



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A REALIZACE DOMÁCÍ SÍTĚ LAN TECHNOLOGIÍ PLC

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LAN HOME NETWORK USING PLC TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

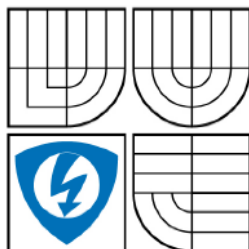
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ PATAJ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MIŠUREC, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jiří Pataj

ID: 78374

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace domácí sítě LAN technologií PLC

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Rozeberte možnosti technologie PLC (Power Line Communication). Navrhněte a odzkoušejte experimentální síť LAN pomocí technologie PLC, provedení DS2, HomePlug. Proved'te měření na této síti LAN, která zdokumentují možnosti této technologie.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HRASNICA, HAIDINE, LEHNERT. Broadband Powerline Communications Network design, ISBN:0-470-85741-2, 2004

[2] DOSTERT, Klaus. Powerline Communications. Upper Saddle River, NJ 07458 : Prentice Hall PTR, 2001. 338s. ISBN 0-13-029342-3.

Termín zadání: 29. 1. 2010

Termín odevzdání: 26. 5. 2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

ANOTACE

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací

Návrh a realizace domácí sítě LAN technologií PLC

Diplomová práce

Zaměření studia: Telekomunikační a informační technika
Autor: Bc. Jiří Pataj
Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Abstrakt:

Diplomová práce pojednává o možnostech datové komunikace po silových vedeních nízkého napětí, tzv. PLC. Tato technologie umožňuje přenos dat po elektrickém vedení. Z hlediska datových komunikací se PLC rozděluje podle použitých kmitočtů na úzkopásmová a širokopásmová.

Uvedeny jsou teoretické znalosti datové komunikace po silovém vedení a popis jejich technických řešení. Následně je navržena koncepce sítě LAN, pomocí dostupného komerčního řešení technologií DS2 a určení její vhodnosti pro domácí použití. Hlavním přínosem je realizace a měření této experimentálně vytvořené sítě LAN v rodinném domě. Výsledkem jsou skutečné dosahované rychlosti této technologie v závislosti na vzdálenosti a kvalitě daného spojení.

Klíčová slova: komunikace, silové vedení, signál, širokopásmová, modulace, frekvence

ABSTRACT

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of telecommunication

Design and implementation of LAN home network using PLC technology

Diploma thesis

Specialisation of study: Communications and Informatics
Student: Bc. Jiří Pataj
Supervisor: doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Abstract:

Master's thesis deals with possibilities of data communication on low voltage power lines, so-called PLC. This technology allows data transfer on power lines. According frequency band the PLC can be subdivide into narrowband or broadband class.

Given are theoretical knowledge's of data communication on power lines and describes technical solutions. Consequently is suggestion of LAN, which is accessible for commercial usage made by DS2 and his suitable for home use. The main acquisition is implementing and measuring this experimentally created LAN in family house. The results are real bitrates depending on distance and quality of specific connection.

Keywords: communication, power line, signal, broadband, modulation, frequency

PATAJ, J. *Návrh a realizace domácí sítě LAN technologií PLC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 67 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Návrh a realizace domácí sítě LAN technologií PLC" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Mišurcovi, CSc, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD..... | 12 |
| 1 VÝVOJ TECHNOLOGIE PLC..... | 13 |
| 2 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ..... | 14 |
| 2.1 STRUKTURA ENERGETICKÉ SÍTĚ | 14 |
| 2.2 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA | 15 |
| 2.2.1 Úzkopásmové PLC | 15 |
| 2.2.2 Norma ČSN EN 50065..... | 16 |
| 2.2.3 Širokopásmové PLC | 17 |
| 2.3 NAVÁZÁNÍ DATOVÉHO SIGNÁLU | 18 |
| 2.3.1 Přímé navázání signálu – Conductive coupling | 18 |
| 2.3.2 Induktivní navázání signálu – Inductive coupling | 19 |
| 2.3.3 Přímá fázová komunikace..... | 20 |
| 2.3.4 Mezijázová komunikace bez spojení fází | 20 |
| 2.3.5 Mezijázová komunikace se spojením fází | 21 |
| 2.3.6 Zařízení zapojené mezi fázemi | 21 |
| 2.3.7 Řešení mezijázové komunikace | 22 |
| 2.4 MODULAČNÍ TECHNIKY | 22 |
| 2.4.1 Úzkopásmové modulace | 23 |
| 2.4.2 Širokopásmové modulace | 24 |
| 2.5 TOPOLOGIE SÍTÍ V PLC | 25 |
| 2.5.1 Sběrníková topologie..... | 25 |
| 2.5.2 Hvězdicová topologie | 26 |
| 2.5.3 Kruhová topologie..... | 27 |
| 2.6 PŘÍSTUPOVÉ METODY | 28 |
| 2.7 RUŠENÍ V PLC SÍTÍCH..... | 29 |
| 3 NÁVRH DOMÁCÍ SÍTĚ LAN | 31 |
| 3.1 SYSTÉM S TECHNOLOGIÍ DS2/DEFIDEV | 31 |
| 3.1.1 Head-End (HE) | 31 |
| 3.1.2 Repeater (REP) | 33 |
| 3.1.3 Modem (CPE) | 33 |
| 3.1.4 Network management systém (NMS)..... | 34 |
| 3.1.5 Zapojení PLC sítě..... | 36 |
| 4 REALIZACE A MĚŘENÍ PLC SÍTĚ | 37 |
| 4.1 RFC 2544 | 38 |
| 4.2 MĚŘENÍ DLE NORMY RFC 2544 | 40 |
| 4.2.1 Měření na délce vedení 1m | 40 |
| 4.2.2 Měření na délce vedení 10m | 43 |
| 4.2.3 Měření na délce vedení 30m | 46 |
| 4.2.4 Měření na délce vedení 50m | 50 |
| 4.2.5 Vyhodnocení měření | 53 |
| 4.3 MĚŘENÍ NÁSTROJEM IPERF | 54 |
| 4.3.1 Vyhodnocení měření | 57 |
| 4.4 MĚŘENÍ SIGNAL TO NOISE RATIO..... | 57 |
| ZÁVĚR..... | 60 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 62 |
| PŘÍLOHA A: PŮDORYS PŘÍZEMÍ..... | 65 |
| PŘÍLOHA B: PŮDORYS PRVNÍHO PATRA | 66 |
| PŘÍLOHA C: OBSAH CD | 67 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| OBR. 2.3: PŘÍMÉ (KAPACITNÍ) NAVÁZÁNÍ SIGNÁLU..... | 18 |
| OBR. 2.4: SCHÉMA KAPACITNÍHO NAVÁZÁNÍ SIGNÁLU..... | 19 |
| OBR. 2.6: PŘÍMÁ FÁZOVÁ KOMUNIKACE | 20 |
| OBR. 2.7: MEZIFÁZOVÁ KOMUNIKACE BEZ SPOJENÍ FÁZÍ | 20 |
| OBR. 2.8: MEZIFÁZOVÁ KOMUNIKACE SE SPOJENÍM FÁZÍ..... | 21 |
| OBR. 2.9: ZAŘÍZENÍ ZAPOJENÉ MEZI FÁZEMI | 21 |
| OBR. 2.10: ŘEŠENÍ MEZIFÁZOVÉ KOMUNIKACE S TŘÍSVORKOVÝM FILTREM | 22 |
| OBR. 2.11: PRINCIP PŘEMĚNY SIGNÁLU MODULACÍ | 23 |
| OBR. 2.12: PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ SBĚRNICOVÉ TOPOLOGIE | 26 |
| OBR. 2.13: PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ HVĚZDICOVÉ TOPOLOGIE..... | 26 |
| OBR. 2.14: PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ KRUHOVÉ TOPOLOGIE | 27 |
| OBR. 2.1: ROZDĚLENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY | 29 |
| OBR. 2.2: MOŽNÉ ZDROJE RUŠENÍ NA PŘENOSOVÉ CESTĚ PLC..... | 30 |
| OBR. 3.1: AMH-201, HEAD-END/REPEATER (32MAC)..... | 32 |
| OBR. 3.2: AGW-200, SYSTÉM PRO KONFIGURACI, SPRÁVU A MANAGEMENT..... | 36 |
| OBR. 3.3: PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ PLC LAN SÍTĚ | 37 |
| OBR. 4.1: RODINNÝ DŮM URČENÝ PRO REALIZACI PLC SÍTĚ..... | 38 |
| OBR. 4.2: ZÁVISLOST RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA ZMĚNĚ VELIKOSTI RÁMCE VE VZDÁLENOSTI 1M. | 42 |
| OBR. 4.3: ZÁVISLOST ZTRÁTOVOSTI NA RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ VE VZDÁLENOSTI 1M | 42 |
| OBR. 4.4: ZÁVISLOST VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA ZMĚNĚ VELIKOSTI RÁMCE VE VZDÁLENOSTI 10M..... | 45 |
| OBR. 4.5: ZÁVISLOST ZTRÁTOVOSTI NA RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI | 45 |
| OBR. 4.6: ZÁVISLOST ZTRÁTOVOSTI NA RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI .. | 46 |
| OBR. 4.7: ZÁVISLOST VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA ZMĚNĚ VELIKOSTI RÁMCE VE VZDÁLENOSTI 30M..... | 48 |
| OBR. 4.8: ZÁVISLOST ZTRÁTOVOSTI NA RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI | 49 |
| OBR. 4.9: ZÁVISLOST ZTRÁTOVOSTI NA RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI... | 49 |
| OBR. 4.10: ZÁVISLOST VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA ZMĚNĚ VELIKOSTI RÁMCE VE VZDÁLENOSTI 50M..... | 52 |
| OBR. 4.11: ZÁVISLOST ZTRÁTOVOSTI NA RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI | 52 |
| OBR. 4.12: ZÁVISLOST ZTRÁTOVOSTI NA RYCHLOSTI VYSÍLÁNÍ RÁMCŮ NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI .. | 53 |
| OBR. 4.13: SROVNÁNÍ PROPUSTNOSTI S TEORETICKÝMI HODNOTAMI SYSTÉMU 100MBIT/S | 54 |
| OBR. 4.14: ZÁVISLOST ŠÍŘKY PÁSMY (BANDWIDTH) NA ZMĚNĚ VZDÁLENOSTI U PROTOKOLU TCP..... | 56 |
| OBR. 4.15: ZÁVISLOST ŠÍŘKY PÁSMY (BANDWIDTH) NA ZMĚNĚ VZDÁLENOSTI U PROTOKOLU UDP | 56 |
| OBR. 4.16: ZÁVISLOST SNR NA ZMĚNĚ FREKVENCE VE VZDÁLENOSTI 1M | 58 |
| OBR. 4.17: ZÁVISLOST SNR NA ZMĚNĚ FREKVENCE NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 50M | 58 |
| OBR. 4.18: ZÁVISLOST SNR NA ZMĚNĚ FREKVENCE NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 50M | 59 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| TAB. 2.1: VÝTAH ROZDĚLENÍ FREKVENČNÍHO PÁSMU ELEKTRICKÉ SÍTĚ DLE NORMY ČSN | 16 |
| TAB. 2.2: ROZDĚLENÍ RADIOVÝCH PÁSEM S KMITOČTEM DO 30 MHZ | 17 |
| TAB. 3.1: TECHNICKÉ SPECIFIKACE AMH-201 | 32 |
| TAB. 3.2: TECHNICKÉ SPECIFIKACE AMH-200 | 34 |
| TAB. 4.1: PROPUSTNOST A RECOVERY TIME NA STAJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 1M | 40 |
| TAB. 4.2: ZTRÁTOVOST NA VZDÁLENOST 1M | 41 |
| TAB. 4.3: ZPOŽDĚNÍ NA VZDÁLENOST 1M | 41 |
| TAB. 4.4: PROPUSTNOST A RECOVERY TIME NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 10M | 43 |
| TAB. 4.5: PROPUSTNOST A RECOVERY TIME NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 10M | 43 |
| TAB. 4.6: ZTRÁTOVOST NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 10M | 44 |
| TAB. 4.7: ZTRÁTOVOST NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 10M | 44 |
| TAB. 4.8: ZPOŽDĚNÍ VE VZDÁLENOSTI 10M | 44 |
| TAB. 4.9: PROPUSTNOST A RECOVERY TIME NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 30M | 46 |
| TAB. 4.10: PROPUSTNOST A RECOVERY TIME NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 30M | 47 |
| TAB. 4.11: ZTRÁTOVOST NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 30M | 47 |
| TAB. 4.12: ZTRÁTOVOST NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 30M | 47 |
| TAB. 4.13: ZPOŽDĚNÍ VE VZDÁLENOSTI 30M | 48 |
| TAB. 4.14: PROPUSTNOST A RECOVERY TIME NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 50M | 50 |
| TAB. 4.15: PROPUSTNOST A RECOVERY TIME NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 50M | 50 |
| TAB. 4.16: ZTRÁTOVOST NA STEJNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 50M | 51 |
| TAB. 4.17: ZTRÁTOVOST NA ROZDÍLNÉ FÁZI VE VZDÁLENOSTI 50M | 51 |
| TAB. 4.18: ZPOŽDĚNÍ VE VZDÁLENOSTI 50M | 51 |
| TAB. 4.19: SROVNÁNÍ PROPUSTNOSTI A ZPOŽDĚNÍ S PŘENOSOVÝM MÉDIEM 100 MBIT/S | 54 |
| TAB. 4.20: ŠÍŘKA PÁSMU PROTOKOLU TCP NA STEJNÉ A ROZDÍLNÉ ELEKTRICKÉ FÁZI | 55 |
| TAB. 4.21: ŠÍŘKA PÁSMU A JITTER PROTOKOLU UDP NA STEJNÉ A ROZDÍLNÉ ELEKTRICKÉ | 55 |

ÚVOD

Už dlouhou dobu se rozmáhá myšlenka využití napájecí sítě pro přenos dat. Takovéto napájecí sítě využívané pro datovou komunikaci nesou označení PLC [4]. Tato technologie „Power Line Communication“ (PLC) umožňuje přenos dat po elektrickém vedení s využitím frekvenčního pásma od 100kHz až do 30MHz. Tento frekvenční rozsah lze rozdělit na širokopásmový a úzkopásmový, dle použitých frekvencí. Hlavní výhodou této technologie je použití sítě, která dnes pokrývá téměř celý svět a dosahuje i do míst, kde by jiný způsob vytvoření datové sítě byl prakticky nemožný. Samozřejmostí je využití stávající kabelové infrastruktury, což vede ke snadné instalaci a snížení nákladů na její vytvoření. Už ze své podstaty je možné tuto síť použít ke komunikaci a sdílení informací.

Přenos dat po energetické síti nabízí kromě širokopásmového přístupu také další úzkopásmové služby. Dodavatelé elektrické energie mohou technologii PLC využít pro dálkové snímání hodnot elektroměrů, jakou jsou automatizované odečty elektroměrů, řízení spotřeby energie v reálném čase nebo spotřebu energie v různé denní dobu. Pro uživatele v domácnosti širokopásmový přenos dat po energetické síti nabízí realizaci domácí LAN s možností využití všech běžných datových přenosů použitých v dnes nejrozšířenějším TCP/IP protokolu. Z tohoto hlediska prolínání moderních informačních technologií a silových vedení přináší zajímavé možnosti využití, které vede k efektivnějšímu využívání energetických rozvodů v domácnostech.

Cílem mé práce bylo prostudovat možnosti datové komunikace po silových vedeních nízkého napětí. Podrobně prozkoumat především možnosti návrhu domácí sítě LAN s využitím širokopásmové technologie PLC. Poté provést realizaci a měření vhodně zvolených parametrů této datové sítě.

1 VÝVOJ TECHNOLOGIE PLC

Myšlenky přenášet data po rozvodech napájecí sítě nízkého napětí se začaly prosazovat v devadesátých letech dvacátého století. Mezi nejznámější průkopníky přenosu dat silových rozvodů patří americká společnost Nortel, která se v Evropě spojila s britskou energetickou společností United Utilities PLC. Přesněji s její dceřinou společností Norweb Communications, zabývající se komunikacemi. Poté jako podnik Nor.WeB DPL vyvinul technologii přenosu dat po silových rozvodech s názvem Digital PowerLine [2]. Ještě v roce 1998 byla na CeBITu 98 představena nejnovější verze této technologie pod označením DPL 1000 a Nor. Web mezitím započal velký testovací projekt v Manchesteru. O rok později došlo k ukončení projektu Manchester i aktivit společnosti, která dále nechtěla pokračovat ve vývoji technologie pro přenosy dat po silových rozvodech. Důvody ukončení tohoto projektu byly ekonomické, kdy se praktické nasazení ukazovalo jako příliš drahé. Také rozdílné řešení silových rozvodů v různých státech je nemalý problém. Představa, že jediné technické řešení dokáže vyhovět situaci v různých státech, nebyla příliš reálná a přizpůsobení pro každý stát by bylo příliš drahé. Obdobně odpadnul stejně zaměřený projekt německé firmy Siemens. Po pár letech se začaly objevovat první produkty pro přenosy dat. Mezi první aplikace patřilo vzdálené měření spotřeby elektrické energie. Přestože se vývoji věnuje více firem, na přední pozici výroby čipsetů se dostala americká firma Intellon a španělská společnost Design of Systems on Silicon, známá pod zkratkou DS2, která se touto problematikou zabývá od roku 1998. Tato společnost má hlavní roli ve vývoji řešení pro technologický základ projektu Open PLC European Research Alliance (OPERA), jehož sponzorem je Evropská komise. Projekt OPERA byl oficiálně spuštěn 1. ledna 2004 a kromě DS2 se do něj zapojilo několik univerzit a firem z evropských zemí. Cílem tohoto projektu bylo a je vyvinout jednotný standard pro PLC, který měl nahradit řešení jednotlivých firem. Výsledkem tohoto snažení je čip DS2. V roce 2005 společnost Corinex aplikovala tento čip pro přenosy dat po elektrické síti [2]. Po třech letech v lednu 2007 projekt vstoupil do další etapy nazvané OPERA Phase II. Evropská komise schválila další financování, a tím by tedy v následujících letech mělo dojít k dalšímu vývoji datových služeb po elektrorozvodných sítích. V roce 2006 společnost ElectraStar spustila v Praze poskytování internetových a hlasových služeb, které využívají elektrické rozvody patřící Pražské energetice (PRE). Tomuto komerčnímu provozu předcházela pilotní test, po kterém z důvodu nízké poptávky došlo k ukončení komerčního provozu. V současné době je napájecí síť kromě distribuce elektrické energie také dále využívána rozvodnými závody pro vzdálenou regulaci odběru a odečty elektroměrů [4].

2 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ

Silová vedení nebyla primárně určena pro přenos vysokofrekvenčního signálu, tudíž zde nastávají různé problémy, kterými se budeme v následujících kapitolách zabývat. Hlavním úkolem silového vedení je a bude přenos elektrické energie, kde se v rozvodech používá nf kmitočet 50 Hz. Z hlediska komunikace po silových vedeních je zajímavý rozsah kmitočtů od 100kHz až do 30MHz. Napájecí síť není tedy z hlediska komunikací optimální médium, a pro efektivní komunikaci je tedy nutné porozumět charakteristikám napájecích sítí.

2.1 Struktura energetické sítě

Energetickou distribuční síť lze rozlišit na tři základní napěťové úrovně, u kterých lze vytvořit datovou síť [11].

- Velmi vysoké napětí (VVN) – označení pro elektrické napětí přesahující 100kV, nejpoužívanější je vedení VVN o hodnotách 110kV, 220kV a 400kV. Tyto sítě jsou nejčastěji realizovány nadzemními kabely a slouží k přenosu energie na velké vzdálenosti.
- Vysoké napětí (VN) – slouží k pokrytí podstatně menších oblastí a menších vzdáleností, než je tomu u VVN. Rozvody vysokého napětí dosahují hodnot 10 – 30 kV a jsou tvořeny nadzemním i podzemním vedením.
- Nízké napětí (NN) – v Evropě používané napětí o velikosti 230/400 V s normalizovaným kmitočtem 50 Hz, ve Spojených státech a Japonsku se používá v rozvodné soustavě kmitočet 60 Hz a napětí o velikosti 110 V. Délka takovýchto vedení bývá ve stovkách metrů a slouží k dodávce energie koncovým uživatelům [11].

Naši navrhovanou datovou síť LAN budeme realizovat na elektroinstalaci v domácnosti, která patří do NN úrovně.

2.2 Frekvenční charakteristika

Z hlediska datových komunikací je zajímavý rozsah kmitočtů od 100 kHz do 30 MHz. Tento používaný rozsah frekvencí se rozděluje na úzkopásmové a širokopásmové PLC. Na frekvencích od 10 kHz do 150 kHz (úzkopásmové PLC) se útlumová charakteristika pohybuje okolo 3dB. Se stoupající frekvencí se útlum převážně zvyšuje a při frekvenci 1 MHz dosahuje hodnot okolo 23dB. Při vyšších frekvencích od 1MHz do 30 MHz (širokopásmové PLC) se útlumová charakteristika pohybuje v rozmezí 22 dB až do 70 dB. Útlum na vedení je také značně ovlivněn topologií sítě a připojenými spotřebiči, které jsou běžné v silových rozvodech a mohou být připojovány nebo odpojovány zcela náhodně, což má významný vliv na časově nestálé parametry kanálů. Transformátory jsou pro datový signál také značný problém a řešení tohoto problému není zcela snadné. U komunikačních modemů pro přenos dat po silových vedeních nízkého napětí byla frekvence definována dle ČSN EN 50065 do 150 kHz [4].

2.2.1 Úzkopásmové PLC

Evropské normy CENELEC (Evropský výbor pro elektrotechnickou standardizaci) výrazně omezují šířku pásma využitelnou pro přenos dat [5]. V Evropě jsou stejně jako u nás pro přenos dat po energetické síti povoleny kmitočty rozdělené do čtyř pásem, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 50065. Kmitočtové pásmo od 9 kHz do 148,5 kHz je rozděleno na 4 subpásma A, B, C, D, které jsou uvedené v tabulce 2.1. Pásma B, C, D jsou pro všeobecné použití a nejnižší možnou frekvenci pro přenos dat lze stanovit na 100 kHz, protože na nižších frekvencích je vysoká úroveň šumu od zařízení připojených k síti. Při úvaze horní frekvence 150 kHz lze tedy vidět, že šířka pásma není vysoká, což ovlivňuje i přenosovou rychlost. Jedná se tedy o úzkopásmové PLC, které je používáno pro průmyslové využití. V tomto odvětví není příliš kladen důraz na přenosové rychlosti ale na spolehlivost přenesení dat [4].

Tab. 2.1: Výtah rozdělení frekvenčního pásma elektrické sítě dle normy ČSN EN 50065.

| Pásmo | Kmitočtový rozsah [kHz] | Poznámka |
|-------|-------------------------|--|
| | 3 - 95 | jen pro dodavatele el. energie |
| A | 9 - 95 | pro dodavatele el. energie a po jejich souhlasu i pro odběratele |
| B | 95 - 125 | jen pro odběratele |
| C | 125 - 140 | jen pro odběratele – vyžadován protokol o přistoupení k dohodě |
| D | 140 – 148,5 | |

2.2.2 Norma ČSN EN 50065

Přesný název této normy je „Signalizace v instalacích nízkého napětí v kmitočtovém rozsahu od 3 kHz do 148,5 kHz“. Přesně stanovuje kmitočtové pásma, meze koncového výstupního napětí v pracovním pásmu a meze pro rušení šířené vedením a vyzařováním. Udává také metody měření [4].

Protokol o přistoupení k dohodě:

- všechny systémy musí použít kmitočet 132,5 kHz k upozornění, že vysílání pokračuje
- žádný vysílač nesmí vysílat spojitě po dobu přesahující 1 s a po každém vysílání nesmí vysílat znovu po dobu alespoň 125 ms. (pozn. vysílání je považováno za řadu signálů, v kterých není mezera větší než 80 ms)
- každý vysílač musí být vybaven signálním detektorem, který detekuje, kdy je pásmo v použití (tj. stav, kdy je přítomen na hlavních vstupních svorkách přístroje jakýkoliv signál v pásmu 131,5 - 133,5 kHz trvající alespoň 4 ms)
- přístroj může vysílat, jestliže pásmo není využito po dobu v každém případě náhodně zvolenou a rovnoměrně rozloženou mezi 85ms a 115ms s alespoň sedmi možnými hodnotami v tomto pásmu
- k umožnění detekce použitého pásma musí přístroj vysílat svůj signál se spektrálním rozložením v souladu s B přílohou této normy

2.2.3 Širokopásmové PLC

Pro přenos velkých objemů dat je potřeba využít výrazně širší kmitočtové pásmo, než je stanoveno v normě CENELEC. Dnes existující širokopásmové systémy PLC používají kmitočty v pásmu 2 – 30 MHz [1]. V tomto pásmu pracují i jiné komunikační systémy, a proto je potřeba zajištění elektromagnetické kompatibility. Zásadním cílem je tedy umožnění koexistence s již používanými rádiovými frekvenčními pásmy. Signál je tedy rozdělen do jednotlivých kmitočtů tak, aby bylo umožněno přepnutí z jednoho pásma do druhého v případě požadavku a deaktivaci v případě místního rušení. Kmitočty jsou určovány na základě rozsáhlých měření a plánování v rámci krátkovlnného pásma v souladu s Evropským výborem pro elektrotechnickou standardizaci (CENELEC). V tabulce 2.2 jsou zobrazena radiová pásma pracující ve stejném kmitočtovém rozsahu.

Tab. 2.2: Rozdělení radiových pásem s kmitočtem do 30 MHz

| Typ | Kmitočtový rozsah [kHz] | Užití |
|-------------------|-------------------------|--|
| Krátké vlny | 3000 – 30000 | letectví, námořnictví, meteorologie |
| Střední vlny | 300 – 3000 | letecké radionavigace, námořní radionavigace |
| Dlouhé vlny | 30 – 300 | rozhlasové, letecké a námořní navigace |
| Velmi dlouhé vlny | 10 - 30 | radionavigace |

2.3 Navázání datového signálu

Signálová vazba umožňuje přenos dat mezi zařízeními [1]. U nás jsou standardně elektrické rozvody realizovány pomocí třífázového rozvodu 400V. Pro výběr správného principu navázání PLC signálu do elektrických rozvodů je potřeba zohlednit požadavky.

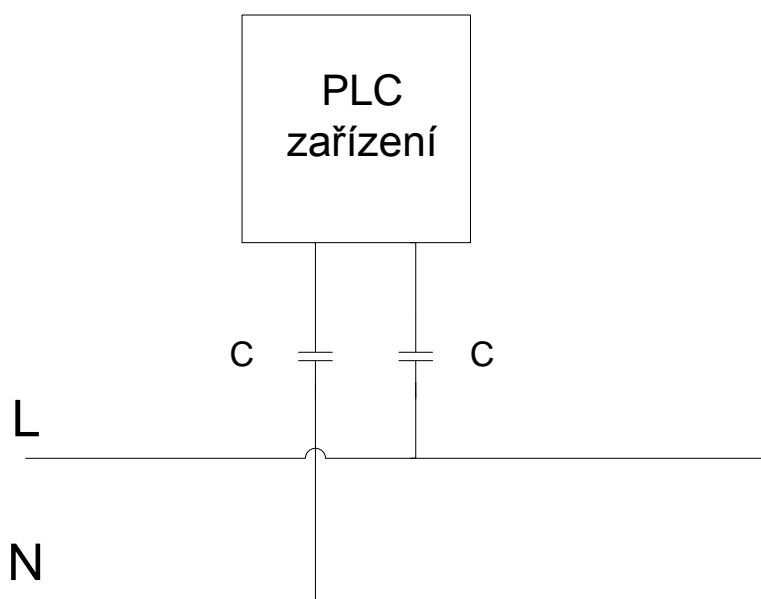
Požadavky:

- Bezpečnost
- Nízká úroveň vyzařování
- Efektivita vazby

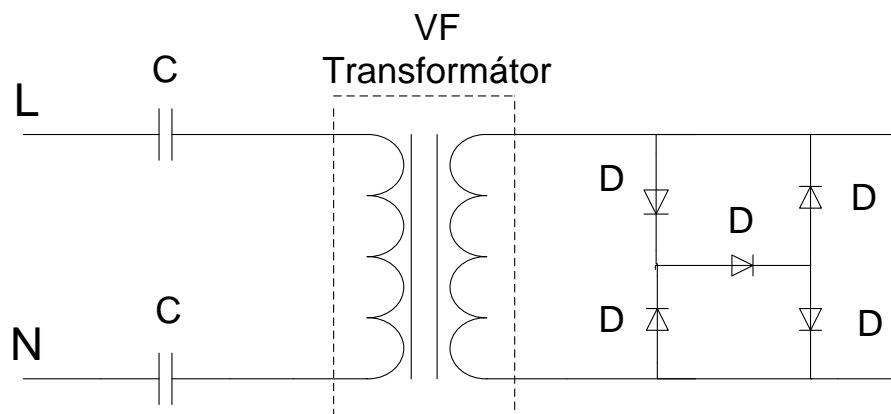
Dle těchto definovaných požadavků lze rozlišit dva základní principy navázání signálu.

2.3.1 Přímé navázání signálu – Conductive coupling

Přímé neboli kapacitní navázání signálu je principiálně znázorněno na obrázku 2.3. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 2.4, kde diody v zapojení chrání před přepětím. Tento způsob navázání signálu je nejefektivnější pro rozvody s vyšší impedancí a používá se nejčastěji pro koncové stanice v nn síti [9].



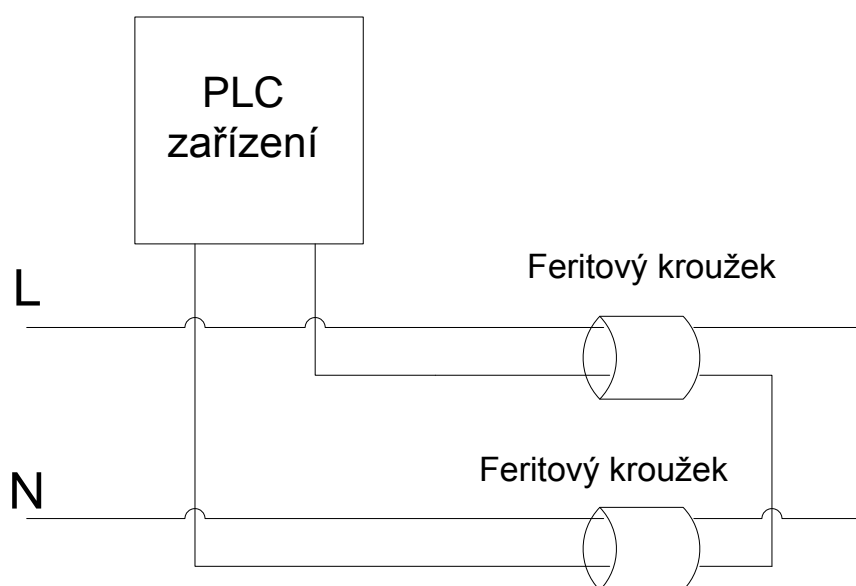
Obr. 2.3: Přímé (kapacitní) navázání signálu



Obr. 2. 4: Schéma kapacitního navázání signálu

2.3.2 Induktivní navázání signálu – Inductive coupling

Metoda induktivního navázání signálu se používá zejména u vn a nn systémů. Na obrázku 2.5 je zobrazeno principiální zapojení induktivní vazby. Důležitým prvkem je vysokofrekvenční transformátor ve formě feromagnetického kroužku. Datový signál se pomocí cívek injektuje na elektrické rozvody a v případě blízkého umístění rozdílných fází dochází injektování signálu i na ostatní fáze. V takovém případě lze rozvést PLC signál na všechny fáze elektroinstalace v rodinném domě. Předností je jednoduchá implementace a efektivní využití v rozvedech s nízkou impedancí [9].

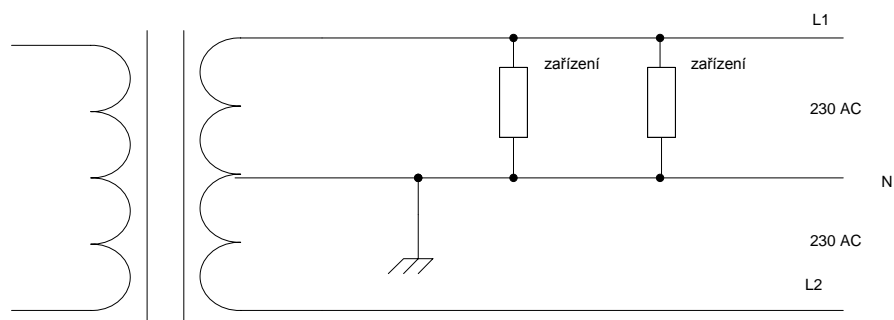


Obr. 2.5: Induktivní navázání signálu

Jelikož je signál z vysílače nejčastěji injektován do jedné fáze střídavého rozvodu, musíme pomocí speciálních filtrů zajistit, aby vf signál byl dodáván do všech fází. Vysvětlím zde některé případy, které mohou nastat při napojení zařízení ovládaných pomocí síťového rozvodu. Pro jednoduchost budu uvažovat jen dvoufázový rozvod z distribučního transformátoru.

2.3.3 Přímá fázová komunikace

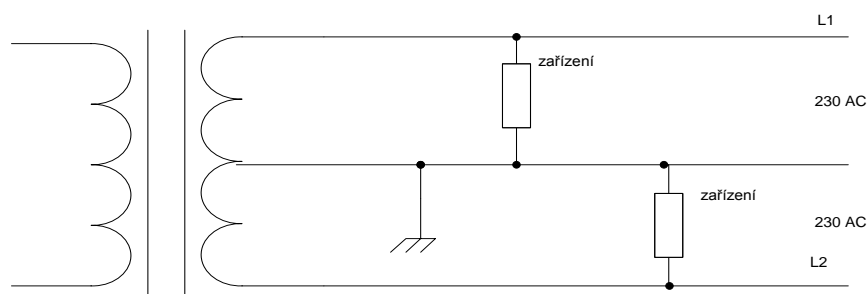
Při přímé fázové komunikaci jsou zařízení na stejné fázi, a pokud nedochází k velkému útlumu na trase, nedochází ani k problémům při komunikaci [1]. Jedná se tedy téměř o ideální stav zapojení vysílače a přijímače, kde jsou pevně spojeny silovými vodiči. Zapojení je znázorněno na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Přímá fázová komunikace

2.3.4 Mezifázová komunikace bez spojení fází

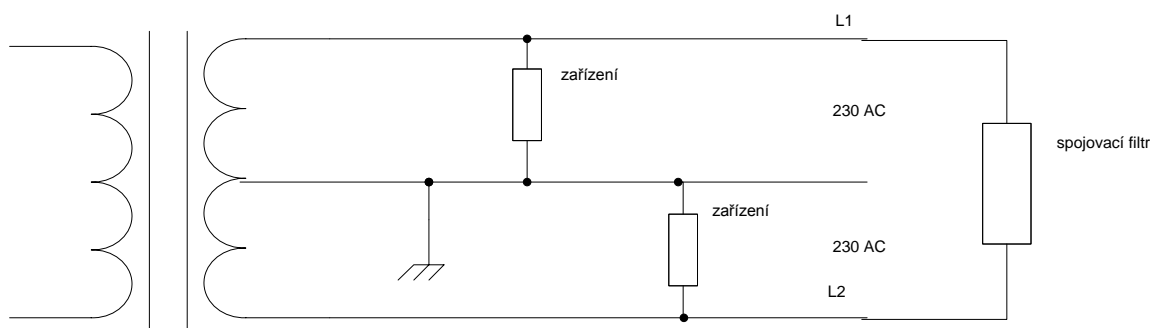
Některé instalace vyžadují, aby uzly byly připojeny k jiným fázím distribuční sítě. Na obrázku 2.7 je realizován distribuční transformátor na frekvenci 50 Hz a komunikační cesta je přes sekundární vedení distribučního transformátoru. V závislosti na transformátorové konfiguraci a zatížení se může signálový útlum pohybovat při frekvencích od 100 kHz do 400 kHz v řádech desítek dB. Pokud dochází ke kombinaci tohoto útlumu se šumem distribuční sítě, nedochází ke komunikaci mezi uzly [1].



Obr. 2.7: Mezifázová komunikace bez spojení fází

2.3.5 Mezifázová komunikace se spojením fází

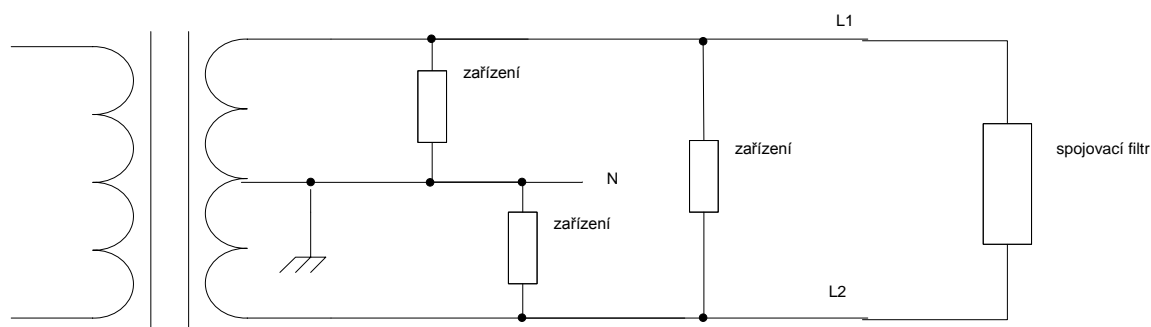
Řešením pro mezifázovou komunikaci může být spojení fází pomocí spojovacího filtru, který slouží pro signálové přemostění fází a má charakteristiku pásmové propusti pro 100 – 130 kHz. Pro tyto kmitočty je konstrukce takové propusti realizovatelná a je zobrazena na obrázku 2.8.



Obr. 2.8: Mezifázová komunikace se spojením fází

2.3.6 Zařízení zapojené mezi fázemi

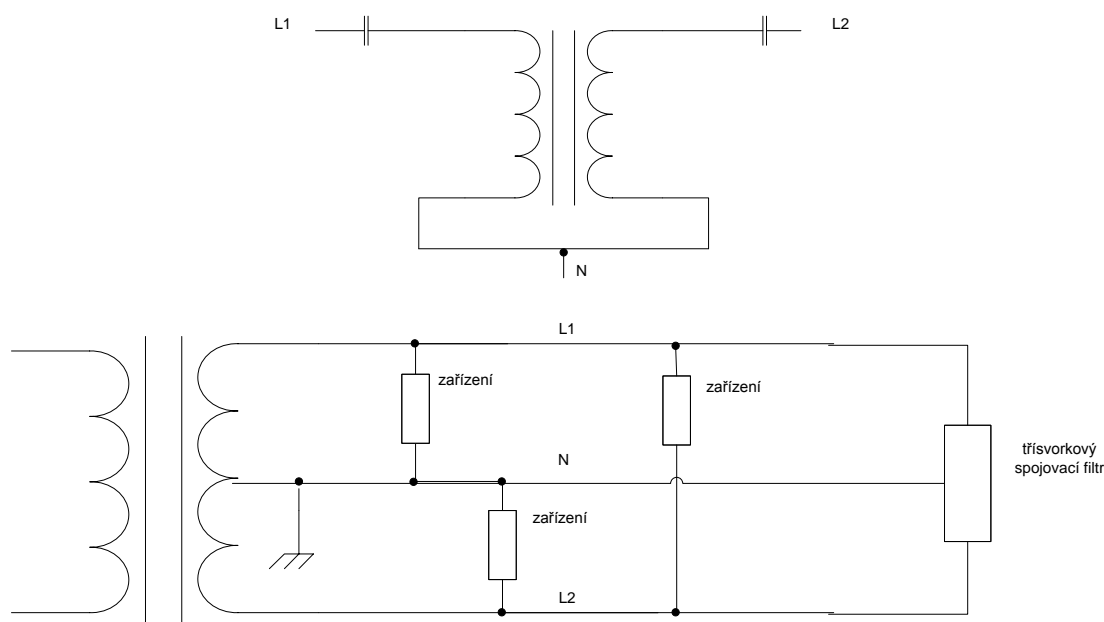
Pokud je zařízení připojeno mezi fáze L1 a L2, dochází ke zkratu pro datový signál, který způsobuje spojovací filtr, jenž je zobrazen na obrázku 2.9. Spojovací filtr funguje správně, pokud mají zařízení společnou zem. Proto je zapotřebí další řešení této situace [1].



Obr. 2.9: Zařízení zapojené mezi fázemi

2.3.7 Řešení mezifázové komunikace

Řešení zapojeného zařízení mezi fázemi je na obrázku 2.10. Je použit třísvorkový spojovací filtr, který dokáže propojit fáze L1 a L2 signálově, nikoli však napěťově [1]. Podle frekvenčního pásma použitého pro přenos dat jsou určeny hodnoty kapacity a induktorů filtru. Tímto lze docílit spojení zařízení mezi fázemi a nulou i mezi fázemi. Signálový útlum je značně menší a pohybuje se okolo 3 dB namísto desítek dB.



Obr. 2.10: Řešení mezifázové komunikace s třísvorkovým filtrem

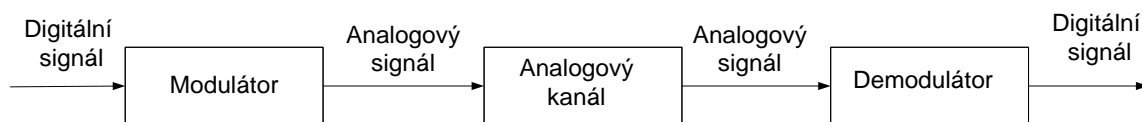
2.4 Modulační techniky

Modulace signálu je nelineární proces, kterým se mění charakter nosného signálu pomocí modulujícího signálu. Při modulaci dochází ke změně některých z parametrů nosného signálu (frekvence, amplituda, fáze) na vysílací straně a na přijímací straně se užitečná data získávají dle těchto změn. Tímto procesem dochází k přenášení užitečného signálu (dat) na nosném signálu. Vždy je tedy zapotřebí modulátor a demodulátor, které musí být zapojeny na opačných koncích komunikačního média. V případě oboustranné komunikace je zapotřebí přenášený signál modulovat a demodulovat na obou stranách. V současné době používají služby PLC úzkopásmové a širokopásmové modulace. Pro spolehlivou komunikaci po napájecích sítích je důležité zvolit vhodný způsob přenosu dat.

Tímto je zřejmá potřeba upravit datový (digitální) signál před samotným přenosem po médiu na analogový a na konci přenosu zpět na digitální. V podstatě tedy používáme zařízení (modem) obsahující modulátor a demodulátor pro přenos digitálních dat analogovou cestou. Existuje mnoho typů složených a jednoduchých modulací. Jednoduchá modulace zpracovává jeden modulační signál a složená modulace zpracovává několik modulačních signálů. Modulací lze také dosáhnout zvýšení přenosové rychlosti s využitím vícecestavových signálů. Na obrázku 2.11 je znázorněn princip přeměny signálu modulací [10].

Rozdělení modulace podle typu nosného signálu:

- Spojité analogové modulace – nosný signál má harmonický průběh v čase a modulační signál je analogový
- Spojité digitální modulace – nosný signál je harmonický a modulační signál je digitální
- Diskrétní modulace – nosný signál má nespojitý průběh



Obr. 2.11: Princip přeměny signálu modulací

2.4.1 Úzkopásmové modulace

Pro spolehlivou komunikaci přes přenosové médium je třeba zvolit vhodný způsob přenosu. Z hlediska realizace jsou nejvýhodnější modulace úzkopásmová o jedné nosné. Tyto modulace se na napájecím vedení používají ve frekvenčním pásmu kolem 100 kHz. Lze je použít pouze pro nízké bitové rychlosti v řádu set kbps [4].

Druhy úzkopásmových modulací:

- FSK (Frequency Shift Keying) – frekvenční klíčování

U této modulace dochází ke změně kmitočtu nosného signálu vlivem modulačního signálu. Je založena na klíčování značky či mezery pomocí dvou rozdílných kmitočtů. Rozdíl klíčovacích kmitočtů je označován jako zdvih neboli shift.

- PSK (Phase-Shift Keying) – fázové klíčování

Tento druh modulace, u které se nastavuje modulační signál fázi nosného signálu na předem určené hodnoty. BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulace se využívá u binárního modulačního signálu, kde jsou fáze navzájem otočené o 180° . Pro omezení chyb při demodulaci se využívá DPSK (Differential Phase Shift Keying) modulace, u které se fáze signálu posouvá vůči předešlému intervalu. Kombinací BPSK a DPSK vzniká DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), která spojuje výhody obou těchto modulací.

- GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)

Jedná se o speciální typ diferenčního fázového klíčování, kde je vysílání logické 1 (logické 0) reprezentováno kladnou (zápornou) změnou fáze. V rámci jedné vysílací periody je možný jeden ze dvou stavů. Přenosová rychlost je rovna modulační a zvýšit ji lze jen zvýšením počtu symbolů vysílaných během periody. Využívá několik málo nosných frekvencí s šířkou pásma v řádu MHz. Při vyšších přenosových rychlostech než 2Mbps je signál odolný proti úzkopásmovému a impulznímu rušení.

2.4.2 Širokopásmové modulace

Tyto modulace se používají pro kmitočtové pásmo od 2 MHz do 30MHz, a lze tak dosáhnout výrazně vyšších přenosových rychlostí, které se v těchto dnech pohybují v řádech stovek Mbps.

Druhy širokopásmových modulací:

- DSSSM (Direct Sequence Spread Spektrum Modulation)

Technika přímého rozprostření spektra, která slouží nejčastěji k rozšíření spektra bezdrátového přenosu dat. Bity určené k přenosu jsou nahrazeny početnější sekvencí bitů, které mají pseudonáhodný charakter. Jde tedy o zavedení redundance a bez znalosti původní pseudonáhodné sekvence se přenášený signál jeví jako náhodný šum.

- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

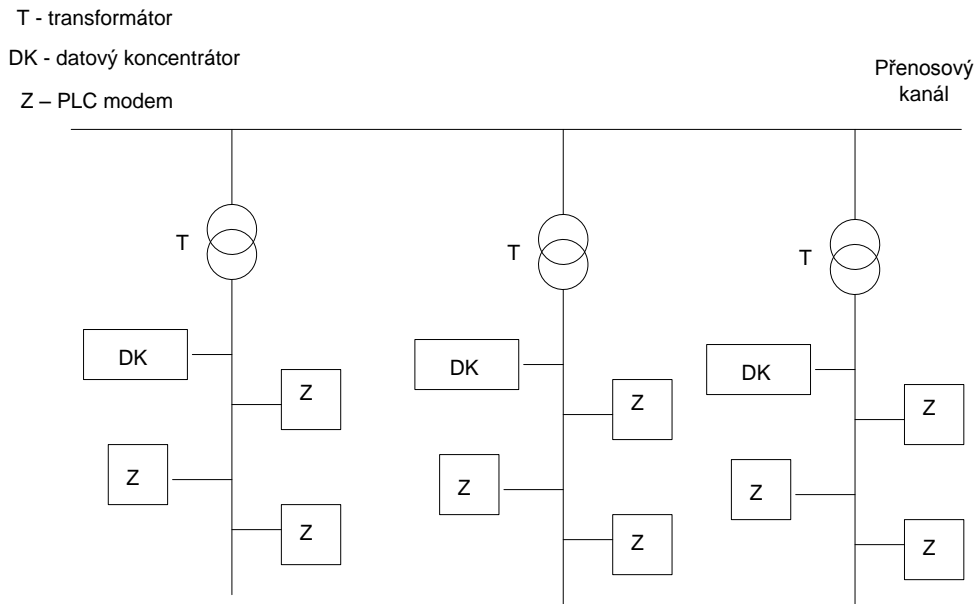
V současnosti nejvyžívanější metoda širokopásmové modulace. Jedná se o přenosovou techniku pracující s tzv. rozprostřeným spektrem, kdy je signál vysílán na více nezávislých frekvencích, což zvyšuje odolnost vůči interferenci. Jednotlivé nosné jsou modulovány robustními modulacemi (QPSK, 16QAM, 64QAM) a jsou vzájemně ortogonální, takže maximum každé nosné se překrývá s minimy ostatních. Každý přenosový kanál můžeme samostatně sledovat, zda je rušen nebo použitelný pro přenos. Největší výhodou je vyhodnocování chybovosti v reálném čase, tedy jak moc se na nich projevuje rušení, poruchy a útlumy. Podle těchto informací se buďto kanál pro přenos využije či nikoliv. Hlavní nevýhodou ortogonálních nosných je vysoký poměr mezi špičkovým a středním výkonem. Proto jsou také vyžadovány zesilovače se širokým lineárním rozsahem, které jsou schopny eliminovat vysoký poměr výkonu [4].

2.5 Topologie sítí v PLC

Tak jako v LAN sítích, tvořených pomocí ethernet technologie, máme několik základních topologií PLC sítě [7]. Lze tak vytvořit vzájemným propojením vedení topologii sběrníkovou, hvězdicovou a kruhovou. Každá z těchto topologií přináší určité výhody a nevýhody, které jsou popsány níže.

2.5.1 Sběrníková topologie

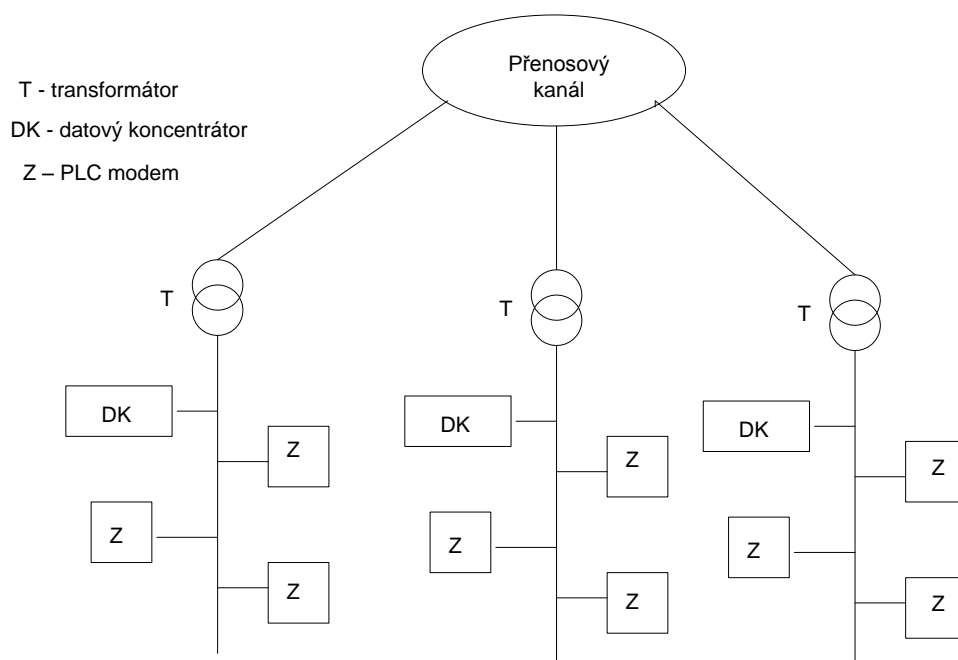
Principiální zapojení této topologie lze vidět na obrázku 2.12. Hlavním prvkem je sdílený přenosový kanál, ke kterému jsou připojována všechna komunikující zařízení. Sdílení přenosového kanálu přináší nízké náklady na realizaci, která je ovšem kompenzována nespolehlivostí nastávající při poruše přenosového kanálu. V takovém případě je znemožněna komunikace zařízení zapojených za místem poruchy.



Obr. 2.12: Principiální zapojení sběrnice topologie

2.5.2 Hvězdicová topologie

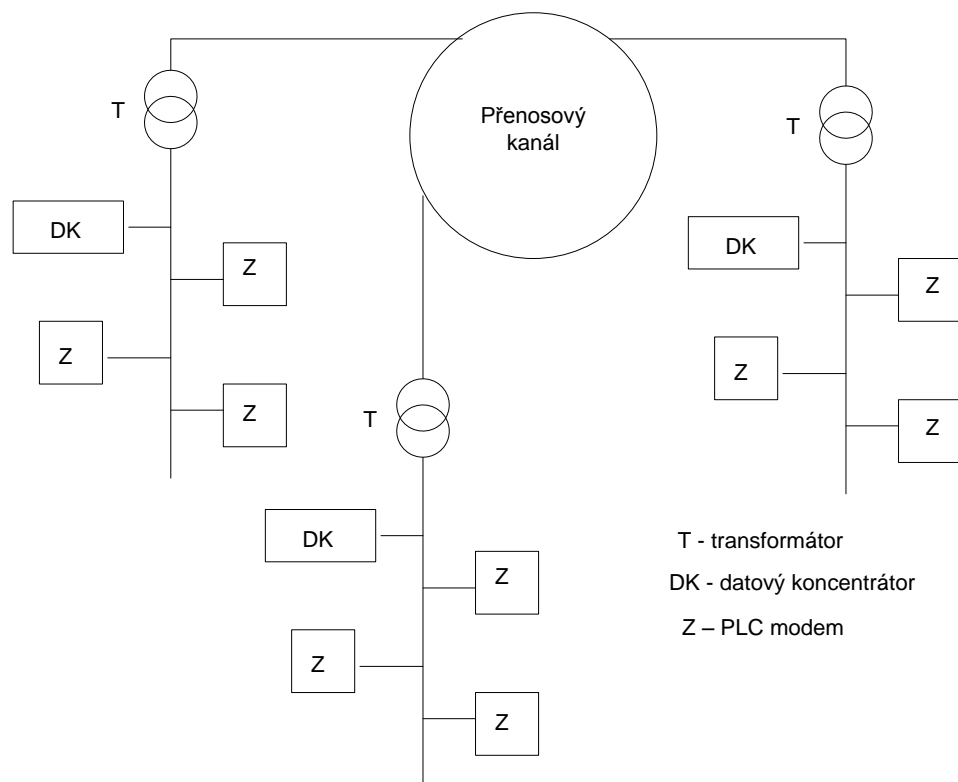
Ve hvězdicové topologii je základem centrální prvek sítě [7]. Z tohoto místa jsou paprskovitě připojována komunikující zařízení. Při přerušení jednoho spojení dochází pouze k výpadku tohoto spojení, a ostatní zařízení jsou tedy schopna komunikovat nezávisle na sobě. Toto zapojení je zobrazeno na obrázku 2.13.



Obr. 2.13: Principiální zapojení hvězdicové topologie

2.5.3 Kruhová topologie

U této topologie, která je znázorněna na obrázku 2.14, datový signál postupuje po smyčce v jednom směru a prochází všemi připojenými zařízeními. Jednotlivé zařízení datový signál zesilují a posílají ho dále. Napájení této sítě je provedeno ze dvou stran, a tak při poruše nedojde ke kompletnímu odpojení všech zařízení, ale jen určité části. Vzniká tak hlavní výhoda, kterou je z hlediska spolehlivosti kruhová topologie nejlepší, možnosti rekonfigurace topologie při poruše [7].



Obr. 2.14: Principiální zapojení kruhové topologie

2.6 Přístupové metody

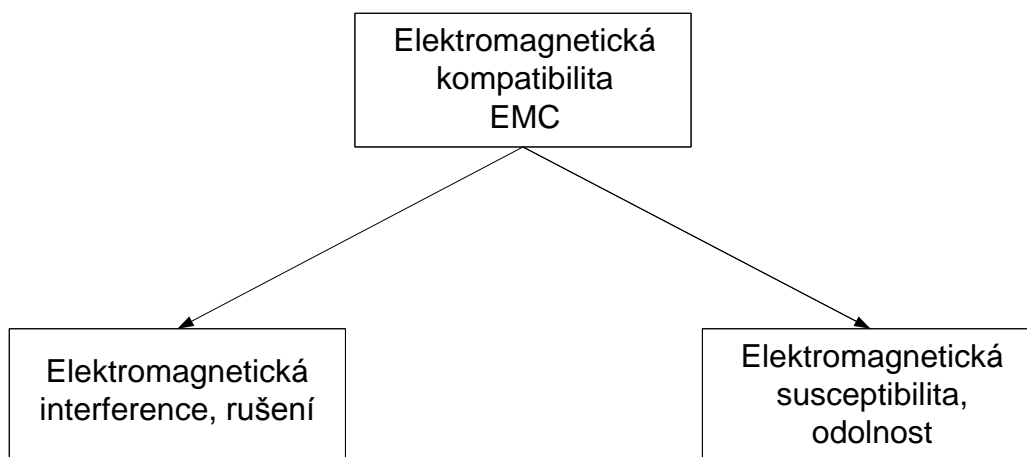
PLC vyžaduje specifické řešení přístupu k přenosovému prostředku. To je k protokolu MAC (Medium Access Control). Aby bylo zajištěno spolehlivého přenosu dat, musí přístupové protokoly provádět detekci a opravu chyb, účinné adaptivní vyrovnávání a fragmentaci paketů do krátkých rámců. Přenos se realizuje po krátkých datových rámcích, protože při přenosu větších souvislých informací dojde k chybám. Je tedy potřebné kromě mechanismu detekce chyb použít i mechanismy opravné. Pro PLC se jako metoda přístupu nejvíce hodí deterministické předávání tokenu. Právo vysílat (rámec token) obdrží vždy pouze jediný uzel. Pro přenos tokenu mezi uzly se používá spolehlivá dohadovací metoda ve třech krocích (free-way handshake). Tímto se předává token mezi uzly deterministicky a nehrozí přitom ztráta tokenu. I když všechny uzly nemusí slyšet každé vysílání v síti, protože elektrické sítě se u každého přípojného uzlu liší, právo vysílat má díky tokenu jen jeden uzel. Proto nedochází k současnému vysílání a kolizím [4].

Forward error correction:

Dopředná oprava chyb (FEC - Forward error correction) se používá k minimalizaci počtu opětovného vysílání a detekce chyb ke zjištění, jestli je třeba znovu vyslat některý rámeček. Každý rámeček se potvrzuje pro zajištění spolehlivosti a tím nedochází ke ztrátám rámečků. Přijímač v PLC musí být schopen se přizpůsobovat neustálým změnám v elektrické síti, protože se podmínky v elektrické síti neustále mění. Přijímači tak pomáhá adaptivní vyrovnávání, aby se mohl přizpůsobovat každému dalšímu rámečku [4].

2.7 Rušení v PLC sítích

V případě systémů PLC dochází i k velmi silnému rušení [6]. Proto je důležité zajištění elektromagnetické kompatibility. Je žádoucí, aby zařízení, systémy či přístroje vykazovaly správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiná zařízení a naopak. Elektromagnetickou kompatibilitu lze principiálně rozdělit na dvě části, jak lze vidět na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Rozdělení elektromagnetické kompatibility

Samotné zařízení PLC může být objektem rušení od jiných zařízení, kdy se jedná o elektromagnetickou susceptibilitu nebo naopak samo může být zdrojem rušení pro ostatní zařízení, pak hovoříme o elektromagnetické interferenci. Energetická síť má jako přenosové médium nestálé parametry, a proto není primárně dimenzována pro VF provoz, který využívají širokopásmové PLC systémy. S každým dalším zařízením připojeným do sítě se parametry rušení dynamicky mění a jsou výraznější tím více, čím víc jsou zapojeny v blízkosti přijímače. Na obrázku 2.2 jsou znázorněny možné zdroje rušení.

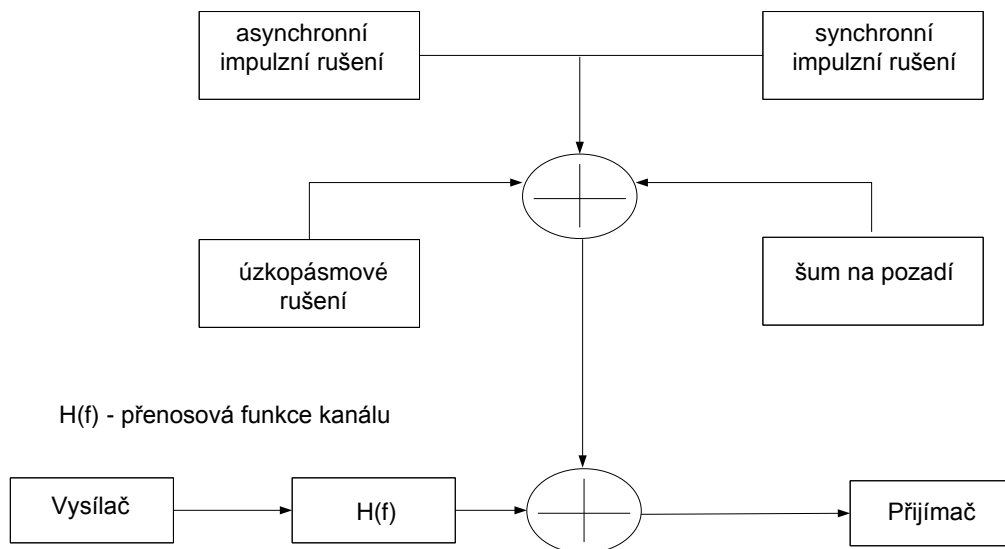
Šum na pozadí – v síti je přítomen vždy a vzniká skládáním velkého počtu zdrojů rušení a jeho parametry jsou proměnlivé v čase. Popisuje se spektrální výkonovou hustotou neboli PSD (Power Spectral Density), která s rostoucím kmitočtem klesá. Na frekvencích do 20 kHz jsou hodnoty PSD vysoké a při frekvencích pohybujících se okolo 150 kHz je úroveň PSD řádově tisíckrát nižší [6].

Impulzní rušení – Vyskytuje se v energetických sítích velmi často a je způsobováno tyristorovými regulátory, kolektorovými elektromotory nebo spínanými zdroji. Je charakteristické napětovými špičkami o délce trvání od jednotek do stovek

μs , které dosahují úrovně PSD o 10 až 50 dB více než šum na pozadí. Impulzní rušení lze rozdělit na asynchronní a synchronní [6].

- **Synchronní** – Obsahuje synchronní impulzy ke kmitočtu elektrického vedení, které se opakují v rozsahu 50 až 100 Hz. Tyto impulzy mají dobu trvání v jednotkách ms a s kmitočtem snižující spektrální výkonovou hustotu. Nejčastěji je tento typ šumu způsobován napájecími zdroji, které pracují synchronně s kmitočtem vedení.
- **Asynchronní** – Obsahuje asynchronní impulzy ke kmitočtu elektrického vedení, které se opakují v rozsahu 50 až 200 kHz. Rušící impulzy jsou generovány spínacími prvky zapojenými v distribuční síti. Délka trvání takto vytvořených impulzů se pohybuje v délce 10 - 100 μs a výkonová spektrální hustota může přesahovat 50dB nad hladinou šumu v pozadí.

Úzkopásmové rušení – na frekvencích pohybujících do 150 kHz jej způsobují nejčastěji spínané procesy, zářivky, televize a počítačové monitory. Při vyšších frekvencích rušení pochází od rozhlasových stanic vysílajících ve středovlnném a krátkovlnném pásmu [6].



Obr. 2.2: Možné zdroje rušení na přenosové cestě PLC

3 NÁVRH DOMÁCÍ SÍTĚ LAN

Pro návrh domácí sítě LAN pomocí technologie PLC lze použít standard HomePlug AV nebo DS2. Mezi základní rozdíly těchto technologií patří uživatelská přívětivost, kdy technologie HomePlug AV je především určena pro běžné používání v domácnosti s obsluhou bez větších IT znalostí. Standard DS2 nabízí ve srovnání s první jmenovanou technologií mnohem rozsáhlejší možnosti softwarového i hardwarového nastavení. Právě z důvodu možnosti volby komunikačního pásma, dohledu nad sítí pomocí Network management service (NMS) a možnosti zapojení opakováčů signálu jsem zvolil pro návrh sítě tuto technologii.

3.1 Systém s technologií DS2/Defidev

Pro návrh sítě LAN byl vybrán PLC systém s technologií DS2/Defidev. Ústředním bodem tohoto systému je centrální zařízení Head-End (HE), které komunikuje s koncovým modemem (CPE). Datový signál je injektován indukční cívkou na jednu fázi elektrických rozvodů v domě. V případě souběhu více fází v minimální délce 2 metrů dochází k indukci signálu i na ostatní fáze. Maximální dosah takového signálu je do vzdálenosti 300m a v případě použití Reapeterů (REP) libovolný. Všechna výše uvedená zařízení (HE, CPE, REP) pracují na síťové vrstvě TCP/IP modelu a mají dynamicky přidělovány IP adresy pomocí modulu NMS. Tímto zařízením se celá PLC síť konfiguruje a spravuje.

3.1.1 Head-End (HE)

Jedná se o centrální zařízení umožňující propojit WAN síť s PLC přístupovou sítí na elektrických rozvodech [3]. HE tedy provádí injektáž signálu na elektrické rozvody. Místo injektáže signálu by mělo být voleno s ohledem na jednotlivé fáze elektrického rozvodu. V případě umístění centrálního bodu na místo souběhu více fází dochází k injektáži signálu na všechny fáze. V tomto bodě rovněž dochází ke konfiguraci všech prvků, které jsou přiřazeny danému HE s pomocí NMS. Existuje několik komerčně dostupných modelů a mnou vybrané zařízení je AMH – 201.

AMH – 201, Head-End/repeater

Zařízení je primárně navrženo pro využití jako repeater, tak i jako centrálního bodu head-end. Injektáž signálu provádí pouhým zasunutím do elektrické zásuvky. Na obrázku 3.1 je zobrazena jeho reálná fotografie. Z důvodu kompatibility s ostatními produkty je možné využít dvě zařízení. Jedno v módu HE a druhé v REP.



Obr. 3.1: AMH-201, Head-End/Repeater (32MAC)

Tab. 3.1: Technické specifikace AMH-201

| AMH - 201 | | | |
|---------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Rozměry | 93 x 62 x 37 | Spektrální hustota výkonu | -56 dBmW/Hz |
| Provozní teplota | 0°C - 40°C | Indikátor stavu LED | Power/ETH/PLC |
| Jištění | IP20 | Rychlost přenosu dat | Do 200Mbps |
| MeanTime Between Failure | 72000h | Čipová sada DS2 | DSS9001 |
| Vstupní napětí | 100–240 Vac | Podporované protokoly | TCP/IP-DHCP-TFTP-SNMP-VLAN.OOS |
| Vstupní frekvence | 60Hz – 50Hz | Počet podporovaných MAC adres | 64 |
| Spotřeba energie | 6,6 W | Počet podporovaných PLC uzlů | 32 |
| Modulace | OFDM | Počet VLAN | 16 |
| Počet frekvenčních nosičů | 1536 | Dostupná nastavení | HE/REP/CPE |

3.1.2 Repeater (REP)

Tohle zařízení je určeno k takzvanému opakování (zesílení) přenášeného signálu po elektrickém vedení, a lze tak jednoduše neomezeně zvyšovat dosah vysokofrekvenčního datového signálu po elektrickém vedení. Ve srovnání s výše uvedeným prvkem HE se k repeateru nepřivádí WAN konektivita, ale slouží pouze v režimu opakováče užitečného signálu [3]. V našem případě je použito stejné zařízení jako u prvku HE, které lze konfigurovat vzdáleně za pomoci NMS, a přepínat tak mezi funkcí HE a REP.

3.1.3 Modem (CPE)

Hlavním úkolem koncového uživatelského modemu (CPE) je zpětný převod vysokofrekvenčního signálu z PLC sítě na dnes nejrozšířenější ethernet rozhraní s konektorem RJ45 [3]. Koncový bod lze zapojit do jakékoli zásuvky v rámci objektu, která je provozována na stejné elektrické fázi připojeného HE bodu. Na trhu je dostupných hned několik komerčních řešení CPE, která lze jednoduše vzdáleně konfigurovat s pomocí NMS. Mnou vybrané zařízení je AMH - 200.

AMH – 200, CPE modem

Jedná se o koncový uživatelský modem pro převod vysokofrekvenčního signálu z elektrické sítě na ethernet rozhraní s konektorem RJ45. V tabulce 3.2 jsou vypsány technické specifikace. Zapojení tohoto modemu se provádí pouhým zasunutím do elektrické zásuvky a je plně kompatibilní s ostatními produkty Defidev/DS2. Použitá čipová sada DSS9010 je optimalizována pro přenos audio signálů od VOIP po DVD hi-fi signál. Podporuje připojení až 16 zařízení s MAC adresou a zaměřením na domácí peer-to-peer síť je vhodný pro realizaci LAN.

Tab. 3.2: Technické specifikace AMH-200

| AMH - 200 | | | |
|---------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Rozměry | 93 x 62 x 37 | Spektrální hustota výkonu | -56 dBmW/Hz |
| Hmotnost | 195g | Frekvenční rozsah | 2MHz – 34MHz |
| Provozní teplota | 0°C - 40°C | Indikátor stavu LED | Power/ETH/PLC |
| Jištění | IP20 | Rychlost přenosu dat | Do 200Mbps |
| MeanTime Between Failure | 72000h | Čipová sada DS2 | DSS9010 |
| Vstupní napětí | 100–240 Vac | Podporované protokoly | TCP/IP-DHCP-TFTP-SNMP-VLAN.OOS |
| Vstupní frekvence | 60Hz – 50Hz | Počet podporovaných MAC adres | 32 |
| Spotřeba energie | 6,6 W | Počet podporovaných PLC uzlů | 15 |
| Modulace | OFDM | Počet VLAN | 1 |
| Počet frekvenčních nosičů | 1536 | Dostupná nastavení | CPE |

3.1.4 Network management systém (NMS)

Network management systém je neméně důležitou součástí PLC sítě. Slouží k zjednodušené vzdálené konfiguraci sítě na bázi systému DS2/Defidev [3]. Pomocí tohoto management systému lze přes webové rozhraní plně konfigurovat volitelné parametry u všech HE, REP a CPE bodů zapojených v síti. Široká nabídka nastavení od síťového rozhraní, šířky využívaného pásma až po QOS a VOIP parametrů vytváří z MNS velice důležitý a užitečný nástroj PLC sítě. Z dostupných produktů je pro naše účely nejvhodnější AGW-200.

AGW-200, NMS

Zařízení AGW-200 je nedílnou součástí PLC sítě DS2/Defidev a plní funkci NMS. Propojením s počítačem a HE bodem lze přes webové rozhraní plně konfigurovat všechny dostupné parametry sítě. Samotné zařízení nabízí jak LAN, WAN porty, tak i WiFi rozhraní, pomocí kterého lze také konfigurovat PLC síť vzdáleně. Na obrázku 3.2 je zobrazena reálná fotografie tohoto zařízení

Vlastnosti:

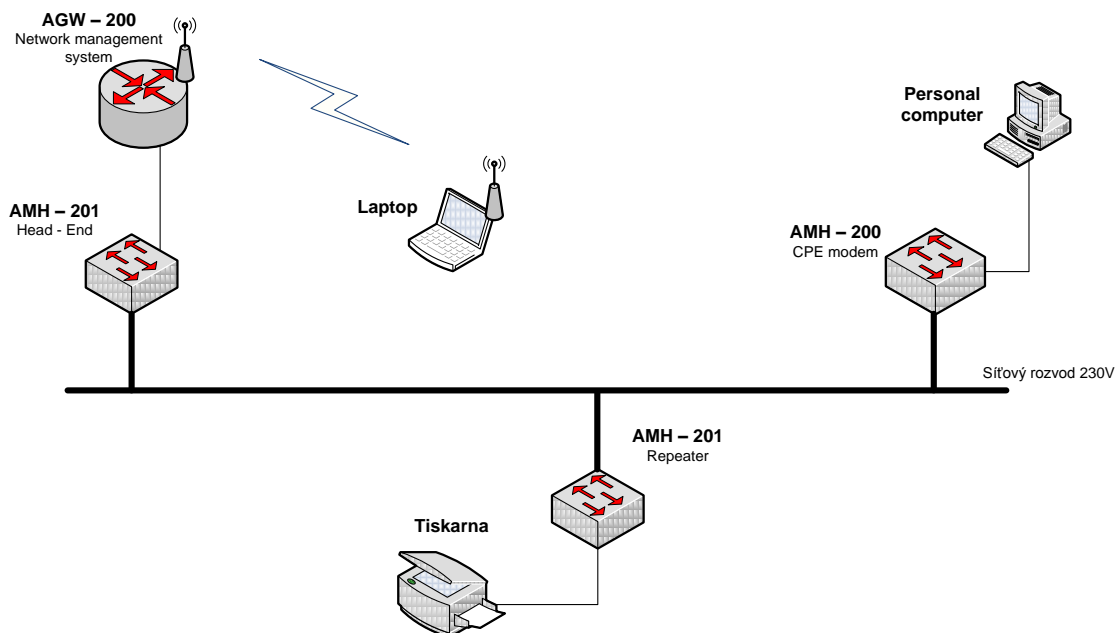
- AP of IEEE 802.11g, Router
- Defidev PLC Network Management Systém
- RJ-45 rozhraní pro ADSL/kabel/PLC modem
- WiFi rozhraní
- 3x LAN, 1x WAN port
- Podpora virtuální a globální IP adresy
- Podpora SNMP
- Podpora auto provisioning
- Součinnost s Cisco, Nortel & Alcatel soft switch



Obr. 3.2: AGW-200, Systém pro konfiguraci, správu a management

3.1.5 Zapojení PLC sítě

Na obrázku 3.3 je znázorněna fyzická topologie navrhované LAN. PLC směrovač AGW – 200 s network management systémem je spojen s AMH – 201 pomocí 100 Mbps ethernet linky, který je nakonfigurován v módu Head-End. HE bod je následně zapojen přímo do zásuvky elektrické sítě 230V. V tomto bodě dochází k injektáži vysokofrekvenčního signálu přímo na fázi elektrického rozvodu, který může být dále pomocí stejného zařízení v režimu repeater obnovován a poslán dále po elektrickém vedení. Na druhém konci takto vytvořené LAN je zapojeno zařízení AMH – 200 v režimu koncového modemu (CPE), který převádí vysokofrekvenční datový signál zpět na ethernet rozhraní. Opakovací zařízení je vhodné použít k zesílení signálu všude tam, kde dochází ke snížení kvality přenášeného datového signálu vlivem vzdálenosti nebo rušením přenosového média. Nastavení celé sítě se provádí připojením Laptopu pomocí WiFi sítě na AGW – 200 a konfigurací jednotlivých zařízení přes webové rozhraní network management systému.

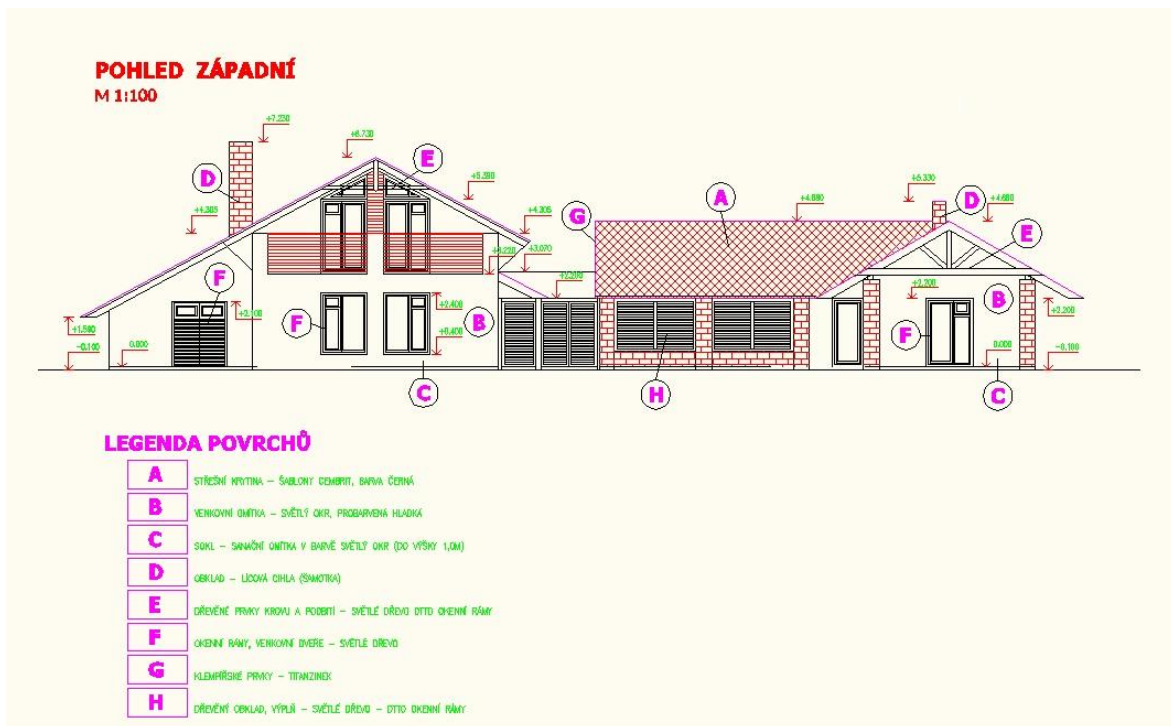


Obr. 3.3: Principiální zapojení PLC LAN sítě

4 REALIZACE A MĚŘENÍ PLC SÍTĚ

Na obrázku 4.1 je zobrazen objekt, ve kterém proběhlo měření PLC sítě. Měření jsem zaměřil na jednotlivé fáze třífázové elektrické instalace, jehož rozvody jsou vyrobeny z mědi. V případě vhodného umístění zařízení AMH – 201 pro injektáž datového signálu docházelo k šíření vysokofrekvenčního signálu i na ostatní fáze elektrického rozvodu. Byly změřeny i hodnoty při mezifázové komunikaci a vhodně porovnány s komunikací na stejné elektrické fázi.

Pro testování a měření parametrů sítě byly použity dvě metody, které pracují na síťové a transportní vrstvě TCP/IP modelu. Na měření síťové vrstvy bylo použito zařízení Trend Unipro GbE, které pracuje v souladu s doporučením RFC 2544. V tomto doporučení jsou popsány výkonnostní testy síťových zařízení a formát prezentace jejich výsledků. Jako druhý způsob měření byl zvolen program Iperf, který pracuje na transportní vrstvě TCP/IP modelu. Pomocí této metody lze generovat na vytvořené síti TCP a UDP provoz a současně měřit výstupní hodnoty Bandwidth (aktuální šířka pásma), Lossrate (ztrátovost spojení), Jitter (kolísání zpoždění). Z takto změřených dat na jednotlivých protokolech a vrstvách lze jednoznačně určit parametry LAN sítě a její vhodnost či nevhodnost pro domácí použití.



Obr. 4.1: Rodinný dům určený pro realizaci PLC sítě

4.1 RFC 2544

Benchmarking Methodology Working Group vydala v roce 1999 dokument doporučující metodu testů RFC 2544 Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices, který nahrazuje starší dokument RFC 1242. Tento dokument popisuje metodiku testování síťových zařízení a způsob prezentace jejich výsledků. Níže jsou blíže uvedeny jednotlivé testy a jejich metodiky splňující normu RFC 2544 [8].

Throughput test (Propustnost)

Test propustnosti vyjadřuje maximální rychlost zaslání rámců, u kterého nedochází k zahazení žádného rámce. Principiální funkcí tohoto testu je porovnávání přijatých rámců od testovacího zařízení vzhledem k množství odeslaných rámců. Jestliže je počet přijatých rámců shodný s počtem odeslaných rámců, zvýšíme rychlost vysílání a test opakujeme. V případě nižšího počtu přijatých rámců rychlost naopak snížíme. Minimální délka testu je definována na 60s [8].

Latency test (Zpoždění)

Úkolem testu je zjištění zpoždění procházejících rámců sítě. Je důležité zajistit propustnost posílaných rámců přes dané přenosové médium. Rámce jsou zasílány po dobu nejméně 120s rychlostí, která byla naměřena u testu propustnosti. Po 60s je odeslán označený rámeček a zaznamenán čas, kdy byl zcela odeslán. Přijímací strana takto označený rámeček rozezná a zaznamená čas příchodu. Výsledné zpoždění je tak určeno rozdílem těchto naměřených hodnot [8].

Frame lost test (Ztrátovost)

Ztrátovost vyjadřuje v procentech počet rámců, které jsou zařízením přeneseny vzhledem k počtu zaslaných rámců. Při testu jsou rámce zasílány maximální rychlostí pro dané médium a poté je test opakován s postupným snižováním rychlostí o 10%. Testování se provádí do okamžiku, kdy dosáhneme ve dvou testech ztráty žádného rámečku.

Back to back frame test

Pomocí tohoto testu lze zjistit schopnost testovaného zařízení pracovat s back to back rámcí. Jedná se o rámce pevné délky, které jsou vyslány za sebou v minimálním povoleném intervalu pro dané médium. Při testu se zasílá shluk back to back rámců do daného zařízení a sleduje se počet přijatých rámců. V případě rovnosti počtu přijatých a odeslaných rámců test opakujeme se zvýšeným počtem rámců. Pokud je počet přijatých rámců nižší v porovnání s odeslanými, test opakujeme se sníženým počtem rámců. Výsledkem testu je počet rámců v nejdelším shluku, ve kterém nedošlo ke ztrátě ani jednoho rámečku. Výsledkem je průměr hodnot z jednotlivých testů, které musí trvat nejméně dvě sekundy a měly by být opakovány nejméně padesátkrát [8].

Systém recovery test (Zotavení se po přetížení)

Výsledkem tohoto testu je určení schopnosti daného zařízení zotavit se ze stavu přetížení. V první fázi tohoto testu se zjišťuje propustnost zařízení pro danou velikost rámečku. Dále se posílá tok rámců trvajících alespoň 60s se 110% rychlostí zjištěnou v testu propustnosti. V případě vyšší rychlosti než maximální dochází ke snížení rychlosti vysílání na polovinu. Zaznamená se čas a poté čas poslední ztráty testovacího rámečku. Výsledkem je rozdíl zaznamenaných časů [8].

4.2 Měření dle normy RFC 2544

Měření bylo provedeno přístrojem Trend Unipro GbE, který umožňuje monitorování provozu na datové síti dle specifikací normy RFC 2544. Tento přístroj lze využít v režimu koncového bodu, pasivního monitoringu a smyčky. V našem případě bylo využito režimu smyčky, kdy jeden přístroj v tomto režimu otáčel datový provoz na fyzické vrstvě a druhý vyhodnocoval vyslané a přijaté rámce. Měření bylo provedeno na stejné i rozdílné fázi elektrických rozvodu a to na vzdálenosti 1m až 50m. Měřeno bylo všech pět parametrů sítě dle doporučení RFC 2544. V případě back to back testu nejsou hodnoty uváděny, protože v každém měření vyšly nulové.

Pro nadměrný počet změřených hodnot jsou níže uvedeny měření ze vzdáleností 1, 10, 30 a 50 metrů. Kompletní změřené hodnoty jsou uloženy na příloženém CD.

4.2.1 Měření na délce vedení 1m

Měření pomocí přístroje Trend Unipro GbE probíhalo i na nejmenší možnou vzdálenost, kdy byly přístroje zapojeny do stejné elektrické zásuvky. Z tohoto důvodu nebylo možné realizovat měření na rozdílných fázích elektrického rozvodu, ale pouze na stejné fázi. Měřeno bylo všech 5 parametrů dle normy RFC 2544. V sérii tabulek 4.1 – 4.3 jsou zaznamenány hodnoty propustnosti (throughput), recovery time, ztrátovosti (frame loss rate) a zpoždění (latency) v závislosti na změně velikosti rámce. Nejdůležitější parametry propustnosti a ztrátovosti jsou zobrazeny v sérii obrázků 4.2 – 4.3. Na obrázku 4.2 dochází při zvyšování velikosti rámce k nelineárnímu poklesu frame rate a tím ke zvyšování propustnosti (throughput). Závislost změny ztrátovosti na frame rate u všech měřených velikostí rámce je zobrazena na obrázku 4.3. Při zvyšování frame rate dochází až k ztrátovosti 79,81% u velikosti rámce 128byťů.

Tab. 4.1: Propustnost a recovery time na stejné fázi ve vzdálenosti 1m

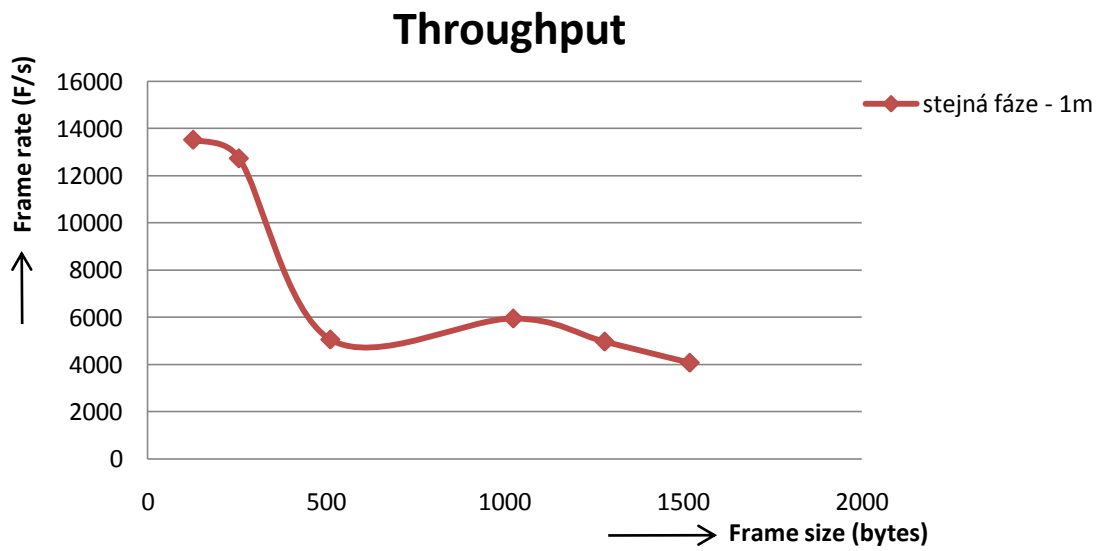
| Frame size (bytes) | Frame rate (F/s) | Throughput | | Recovery time (μs) |
|-----------------------|---------------------|------------|----------|-----------------------|
| | | (%) | (b/s) | |
| 128 | 13528 | 16.0172 | 13852672 | 0 |
| 256 | 12737 | 28.1238 | 26085376 | 0 |
| 512 | 5048 | 21.4845 | 20676608 | 0 |
| 1024 | 5939 | 49.6033 | 48652288 | 192893 |
| 1280 | 4957 | 51.5549 | 50759680 | 281366 |
| 1518 | 4063 | 49.9939 | 49341072 | 0 |

Tab. 4.2: Ztrátovost na vzdálenost 1m

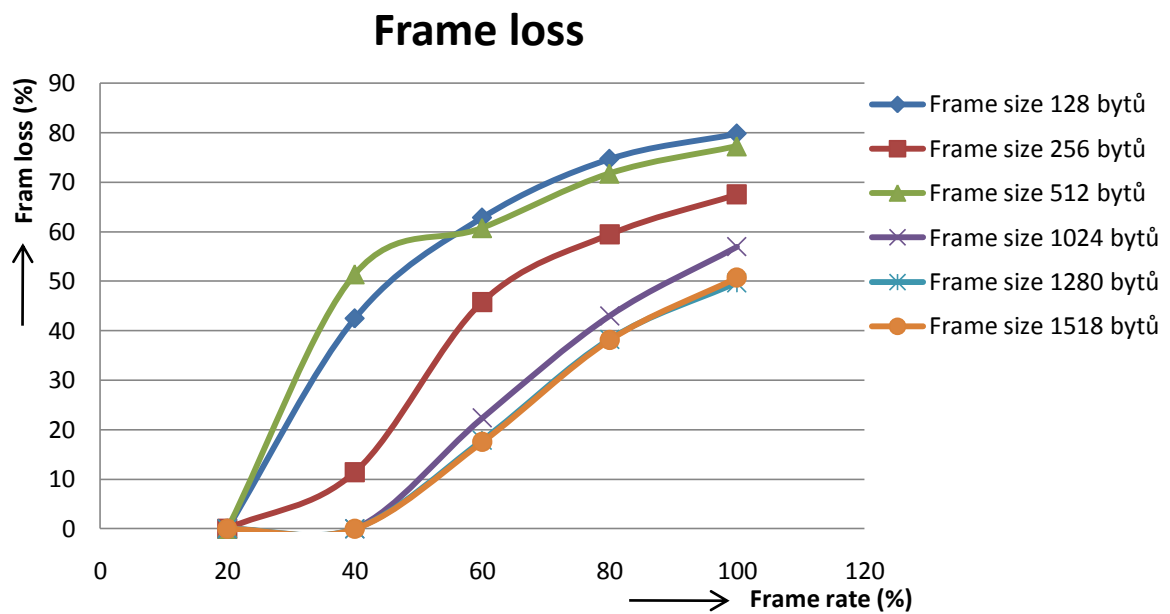
| Frame rate (%) | Frame size (bytes) | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1280 | 1518 |
| | Frame loss rate (%) | | | | | |
| 100 | 79,81 | 67,542 | 58,66 | 56,992 | 49,712 | 50,728 |
| 80 | 74,692 | 59,48 | 47,744 | 43,026 | 38,274 | 38,12 |
| 60 | 62,838 | 45,83 | 69,962 | 22,358 | 17,854 | 17,528 |
| 40 | 42,486 | 11,43 | 0,012 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 17,946 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 4.3: Zpoždění na vzdálenost 1m

| Frame size (bytes) | Latency (μ s) | Type of transmission medium | Frame rate (b/s) |
|--------------------|--------------------|------------------------------|------------------|
| 128 | 2386 | Twisted pair / Power line | 13852672 |
| 256 | 5654,7 | | 26085376 |
| 512 | 4073,6 | | 20676608 |
| 1024 | 65522,3 | | 48652288 |
| 1280 | 112722 | | 50759680 |
| 1518 | 137397 | | 49341072 |



Obr. 4.2: Závislost rychlosti vysílání rámců na změně velikosti rámce ve vzdálenosti 1m.



Obr. 4.3: Závislost ztrátovosti na rychlosti vysílání rámců ve vzdálenosti 1m

4.2.2 Měření na délce vedení 10m

Měření na vzdálenost 10m bylo provedeno na stejných i rozdílných fázích elektrického rozvodu. Při porovnání změřených hodnot v sérii tabulek 4.4 ÷ 4.8 je značný pokles propustnosti (throughput) a zvýšení ztrátovosti (frame loss rate) na rozdílné elektrické fázi. Zhoršení parametrů sítě přisuzují většímu zarušení frekvenčního pásma 4 – 34 MHz, ve kterém probíhal datový přenos. Na stejné elektrické fázi je nejvyšší dosahovaná propustnost 30445008 b/s při velikosti rámce (frame size) 1518 bytů. U datové komunikace přes rozdílnou elektrickou fázi byla nejvyšší naměřená hodnota 17329488 b/s při velikosti rámce 1518 bytů. Obdobně také došlo ke zvýšení ztrátovosti, jehož nejnižší hodnota je 0 % u stejné elektrické fáze a 29,082 % u rozdílné elektrické fáze. Na obrázcích 4.4 ÷ 4.6 jsou v grafech přehledně zobrazeny průběhy propustnosti (throughput) a ztrátovosti (frame loss).

Tab. 4.4: Propustnost a recovery time na stejné fázi ve vzdálenosti 10m

| Frame size (bytes) | Frame rate (F/s) | Throughput | | Recovery test (μs) |
|--------------------|------------------|------------|----------|--------------------|
| | | (%) | (b/s) | |
| 128 | 11879 | 14.0648 | 12164096 | 0 |
| 256 | 8844 | 19.5279 | 18112512 | 0 |
| 512 | 6058 | 25.7831 | 24813568 | 0 |
| 1024 | 3507 | 29.2909 | 28729344 | 2592,59 |
| 1280 | 2966 | 30.8476 | 30371840 | 0 |
| 1518 | 2507 | 30.8478 | 30445008 | 0 |

Tab. 4.5: Propustnost a recovery time na rozdílné fázi ve vzdálenosti 10m

| Frame size (bytes) | Frame rate (F/s) | Throughput | | Recovery test (μs) |
|--------------------|------------------|------------|----------|--------------------|
| | | (%) | (b/s) | |
| 128 | 7921 | 9.37852 | 8111104 | 0 |
| 256 | 5837 | 12.83 | 11954176 | 0 |
| 512 | 3579 | 15.2324 | 14659584 | 0 |
| 1024 | 1823 | 15.2259 | 14934016 | 0 |
| 1280 | 1538 | 15.9958 | 15749120 | 0 |
| 1518 | 1427 | 17.5588 | 17329488 | 0 |

Tab. 4.6: Ztrátovost na stejné fázi ve vzdálenosti 10m

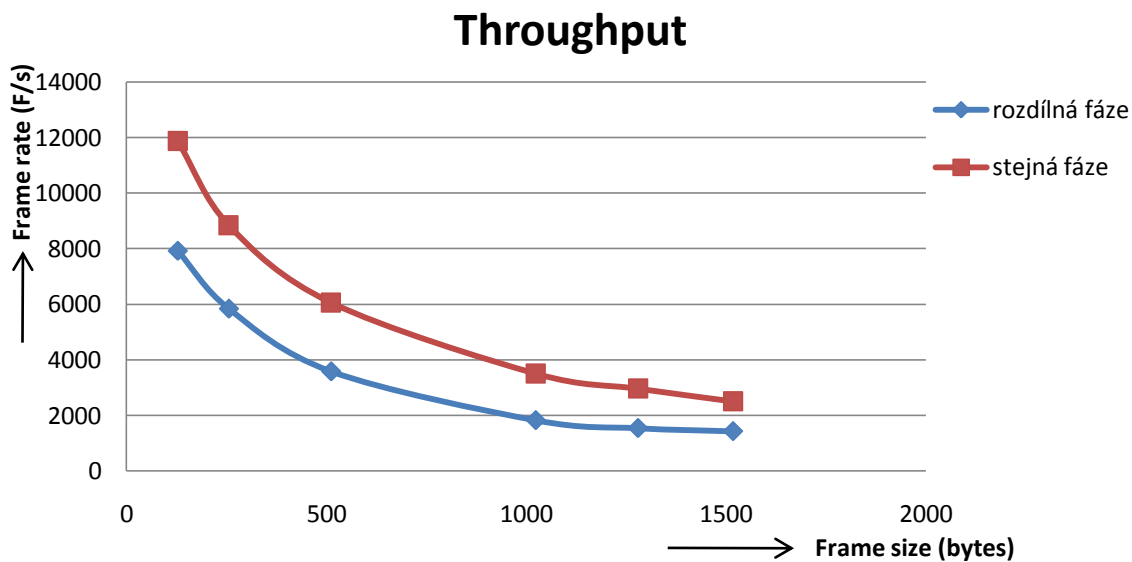
| Frame rate (%) | Frame size (bytes) | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1280 | 1518 |
| | Frame loss rate (%) | | | | | |
| 100 | 84,496 | 86,166 | 78,136 | 77,31 | 78,4 | 79,906 |
| 80 | 81,882 | 76,676 | 80,29 | 71,794 | 74,764 | 75,924 |
| 60 | 79,218 | 66,866 | 69,986 | 60,778 | 68,794 | 66,936 |
| 40 | 61,672 | 46,352 | 51,99 | 51,442 | 45,67 | 45,288 |
| 20 | 7,826 | 0,044 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 4.7: Ztrátovost na rozdílné fázi ve vzdálenosti 10m

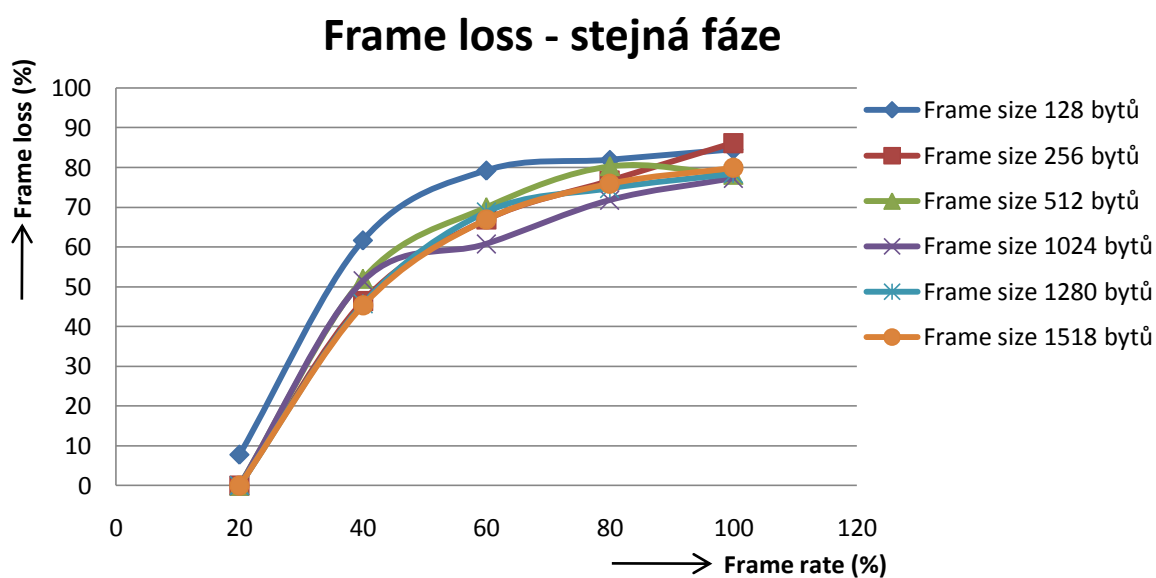
| Frame rate (%) | Frame size (bytes) | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1280 | 1518 |
| | Frame loss rate (%) | | | | | |
| 100 | 90,948 | 92,526 | 90,102 | 86,328 | 82,878 | 88,578 |
| 80 | 88,834 | 90,502 | 90,58 | 82,954 | 81,598 | 85,672 |
| 60 | 84,56 | 87,186 | 85,806 | 77,928 | 75,436 | 80,466 |
| 40 | 77,394 | 80,668 | 74,6 | 65,234 | 62,674 | 68,522 |
| 20 | 38,914 | 49,544 | 51,664 | 29,082 | 35,01 | 44,306 |

Tab. 4.8: Zpoždění ve vzdálenosti 10m

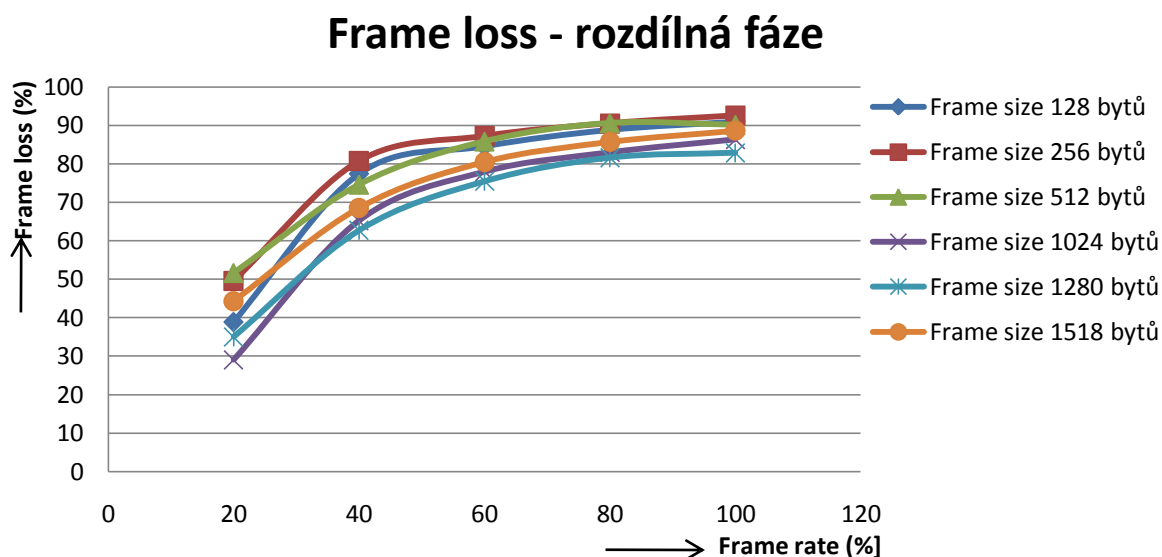
| Frame size (bytes) | Type of transission medium | stejná elektrická fáze | | rozdílná elektrická fáze | |
|--------------------|----------------------------|------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| | | Latency (μ s) | Frame rate (b/s) | Latency (μ s) | Frame rate (b/s) |
| 128 | Twisted pair / Power line | 4099,3 | 12164096 | 2988,7 | 8111104 |
| 256 | | 4595,5 | 18112512 | 4609,5 | 11954176 |
| 512 | | 6550,6 | 24813568 | 7280,6 | 14659584 |
| 1024 | | 12551,4 | 28729344 | 6952,4 | 14934016 |
| 1280 | | 20157,8 | 30371840 | 31006,6 | 15749120 |
| 1518 | | 12030 | 30445008 | 142114 | 17329488 |



Obr. 4.4: Závislost vysílání rámců na změně velikosti rámce ve vzdálenosti 10m.



Obr. 4.5: Závislost ztrátovosti na rychlosti vysílání rámců na stejné fázi ve vzdálenosti 10m



Obr. 4.6: Závislost ztrátovosti na rychlosti vysílání rámců na rozdílné fázi ve vzdálenosti 10m

4.2.3 Měření na délce vedení 30m

Naměřené hodnoty throughput, recovery test, frame loss rate a latency na vzdálenost 30m lze vidět v sérii tabulek 4.9 ÷ 4.13. Na této vzdálenosti se rozdíly mezi fázovou a mezifázovou komunikací snížily a nebyly tak patrné. Z obrázku 4.7 lze ovšem vidět dosažení nižší propustnosti (throughput) při mezifázové komunikaci, která se pohybuje do rozdílu 6% pro jednotlivou velikost rámce (frame size). Velikost hodnoty zpoždění (latency) se na tuto vzdálenost pohybovala do 12,7 ms u stejné elektrické fáze a do 13,4 ms u rozdílné elektrické fáze.

Tab. 4.9: Propustnost a recovery time na stejné fázi ve vzdálenosti 30m

| Frame size (bytes) | Frame rate (F/s) | Throughput | | Recovery test (μ s) |
|--------------------|------------------|------------|----------|--------------------------|
| | | (%) | (b/s) | |
| 128 | 9570 | 11.09 | 9799680 | 0 |
| 256 | 7429 | 16.4035 | 15214592 | 0 |
| 512 | 4956 | 21.093 | 20299776 | 733,814 |
| 1024 | 2805 | 23.4277 | 22978560 | 0 |
| 1280 | 2139 | 22.2465 | 21903360 | 0 |
| 1518 | 1808 | 22.2468 | 21956352 | 421522 |

Tab. 4.10: Propustnost a recovery time na rozdílné fázi ve vzdálenosti 30m

| Frame size (bytes) | Frame rate (F/s) | Throughput | | Recovery test (μ s) |
|--------------------|------------------|------------|----------|--------------------------|
| | | (%) | (b/s) | |
| 128 | 7591 | 8.98779 | 7773184 | 0 |
| 256 | 5484 | 12.1089 | 11231232 | 0 |
| 512 | 3304 | 14.062 | 13533184 | 0 |
| 1024 | 2150 | 17.9571 | 17612800 | 2536,9 |
| 1280 | 1839 | 19.1264 | 18831360 | 5934,58 |
| 1518 | 1713 | 21.0779 | 20802672 | 15923,7 |

Tab. 4.11: Ztrátovost na stejné fázi ve vzdálenosti 30m

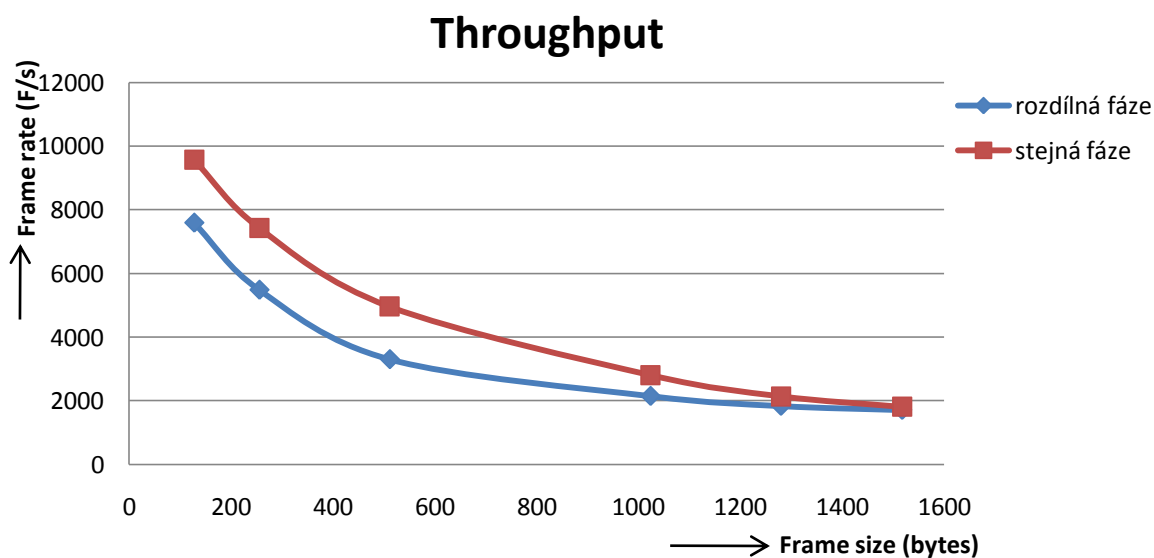
| Frame rate (%) | Frame size (bytes) | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1280 | 1518 |
| | Frame loss rate (%) | | | | | |
| 100 | 89,582 | 89,204 | 86,196 | 80,136 | 85,346 | 78,044 |
| 80 | 86,912 | 86,274 | 82,114 | 75,642 | 80,772 | 71,786 |
| 60 | 82,486 | 80,732 | 76,818 | 65,646 | 68,548 | 62,934 |
| 40 | 75,94 | 69,788 | 62,888 | 55,978 | 53,022 | 44,138 |
| 20 | 16,172 | 2,384 | 0,138 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 4.12: Ztrátovost na rozdílné fázi ve vzdálenosti 30m

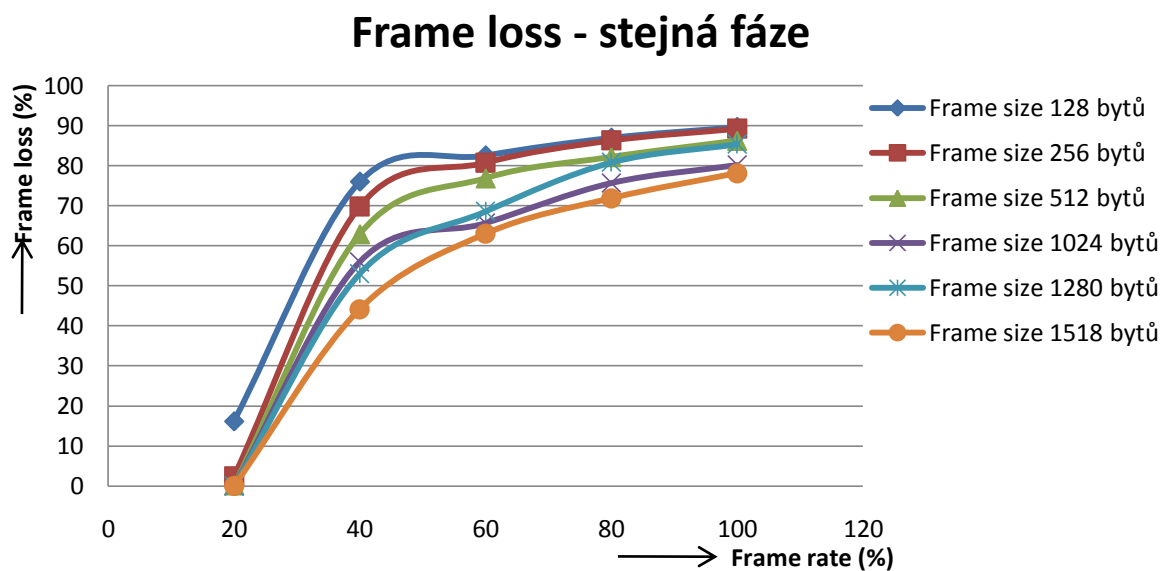
| Frame rate (%) | Frame size (bytes) | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1280 | 1518 |
| | Frame loss rate (%) | | | | | |
| 100 | 90,454 | 89,776 | 88,402 | 87,112 | 80,222 | 78,512 |
| 80 | 88,166 | 85,562 | 87,152 | 82,982 | 81,708 | 80,038 |
| 60 | 84,282 | 79,54 | 83,798 | 73,718 | 78,154 | 61,984 |
| 40 | 75,82 | 72,688 | 73,486 | 55,29 | 62,226 | 42,3 |
| 20 | 23,192 | 4,854 | 0,132 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 4.13: Zpoždění ve vzdálenosti 30m

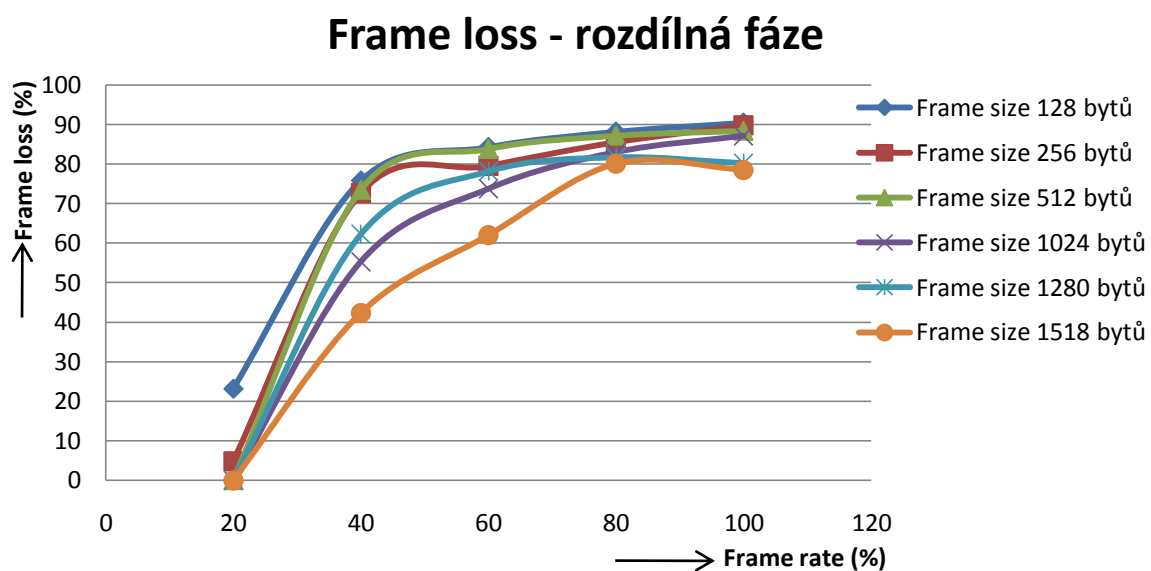
| Frame size (bytes) | Type of transmission medium | stejná elektrická fáze | | rozdílná elektrická fáze | |
|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| | | Latency (μ s) | Frame rate (b/s) | Latency (μ s) | Frame rate (b/s) |
| 128 | Twisted pair / Power line | 5136,3 | 9799680 | 4045,3 | 7773184 |
| 256 | | 12658,2 | 15214592 | 4542,9 | 11231232 |
| 512 | | 8093,2 | 20299776 | 5903,8 | 13533184 |
| 1024 | | 45026,3 | 22978560 | 4216,8 | 17612800 |
| 1280 | | 5836,1 | 21903360 | 7084,6 | 18831360 |
| 1518 | | 10683,3 | 21956352 | 13394,2 | 20802672 |



Obr. 4.7: Závislost vysílání rámců na změně velikosti rámce ve vzdálenosti 30m



Obr. 4.8: Závislost ztrátovosti na rychlosti vysílání rámců na stejné fázi ve vzdálenosti 30m



Obr. 4.9: Závislost ztrátovosti na rychlosti vysílání rámců na rozdílné fázi ve vzdálenosti 30m

4.2.4 Měření na délce vedení 50m

Nejvzdálenějším bodem měření na stejné i rozdílné elektrické fázi bylo 50m. Na tuto vzdálenost došlo ke zdatelnému snížení propustnosti (throughput) ve srovnání s měřeními na kratší vzdálenosti. V sérii tabulek 4.14 ÷ 4.15 jsou naměřené hodnoty, kde se propustnost na stejné fázi pohybovala od 10815488 b/s do 21524480 b/s. V kontrastu s těmito hodnotami došlo na rozdílné fázi k rapidnímu propadu, který se pohyboval v rozmezí 2243120 b/s – 6157008 b/s v závislosti na velikosti vysílaného rámce. V tabulce 4.13 jsou naměřené hodnoty zpoždění (latency), které dosahovaly až 46,4 ms při komunikaci na stejné elektrické fázi a 1281 ms při komunikaci na rozdílných elektrických fázích. Takto výrazný propad parametrů sítě přisuzují značnému zarušení komunikačního pásma 4 – 34 MHz a vzdálenosti, která začíná být pro technologii DS2 kritická. Na sérii obrázků 4.10 ÷ 4.12 jsou graficky znázorněny průběhy propustnosti a ztrátovosti, kde je nejlépe viditelný propad propustnosti ve srovnání naměřených hodnot stejné a rozdílné elektrické fáze.

Tab. 4.14: Propustnost a recovery time na stejné fázi ve vzdálenosti 50m

| Frame size (bytes) | Frame rate (F/s) | Throughput | | Recovery test (μs) |
|--------------------|------------------|------------|----------|--------------------|
| | | (%) | (b/s) | |
| 128 | 10562 | 12.55 | 10815488 | 0 |
| 256 | 7076 | 15.6241 | 14491648 | 0 |
| 512 | 3946 | 16.7943 | 16162816 | 0 |
| 1024 | 2244 | 18.7422 | 18382848 | 0 |
| 1280 | 2102 | 21.8617 | 21524480 | 19896,9 |
| 1518 | 1427 | 17.5588 | 17329488 | 0 |

Tab. 4.15: Propustnost a recovery time na rozdílné fázi ve vzdálenosti 50m

| Frame size (bytes) | Frame rate (F/s) | Throughput | | Recovery test (μs) |
|--------------------|------------------|------------|---------|--------------------|
| | | (%) | (b/s) | |
| 128 | 1795 | 2.86314 | 2243120 | 0 |
| 256 | 1415 | 3.12438 | 2897920 | 5771090 |
| 512 | 1009 | 4.29435 | 4132864 | 2640210 |
| 1024 | 374 | 3.12369 | 3063808 | 0 |
| 1280 | 375 | 3.90016 | 3840000 | 0 |
| 1518 | 507 | 6.23846 | 6157008 | 0 |

Tab. 4.16: Ztrátovost na stejné fázi ve vzdálenosti 50m

| Frame rate (%) | Frame size (bytes) | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1280 | 1518 |
| | Frame loss rate (%) | | | | | |
| 100 | 88,25 | 88,37 | 86,39 | 79,962 | 80,602 | 83,7 |
| 80 | 87,628 | 85,732 | 83,31 | 74,77 | 74,856 | 76,808 |
| 60 | 83,636 | 80,846 | 77,74 | 65,526 | 65,24 | 69,546 |
| 40 | 75,362 | 72,262 | 66,924 | 49,244 | 47,386 | 49,692 |
| 20 | 27,786 | 35,674 | 14,486 | 0,072 | 1,546 | 6,522 |

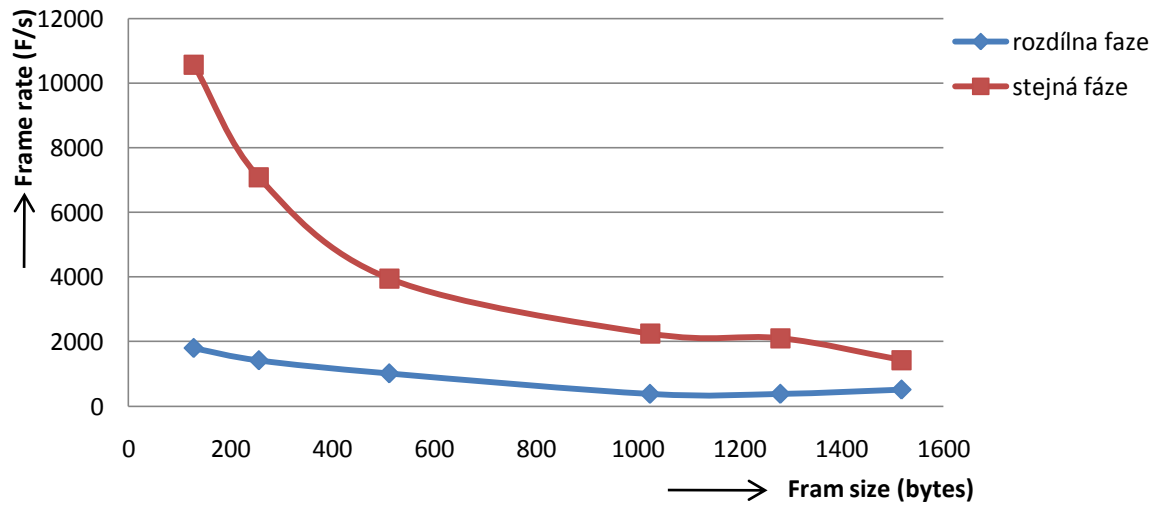
Tab. 4.17: Ztrátovost na rozdílné fázi ve vzdálenosti 50m

| Frame rate (%) | Frame size (bytes) | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1280 | 1518 |
| | Frame loss rate (%) | | | | | |
| 100 | 95,734 | 96,004 | 94,822 | 94,016 | 90,646 | 87,528 |
| 80 | 94,898 | 94,856 | 94,036 | 92,74 | 87,294 | 84,534 |
| 60 | 93,528 | 93,162 | 85,866 | 89,902 | 79,596 | 77,732 |
| 40 | 89,974 | 89,166 | 79,284 | 85,132 | 68,992 | 67,66 |
| 20 | 80,704 | 77,71 | 61,928 | 54,208 | 39,156 | 36,338 |

Tab. 4.18: Zpoždění ve vzdálenosti 50m

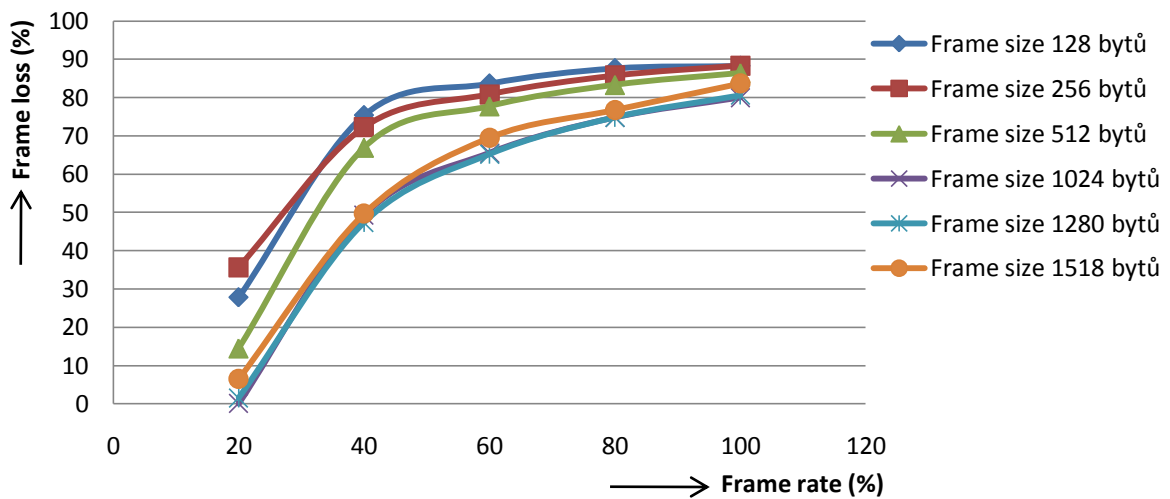
| Frame size (bytes) | Type of transission medium | stejná elektrická fáze | | rozdílná elektrická fáze | |
|--------------------|----------------------------|------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| | | Latency (μ s) | Frame rate (b/s) | Latency (μ s) | Frame rate (b/s) |
| 128 | Twisted pair / Power line | 2674,2 | 10815488 | 2240,9 | 2243120 |
| 256 | | 4266,8 | 14491648 | 5612,5 | 2897920 |
| 512 | | 5601,6 | 16162816 | 192483 | 4132864 |
| 1024 | | 46383,7 | 18382848 | 8900,7 | 3063808 |
| 1280 | | 362575 | 21524480 | 14410,8 | 3840000 |
| 1518 | | 41147,6 | 17329488 | 1281776 | 6157008 |

Troughput

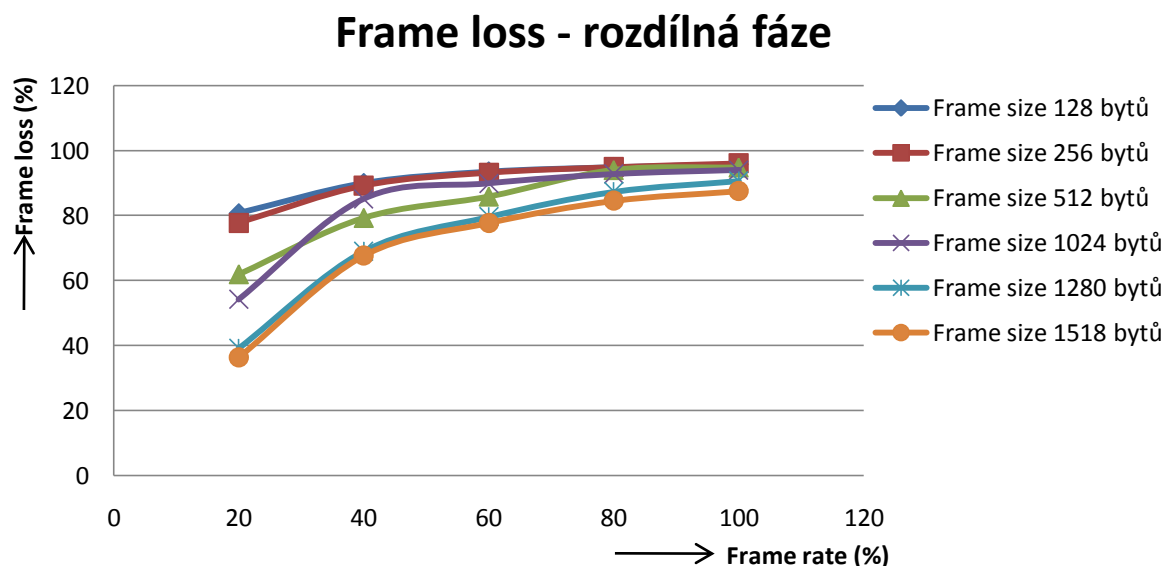


Obr. 4.10: Závislost vysílání rámců na změně velikosti rámce ve vzdálenosti 50m

Frame loss - stejná fáze



Obr. 4.11: Závislost ztrátovosti na rychlosti vysílání rámců na stejné fázi ve vzdálenosti 50m



Obr. 4.12: Závislost ztrátovosti na rychlosti vysílání rámců na rozdílné fázi ve vzdálenosti 50m

4.2.5 Vyhodnocení měření

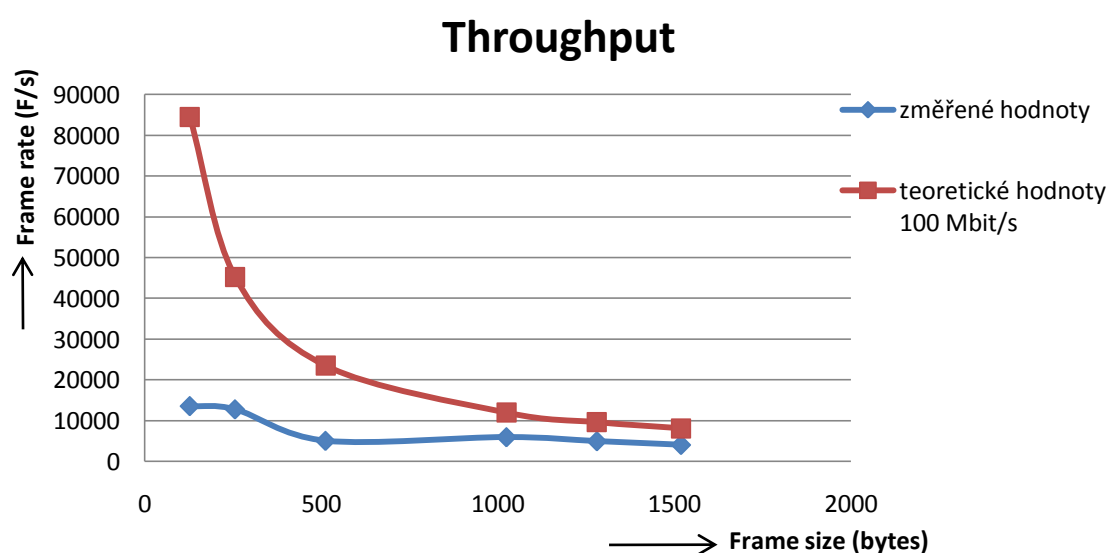
Měření pomocí přístroje Trend Unipro GbE proběhlo při komunikaci na stejné i rozdílné elektrické fázi na vzdálenosti od 1m do 50m. Z naměřených hodnot propustnosti zobrazených v tabulkách a grafech je zřejmý výrazný vliv na parametry přenosového média s rostoucí vzdáleností. V tabulce 4.19 lze porovnat naměřené hodnoty frame rate s hodnotami systému 100 Mbit/s, které lze dosáhnout pomocí přenosového média vytvořeného z UTP kabelů.

Při porovnání nejvyšších naměřených hodnot, které byly dosaženy na vzdálenost 1m, dosahuje PLC síť pouze rozsahu 16 – 52 % propustnosti 100Mb/s systému. Takto výrazný rozdíl propustnosti se dále zvyšuje s rostoucí vzdáleností. Na obrázku 4.13 je graficky znázorněno porovnání propustnosti z předešlé tabulky. Druhý důležitý parametr tohoto měření je zpoždění (latency). V nejnižších hodnotách bylo 2,3x větší při použití velikosti rámce 128 bytů a až 137x větší při použití 1518 bytů velkého rámce u PLC sítě.

Z výše uvedených hodnot je zřejmé, že přenos dat po elektrické síti za pomoci technologie DS2/Defidex výrazně nedosahuje přenosových hodnot 100Mbit/s systému.

Tab. 4.19: Srovnání propustnosti a zpoždění s přenosovým médiem 100 Mbit/s

| Frame size (bytes) | změřené hodnoty | | | teoretické hodnoty | |
|--------------------|------------------|--------------|----------------|----------------------------------|--------------|
| | Frame rate (F/s) | Latency (ms) | Throughput (%) | Theoretically 100 Mbit/sys (F/s) | Latency (ms) |
| 128 | 13528 | 2,386 | 16,0172 | 84459 | < 1 |
| 256 | 12737 | 5,6547 | 28,1238 | 45289 | < 1 |
| 512 | 5048 | 4,0736 | 21,4845 | 23496 | < 1 |
| 1024 | 5939 | 65,5223 | 49,6033 | 11973 | < 1 |
| 1280 | 4957 | 112,722 | 51,5549 | 9615 | < 1 |
| 1518 | 4063 | 137,397 | 49,9939 | 8127 | < 1 |



Obr. 4.13: Srovnání propustnosti s teoretickými hodnotami systému 100Mbit/s

4.3 Měření nástrojem IPERF

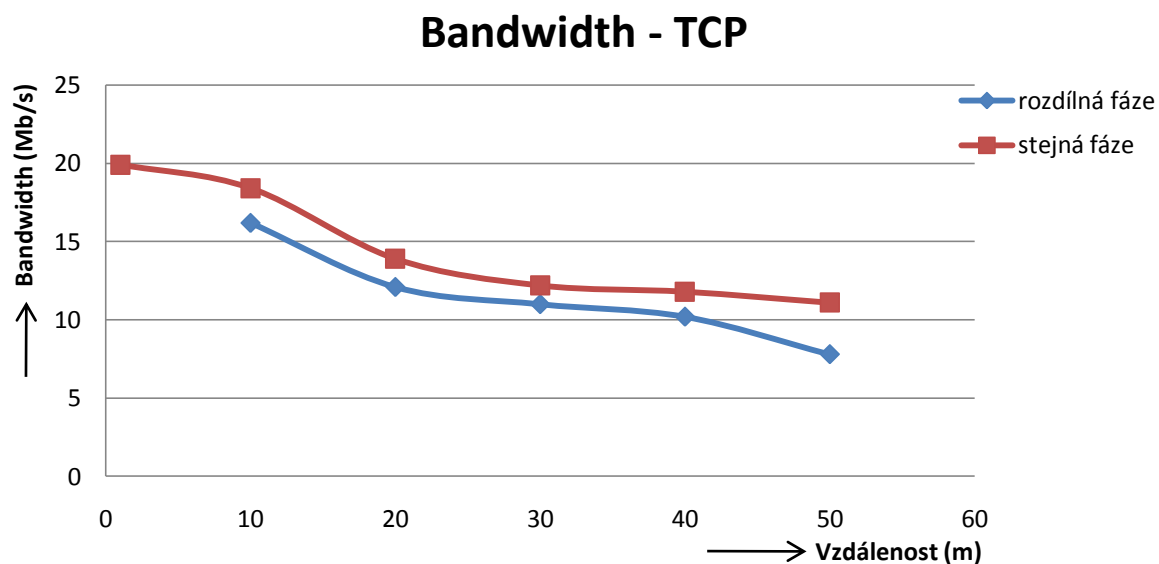
Pro měření transportní vrstvy TCP/IP modelu jsem vybral nástroj IPERF. Tento diagnostický nástroj pro měření sítě umožňuje měření TCP i UDP protokolu. Pracuje na principu server – klient a je multiplatformní (Windows, Linux). Na jedné straně spojení spustíme server a poté klientem z druhé strany měříme propustnost daného datového spojení. Testování jsem provedl jako v předešlém měření na vzdálenost 1 – 50 metrů na stejné i rozdílné fázi elektrického vedení. Všechna měření jsem prováděl 10x trvajících nejméně 60s a poté vypočítal průměrnou naměřenou hodnotu.

Tab. 4.20: Šířka pásma protokolu TCP na stejné a rozdílné elektrické fázi

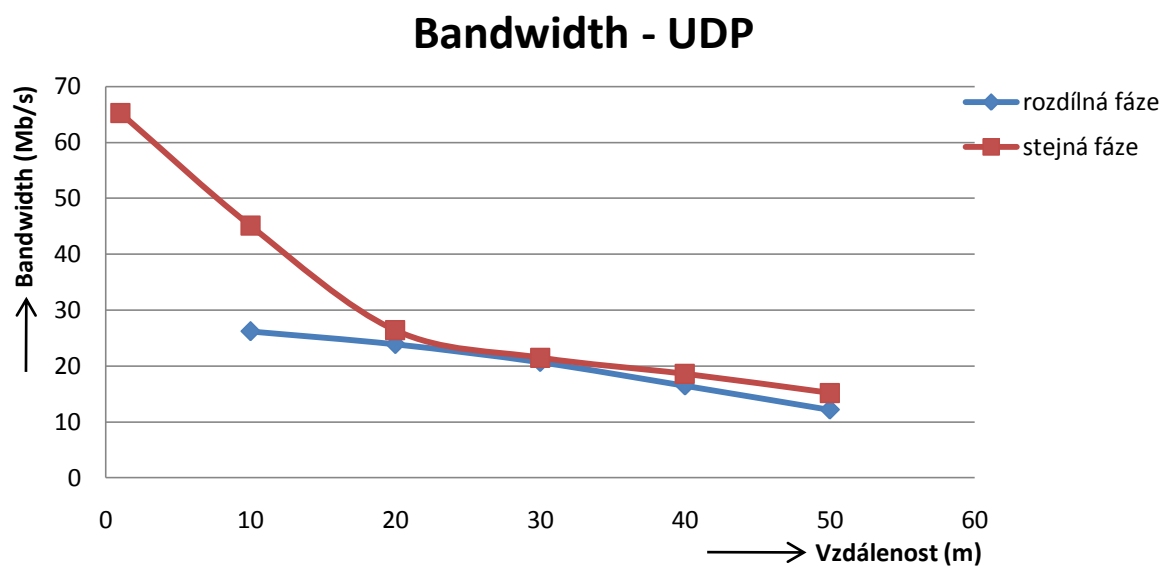
| Vzdálenost (m) | stejná elektrická fáze | rozdílná elektrická fáze |
|-------------------|------------------------|--------------------------|
| | Bandwidth (Mb/s) | Bandwidth (Mb/s) |
| 1 | 19,9 | - |
| 10 | 18,4 | 16,2 |
| 20 | 13,9 | 12,1 |
| 30 | 12,2 | 11 |
| 40 | 11,8 | 10,2 |
| 50 | 11,1 | 7,8 |

Tab. 4.21: Šířka pásma a jitter protokolu UDP na stejné a rozdílné elektrické fázi

| Vzdálenost (m) | stejná elektrická fáze | | rozdílná elektrická fáze | |
|-------------------|------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| | Bandwidth (Mb/s) | Jitter (ms) | Bandwidth (Mb/s) | Jitter (ms) |
| 1 | 65,3 | 14,777 | - | - |
| 10 | 45,1 | 0,668 | 26,2 | 1,193 |
| 20 | 26,4 | 12,662 | 23,9 | 3,075 |
| 30 | 21,5 | 13,626 | 20,7 | 13,334 |
| 40 | 18,6 | 10,214 | 16,5 | 3,082 |
| 50 | 15,2 | 13,771 | 12,2 | 12,671 |



Obr. 4.14: Závislost šířky pásma (bandwidth) na změně vzdálenosti u protokolu TCP



Obr. 4.15: Závislost šířky pásma (bandwidth) na změně vzdálenosti u protokolu UDP

4.3.1 Vyhodnocení měření

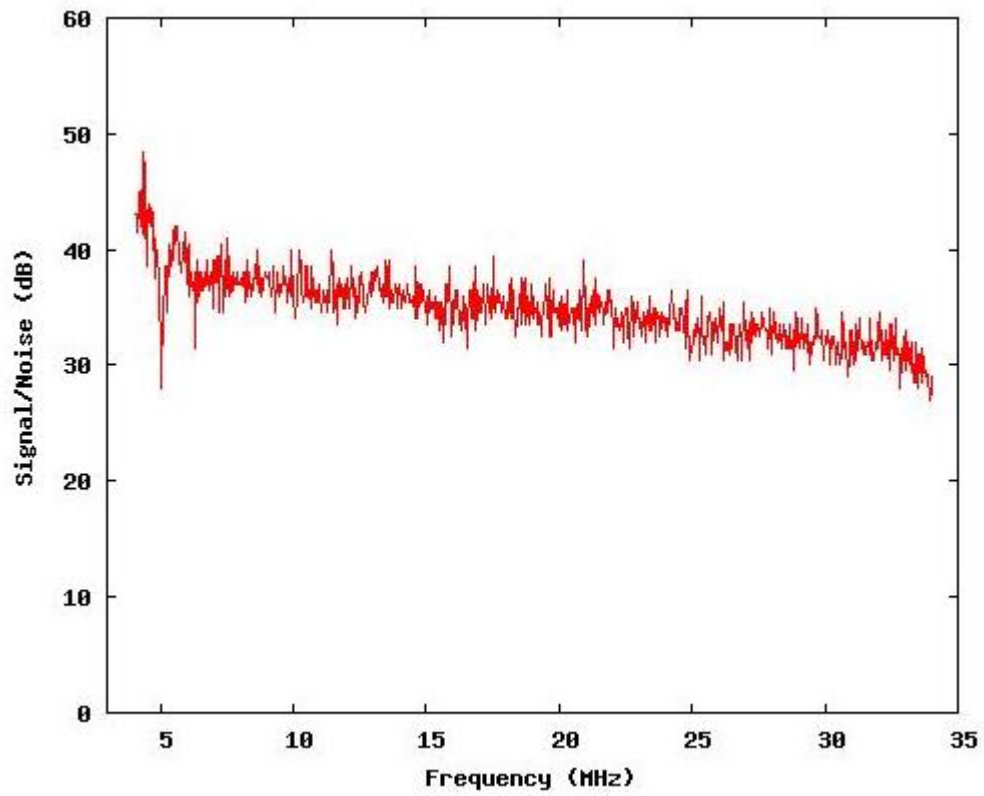
Ve dvojici tabulek 4.20 ÷ 4.21 jsou zobrazeny naměřené hodnoty šířky pásma (bandwidth) na protokolu TCP i UDP. Z tabulky 4.20 jsou znatelné nižší hodnoty při komunikaci na rozdílné fázi ve srovnání s komunikací na stejné elektrické fázi, které jsou způsobeny zarušením komunikačního pásma v rozsahu 4 – 34 MHz. V následující tabulce 4.21 je tento rozdíl ještě vyšší u protokolu UDP. Na první srovnatelné vzdálenosti (10m) je šířka pásma 45,1 Mb/s u komunikaci na stejné elektrické fázi a 26,2 Mb/s u komunikaci na rozdílné elektrické fázi. Všechny tyto hodnoty jsou přehledně zobrazeny v sérii obrázků 4.14 ÷ 4.15. Při měření protokolu UDP, byly také zaznamenány hodnoty kolísání zpoždění (Jitter). Kolísání zpoždění patří mezi nejdůležitější parametry přenosu dat při používání VOIP (voice over IP). Změřené hodnoty kolísání zpoždění se pohybují do 15 ms, což je pro VOIP komunikaci dostačující.

Naměřené hodnoty šířky pásma a kolísání zpoždění pomocí nástroje IPERF potvrzují vyhodnocení z měření dle normy RFC 2544. Změřené hodnoty zdaleka nedosahují přenosových parametrů systému 100Mbit/s, který je realizovatelný pomocí UTP kabelů a patří mezi nejrozšířenější technologii v rámci domácí sítě LAN.

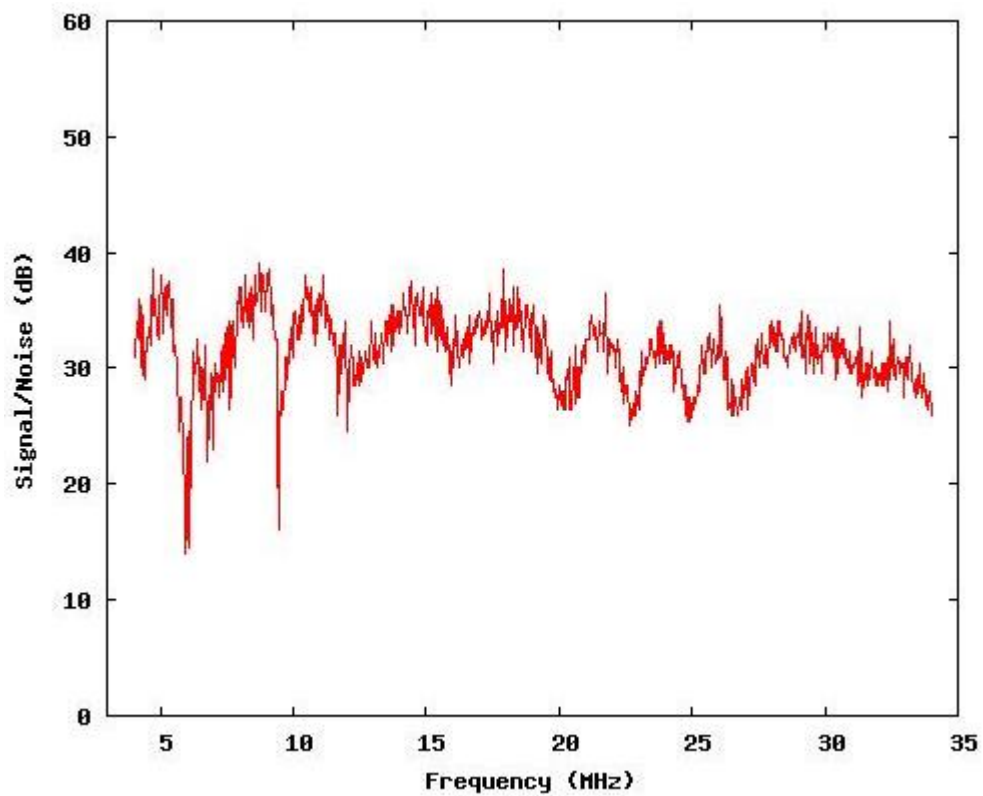
4.4 Měření signal to noise ratio

Měření odstupů signál-šum, tedy poměru SNR (signal to noise ratio) probíhalo pomocí funkcionality network management systému (NMS) umístěného na AGW – 200. Výsledné grafy jsou zobrazeny z pohledu koncového zařízení AMH – 200, na kterém bylo provedeno měření na vzdálenosti 1 – 50 metrů. Samotné grafy jsou vyjmuty z webového rozhraní NMS.

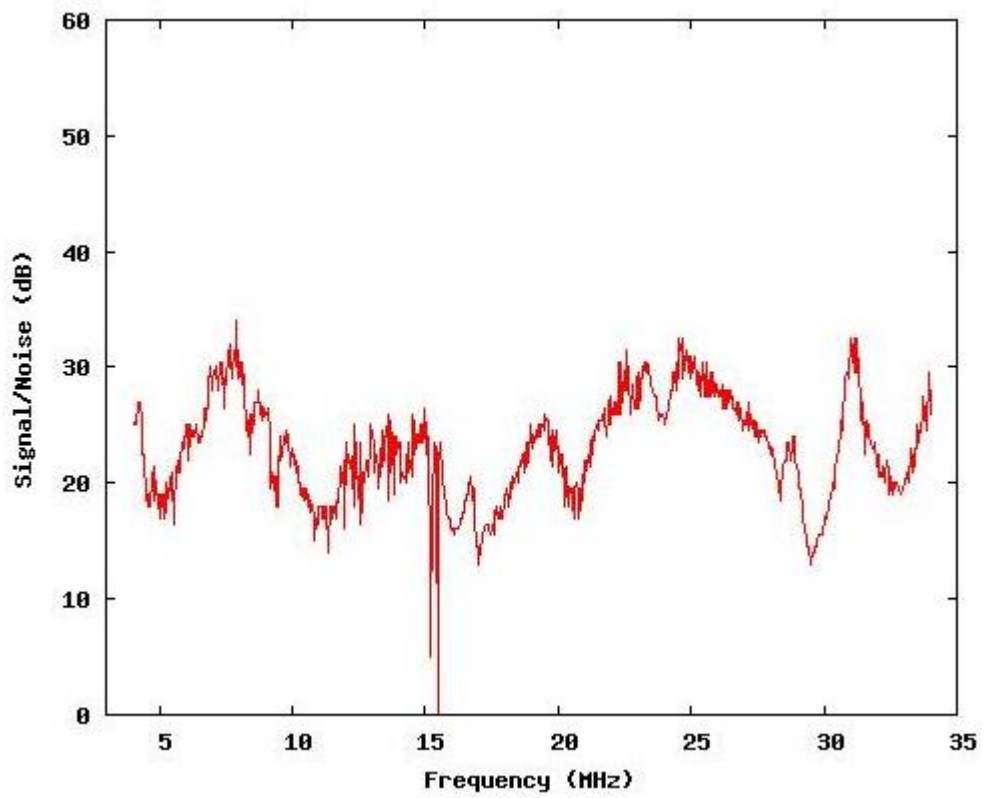
V sérii obrázků 4.16 ÷ 4.18 jsou zobrazeny poměry SNR s rostoucí vzdáleností a při komunikaci na stejné i rozdílné elektrické fázi. Ve vzdálenosti 1m docházelo k minimálnímu rušení frekvenčního pásma 4 – 34 MHz, které je zobrazeno na obrázku 4.16. Se zvětšující se vzdáleností narůstá i rušení v přenosovém kanálu (obrázek 4.16), které je způsobeno zapojenými spotřebiči do elektrické sítě. Na obrázku 4.18 je vidět poměr SNR při komunikaci na rozdílné elektrické fázi ve vzdálenosti 50m. Zde je již patrné značné zarušení přenosového pásma, které potvrzují naměřené hodnoty z předchozích měření.



Obr. 4.16: Závislost SNR na změně frekvence ve vzdálenosti 1m



Obr. 4.17: Závislost SNR na změně frekvence na stejné fázi ve vzdálenosti 50m



Obr. 4.18: Závislost SNR na změně frekvence na rozdílné fázi ve vzdálenosti 50m

ZÁVĚR

V této práci jsem měl za úkol navrhnout a realizovat domácí síť LAN technologií PLC. Naznačil jsem možnosti této technologie a uvedl technická omezení, která jsou nedílnou součástí této technologie. V kapitole 2 jsem rozebral strukturu energetické sítě, frekvenční charakteristiku, problém navázání datového signálu, modulační techniky a zdroje rušení, které mohou probíhat v PLC síti.

V další části této práce (kap. 3) jsem navrhnul domácí síť LAN s PLC technologií DS2/Defidev. Pro realizaci této sítě jsem vybral komerčně prodávané zařízení AMH – 200 ve formě CPE modemu, AMH – 201 ve formě Head-End bodu a centrální bod AGW – 200 s network management systémem pro konfiguraci celé sítě. Pomocí těchto prvků jsem navrhnul zapojení PLC LAN sítě.

Hlavním přínosem mé práce bych uvedl realizaci a měření mnou navržené PLC sítě. (kap. 4) Zvolenou PLC síť jsem realizoval v rodinném domě a provedl její měření pomocí normy RFC 2544. Pro monitorování provozu na datové síti dle specifikací normy byl použit přístroj Trend Unipro GbE, kterým jsem změřil důležité parametry datové sítě do vzdálenosti 50 metrů. Pomocí změřených parametrů propustnosti (throughput), zpoždění (latency) a ztrátovosti (frame lost) jsem provedl jejich vyhodnocení. Jako druhou a kontrolní metodu měření jsem vybral síťový nástroj IPERF. Pomocí tohoto nástroje jsem zaznamenal šířku pásma (bandwidth) a kolísání zpoždění (jitter) na protokolu TCP a UDP, který pracuje na transportní vrstvě TCP/IP modelu.

Technologie DS2/Defidev je použitelná pro vytvoření malých datových domácích sítí, ovšem za určitých podmínek. Musí být pro uživatele dostačující datová propustnost v rozmezí 10 – 25 Mb/s. Současně je také důležité počítat s klesající propustností a ostatních měřených parametrů s rostoucí délkou datové sítě. Neméně důležitým aspektem je zapojení takovéto sítě na stejné a rozdílné elektrické fázi. Při komunikaci na rozdílných elektrických fázích dochází k zdatelné degradaci síťových parametrů, které se nejvíce projeví u měření propustnosti na vzdálenosti 50m. Konkurencí této technologii pro domácí použití je vytvoření LAN pomocí UTP kabelů nebo WiFi. Obě tyto varianty umožňují vytvoření domácí sítě s výrazně menší finanční zátěží a s lepšími parametry datové sítě. V místech, kde není vhodné použití UTP kabelů, lze využít WiFi technologii. Použití DS2/Defidev bych doporučil jen v krajním případě, ve kterém nelze rozvést UTP kabeláž a použít WiFi technologii z důvodu značného zarušení frekvenčního pásma, na kterém daný typ WiFi pracuje.

Zadání diplomové práce bylo splněno a práce udává ucelený pohled o možnostech širokopásmové datové komunikaci po silovém vedení nízkého napětí. Jsou zde uvedeny teoretické předpoklady pro realizaci datové komunikace a možnosti technologie DS2/Defidev. V praktické části jsem provedl měření parametrů datového spojení v závislosti na délce vedení a její vyhodnocení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

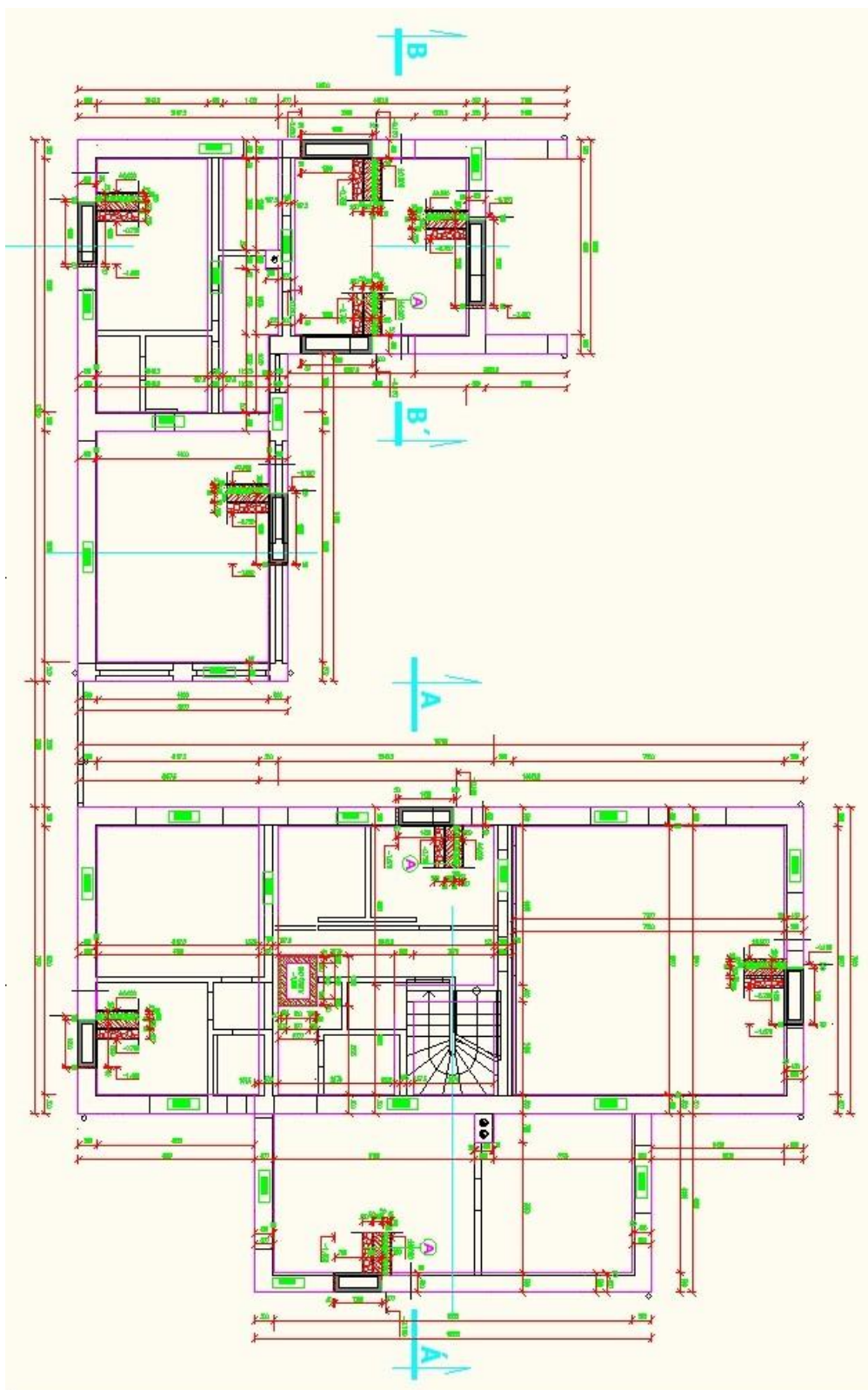
- [1] PAVELKA, Ondřej. *Internet ze zásuvky ? Ano, ale...* [online]. 5.9.2000. [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/00034/index.html#CLuvod>>.
- [2] STEINBAUER, Petr. *Komunikace po silovém vedení : Způsoby řešení* [online]. 5.5. 2000. [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.volny.cz/stei/studium/nm/reseni.html#dpl>>.
- [3] TAKYONET : *Dodavatel technologie DS2/Defidev* [online]. c2005. [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.takyo.net/>>
- [4] PATAJ, J. *Možnosti datové komunikace po silových vedeních nízkého napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
- [5] NĚMEC, Marek. *Sít' skrze zásuvku* [online]. 30. 10. 2003. [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.zive.cz/default.aspx?section=44&server=1&article=114358>>.
- [6] VANČATA, Pavel. *Standardizace širokopásmových systémů přenosu po energetickém vedení* [online]. 05. 12. 2005. [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW:<<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=&cisloclanku=2005112801>>.
- [7] MIŠUREC, Jiří, MLÝNEK, Petr. *Elektrorevue : časopis pro elektrotechniku* [online]. 12.01.2009. [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/systemy-plc-pro-dalkovy-sber-merenyh-dat/>>.
- [8] MARTINÁSEK, Zdeněk, SOBOTKA, Jiří, DOSTÁL, Otto. The transmission rate measuring methods. *Measuring methods*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 6 s.
- [9] Přenos dat po silnoprůdých vedeních.[online]. 2002, [cit. 2010-05-10]. Dostupný z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=4589>.

- [10]FAJKUS, P. Modely silových vedení pro přenos dat PLC systémů. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, 68 s.
- [11]SVOBODA, J. Systémy širokopásmového přenosu po energetických sítích. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Peter Stančík.

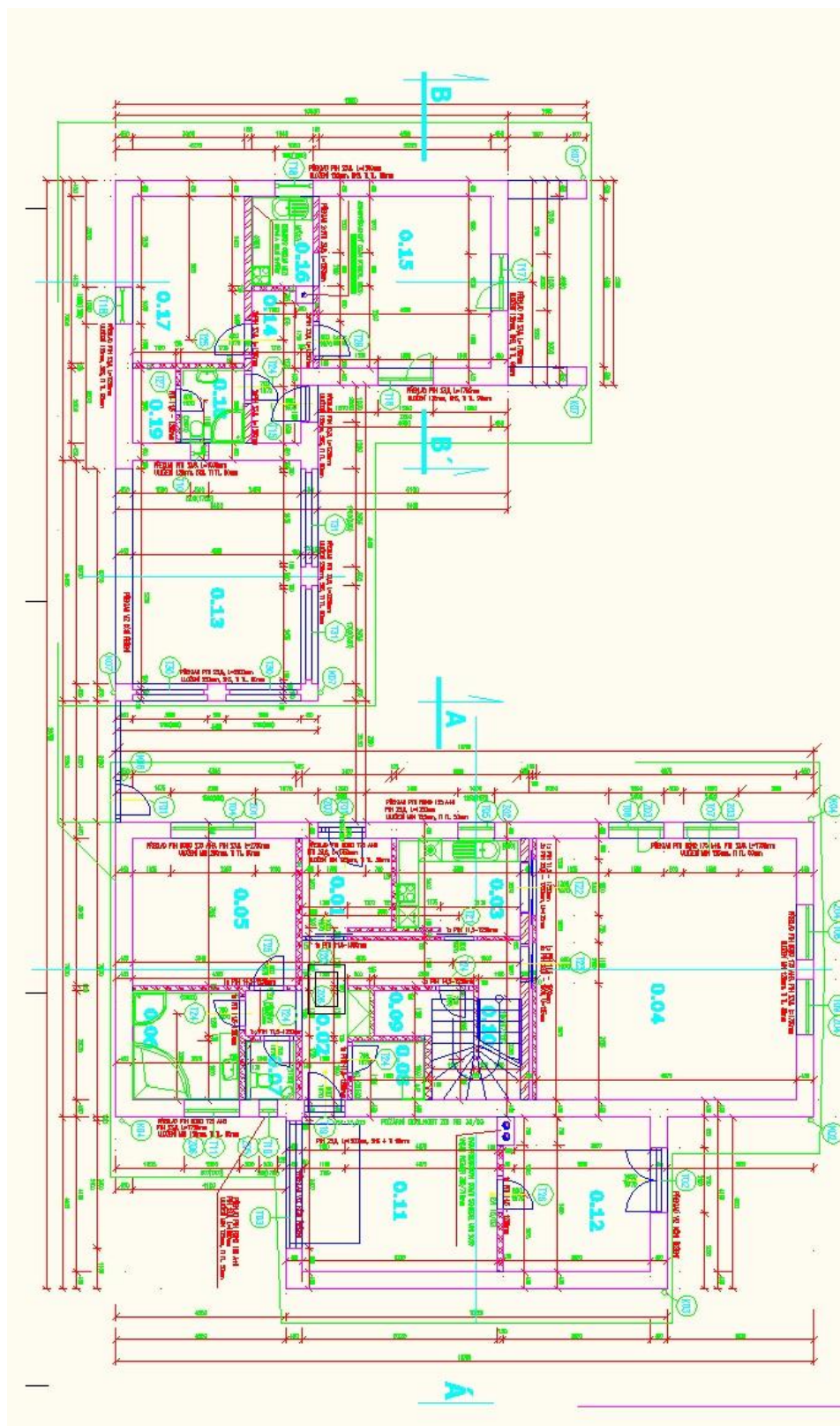
Seznam použitých zkratek

| | |
|---------------------|---|
| BPL | Broadband over Poweline |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CENELEC | Evropský výbor pro elektrotechnickou standardizaci |
| CPE | Customer Premises Equipment |
| ČSN EN 50065 | Signalizace v instalacích nízkého napětí v kmitočtovém rozsahu od 3kHz do 148,5 kHz |
| DSSSM | Direct Sequence Spread Spektrum Modulation |
| EMC | Electromagnetic Compatibility |
| FEC | Forward error correction |
| FSK | Frequency Shift Keying |
| GMSK | Gaussian Minumum Shift Keying |
| HE | Head-End |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| ISAR | Intelligent System for Automated Fading |
| LAN | Local Area Network |
| MAC | Medium Access Control |
| NMS | Network Management systém |
| NN | Nízké napětí |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| OPERA | Europen Research Aliance |
| PLC | Power Line Communication |
| PRE | Pražská energetika |
| PSD | Power Spectral Density |
| PSK | Phase-Shift Keying |
| REP | Repeater |
| SNR | Signal To Noise Ratio |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| UDP | User Datagram Protocol |
| VN | Vysoké napětí |
| VVN | Velmi Vysoké Napětí |
| WAN | Wide Area Network |
| WiFi | Wireless Fidelity |
| WLAN | Wireless Local Area Network |

Příloha A: Půdorys přízemí



Příloha B: Půdorys prvního patra



Příloha C: OBSAH CD

- Diplomová práce ve formátu .docx a .pdf
- Změřené hodnoty přístrojem Trend Unipro GbE