



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta elektrotechnická

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2014**

**Lukáš Engler**

Sem vložit oficiální zadání.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 25. 5. 2014

.....

podpis bakalanta

**Anotace:**

Tato bakalářská práce se zabývá vzdáleným napájením uzlů přístupové sítě. Konkrétně se zaměřuje na návrh řešení pro přípojky fast-DSL a rozebírá jednotlivá úskalí tohoto řešení. Popisuje technologie DSL, G.fast a Power over Ethernet. Teoretické předpoklady ověřuje měřeními, jejichž cílem je zejména popis dosažitelného napájecího výkonu v závislosti na druhu a délce použitého sdělovacího kabelu. Cílem této práce je popsat a experimentálně ověřit možnosti zpětného napájení uzlů v přístupové síti.

**Klíčová slova:** fast-DSL, G.fast, Power over Ethernet, přístupová síť, inverzní napájení

**Summary:**

This bachelor thesis deals with powering of remote equipment in an access network. Specifically, it focuses on design of solution for fast-DSL connections and discusses various drawbacks of this solution. It describes DSL, G-fast and Power over Ethernet technologies. The theoretical assumptions are verified by measurements, whose goal is a description of the attainable power depending on the type and length of the communication cable used. The main aim of this thesis is to describe and verify possibilities of inverse powering of remote nodes in the access network.

**Index Terms:** fast-DSL, G.fast, Power over Ethernet, access network, inverse powering

# OBSAH

1. Úvod.....	1
2. Digitální účastnické přípojky .....	1
2.1. Systémy xDSL.....	2
2.2. Modulace DMT .....	4
2.3. Struktura sítě xDSL .....	4
3. Přípojka G.fast.....	6
3.1. Modulace VDMT.....	7
3.2. Inverzní napájení .....	7
3.3. Stavební bloky .....	8
4. Napájení v sítích Ethernet .....	11
4.1. Dodatek IEEE 802.3af .....	12
4.2. Dodatek IEEE 802.3at.....	16
4.3. Energy Efficient Ethernet.....	17
5. Praktická část.....	17
5.1. Vlastnosti vedení .....	17
5.2. Měření úbytku napětí na kabelu .....	18
5.3. Měření rozvinutého kabelu.....	26
5.4. Měření modemů.....	28
5.5. Návrh filtru .....	34
6. Závěr .....	38
7. Literatura .....	39
8. Seznam obrázků.....	42
9. Seznam tabulek.....	43
10. Seznam použitých zkratk .....	43
Příloha: Graf závislosti úbytku napětí na délce vedení.....	45

# 1. Úvod

Bakalářská práce se v souvislosti s rozvojem FTTx<sup>1</sup> zaměřuje na část přístupové sítě mezi koncovými účastníky a telefonní ústřednou, kde se snaží popsat problematiku vzdáleného napájení pomocí účastnických přípojek xDSL<sup>2</sup>.

Jelikož nasazení FTTH<sup>3</sup> je finančně velmi náročné, jak postupujeme dále směrem ke koncovým účastníkům, náklady na implementaci rostou dokonce exponenciálně v závislosti na dosahu FTTx, je žádoucí tyto investice rozprostřít do delšího časového úseku. Proto na základě technologií VDSL 2<sup>4</sup> vznikl standard G.fast<sup>5</sup>, který je určen pro přenos dat po metalických vedeních na krátkých úsecích sítě pod 400 metrů délky (ideálně pod 250 m), rychlostmi typickými pro optická vedení, a jehož úkolem je poskytnout dočasné řešení v podobě nahrazení optické trasy od uličního rozvaděče až ke koncovému uživateli.

Jeden z hlavních znaků tohoto standardu je vzdálené napájení zařízení, které zprostředkovávají přechod na hranici optické a metalické trasy. Může se stát, že napájení ze strany ústředny nebude možné bez nutnosti položení nového vedení, což by vedlo k nežádoucím nákladům. Z tohoto důvodu G.fast navrhuje také inverzní (zpětné) napájení těchto zařízení, tedy ze strany koncového účastníka.

Součástí práce je též popis technologie Power over Ethernet, která s touto problematikou úzce souvisí.

Úkolem této práce je popis podmínek, za jakých se dá toto řešení úspěšně zavést. Experimentálně ověříme možnosti napájení jednoduchého modemu za použití různých metalických vedení, s přihlédnutím na napájecí napětí a spotřebovaný výkon zařízení v různých provozních režimech, úbytek napětí ve vedení při různém procházejícím proudu.

Rozložení dokumentu je následující. Nejdříve je popsána technologie DSL, stručně její standardy, mezi které patří též G.fast, dále zařízení umožňující funkci DSL jako celku a struktura sítě. Následně se podrobně zaměříme na samotný G.fast, jeho jednotlivé znaky a úskalí. Rozebereme také Power over Ethernet. Poslední část slouží pro experimentální ověření teoretických předpokladů, prezentaci naměřených výsledků a závěrů.

## 2. Digitální účastnické přípojky

Digital Subscriber Line, dříve také Digital Subscriber Loop, je technologie vysokorychlostního přenosu dat mezi koncovým účastníkem a nejbližší telefonní ústřednou. Jeden z hlavních znaků a také nesporná výhoda oproti jiným technologiím je, že používá pro přenos dat stávající telefonní vedení nebo vedení kabelové televize, nejčastěji symetrického páru, koaxiálního kabelu, či plochého nekrouceného kabelu. Ve většině případů tedy odpadá instalace nových vedení, a tím se značně snižují náklady na implementaci.<sup>39</sup>[14]

---

<sup>1</sup> FTTx: Fiber to the „x“ je souhrnné označení pro technologie širokopásmové síťové architektury využívající k přenosu dat optické vlákno

<sup>2</sup> xDSL: „x“ Digital Subscriber Line je souhrnné označení pro technologie širokopásmového připojení pomocí stávajících telefonních vedení

<sup>3</sup> FTTH: Fiber to the Home

<sup>4</sup> VDSL 2: Very-high-speed Digital Subscriber Line 2

<sup>5</sup> G.fast: ITU-T-G. Fast Access to/over Subscriber Terminals

I když jsou data přenášena po vedení určeném původně pro telefonní hovory, neznamená to však, že by v jeden okamžik mohla být v provozu jen jedna z těchto služeb. DSL totiž přenáší data na vyšších frekvencích. Zatímco POTS<sup>6</sup>, tedy telefonní služba, využívá frekvence 0 Hz až 4 kHz, DSL se pohybuje typicky od 25 kHz do 2 MHz.

Novější systémy xDSL mohou dosahovat i frekvencí vyšších, to znamená, že se liší použitím různých kmitočtových pásem. Kromě frekvence se liší zejména přenosovou rychlostí, která se u DSL pohybuje mezi 256 kb/s a 100 Mb/s, a dosahem. [14]

## 2.1. Systémy xDSL

Parametry DSL se mění v závislosti na typu systému. Základní dělení je na symetrickou a asymetrickou přípojku. U symetrické linky jsou přenosové rychlosti ve směru od a k účastníkovi stejné. U asymetrické varianty je vyšší přenosová rychlost ve směru k účastníkovi. Děje se tak proto, abychom efektivněji využili přenosovou kapacitu, neboť u běžného účastníka využívajícího širokopásmových služeb je daleko častěji nutné přenášet více dat ve směru k němu (prohlížení internetu, prohlížení videa atd.). Tím však důležitost symetrické varianty neklesá. Dá se s úspěchem použít v případech, kdy je přenosová kapacita využita v obou směrech srovnatelně, například k udržení aktualizovaných databází a podobně.

### ISDL (ISDN Digital Subscriber Line)

Nejstarší varianta xDSL je ISDL s neměnnou přenosovou rychlostí 128 kb/s. K oddělení směrů přenosu používá metodu EC<sup>7</sup>, přenos probíhá v základním pásmu za použití čtyřúrovňového linkového kódu 2B1Q.

### HDSL (ITU-T G.991.1)

Přenosová rychlost je 2,048 Mb/s v obou směrech, a to buď po 2 nebo 3 párech účastnického vedení, kdy každé vedení přenáší část datového toku. Nevýhoda HDSL vězí v nutnosti použít právě 2 nebo 3 páry vedení. **HDSL 2** využívá jen jednoho symetrického páru a modulace TC-PAM<sup>8</sup>.

### SDSL a SHDSL (ITU-T G.991.2)

Používá modulaci 16-TC-PAM, která zlepšuje zabezpečení přenosu kontrolou chyb (3 bity pro data a čtvrtý pro kontrolu). Výhoda oproti HDSL spočívá v možnosti nastavit maximální přenosovou rychlost, což se může dělat automaticky při sestavování spojení na základě parametrů vedení nebo manuálně. Přenosové rychlosti se pohybují mezi 192 kb/s a 2,312 Mb/s po krocích 64 kb/s. Další zlepšení spočívá ve snížení přeslechového rušení do sousedních párů nastavením vysílací úrovně odpovídající parametrům daného vedení. Nicméně nelze na jednom účastnickém vedení provozovat současně přenos hovorového signálu a vysokorychlostního datového kanálu.

### ADSL (ITU-T G.992.x)

Již umožňuje na jednom vedení převádět současně telefonní hovory a vysokorychlostní datové kanály. Má varianty Annex A (ADSL over POTS) a Annex B (ADSL over ISDN). Přenosové rychlosti směrem k účastníkovi jsou až 8 Mb/s, 12 Mb/s pro **ADSL 2** a až 42 Mb/s pro **ADSL 2+**. Směrem od účastníka může přenosová rychlost dosáhnout až 1 Mb/s. Abychom dokázali frekvenčně oddělit telefonní kanál od

---

<sup>6</sup> POTS: Plain Old Telephone Service

<sup>7</sup> EC: Echo Cancellation

<sup>8</sup> TC-PAM: Trellis-Coded Pulse Amplitude Modulation



vysokorychlostních datových kanálů, používáme na každé straně účastnického vedení rozbočovače (splittery) nebo filtry.

### VDSL (ITU-T G.993.1) a VDSL 2 (ITU-T G.993.2)

Tato technologie slouží pro propojení poslední části přístupové sítě, jedná se zpravidla o úsek účastnického vedení o délce 300 m až 1,5 km. Zde už se objevuje koexistence s optickým vedením, pomocí něhož je datový tok přiveden do rozvaděče. Z rozvaděče vede ke koncovým účastníkům opět metalické vedení. Díky navýšení frekvenčního spektra do 12 MHz se zvýšila přenosové rychlosti na 52 Mb/s směrem k účastníkovi. Ve směru od účastníka se při nesymetrickém přenosu dat dosahuje rychlosti 6,4 Mb/s. Při symetrickém přenosu dat se počítá s rychlostí 34 Mb/s. Přenosová rychlost VDSL 2 dosahuje až 100 Mb/s při frekvenčním spektru do 30 MHz. Tato technologie využívá pro frekvenční oddělení obou směrů princip frekvenčního multiplexu FDM<sup>9</sup>.

### G.fast (ITU-T G.9700, G.9701)

Název	Typ provozu	Upload [Mb/s]	Download [Mb/s]	Frekvenční pásmo [kHz]	Metoda duplexního přenosu	Dosah [km]
<b>IDSL</b>	symetrický, duplexní	0,128	0,128	0 - 50	EC	6
<b>HDSL</b>	symetrický, duplexní	2	2	40 - 292	EC	2.3
<b>SDSL</b>	symetrický, duplexní	2,3	2,3	0 - 384	EC	2.5
<b>SHDSL</b>	symetrický, duplexní	2,3	2,3	0 - 384	EC	3.6
<b>ADSL Lite</b>	asymetrický	0,5	1,5	25 - 138 138 - 552	FDD, EC	7
<b>ADSL</b>	asymetrický	1	8	25 - 138	FDD, EC	8
<b>ADSL 2</b>	asymetrický	1	12	138 - 1104	FDD, EC	8
<b>ADSL 2+</b>	asymetrický	1	24	138 - 2208	FDD, EC	3
<b>VDSL</b>	asymetrický, symetrický, duplexní	6,4 34	52 34	300 - 900 1200 - 30000	FDD	0,3 - 1,5
<b>VDSL 2</b>	asymetrický, symetrický, duplexní	100	100	1200 - 30000	FDD	0,3 - 1,5

*Tabulka 1: Srovnání parametrů systémů xDSL [18]*

V souvislosti s použitím metalického vedení je třeba zmínit podstatnou a jednu z největších nevýhod DSL, kterou je útlum vedení. Z tohoto důvodu nemůžeme DSL nasadit na vzdálenosti charakteristické například pro technologii FTTx. Přesto se

<sup>9</sup> FDM: Frequency Division Multiplexing

technologie DSL v současné době řadí mezi nejpoužívanější, s celkovým počtem 364,1 milionu účastníků (údaj platný pro únor 2012).[13] [22]

## 2.2. Modulace DMT

Technologie DSL používá modulaci s více nosnými nesoucí název DMT<sup>10</sup>. Základní princip je rozdělení frekvenčního pásma do 256 subpásem, někdy též označovaných jako subkanály. Tato subpásma mají stejnou frekvenční šířku 4,3125 kHz a pro modulaci přenášených dat využívají kvadrurně amplitudovou modulaci - QAM<sup>11</sup>. Důležitý je fakt, že jednotlivá subpásma jsou na sobě navzájem nezávislá, tudíž mohou na základě odstupů signálu od šumu (SNR<sup>12</sup>) použít pro každý subkanál jiný počet stavů modulace QAM.

Modulace se u DMT provádí pomocí diskretní inverzní Fourierovy transformace (IDFT<sup>13</sup>), kdy se přenášený signál, tedy skupina QAM symbolů v každém subpásmu, převede z frekvenční oblasti do časové, kde tvoří DMT symbol. Demodulace se děje diskretní Fourierovou transformací (DFT<sup>14</sup>), zde se naopak signál převádí z časové oblasti do frekvenční. Modulační rychlost je stejná ve všech subpásmech.[20]

## 2.3. Struktura sítě xDSL

Když půjdeme od účastníka, skládá se xDSL síť z počítače účastníka připojeného na modem. Ten je přes splitter napojen prostřednictvím uličního rozvaděče nebo pobočkové ústředny na DSLAM. Dále vede provoz na BRAS a do sítě konkrétního poskytovatele.

### xDSL Modem

DSL modem (angl. DSL transceiver), někdy označovaný jako ATU-R<sup>15</sup>, slouží pro připojení počítače účastníka k telefonnímu vedení. Modem může připojovat i více počítačů najednou pomocí Ethernetových portů RJ-45 nebo též bezdrátově přes Wi-fi rozhraní, nejčastěji 802.11b, 802.11g nebo 802.11n, a vytvořit tak bezdrátový přístupový bod (wireless access point). K připojení k telefonní lince slouží rozhraní RJ-11<sup>16</sup>. Konfiguraci modemu můžeme provést nejčastěji přes webové rozhraní, jak tomu bylo i v případě našeho experimentu. Mezi další funkce DSL modemu patří například překlad adres NAT<sup>17</sup>, zabudovaný přepínač, tvorba a management virtuálních sítí VLAN<sup>18</sup>, DHCP<sup>19</sup>, DNS<sup>20</sup>, VoIP<sup>21</sup>. [15]

### Rozbočovač

Rozbočovač, neboli splitter, je pasivní síťová součástka, která slouží k oddělení technologie POTS od DSL, jdoucích po stejném médiu. Funkce splitteru je založená na principu nízkofrekvenčního filtru. Jelikož obě zmíněné technologie používají rozdílné

<sup>10</sup> DMT: Discrete Multi-Tone

<sup>11</sup> QAM: Quadrature amplitude modulation

<sup>12</sup> SNR: Signal to Noise Ratio

<sup>13</sup> IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform

<sup>14</sup> DFT: Discrete Fourier Transform

<sup>15</sup> ATU-R: ADSL Termination Unit – Remote

<sup>16</sup> RJ-11: Registered Jack - 11

<sup>17</sup> NAT: Network Address Translation

<sup>18</sup> VLAN: Virtual Local Area Network

<sup>19</sup> DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol

<sup>20</sup> DNS: Domain Name System

<sup>21</sup> VoIP: Voice over Internet Protocol

frekvence, splitter propustí jen určitý rozsah frekvencí a přivede ho na daný port. Bez použití splitteru by docházelo ke snížení kvality DSL i telefonní služby vlivem ozvěn a šumu. Splitter má obvykle 3 porty. Z jedné strany se nachází port pro vedení, na kterém jdou obě technologie ještě společně, na druhé straně ústí buď dva nebo jen jeden port pro danou službu (v takovém případě se jedná o filter). [17]

Ukázka našeho splitteru je na následujícím obrázku.



*Obrázek 1: Použitý splitter*

## **DSLAM**

DSLAM<sup>22</sup> je síťové zařízení, které slučuje data z několika DSL modemů do jednoho vysokorychlostního kanálu použitím multiplexování. Obvykle je dále spojen s širokopásmovým vzdáleným přístupovým serverem BRAS<sup>23</sup>, jehož úkolem je řídit síťový provoz mezi DSLAM a sítí internetového poskytovatele ISP<sup>24</sup>. Jelikož s rostoucí vzdáleností klesá vlivem rostoucího útlumu kvalita přenosu, DSLAM se nemusí nutně nacházet jen v telefonních ústřednách, ale instalují se také blízko účastníka, typicky koncentrují telefonní linky z několika ulic či bloků v uličním rozvaděči. Vzdálenost je zde klíčová, například na 300m úseku vedení dosáhneme přenosové rychlosti až 25 Mb/s, zatímco na 3km už jen 8 Mb/s (platí pro 0,4 mm kabel a ADSL2+ technologii).[16]

## **BRAS**

Zatímco DSLAM soustředí datový provoz od několika účastníků, Broadband Remote Access Server soustředí provoz z několika DSLAM. Poskytuje QoS<sup>25</sup>, je

---

<sup>22</sup> DSLAM: DSL Access Multiplexer

<sup>23</sup> BRAS: Broadband Remote Access Server

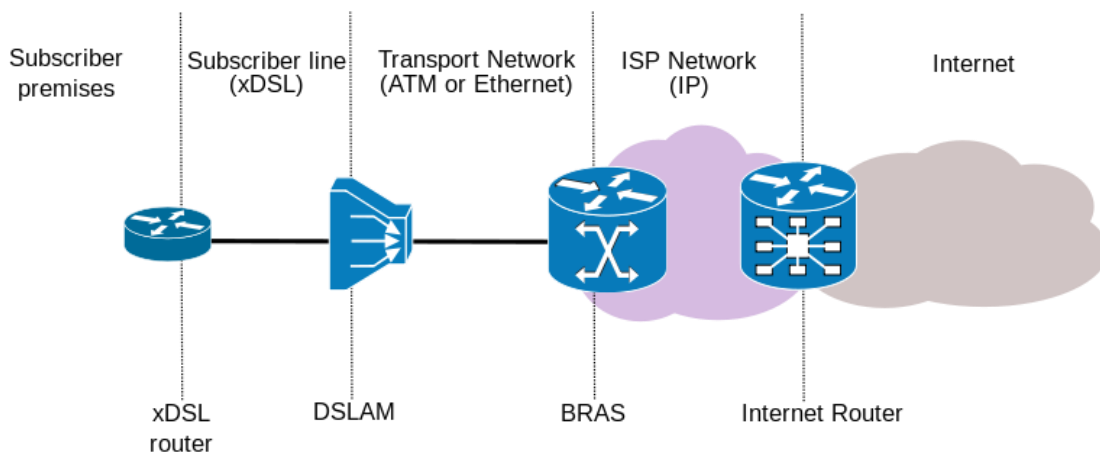
<sup>24</sup> ISP: Internet Service Provider

<sup>25</sup> QoS: Quality of Service

odpovědný za přiřazení IP adres účastníkům (je také 1. hop od účastníka směrem do internetu). Metody přístupu k lince jsou PPPoE<sup>26</sup>, PPPoA<sup>27</sup> nebo jen Ethernet. V případě ATM nebo Frame Relay, jednotliví účastníci mají svá ID virtuálního okruhu, v případě Ethernetu se odlišují VLAN ID nebo MPLS<sup>28</sup> tagy.

Jinými slovy je jakýmsi logickým ukončením přístupové sítě a řídí provoz mezi přístupovou sítí a sítí internetového poskytovatele. Proto je někdy označován jako BNG<sup>29</sup>. [19]

Grafické znázornění struktury sítě je na obrázku.



Obrázek 2: Grafické znázornění struktury xDSL sítě [19]

### 3. Přípojka G.fast

Nároky na množství a rychlost přenášených dat se neustále zvyšují. Cílem je najít způsob, jak efektivně a levně zlepšit infrastrukturu sítě, aby těmto nárokům bylo co nejvíce vyhověno. Navzdory stále se zvyšujícímu trendu přenosu dat po optickém médiu, je dosud nejpoužívanější metalické vedení a s jeho použitím se počítá i do budoucnosti.

Kapacitu přístupových sítí můžeme zvýšit použitím FTTH namísto stávajících metalických vedení v segmentech na samé hranici přístupové sítě. Čím blíže bychom chtěli FTTH implementovat ve směru ke koncovým účastníkům, tím více by náklady rostly, a to exponenciálně. Abychom tyto náklady rozprostřeli do delšího časového úseku, hledáme prozatímní řešení, jak přenášet data rychlostmi typickými pro optická vedení, ale po stávajících metalických linkách. Proto započal vývoj nového DSL standardu G.fast, což je rekurzivní akronym pro *Fast Access to/over Subscriber Terminals* a písmenko *G* říká, že jde o soubor doporučení ITU-T G, tedy kategorie přenosových systémů a médií, digitálních systémů a sítí.

G.fast čerpá z úspěchu technologie VDSL2, ale jeho přenosové rychlosti by měly dosahovat na 500 až 1000 Mb/s v úsecích vedení pod 200 m. Předpokládá se užití frekvenčního spektra až na 106 MHz a 212 MHz. Takto vysoké frekvence znamenají vyšší útlum vedení, takže je zapotřebí udržet délky vedení co nejkratší, a také dovolují přeslechu

<sup>26</sup> PPPoE: Point to Point Protocol over Ethernet

<sup>27</sup> PPPoA: Point to Point Protocol over ATM

<sup>28</sup> MPLS: Multiprotocol Label Switching

<sup>29</sup> BNG: Broadband Network Gateway

na vzdáleném konci (FEXT<sup>30</sup>) negativně ovlivňovat kvalitu přenosu, v případech, kdy je v jednom kabelu více aktivních přípojek. Na rozdíl od VDSL 2 bude G.fast používat pro oddělení směrů přenosu časové dělení TDD<sup>31</sup>. Snížení chybovosti při přenosu zajišťuje metoda dopředného opravení chyb FEC<sup>32</sup>.

Kvůli takto krátkým vzdálenostem se G.fast bude muset spolehnout na husté rozmístění zařízení. Idea je taková, že z ústředny povede optické vedení do vzdáleného uzlu RN<sup>33</sup>, který se nachází blízko koncového uživatele (například v distribučním bodě, pod zemí, nebo přímo v budově). Tento uzel tvoří přechod na metalické vedení a může připojit až 16 uživatelů, bude muset být energeticky úsporný a soběstačný.[9]

### 3.1. Modulace VDMT

Vektorová DMT je rozšíření modulace DMT. Používá se u přípojek xDSL, například u VDSL 2, neboť právě tam mají na přenosovou rychlost velký vliv přeslechy, které mají většinové zastoupení v šumu. Frekvenční dělení směrů přenosu (FDD) dokáže efektivně eliminovat přeslech na blízkém konci (NEXT<sup>34</sup>). V souvislosti s použitím krátkých délek účastnického vedení a rozšířeného frekvenčního pásma je třeba potlačit také přeslech na vzdáleném konci (FEXT). K tomuto účelu se hodí právě VDMT.[20]

V případě G.fastu se v Bellových laboratořích pracuje na vylepšení VDMT, známé spíše jako Vectoring 2.0 nebo G.vector. Tato technologie se specializuje na délky účastnického vedení pod 250 metrů, tedy přesně pro potřebu G.fastu. Jelikož G.fast bude používat tak vysoké frekvence, síla přeslechu na vzdáleném konci může dosahovat síly srovnatelné s původním signálem, takže je potřeba použít kompenzační signál, který bude schopen tento negativní vliv eliminovat, aniž by překročil spektrální hustotu výkonu. Další otázkou je náročnost výpočetního algoritmu, při použití takových frekvencí.

Pro představu společnost Telekom Austria byla schopna v laboratorních podmínkách dosáhnout přenosové rychlosti 1.1 Gb/s na jednom 70 m symetrickém páru, 800 Mb/s na 100 m. V reálném případě jsou však k dispozici většinou nestíněná stará vedení, na kterých se rychlost dostala na 500 Mb/s na 100 m, pro dvě vedení však rychlost klesla na pouhých 60 Mb/s. Nicméně s použitím prototypu Vectoringu 2.0 se podařilo eliminovat přeslechy a rychlost se vyšplhala opět na 500 Mb/s. Proto je důležité si uvědomit, že dosažitelné přenosové rychlosti budou závislé na kvalitě metalického vedení, které budou pravděpodobně v různých místech odlišné.[21]

### 3.2. Inverzní napájení

G.fast počítá s inverzním (zpětným) napájením, tzn. ze strany účastníka (CPE<sup>35</sup>). Výhodou je zaprvé kratší vzdálenost k napájenému zařízení ve vzdáleném uzlu (RN), a tím i menší ztráty při daném napětí, ve srovnání s dopředným napájením, tedy napájením z ústředny (CO<sup>36</sup>). Za druhé to znamená ekonomicky úspornější řešení, protože není potřeba pokládat novou kabeláž pro napájení, neboť vodiče, po nichž budeme proud dodávat do vzdáleného uzlu, jsou součástí vedení mezi vzdáleným uzlem a účastníkem.

Nevýhoda inverzního napájení vězí v tom, že účastník bude muset být sám schopen uvést do provozu zařízení na jeho straně bez toho, aniž by musel mít odbornou způsobilost

---

<sup>30</sup> FEXT: Far End Crosstalk

<sup>31</sup> TDD: Time Division Duplex

<sup>32</sup> FEC: Forward Error Correction

<sup>33</sup> RN: Remote Node

<sup>34</sup> NEXT: Near End Crosstalk

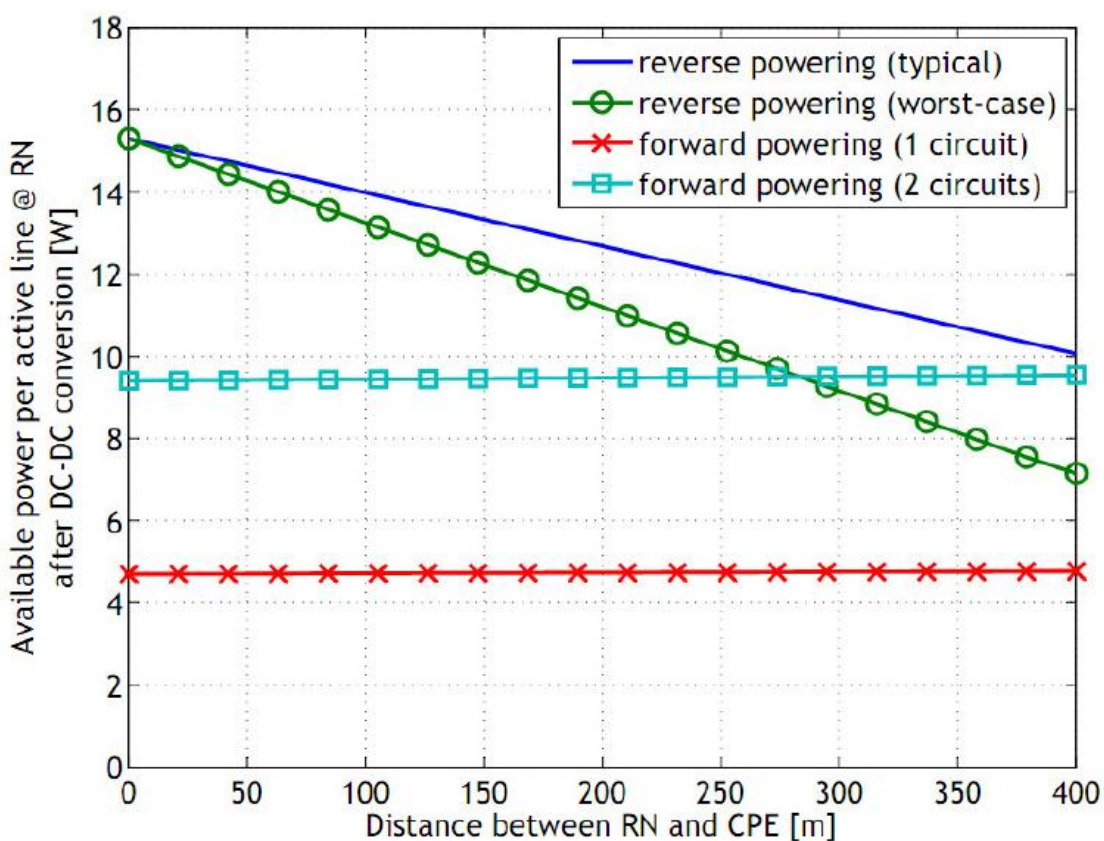
<sup>35</sup> CPE: Customer Premises Equipment

<sup>36</sup> CO: Central Office

k obsluze zařízení pod nebezpečným proudem. Proto bude třeba použít napětí a proud odpovídajících velikostí tak, aby byla zaručena bezpečnost účastníka při manipulaci se zařízením. Jinými slovy napájecí výkon bude muset být omezený.

Dalším faktem je, že na jednoho účastníka může být aktivní pouze jeden symetrický pár vedení. Pro představu pokud budeme napájet vzdálený uzel na vzdálenost 400 m vedením o průměru 0,4 mm, dosáhneme napájecího výkonu 7,2 W pro jednu aktivní linku. Očekávanými parametry G.fastu jsou napětí zdroje 60 V, proud pod 300 mA, přenos TDD kvůli nižší výpočetní náročnosti.

Následující graf závislosti použitelného napájecího výkonu na vzdálenosti mezi ústřednou (nebo rozvaděčem) a zařízením na straně účastníka (typicky modemem) ukazuje srovnání dopředného napájení pro různý počet smyček a inverzního napájení pro vodiče typicky o průměru 0,5 mm a v horším případě 0,4 mm. Je zřejmé, že u klasického napájení z ústředny není hlavním problémem vzdálenost, ale ekonomická náročnost, ve srovnání z druhou variantou.[9]



Obrázek 3: Závislost napájecího výkonu na vzdálenosti [9]

### 3.3. Stavební bloky

Stejně jako u VDSL 2, také G.fast spoléhá na použití rozšiřujících modulů (SEM<sup>37</sup>/REM<sup>38</sup>). Základem každého je optická ukončovací jednotka (ONT<sup>39</sup>), která

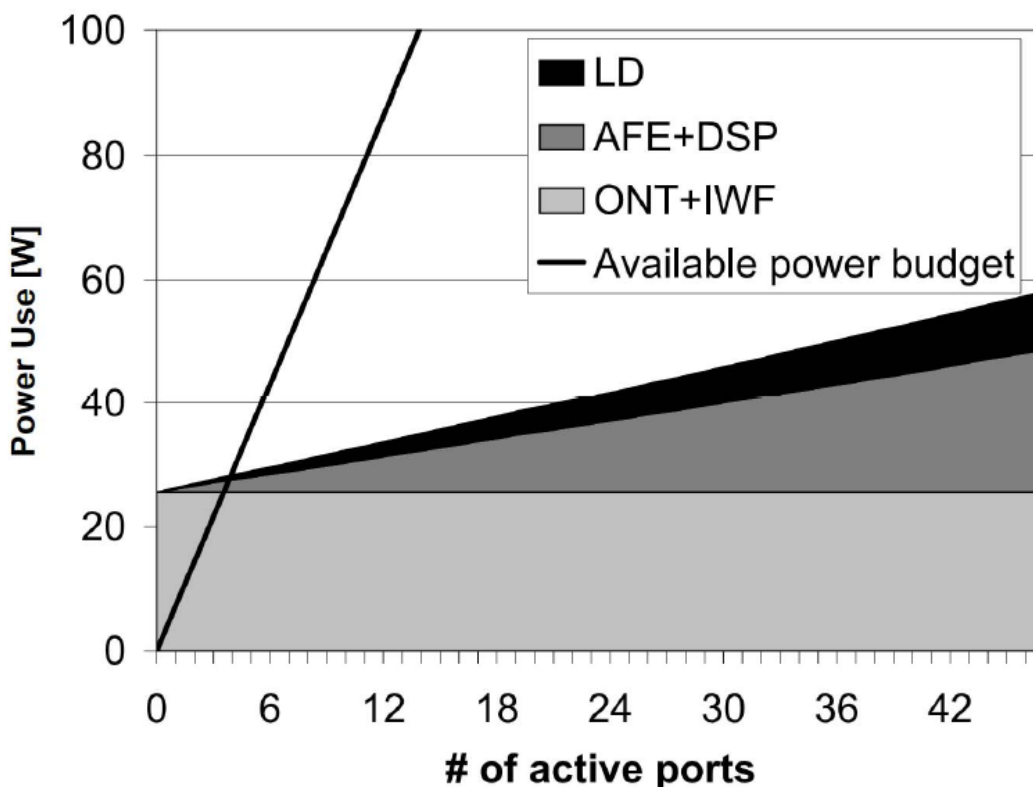
<sup>37</sup> SEM: Sealed Expansion Module

<sup>38</sup> REM: Remote Expansion Module

<sup>39</sup> ONT: Optical Network Terminal

převádí optický signál na elektrický a centrální blok (IWF<sup>40</sup>), která řídí datový provoz mezi ONT na straně CO a digitálním signálovým procesorem (DSP<sup>41</sup>). Na signálový procesor navazuje jednotka analogového rozhraní (AFE<sup>42</sup>) a na ni dále linkový budič (LD<sup>43</sup>), který zesiluje analogový signál. Optická ukončovací jednotka spolu s IWF jsou jediné stavební bloky vzdáleného uzlu, jejichž počet se nezvyšuje s počtem aktivních linek. Napájení těchto bloků je závislé na počtu aktivních portů, přičemž existuje minimální počet aktivních portů, který stačí na napájení daného uzlu jako celku.

Grafické znázornění závislosti počtu aktivních portů na spotřebě výkonu je na následujícím obrázku. Všimneme si, že jednotka ONT a funkce IWF skutečně nejsou z hlediska spotřeby výkonu závislé na počtu aktivních portů. Na grafu je také patrný minimální počet aktivních portů, který vymezuje rostoucí křivka napájecího výkonu, který je k dispozici.[9]



Obrázek 4: Závislost počtu aktivních portů na spotřebě výkonu [9]

G.fast nabízí tři metody, jak usnadnit napájení uzlu. Každá z nich je specifická svojí architekturou, všechny však počítají s délkou smyčky 200 m.

<sup>40</sup> IWF: Interworking Function

<sup>41</sup> DSP: Digital Signal Processor

<sup>42</sup> AFE: Analog Front End

<sup>43</sup> LD: Line Driver

## Vzdálená linková karta

První architektura využívá všechny výše popsané stavební bloky v 16 portovém vzdáleném uzlu, tedy ONT, IWF, DSP, AFE a LD. V úvahu připadají 2 technologie: ASIC<sup>44</sup> a FPGA<sup>45</sup>.

Implementace ASIC nabízí lepší využití napájecího výkonu, zatímco FPGA technologie je flexibilnější z hlediska programovatelnosti.

Dále lze rozlišovat mezi fixní a adaptivní architekturou. U fixní jsou ONT a IWF plně napájeny, i když je v provozu jen jeden port. Adaptivní varianta napájí IWF jen z takové části, aby se pokryl výkon potřebný k provozu daného počtu portů, což platí stejně pro jednotku ONT, která má aktivní pouze nezbytná optická vlákna.

## Centrální IWF

Jelikož je funkce IWF nejnáročnější z hlediska spotřeby energie, je v této architektuře situována v CO, za účelem větší úspory energie ve vzdáleném uzlu. Dále zde rozlišujeme 3 možnosti implementace: bez agregace, částečná a plná agregace.

První možnost se dá v případě 16 portového vzdáleného uzlu realizovat 16-ti optickými vlákny mezi CO a vzdáleným uzlem. Extrémně nízká spotřeba napájecího výkonu při jednom aktivním portu je ale převážena vysokými náklady.

U částečné agregace se provoz hromadí v místě DSP, což zmenšuje potřebné pásmo mezi CO a uzlem z 10 Gb/s na 8 Gb/s, ovšem za cenu mírného zvýšení spotřebované energie.

Třetí možnost počítá s použitím L2<sup>46</sup> přepínače ve vzdáleném uzlu, aby bylo zajištěné rozdělení provozu mezi jednotlivé DSP. Jinými slovy rozdělíme funkci IWF tak, aby se v uzlu nacházela jen ta nejzákladnější část. Dále používá jen jedno optické vlákno 10 Gb/s, což ale znemožňuje adaptivní architekturu, neboť je nutné mít toto vlákno v provozu i za předpokladu jen jednoho aktivního portu.

## Centrální IWF a DSP

Funkce IWF společně s DSP je na straně ústředny, která pouze posílá OFDM symboly do vzdáleného uzlu. Úkol uzlu je v tomto případě jediný, dát tuto informaci na vedení. Výhodou je nejnižší spotřeba energie z uvedených architektur, nevýhoda pak zvýšení pásma mezi CO a RN až třikrát spolu s nákladností.

Následující graf porovnává jednotlivé varianty a architektury v závislosti na dosahu. [9]

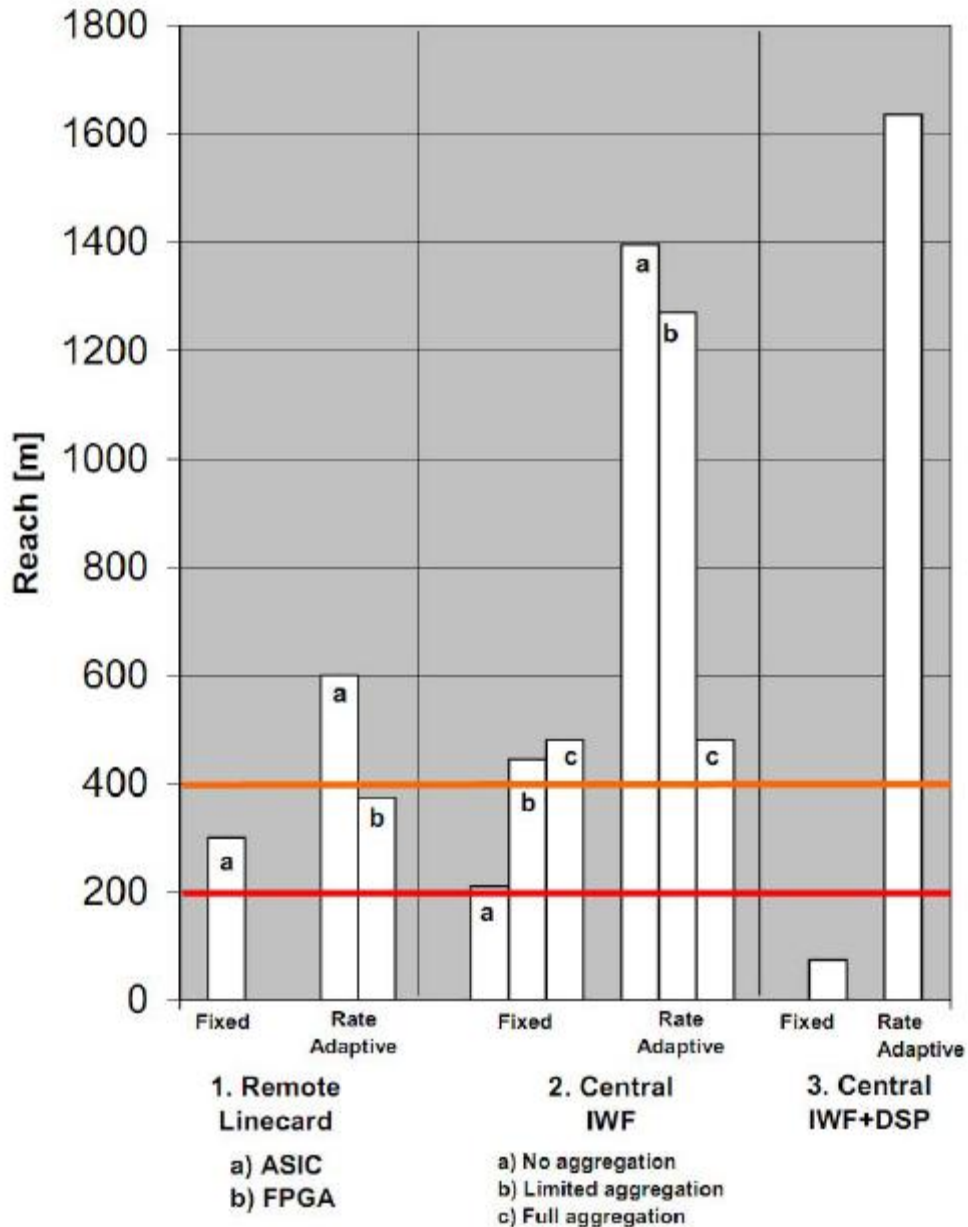
---

<sup>44</sup> ASIC: Application Specific Integrated Circuit

<sup>45</sup> FPGA: Field Programmable Gate Array

<sup>46</sup> L2: Second Layer





Obrázek 5: Znáornění dosahu pro různé varianty a architektury [9]

## 4. Napájení v sítích Ethernet

Pro porovnání s napájením řešeným u přípojek xDSL uvádíme i obdobné řešení PoE – Power over Ethernet. Tato technologie je standardizována IEEE<sup>47</sup> 802.3, v červnu 2003 se dočkala dodatku IEEE 802.3af „Data Terminal Equipment Power via Media Dependent Interface“. Toto rozšíření definuje, jak budou zařízení napájena prostřednictvím technologií 10BASE-T, 100BASE-T a 1000BASE-T. Už v roce 2000 měla firma Cisco Systems svoji vlastní obdobu dnešního PoE zvanou Cisco Inline Power (ILP). ILP byla od

<sup>47</sup> IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

té doby instalována do nemalého počtu sítí, což kladlo požadavek na standardizační komise, aby PoE bylo kompatibilní s ILP. Výhody PoE jsou nasnadě:

- napájení a data na jednom kabelu
- není nutné mít další napájecí kabel/adaptér
- snadnější manipulace se zařízením
- možné řízení spotřeby a management přes SNMP
- není nutné vylepšovat kabeláž

## 4.1. Dodatek IEEE 802.3af

Základní vlastnosti standardu jsou:

- napětí 44 - 57 V
- max. proud 550 mA
- max. zapínací proud 500 mA
- typický proud 10 – 350 mA
- detekce přetížení 350 – 500 mA
- odběr v klidovém stavu max. 5 mA

Standard rozlišuje dva druhy zařízení, a to napájecí (PSE<sup>48</sup>) a napájené (PD<sup>49</sup>). Napájená zařízení jsou zejména přístupové body (AP<sup>50</sup>), IP telefony, tiskárny atd. Napájecí zařízení může být třeba přepínač podporující PoE. Součástí standardu je také popis detekce PD, udržení a odpojení se od napájení.

### Napájecí zařízení (PSE)

Úkolem tohoto zařízení je detekce napájených zařízení, následné udržení a ukončení napájení. Samotné PSE můžeme dále rozdělit na:

- koncové
- mezilehlé

**Koncové PSE** je například port na PoE přepínači, ve kterém je přímo zapojen kabel s napájením. V rámci kabelu se pro napájení mohou použít buď dva datové páry vodičů (zpravidla 1,2 a 3,6), což nazýváme alternativa A.

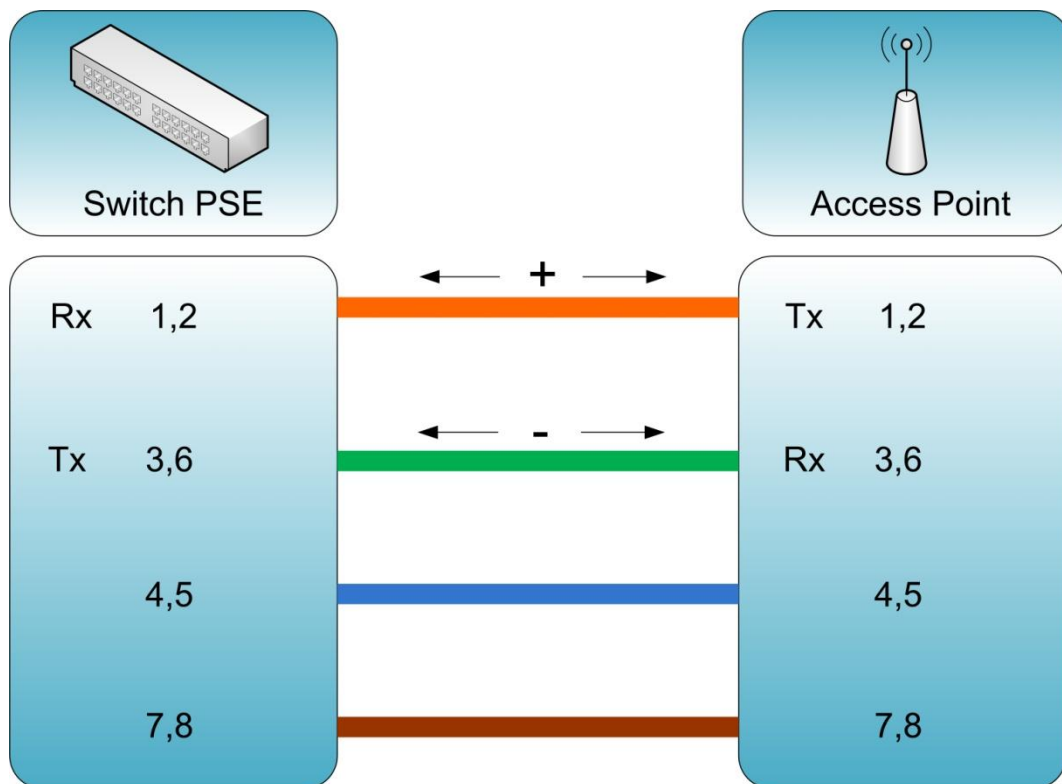
Ta využívá principu fantomových okruhů. Vysílací datový pár může tvořit kladnou větev, přijímací zase větev zápornou. Tato polarita může být i opačná, protože podle standardu musí PD podporovat oba případy. Alternativa B označuje napájení po nevyužitých párech vodičů, většinou 4,5 a 7,8. Je zřejmé, že tato varianta má jistá omezení. Nelze ji například sloučit s technologií 1000BASE-T, neboť ta používá jako datové vodiče všechny čtyři páry v kabelu.

---

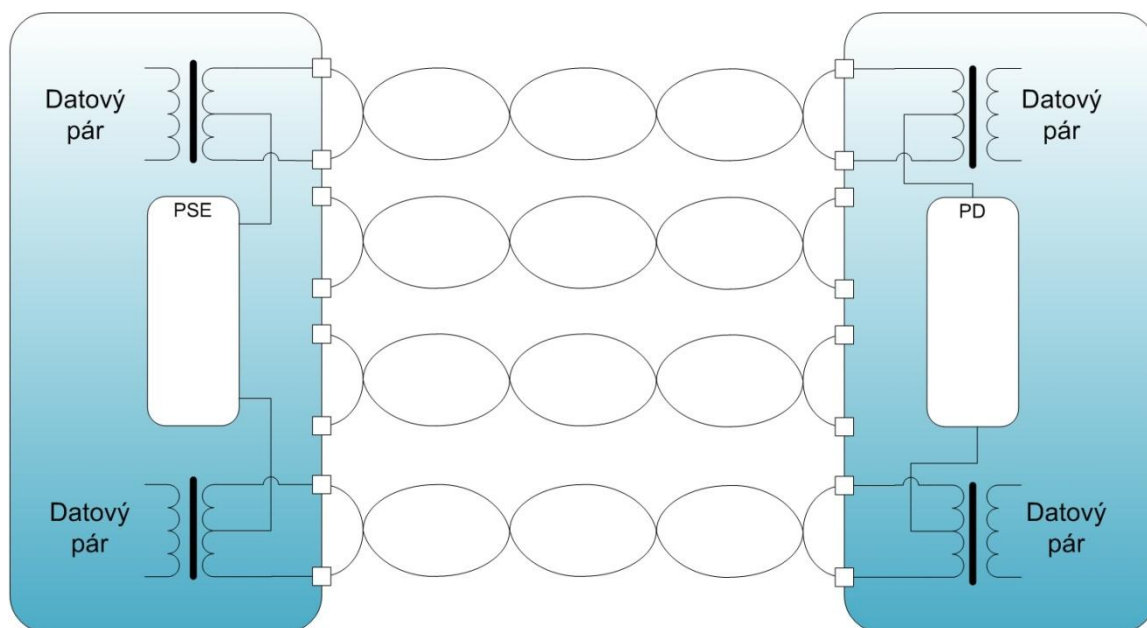
<sup>48</sup> PSE: Power Sourcing Equipment

<sup>49</sup> PD: Powered Device

<sup>50</sup> AP: Access Point

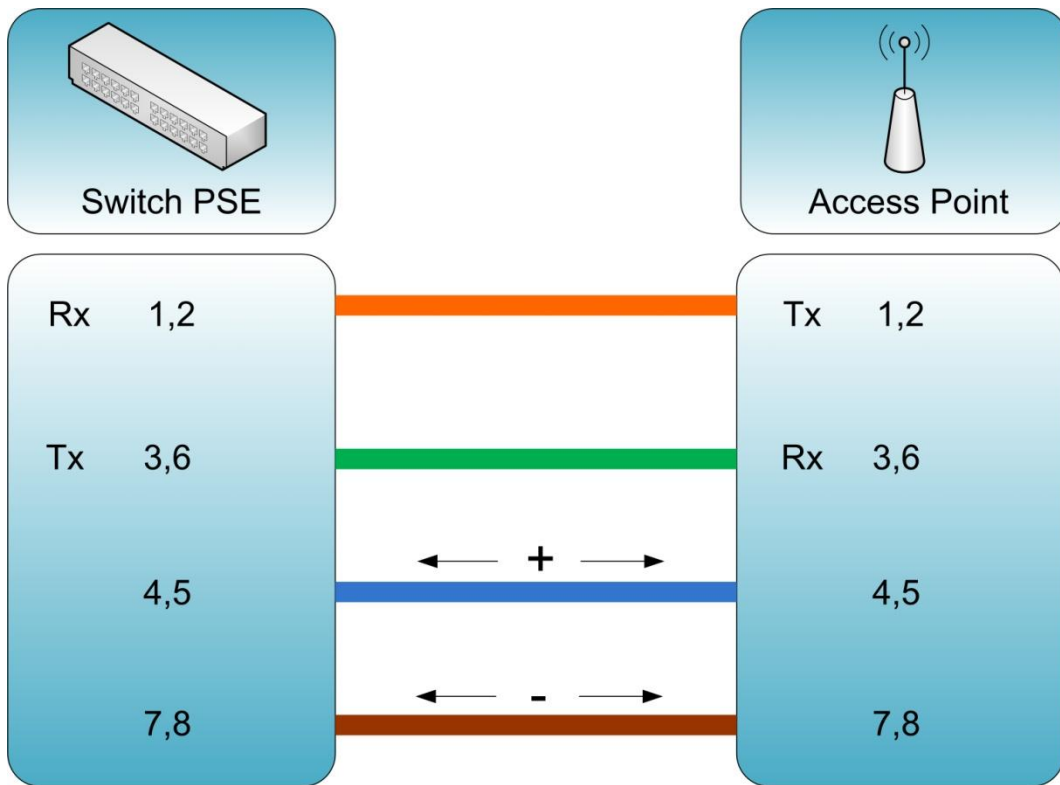


Obrázek 6: Alternativa A

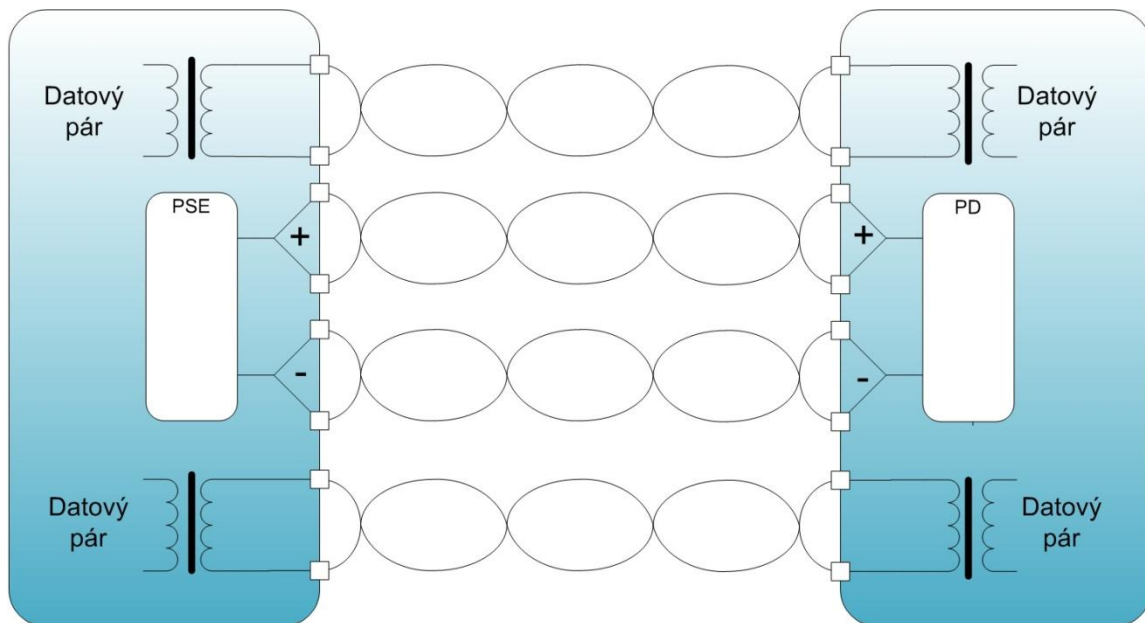


Obrázek 7: Schéma alternativy A

Nebo můžeme použít zbylé páry vodičů (4,5 a 7,8), což nazýváme alternativa B:



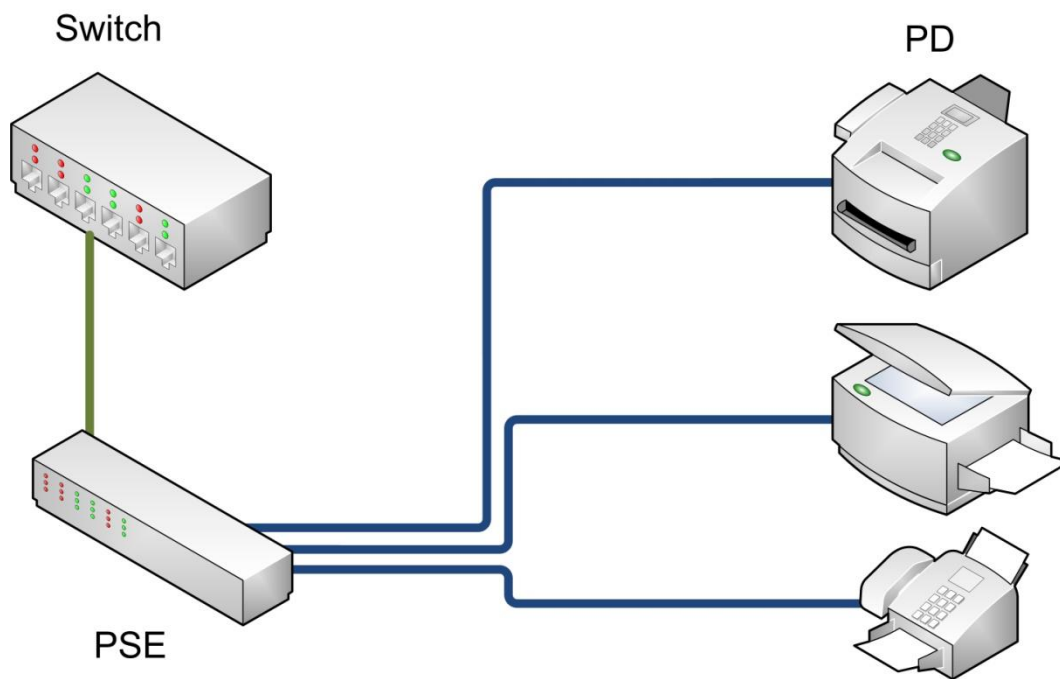
Obrázek 8: Alternativa B



Obrázek 9: Schéma alternativy B

Napájecí zařízení musí podle standardu podporovat obě alternativy – A i B, ale pro konkrétní napájení je vždy použita jen jedna. Jelikož se v případě DSL používá jeden pár vodičů, napájení je třeba řešit navíc s pomocí rozbočovačů nebo filtrů, jejichž funkce je navázat napájecí napětí na vedení (návrhu těchto filtrů se věnujeme v poslední kapitole).

**Mezilehlé PSE** použijeme například tehdy, kdy máme přepínač, který nepodporuje PoE. V takovém případě PSE umístíme mezi přepínač a napájené zařízení, jak je uvedeno v následujícím obrázku. Zde je mezi přepínačem (switch) a napájenými zařízeními jedno PSE, které napájí více PD. V praxi se můžeme setkat i s jinou variantou PSE, které slouží pro napájení pouze jednoho PD. Mezi přepínačem a PSE je pouze datové spojení, mezi PSE a PD jsou spojení datová i napájecí.



Obrázek 10: Mezilehlé PSE

Mezilehlá PSE zpravidla podporují pouze alternativu B, čili se nehodí pro vyšší přenosové rychlosti, jako například 1000BASE-T.

#### Napájené zařízení (PD)

Je takové zařízení, které dokáže přijmout napájení pomocí obou alternativ. V praxi se může stát, že se někteří výrobci omezí jen na jednu z alternativ a dochází k poruchám napájení.

PD se dělí do výkonnostních tříd podle maximálního příkonu:

Třída	Proud [mA]	Příkon PD [W]	Popis
0	0-4	0,44-12,94	PD neidentifikováno.
1	9-12	0,44-3,84	Nízký příkon PD.
2	17-20	3,84-6,49	Střední příkon PD.
3	26-30	6,49-12,95	Vysoký/plný příkon PD.
4	36-44	12,95-25,5	Vyhrazeno pro 802.3at (typ 2), nepodporováno 802.3af.

Tabulka 2: Třídy PoE podle napájení [11] [25]

Proces napájení zařízení prochází několika fázemi.

**Detekce** - Tato fáze je založena na měření terminačního odporu. PSE přiloží malé stejnosměrné napětí (typicky 2,7 až 10,1 V) mezi vysílací a přijímací páry vedení. PD odpovídající standardu PoE má mezi svými přijímacími a vysílacími páry 25kΩ rezistor. Pokud je tato zátěž (24,1 až 26 kΩ) detekována, PD je považováno za kompatibilní se standardem 802.3af. Detekční signál je posílán do aktivních i neaktivních portů v intervalu minimálně 2 s, přičemž odpověď na něj musí přijít za méně než 500 ms.

**Klasifikace** - PSE vyše klasifikační signál, neboli přiloží napětí (typicky 14,5 až 20,5 V) do kladného napájecího páru, a sleduje proudové zatížení na záporném napájecím páru. Na základě hodnoty změřeného proudu PSE určí výkonovou třídu. Pokud je proud menší než 4 mA, je zařízení přiřazeno výchozí nultá třída. Pokud proud naopak překročí 44 mA, proces je ukončen a vrací se do fáze detekce. Délka měření proudu zde nepřesáhne 75 ms.

**Detekce 802.3at** (volitelné) - PSE podporující tento standard může též přiložit napětí 7 až 10 V. Pokud zjistí proud v rozmezí 0,25 až 4 mA, přiloží opět klasifikační signál indikující kompatibilitu s 802.3at. Nakonec přiloží znovu 7 až 10 V a v případě, že změří proud v rozmezí 0,25-4 mA, pokračuje aktivační fází.

**Aktivace** - PSE vyše aktivační signál přiložením napětí 30 až 44 V. V PD se nabíjí překlenovací kondenzátory, které omezí okamžitý proudový odběr zařízení bezprostředně po připojení. Když překročí povolenou hodnotu, mohlo by to být považováno za zkrat a došlo by k odpojení napájení. Aktivace trvá zpravidla 50 ms.

**Napájení** - PSE poskytuje plné napájení 37-57 V pro 802.3af, případně 42,5-57 V pro 802.3at. V této fázi se mohou objevit vyšší proudové odběry, pokud však přesáhnou dobu trvání 50 ms, dojde k odpojení napájení. Stejně tak nesmí proud poklesnout pod 10 mA, jinak to bude vyhodnoceno jako odpojení zařízení.

**Odpojení** - Pokud dojde k odpojení PD, napájení je ukončeno za maximálně 250 ms.

IEEE standard pro PoE počítá s použitím kabelů Cat5 a vyšších, nicméně pro menší napájecí výkony můžeme využít i kabely Cat3. [11] [24] [25]

## 4.2. Dodatek IEEE 802.3at

Dodatek z roku 2009, též známý jako PoE+. Stejně jako předchozí uvedený rozlišuje dvě umístění PSE, tedy jako koncové a mezilehlé napájecí zařízení. Dále dělí PSE z hlediska poskytovaného napájecího výkonu na dva typy:

- **Typ 1** používá dva páry pro napájení a může poskytnout maximálně 15,4 W v rozpětí 44 až 57 V stejnosměrného napětí po kabelech Cat3 a lepší.
- **Typ 2** může poskytnout 30 W po dvou párech nebo 60 W po čtyřech párech v rozpětí 50 až 57 V stejnosměrného napětí po kabelech Cat5 a lepší.

Napájená zařízení mohou být napájena v rozmezí 37 – 57 V, potom poskytují tyto příkony:

- Typ 1 maximálně 13 W.
- Typ 2 po dvou párech maximálně 25,5 W.
- Typ 2 po čtyřech párech maximálně 51 W.

Podpora alternativ A i B je samozřejmostí.[26]

### 4.3. Energy Efficient Ethernet

Neboli dodatek 802.3az z roku 2010, jehož cílem je ušetřit spotřebu napájených zařízení alespoň o 50 %. Síťová zařízení totiž podle odhadů spotřebují 10 % celkové spotřebované energie ze všech IT<sup>51</sup> zařízení. Spotřeba energie roste nejen s přibývajícými síťovými prvky, ale i s rostoucími nároky na přenosovou kapacitu. Studie Lawrence Berkeley Laboratory uvádí, že díky EEE<sup>52</sup> se teoreticky může ušetřit 450 milionů dolarů ročně [28] .

Ke vzniku standardu vedly dva faktory:

- Některé části obvodů v síťových prvcích jsou stále aktivní a vyžadují plný výkon, i když prvkem neprotéká datový tok.
- Typický síťový provoz v Ethernetu má sice provozní špičky, kdy je využita celá přenosová kapacita, ale přesto velkou část doby zůstává neaktivní.

Princip EEE spočívá v přepínání portů na síťových prvcích do režimu Datový mód a Nečinný mód (LPI<sup>53</sup>) podle toho, zda porty protéká datový tok. Každý port nebo síťová karta (NIC<sup>54</sup>) při sestavování spojení informuje protějšek o podpoře EEE. Pokud je EEE podporováno zařízeními na obou koncích, spojení funguje v tomto režimu, takže při nulovém datovém toku přechází porty na obou koncích spojení do módu LPI. Síťový prvek se neustále ujišťuje, zda není třeba přepnout port do datového módu vysláním testovacího signálu v určitých intervalech. Pokud protějščí síťový prvek při navazování spojení nepotvrdí podporu EEE, komunikace probíhá jako u klasického Ethernetu.

Energy Efficient Ethernet podporuje technologie BASE-T až do 10 Gb/s. [27] [28]

## 5. Praktická část

### 5.1. Vlastnosti vedení

Jelikož vodiče používané v praxi nejsou ideální, vznikají v nich průchodem elektrického proudu ztráty, kterým souhrnně říkáme ztrátový výkon. Tento výkon přechází do okolí ve formě tepla, takže zahřívá nejen vodič, ale i izolaci a okolí. Míra ohřevu závisí na velikosti procházejícího proudu a vlastnostech izolace. Předpokládáme, že k určení oteplení vodiče použijeme vzorec:

$$P = R \cdot I^2 \text{ [W; } \Omega; \text{ A]}, \quad (1)$$

přičemž P je ztrátový výkon, R je odpor vodiče a I procházející proud. Je třeba uvažovat, že pokud tento vztah použijeme pro vodič bez izolace, výsledné oteplení pro vodič s izolací bude větší, neboť izolační materiál se bude snažit udržet teplo uvnitř kabelu.

---

<sup>51</sup> IT: Information Technology

<sup>52</sup> EEE: Energy Efficient Ethernet

<sup>53</sup> LPI: Low Power Idle

<sup>54</sup> NIC: Network Interface Card

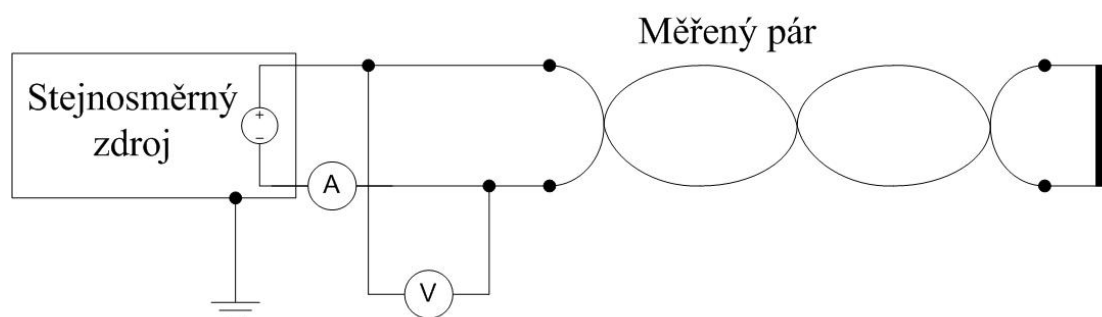
Pokud se mění teplota vodiče, mění se i odpor a s ním úbytek napětí na vodiči, což je třeba brát v úvahu.[7]

S rostoucí teplotou roste elektrický odpor vodiče. Tato závislost je nelineární, avšak pro malé změny teploty ji za lineární považovat můžeme. Na každém vodiči se v závislosti na jeho délce mění odpor vodiče, a proto je třeba sledovat také úbytek napětí na vodiči. Pro účely našeho projektu chceme zjistit, jak velké napětí jsme schopni dopravit na konec vodiče. Budeme tedy měřit úbytek napětí na vodiči.[10]

Další faktor, který je třeba brát v úvahu, je elektrická pevnost izolace. Izolační materiál se může při určitém napětí stát vodivým. Toto napětí, při němž se působením elektrického pole v izolantu začnou uvolňovat vázané elektrony, které narážejí do neutrálních atomů a uvolňují další elektrony, a materiál se tedy stává vodivým, se nazývá průrazné napětí. Při měření musíme dát pozor, aby hodnoty napětí ve vodiči byly nižší, než průrazné napětí izolace.[8]

## 5.2. Měření úbytku napětí na kabelu

Nejprve jsme měřili dvě délky kabelů a dva různé průměry vodiče. Vybrali jsme jeden kroucený pár vodičů, jeden konec připojili ke zdroji a druhý konec zkratovali. K měření jsme používali číslicové multimetry Metex M3850 a Metex 3610D, napájecí zdroje AUL 210, AUL 310. Schéma a ukázka zapojení je na obrázku:



Obrázek 11: Schéma zapojení pro měření úbytku napětí na jednom páru





Obrázek 12: Měření úbytku napětí na jednom páru (UTP SYKFY)

Postupně jsme zvyšovali proud a sledovali, jak se mění napětí v závislosti na čase. Dávali jsme pozor, aby se vedení příliš nezahřálo a nedošlo tak k propálení izolace. Maximální teplotu jsme stanovili pro nejhorší případ 120° C. Před samotným měřením jsme si ověřili výpočtem, do jaké míry můžeme vodiče zatížit, aby nedošlo k jejich zničení. Pro první měření jsme použili nestíněný přenosový kabel SYKFY UTP firmy PraKab, s parametry 5x2x0,5.

Výsledky měření ukazuje následující tabulka:

Vodič 100 m. Průměr vodiče 0,5 mm.								
I [A]	U [V]	U' [V]	U <sub>x</sub> [mV]	R [Ω]	R' [Ω]	P [W]	Δ θ [°C]	U <sub>UB</sub> [V]
0,508	4,51	4,51	0	8,88	8,88	2,29	0,00	4,37
1	8,91	8,92	10	8,91	8,92	8,91	0,15	8,61
1,5	13,43	13,5	70	8,95	9,00	20,15	0,68	12,91
1,94	17,57	17,74	170	9,06	9,14	34,09	1,27	16,70
4,04	37,7	39,73	2030	9,33	9,83	152,31	7,30	34,77

Tabulka 3: Výsledky měření úbytku napětí na jednom páru

Kde I je proud protékající vodiči, U je úbytek napětí, U' je úbytek napětí zaznamenaný po 2 minutách měření, U<sub>x</sub> je rozdíl napětí U a U', R je elektrický odpor, R' je elektrický odpor podle napětí U', P je ztrátový výkon, Δ θ je odhadované oteplení vodiče po 2 minutách a U<sub>UB</sub> je vypočítaný úbytek napětí na vodičích.

Nejdříve bylo třeba spočítat měrný odpor vedení, abychom orientačně věděli, jaké hodnoty odporu máme očekávat. Vyšli jsme ze vzorce pro rezistivitu:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} [\Omega \cdot m; \Omega; m^2; m], \quad (2)$$

kde  $S$  je průřez vodiče a  $l$  délka vodiče. Tento vzorec upravíme pro výpočet odporu vedení na:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} [\Omega] \quad (3)$$

Důležité je uvědomit si, že měříme dva vodiče ve smyčce, tudíž délka měřených vodičů odpovídá poloviční délce vedení (kabelu). Rezistivita  $\rho$  je závislá na teplotě podle vztahu:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) [\Omega \cdot m; K^{-1}; ^\circ C], \quad (4)$$

kde  $\alpha$  je teplotní součinitel elektrického odporu (pro měď platí, že  $\alpha_{Cu} = 0,004 K^{-1}$ ).  $\Delta\vartheta$  je změna teploty. Jelikož je v tomto případě změna teploty nulová,  $\rho = \rho_0$ . Po dosazení vyjde odpor vedení:

$$R = \frac{0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot 200}{1,96 \cdot 10^{-7}} = 17,214 \Omega/100m \quad (5)$$

Elektrický odpor  $R$  vypočítáme podle Ohmova zákona ( $R'$  vypočítáme analogicky z  $U'$ ):

$$U = R \cdot I [V; \Omega; A] \quad (6)$$

ze vzorce:

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (7)$$

Po dosazení vyjdou výsledky dle *Tabulka 3*. Hodnoty očekáváme blízké odporu 50m vedení, tedy  $R = 8,6 \Omega$  (pro 100m vedení tedy  $R = 17,2 \Omega$ ).

Ztrátový výkon vypočítáme podle:

$$P = U \cdot I [W], \quad (8)$$

Po dosazení do *Tabulka 3* vidíme, že výkon s rostoucím proudem exponenciálně stoupá.

Ze vzorce pro teplotní součinitel elektrického odporu:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta \cdot R_0} [K^{-1}; \Omega; ^\circ C; \Omega] \quad (9)$$

vypočítáme odhadované oteplení vodičů:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta R}{\alpha \cdot R_0} [^\circ C] \quad (10)$$

Po dosažení vyjdou výsledky dle tabulky *Tabulka 3*. Odhadované oteplení je při dvouminutovém intervalu a nízkém proudu zanedbatelné, nicméně se zvyšujícím se proudem je oteplení vedení znatelnější. Hodnoty oteplení očekáváme v rozmezí 0 až 20 °C.

Podle Ohmova zákona (6) dostaneme vypočítaný úbytek napětí na vodičích:

$$U_{UB} = R \cdot I [V; \Omega; A] \quad (11)$$

Po dosažení vyjdou výsledky dle *Tabulka 3*. Pro malé proudy očekáváme lineární nárůst úbytku napětí, nicméně pro vyšší proudy se závislost začne měnit v exponenciální.

Druhé měření probíhalo na kabelu o průměru vodiče 0,4 mm a délce 100 m. Výsledné hodnoty uvádí *Tabulka 4*. Postup při výpočtu jednotlivých veličin je stejný, jako u *Tabulka 3*.

Vodič 100 m.								
Průměr vodiče 0,4 mm.								
I [A]	U [V]	U' [V]	U <sub>x</sub> [mV]	R [Ω]	R' [Ω]	P [W]	Δ θ [°C]	U <sub>UB</sub> [V]
0,5	15,54	15,55	10	31,08	31,10	7,77	0,19	13,45
1	31,54	31,54	0	31,54	31,54	31,54	0,00	26,90
1,5	47,4	47,4	0	31,60	31,60	71,10	0,00	40,35

*Tabulka 4: Výsledky měření úbytku napětí na jednom páru*

Zde jsme se kvůli menšímu průměru vodiče omezili na proud maximálně 1,5 A. G.fast bere tento průměr vodiče jako možnou alternativu, ale považuje ji za nejhorší scénář. Z tabulky vidíme, že oteplení jsme zjistili jen u proudu 0,5 A. V praxi však očekáváme i oteplení u vyšších proudů, a to minimálně jako zde zjištěné. U takto nízkých proudů se sice vodiče oteplují jen minimálně nebo se neoteplují vůbec, ale nejsou schopny poskytnout tak vysoký napájecí výkon.

Potřetí jsme měřili vodič o průměru 0,4 mm a délce tentokrát 400 m. Výsledné hodnoty uvádí *Tabulka 5*. Postup při výpočtu jednotlivých veličin je stejný, jako u *Tabulka 3*.

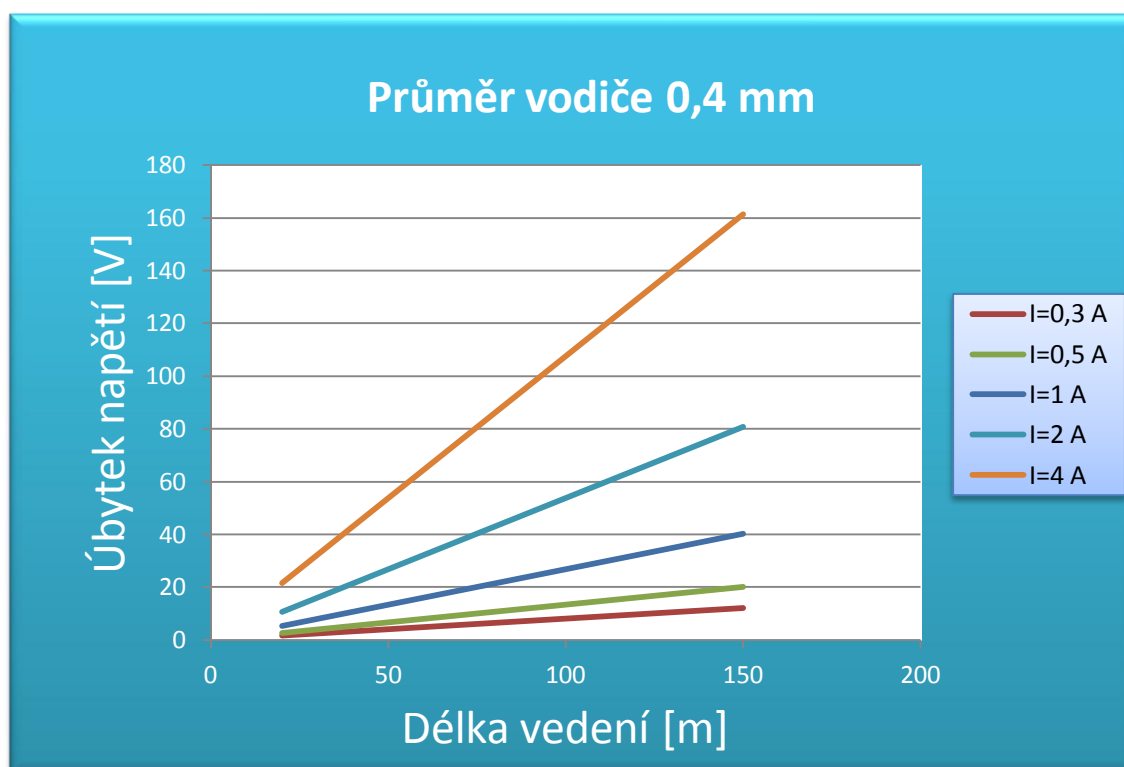
Vodič 400 m.								
Průměr vodiče 0,4 mm.								
I [A]	U [V]	U' [V]	U <sub>x</sub> [mV]	R [Ω]	R' [Ω]	P [W]	Δ θ [°C]	U <sub>UB</sub> [V]
0,1	10,53	10,53	0	105,30	105,30	1,05	0,00	10,76
0,64	70,1	70,1	0	109,53	109,53	44,86	0,00	68,86

*Tabulka 5: Výsledky měření úbytku napětí na jednom páru*

V tomto případě se jedná o vzdálenost větší, než s jakou G.fast počítá. Vidíme, že úbytek napětí je úměrný průměru vodiče a je závislý také na procházejícím proudu. Zde jsme oteplení nezjistili, v praxi v závislosti na prostředí, ve kterém bude kabel uložen a na přenosových podmínkách počítáme aspoň s minimálním oteplením do několika °C. Nejvhodnější vlastnosti má tedy vodič o průměru 0,5 mm.

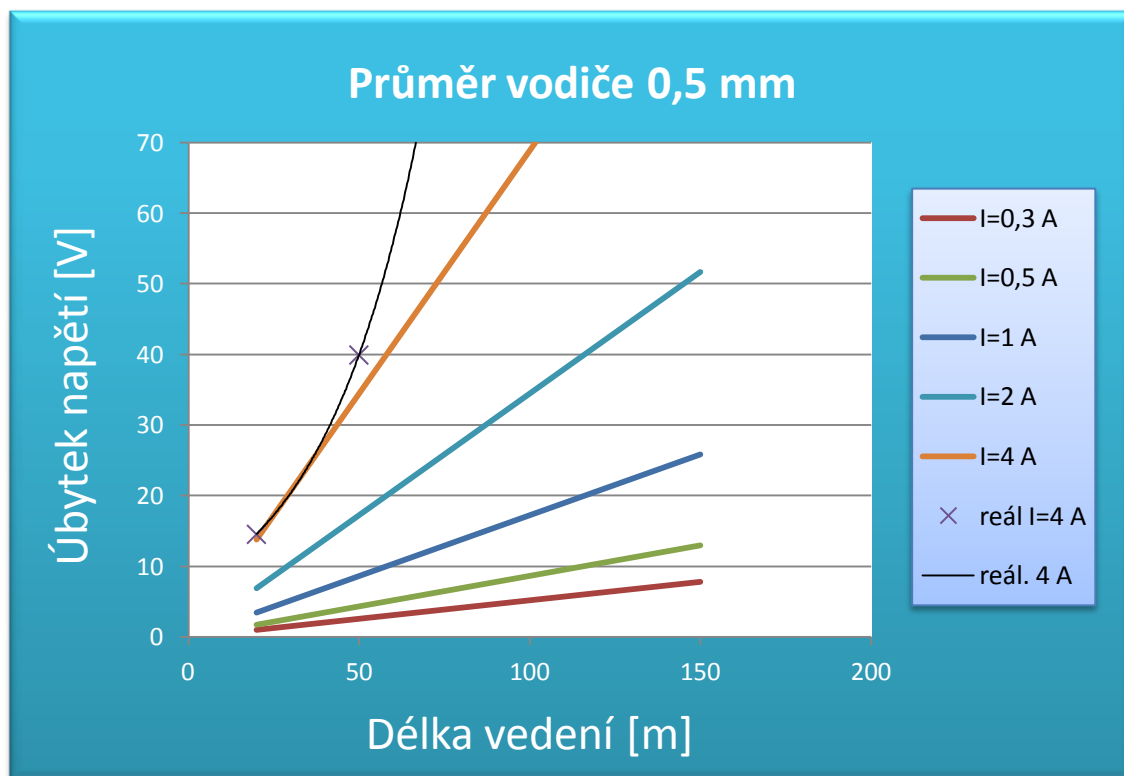
Na základě naměřených hodnot a následných výpočtů jsme schopni vynést závislost úbytku napětí na délce vedení. Budeme uvažovat různé velikosti procházejícího proudu. Pro nízké proudy by měla být závislost lineární, pro vyšší proudy však očekáváme vlivem oteplení exponenciální průběh závislosti. Z předchozích měření vyplynulo, že pro některé délky vedení a pro některé proudy přístroje nezaznamenaly oteplení (např. pro 100m vodič

o průměru 0,4 mm při procházejícím proudu 1,5 A), v odpovídajících grafech mohou tedy být z tohoto důvodu zobrazeny závislosti lineární.



Obrázek 13: Graf závislosti úbytku napětí na délce vedení (pro různé proudy)

Podle vzorce pro rezistivitu (4) vypočítáme měrný odpor  $R$  pro vodiče různých délek. Podle Ohmova zákona (6) vypočítáme úbytek napětí na těchto vodičích pro různé proudy. Tyto závislosti vyneseme do grafu. V dalším grafu, tentokrát pro jiný průměr vodiče, je již patrný vliv oteplení, jak plyne z měření. Postup sestavení grafu je analogický s předchozím.



Obrázek 14: Graf závislosti úbytku napětí na délce vedení (pro různé proudy)

Podle Ohmova zákona (6) vypočítáme odpory pro jednotlivá napětí (proud je relativně konstantní). Podle vzorce pro rezistivitu (4) vypočítáme oteplení vodiče

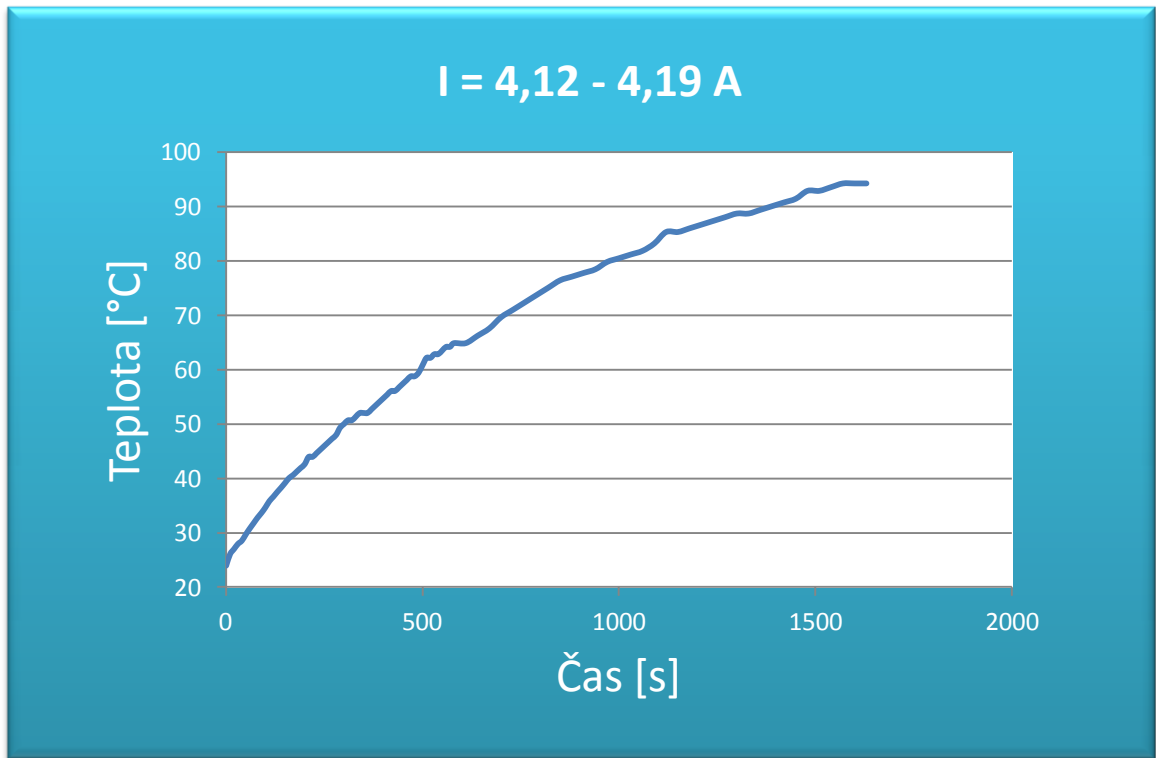
$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta \vartheta \cdot R_0} [K^{-1}; \Omega; ^\circ C] \quad (12)$$

$$\Delta \vartheta = \frac{R_{n+1} - R_n}{\alpha \cdot R_0} [^\circ C] \quad (13)$$

Za  $R_0$  považujeme hodnotu naměřeného (nikoliv spočteného) odporu, tedy  $8,88 \Omega$ . Každou následující teplotu vodiče dostaneme součtem současné teploty vodiče a oteplení.

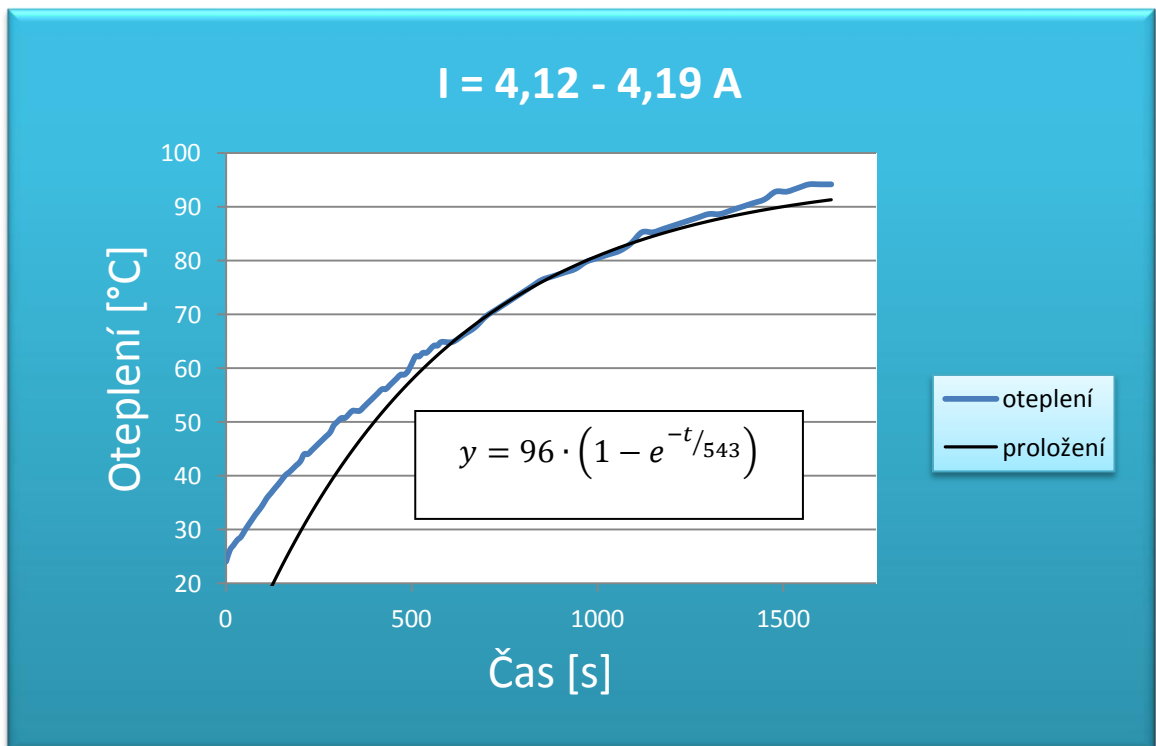
$$\vartheta_{n+1} = \vartheta_n + \Delta \vartheta [^\circ C] \quad (14)$$

Počáteční teplota je teplota v místnosti  $\vartheta = 24^\circ C$ . Po dosazení výsledků a vynesení do grafu dostaneme závislost teoretické teploty vodiče na čase. Vidíme, že po určitém čase se nárůst teploty (pro relativně konstantní proud) postupně vyrovná.



Obrázek 15: Graf závislosti teploty vodiče na čase

Z grafu vidíme, že v našem případě je maximální nárůst teploty do  $\vartheta_{max} = 95^\circ \text{ C}$ . Doba, za kterou se teplota ustálí přibližně odpovídá  $3\tau = 1630 \text{ s}$ , a proto  $\tau = 543,3 \text{ s}$ . Další graf vyjadřuje exponenciální charakter oteplení.



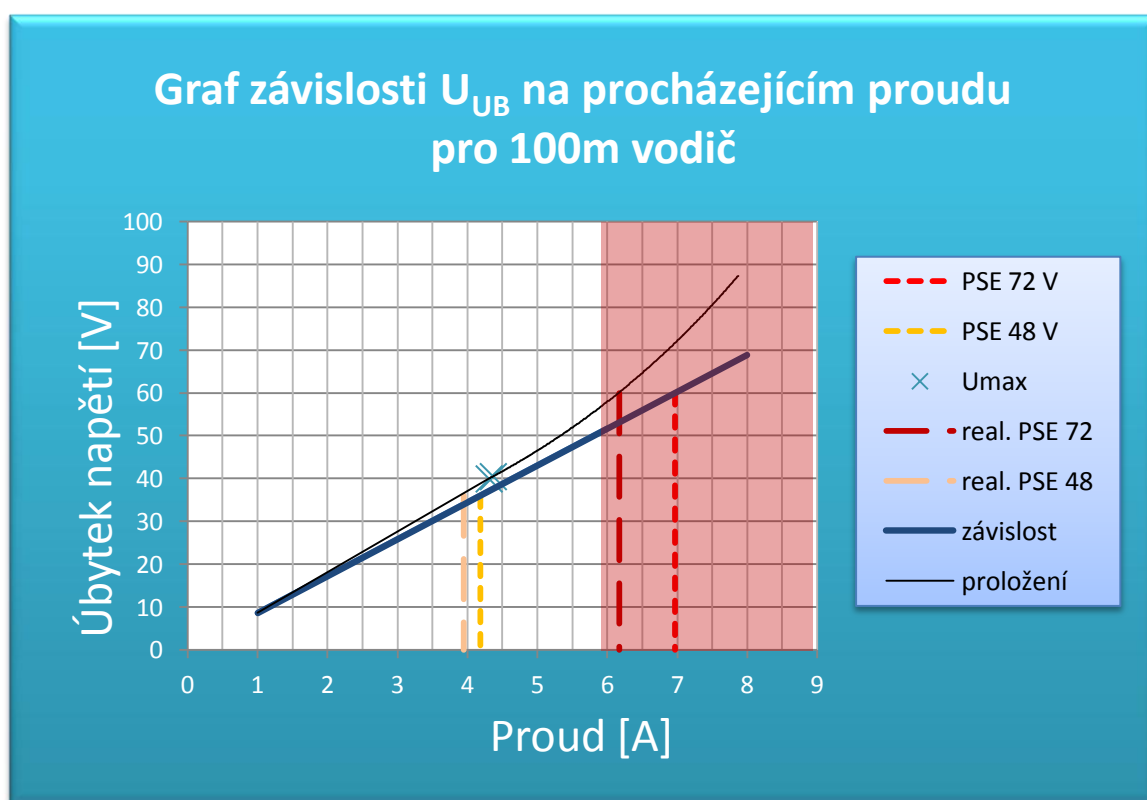
Obrázek 16: Graf závislosti oteplení vodiče na čase

Abychom mohli proložit závislost exponenciálou, jejíž obecný tvar je

$$\vartheta = \vartheta_{min} + (\vartheta_{max} - \vartheta_{min})(1 - e^{-t/\tau}), \quad (15)$$

potřebujeme buď nejdříve jednotlivé hodnoty oteplení odečíst od maximální teploty  $\vartheta_{max} = 95^\circ C$  nebo využít tohoto vzorce a vhodnou změnou jeho parametrů docílit aproximace naměřených hodnot. Teprve potom jsme schopni správně proložit, jak je vidět na grafu *Obrázek 16*. Menší prohnutí křivky vysvětlujeme tím, že výkon ohřívající vodič v čase stoupá.

Graf závislosti úbytku napětí na velikosti procházejícího proudu nám opět ukazuje exponenciální charakter úbytku, kvůli oteplení vodiče při vyšších proudech. Barevně vyznačeny jsou horní hranice proudů, s nimiž ještě lze poskytnout napájenému zařízení 12 V pro daný úsek vedení, a to jak pro případ bez oteplení, tak pro uvažované oteplení vodiče. V grafu také uvažujeme napájecí napětí na straně zdroje 72 V i 48 V. Použili jsme vodič o průměru 0,5 mm délky 100 m, což odpovídá 50m kabelu. Pro tento průměr vodiče je proud vyšší než 6 A už nebezpečný, neboť může dojít k porušení izolace.

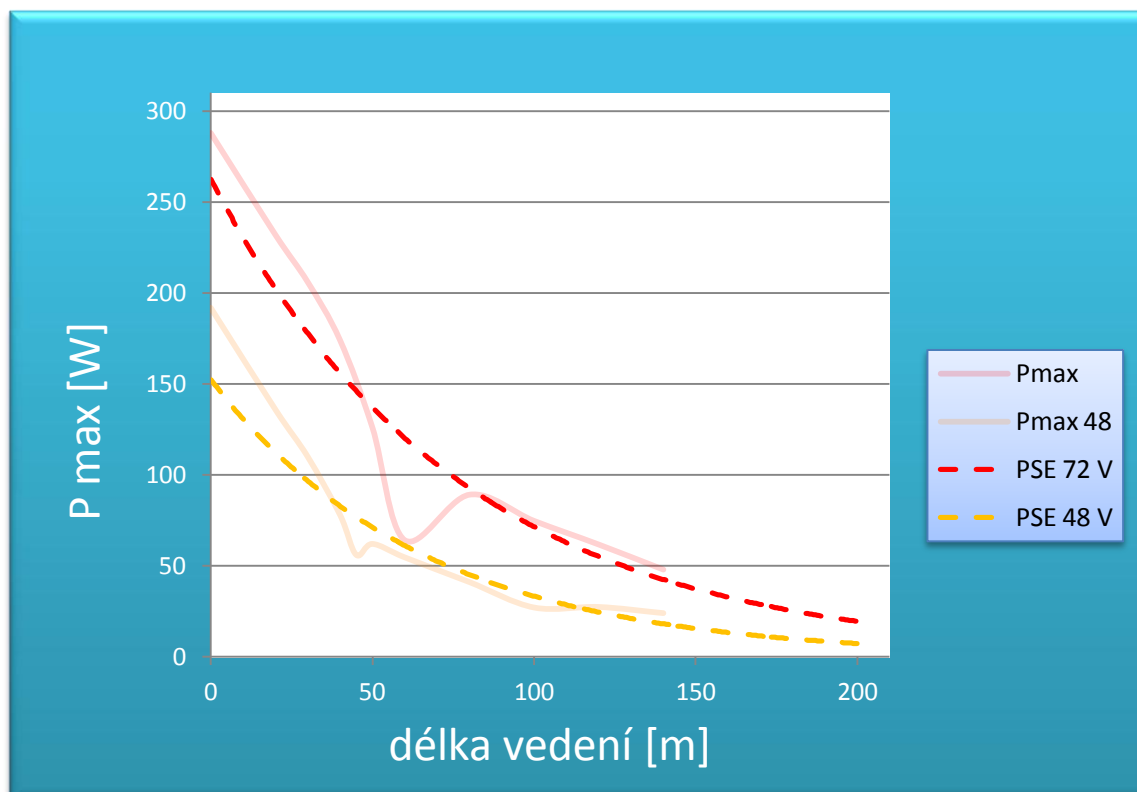


Obrázek 17: Graf závislosti úbytku napětí na proudu

Tímto se dostáváme k závislosti napájecího výkonu na délce vedení. Maximální napájecí výkon je součin vyznačeného maximálního proudu a napájecího napětí na straně napájeného zařízení (12 V). Následující graf popisuje tuto závislost. Pro různé délky

vedení jsme uvažovali vždy nejvyšší možný proud, který na danou vzdálenost zaručí takový úbytek napětí, aby napájené zařízení obdrželo napětí 12 V.

Vyšli jsme z grafu závislosti úbytku napětí na délce vedení (viz. příloha) pro proudy  $I_1 = 0,3 \text{ A}$ ,  $I_2 = 0,5 \text{ A}$ ,  $I_3 = 1 \text{ A}$ ,  $I_4 = 2 \text{ A}$ ,  $I_5 = 4 \text{ A}$ . Vždy pro určitou délku vedení jsme z křivek reprezentující jednotlivé proudy odečítali odpovídající úbytek napětí (pro odečtení jsme vybrali vždy křivku reprezentující nejvyšší možný proud, při kterém lze garantovat 12 V na straně napájeného zařízení). S rostoucí délkou vedení rostl odečítaný úbytek napětí, a když přesáhl povolenou hodnotu, bylo třeba odečítat z křivky reprezentující nižší proud. Pokaždé, když jsme byli nuceni přejít na křivku pro nižší proud, vznikl v grafu *Obrázek 18* pokles.



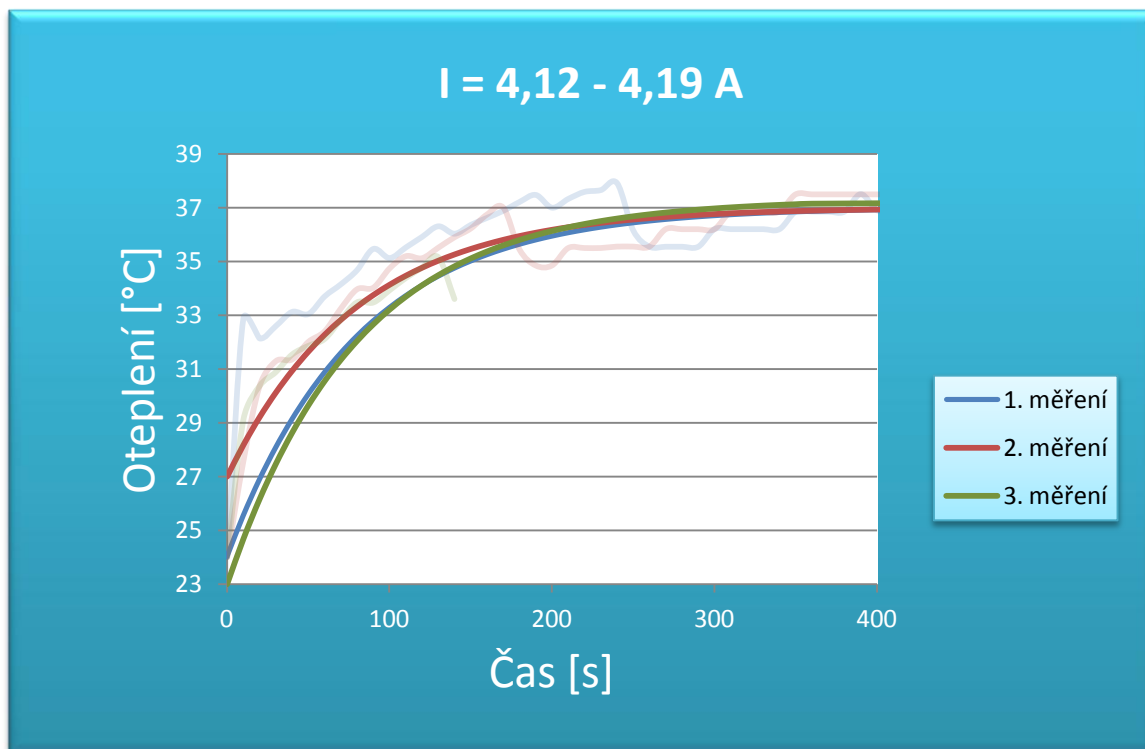
*Obrázek 18: Graf maximálního napájecího výkonu na délce vedení (kabelu)*

### 5.3. Měření rozvinutého kabelu

Naše předchozí měření vždy probíhala na namotaném přenosovém kabelu. Vzhledem k tomu, že se kabel zahřívá, naměřené výsledky se mohou lišit od případu, kdy je kabel rozvinutý a teplo v něm vznikající se přenáší do okolního prostředí a nikoliv do jiné části stejného kabelu, kterou opět ohřívá. Provedli jsme tedy další měření, kdy byl kabel rozvinut. Cílem bylo získat ucelenější představu o reálné situaci, kdy je kabel uložen v zemi nebo jinak rozvinut a teplo, které v něm vzniká se lépe odvádí ven z kabelu. Zapojení tohoto měření je znázorněno na *Obrázek 11*. Použili jsme stejný přenosový kabel firmy PraKab, tedy SYKFY<sup>55</sup> UTP s parametry 5x2x0,5, délky 50 m. Výsledky měření jsou uvedeny v grafu *Obrázek 19*, přičemž naměřené hodnoty jsou navíc uvedeny v tabulce v příloze.

<sup>55</sup> SYKFY: S-sdělovací kabel vnitřní; Y-PVC izolace žil; K-kabel; F-elektrostatické stínění; Y-PVC plášť





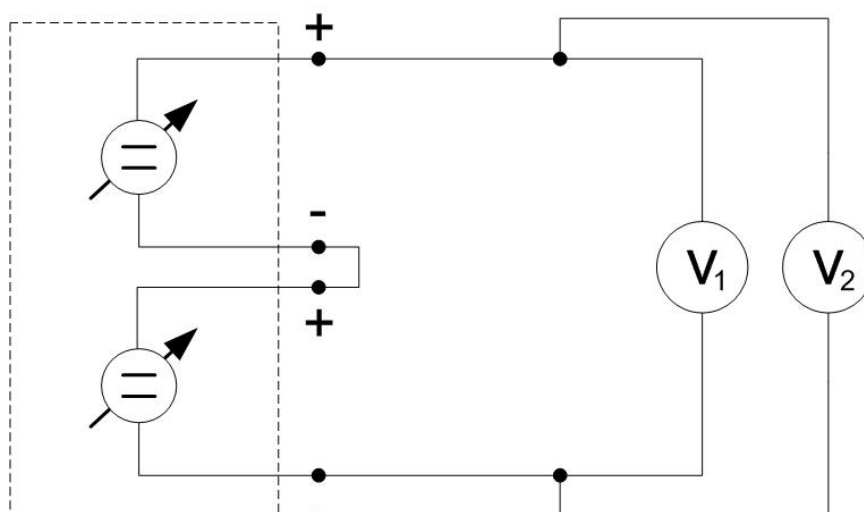
Obrázek 19: Graf měření oteplení rozvinutého kabelu

Když srovnáme namotaný a rozvinutý kabel z hlediska oteplení, vidíme, že podle předpokladu se rozvinutý kabel ohřál pouze o 10 - 15° C, což je přibližně o 80 % méně, než namotaný, který dosahoval teploty až 94° C. Rozvinutý kabel také potřebuje o jednu třetinu méně času na ustálení růstu oteplení.

Při tomto měření jsme však narazili na problém. Jak měřený úbytek napětí rostl, použité multimetry při přechodu z napětí přibližně 39,9 V na 40 V měnily rozsah. V souvislosti s tímto přepnutím na jiný rozsah zobrazované hodnoty vždy spadly na 37 V a odtud pokračovaly v růstu. Interval napětí mezi 37 V a 40 V byl tedy změřen dvakrát, pokaždé ale pro jiný čas. Proto jsme museli tyto hodnoty při přepínání rozsahu korigovat, k čemuž jsme použili přesnější multimetr. Na obrázku *Obrázek 20* jsou použité multimetry, zleva Metex MTX 3282B, Metex M3850 a Metex 3610D a za ním potom schéma zapojení při korigování naměřených hodnot (*Obrázek 21*). Ke korigovanému multimetru byl připojen referenční a při zvyšování napětí jsme pozorovali přepínání rozsahu. Výsledky jsme porovnali s údaji z referenčního multimetru a korigovali naměřené hodnoty, jež jsme vynášeli do grafu *Obrázek 19*.



Obrázek 20: Použité multimetry



Obrázek 21: Zapojení při korigování multimetrů

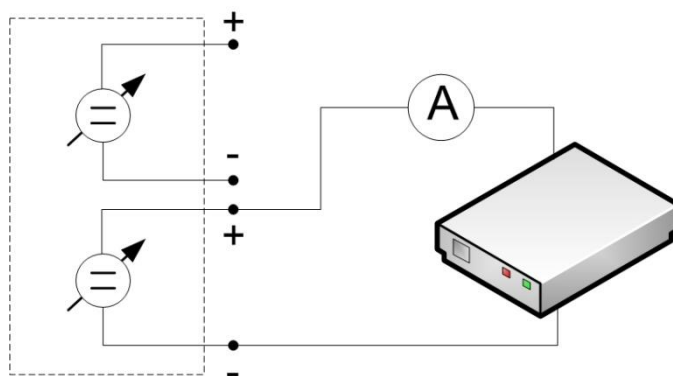
## 5.4. Měření modemů

Tato část se zaměřuje na chování modemů v experimentálních provozních podmínkách včetně dálkového napájení po stejném vedení jako se přenáší datový signál. K tomuto měření jsme vyrobili vlastní napájecí kabel s napájecím konektorem na jednom konci a RJ-11 konektorem na druhém konci. Použili jsme dvojici VDSL 2 modemů firmy Planet série VC-230. Jeden s možností bezdrátového připojení Wi-Fi. Nejdříve nás zajímal proudový odběr modemu, a to ve fázích inicializace, s připojeným PC, s připojeným dalším modemem (aktivním VDSL 2 spojením), s aktivní Wi-fi atd. Různé varianty zapojení a jejich proudový odběr ukazují následující obrázky:

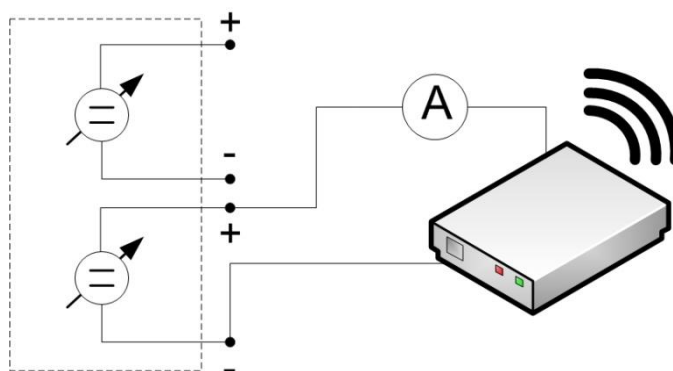
		I [mA]
Schéma 1	<b>Inicializace</b>	309
Schéma 4	<b>PC</b>	395
Schéma 7	<b>Modem+PC</b>	417
Schéma 3	<b>Modem</b>	422
Schéma 2	<b>Wlan</b>	437
Schéma 5	<b>PC+wlan</b>	440
Schéma 6	<b>Modem+wlan</b>	510
Schéma 8	<b>PC+modem+wlan</b>	515

Tabulka 6: Proudové odběry podle schémat zapojení

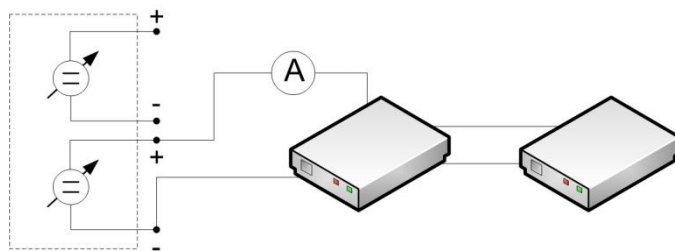
Nejmenší vliv na odběr proudu má například připojení PC (při konfiguraci přes webové rozhraní), aktivní Wi-Fi.



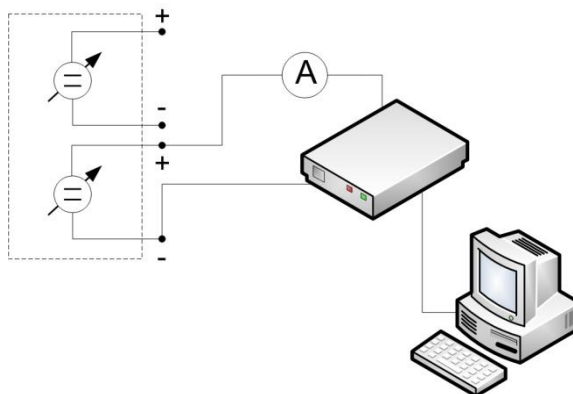
Obrázek 22: Schéma zapojení 1



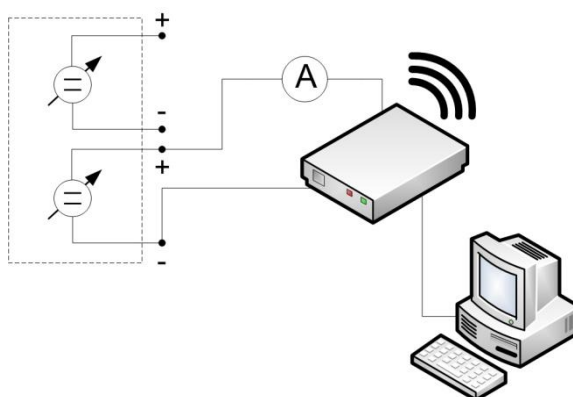
Obrázek 23: Schéma zapojení 2



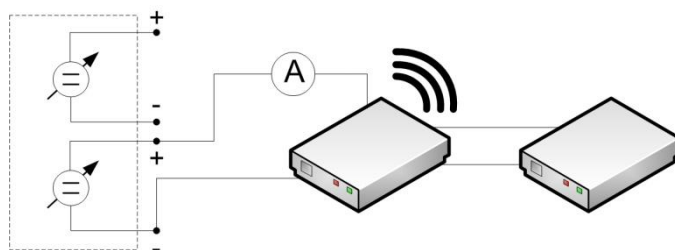
Obrázek 24: Schéma zapojení 3



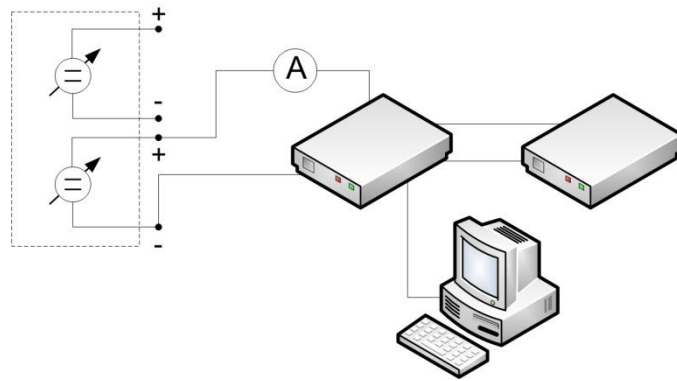
Obrázek 25: Schéma zapojení 4



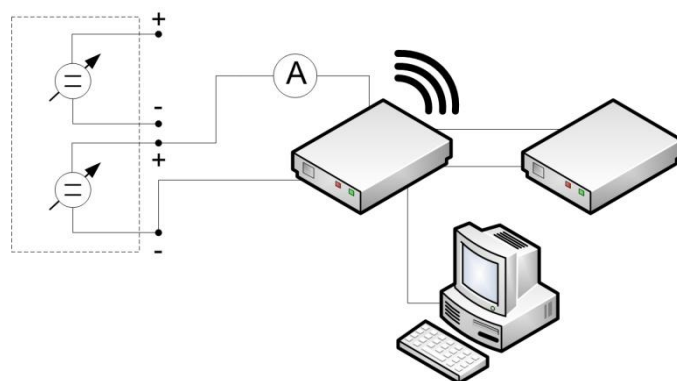
Obrázek 26: Schéma zapojení 5



Obrázek 27: Schéma zapojení 6

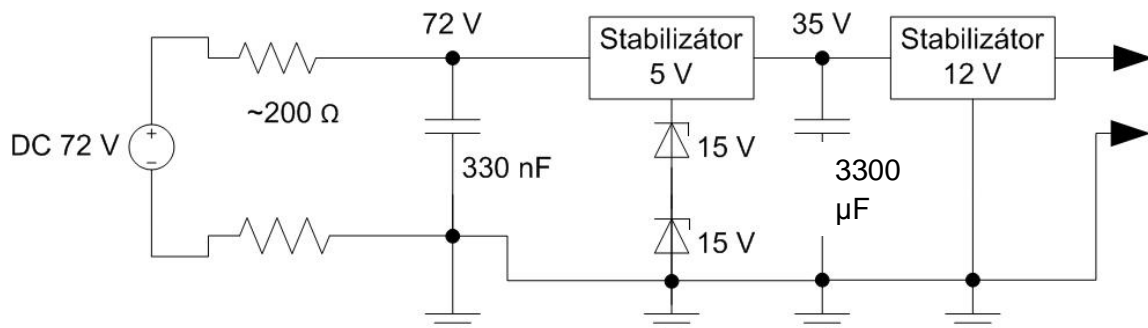


Obrázek 28: Schéma zapojení 7

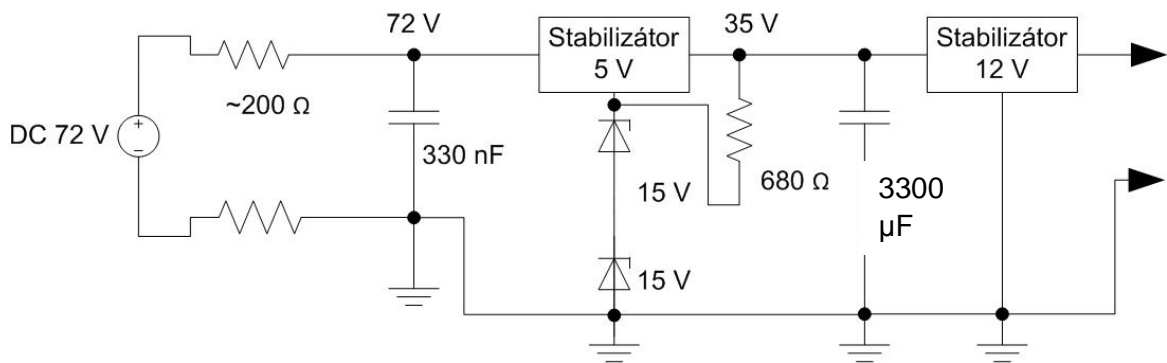


Obrázek 29: Schéma zapojení 8

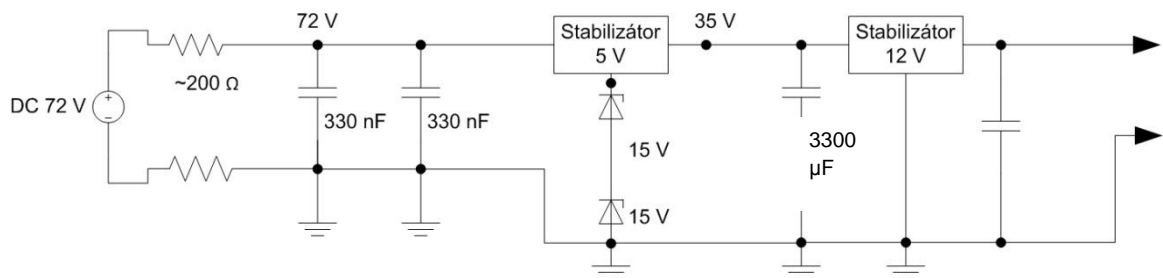
Nyní se přesouváme k problematice napájení modemu. Ten vyžaduje napětí 12 V. Pokud jsme modem připojili k napájecímu zdroji a postupně zvyšovali napětí od nuly až na 12 V, modem nereagoval. Bylo třeba zajistit 12V napětí ihned po připojení napájecího kabelu. K tomuto účelu jsme použili stabilizátory, Zenerovy diody a kondenzátory, které jsme vhodně zapojili a umístili do obvodu před napájený modem. Následující schémata ukazují použitá zapojení. Často docházelo k přehřívání stabilizátorů, takže bylo třeba zajistit odvod tepla, což jsme vyřešili přimontováním stabilizátorů na kovový chladič.



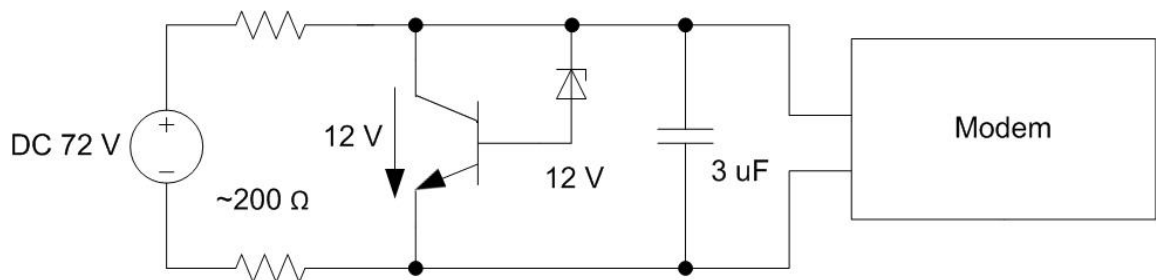
Obrázek 30: Schéma stabilizace 1



Obrázek 31: Schéma stabilizace 2



Obrázek 32: Schéma stabilizace 3



Obrázek 33: Schéma stabilizace 4

Správnou funkci modemu zaručilo čtvrté zapojení (Obrázek 33). Celkový odběr byl 650 – 680 mA, přičemž přibližně 500 mA odebíral modem a zbytek odebíral tranzistor.

Se spuštěným a správně fungujícím modemem jsme se mohli soustředit na vliv použitého vedení mezi dvěma modemy na přenosovou rychlost, SNR atd. Jeden z modemů byl nakonfigurován jako CO a druhý jako CPE. K dispozici jsme měli 305m úsek UTP<sup>56</sup> o průměru vodiče 0,5 mm, 350m úsek SYKFY o průměru vodiče 0,5 mm a 400m úsek TCEPKPFLE<sup>57</sup> o průměru vodiče 0,4 mm. Cílem bylo simulovat stav, kdy koncový účastník (resp. CPE) napájí zařízení v RN. Připravili jsme tři zapojení:

- přímo propojené modemy, napájené originálními napájecími kabely

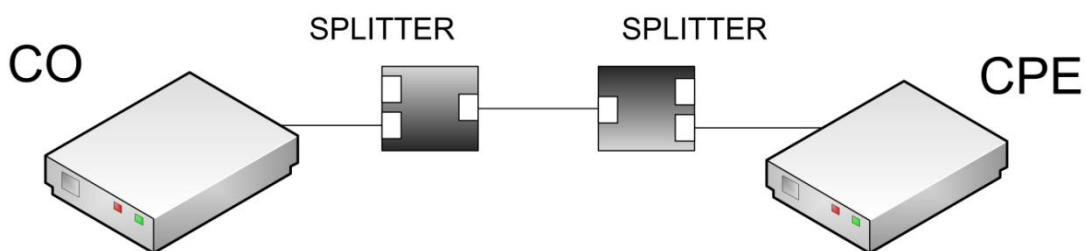
<sup>56</sup> UTP: Unshielded Twisted Pair

<sup>57</sup> TCEPKPFLE: T-sdělovací kabel místní; C-měděné jádro; EP-izolace žil z napěněného PE; K-kabel; P-plnicí hmota; FL-elektrostatické stínění; E-vnitřní plášť z PE



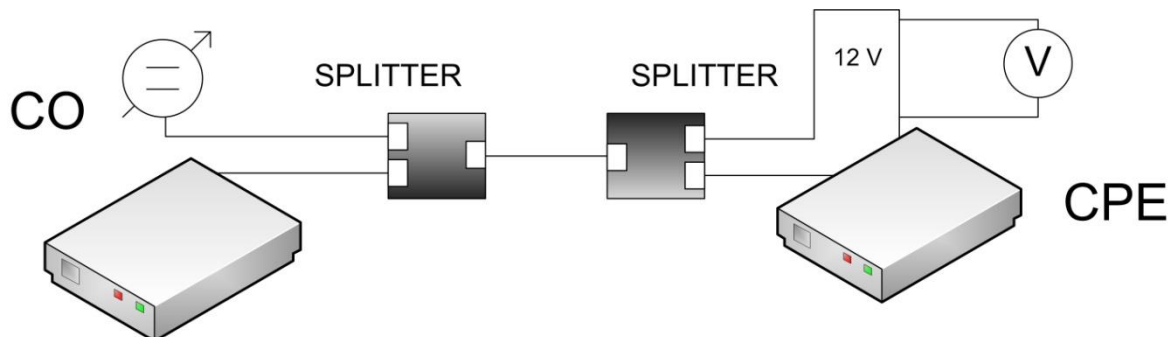
Obrázek 34: Schéma zapojení „modem – vedení – modem“

- modemy propojené přes splitters, napájené originálními napájecími kabely



Obrázek 35: Schéma zapojení „modem – splitter – vedení – splitter – modem“

- modemy propojené přes splitters, CO napájený originálním napájecím kabelem, CPE napájecím zdrojem na straně CO a takovým napětím, aby i přes úbytek napětí na vedení měl dostatečné napájecí napětí



Obrázek 36: Schéma zapojení „modem – splitter – vedení – splitter – modem“ s napájecím zdrojem

Pro každé z uvedených zapojení jsme postupně použili všechna tři vedení. Abychom ověřili chování u zapojení 3 (Obrázek 36), nechali jsme vodič zahřát, takže v tabulce uvádíme ještě naměřené hodnoty po pěti a po deseti minutách od začátku měření. Výsledky uvádí tabulka. Hodnoty, u nichž nedocházelo ke změně, jsme kvůli přehlednosti zesvětlili.

Zapojení 1	Downstream			Upstream		
	$v_b$ [Mb/s]	SNR [0.1dB]	zpoždění [ms]	$v_b$ [Mb/s]	SNR [0.1dB]	zpoždění [ms]
UTP 305 m	93,816	64	6	122,224	176	5
SYKFY 350 m	22,776	61	8	65,016	N/A	8
TCEPKPFLE 400 m	46,2	145	8	118,744	110	6
<b>Zapojení 2</b>						
UTP 305 m	94,384	66	6	122,216	172	5
SYKFY 350 m	21,624	62	8	64,384	74	8
TCEPKPFLE 400 m	46,144	61	8	118,32	N/A	6
<b>Zapojení 3</b>						
UTP 305 m	94,4	65	6	122,208	N/A	5
SYKFY 350 m	22,176	62	8	65,016	74	8
TCEPKPFLE 400 m	61,264	61	7	118,064	N/A	6
<b>Zapojení 3 (+5min)</b>						
UTP 305 m	94,4	63	6	122,208	170	5
SYKFY 350 m	22,176	59	8	65,016	70	8
TCEPKPFLE 400 m	61,264	59	7	118,064	106	6
<b>Zapojení 3 (+10min)</b>						
UTP 305 m	94,4	63	6	122,208	170	5
SYKFY 350 m	22,176	56	8	65,016	67	8
TCEPKPFLE 400 m	61,264	N/A	7	118,064	N/A	6

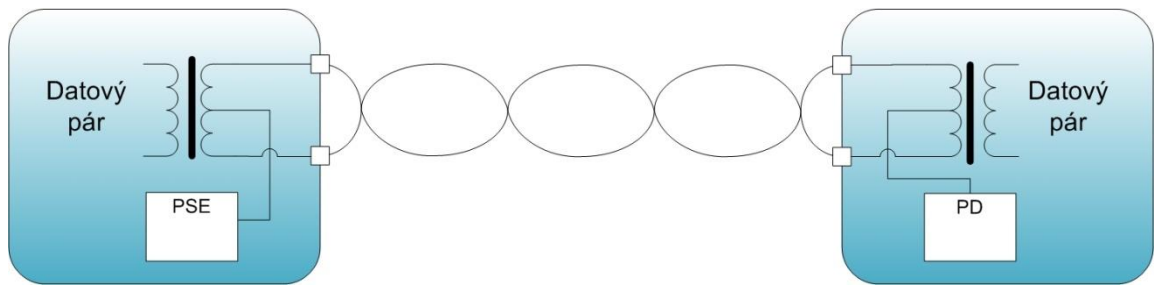
Tabulka 7: Výsledky měření modemů podle zapojení a použitých vedení

Potvrdil se předpoklad, že nejlepších výsledků z hlediska přenosové rychlosti a zpoždění dosáhne kabel UTP. U něj se přenosová rychlost při různých délkách vedení měnila zanedbatelně. Ke spuštění napájeného modemu stačilo nastavit na napájecím zdroji napětí 52 V. Použitím splitterů se mírně zvýšil odstup signálu od šumu, ale se zahřívajícím se vedením opět klesal, což se projevilo hlavně u kabelů SYKFY a TCEPKPFLE. U kabelu SYKFY se kvůli větší délce kabelu muselo zajistit vyšší napájecí napětí na napájecím zdroji, v našem případě 55-58 V. U kabelu TCEPKPFLE, který měl největší délku a nejmenší průměr bylo třeba ke spuštění modemu použít napětí až 68 V. Některé hodnoty nebyly modemem zobrazeny, v tabulce jsou uvedeny jako „N/A“.

## 5.5. Návrh filtru

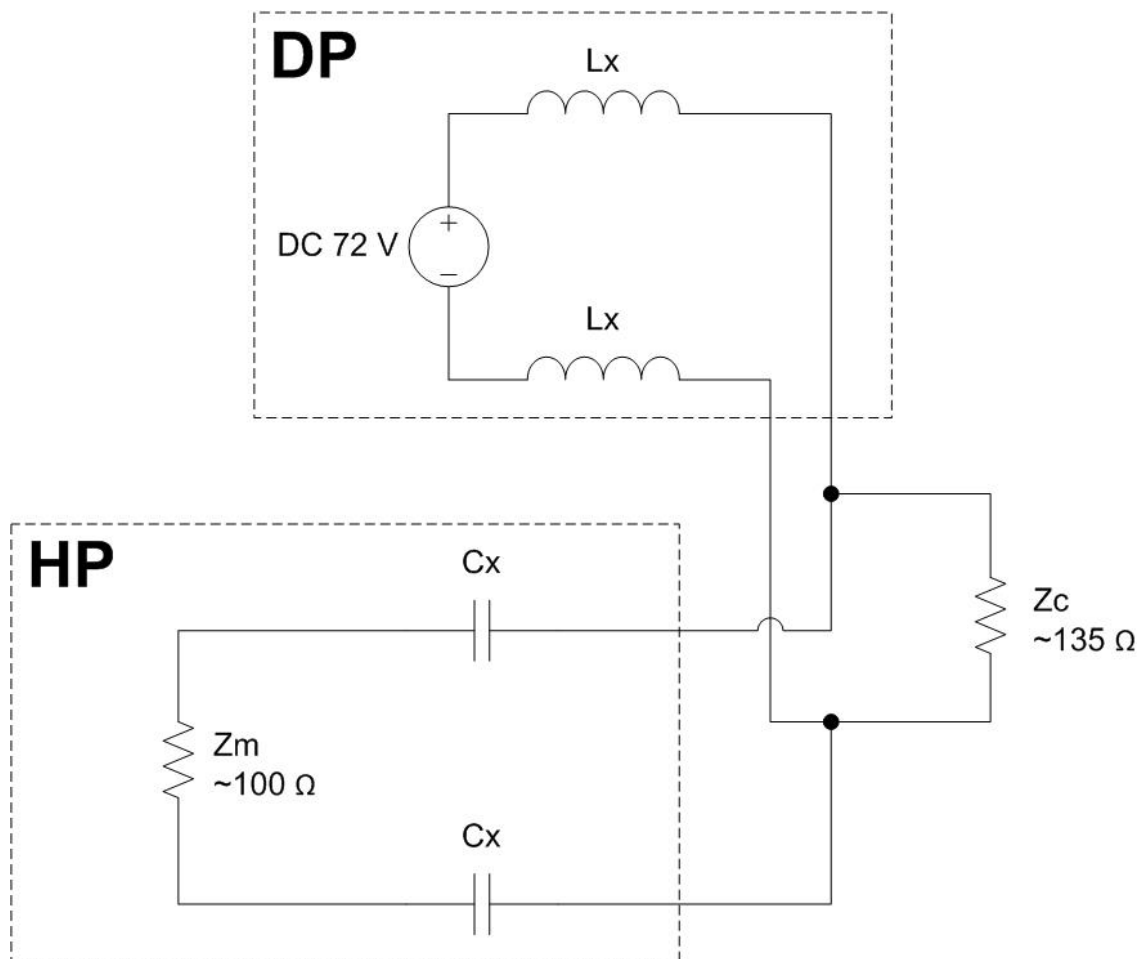
V experimentu byl použit k navázání napájecího napětí na vedení klasický splitter pro ISDN pásmo. Za normálních okolností by stačilo použít jednoduchý filtr, jehož návrhu bude věnována tato kapitola.



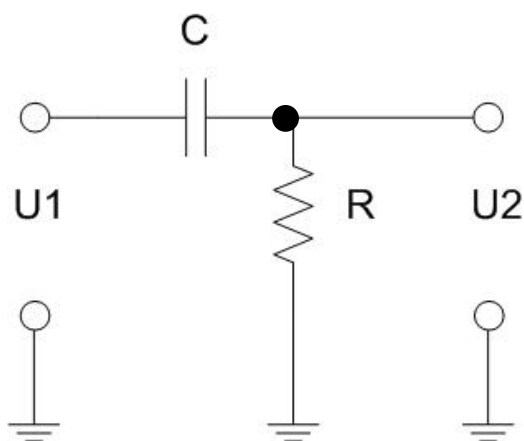


Obrázek 37: Schéma napájení u DSL

Naším úkolem je navrhnout hodnoty indukčnosti a kapacity pro danou mezní frekvenci a dané impedance. V případě horní propusti máme na jedné straně modem, s impedancí  $Z_m = 100 \Omega$ , sériově zapojené kondenzátory o shodné kapacitě  $C_x$  a na opačné straně zakončení s impedancí  $Z_c = 135 \Omega$ . Dolní propustí prochází právě napájení, tudíž začíná zdrojem stejnosměrného napětí, pokračuje sériově zapojenými cívkami o shodné indukčnosti  $L_x$  a opět končí ve stejném zakončení jako horní propust, tedy v  $Z_c$ .



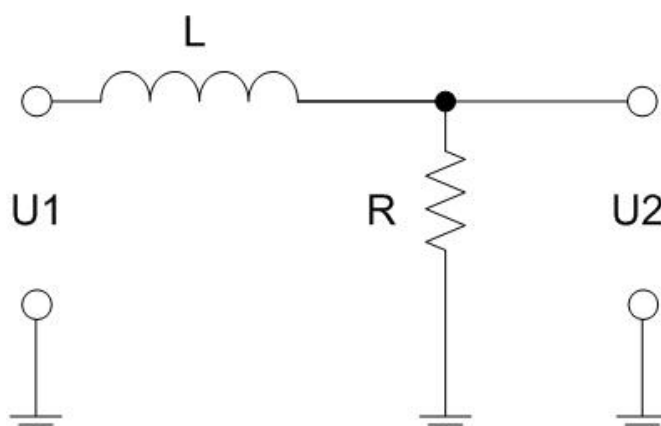
Obrázek 38: Zjednodušené schéma zapojení pro výpočet parametrů



Obrázek 39: Náhradní obvod horní propusti

Základní vzorec pro mezní frekvenci horní propusti je

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \text{ [Hz; } \Omega; \text{ F]} \quad (16)$$



Obrázek 40: Náhradní obvod dolní propusti

Základní vzorec pro mezní frekvenci v dolní propusti je

$$f_m = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L} \text{ [Hz; } \Omega; \text{ H]} \quad (17)$$

Na základě náhradních obvodů pro horní a dolní propusti a schématu zapojení odvodíme vztahy pro indukčnost, kapacitu, impedanci a mezní frekvenci. Pro horní propust v našem zapojení platí vzorec

$$\frac{1}{C_x \cdot \omega} + \frac{1}{C_x \cdot \omega} = Z_c + Z_m \text{ [F; } \Omega] \quad (18)$$

kde  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ . Mezní frekvence je 138 kHz, neboť takový kmitočet používá VDSL2 over ISDN. Po dosazení vychází kapacita

$$C_x = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot (135 + 100) \cdot 138000} = 9,8 \text{ nF}$$

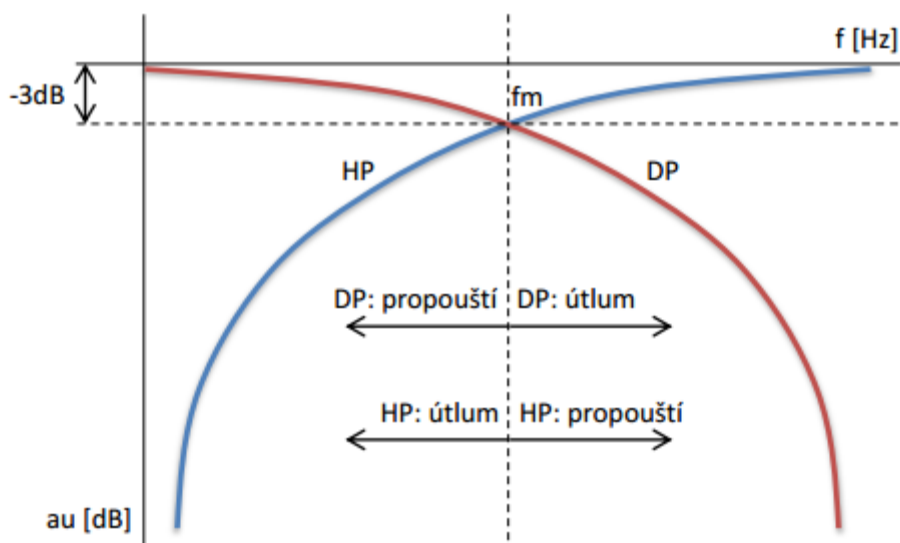
Ten samý postup aplikujeme na dolní propust

$$2 \cdot L_x \cdot \omega = Z_c [H; \Omega] \quad (19)$$

kde  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ . Mezní frekvence je opět 138 kHz. Po dosazení vychází indukčnost

$$L_x = \frac{135}{2 \cdot \pi \cdot 138000} = 78 \text{ } \mu\text{H}$$

Následující obrázek znázorňuje frekvenční charakteristiku obou propustí. Můžeme si všimnout, že jsou pouze zrcadlově otočené podle hranice mezní frekvence. Dolní propust klesá o 20 dB na dekádu, horní o 20 dB na dekádu naopak roste.



Obrázek 41: Frekvenční charakteristika horní a dolní propusti [23]

## 6. Závěr

Cílem práce bylo popsat napájení v přístupové síti pomocí účastnických přípojek xDSL a experimentálně ověřit možnosti jeho realizace. Na základě znalostí systémů digitálních účastnických přípojek popsaných v druhé kapitole, standardu G.fast a jeho vlastností vysvětlených ve třetí kapitole a v neposlední řadě technologie Power over Ethernet a jejích dodatků z kapitoly čtyři, jsme mohli přistoupit k praktické části práce.

Druhá část práce se věnovala měření. Otázka zpětného napájení úzce souvisí s délkou vedení, tudíž cílem páté kapitoly bylo především popsat závislost úbytku napětí na délce vedení, a to i při postupném oteplování vedení, a také vynést závislost napájecího výkonu na délce vedení. V první části bylo zjištěno, pokud se zaměříme na 150m úsek vedení o průměru vodiče 0,4 mm a použitý proud 500 mA, že úbytek napětí se pohybuje okolo 20 V. Při průměru vodiče 0,5 mm už jen 13 V. Teplotní nárůst na vodičích může být až o 70 až 80 °C. Je evidentní, že prostředí, ve kterém bude vedení položeno a druh samotného vedení může silně ovlivnit konečné parametry přenosové cesty. Jelikož v praxi telefonní vedení nemusí být vždy v dobrém stavu, je třeba počítat raději s nejhorším scénářem.

Napájecí výkon poskytovaný napájenému zařízení s rostoucí vzdáleností exponenciálně klesá, nicméně pro 150m úsek vedení se ještě udržíme nad hranicí 15 W, a to při použití napájecího napětí 48 V a vodiče o průměru 0,5 mm. Při 72 V se na stejnou vzdálenost a vedení udržíme nad hranicí 25 W. Opět je třeba zmínit, že druh vedení má klíčový vliv na konečné výsledky.

U měření modemů jsme postupně měnili druhy vedení a nechávali je ohřát. Z výsledků vidíme, že přenosové rychlosti pro konkrétní vedení se příliš neměnily, i když došlo k oteplení. Nepatrná změna byla zaznamenána také u SNR, který se začal s teplejším vedením snižovat. Nicméně žádné diametrální změny nezpůsobila ani změna vedení, ani jeho oteplení.

V poslední kapitole jsme navrhli parametry filtru, kterým dostaneme napájecí napětí do vedení a do napájeného zařízení.

## 7. Literatura

- [1] Vodrážka, J.: Další stádium vývoje digitálních účastnických přípojek. Access server <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2013030001>
- [2] Vodrážka, J.: Varianty přípojek VDSL2. Access server <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006052401>
- [3] Vodrážka, J.: Spektrální profil přípojek VDSL2 vybraný pro sítě v ČR. Access server <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2011040001>
- [4] Vodrážka, J.: Teoreticky dosažitelné přenosové rychlosti u přípojky VDSL2 s potlačováním přeslechů. Access server <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008080002>
- [5] Vodrážka, J.: Modelování metalických účastnických přípojek. Access server <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2001012601>
- [6] Hubený, T.: Jevy ovlivňující útlum symetrických kabelových vedení. Access server <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004120201>
- [7] Kříž, M.: Dimenzování elektrického vedení z hlediska jeho oteplení. Společnost IN-EL <http://www.in-el.cz/?t=201&p=101205>
- [8] Lipták J., Sedláček J.: Úvod do elektrotechnických materiálů. Skriptum ČVUT Praha r. 2005
- [9] Timmers M., Hooghe K., Guenach M., Storry Ch., Maes J.: System design of reverse-powered G.fast. Workshop on Telecommunications: From research to standards
- [10] Riechl J.: Multimediální učebnice fyziky. WebArchiv <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/242-zavislost-odporu-kovoveho-vodice-na-teplote>
- [11] Wikipedia contributors: Power over Ethernet. Wikipedia, The Free Encyclopedia [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Power\\_over\\_Ethernet&oldid=591943535](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Power_over_Ethernet&oldid=591943535)
- [12] Wikipedia contributors, 'Digital subscriber line', Wikipedia, The Free Encyclopedia [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Digital\\_subscriber\\_line&oldid=601727601](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Digital_subscriber_line&oldid=601727601)
- [13] Pravda, I.: Telefonní modemy a systémy xDSL. Materiál ke cvičením z předmětu A2B32TSI. Katedra telekomunikační techniky (FEL ČVUT), 2013
- [14] Příspěvatelé Wikipedie, 'Asymmetric Digital Subscriber Line', Wikipedie: Otevřená encyklopedie [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Asymmetric\\_Digital\\_Subscriber\\_Line&oldid=11214552](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Asymmetric_Digital_Subscriber_Line&oldid=11214552)

- [15] Wikipedia contributors, 'DSL modem', Wikipedia, The Free Encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=DSL\\_modem&oldid=598591265](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=DSL_modem&oldid=598591265)
- [16] Wikipedia contributors, 'Digital subscriber line access multiplexer', Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Digital\\_subscriber\\_line\\_access\\_multiplexer&oldid=601667445](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Digital_subscriber_line_access_multiplexer&oldid=601667445)
- [17] Wikipedia contributors, 'Splitter', Wikipedia, The Free Encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Splitter&oldid=569010518>
- [18] Wikibooks contributors, 'Communication Networks/DSL', Wikibooks, The Free Textbook Project,  
[http://en.wikibooks.org/w/index.php?title=Communication\\_Networks/DSL&oldid=2563551](http://en.wikibooks.org/w/index.php?title=Communication_Networks/DSL&oldid=2563551)
- [19] Wikipedia contributors, 'Broadband Remote Access Server', Wikipedia, The Free Encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Broadband\\_Remote\\_Access\\_Server&oldid=558728978](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Broadband_Remote_Access_Server&oldid=558728978)
- [20] Jareš, P.: Vektorová modulace DMT. Access server  
<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2007010002>
- [21] Spruyt P., Vanhastel S.: The Numbers are in: Vectoring 2.0 Makes G.fast Faster. Alcatel Lucent – Techzine,  
<http://www2.alcatel-lucent.com/techzine/the-numbers-are-in-vectoring-2-0-makes-g-fast-faster/>
- [22] Point Topic: World Broadband Statistics - Q2 2012. Point Topic,  
<http://point-topic.com/wp-content/uploads/2013/02/Sample-Report-Global-Broadband-Statistics-Q2-2012.pdf>
- [23] Studijní materiály SŠ Sýkorova. Dostupné na  
[http://www.et.jecool.net/other/zis\\_fr\\_char\\_hor\\_dol\\_prop.pdf](http://www.et.jecool.net/other/zis_fr_char_hor_dol_prop.pdf)
- [24] White Paper: Fundamentals of Power Over Ethernet (PoE). Fluke Networks:  
[http://www.gocsc.com/uploads/white\\_papers/AE0F4756CB164FB58717FF0D6F2CCE6C.pdf](http://www.gocsc.com/uploads/white_papers/AE0F4756CB164FB58717FF0D6F2CCE6C.pdf)
- [25] Mrázek, O.: Princip činnosti Power Over Ethernet. HW.cz server:  
<http://www.hw.cz/produkty/ethernet/princip-cinnosti-power-over-ethernet.html>
- [26] Microsemi: Understanding 802.3at – PoE Plus Standard Increases Available Power. PowerDsine,  
[http://www.streakwave.com/powerdsine/Understanding\\_802\\_3at\\_PowerDsine.pdf](http://www.streakwave.com/powerdsine/Understanding_802_3at_PowerDsine.pdf)

- [27] Rajesh, K.: ExcITingIP: An Introduction to IEEE 802.3az – Energy Efficient Ethernet. <http://www.excitingip.com/2534/an-introduction-to-ieee-802-3az-energy-efficient-ethernet/>
- [28] Wikipedia contributors, 'Energy-Efficient Ethernet', Wikipedia, The Free Encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Energy-Efficient\\_Ethernet&oldid=604545507](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Energy-Efficient_Ethernet&oldid=604545507)

## 8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Použitý splitter .....	5
Obrázek 2: Grafické znázornění struktury xDSL sítě [18] .....	6
Obrázek 3: Závislost napájecího výkonu na vzdálenosti [9].....	8
Obrázek 4: Závislost počtu aktivních portů na spotřebě výkonu [9].....	9
Obrázek 5: Znázornění dosahu pro různé varianty a architektury [9] .....	11
Obrázek 6: Alternativa A .....	13
Obrázek 7: Schéma alternativy A .....	13
Obrázek 8: Alternativa B.....	14
Obrázek 9: Schéma alternativy B .....	14
Obrázek 10: Mezilehlé PSE .....	15
Obrázek 11: Schéma zapojení pro měření úbytku napětí na jednom páru.....	18
Obrázek 12: Měření úbytku napětí na jednom páru (UTP SYKIFY) .....	19
Obrázek 13: Graf závislosti úbytku napětí na délce vedení (pro různé proudy) .....	22
Obrázek 14: Graf závislosti úbytku napětí na délce vedení (pro různé proudy) .....	23
Obrázek 15: Graf závislosti teploty vodiče na čase .....	24
Obrázek 16: Graf závislosti oteplení vodiče na čase .....	25
Obrázek 17: Graf závislosti úbytku napětí na proudu .....	25
Obrázek 18: Graf maximálního napájecího výkonu na délce vedení (kabelu) .....	26
Obrázek 19: Graf měření oteplení rozvinutého kabelu .....	27
Obrázek 20: Použité multimetry .....	28
Obrázek 21: Zapojení při korigování multimetrů .....	28
Obrázek 22: Schéma zapojení 1 .....	29
Obrázek 23: Schéma zapojení 2 .....	29
Obrázek 24: Schéma zapojení 3 .....	30
Obrázek 25: Schéma zapojení 4 .....	30
Obrázek 26: Schéma zapojení 5 .....	30
Obrázek 27: Schéma zapojení 6 .....	30
Obrázek 28: Schéma zapojení 7 .....	31
Obrázek 29: Schéma zapojení 8 .....	31
Obrázek 30: Schéma stabilizace 1 .....	31
Obrázek 31: Schéma stabilizace 2 .....	32
Obrázek 32: Schéma stabilizace 3 .....	32
Obrázek 33: Schéma stabilizace 4 .....	32
Obrázek 34: Schéma zapojení „modem – vedení – modem“ .....	33
Obrázek 35: Schéma zapojení „modem – splitter – vedení – splitter – modem“ .....	33
Obrázek 36: Schéma zapojení „mod. – spl. – vedení – spl. – mod.“ s nap. zdrojem .....	33
Obrázek 37: Schéma napájení u DSL .....	35
Obrázek 38: Zjednodušené schéma zapojení pro výpočet parametrů.....	35
Obrázek 39: Náhradní obvod horní propusti .....	36
Obrázek 40: Náhradní obvod dolní propusti .....	36
Obrázek 41: Frekvenční charakteristika horní a dolní propusti [22] .....	37



## 9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání parametrů systémů xDSL [17] .....	3
Tabulka 2: Třídy PoE podle napájení [11] [24].....	15
Tabulka 3: Výsledky měření úbytku napětí na jednom páru.....	19
Tabulka 4: Výsledky měření úbytku napětí na jednom páru.....	21
Tabulka 5: Výsledky měření úbytku napětí na jednom páru.....	21
Tabulka 6: Proudové odběry podle schémat zapojení .....	29
Tabulka 7: Výsledky měření modemů podle zapojení a použitých vedení.....	34

## 10. Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
FTTX	Fiber to the "x"
xDSL	"x" Digital subscriber line
FTTH	Fiber to the home
VDSL	Very-high-speed Digital Subscriber Line
G.fast	G. Fast Access to/over Subscriber Terminals
POTS	Plain Old Telephone Service
EC	Echo Cancellation
TC-PAM	Trellis-Coded Pulse Amplitude Modulation
IDSL	ISDN Digital Subscriber Line
HDSL	High-Speed Digital Subscriber Line
SDSL	Symmetric Digital Subscriber Line
SHDSL	Single pair High speed Digital Subscriber Line
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
DMT	Discrete Multi-Tone
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SNR	Signal to Noise Ratio
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
ATU-R	ADSL Termination Unit – Remote
RJ-11	Registered Jack - 11
NAT	Network Address Translation
VLAN	Virtual Local Area Network
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DNS	Domain Name System
VoIP	Voice over Internet Protocol
DSLAM	DSL Access Multiplexer
BRAS	Broadband Remote Access Server
ISP	Internet Service Provider
QoS	Quality of Service
PPPoE	Point to Point Protocol over Ethernet

PPPoA	Point to Point Protocol over ATM
MPLS	Multiprotocol Label Switching
BNG	Broadband Network Gateway
FEXT	Far End Crosstalk
TDD	Time Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
RN	Remote Node
NEXT	Near End Crosstalk
CPE	Customer Premises Equipment
CO	Central Office
SEM	Sealed Expansion Module
REM	Remote Expansion Module
ONT	Optical Network Terminal
IWF	Interworking Function
DSP	Digital Signal Processor
AFE	Analog Front End
LD	Line Driver
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
FPGA	Field Programmable Gate Array
L2	Second Layer (OSI Model)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PSE	Power Sourcing Equipment
PD	Powered Device
AP	Access Point
IT	Information Technology
EEE	Energy Efficient Ethernet
LPI	Low Power Idle
NIC	Network Interface Card
UTP	Unshielded Twisted Pair
TCEPKPFLE	T-sdělovací kabel místní; C-měděné jádro; EP-izolace žil z napěněného PE; K-kabel; P-plnicí hmota; FL-elektrostatické stínění; E-vnitřní plášť z PE

## **Příloha: Graf závislosti úbytku napětí na délce vedení**

# Průměr vodiče 0,5 mm

