámce roste zpoždění viz tab. 5.1, objemnější rámce se přenášejí déle.

Dále lze z výsledků vypočítat úbytek propustnosti při vertikálním překladu dat mezi vrstvami. Na fyzické vrstvě je rychlost maximální a úpravou dat pro přenos

Tab. 5.1: Zpoždění v závislosti na délce rámce pro měření na vzdálenost 30 m.

Rámec [B]	Zpoždění [ms]
64	20,692
512	21,58
1518	62,937

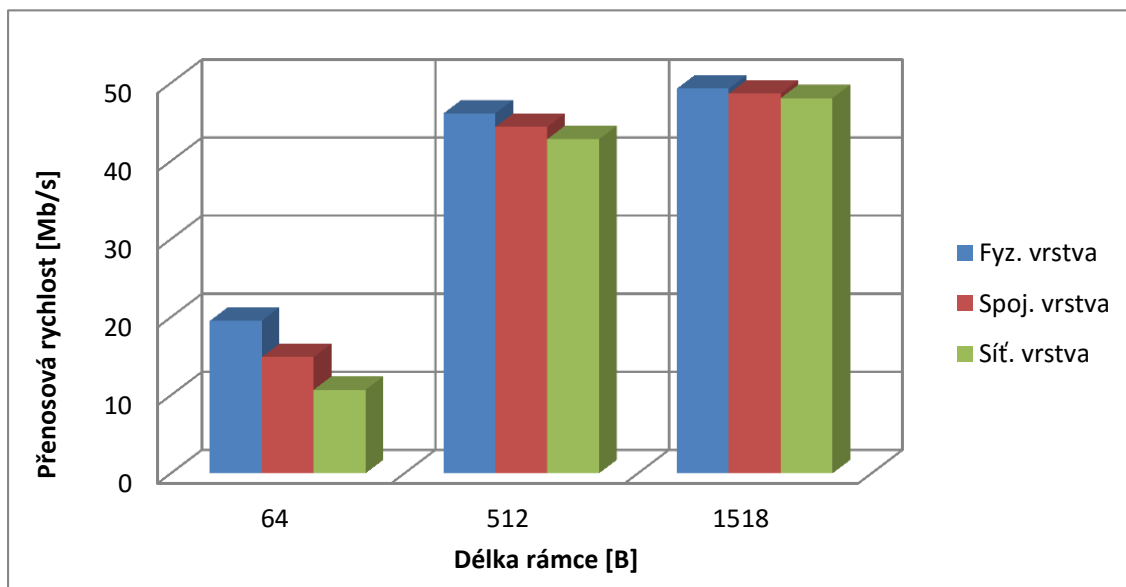
na vyšších vrstvách OSI/ISO modelu je pro každou vyšší vrstvu nižší. Data ve formě bitů na nejnižší úrovni pak strukturováním do rámce, včetně potřebné hlavičky a zápatí, lze takto přeložená použít pro komunikaci na vyšší, a sice linkové (neboli spojové) vrstvě, a obdobně pak funguje překlad do formy paketu pro přenos a případné směrování na vrstvě síťové. Na linkové vrstvě je tedy propustnost menší a na síťové vrstvě nejmenší. Ve srovnání s prvním měřením 4.1, kdy byla rychlost měřena na nejvyšší, aplikační vrstvě, je však propustnost i na 3. vrstvě několikanásobně větší.

Také nelze přehlédnout následek dříve zmíněného obousměrného provozu. Nejvyšší naměřená rychlost na fyzické vrstvě je necelých 143 Mb/s, přestože výrobce udává přenosovou rychlost až 500 Mb/s. Teoreticky by měl být kanál rozdělen na půl, a tak bychom dosahovali 250 Mb/s pro každý ze směrů, pracujeme-li ve smyčce, ale reálně není nikdy možné dosáhnout tohoto uspořádání na sdíleném médiu.

Tab. 5.2: Zpoždění v závislosti na délce rámce pro měření na vzdálenost 60 m.

Rámec [B]	Zpoždění [ms]
64	16,886
512	68,316
1518	148,648

**Ve druhém bodě** měření byla komunikační vzdálenost prodloužena na 60 metrů. Přenosová rychlost zdvojnásobením délky vedení poklesla z maxima v necelých



Obr. 5.2: Výsledky měření na vzdálenost 60 m.

140 Mb/s na maximální rychlost téměř 50 Mb/s, tj. skoro na třetinu předchozí hodnoty. Přehled výsledných hodnot přenosové rychlosti lze vidět na obr. 5.2. Zpoždění při přenosu na větší vzdálenost také narostlo, u středních rámců více než třikrát, u ostatních délek nebyl rozdíl tak markantní, viz tab. 5.2. Stejně jako v předchozím bodě pak lze pozorovat rostoucí rychlost a zpoždění v závislosti na délce rámce.

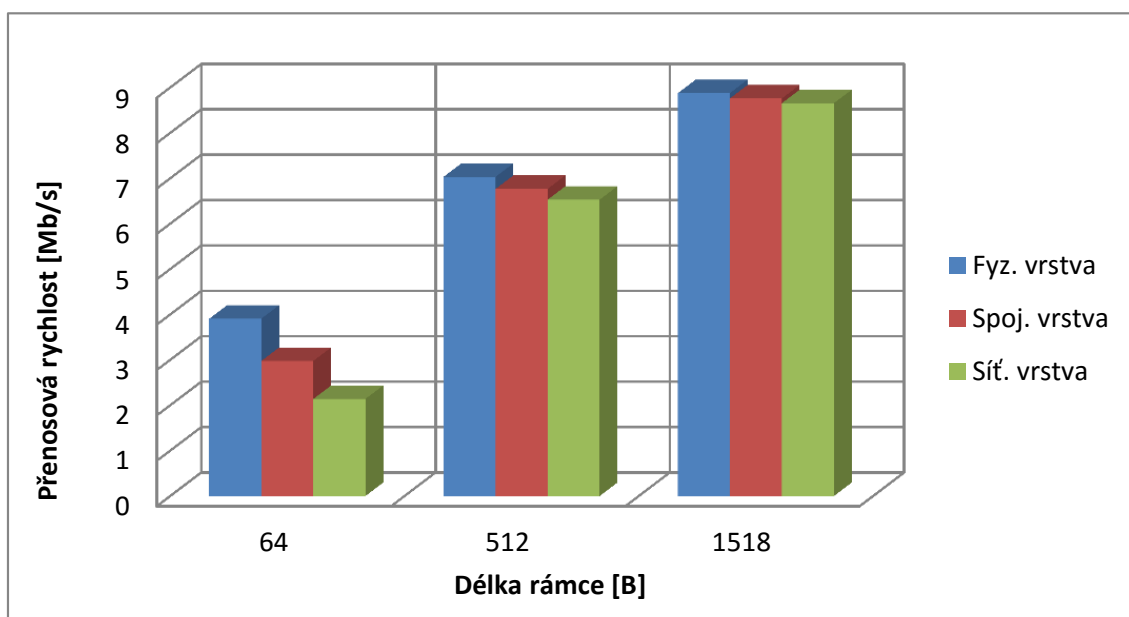
**Ve třetím bodě** měření byl jeden z modemů připojen do sběrnice zásuvek, která ale zřejmě spadá do jiné větve vedení nežli zásuvky v ostatních měřeních, a byl tedy příliš vzdálený, modemy se vůbec nespojily.

**Ve čtvrtém bodě** měření byl do měřené trasy z prvního bodu měření (30 m) zapojen zdroj rušení, působící v kmitočtovém rozsahu 1–50 MHz. Přenos je jím tedy ovlivněn ale ne zcela přerušen, standard HomePlug AV2 umožňuje působení v pásmu až do 86 MHz. Měření vlivu rušení bylo rozděleno na tři části, nejprve byl potenciometrem nastaven výkon zdroje rušení na 0%, poté na 50% a nakonec na 100%.

I při rušení ztlumeném na minimum klesla propustnost oproti původní maximální hodnotě 140 Mb/s na 45 Mb/s viz obr. A.1 v příloze, tedy více než na třetinu. Vliv zapojeného zdroje rušení se na zpoždění projevil výrazněji u delších rámců, pro nejkratší rámce vyšlo zpoždění srovnatelné se scénářem bez rušení, jak lze vyčíst v příloze z tabulky A.6.

V případě rušení nastaveného na 50% maximálního výkonu poklesla naměřená propustnost ještě výrazněji, a sice na hodnoty nepřesahující 30 Mb/s. Lze také pozorovat, že se rozdíly mezi propustnostmi v závislosti na délce rámce zmenšují s rostoucím rušením, jak jde vidět v příloze A.2, ovlivněny jsou jím nejvíce přenosy s nejdelšími rámci. Stejně tak zpoždění zaznamenává významný nárůst úměrně délce

rámců. Z původních 63 ms vzrostlo v nejzazším případě až na 262 ms, tedy zhruba čtyřikrát, detailnější přehled podává příloha A.7.



Obr. 5.3: Výsledky měření pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 100 %.

V posledním scénáři, kdy bylo rušení nastaveno naplno, je konečně docíleno významných změn v naměřené přenosové rychlosti pro všechny délky rámců. V případě přenosu nejdelších rámců poklesla hodnota více než patnáctkrát, na výsledných 9 Mb/s, nejkratších z původních maximálně 18 Mb/s na necelé 4 Mb/s. Naměřenou propustnost tohoto scénáře ilustruje obrázek 5.3. Zpoždění se však stále projevuje výraznou měrou jen při přenosu větších rámců, a to nárůstem skoro čtrnáctinásobným oproti přenosu před zapojením zdroje rušení, a to na hodnotu 860 ms.

Tab. 5.3: Zpoždění v závislosti na délce rámce pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 100 %.

Rámec [B]	Zpoždění [ms]
64	21,543
512	561,444
1518	860,265

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PLC KOMUNIKACE S VÍCE NOSNÝMI

Následující kapitola se zabývá měřením přenosu dat za použití úzkopásmových PLC modemů s více nosnými. Jsou zde představeny podmínky měření, použité přístroje a sestavené topologie.

### 6.1 Použité kity a technologie

Pro účely měření byl použit kit SAM4CP16C-EK od výrobce Atmel za využití dvou úzkopásmových standardů, G3-PLC a PRIME.

#### 6.1.1 SAM4CP16C-EK Kit

Kit obsahuje mikrokontroler s G3-PLC transceiverem, podporujícím kmitočtová pásma CENELEC-A, FCC i ARIB [26].

#### 6.1.2 Modulace

Standardy PRIME a G3 využívají, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.4, OFDM modulaci pro přenos více nosných, které jsou samotné nadto modulovány škálou digitálních modulací. K provedenému měření je třeba uvést přehled použitých modulací nosných kmitočtů pro daný standard za použití zdroje [27].

#### G3

- 8PSK – 8-state phase-shifting keying – nejrychlejší z PSK modulací, může přenést oproti ostatním modulacím nejvíce dat na nosnou. Je ale také nejchytovější.
- QPSK – quadrature phase-shifting keying – rychlá modulace, pomalejší a méně chybová než předchozí.
- BPSK – binary phase-shifting keying – binární modulace, umožňující relativně nízkou chybovost a menší rychlost než 8PSK a QPSK modulace.
- ROBO – robustní mód s velice precizním FEC mechanismem, má nejnížší chybovost, ale také nejnížší přenosovou rychlost.

#### PRIME

- 8PSK, QPSK, BPSK – stejně jako u G3 v předchozí podkapitole.
- RQPSK – robustnější obdoba QPSK modulace.

- RBPSK – robustnější obdoba modulace BPSK.

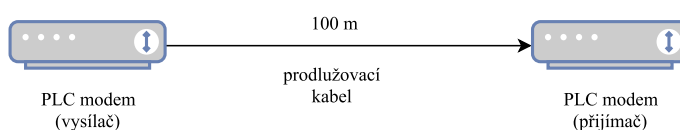
## 6.2 Topologie a nastavení měření

### 6.2.1 Topologie

Měření pomocí již představeného kitu SAM4CP16C-EK proběhlo v případě standardu G3-PLC i PRIME pro tři předem definované topologie.

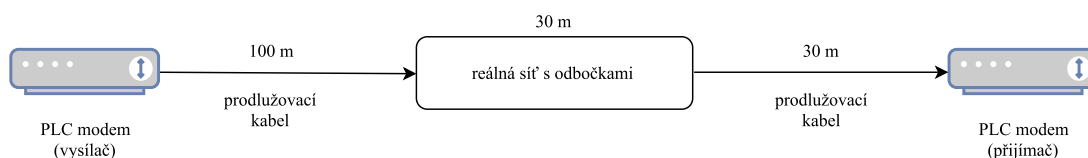
První topologie, viz obr. 6.1, dále označovaná jako „přímá“, reprezentuje příznivé podmínky pro přenos, signál je tu veden pouze prodlužovacím kabelem odděleným od reálné sítě, bez rušení a bez odboček. Očekáváme proto výsledky, které můžeme považovat za ideální pro danou technologii a použitý PLC standard.

Měření proběhlo pro dvě verze této topologie, v první, označované jako 1A, není trasa prodlužovacích kabelů zapojena do elektrické sítě a přenos tedy probíhá v médiu bez proudu. Ve variantě 1B je trasa zapojena do elektrické sítě a přenos se šíří běžně, odesílaný signál je modulován na signál procházející vedením o jenovitém napětí 230 V a frekvenci 50 Hz. Scénář 1A jsme si zvolili jako referenční při srovnání s dalšími topologiemi (2. a 3. scénářem).



Obr. 6.1: Schéma topologie č. 1.

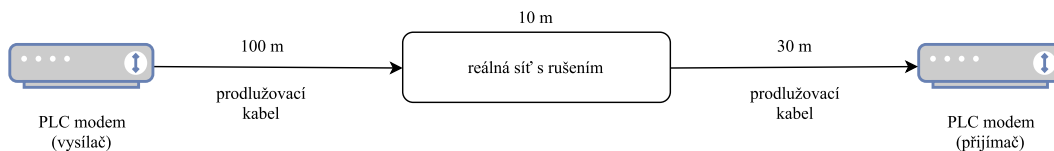
Druhá topologie, znázorněna na obrázku 6.2, dále označovaná jako „s odbočkami“, sestává z prodlužovacích kabelů celkové délky 130 m a 30 metrů reálné sítě. Těchto třicet metrů bylo získáno zapojením zásuvek v laboratoři a na konci chodby, mezi nimiž přenos probíhal. V cestě reálnou sítí bylo několik odboček, které zhoršovaly schůdnost přenosového kanálu, takže tato topologie lépe reprezentuje přenos v běžném provozu, což by měly výsledky potvrdit.



Obr. 6.2: Schéma topologie č. 2.

V poslední, třetí, topologii, dále označované jako „s rušením“, je veden signál přes 130 m prodlužovacích kabelů a 10 metrů reálné sítě s rušením, viz obrázek 6.3.

Intenzivní rušení bylo zajištěno zapojeným rackem s několika aktivními zařízeními v cestě přenosu, a výrazně zhoršilo podmínky PLC komunikace. Lze proto očekávat vysoce neúspěšné či chybové přenosy z důvodu snížené kvality přenosového kanálu.



Obr. 6.3: Schéma topologie č. 3.

### 6.2.2 Nastavení měření

Samotné měření probíhalo pro představené kity, technologie (6.1) a topologie (6.2.1). Použitý software je pro tento účel **PHY Tester tool** taktéž od firmy Atmel, který je kompatibilní s firmwarem kitů. Kity byly propojeny USB rozhraním s notebookem s tímto softwarem, pomocí kterého byly nastavovány parametry měření.

Nastavení sestávalo ze dvou částí – úprava parametrů vysílače a přijímače. Přijímač byl nastaven na výchozí hodnotu časového intervalu mezi přijímanými rámci 100 ms a počtu odesílaných zpráv na celkově 500.

Vysílač zahrnoval více možností nastavení. Nejprve bylo třeba nastavit modulaci, která bude při přenosu použita, vybrat modulační metodu diferenciální či koherentní, a dále zde bylo při využití standardu G3-PLC také nastavení impedance a útlumu. Opět byla určena pro obě technologie jako výchozí hodnota pro vysílání 500 rámců s odstupem 100 ms a metoda diferenciální.

Nastavené výchozí hodnoty byly cíleně měněny v určených bodech měření pro vyhodnocení vlivu na sledované parametry měření.

# 7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PLC KOMUNIKACE S VÍCE NOSNÝMI

## 7.1 Měřené parametry

Před samotným shrnutím a vyhodnocením získaných dat budou objasněny klíčové parametry, měřené či nastavované kity SAM4CP16C-EK od firmy Atmel. Jedná se o tyto parametry:

- RSSI – indikátor síly přijatého signálu v dBuV [26].
- LQI – indikátor průměrného SNR <sup>1</sup> na nosnou frekvenci, výrobcem udávaný v decibelech [26].
- EVM – velikost odchylky vektoru pro OFDM modulaci. Udává chybu vektoru signálu, neboli rozdíl mezi naměřeným a ideálním vektorem [28].
- Přizpůsobení impedance – v textu dále označované zkratkou IMP. Použitý kit SAM4CP16C-EK má dvě možnosti přizpůsobení, jedna je optimalizovaná pro velkou impedanci vedení (High Z), druhá malou (Very Low Z). Výchozí nastavení kitu je automatické přizpůsobení (Auto Z), které v materiálech není přesněji definováno [26].
- Rx – počet doručených zpráv, dále uváděn v procentech ku celkovému počtu odeslaných zpráv [26].
- Rx OK – počet zpráv doručených s nepoškozeným obsahem, tj. správně doručených, dále taktéž uváděn v procentech ku celkovému počtu odeslaných zpráv [26].
- Efektivní rychlost – přenosová kapacita užitečných (aplikačních) dat. Je získána výpočtem z fyzické rychlosti (Raw baudrate), od níž jsou odečtena režijní data [29].
- Fyzická rychlost – v materiálech označovaná jako Raw baudrate, jedná se o přenosovou rychlost měřenou na fyzické vrstvě [26].

## 7.2 Získané hodnoty

Měření bylo provedeno nejprve pro standard G3-PLC, a poté pro stejné základní nastavení a topologie podruhé se standardem PRIME. Získané údaje ze tří měření pro každý sledovaný případ byly zprůměrovány a sledované hodnoty vyneseny do tabulek, uvedených v příloze v části A.3.1 (pro standard G3-PLC) a A.3.2 (za použití technologie PRIME).

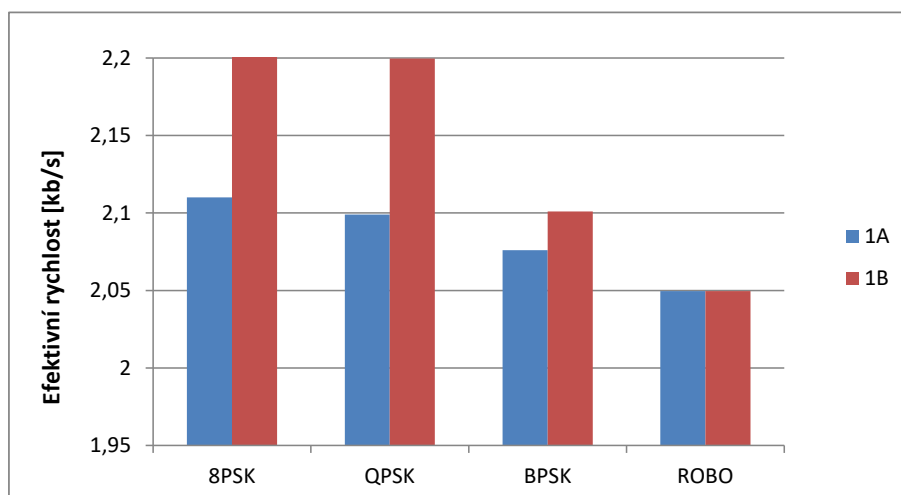
---

<sup>1</sup>signal-to-noise ratio, česky odstup signálu od šumu

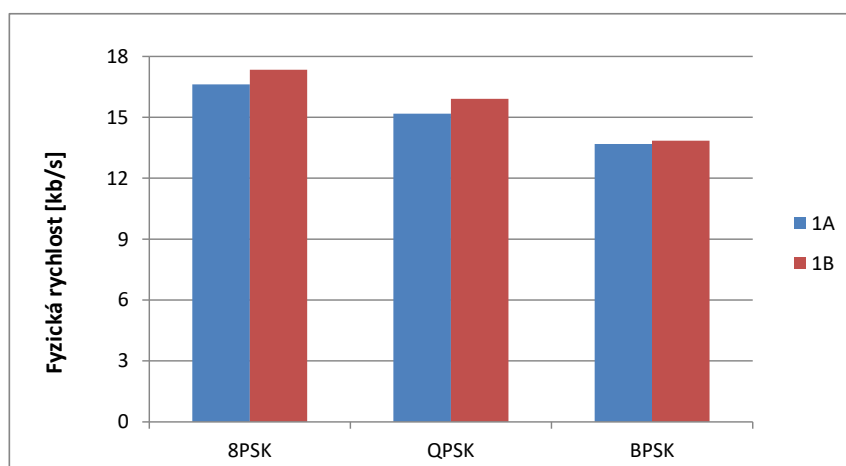
## 7.2.1 G3-PLC

### Přímá topologie

Výsledky měření této topologie odpovídají ideálním podmínkám. Úspěšnost doručení zpráv i správnost získaných dat (obsahu zpráv) dosahovala s minimální odchylkou 100%. V ideálních podmínkách tedy nezáleží na zvolené modulaci, jak lze vidět na obrázku č. 7.4, který uvádí správnost doručených dat dle užití modulační topologie.



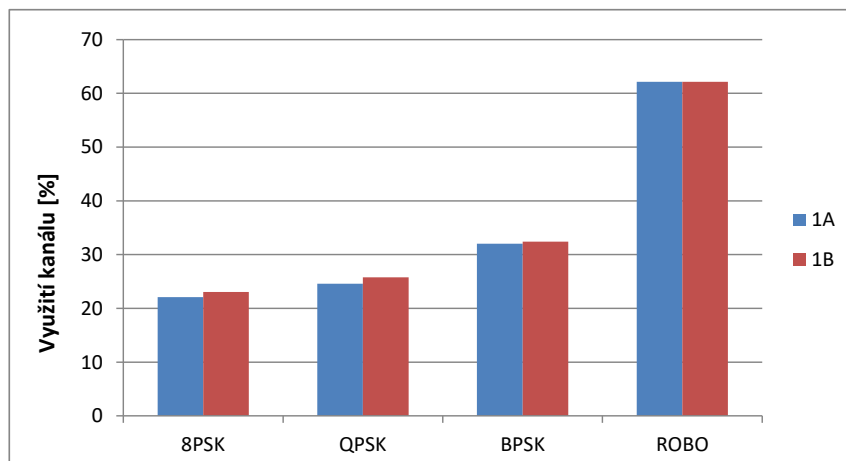
Obr. 7.1: Srovnání naměřené efektivní rychlosti pro scénář 1A a 1B.



Obr. 7.2: Srovnání naměřené fyzické rychlosti pro scénář 1A a 1B.

Je třeba také zmínit patrný rozdíl mezi výsledky ze scénáře 1A a 1B, tedy zda trasa byla zapojena do elektrické sítě či nikoliv. Jak lze vidět na obrázcích 7.1, 7.2 a 7.3, scénář s komunikačním kanálem pod napětím vykazoval rychlejší přenos, ale





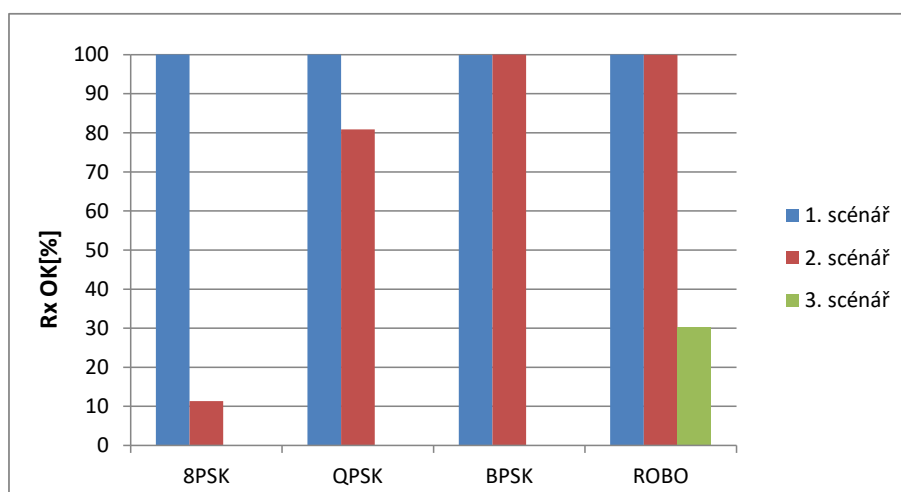
Obr. 7.3: Srovnání naměřeného využití kanálu pro scénář 1A a 1B.

také větší využití kanálu. Tedy v podmínkách se zanedbatelným rušením fungovala PLC komunikace s použitou technologií a kity i bez proudu.

### Topologie s odbočkami

Scénář měl představovat situaci běžného provozu, a výsledky měření s výchozími hodnotami této domněnce odpovídají. Jak lze vyčíst z obrázku č. 7.4, úspěšnost správně doručených zpráv záleží na typu užití modulace. Obdobně v tabulce A.10, zahrnuté v příloze, je patrné, že vícestavová modulace 8PSK je zároveň nejchybovější, a to jak v doručení zpráv, tak ve správnosti jejich obsahu.

Tato topologie byla zároveň zvolena jako výchozí pro měření vlivu nastavova-

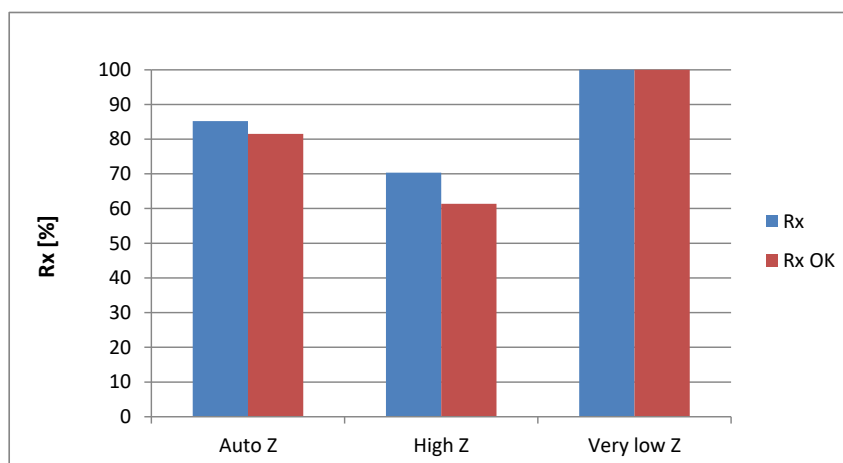


Obr. 7.4: Grafické znázornění správnosti doručených dat pro jednotlivé topologie dle užití modulace.

ných parametrů. Nejprve byly zdvojnásobeny intervaly posílání a přijímání zpráv, tedy ze 100 ms na 200 ms. Měření ukázalo, že parametr nemá prokazatelný vliv na úspěšnost či správnost dat, ale jen na rychlost a využití kanálu, viz tabulka A.11 v příloze. Zpomalení odesílání a přijímání zpráv způsobilo pokles v rychlosti i ve využití komunikačního kanálu, a to přibližně o 48 %.

Následně byly tytéž intervaly zkráceny na polovinu původní doby, tj. na 50 ms. Jak lze vidět v tabulce A.13, zrychlení odesílání a přijímání zpráv mělo za následek vyšší využití kanálu i přenosovou rychlost cca o 15 %.

Další z parametrů, jejichž vliv jsme testovali, bylo nastavení IMP. Měření ukázalo, že nastavení impedančního přizpůsobení mělo vliv pouze na úspěšnost doručení a správnost dat. Graf srovnávající jejich hodnoty naměřené za použití modulace QPSK pro automatickou impedanci, použitou jako výchozí nastavení, vysokou impedanci a velmi nízkou impedanci je na obr. 7.5. Z grafu je patrné, že správnost dat



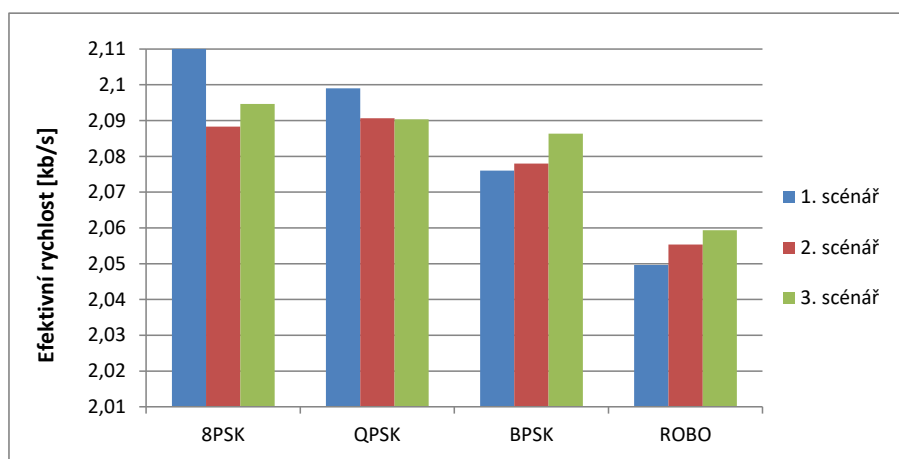
Obr. 7.5: Grafické znázornění správnosti doručení dat pro různá nastavení impedance.

pro danou modulaci a scénář se pohybovala pro automatické nastavení okolo 80 %, zvýšení impedančního přizpůsobení zapříčinilo pokles na 60 %, a naopak snížení impedančního přizpůsobení na velmi nízkou hodnotu zvýšilo úspěch správně doručení dat na 100 %. Lze tedy usoudit, že má impedanční přizpůsobení podstatný vliv na úspěch přenosu.

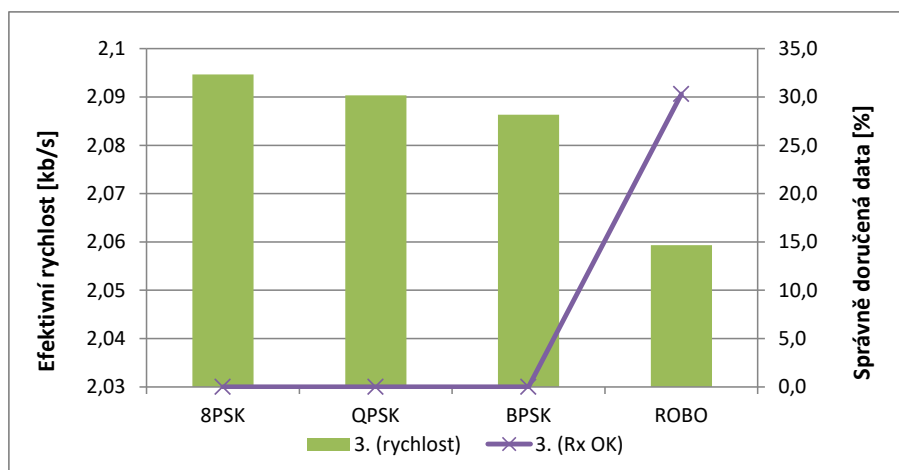
### Topologie s rušením

Scénář má simulovat situaci, kdy přenos probíhá s velkým rušením. Získané výsledky tento předpoklad potvrzují; jak lze vyčíst z tabulky A.15, úspěšnost dat je pro běžné modulace nulová, pouze v případě využití robustní modulace dosahuje správnost dat alespoň 30 %.

Naopak z hlediska přenosové rychlosti k žádnému poklesu minimálně oproti druhému scénáři nedochází. V případě efektivní rychlosti je pro BPSK a robustní modulaci dokonce rychlost vyšší než v ostatních scénářích viz obr. 7.6. Uvedení těchto souvislostí do vizuální podoby je demonstrováno na obrázku 7.7. V případě přenosové rychlosti na fyzické vrstvě jsou data srovnatelná pro všechny tři scénáře viz obr. 7.8.



Obr. 7.6: Grafické znázornění efektivní rychlosti pro jednotlivé topologie dle užití modulace.



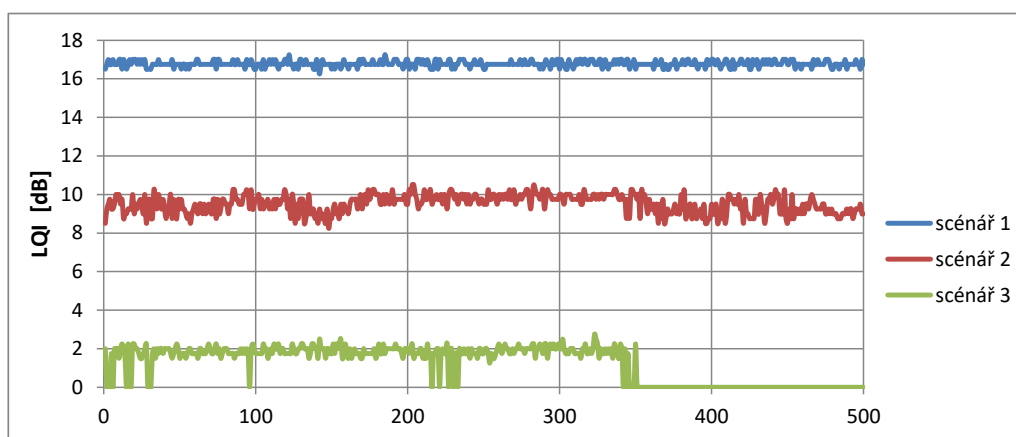
Obr. 7.7: Grafické znázornění efektivní rychlosti srovnané s úspěšností správně doručených dat ve 3. scénáři (s rušením).

Uskutečněné scénáře jsme následně srovnali z hlediska parametrů předdefinovaných v kapitole 7.1. Jak lze vidět na obr. 7.9, kvalita linky se výrazně lišila pro různé podmínky přenosu.



Obr. 7.8: Grafické znázornění fyzické rychlosti pro jednotlivé topologie dle užití modulační metody.

Pro ideální situaci je také LQI, neboli průměrný odstup signálu od šumu, ve vysokých hodnotách, tzn. přenos je velmi kvalitní. Ve třetím scénáři, který simuluje největší rušení přenosu, vidíme cca od 350. zprávy, že už přijímač další zprávy nezachytil, LQI je proto nulový. Důvod tkví v definici intervalu mezi posílanými/přijímanými pakety. Zde byl nastavený v hodnotě 100 ms, znamená to ale, že přijímač čeká maximálně dvojnásob nastavené doby (tj. v tomto případě 200 ms), jestli zprávu nezachytí. Jelikož je přenos silně rušen, přijímač nebyl schopen zachytit každou zprávu, a tedy se zdržel čekáním natolik, že přesáhl dobu, kdy ještě vysílač data vysílal. Logicky pak už žádnou zprávu zachytit nemohl, protože vysílání ustalo. Číselné pořadí zachycených paketů v třetím scénáři tedy neodpovídá pořadí vysílaných paketů.



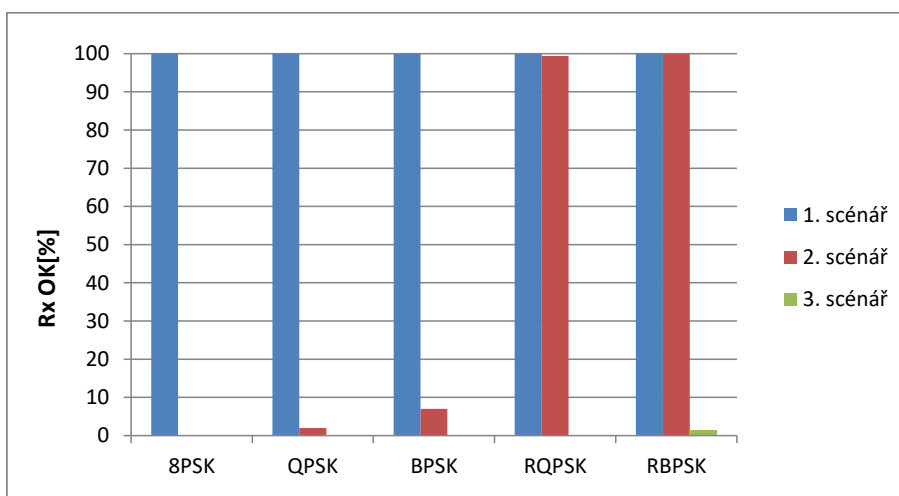
Obr. 7.9: Grafické znázornění indikátoru kvality linky pro jednotlivé pakety ve všech třech scénářích (modulace ROBO).

## 7.2.2 PRIME

Měření proběhlo se stejně definovanými scénáři a topologiemi, tentokrát za použití standardu PRIME.

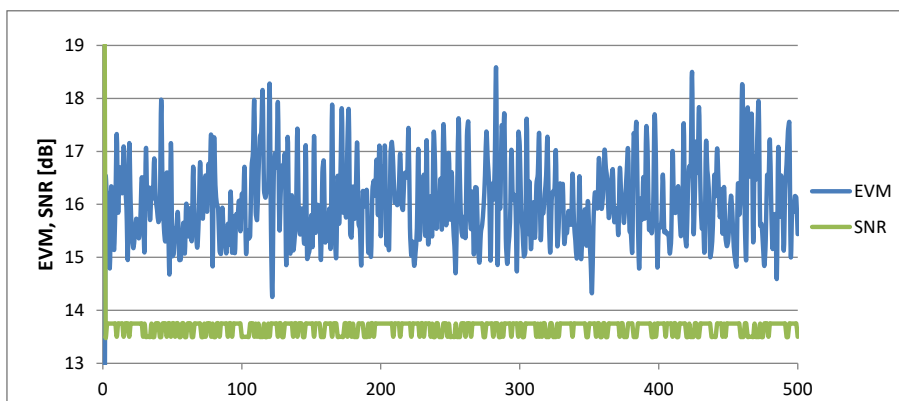
### Přímá topologie

První topologie opět potvrdila ideální podmínky z hlediska úspěšnosti doručení bezchybných dat, jak lze vidět na obr. 7.10. Ve scénáři 1A i 1B byla úspěšnost i správnost pro všechny modulační 100 %.

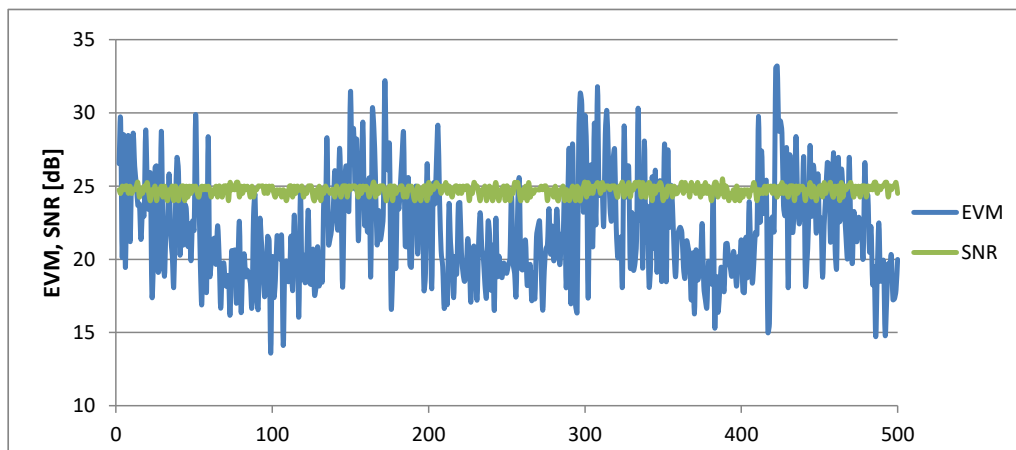


Obr. 7.10: Grafické znázornění správnosti doručených dat pro jednotlivé topologie dle užití modulační.

Srovnání scénářů 1A a 1B je představeno také dle dalších parametrů. Vzájemně se lišily také v EVM a SNR, jak lze vyčíst z obrázků 7.11 a 7.12. Opět je zde vidět, že



Obr. 7.11: Grafické znázornění odstupe signálu od šumu a velikosti odchylky vektoru pro jednotlivé pakety ve scénáři 1A.

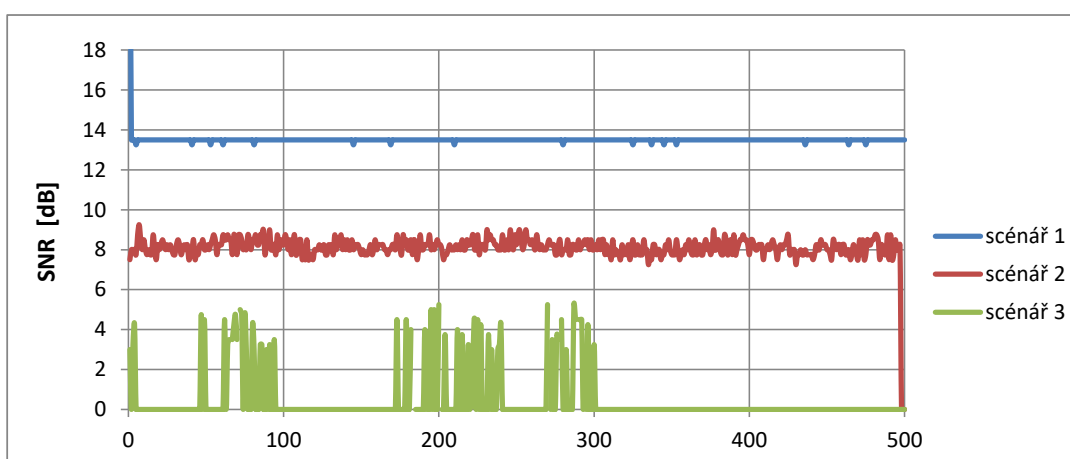


Obr. 7.12: Grafické znázornění odstupu signálu od šumu a velikosti odchylky vektoru pro jednotlivé pakety ve scénáři 1B.

je kvalitnější přenos v případě probíhajícího elektrického proudu; odstup od šumu je v případě scénáře 1A necelých 15 dB, v případě 1B okolo 25 dB. Zároveň však odchylka vektoru vykazuje menší rozpětí hodnot a nepřesahuje 19 dB ve scénáři bez proudu. Naopak ve scénáři, kdy je trasa zapojená do elektrické sítě, osciluje hodnota mezi cca 14 dB a 32 dB. Může to být způsobeno fázovým šumem, který je zesílený signálem procházejícím elektrickým vedením [28].

### Topologie s odbočkami

Scénář odpovídal běžnému provozu, odstup signálu od šumu naměřený pro RQPSK modulaci srovnávaný pro všechny tři scénáře je uveden na obr.7.13. Ukazuje, že

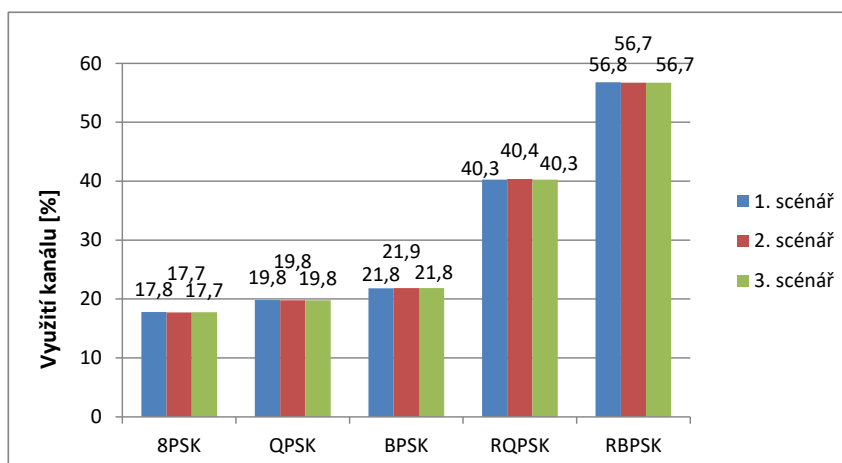


Obr. 7.13: Grafické znázornění indikátoru kvality linky pro jednotlivé pakety ve všech třech scénářích.

podmínky přenosu jsou z hlediska SNR téměř o polovinu horší než v případě prvního scénáře. Z tabulky A.18 lze také vyčíst, že ač je doručeno téměř 100 % dat, pro běžné (nerobustní) modulace nebylo přijato ani 10 % nepoškozených dat.

### Topologie s rušením

Třetí topologie vykazovala dle očekávání nejhorší výsledky, ať už z hlediska úspěšnosti a správnosti dat, úspěšně a bezchybně doručeno bylo (a to v případě robustních modulací) nanejvýš necelá 2 % dat, viz tab. A.19, tak i naměřeného odstupu signálu od šumu. SNR nedosáhl ani 6 dB a většina hodnot je nulová. Jak je tedy zřejmé, přenos byl velice nekvalitní, což ovšem odpovídá komunikaci za podmínek se silným rušením. Ačkoliv byla data prakticky nepoužitelná, jejich přenos vytěžoval linku do stejné míry jako v ostatních scénářích, viz obr. 7.14.



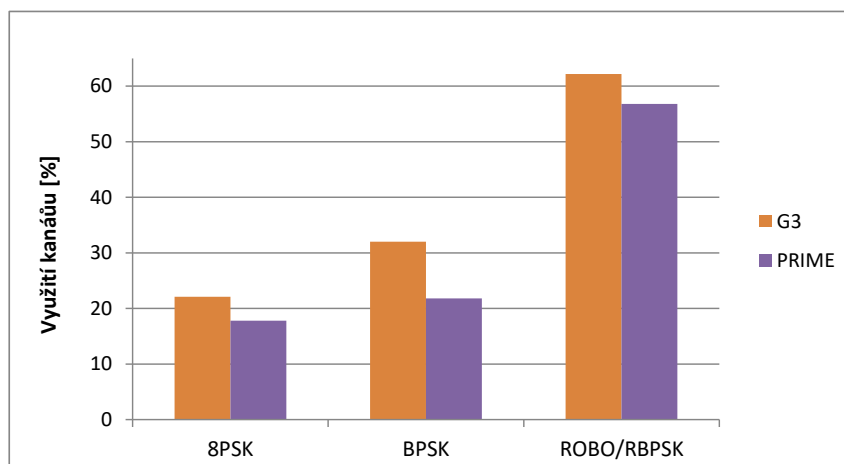
Obr. 7.14: Grafické znázornění naměřeného využití kanálu pro jednotlivé topologie dle užití modulace.

Pro úplnost jsou v příloze také uvedené grafy srovnávající rychlost efektivní (A.3) a fyzickou (A.4) dle modulace.

### 7.2.3 Srovnání výsledků G3-PLC a PRIME

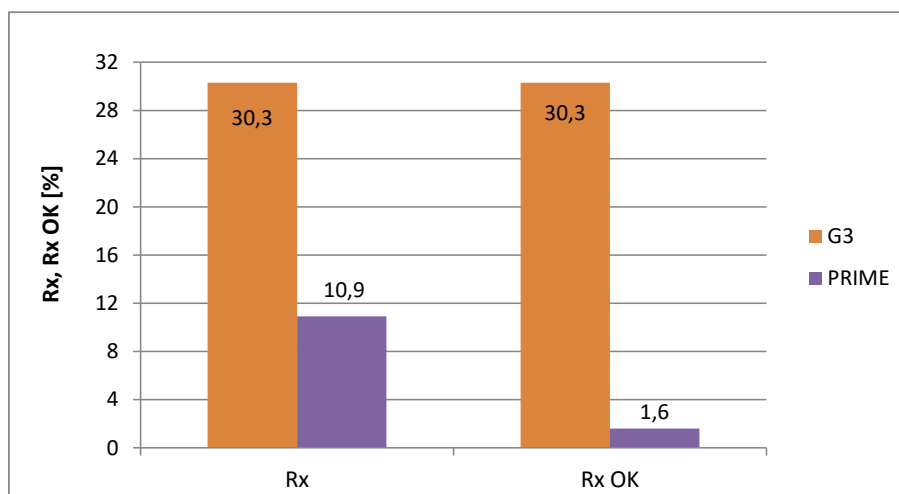
Po představení detailních výsledků samostatně pro oba standardy je třeba jejich dosažené vypovídající hodnoty srovnat.

První hledisko je využití komunikačního kanálu (pro účel srovnání byl zvolen scénář 1A), viz obrázek 7.15. Je z něj patrné, že standard G3-PLC vytěžuje linku více, a to i v případě robustních modulací, tj. v případě G3 modulace ROBO a v případě PRIME modulace RBPSK.



Obr. 7.15: Srovnání naměřeného využití kanálu pro standardy G3 a PRIME.

Druhý parametr, jímž lze poměřit oba standardy, je úspěšnost doručení zpráv a úspěšnost doručení bezchybných dat. Byl vybrán scénář č. 3 s ohledem na účel srovnání, a sice použitelnosti standardů ve výrazně rušeném prostředí. Jak lze vyčíst z obrázku 7.16, pro standard G3 byla naměřena maximální hodnota 30,3 % (nejlepší výsledek byl při modulaci ROBO), a to pro oba parametry (Rx i Rx OK). Necelá třetina zpráv tedy byla doručena v pořádku. Oproti tomu v případě PRIME došlo maximálně jen necelých 11 % (RQBPSK), a jen 1,6 % dat (RBPSK) bylo bez chyby. Z výsledků vyplývá, že je tedy mnohem vhodnější použít v případě demonstrovaného rušení standard G3, pokud chceme především co největší úspěšnost doručení správných dat.



Obr. 7.16: Srovnání maximální úspěšnosti doručení a bezchybnost zpráv pro standardy G3 a PRIME (robustní modulace ROBO, RQBPSK a RBPSK).



Další hlediska jsou síla signálu a velikost odchylky vektoru. Pro jejich srovnání byl vybrán scénář 1A, kde přenos nebyl ovlivněn ztrátou paketů z důvodu rušení, za modulace 8PSK. Síla signálu (indikátor RSSI) dosahovala pro standard PRIME průměrné hodnoty 122 dBuV a velikost odchylky vektoru (EVM) průměrně 16 dB. V případě standardu G3 byl RSSI průměrně 116 dBuV a EVM 24 dB, tedy proběhl kvalitativně horší přenos než za použití standardu PRIME ve stejných (příznivých) podmínkách.

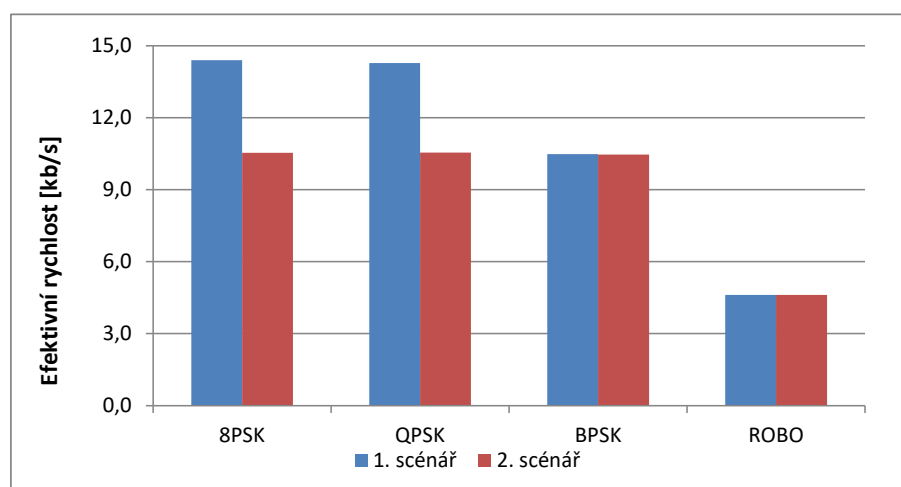
## 7.2.4 Měření maximálních rychlostí

V posledním měření jsme si kladli za cíl dosáhnout maximální možné přenosové rychlosti pro dané kity měřením dvou z definovaných topologií v části 6.2.1, jmenovitě topologie označené jako 1B (přímá topologie zapojená v síti) a č. 2 (topologie s odbočkami).

Na základě úvahy a zvážení předchozích výsledků jsme vybrali jako hlavní parametry, které ovlivňují rychlost vzdálenost, rozestupy posílaných zpráv a délku zpráv. Vlastní měření však ukázalo, že snížení rozestupů je efektivní jen v případě menších zpráv, při dosažení maximální délky zpráv nemělo žádný měřitelný vliv.

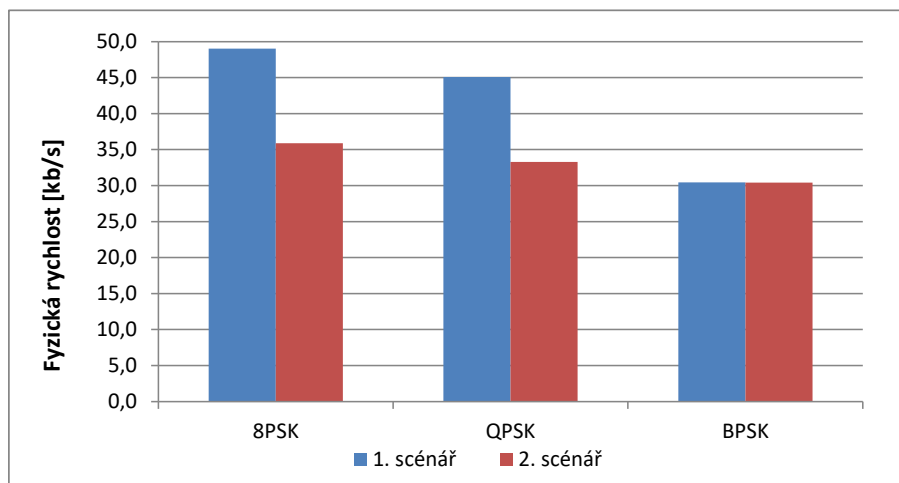
### G3-PLC

Původní zpráva v případě měření za použití standardu G3 obsahovala 25 znaků, maximální zpráva čítala pětinasobek. Markantní vliv na rychlost je pak zřetelně vidět na obrázku 7.17, který srovnává maximální dosažené efektivní rychlosti pro topologii přímou a s odbočkami. Z původních cca 2 kb/s stoupla díky zvětšenému objemu zprávy efektivní rychlost až na necelých 15 kb/s. Stejným způsobem lze



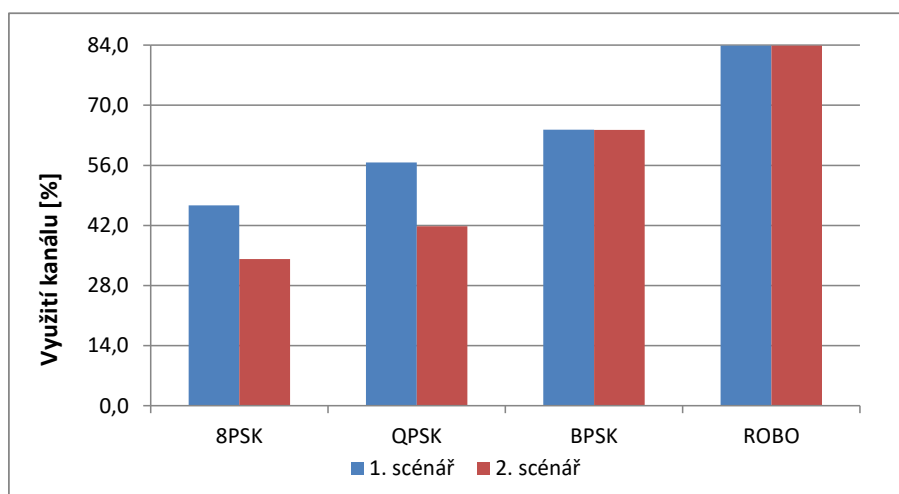
Obr. 7.17: Srovnání naměřené maximální efektivní rychlosti pro 1. a 2. scénář.

pozorovat tento vliv na fyzickou rychlost, viz obr. 7.18. Z původních až 17 kb/s měla pětikrát delší zpráva za následek nárůst fyzické přenosové rychlosti až na necelých 50 kb/s.



Obr. 7.18: Srovnání naměřené maximální fyzické rychlosti pro 1. a 2. scénář.

Další změnou ve vlastnostech přenosu je zvýšení využití přenosového kanálu, jak lze vidět na obrázku 7.19. V měření s původními parametry bylo dosaženo hodnoty až 62 %, prodloužení zprávy pak zapříčinilo nárůst až na 84 %.



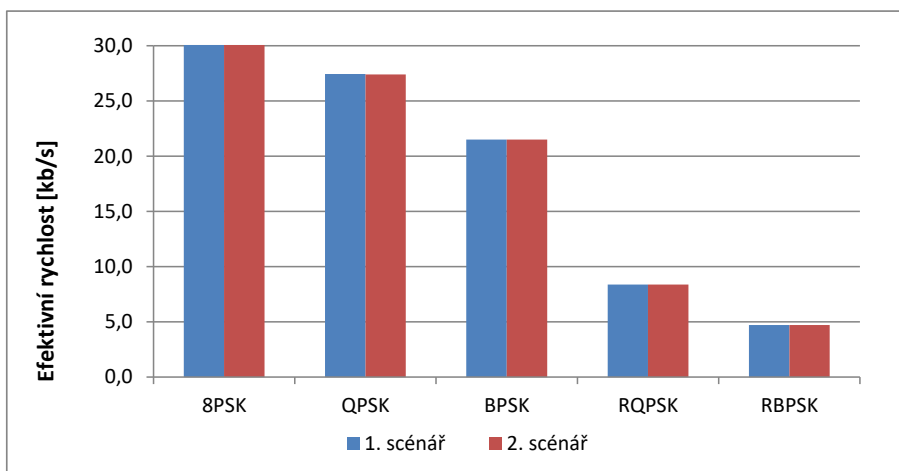
Obr. 7.19: Srovnání naměřeného maximálního využití kanálu pro 1. a 2. scénář.

Ze všech výše zmíněných parametrů jsme tedy usoudili, že zvětšený objem zprávy umožnil efektivnější přenos, jak z hlediska rychlosti přenosu dat, tak také využití daného komunikačního kanálu pro přenos.

## PRIME

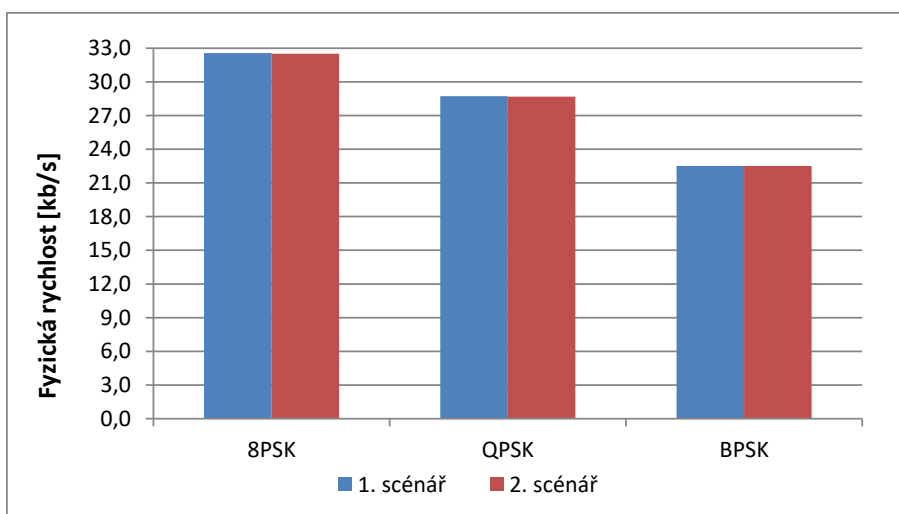
Testováním maximální délky zprávy byla odhalena hodnota 277 bytů. Srovnáním této délky s původním textem čítajícím 28 bytů nám vychází téměř desetinásobně delší zpráva, jejíž vliv jsme následně proměřili.

Za původních parametrů jsme dosáhli efektivní rychlosti nepřesahující 2,1 kb/s, v případě desetinásobné délky zprávy jsme naměřili maximálně 30,2 kb/s, jak je zobrazeno v grafu na obr. 7.20. Také fyzická rychlost dosáhla nárůstu oproti původ-



Obr. 7.20: Srovnání naměřené maximální efektivní rychlosti pro 1. a 2. scénář.

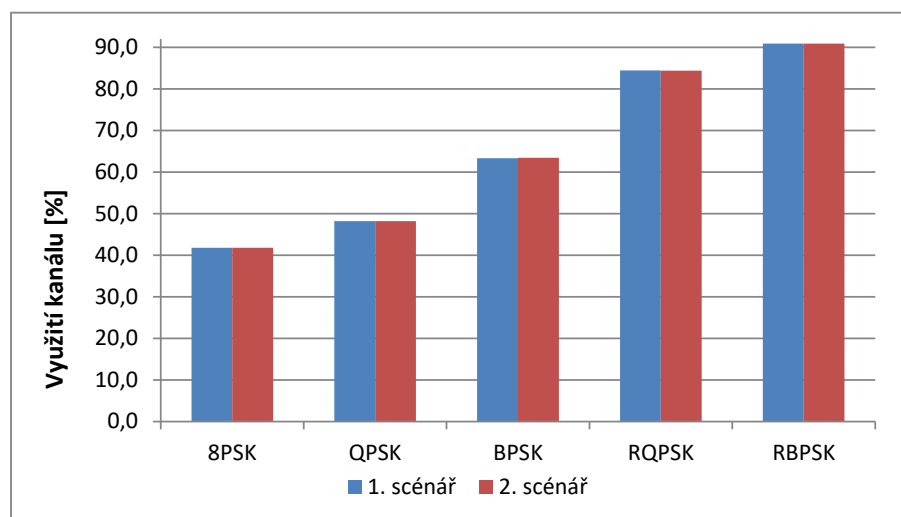
ním až 4,3 kb/s na maximálních necelých 33 kb/s, jak je možné vyčíst z obrázku 7.21. Při bližším zkoumání obou grafů srovnávajících přenosové rychlosti v případě standardu PRIME si lze povšimnout, že rozdíl mezi fyzickou a efektivní rychlostí je



Obr. 7.21: Srovnání naměřené maximální fyzické rychlosti pro 1. a 2. scénář.

oproti výsledkům standardu G3 minimální. Z definice efektivní rychlosti, uvedené v kapitole 7.1, je možno usoudit, že přenos za standardu PRIME vyžaduje menší režii (v provozu figuruje menší objem režijních dat).

Zatímco využití přenosového kanálu v měření s původními parametry nedosáhlo i pro nejrobustnější modulaci 57 %, znásobení délky zprávy mělo za následek nárůst využití kanálu až na maximální hodnotu 90,9 %, tedy reálně téměř plné využití.



Obr. 7.22: Srovnání naměřeného maximálního využití kanálu pro 1. a 2. scénář.

### 7.3 Srovnání vlastních výsledků s dostupnou literaturou

Získané závěry byly následně konfrontovány s dalšími měřeními, popsány v odborných publikacích.

#### Narrowband Power Line Communication for Smart Metering and Street Lighting Control

Naměřené hodnoty ve srovnání s článkem *Narrowband Power Line Communication for Smart Metering and Street Lighting Control* [30] jsou uvedené v tabulce 7.1 a 7.2. V citovaném článku autoři testovali komunikaci na dlouhou vzdálenost (tj. 133–210 m) mezi 2 modemy (C2000 Power Line Modem Developer’s Kits od Texas Instruments, viz 3.2.2) bez odboček, což by měla být podobná varianta jako náš scénář 1B, ve kterém byly bez odboček spojeny 2 modemy (viz 6.1.1) na vzdálenost 100 m.

Pro srovnání rychlostí naměřených na různých vrstvách síťové architektury jsme vycházeli z téhož článku, ve kterém je uvedeno také, že fyzická rychlost je zhruba

Tab. 7.1: PRIME – srovnání vlastních výsledků se článkem [30]

PRIME	Fyzická rychlost (změřená) [b/s]	Aplikační rychlost [b/s]
8PSK	32550	6178
QPSK	28715	5805
BPSK	22501	4970

8–10krát větší [30]. Toto rozmezí platí v případě námi naměřených rychlostí se standardem G3, hodnoty nám vyšly převážně devětkrát vyšší, dá se z toho tedy usoudit, že jsou hodnoty naměřené fyzické rychlosti a aplikační rychlosti pocházející z článku řádově srovnatelné. Oproti tomu námi získané výsledky měření se standardem PRIME jsou pouze 4–5krát větší, zřejmě jsme tedy naměřili na podobné topologii menší přenosovou rychlost, než autoři citovaného článku.

SNR za použití standardu PRIME bylo v případě článku 12–21 dB, vlastní výsledky ukázaly hodnoty SNR 21,5–25,8 dB. Naše měření tedy bylo kvalitnější. Naopak za použití standardu G3 se rozdílná vzdálenost projevila, vlastní výsledky

Tab. 7.2: G3 – srovnání vlastních výsledků se článkem [30]

G3	Fyzická rychlost (změřená) [b/s]	Aplikační rychlost [b/s]
8PSK	49038	5330
QPSK	45074	5114
BPSK	30450	4491

se pohybují ve vyšších rychlostech než výsledky uvedené v článku. RSSI v případě článku dosahovalo 98 dBuV, v případě vlastních naměřených hodnot 116 dBuV, vlastní přenos vykazoval tedy také vyšší sílu signálu než přenos z citované literatury [30].

### Performance evaluation of two narrowband PLC systems: PRIME and G3

Získané závěry v předchozí kapitole 7.2 byly konfrontovány také s nálezy článku *Performance evaluation of two narrowband PLC systems: PRIME and G3* [31], kde autoři srovnávali tyto dva standardy z hlediska vypořádání se s různými druhy rušení, přenosové rychlosti, a představili své návrhy na vylepšení standardů. V článku byla vyzdvížena jako hlavní přednost PRIME přenosová rychlost, jmenovitě až 42,9 kb/s pro DQPSK, docílená ale na úkor robustnosti přenosu, což bylo uvedeno jako jeho hlavní zápor oproti G3, která dosáhla nanejvýš 34 kb/s pro DQPSK [31]. V našem měření se také standard G3 ukázal jako schopnější přenosu i za silného rušení.

V nejhorsích podmínkách, tedy ve scénáři č. 3 dosahoval v robustním módu téměř 19násobné úspěšnosti doručení bezchybných dat a i ve scénáři s odbočkami (č. 2) měl výrazně větší úspěšnost doručení dat v nerobustních modulacích. V témže scénáři dosáhl G3 v modulaci QPSK efektivní rychlosti 10,5 kb/s. Standard PRIME v QPSK ve stejném scénáři dosáhl rychlosti 27,4 kb/s. Závěr, že PRIME dosahuje lepší datové rychlosti, naše měření tedy potvrdilo.

### **Comparison of PLC G3 and PRIME**

V článku *Comparison of PLC G3 and PRIME* [32] se autoři zaměřili na srovnání charakteristik obou úzkopásmových PLC standardů. Maximální rychlosti na fyzické vrstvě v případě G3 dosáhli 33,4 kb/s (v modulaci DQPSK), v případě standardu PRIME 128,6 kb/s (modulace D8PSK) [32]. Námi získané maximální rychlosti v kapitole 7.2.4 odpovídají 45,1 kb/s pro QPSK a G3, v případě standardu PRIME 32,6 kb/s za použití modulace 8PSK. Oproti efektivním rychlostem námi změřené fyzické rychlosti nepotvrzují rychlejší přenos standardu PRIME, G3 totiž v našem případě využívalo velké množství režijních dat, ale samotná datová rychlost (aplikačních dat) byla menší než za použití PRIME, takže tato tendence platí i v našem měření. Autorům se podařilo docílit podmínek, za kterých získali výrazně větší přenosové rychlosti i za použití stejných standardů jako v našich měřeních.

### **Performance Analysis and Enhancements of Narrowband OFDM Powerline Communication Systems**

Článek *Performance Analysis and Enhancements of Narrowband OFDM Powerline Communication Systems* [33] zkoumá výkon úzkopásmových standardů za působení různých druhů rušení. Výsledky ukázaly hodnotu přenosové rychlosti 42 kb/s pro standard PRIME za použití BPSK modulace s rušením NBI (narrow band interference), objevujícím se při přenosu po rozvodech nízkého napětí (nejčastěji v důsledku rušení televizním přijímačem) [33]. V našem měření topologie s odbočkami jsme dosáhli pouze 22,5 kb/s, nemáme však jasně zmapovány možné zdroje rušení při přenosu v tomto scénáři na rozdíl od přesně určeného NBI rušení, na který se zaměřili autoři článku.

## 8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo nastudování technických specifik PLC komunikace a její možnosti z hlediska dálkového přenosu dat. Dále obeznámení se s komerčními modemy a vývojovými kity a metodami měření aktivních síťových prvků.

V bakalářské práci byla popsána technologie PLC z hlediska principu, přínosu oproti jiným komunikačním technologiím, a také její základní nedostatky. Představeno bylo rovněž několik důležitých standardů definujících PLC komunikaci, jak širokopásmovou, tak i úzkopásmovou, a kmitočtová pásma, omezující přenos dat po silovém vedení a lišící se pro různé světové oblasti. Poté bylo uvedeno hlavní rozdělení technologie dle kmitočtového pásma, v němž působí, a jednotlivé druhy mezi sebou srovnány, ať už na základě technických rozdílů, tak praktického využití. Pro důkladnější porozumění přenosu dat z hlediska přenosového média zde byly shrnuty kategorie elektrického vedení dle hodnoty jmenovitého napětí a rozebrány možnosti využití pro datovou komunikaci. Dále se práce zabývala přehledem PLC řešení dostupných na trhu, komerčních modemů od firmy ModemTec, Devolo a dalších a několik vývojových kitů, především od společnosti Texas instruments a Atmel.

Výstupem práce jsou série měření, které měly za úkol ověřit teoretické poznatky popsané v první části práce. První série za využití širokopásmových modemů prokázala pokles přenosové rychlosti na aplikační vrstvě se vzrůstající komunikační vzdáleností. V sérii druhé byla za pomoci testeru aktivních síťových prvků a širokopásmových modemů měřena propustnost a zpoždění definované doporučením RFC 2544. Analýzou získaných výsledků byl zjištěn negativní vliv rušení na datový přenos a také závislost propustnosti na délce posílaného rámce. Dále byl pozorován vertikální překlad dat mezi vrstvami, jehož následkem klesá datová rychlost a roste zpoždění.

V třetí sérii měření úzkopásmových modemů s více nosnými jsme si definovali různé topologie, které představovaly ideální prostředí, běžný provoz a výrazné rušení přenosu a na jejich podkladu jsme zkoumali parametry přenosu v závislosti na použitém úzkopásmovém standardu, G3-PLC či PRIME, a druhu digitální PSK modulace. Výsledky ukázaly, že G3 je znatelně robustnější standard a tedy vhodnější pro použití v prostředí s velkým rušením. Naopak přednost standardu PRIME je datová rychlost, naměřené hodnoty přenosové kapacity aplikačních dat dosahovaly v ideálních podmínkách dvojnásobek hodnot naměřených pro standard G3. PRIME je tedy vhodnější pro příznivé podmínky komunikace, kdy upřednostňujeme vyšší rychlost přenosu. Z hlediska modulací jsme pozorovali, že vícecestavové typy PSK modulace umožňovaly vyšší datovou rychlost na úkor robustnosti přenosu, a tedy snížené úspěšnosti doručení posílaných dat v neideálním prostředí. Naopak robustní

módy modulací za cenu snížené rychlosti dosahovaly vysoké spolehlivosti přenosu i v nepříznivých podmínkách. Vytvořené závěry jsme následně srovnávali s dostupnou literaturou, zabývající se výkonem úzkopásmových standardů G3 a PRIME. Pro účel srovnání naměřených hodnot jsme provedli měření, kladoucí si za cíl dosažení maximálních přenosových rychlostí pro oba standardy a maximálního využití komunikačního kanálu. Maximálních hodnot jsme dosáhli větší délkou odesílané zprávy.

Výsledky práce jsem ve spolupráci s vedoucím práce publikovala v článku *Experimental measurements of multi-carrier Power Line Communication systems*, který bude široké veřejnosti představen v červenci tohoto roku na konferenci *2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing* v Barceloně.



## LITERATURA

- [1] SCHWARTZ, Mischa. Carrier-wave telephony over power lines: Early history [History of Communications]. *IEEE Communications Magazine* [online]. USA: IEEE, 2009, roč. 47, č. 1, s.14–18 [cit. 2016-11-08]. ISSN 0163-6804. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?arnumber=4752669>>.
- [2] GALLI, Stefano, Anna SCAGLIONE a Zhifang WANG. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2011, roč. 99, č. 6, s. 998-1027 [cit. 2016-11-08]. ISSN 1558-2256. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?arnumber=5768099>>.
- [3] MIŠUREC, Jiří a Petr MLÝNEK. Power Line Communication pro Smart Metering a Smart Grid – současné možnosti. In: *Sborník 18. konference ČK CIRED*. 2014, s. 1-12. ISBN 978-80-905014-3-0.
- [4] GALLI, Stefano a Thierry LYS. Next generation Narrowband (under 500 kHz) Power Line Communications (PLC) standards. *Communications, China* [online]. 2015, roč. 12, č. 3 [cit. 2016-10-30]. ISSN 1673-5447. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/7084358>>.
- [5] OKSMAN, Vladimír a Jin ZHANG. G.HNEM: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology. *Communications Magazine, IEEE* [online]. 2011, roč. 49, č. 12 [cit. 2016-11-12]. ISSN 01636804. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?arnumber=6094004>>.
- [6] HRASNICA, Halid, Abdelfatteh HAIDINE a Ralf LEHNERT. *Broadband powerline communications networks: network design*. 1.vyd. Chichester: John Wiley, 2004, 275 s. ISBN 0-470-85741-2.
- [7] YONGE, Larry, Jose ABAD, Kaywan AFKHAMIE, Lorenzo GUERRIERI, Srinivas KATAR, Hidayat LIOE, Pascal PAGANI, Raffaele RIVA, Daniel M. SCHNEIDER a Andreas SCHWAGER. An Overview of the HomePlug AV2 Technology. *Journal of Electrical and Computer Engineering* [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2013, č.2013 [cit. 2016-11-27]. ISSN 2090-0147. Dostupné z URL: <<https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/892628>>.

- [8] BERGER, Lars Torsten, Andreas SCHWAGER a J. Joaquín ESCUDERO-GARZÁS. Power Line Communications for Smart Grid Applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering* [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2013, roč. 2013 [cit. 2016-11-08]. ISSN 2090-0147. Dostupné z URL: <<https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/712376>>.
- [9] *Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines*. 1. vydání. Editor Hendrik FERREIRA. Chichester: John Wiley, 2010, 507s. ISBN 978-047-0740-309.
- [10] MT49R. *Modemtec* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.modemtec.cz/cz/produkty/plc-modemy/seriove-rozhrani/mt49r>>.
- [11] MT39-L1-ver. R. *Modemtec* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.modemtec.cz/cz/produkty/plc-modemy/seriove-rozhrani/mt39-l1-ver-r>>.
- [12] MT34A-ver. R. *Modemtec* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.modemtec.cz/cz/produkty/plc-modemy/seriove-rozhrani/mt34a-ver-r>>.
- [13] MT23-B. *Modemtec* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.modemtec.cz/cz/produkty/plc-modemy/seriove-rozhrani/mt23-b>>.
- [14] MT23-S. *Modemtec* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.modemtec.cz/cz/produkty/plc-modemy/seriove-rozhrani/mt23-s>>.
- [15] IT700 IC. *Yitran* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.yitran.com/index.aspx?id=3351>>.
- [16] IT800 IC. *Yitran* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.yitran.com/index.aspx?id=3360>>.
- [17] IT900 IC. *Yitran* [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z URL: <<http://www.yitran.com/index.aspx?id=3406>>.
- [18] dLAN® Green PHY Module Powerline adapter. *devolo* [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z URL: <<http://www.devolo.com/en/Business-Solutions/Modules/dLAN-Green-PHY-Module/Single-Adapter>>.
- [19] devolo G3-PLC Modem 500k Powerline adapter. *devolo* [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z URL: <<http://www.devolo.com/en/SmartGrid/Products/devolo-G3-PLC-Modem-500k/Single-Adapter>>.

- [20] AFE030 (Power Operational Amplifiers) Description & parametrics. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/product/AFE030/description>>.
- [21] AFE031 (Power Operational Amplifiers) Description & parametrics. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/product/AFE031/description>>.
- [22] dLAN® Green PHY eval board II Powerline adapter - devolo AG. *devolo* [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z URL: <<http://www.devolo.com/en/Business-Solutions/Modules/dLAN-Green-PHY-eval-board-II/Single-Adapter>>.
- [23] C2000 Power Line Modem Developer's Kit - TMDSPCKIT-V3 - TI Tool Folder. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/tool/tmdsplckit-v3#descriptionArea>>.
- [24] ATSAM4CP16B. *Atmel Corporation* [online]. [cit. 2016-11-3]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/devices/ATSAM4CP16B.aspx>>.
- [25] ŠILHAVÝ, Pavel. *Datová komunikace - Laboratorní cvičení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, s. 51-59. ISBN 978-80-214-4725-7.
- [26] Atmel Corporation. *SAM4CP16C-EK Kit User Manual*[online]. [cit. 2017-3-24]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/images/doc43086.pdf>>.
- [27] RIDGWAY, Richard W., David W. NIPPA a Stephen YEN. Data Transmission Using Differential Phase-Shift Keying on a 92 GHz Carrier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [online]. USA: IEEE, 2010, roč. 58, č. 11, s. 3117–3126 [cit. 2017-04-17]. ISSN 00189480. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?arnumber=5604343>>.
- [28] GREGORIO, Fernando, Juan COUSSEAU, Stefan WERNER, Taneli RIIHONEN a Risto WICHMAN. EVM Analysis for Broadband OFDM Direct-Conversion Transmitters. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. USA: IEEE, 2013, roč. 62, č. 7, s. 3443–3451 [cit. 2017-03-27]. ISSN 00189545. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?arnumber=6472311>>.
- [29] PAHLAVAN, Kaveh a Prashant KRISHNAMURTHY. *Networking fundamentals: wide, local, and personal area communications*. 18. vydání. Chichester: John Wiley, 2009, s. 132–134. ISBN 0470992891.

- [30] MLÝNEK, Petr, Jiří MIŠUREC, Zdeněk KOLKA, Jan SLÁČIK a Radek FUJDIÁK. Narrowband Power Line Communication for Smart Metering and Street Lighting Control. *IFAC PapersOnLine* [online]. Elsevier, 2015, roč.48, č.4, s.215–219 [cit. 2017-04-25]. ISSN 24058963. Dostupné z URL: <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2405896315008101>>.
- [31] MATANZA, Javier, Sadot ALEXANDRES a Carlos RODRIGUEZ-MORCILLO. Performance evaluation of two narrowband PLC systems: PRIME and G3. *Computer Standards & Interfaces* [online]. Elsevier, 2013, roč.36, č.1, s.198–208 [cit. 2017-04-25]. ISSN 09205489. Dostupné z URL: <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0920548913000482>>.
- [32] HOCH, Martin. Comparison of PLC G3 and PRIME. *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)* [online]. IEEE Publishing, 2011, s.165–169 [cit. 2017-05-10]. DOI: 10.1109/ISPLC.2011.5764384. ISBN 9781424477517. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5764384/>>.
- [33] KIM, Il Han, Badri VARADARAJAN a Anand DABAK. Performance Analysis and Enhancements of Narrowband OFDM Powerline Communication Systems. *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)* [online]. IEEE Publishing, 2010, s.362–367 [cit. 2017-05-11]. DOI: 10.1109/SMARTGRID.2010.5622070. ISBN 978-1-4244-6510-1. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5622070/>>.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

8PSK	osmistavové klíčování fázovým posunem – 8-State Phase-Shifting Keying
AES	standard pokročilého šifrování – Advanced Encryption Standard
APP	přenosová kapacita aplikačních dat
ARIB	Asociace rádiového průmyslu a obchodu – Association of Radio Industries and Businesses
BB-PLC	širokopásmová technologie PLC – Broad Band PowerLine Communication
BPSK	binární klíčování fázovým posunem – Binary Phase-Shifting Keying
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice – Comité européen de normalisation électrotechnique
CSMA/CA	protokol přístupu k médiu s předcházením kolizí – Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance
EVM	velikost odchylky vektoru – Error Vector Magnitude
FCC	Federální komunikační komise – Federal Communications Commission
FEC	mechanismus korekce chyb – Forward Error Correction
GPRS	služba mobilních dat – General Packet Radio Service
HAN	domácí síť – Home Area Network
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMP	impedanční přizpůsobení
ITU-T	Standardizační sektor Mezinárodní telekomunikační unie
LAN	místní síť – Local Area Network
LQI	robustní modulace – Link Quality Indicator
NBI	úzkopásmové rušení – narrow band interference
NB-PLC	úzkopásmová technologie PLC – Narrow Band PowerLine Communication

OFDM	pravoúhlý multiplex s kmitočtovým dělením – Orthogonal frequency division multiplexing
PHY	přenosová rychlost na fyzické vrstvě
PLC	datový přenos po elektrické síti – PowerLine Communication
PRIME	PowerLine Related Intelligent Metering Evolution
PSK	klíčování fázovým posunem – Phase-Shifting Keying
QPSK	čtyřstavové klíčování fázovým posunem – Quadrature Phase-Shifting Keying
ROBO	robustní modulace
RSSI	indikátor síly signálu – Received Signal Code Power
Rx	úspěšnost doručení zpráv
Rx OK	úspěšnost doručení bezchybných zpráv
SNR	odstup signálu od šumu – Signal-To-Noise Ratio
UNB-PLC	technologie PLC působící ve velmi úzkém kmitočtovém pásmu – Ultra Narrow Band PowerLine Communication
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
WAN	rozsáhlá síť – Wide Area Network

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Výsledky měření</b>	<b>59</b>
A.1	Powerline HomePlug AV2 Kit . . . . .	59
A.2	Tester NetBlazer . . . . .	60
A.3	Atmel SAM4CP16C-EK Kit . . . . .	62
A.3.1	G3-PLC . . . . .	62
A.3.2	PRIME . . . . .	64

# A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

## A.1 Powerline HomePlug AV2 Kit

Tab. A.1: První měření – vzdálenosti v rámci pokoje č.1.

Dosah [m]	2,5	7,5	10,5
D [Mb/s]	47,17	29,98	29,45
U [Mb/s]	15,17	15,27	15,22

Tab. A.2: Druhé měření – mezi routerem a zásuvkami v pokoji č. 2.

Dosah [m]	6	13,5
D [Mb/s]	57,41	34,68
U [Mb/s]	15,1	15,36

Tab. A.3: Třetí měření – vliv rušení.

Scénář	Bez rušení	S rušením
D [Mb/s]	37,57	2,395
U [Mb/s]	13,54	7,77

Tab. A.4: Čtvrté měření – mezi routerem a zásuvkami v pokoji č. 3.

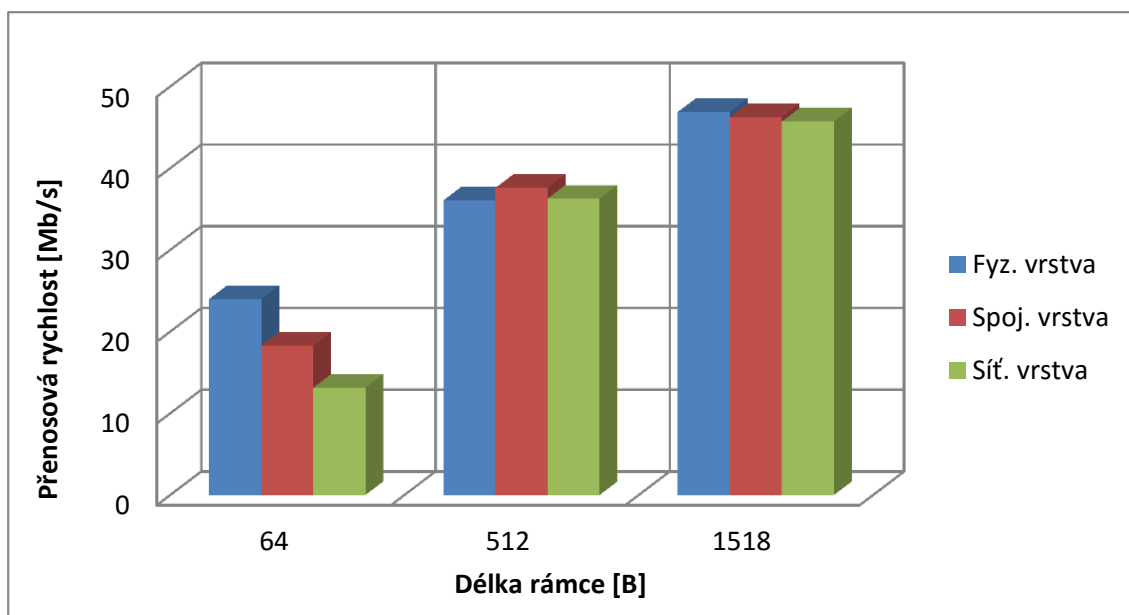
Dosah [m]	7	12,5	16
D [Mb/s]	49,37	30,83	19,75
U [Mb/s]	15,24	14,72	14,64

Tab. A.5: Páté měření – mezi routerem a zásuvkami v pokoji č. 1.

Dosah [m]	13	20,5
D [Mb/s]	27,39	31,77
U [Mb/s]	15,23	15,17



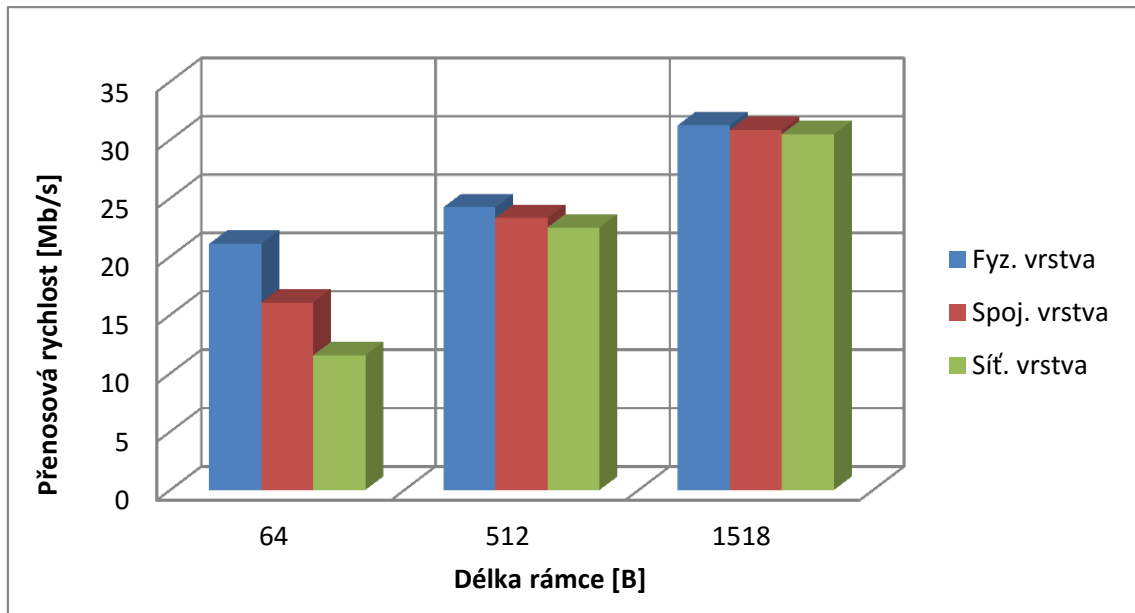
## A.2 Tester NetBlazer



Obr. A.1: Výsledky měření pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 0 %.

Tab. A.6: Zpoždění v závislosti na délce rámce pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 0 %.

Rámec [B]	Zpoždění [ms]
64	15,826
512	51,07
1518	169,225



Obr. A.2: Výsledky měření pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 50 %.

Tab. A.7: Zpoždění v závislosti na délce rámce pro scénář se zapojeným rušením nastaveným na 50 %.

Rámec [B]	Zpoždění [ms]
64	22,192
512	95,089
1518	261,583

## A.3 Atmel SAM4CP16C-EK Kit

### A.3.1 G3-PLC

Tab. A.8: Scénář č. 1A

	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	100,0	100,0	2110,0	16616,7	22,1
QPSK	100,0	100,0	2099,0	15181,0	24,6
BPSK	99,9	99,9	2076,0	13678,3	32,0
ROBO	100,0	100,0	2049,7	-	62,2

Tab. A.9: Scénář č. 1B

	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	100,0	99,9	2201,3	17336,0	23,1
QPSK	100,0	100,0	2199,7	15908,7	25,8
BPSK	100,0	100,0	2101,0	13845,0	32,4
ROBO	100,0	100,0	2049,7	-	62,2

Tab. A.10: Scénář č. 2

	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	29,5	11,3	2088,3	16444,3	21,9
QPSK	85	80,9	2090,7	15119,7	24,5
BPSK	100,0	100,0	2078,0	13693	32,1
ROBO	99,9	99,9	2055,3	-	62,3

Tab. A.11: Změna rozestupu mezi rámci pro modulaci 8PSK

	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage[%]
100 ms	2088	16444	21,9
200 ms	1087	8561	11,4

Tab. A.12: Změna rozestupu mezi rámci pro modulaci QPSK

	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage[%]
100 ms	2091	15120	24,5
200 ms	1088	7871	12,8

Tab. A.13: Změna rozestupu mezi rámci pro modulaci ROBO

	APP [b/s]	Ch.usage[%]
100 ms	2055	62,3
50 ms	2376	72,1

Tab. A.14: Změna impedance pro modulaci QPSK

	RX [%]	RX OK [%]
Auto Z	85,2	81,5
High Z	70,3	61,3
Very low Z	100	100

Tab. A.15: Scénář č. 3

	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	5,1	0,0	2094,7	16494,0	21,9
QPSK	3,2	0,0	2090,3	15116,3	24,5
BPSK	5,7	0,0	2086,3	13747,0	32,2
ROBO	30,3	30,3	2059,3	-	62,5

### A.3.2 PRIME

Tab. A.16: Scénář č. 1A

	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	100	100	2052,7	3408,7	17,8
QPSK	100	100	2052,7	4289,0	19,8
BPSK	100	100	2048,0	3401,0	21,8
RQPSK	100	100	2048,0	21832	40,3
RBPSK	100	100	2052,3	18361,7	56,8

Tab. A.17: Scénář č. 1B

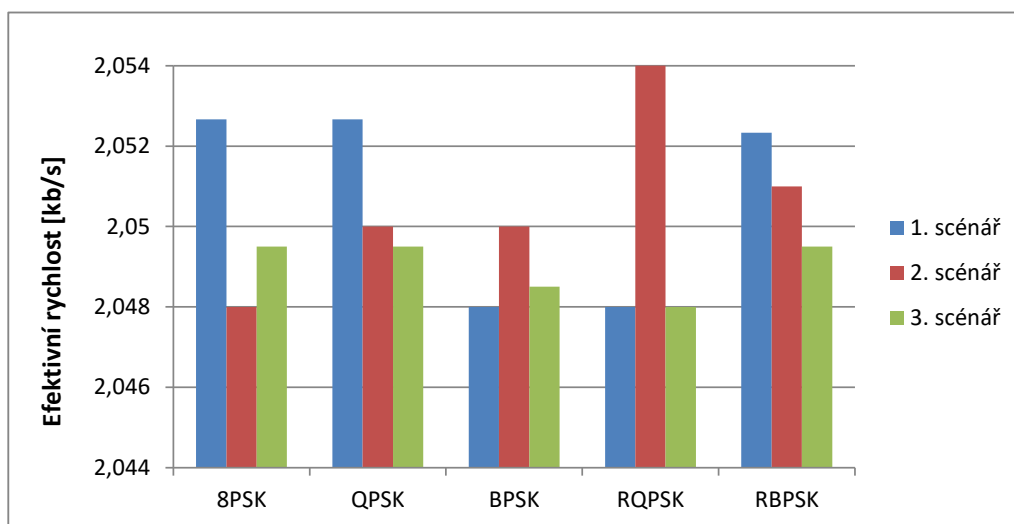
	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	100	100	2049,0	3403,0	17,7
QPSK	100	100	2054,0	4291,0	19,8
BPSK	100	100	2050,0	3405,0	21,9
RQPSK	100	100	2048,0	21836	40,3
RBPSK	100	100	2049,0	18333,0	56,7

Tab. A.18: Scénář č. 2

	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	99,8	0,0	2048,0	3401,0	17,7
QPSK	99,6	2,0	2050,0	4282,0	19,8
BPSK	100,0	7,0	2050,0	3405,0	21,9
RQPSK	99,4	99,4	2054,0	21899,0	40,4
RBPSK	100,0	100,0	2051,0	18346,0	56,7

Tab. A.19: Scénář č. 3

	RX [%]	RX OK [%]	APP [b/s]	PHY [b/s]	Ch.usage [%]
8PSK	6,0	0,0	2049,5	3403,5	17,7
QPSK	8,5	0,0	2049,5	4282,0	19,8
BPSK	2,4	0,0	2048,5	3402,0	21,8
RQPSK	10,9	0,0	2048,0	21835,0	40,3
RBPSK	8,5	1,6	2049,5	18339,0	56,7



Obr. A.3: Grafické znázornění efektivní rychlosti pro jednotlivé topologie dle užití modulace (PRIME).



Obr. A.4: Grafické znázornění fyzické rychlosti pro jednotlivé topologie dle užití modulace (PRIME).