

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**MODELÝ SILOVÝCH VEDENÍ PRO PŘENOS
DAT PLC SYSTÉMŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

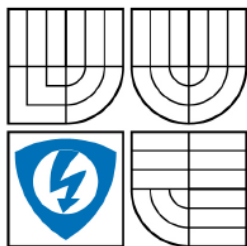
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR FAJKUS

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Petr Fajkus

ID: 83812

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Modely silových vedení pro přenos dat PLC systémů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. navrhování vedení (dimenzování vodičů), druhy vedení (rozdělení - kabelová, venkovní - Cu, Al, AlFe)
2. vedení nn vn, náhradní schéma, konstanty vedení,
3. navržení dílčích modelů vedení používaných v ČR,
4. úvod do PLC, modulace signálu, přenos vysokofrekvenčních signálů po vedeních nn a vn.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 1.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Fajkus

Bytem: Klatovská 2, 60200, Brno

Narozen/a (datum a místo): 18.5.1985, Vsetín

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, Csc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

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

☐ disertační práce

☐ diplomová práce

☐ bakalářská práce

☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Modely silových vedení pro přenos dat PLC systémů
Vedoucí/ školitel	Ing. Ilona Lázničková, Ph.D
VŠKP:	
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby	16.6.2009
VŠKP:	

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

☐ tištěné formě – počet exemplářů2.....

☐ elektronické formě – počet exemplářů1.....

* hodící se zaškrtněte

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace práce:

FAJKUS, P. Modely silových vedení pro přenos dat PLC systémů. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, 68 stran.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

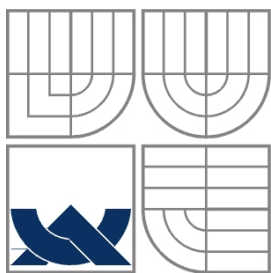
Modely silových vedení pro přenos dat PLC systémů

Petr Fajkus

vedoucí: Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

The models of power lines for PLC data communication systems

by

Petr Fajkus

Supervisor: Ing. Iлона Lázníčková, Ph.D.

Brno University of Technology, 2009

Brno

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku datové komunikace po silnoprůdých vedeních. Tato technologie je označována jako PLC (Power Line Communication). Širšímu nasazení této technologie do praxe v současnosti brání celá řada nedostatků. Těmi hlavními je zejména rušení užitečného signálu na vedení, vyzařování rušení, malý dosah užitečného signálu a prvky energetické sítě, které ovlivňují přenos. Při analýze dílčích problémů se ukazuje, že je vhodné mít k dispozici počítačový model silnoprůdého vedení, který by umožňoval počítačově simulovat datový přenos po silnoprůdém vedení. Je třeba sloučit dva rozdílné, svým způsobem protichůdné požadavky. Silnoprůdá vedení nejsou primárně určena pro datový přenos a datová vedení nejsou uzpůsobena pro přenos elektrické energie. Oba typy vedení jsou sice popsány stejnými primárními parametry, ale jsou provozovány v naprosto odlišných režimech. Tato práce rozebírá tyto režimy a možné modely silnoprůdých a datových vedení z hlediska přenosu dat. Hlavní část je věnována návrhu modelu silnoprůdého vedení pro datový přenos a počítačovému ověření funkcionality nového navrženého modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA: PLC, model silnoprůdého vedení, komunikace po silnoprůdém vedení, datové přenosy po silnoprůdém vedení

ABSTRACT

Bachelor's thesis is focused on the issue of data communications over power lines. This technology is known as PLC (Power Line Communication). Wider deployment of this technology into practice at present prevents a number of shortcomings. Main problems are disturbance useful signal on power lines, radiation interference, small reach of useful signal and elements of energy network, which affect the transmission. In the analysis of sub-problems, it appears that it is appropriate to have a computer power line model, allowing a computer simulation of data communication over power line. It is necessary to combine two different, conflicting requirements. Power lines are not primarily intended for data communication, and data lines are not designed for the transmission of electricity. Both types of line are described the same primary parameters, but they operate in completely different modes. This thesis examines these modes and possible models of power and data lines in terms of data communication. The main part is devoted to the draft power line model for data communication and computer verification of the functionality of the new proposed model.

KEY WORDS: PLC, model of power line, power line communication, power line data transmission

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	15
1 ÚVOD	17
1.1 TECHNOLOGIE PLC.....	17
2 CÍL PRÁCE	19
3 POPIS DATOVÉ KOMUNIKACE	20
3.1 TELEKOMUNIKAČNÍ KANÁL	20
3.1.1 ÚTLUM A ZKRESLENÍ SIGNÁLU	21
3.1.2 ŠÍŘKA PÁSMO	22
3.2 MODULACE NOSNÉHO SIGNÁLU	22
3.2.1 MODULACE POUŽITELNÉ PRO TECHNOLOGII PLC	23
3.3 PŘENOSOVÁ RYCHLOST	25
4 POPIS SILNOPROUDÝCH VEDENÍ	27
4.1 POPIS SILNOPROUDÝCH VEDENÍ Z HLEDISKA ELEKTROENERGETIKY	27
4.1.1 VENKOVNÍ VEDENÍ	28
4.1.2 KABELOVÁ VEDENÍ.....	36
4.2 POPIS SILNOPROUDÝCH VEDENÍ Z HLEDISKA DATOVÉHO PŘENOSU	37
4.2.1 VENKOVNÍ VEDENÍ	37
4.2.2 KABELOVÁ VEDENÍ.....	40
4.3 URČENÍ PARAMETRŮ SILNOPROUDÝCH VEDENÍ MĚŘENÍM.....	42
5 POUŽÍVANÉ MODEL Y VEDENÍ	44
5.1 MODEL Y SILNOPROUDÝCH VEDENÍ	44
5.1.1 MODEL VEDENÍ S ROVNOMĚRNĚ ROZLOŽENÝMI PARAMETRY	44
5.1.2 MODEL Y VEDENÍ POUŽÍVANÉ PRO SOUSTAVY VVN A ZVN	47
5.1.3 MODEL VEDENÍ POUŽÍVANÝ PRO SOUSTAVY NN A VN.....	50
5.2 MODEL Y DATOVÝCH VEDENÍ	51
5.2.1 VEDENÍ ZAKONČENÉ CHARAKTERISTICKOU IMPEDANCÍ	52
5.2.2 VEDENÍ ZAKONČENÉ OBECNOU IMPEDANCÍ	52
5.2.3 VEDENÍ PRAKTICKY NEKONEČNĚ DLOUHÉ	52
6 PROBLEMATIKA DATOVÝCH PŘENOSŮ PO SILNOPROUDÉM VEDENÍ	54
7 VYTVOŘENÍ MODEL U SILNOPROUDÉHO VEDENÍ PRO SIMULACI DATOVÝCH PŘENOSŮ.....	56
7.1 NAVRHOVÁNÍ VEDENÍ	56
7.1.1 NAVRHOVÁNÍ VEDENÍ DLE DOVOLENÉHO ÚBYTKU NAPĚTÍ	56
7.1.2 DÍLČÍ VEDENÍ POUŽÍVANÁ V ČR.....	57
7.2 SILNOPROUDÁ VEDENÍ ZAKONČENÁ CHARAKTERISTICKOU IMPEDANCÍ	58

7.3 REÁLNĚ ZAKONČENÁ SILNOPROUDÁ VEDENÍ	60
7.4 MODEL PRO SIMULACI SOUČASNÉHO ROZVODU ELEKTRICKÉ ENERGIE A PŘENOSU DAT PO SILNOPROUDÉM VEDENÍ	62
8 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	66
9 ZÁVĚR.....	67
POUŽITÁ LITERATURA	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Základní blokové schéma datové komunikace.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-2 Zjednodušené blokové schéma datové komunikace.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-3 Jednoduché blokové schéma datového kanálu.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-4 Příklad vlivu rezistance a reaktance na „obdélníkový“ průběh signálu.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-5 Závislost „zhodnocení“ signálu na frekvenci - tzv. vanová křivka.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-6 Princip přeměny signálu modulací.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-7 Příklad některých modulací používaných pro technologii PLC.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4-1 Některá možná rozpětí vodičů.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-2 Transpozice (kroucení) vedení.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-4 Příklad uspořádání svazkových vodičů.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-5 Určení parametrů vedení měřením.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5-1 Elementární úsek silnoprůdého vedení.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5-2 Model vedení vvn a zvn - π článek.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5-3 Model vedení vvn a zvn - T článek.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 5-4 Model vedení vvn a zvn - Γ článek.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5-5 Model vedení nn a vn.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 6-1 Princip datového přenosu po silnoprůdém vedení.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 7-1 Model pro simulaci přenosu dat obecně zakončeného vedení.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 7-2 průběh výstupního signálu na vedení zakončeném charakteristickou impedancí.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 7-3 Průběh výstupního signálu na reálně zakončeném vedení.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7-4 Vytvořený model pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 7-5 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie - modulace PSK, venkovní vedení.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 7-6 Vytvořený model pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 7-7 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží - modulace PSK, venkovní vedení.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 7-8 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží-modulace PSK, kabelové vedení.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 7-9 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží-modulace FSK.....</i>	<i>65</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4-1 Teplotní součinitele odporu (do 80 °C) [1]</i>	30
<i>Tab. 7-1 Příklad venkovních vedení</i>	57
<i>Tab. 7-2 Příklad kabelových vedení</i>	58
<i>Tab. 7-3 Charakteristická impedance navrhnutých vedení pro kmitočet 100 kHz</i>	58

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

PLC	Powerline Line Communication
BPL	Broadband over Power Line
OPERA	Open PLC European Research Alliance
HDO	Hromadné Dálkové Ovládání
AlFe	ocelohliníková lana
Al	hliník
Cu	měď
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
zvn	zvlášť vysoké napětí
Micro-Cap	počítačový program
π , T, Γ -článek	náhradní modely silnoprůdových vedení
Z , Z	impedance
Y , Y	admitance
R	činný odpor
L	indukčnost
C	kapacita
G	konduktance
X	induktivní reaktance
B	kapacitní susceptance
γ	konstanta šíření (činitel přenosu)
α	měrný útlum
β	měrný posuv
α_R , β_R	teplotní součinitelé odporu
α_v , α_{vz}	vlastní a vzájemný potenciálový koeficient
Z_0	charakteristická impedance
ΔU , ΔU	úbytek napětí
s	průřez vodiče
ρ	rezistivita
Φ	magnetický tok
d	osová vzdálenost mezi lany
a	osová vzdálenost mezi lany jedné fáze

r	poloměr vodiče
h	výška vodičů nad zemí
$\cos\varphi$	účinník
l	délka vedení
P	elektrický výkon, odběr soustavy
f	kmitočet signálu
$I, \mathbf{I}$	elektrický proud
$U, \mathbf{U}$	elektrické napětí
$\mathbf{A, B, C, D}$	Blondelovy konstanty
$\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$	integrační konstanty
dx	dílčí úsek vedení
x	vzdálenost bodu dx od konce vedení
y	vzdálenost bodu dx od začátku vedení
c	rychlost šíření elektromagnetického pole
λ	délka vlny napětí (proudu)
t	čas
ω	úhlová rychlost
v	rychlost
ASK	Amplitude Shift Keying
FSK	Frequency Shift Keying
PSK	Phase Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
μ	permeabilita
ε	permitivita

1 ÚVOD

V dnešní době je čím dál více využíváno elektronického datového přenosu k automatizaci a řízení různých technologických procesů. Dochází tak k nárůstu budování datových linek s využitím různých datových technologií. Hlavními požadavky jsou rychlost přenosu, spolehlivost, nízká cena, nízká chybovost. Datové kanály lze rozdělit na bezdrátové a pevné (metalické, optické). Bezdrátové mají výhody, že se nemusejí stavět datové kanály pro přenos, protože se šíří vzduchem ve všech směrech. Teoreticky je dostačující vysílač a přijímač. Jejich nevýhoda je náchylnost na rušení vlivem jiných signálů. Oproti tomu druhá varianta má výhody v menším rušení jinými signály. Značnou nevýhodu mají v nutnosti instalace komunikačních kabelů. S tím mohou být spojené různé problémy (instalace na cizím pozemku, památkové objekty, ve kterých jsou zakázány rekonstrukce a úpravy, obtížná instalace atd.).

Neustále dochází k vývoji a vylepšování známých technologií. Paralelně k tomu jsou vyhledávány jiné možnosti a technologie, které by mohly být využity v součinnosti s jinými systémy, nebo je zcela nahradit.

1.1 Technologie PLC

Jedna z možností je využití elektrorozvodných sítí zároveň pro elektroenergetické a telekomunikační účely. Technologie založená na této myšlence je označována jako technologie PLC (Power Line Communication). Jedná se o přenos dat pomocí nosného signálu na kmitočtu řádově jednotek až desítek MHz. Využití elektrické rozvodné sítě má hlavní výhodu v tom, že se k přenosu vysokofrekvenčního signálu využívá stávajících rozvodů elektrické energie a nemusí se instalovat speciální datové kabely. Snižují se tím náklady, což je žádoucí. Teoreticky lze říci, že každá stavba (s přívodem elektrické energie) má vytvořenou možnost datového kanálu PLC. Využití silnoproudých rozvodů pro datové přenosy se datuje od samého počátku elektrifikace, ale až v posledních pár letech je snaha technologii PLC hlouběji prozkoumat a rozšířit možnosti datového přenosu. Zatím jsou tyto systémy používány ve zkušebních provozech. Využití bylo zpočátku zaměřeno na poskytování služeb související s distribucí elektrické energie. Příkladem je tzv. HDO (Hromadné Dálkové Ovládání). HDO je specifický řídicí a ovládací systém. Používá se pro centrální řízení elektrických spotřebičů a jedná se o velice rozšířenou technologii (pracovní frekvence se pohybuje přibližně mezi 400 Hz až 1,1 kHz). Výraznou nevýhodou použití vysokofrekvenčního signálu na silnoproudém vedení je značná citlivost na rušení. Elektroenergetické vedení je navrženo především na přenos elektrické energie se základním kmitočtem 50 Hz, nikoli pro přenos vysokofrekvenčního signálu. Rušení technologie PLC způsobují zejména přístroje do sítě zapojené. Technologii PLC lze rozdělit na úzkopásmové a širokopásmové.

Úzkopásmové systémy jsou určeny zejména pro potřeby distributora elektrické energie. Například pro odečtové telemetrické systémy.

Několik předních evropských firem a univerzit vytvořilo projekt OPERA (Open PLC European Research Alliance). Tyto společnosti se rozhodly spolupracovat na vývoji technologie

PLC [6]. Hlavním záměrem projektu OPERA je rozvinout a standardizovat technologii PLC tak, aby mohla být alternativou pro stávající telekomunikační technologie. Proto je zde myšlenka vytvořit rozsáhlou síť dostupnou v každém obydleném a průmyslovém objektu, aby bylo možno nabídnout širokopásmovou komunikaci všem.

2 CÍL PRÁCE

Cílem práce je vytvořit model vedení použitelný pro simulaci datových přenosů po silnoprůdém vedení. Tento model by měl být vhodný pro úzkopásmové PLC systémy. Proto bude třeba porovnat modely vedení používané pro silnoprůdové a datové vedení a provést popis jejich parametrů. Na základě těchto poznatků bude vytvořen model vedení a postupně se provedou simulace ve vhodném počítačovém programu, aby se ověřilo zda je tento model vyhovující. Nynější výzkum je zaměřen především na přenos dat po sítích nízkého napětí a proto se práce také zaměří na úzkopásmové systémy PLC v sítích nízkého napětí.

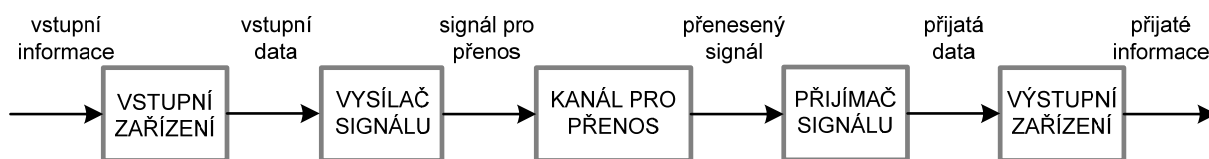
3 POPIS DATOVÉ KOMUNIKACE

Datová komunikace slouží pro přenos informace (dat) mezi dvěma body (zdrojem a přijímačem) za použití datového kanálu [8].



Obr. 3-1 Základní blokové schéma datové komunikace

Toto blokové schéma (Obr. 3-1) je příliš obecné. Ukazuje pouze základní stavbu komunikačního systému pro přenos dat. Ke správné činnosti je třeba, aby systém obsahoval další bloky, jak je uvedeno na Obr. 3-2. Na vstupu je určitá vstupní informace, která má být přenesena ke koncovému datovému terminálu. Nejprve se informace upraví do formátu, se kterým lze následně pracovat. Děje se tak pomocí vstupního zařízení, které převede informaci do formy vhodné k přenosu po vedení. Následně dochází k přenosu pomocí tohoto kanálu a na druhé straně je přijat určitý signál, který je zpravidla odlišný od signálu na jeho vstupu vlivem rušení a šumu. Ze signálu na přijímači se zpětným procesem získají data a následně informace, které mohou být odlišné od vstupních informací výše zmíněným rušením a šumem na přenosovém médiu.



Obr. 3-2 Zjednodušené blokové schéma datové komunikace

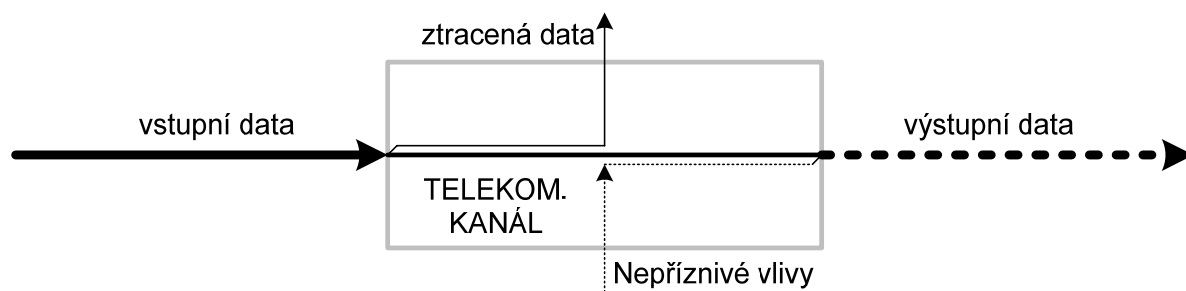
3.1 Telekomunikační kanál

Telekomunikační kanál je nedílnou součástí datové komunikace. Jeho prostřednictvím dochází k přenosu informace (dat) od zdroje k přijímači. Především se dělí na [5]:

- „bezdrátová“ (např. satelitní, mikrovlnné, rádiové, atd.)
- „vodičová“ (metalická a optická)

Šíření signálu prostřednictvím „bezdrátového“ média je realizováno formou elektromagnetických vln otevřeným prostorem (ve všech směrech nebo v určitém směru). Dělí se dle použité frekvence signálu. Dále se práce zaměří především na „metalická“ přenosová média, protože jsou využívána v technologii PLC.

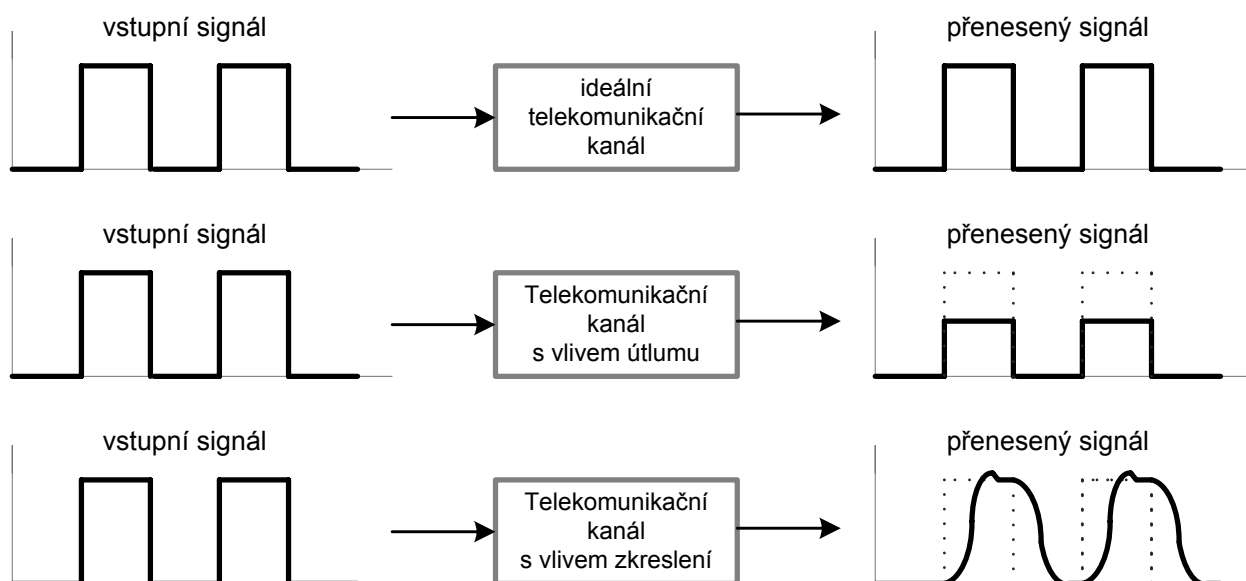
Místo zdroje a přijímače je přesně stanoveno. Na telekomunikačním kanálu dochází k nechtěnému „přijímání“ jiných, kolem se vyskytujících, signálů. Signál je ovlivňován i samotným telekomunikačním kanálem. Důsledkem všech nepříznivých vlivů je ztráta dat viz Obr. 3-3.



Obr. 3-3 Jednoduché blokové schéma datového kanálu

3.1.1 Útlum a zkreslení signálu

Z předchozího Obr. 3-3 plyne, že přenosový kanál ve skutečnosti není ideální, protože nějakým způsobem ovlivňuje přenášený signál. Při přenosu signálu vždy dochází k útlumu signálu a ke zkreslení signálu [5]. Každý druh datového kanálu má jiné vlastnosti a způsobuje útlum a zkreslení v jiné míře. Všechna metalická vedení mají charakteristické parametry (rezistance, svod, indukčnost, kapacita), které ovlivňují útlum a zkreslení signálu (více o parametrech vedení bude popsáno níže). Všeobecně je útlum signálu (při použití metalického vedení) způsoben rezistancí a svodem. Zkreslení signálu je způsobeno indukčností a kapacitou. Následující obrázek (Obr. 3-4) názorně ukazuje vliv útlumu a zkreslení na přenášeném „obdélníkovém“ signálu. Jak je vidět, ideální přenosová cesta signál neovlivňuje, ovšem v praxi se nevyskytuje. Útlum signálu vlivem odporu (rezistance a svod) způsobuje zmenšení amplitudy. Zkreslení signálu vlivem reaktance (indukčnost a kapacita) se projevuje při rychlých změnách a u obdélníkového signálu způsobí „zaoblení hran“ (výsledkem bývá signál s relativně pozvolnými změnami).



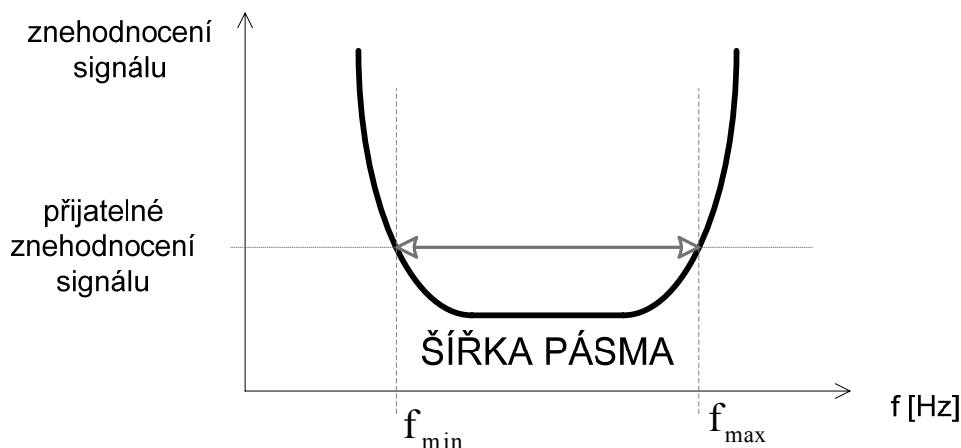
Obr. 3-4 Příklad vlivu rezistance a reaktance na „obdélníkový“ průběh signálu

V praxi se obdélníkový signál někdy používá pro přenos binárního signálu na krátké vzdálenosti, kdy nedochází k velkému zkreslení signálu a je tedy možné vyvarovat se chybám.

Tomuto způsobu se říká přenos v základním pásmu (baseband). Je však zřejmé, že pro přenos na větší vzdálenosti není signál s „náhlými“ změnami vhodný, protože čím větší je délka přenosového vedení, tím větší je zkreslení (i útlum). Z toho plyne, že od určité úrovně zkreslení nelze signál s „rychlými“ změnami použít, protože už není možné rozpoznat průběh vstupního signálu. Na větší vzdálenosti se používá signál s „pozvolnými“ změnami, který není vlivem zkreslení tolik znehodnocen. V praxi se využívají harmonické signály. Útlum a zkreslení signálu nejsou jediné nepříznivé vlivy při přenosu dat, další jsou například přeslechy, rušení, atd.

3.1.2 Šířka pásma

Šířka pásma (bandwidth) je jedna z vlastností, která ovlivňuje přenosovou rychlost. Jedná se o určitou frekvenční oblast, kterou lze využít pro přenos signálu aniž by byl výrazně znehodnocen. Šířka pásma je závislá na kmitočtových vlastnostech konkrétního datového kanálu. Tyto nepříznivé vlivy u konkrétního přenosového média nepůsobí stejně na všechny druhy signálu a je složité tuto skutečnost obecně popsat. Pokud však použijeme signál s harmonickým průběhem lze obecně říci, že šířka pásma je popsána dle tzv. vanové křivky (Obr. 3-5). Tato křivka ukazuje závislost nepříznivých vlivů na frekvenci harmonického signálu. Je vidět, že pro určité frekvence je vliv nežádoucích faktorů nízký a pro jiné frekvence dosti vysoký. Šířka pásma je tedy oblast frekvencí, kde vliv nepříznivých vlastností je relativně přijatelný (je ohraničený frekvencemi $f_{\min}$, $f_{\max}$) a po přenosu je signál v dostatečné kvalitě. Oproti tomu přenos signálu mimo šířku pásma je doprovázeno vysokým znehodnocením a na straně příjemce je „nečitelný“. Obecně tedy platí, že čím je šířka pásma větší, tím více můžeme přenést dat.



Obr. 3-5 Závislost „znehodnocení“ signálu na frekvenci - tzv. vanová křivka

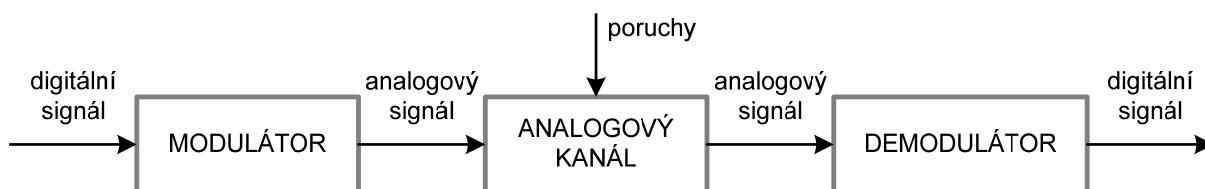
3.2 Modulace nosného signálu

Nosný signál sám o sobě „nenese“ žádnou informaci. Pomocí užitečného signálu se nosný signál upravuje (moduluje). Při modulaci dochází ke změně některých z parametrů nosného signálu (frekvence, amplituda, fáze) a na straně příjemce se užitečná data získávají dle těchto změn. Systémy PLC pro přenos dat využívají analogový kanál, ale data ze zdroje bývají digitální.

Proto je potřeba provést úpravu signálu před přenosem na analogový a na konci přenosu zpět na digitální. K tomuto účelu lze modulaci také využít. Existuje mnoho typů jednoduchých a složených modulací. Jednoduchá modulace zpracovává jeden modulační signál. Složená modulace zpracovává několik modulačních signálů. Modulací lze také zvýšit přenosovou rychlost a to pomocí využívání vícecestavových signálů. Jednou možností je zvětšování počtu stavů u fázového klíčování (PSK). Lepších výsledků se dosáhlo pomocí smíšených klíčovacích metod (např. 16-ti stavová modulace QAM). Podle typu nosného signálu lze modulace rozdělit na:

- Spojité analogové modulace - kde 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.

Princip přeměny signálu modulací znázorňuje následující Obr. 3-6



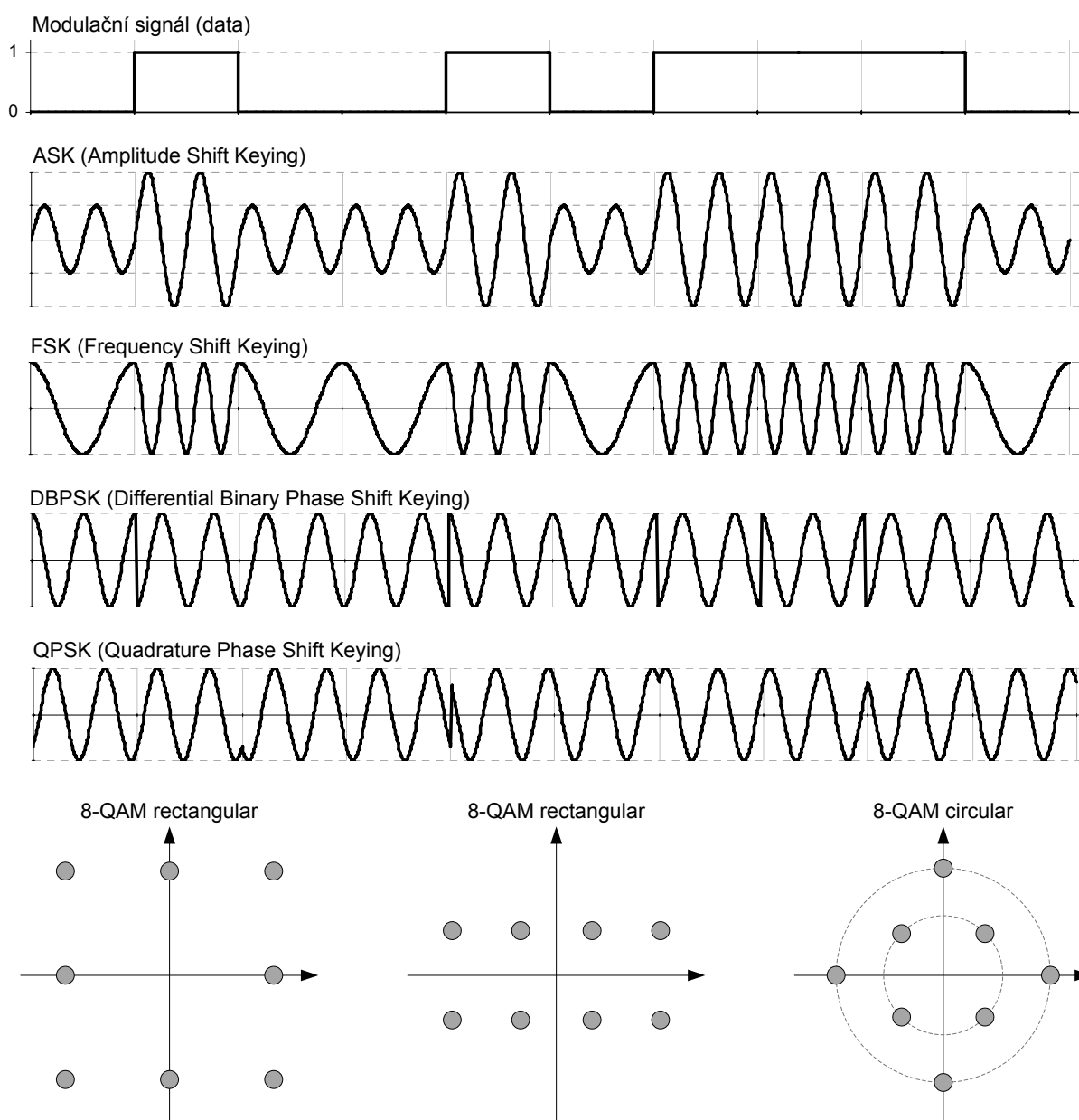
Obr. 3-6 Princip přeměny signálu modulací

3.2.1 Modulace použitelné pro technologii PLC

Pro technologii PLC se používají spojité digitální modulace, kterých existuje celá řada. Zde jsou uvedeny pouze některé z nich [9].

- 1) ASK (Amplitude Shift Keying)- Modulační signál ovlivňuje amplitudu nosného signálu (Obr. 3-7) (frekvence a fáze zůstávají nezměněny). Nevýhoda této modulace je citlivost na náhlé změny modulačního signálu a proto může docházet k častým chybám.
- 2) FSK (Frequency Shift Keying)- Při této modulaci se mění frekvence nosného signálu vlivem modulačního signálu (Obr. 3-7). Zároveň je zajištěno, aby nedocházelo ke změně fáze modulovaného signálu.
- 3) PSK (Phase Shift Keying)- Je druhem modulace, u které modulační signál nastavuje fázi nosného signálu na předem určené hodnoty. Zvláštním případem PSK je BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulace, která se využívá v případě binárního modulačního signálu. Nastavuje pouze dvě hodnoty fází od sebe vzdálených o 180° . Pro omezení chyb při demodulaci se používá DPSK (Differential Phase Shift Keying). Tato modulace fází nenastavuje na předem určenou hodnotu, ale posouvá ji vůči předešlému intervalu. Následně nenastává problém když je fáze signálu na „cestě“ posunuta. Vhodnou volbou se tak jeví kombinace BPSK a DPSK, což je DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), která spojuje výše zmíněné výhody obou modulací (Obr. 3-7).

- 4) QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)- Jedná se o modulaci tvořenou dvoustavovým fázovým klíčováním (BPSK) dvou nosných vln, které mají stejný kmitočet a jsou vzájemně posunuty o 90° (Obr. 3-7). Jde tedy o 4 stavovou modulaci (rozdíl mezi jednotlivými stavy je 90°) a každý stav představuje určitou kombinaci dvou bitů signálu (11 posun fáze o 45° , 01 posun fáze o 135° , 00 posun fáze o 225° , 10 posun fáze o 315°). Existuje i modulace DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), kde se fáze posouvá vůči předešlému intervalu.
- 5) QAM (Quadrature Amplitude Modulation)- Tato modulace reprezentuje data změnou amplitud dvou nosných vln vzájemně fázově posunutých o 90° . Z toho plyne, že je použita kombinace fázové a amplitudové modulace. Podle počtu fázových a amplitudových hodnot jsou například modulace 8-QAM (Obr. 3-7), 16-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM (existuje i 2-QAM, což je v podstatě BPSK a 4-QAM je stejné jako QPSK).



Obr. 3-7 Příklad některých modulací používaných pro technologii PLC

- 6) OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)- U této modulace je zvolené frekvenční pásmo rozděleno na subkanály, které jsou od sebe dostatečně frekvenčně vzdáleny (aby nedocházelo k překrývání). V každém subkanálu je použita určitá modulace (například QPSK, QAM, BPSK).

Pro úzkopásmové PLC systémy se používají například modulace FSK, BPSK, DBPSK, ASK a OFDM. V Širokopásmových PLC systémech se často využívá modulací QAM a OFDM.

3.3 Přenosová rychlost

Přenosová rychlost je veličina, která udává množství dat přenesených za jednotku času. Základní jednotkou je bit za sekundu (bit/s). Jak již bylo uvedeno, je přenosová rychlost ovlivňována řadou faktorů. Záleží na vlastnostech přenosového média, modulátoru a ostatních zařízeních.

Jedním z mnoha faktorů ovlivňující přenosovou rychlost je modulace. Existuje pojem modulační rychlost, který udává, jak rychle se mění modulovaný signál (jak často přechází z jednoho stavu do druhého). Její jednotkou je Baud za jednotku času (Bd/s). Modulační rychlost sama o sobě o přenosové rychlosti vůbec nic nevypovídá, protože četnost změn modulovaného signálu může být různá a přitom se přenosová rychlost nemusí změnit. Kromě modulační rychlosti je třeba vědět, kolik je modulačních stavů (kolik symbolů najednou se přenáší). Nejjednodušší modulace bývají dvoustavové a mohou přenést 1 bit (dva možné kombinace jednoho bitu), dále čtyřstavové mohou přenést 2 bity (čtyři možné kombinace dvou bitů), osmi stavové přenesou 3 bity, atd. (viz kapitola 3.2). Obecně tedy lze říci, že pro přenesení určitého počtu bitů (pro vysvětlení označen jako n) je třeba 2^n -stavovou modulaci. Pro další úvahy tuto závislost jednoduše upravíme tak, že m -stavová modulace přeneše v jednom okamžiku $\log_2(m)$ bitů. Zde je vidět, že čím více bitů se najednou přeneše, tím větší bude přenosová rychlost. Pokud známá modulační rychlost a počet stavů při modulaci, lze pomocí parametrů vyjádřit přenosovou rychlost

$$v_p = v_m \cdot \log_2(m), \quad [\text{bit/s}] \quad (3.1)$$

kde v_p, v_m je přenosová a modulační rychlost a m je počet stavů při modulaci.

Další vlastností, která ovlivňuje přenosovou rychlost je šířka pásma. Obecně platí, že čím větší bude šířka pásma, tím větší může být modulační rychlost. Dle Nyquistova teorému je mezi těmito veličinami určitý vztah (3.2). V ideálním případě by měla modulační rychlost být číselně dvakrát větší než šířka pásma

$$v_m = 2 \cdot \text{šířka pásma} . \quad [\text{bd/s}] \quad (3.2)$$

Následně lze upravit rovnici (3.1) a získá se závislost přenosové rychlosti na způsobu modulace a šířce pásma

$$v_p = 2 \cdot \text{šířka pásma} \cdot \log_2(m) \cdot \quad [\text{bit/s}] \quad (3.3)$$

Z tohoto vztahu plyne, že přenosovou rychlost lze zvyšovat buď pomocí šířky pásma nebo počtem stavů modulace. Rozšiřování šířky pásma je omezeno možnostmi přenosového média. Z kapitoly 3.1.2 je zřejmé, že pro zachování určité kvality signálu již nelze šířku pásma měnit. Nabízí se tedy druhá možnost, a to zvyšování stavů při modulaci. Problémem je omezení parametry datového kanálu. Tuto situaci řeší Shannonův teorém, který udává maximální přenosovou rychlost v závislosti na šířce pásma a odstupu úrovně přenášeného signálu od úrovně šumu (kvalita přenosového kanálu)

$$v_{\text{pmax}} = \text{šířka pásma} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\text{úroveň signálu}}{\text{úroveň šumu}} \right), \quad [\text{bit/s}] \quad (3.4)$$

kde v_{pmax} je maximální přenosová rychlost pro datový kanál.

Z předchozího vztahu je zřejmé, že maximální přenosová rychlost není ovlivňována způsobem modulace. Je to způsobeno odstupem signálu a šumu, protože od určitého počtu stavů modulace by začalo docházet k chybám. Jde v podstatě o principiální limit nezávislý na dokonalosti technologii zpracování.

4 POPIS SILNOPROUDÝCH VEDENÍ

Technologie PLC je založena na přenosu dat s využitím silnoprůdého vedení jako datového kanálu. V elektroenergetice se vedení sleduje z hlediska přenosu elektrické energie (kvalita, ztráty, cena, atd.) při použití frekvence 50 Hz, ovšem pro potřeby PLC systémů je využito vysokofrekvenčního signálu. Proto je zapotřebí provést popis silnoprůdého vedení jak z hlediska elektroenergetiky (přenosu elektrické energie), tak i z hlediska telekomunikací (přenosu dat).

4.1 Popis silnoprůdých vedení z hlediska elektroenergetiky

V oboru elektroenergetika je silnoprůdé vedení jeden z mnoha prvků elektrických sítí (transformátory, reaktory, rozvodny, kompenzátory, tlumivky a mnoho dalších). Prostřednictvím elektrického vedení dochází k přenosu a rozvodu elektrické energie. Propojuje dva uzly elektrické sítě. Uzel je místo připojení zdroje, spotřebiče, transformátoru, rozvětvení sítě, rozvodny nebo místo změny druhu vedení. Vedení je složeno z proudových vodičů, izolačních materiálů, bezpečnostních prvků, různých konstrukcí pro jejich zavěšení a ukotvení. Existuje několik hledisek, podle kterých se provádí dělení vedení. Pro účely této práce je důležité pouze dělení podle napěťové hladiny a podle způsobu provedení.

Dělení vedení dle napěťové hladiny [1]:

- nn- nízké napětí (230/400 V),
- vn- vysoké napětí (6 kV, 10 kV, 22 kV, 35 kV),
- vvn- velmi vysoké napětí (110 kV, 220 kV),
- zvn- zvlášť vysoké napětí (400 kV).

Cílem této práce je zaměřením se na přenos dat po silnoprůdém vedení nízkého a vysokého napětí. Elektrická vedení nn a vn jsou převážně distribuční, to znamená, že slouží pro rozvod elektrické energie ke spotřebitelům.

Rozdělení vedení dle způsobu provedení:

- Venkovní vedení
- Kabelové vedení

Venkovní a kabelová vedení se dále dělí dle způsobu uložení, provedení fázových vodičů atd. (pro technologii PLC se však nejedná o zásadní rozdíl).

V elektroenergetice se pro popis některých prvků a elektrických vedení používají čtyři základní parametry. Tyto parametry určují základní vlastnosti vedení. Používají se pro výpočty a náhradní modely.

Parametry popisující elektrické vedení:

- rezistance R [Ω],
- indukčnost L [H],

- konduktance G [S],
- kapacita C [F].

Z těchto „základních“ parametrů lze určit další provozní parametry vedení a to především charakteristickou (vlnovou) impedanci a činitel přenosu (konstanta šíření).

Většinou se uvažuje soustava v ustáleném stavu a se střídavým proudem o frekvenci 50 Hz. Potom lze zavést upravené parametry:

- induktivní reaktance X [Ω] ($X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$),
- kapacitní susceptance B [Ω] ($B = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$).

Parametry silnoprůdého vedení jsou všeobecně určeny podélnou impedancí

$$\mathbf{Z} = R + j2\pi \cdot f \cdot L = R + jX \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

a příčnou admitancí

$$\mathbf{Y} = G + j2\pi \cdot f \cdot C = G + jB, \quad [S] \quad (4.2)$$

kde $\mathbf{Y}$ [S] je příčná admitance, $\mathbf{Z}$ [Ω] je podélná impedance a f [Hz] je frekvence použitého signálu.

Tyto parametry určují konkrétní vedení o určité délce, rozpětí, výšce nad zemí, použitém materiálu, izolaci atd. Většinou se impedance a admitance vedení udávají na jednotku délky ($\mathbf{Z}_k, \mathbf{Y}_k$), pro jednodušší porovnání parametrů různých vedení. Impedance a admitance vztažené na jednotku délky (1 km) jsou

$$\mathbf{Z}_k = \frac{\mathbf{Z}}{l} = \frac{R}{l} + j \frac{X}{l} = R_k + jX_k \quad [\Omega/\text{km}] \quad (4.3)$$

$$\mathbf{Y}_k = \frac{\mathbf{Y}}{l} = \frac{G}{l} + j \frac{B}{l} = G_k + jB_k, \quad [S/\text{km}] \quad (4.4)$$

kde R_k [Ω/km], X_k [Ω/km], G_k [S/km], B_k [S/km] jsou rezistance, induktivní reaktance, konduktance a kapacitní susceptance vztažené na jednotku délky a l [km] je délka vedení.

Elektrické vedení se podle způsobu provedení dělí na dva základní druhy (venkovní vedení, kabelové vedení). Každé provedení má svá určitá specifika, proto se provede určení jednotlivých parametrů vedení zvlášť pro venkovní a zvlášť pro kabelová vedení.

4.1.1 Venkovní vedení

Je vedeno nad zemí a zavěšeno na stožárech pomocí izolátorů. Bývá využíváno hlavně na dlouhé vzdálenosti a pro vysoká napětí. Důležitým faktorem, kromě ceny, je i pevnost použitého materiálu, protože musí odolávat vnějším vlivům, a to především větru a námraze. Rovněž musí odolávat dynamickým a tepelným účinkům zkratových proudů a vnějších přepětí.

Venkovní vedení dále dělíme podle použitého materiálu, konkrétně podle materiálu proudového vodiče.

V současnosti se vedení realizují převážně hliníkovým vodičem s kombinací ocelové duše, která zde plní hlavně úkol nosného prvku (není zde za účelem vodivého prvku) [1]. Tato kombinace materiálů bývá pro venkovní vedení používána nejčastěji kvůli dobrým pevnostním vlastnostem a pořizovací ceně. Elektrický odpor a proudová zatížitelnost nejsou ideální, jsou však dostačující. Ocelohliníková lana jsou obecně označována jako AlFe. Vyrábí se v různých poměrech hliníku a železa, od toho se pak odvíjí jejich přesné označení, jako např. AlFe8, AlFe6, AlFe4, AlFe3. Číslo za obecným označením typu lana značí množství hliníku vůči množství železa. Jednotlivé vlastnosti lan se zde liší díky různému množství hliníku. Lana s větším množstvím hliníku mají menší odpor, ale také menší pevnost. V normálních podmínkách se většinou používají lana AlFe6 pro jejich dostačující poměr elektrického odporu a pevnosti. U lan AlFe je rezistivita v podstatě stejná jako u hliníkových vodičů, protože činný odpor ocelové duše je několikrát větší než činný odpor hliníku (rozložení proudu v průřezu vodiče je samovolně směřováno do míst s menším odporem). Navíc jeho poměr v průřezu vodiče je 1/3, 1/4, 1/5, nebo 1/7, takže jeho rezistance je asi 50 až 70krát větší než rezistance hliníku.

Proudový vodič venkovního vedení může být také vyroben z mědi (Cu), hliníku (Al), (oceli (Fe)).

Venkovní vedení je navrhováno pro napětíové hladiny od 400 V do 400 kV.

4.1.1.1 Rezistance vodičů

Rezistance vedení se při výpočtech určuje z rezistivity materiálu vodiče, jmenovitého průřezu vodiče a délky proudového vodiče

$$R_0 = \rho_0 \cdot \frac{l}{s_n}, \quad [\Omega] \quad (4.5)$$

kde ρ_0 [$\Omega \cdot \text{m}$] je rezistivita při teplotě ϑ_0 (20°C), l [m] je délka vodiče, s_n [m^2] je plocha průřezu jmenovitého vodiče (dle řady normalizovaných průřezů, které udává příslušná norma).

Protože se v elektroenergetice parametry vedení většinou určují na jednotku délky, tak dle vztahu (4.6) lze vypočítat R_{0k} , což je rezistance vedení při teplotě okolí 20 °C bez dalších vlivů při průchodu stejnosměrného proudu

$$R_{0k} = \rho_0 \cdot \frac{1000}{s_n}. \quad [\Omega/\text{km}] \quad (4.6)$$

Rezistivita hliníkových vodičů a lan AlFe je uvažována přibližně $30 \Omega \text{mm}^2 \text{km}^{-1}$ a měděných vodičů $17,9 \Omega \text{mm}^2 \text{km}^{-1}$.

Někdy se odpor vedení přepočítává na předpokládanou teplotu vodičů při normálním provozu (ne při poruše). Potom se rezistance změní o koeficient

$$k_g = \frac{R_g}{R_0} = 1 + \alpha_R (\nu - \nu_0) + \beta_R (\nu - \nu_0)^2, \quad [-] \quad (4.7)$$

kde α_R [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] a β_R [$^{\circ}\text{C}^{-2}$] jsou teplotní součinitele odporu viz Tab. 4-1

Jestliže se uvažuje zvýšení odporu v ustáleném stavu asi do 80 $^{\circ}\text{C}$, může se považovat závislost rezistance na teplotě za lineární.

Tab. 4-1 Teplotní součinitele odporu (do 80 $^{\circ}\text{C}$) [1]

Materiál	Teplotní součinitele odporu	
	α_R [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	β_R [$^{\circ}\text{C}^{-2}$]
Hliník	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$
Ocel	$6,20 \cdot 10^{-3}$	$9,00 \cdot 10^{-6}$
Měď	$4,17 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$

Dalším vlivem ovlivňujícím rezistivitu vodiče je „skinefekt“ k_s . Při průchodu střídavého proudu vodičem dochází k nerovnoměrnému rozložení proudu po průřezu. Hustota proudu se vlivem skinefektu od středu vodiče k povrchu zvětšuje. Tato skutečnost je dále ovlivňována kmitočtem, použitým materiálem, průřezem (jak velikostí průřezu, tak i jeho tvarem). Zvýšení rezistance skinefektem je pro hliníkové dráty a lana i dvoumateriálová lana při kmitočtu 50 Hz zanedbatelné – nepřesahuje hodnotu 1,5 % [1]. U měděných vodičů je vliv skinefektu ještě menší.

Vliv kroucení drátů k_l znamená, že délka jednotlivých drátů v laně je větší než výsledná délka lana. Proto se přesná hodnota rezistance musí počítat z délky jednotlivých drátů. U lan hliníkových a ocelohliníkových je tento koeficient asi 1,04 a u lan měděných a ocelových asi 1,02.

Průhyb zavěšeného vodiče k_p se projevuje pouze u venkovních vedení. Je způsobeno zavěšením lan na stožárech. Skutečná délka vedení je proto větší než rozpětí vedení (stožárů). Zvětšení rezistance průhybem se pohybuje okolo 1,02.

Následně výpočet rezistance vedení je určen vztahem

$$R = R_0 \cdot k_g \cdot k_s \cdot k_l \cdot k_p. \quad [\Omega] \quad (4.8)$$

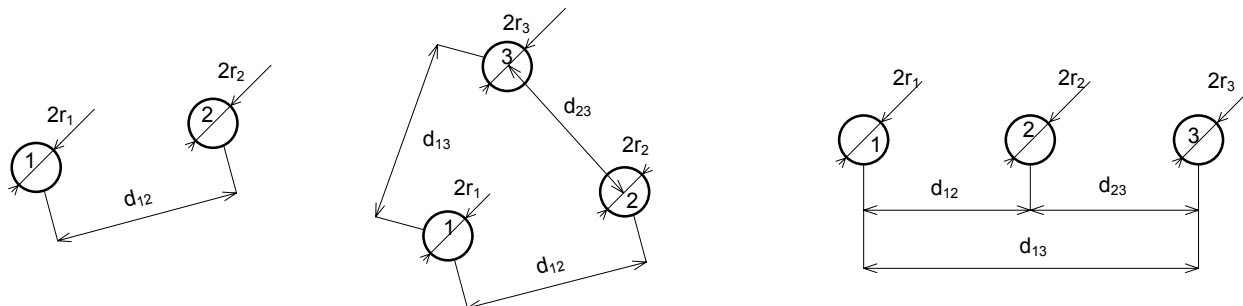
4.1.1.2 Indukčnost vedení

Při přenosu elektrické energie vzniká na vedení magnetické pole vyvolané proudy tekoucími ve vodičích. Pokud uvažujeme vícevodičové vedení vznikají zde i indukčnosti vzájemné (mezi vodiči).

Indukčnost dvouvodičového vedení (Obr. 4-1), kterým protéká proud i vychází z obecné definice indukčnosti

$$L = \frac{\Phi}{i}, \quad [\text{H}] \quad (4.9)$$

kde Φ je magnetický tok.



Obr. 4-1 Některá možná rozpětí vodičů

Po určitých úpravách a úvahách dospějeme ke vztahu, který popisuje indukčnost dvou vodičového vedení vztahenou na jednotku délky

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d}{r} + 0,05 \mu_r, \quad [\text{mH/km}] \quad (4.10)$$

kde d [m] je osová vzdálenost vodičů, r [m] je poloměr vodiče, μ_r [-] je relativní permeabilita materiálu vodiče. Při odvození této rovnice bylo uvažováno, že po celou délku vedení $d = \text{konst.}$, r a μ_r je u obou vodičů stejné.

U vedení trojvodičového (Obr. 4-1) se předpokládá, že každý vodič je ze stejného materiálu a mají stejné průřezy. Potom platí

$$\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 + \mathbf{i}_3 = 0. \quad [\text{A}] \quad (4.11)$$

To znamená, že soustava je vyvážená a proud se „nevrací“ zemí nebo zemním lanem ke zdroji.

Pokud je vedení symetrické (souměrné uspořádání vodičů na stožáru ($d_{12} = d_{23} = d_{13}$)), bude provozní indukčnost všech fází stejná, dle vztahu (4.10). V případě nesouměrného vedení ($d_{12} \neq d_{23} \neq d_{13}$) nebude indukčnost všech fází stejná, ale bude se lišit takto (za stálého předpokladu uvedeného v rovnici (4.11))

$$\begin{aligned} L_{k1} &= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{12}}}{r} + 0,05 \mu_r \\ L_{k2} &= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{23} \cdot d_{12}}}{r} + 0,05 \mu_r \\ L_{k3} &= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 \mu_r \end{aligned} \quad [\text{mH/km}] \quad (4.12)$$

Nesouměrnost napětí se na konci vedení projeví i v případě, že napětí je souměrné a zatížení je symetrické. Má to za následek zhoršení přenosu elektrické energie. Odstraňuje se pomocí transpozice vodičů. Provádí se tak, že každý vodič si na cestě mezi uzly vystřídá svoji pozici

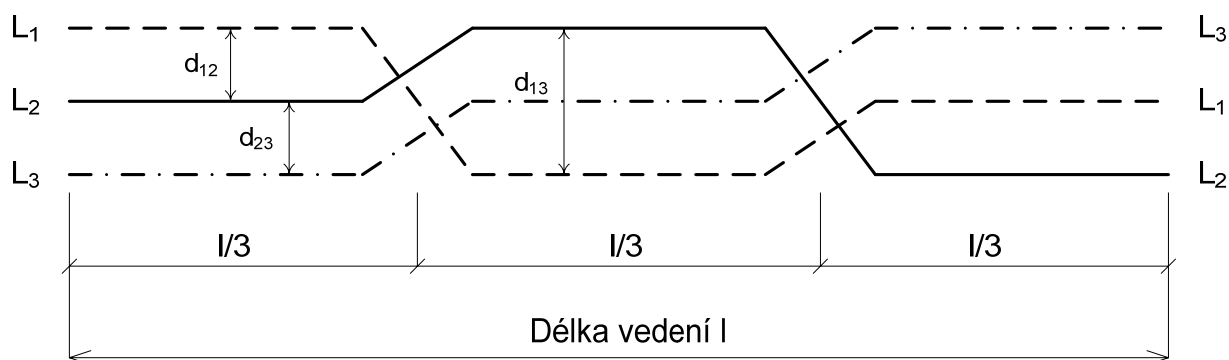
s ostatními vodiči. Každou třetinu délky vedení je vodič na jiné pozici (Obr. 4-2). Pokud se provede transpozice, výsledná indukčnost jedné fáze bude logicky složena ze tří indukčností (pro každou třetinu délky jedna) spojených do série

$$L = \frac{l}{3} \cdot 0,46 \cdot \left(\log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{12}}}{r} + \log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{12}}}{r} + \log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{12}}}{r} \right) + l \cdot 0,05 \mu_r \quad [\text{mH}] \quad (4.13)$$

Úpravou tohoto výrazu se dostane vztah pro výpočet indukčnosti každé fáze na jednotku délky

$$L_k = \frac{L}{l} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 \mu_r \quad [\text{mH/km}] \quad (4.14)$$

Provozní indukčnost transponovaného vedení je stejná jako střední hodnota indukčnosti vedení netransponovaného.



Obr. 4-2 Transpozice (kroucení) vedení

Skinefekt se neprojevuje pouze u rezistivity, projeví se i zvětšením indukčnosti vedení. Díky nerovnoměrnému rozložení proudu po průřezu vodiče a zvětšováním proudové hustoty k okrajům vodiče roste i magnetické pole více jak lineárně. Proto je u střídavého proudu provozní indukčnost větší než u proudu stejnosměrného. Vliv skinefektu se projevuje pouze na chování magnetického toku uvnitř vodiče a není tak závislá na vzdálenosti vodičů a jejich poloměru. Vyjadřuje se pomocí koeficientu α_s ($\alpha_s > 1$). Následně se výpočet indukčnosti změní o tento koeficient

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 \mu_r \cdot \alpha_s \quad [\text{mH/km}] \quad (4.15)$$

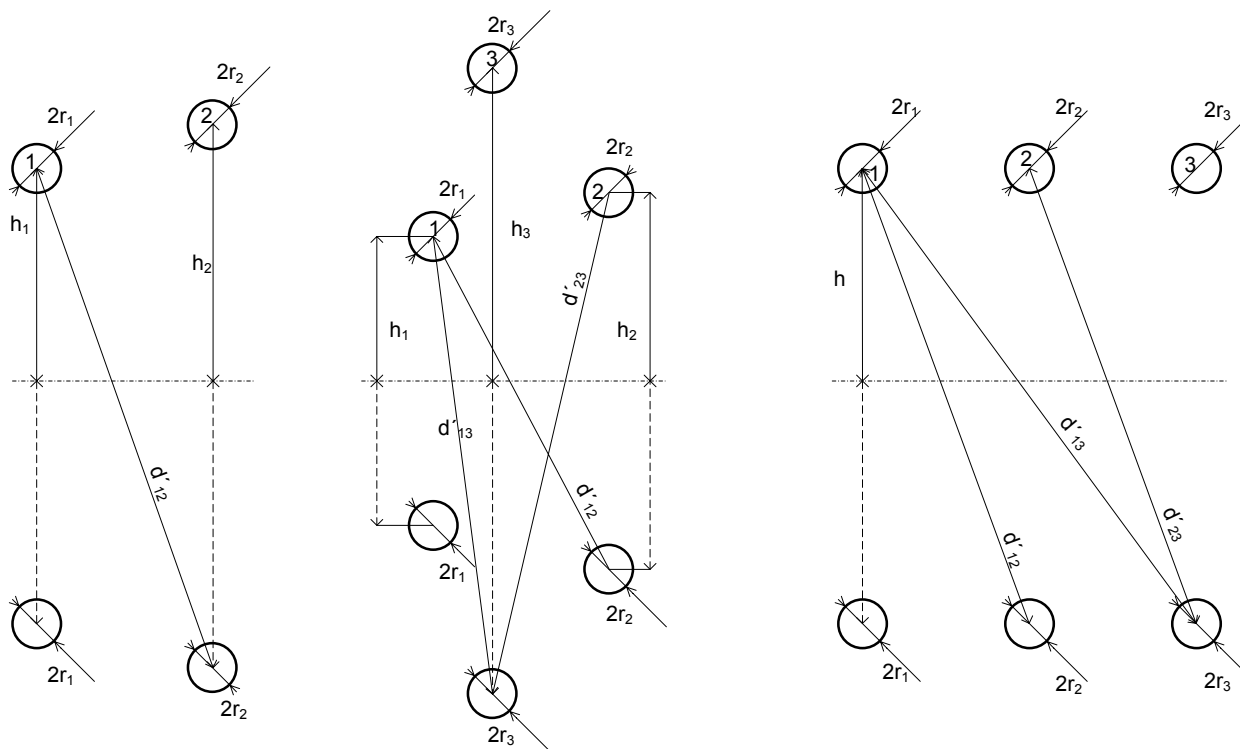
$$k = 10 \frac{-0,05 \cdot \alpha_s \cdot \mu_r}{0,46} \quad [-] \quad (4.16)$$

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}}{k \cdot r} \quad [\text{mH/km}] \quad (4.17)$$

4.1.1.3 Kapacita vedení

Kapacita vedení charakterizuje zpětný vliv působení elektrického pole mezi vodiči a zemí. Elektrické pole jedné fáze indukuje proud i v ostatních fázích. Jednovodičové vedení lze nahradit kondenzátorem. Vzdálenost elektrod kondenzátoru je rovna dvojnásobné výšce vodiče nad zemí ($2 \cdot h$). Jedná se o tzv. metodu zrcadlení, která je nezávislá na frekvenci a materiálu vodiče.

Pro výpočet kapacity třífázového venkovního vedení potřebujeme znát rozmístění jednotlivých vodičů na stožáru a výšku nad zemí (Obr. 4-3). Rozpětí vodičů je znázorněno na Obr. 4-1



Obr. 4-3 Některá možná uspořádání vodičů

Jestliže jsou známá všechna rozpětí a výšky nad zemí, je možno vypočítat provozní kapacitu vedení. Pro přehlednější zobrazení bude provedeno několik mezivýpočtů. Začne se výpočtem středního rozpětí vodičů

$$d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}, \quad [\text{m}] \quad (4.18)$$

střední výška vodičů nad zemí

$$h = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}, \quad [\text{m}] \quad (4.19)$$

střední rozpětí vodičů vůči „obrazům“

$$d' = \sqrt[3]{d'_{12} \cdot d'_{13} \cdot d'_{23}}, \quad [\text{m}] \quad (4.20)$$

Dále bude zaveden vlastní potenciálový koeficient

$$\alpha_v = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \ln \frac{2h}{r} \quad [\text{m/F}] \quad (4.21)$$

a vzájemný potenciálový koeficient

$$\alpha_{vz} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \ln \frac{d'}{d} \quad [\text{m/F}] \quad (4.22)$$

Z těchto hodnot je možno vypočítat kapacitu vodiče proti zemi

$$C_0 = \frac{1}{\alpha + \alpha_v}, \quad [\text{F/m}] \quad (4.23)$$

vzájemnou kapacitu

$$C_v = \frac{\alpha_v}{(\alpha - \alpha_v)(\alpha + 2\alpha_v)}, \quad [\text{F/m}] \quad (4.24)$$

a celkovou kapacitu vedení

$$C = C_0 + 3 \cdot C_v. \quad [\text{F/m}] \quad (4.25)$$

Úpravou vztahu (4.25) podle vztahů (4.23) a (4.24), je možno pro celkovou provozní kapacitu psát

$$C = \frac{1}{\alpha - \alpha_v}. \quad [\text{F/m}] \quad (4.26)$$

Tento postup platí pro vedení bez zemního lana, ale pro vedení se zemním lanem bude velikost provozní kapacity stejná. Vlastní kapacita u soustavy se zemním lanem je větší, protože potenciál země je blíže, ale naopak poklesne vzájemná kapacita.

Za předpokladu $h \gg d$, lze kapacitu jednofázového izolovaného vedení určit dle

$$C_p \cong \frac{24,13}{\log \frac{d}{r}} \quad [\text{nF/km}] \quad (4.27)$$

4.1.1.4 Konduktance vedení

Jedná se o reálnou složku příčné admitance vedení. Skládá se ze ztrát svodem přes izolátory a ztrát korónou. Z toho plyne, že konduktance představuje ztráty výkonu málo závislé na zatížení, ale značně závislé na napětí a na okolním prostředí. Konduktance se uplatňuje hlavně až od napěťové hladiny 110 kV. Svod jsou ztráty způsobené izolačním odporem použitých izolátorů (izolátory nemají nekonečný izolační odpor), takže dochází k propouštění určitého proudu. Po povrchu izolace dochází k propouštění proudu vlivem znečištění prostředí. Izolace je vystavena působení střídavého elektrického pole a tím vznikají dielektrické ztráty, které se projeví jako nedokonalá izolace. Pokud je překročeno kritické napětí mezi vodiči, dojde k vytvoření koróny,

kdy začne „prosakovat“ proud mezi vodiči přímo přes atmosféru. Při kritickém napětí intenzita elektrického pole v okolí vodičů překročí izolační pevnost vzduchu. Kritické napětí je závislé na vzdálenosti vodičů, jejich poloměru a na jejich hladkosti. Zásadní vliv však mají vlastnosti okolního vzduchu (hustota a vlhkost vzduchu), proto je dosti obtížné určit konduktanci. Okolní atmosféra se během dne a roku značně mění, izolace časem ztrácí své vlastnosti. Ztráty se obvykle určují z měření naprázdno (ztráty naprázdno), které se přibližně rovnají ztrátám provozním v příčné admitanci. Přibližná hodnota konduktance je 10^{-8} S/km. V nepříznivých podmínkách může vzrůst až tisíckrát. Pro běžné výpočty ustáleného chodu vedení se konduktance zanedbává. Konduktanci lze pro určité podmínky zjistit z měření naprázdno a nakrátko na vedení.

4.1.1.5 Ostatní parametry vedení

Z předešlých parametrů vedení (R_k, L_k, G_k, C_k) lze následně určit především vlnovou (charakteristickou) impedanci vedení Z_0 , konstantu šíření (činitel přenosu) γ_k , konstantu útlumu (měrný útlum) α_k a posuv fáze (měrný posuv) β_k

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z_k}{Y_k}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R_k + j\omega L_k}{G_k + j\omega C_k}}, \quad [\Omega] \quad (4.28)$$

$$\gamma = \sqrt{Z_k \cdot Y_k} = \sqrt{(R_k + j\omega L_k)(G_k + j\omega C_k)} = \alpha + j\beta, \quad [\text{km}^{-1}] \quad (4.29)$$

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2}(R_k G_k - \omega^2 L_k C_k) + \frac{1}{2}\sqrt{(R_k^2 + \omega^2 L_k^2)(G_k^2 + \omega^2 C_k^2)}}, \quad [\text{km}^{-1}] \quad (4.30)$$

$$\beta = \text{Im}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2}(\omega^2 L_k C_k - R_k G_k) + \frac{1}{2}\sqrt{(R_k^2 + \omega^2 L_k^2)(G_k^2 + \omega^2 C_k^2)}}, \quad [\text{rad/km}] \quad (4.31)$$

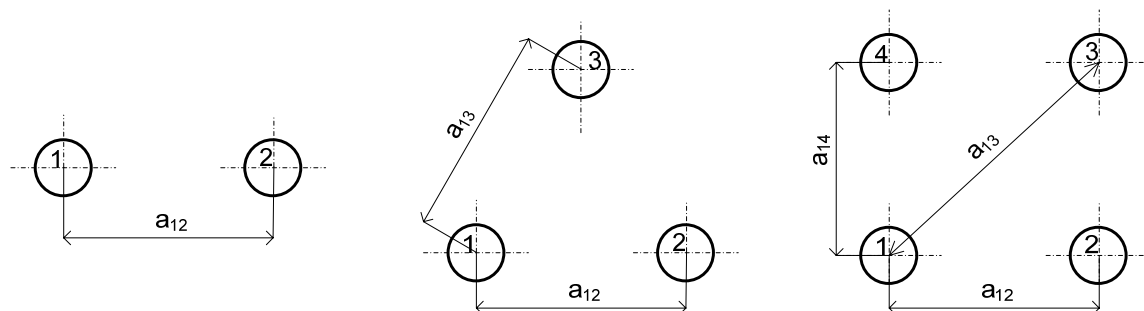
kde ω [rad/s] je úhlová rychlost ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$), α [km⁻¹] je měrný útlum vedení na jednotku délky a β [rad/km] je měrný posuv na jednotku délky

4.1.1.6 Svazkové vodiče

V některých případech se u venkovního vedení využívá tzv. svazkové uspořádání fázových vodičů (Obr. 4-4). Výhodou svazkových vodičů je, že ztráty výkonu jsou menší, než kdyby bylo využito jednoho lana o stejném průřezu jako je součet průřezů vodičů ve svazku. Konkrétně se zmenšují ztráty korónou, odpor vedení a indukčnost vedení. Provozní kapacita se naopak zvětšuje. V tomto uspořádání je jiné rozložení magnetického a elektrického pole a proto se při výpočtu kapacity a indukčnosti používá tzv. ekvivalentní poloměr

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot (a_{12} \cdot a_{13} \cdot \dots \cdot a_{1n})}, \quad [\text{mm}^2] \quad (4.32)$$

kde n [-] je počet lan ve svazku, r [m²] je poloměr lan, a [m] jsou osové vzdálenosti mezi lany (Obr. 4-4)



Obr. 4-4 Příklad uspořádání svazkových vodičů

4.1.2 Kabelová vedení

Kabelová vedení jsou dimenzována pro napětí do 110 kV. Kabely jsou vyráběny pro určitá jmenovitá napětí a pro určitý druh uložení. Může být uloženo do země, položeno na lávkách, nebo zavěšeno na stožárech. Podle toho se pak liší jejich konstrukce. Musí vydržet zatížení specifická pro prostředí, ve kterém jsou uloženy. Většina charakteristických vlastností kabelu jsou patrná z označení vodiče.

Kabelové vedení uložené na stožárech, má mnohem větší izolační pevnost než venkovní vedení. Toho se využívá především v prostorách velmi nepříznivých pro venkovní vedení, kde by konduktance dosahovala příliš velkých hodnot.

Uložení na lávkách má tu výhodu, že vedení není namáháno povětrnostními podmínkami.

Další rozdělení je podle druhu použitého vodiče proudu. Používají se dva druhy, a to s měděným jádrem (označení C) a s hliníkovým jádrem (označení A). Všeobecně má lepší vlastnosti měděný vodič, protože má menší elektrický odpor a velkou proudovou zatížitelnost.

Dále se kabely rozlišují podle druhu materiálu izolace a pláště, které mohou být z PE, PVC, kombinace PE a PVC, plášť s Al fólií, zesílený polyetylen, XPE, a další.

Podle druhu jmenovitého napětí jsou kabely pro napětí 500 V, 750 V, 1 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 35 kV a 110 kV.

Kabelová vedení se používají v oblastech, ve kterých nelze použít vedení venkovní (bezpečnostní důvody, málo prostoru, silná námrazová oblast, chemicky agresivní ovzduší). Často se používají provedení nn a vn.

U výpočtů s kabelovými vedeními je to s parametry mnohem složitější, protože mezi jednotlivými fázemi není pouze jedno prostředí. Rezistance se určuje stejným postupem jako u vedení venkovního, není tu však vliv průhybu vodičů. Kapacita a indukčnost se počítá velice složitě, záleží na každém materiálu izolace, pláště, stínění, atd. Je mnohem jednodušší odečíst tyto parametry z tabulek, které udává výrobce. Kromě parametrů (R , L , C) bývá uvedená i proudová zatížitelnost a jiné vlastnosti kabelu. U kabelových vedení se indukčnost pohybuje přibližně kolem 30 % indukčnosti vedení venkovního. Odhadovaná velikost reaktance bývá u nn kolem $0,05 \div 0,09 \Omega/\text{km}$, u vedení vn potom kolem $0,08 \div 0,23 \Omega/\text{km}$ [1].

4.2 Popis silnoprůdých vedení z hlediska datového přenosu

Jak už zaznělo výše, je silnoprůdé vedení přednostně navrženo pro přenos elektrické energie. V oboru telekomunikací se pro přenos dat také využívají určitá vedení, která jsou metalická (jako silnoprůdá vedení). Na základě rozboru metalických telekomunikačních vedení lze provést popis silnoprůdých elektroenergetických vedení z hlediska přenosu dat.

V oboru telekomunikací jsou pro popis metalických vedení využívány čtyři základní parametry, které vypovídají o jeho přenosových vlastnostech [2]:

- činný odpor R [Ω],
- indukčnost L [H],
- svod (izolační odpor) G [S],
- kapacita C [F].

Následně jsou z těchto základních veličin odvozovány charakteristické vlastnosti vedení jako například měrný útlum, měrný posuv, impedance atd.

Základní rozdělení silnoprůdých vedení je na vedení venkovní a kabelová.

4.2.1 Venkovní vedení

Obecný popis venkovního vedení je proveden v kapitole 4.1.1 dostatečně. Níže v této kapitole je proveden rozbor základních parametrů pro popis venkovních vedení z hlediska přenosu dat.

4.2.1.1 Rezistance vodičů

Jednou ze základních veličin, která podává obraz o přenosových vlastnostech vedení, je činný odpor vodiče. Jak bylo popsáno v kapitole 4.1.1.1, je rezistance vedení ovlivňována řadou faktorů (oteplení, kroucení drátů atd.). Vliv skin efektu (zvyšování odporu vlivem střídavého proudu) je v elektroenergetice téměř zanedbatelný. V oboru telekomunikací však nelze skin efekt opomenout, protože zvyšováním frekvence signálu se ovlivňuje činný odpor (čím větší frekvence, tím větší činný odpor). Tím pádem je pro přenos vysokofrekvenčního signálu zapotřebí rezistanci určovat také podle frekvence signálu

$$R_{fk} = R_{0k} \left(r \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{\rho}} + 0,2 \right), \quad [\Omega/\text{km}] \quad (4.33)$$

kde R_{fk} [Ω/km] je činný odpor vedení pro určitou frekvenci přenášeného signálu vztažený na jednotku délky, r [mm] je poloměr vodiče, μ_r [-] je relativní permeabilita, ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{km}^{-1}$] je rezistivita materiálu vodiče.

Relativní permeabilita se u hliníkových a měděných vodičů pohybuje okolo hodnoty 1.

Ostatní vlivy jako kroucení drátů, průhyb vodiče a vliv oteplení byly již popsány v kapitole 4.1.1.1.

4.2.1.2 Indukčnost vedení

Indukčnost vedení přenášející signál o relativně vysoké frekvenci je vlivem skinefektu vyšší. Pro účely přenosu dat je používán vztah

$$L_k = 0,4 \cdot \left(\ln \frac{d}{r} + 0,25 \right) \quad [\text{mH/km}] \quad (4.34)$$

4.2.1.3 Kapacita vedení

Z kapacity vedení se určuje velikost jalové složky příčné admitance vedení. Pro datová vedení se uvádí výpočet kapacity

$$C_k = \frac{29 \cdot \varepsilon_r}{\ln \frac{d}{r}}, \quad [\text{nF/km}] \quad (4.35)$$

kde ε_r je relativní permitivita.

Relativní permitivita reprezentuje vliv okolních podmínek na velikost kapacity vedení. V normálních podmínkách se pohybuje okolo $\varepsilon_r = 1$, při námraze přibližně $\varepsilon_r = 1,6$ atd.

Protože kapacita vedení není závislá na kmitočtu signálu, bude vhodné kapacitu silnoprůdého vedení, pro účely přenosu dat, určovat dle vztahu (4.27).

4.2.1.4 Konduktance vedení

Svod G neboli konduktance je další parametr vedení. Jedná se o reálnou složku příčné admitance (G_k je konduktance vztažená na 1 km). Podrobný popis konduktance byl proveden již v kapitole 4.1.1.4. Všeobecně je určení svodu obtížné. Někdy se v teorii datových vedení uvádí orientační výpočet svodu

$$G_k = G_{0k} + v \cdot f, \quad [\mu\text{S/km}] \quad (4.36)$$

kde G_{0k} [$\mu\text{S/km}$] je svod při průchodu stejnosměrného proudu vedením (1km), v je činitel svodu a f [kHz] je frekvence použitého signálu.

Svod při průchodu stejnosměrného proudu může být za sucha přibližně 0,1 S/km a za deště zhruba 0,5 S/km. Činitel svodu se v suchém prostředí pohybuje okolo 0,05 S/km, při dešti okolo 0,25 S/km a při námraze přibližně 0,75 S/km [2].

4.2.1.5 Měrný útlum vedení

Měrný útlum je pro přenos dat mnohem důležitější parametr, než v elektroenergetice. Z rovnice (4.29) je zřejmé, že měrný útlum vedení je reálná složka činitele přenosu. Po formálních úpravách lze pro „vysoké“ kmitočty měrný útlum určit dle vztahu

$$\alpha = \frac{R_k}{2} \sqrt{\frac{C_k}{L_k}} + \frac{G_k}{2} \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}. \quad [\text{km}^{-1}] \quad (4.37)$$

Měrný útlum vyjadřuje poměr utlumeného (výstupního) signálu a neutlumeného (vstupního) signálu. Ze vztahu (4.37) je zřejmé, že útlum vedení se skládá z „odporové“ a „svodové“ složky. V tomto případě je odporový vliv rozhodující. Útlum vedení je důležitým faktorem při určování přenosové rychlosti. Útlum vedení lze tedy zlepšit zvýšením indukčnosti nebo snížením odporu a kapacity.

Pokud je použit signál o relativně nízkém kmitočtu, kdy induktivní reaktance je mnohonásobně menší než rezistance, lze výpočet měrného útlumu zjednodušit

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_k \cdot \omega C_k}{2}}. \quad [\text{km}^{-1}] \quad (4.38)$$

4.2.1.6 Měrný posuv na vedení

Podobně jako u měrného útlumu na vedení, je měrný posuv jalovou složkou činitele přenosu vedení. Po úpravách je možno pro relativně vysoké kmitočty měrný posuv určit dle vztahu

$$\beta = \omega \sqrt{L_k \cdot C_k}. \quad [\text{rad/km}] \quad (4.39)$$

Při použití signálu s takovým kmitočtem, kde induktivní reaktance je několikanásobně menší než rezistance je možno výpočet měrného posuvu zjednodušit

$$\beta = \sqrt{\frac{R_k \cdot \omega C_k}{2}}. \quad [\text{rad/km}] \quad (4.40)$$

4.2.1.7 Charakteristická impedance vedení

Charakteristická impedance vedení je všeobecně určena dle vztahu (4.28). Pokud se použije signál o tak vysoké frekvenci, že $\omega L \gg R$ a $\omega C \gg G$, lze výpočet charakteristické impedance zjednodušit

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}. \quad [\Omega] \quad (4.41)$$

Pro „nízké“ kmitočty se charakteristická impedance určí dle vztahu

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{\omega C}} = \sqrt{\frac{L_k}{\omega C_k}} \quad [\Omega] \quad (4.42)$$

4.2.2 Kabelová vedení

Pro kabelová vedení byl obecný popis již proveden v kapitole 4.1.2 dostatečně. Následuje popis základních parametrů kabelových vedení z hlediska datových přenosů. Jak už zaznělo výše, lze parametry kabelů (R_k , L_k , C_k) odečíst z katalogu výrobce. Indukčnost a kapacita jsou na frekvenci téměř nezávislé, proto by neměl být problém s použitím udávaných hodnot v katalogu kabelů. Ovšem jak víme rezistance se s frekvencí mění a odpor udávaný v katalogu je měřen pro napětí o síťovém kmitočtu (50 Hz).

4.2.2.1 Rezistance vodičů

Rezistance vodičů při použití síťového napětí je uváděna v tabulkách výrobce kabelu. Při využití elektroenergetického kabelu k přenosu vysokofrekvenčního signálu bude rezistance vyšší. Otázkou však je jakým způsobem se změní. Pro účely přenosu dat se odpor symetrických kabelů určuje dle vztahu

$$R_k = R_{0k} \cdot k_s \cdot k_b \cdot k_o, \quad [\Omega/\text{km}] \quad (4.43)$$

kde k_s [-] reprezentuje vliv skin efektu, k_b [-] je činitel zvětšení odporu vlivem blízkosti vodičů a k_o [-] je činitel zvětšení odporu způsobený okolními vodiči.

Činitel blízkosti vodičů bývá pro telekomunikační kabely přibližně 1,2 ÷ 1,3 a faktor okolních vodičů přibližně 1,1 ÷ 1,2. Činitel zvětšení povrchu povrchovým jevem se pro kmitočty nižší než kritický kmitočet určuje dle vztahu

$$k_s = 1,25 \left(\frac{f}{f_{kr}} \right)^2, \quad [-] \quad (4.44)$$

kde f je kmitočet použitého signálu.

Při kmitočtu signálu vyšším než je kritický kmitočet se k_s vypočte dle vztahu

$$k_s = 0,24 \cdot r \cdot \sqrt{f} + 0,25. \quad [-] \quad (4.45)$$

Vztah (4.43) byl vytvořen pro datové kabely, které jsou často vícežilové (například osmižilové a mnohem více). Oproti tomu kabely elektroenergetické bývají nejčastěji jednožilové, trojžilové a čtyřžilové. U silnoprůdých kabelů je použito více izolačního materiálu a větší vzdálenost mezi jednotlivými žilami než u datových kabelů. Proto není vhodný pro účely přenosu dat po silnoprůdém vedení.

4.2.2.2 Indukčnost vedení

Indukčnost kabelového vedení je menší než u venkovního vedení. Je to způsobeno geometrickým uspořádáním vodičů. Vzdálenost vodičů od sebe je u kabelového vedení mnohem menší než u vedení venkovního. Malá indukčnost (oproti venkovnímu vedení) má za následek větší měrný útlum, což je nežádoucí. Pro výpočet indukčnosti vysokofrekvenčního vedení je používán vztah

$$L_k = 0,4 \cdot \ln \frac{d}{r} + 0,25 \quad [\text{mH/km}] \quad (4.46)$$

4.2.2.3 Kapacita vedení

U kabelového vedení je kapacita větší než u vedení venkovního, protože je závislá i na vzdálenosti jednotlivých vodičů (u kabelového vedení jsou vodiče mnohem blíže u sebe než u vedení venkovního). Pro telekomunikační datové kabely bývá udáván výpočet kapacity dle specifického vzorce a zřejmě nebude vhodný pro výpočet kapacity silnoprůdých kabelů.

4.2.2.4 Konduktance vedení

Konduktance kabelového vedení se skládá ze dvou složek. Jedna část je způsobena stejnosměrným napětím. Druhá část je zapříčiněna střídavým proudem a v oblasti telekomunikací bývá udávána v poměru k vodivosti provozní kapacity

$$G_{\text{fr}} = k_g \cdot \omega C_p, \quad [\text{S}] \quad (4.47)$$

kde G_{fr} [S] je vodivost způsobená střídavým proudem, k_g [-] je činitel svodu a C_p [F] je provozní kapacita

Vliv svodu proti vodivosti kapacity je malý. Přibližná hodnota činitele svodu při kmitočtu 10 kHz je $1,2 \cdot 10^{-3}$ a pro kmitočet 100 kHz je činitel svodu $7 \cdot 10^{-3}$.

4.2.2.5 Měrný útlum vedení

Jak bylo uvedeno výše, je měrný útlum reálnou složkou činitele přenosu. U kabelového vedení se měrný útlum určuje ze stejných vztahů jako u venkovního vedení (kapitola 4.2.1.5).

4.2.2.6 Měrný posuv na vedení

Měrný posuv se počítá stejně jako u venkovního vedení (kapitola 4.2.1.6).

4.2.2.7 Charakteristická impedance vedení

Za stejných podmínek jako u venkovního vedení (kapitola 4.2.1.7), lze určit charakteristickou impedanci pro kabelová vedení. Vztah

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}, \quad [\Omega] \quad (4.48)$$

je určen pro signály o relativně vysokém kmitočtu, kdy $\omega L \gg R$ a $\omega C \gg G$.

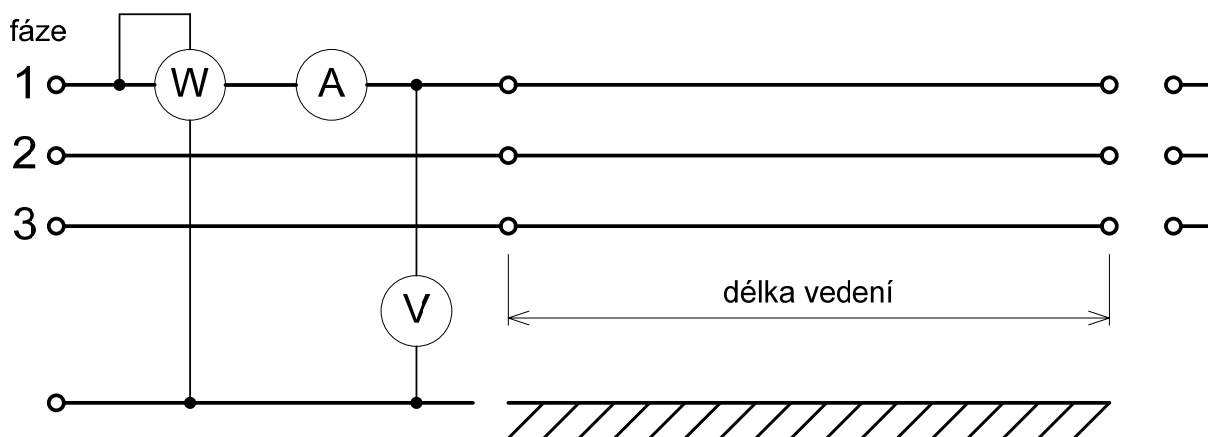
Pro „nízké“ kmitočty se charakteristická impedance kabelového vedení vypočte dle vztahu

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{\omega C}} = \sqrt{\frac{R_k}{\omega C_k}} \quad [\Omega]. \quad (4.49)$$

4.3 Určení parametrů silnoprůdých vedení měřením

V předešlých kapitolách 4.1 a 4.2 byl proveden popis silnoprůdého vedení z hlediska elektroenergetického a z hlediska telekomunikačního. Prvním poznatkem je, že oba obory pro popis silového vedení využívají stejné základní parametry (R , L , G , C). Následně se z těchto parametrů určují další důležité veličiny. V předešlých kapitolách je ukázána jedna možnost zjištění základních parametrů (teoretický výpočet). Druhou možností je určení parametrů měřením na silnoprůdém vedení. Ve většině případů se dosáhne přesnějších výsledků při zjištění parametrů z měření na vedení, protože každé vedení je „jedinečné“ (použité materiály, prostředí, stáří atd.) a s tím teoretické výpočty neuvažují.

Pro stanovení parametrů silnoprůdého vedení se provádí dvě měření a to měření naprázdno a měření nakrátko [1]. Jestliže se provádí měření parametrů na třífázovém vedení je vhodné, aby vedení bylo transponované a napájené souměrným harmonickým napětím. Pokud nejsou předešlé podmínky splněny, tak parametry každé fáze budou jiné a následné určení parametrů by bylo složité. Proto se práce v této kapitole bude věnovat určení parametrů třífázového vedení z měření.



Obr. 4-5 Určení parametrů vedení měřením

Měření parametrů jedné fáze je schématicky znázorněno na obrázku Obr. 4-5. Měření je prováděno tak, že je na začátek vedení připojen zdroj napětí a na každé fázi je stejné napětí (napětí mezi fázemi je mezi sebou posunuto o 120° elektrických). Při měření naprázdno je konec vedení „otevřen“. U měření nakrátko je konec vedení spojen do zkratu.

Výsledkem měření naprázdno a nakrátko jsou příslušné hodnoty napětí (U_0, U_k), proudu (I_0, I_k) a výkonu neboli ztrát (P_0, P_k). Z nich lze určit provozní admitanci naprázdno Y_{00} a provozní impedanci nakrátko Z_{kk}

$$Y_{00} = \frac{I_0}{U_0} \angle \arccos \frac{P_0}{U_0 I_0}, \quad [S] \quad (4.50)$$

$$Z_{kk} = \frac{U_k}{I_k} \angle \arccos \frac{P_k}{U_k I_k}. \quad [\Omega] \quad (4.51)$$

Argumenty impedance a admitance jsou určeny ze známé závislosti $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$. Z předchozích vztahů (4.50) a (4.51) není zřejmé, zda jsou argumenty kladné, nebo záporné. Tato skutečnost je důležitá, protože vypovídá o charakteru Y_{00} a Z_{kk} . Z teorie víme, že podélná impedance má charakter induktivní a příčná admitance má charakter kapacitní, proto oba argumenty budou kladné.

Při měření naprázdno jsou proudy tekoucí v podélném směru velmi malé. Proto lze přibližně říci, že admitance naprázdno je stejná jako admitance vedení. Následně lze určit svod a kapacitu vedení

$$(G_k + j\omega C_k) = Y_k = \frac{Y}{l} = \frac{(G + j\omega C)}{l} \cong \frac{Y_{00}}{l}, \quad [S/km] \quad (4.52)$$

kde l [km] je délka vedení.

Podobně lze říci, že při měření nakrátko jsou proudy tekoucí v příčném směru zanedbatelné a tím pádem impedance nakrátko je v podstatě stejná jako impedance vedení. Potom činný odpor a indukčnost vedení je

$$(R_k + j\omega L_k) = Z_k = \frac{Z}{l} = \frac{(R + j\omega L)}{l} \cong \frac{Z_{kk}}{l} \quad [\Omega/km], \quad (4.53)$$

5 POUŽÍVANÉ MODELÝ VEDENÍ

Modelování je nedílnou součástí řešení elektrických vedení a to jak silnoproudých, tak i telekomunikačních. Jedná se o teoretickou náhradu skutečného vedení. Modely vedení bývají složeny ze sério-paralelního zapojení elektrických prvků (rezistor, cívka, kapacitor) a jsou doplněny o příslušné rovnice.

Jak již bylo uvedeno, lze každé vedení popsat pomocí čtyř parametrů (R, L, G, C). Tyto parametry jsou ve skutečnosti na vedení rozloženy po celé jeho délce (v každém místě vedení) [1]. Takové obecné vedení je velice složité popsat, protože v každém místě vedení nejsou parametry stejné. Například u venkovního vedení je svod největší v místě upevnění vodiče ke stožáru. Dále je problém respektovat změny parametrů v čase. Například vlivem stárí vodičů se mění jeho odpor nebo při každé změně podnebí se mění i svod (teoreticky není podnebí okolo celého vedení stejné) atd. Napětí a proudy jsou závislé nejenom na čase, ale i na prostorových souřadnicích. To znamená, že v jednom čase nejsou okamžité hodnoty napětí (proudu) stejné ve všech místech vedení.

Z výše uvedeného plyne, že je v podstatě nemožné vytvořit přesný model vedení. Proto se při vytváření modelu uvažují zjednodušení, která nemají zásadní vliv na následné úvahy (pro daný účel). Samozřejmě existují modely silnoproudých vedení používaných v elektroenergetice a modely telekomunikačních vedení vytvořených pro rozbor přenosu dat. Níže bude proveden rozbor těchto modelů.

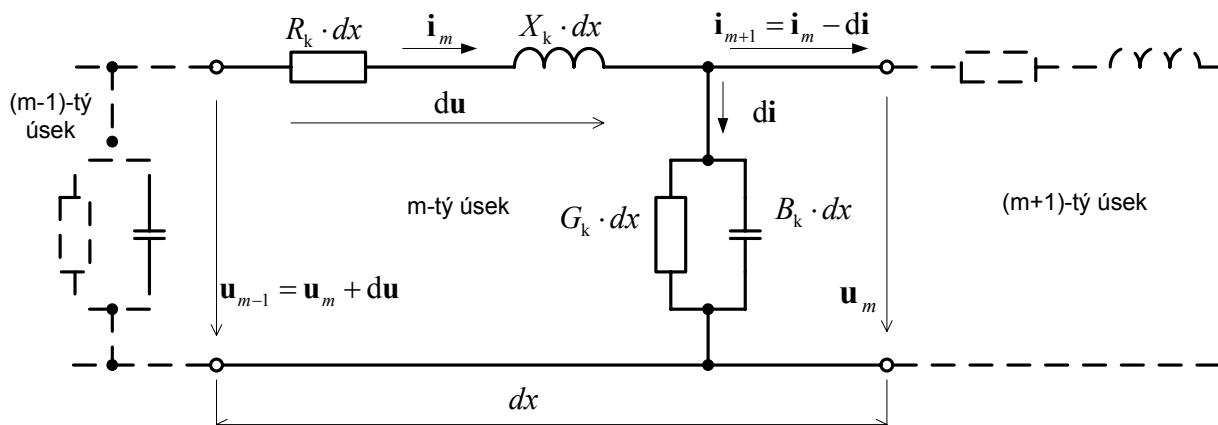
5.1 Modely silnoproudých vedení

V elektroenergetice je používáno několik modelů silnoproudých vedení. Některé jsou přesnější, jiné využívají možných zjednodušení ke snadnější práci. Všeobecně se při modelování v elektroenergetice vychází z toho, že napětí a proud mají kmitočet 50 Hz a hlavním úkolem vedení je přenést elektrickou energii s co možno nejmenšími ztrátami. Jestliže je vedení trojfázové musí být symetrické (v každé fázi stejné), napájeno symetrickým zdrojem napětí a zatíženo symetrickým odběrem, protože modely vedení jsou vždy jednofázové [1]. Předpokládá se ustálený stav, což je situace bez krátkodobých přechodných dějů (připojování a odpojování zdrojů, spotřebičů, vedení, kompenzátorů, přepínání odboček transformátorů, poruchy, zkraty, údery blesku atd.). Pro snazší modelování se uvažuje homogenní vedení.

5.1.1 Model vedení s rovnoměrně rozloženými parametry

V tomto případě je uvažováno vedení s rovnoměrně rozloženými parametry (ve skutečnosti neexistuje), které má v každém libovolně malém úseku stejné R, L, G a C . Do úvahy je brána závislost napětí a proudu jak na čase, tak i na geometrickém rozměru [1].

Tento model vedení je složen z velké řady dílčích úseků. Jeden úsek o délce dx je tvořen sério-paralelním zapojením činného odporu, vodivosti, induktoru a kapacitoru viz Obr. 5-1. Vzdálenost bodu dx od konce vedení je x .



Obr. 5-1 Elementární úsek silnoprůdného vedení

Pokud se vyjde z jednoho elementárního úseku vedení, lze pro něj dle Kirchhoffových zákonů a formálních úpravách vyjádřit vztahy

$$\frac{\partial u(t, x)}{\partial x} = R_k \cdot i(t, x) + L_k \frac{\partial i(t, x)}{\partial t} \quad [\text{V}] \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial i(t, x)}{\partial x} = G_k \cdot u(t, x) + C_k \frac{\partial u(t, x)}{\partial t}, \quad [\text{A}] \quad (5.2)$$

kde $u(t, x)$ je napětí závislé na čase a na vzdálenosti (od konce vedení) a $i(t, x)$ je proud závislý na čase a na vzdálenosti (od konce vedení).

Následnou derivací obou rovnic (5.1) a (5.2) (dle t a x) a úpravou lze odvodit tzv. telegrafní rovnice (lineární parciální homogenní diferenciální rovnice druhého řádu). Telegrafní rovnice

$$\frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} = L_k C_k \cdot \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} + (G_k L_k + R_k C_k) \frac{\partial u(t, x)}{\partial t} + R_k G_k \cdot u(t, x) \quad [\text{V}] \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial^2 i(t, x)}{\partial x^2} = L_k C_k \cdot \frac{\partial^2 i(t, x)}{\partial t^2} + (G_k L_k + R_k C_k) \frac{\partial i(t, x)}{\partial t} + R_k G_k \cdot i(t, x), \quad [\text{A}] \quad (5.4)$$

jsou využívány pro popis modelu s rovnoměrně rozloženými parametry a umožňují určit časovou závislost napětí (proudu) v každém místě vedení.

Za výše zmíněného předpokladu, že se uvažuje harmonický ustálený stav (bez přechodných dějů a napětí a proud jsou vždy harmonické) lze telegrafní rovnice zjednodušit. Využije se tzv. symbolicko-komplexního tvaru, pomocí kterého lze pro tuto situaci stanovit následující úměrnost $\frac{\partial}{\partial t} \approx j\omega$ ($\frac{\partial^2}{\partial t^2} \approx -\omega^2$). Následně se mohou předchozí vztahy (5.1), (5.2), (5.3) a (5.4) upravit na

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} = R_k \cdot \mathbf{I}(x) + j\omega L_k \cdot \mathbf{I}(x) = (R_k + j\omega L_k) \cdot \mathbf{I}(x) = \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{I}(x) \quad [\text{V}] \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{I}(x)}{\partial x} = G_k \cdot \mathbf{U}(x) + j\omega C_k \cdot \mathbf{U}(x) = (G_k + j\omega C_k) \cdot \mathbf{U}(x) = \mathbf{Y}_k \cdot \mathbf{U}(x) \quad [\text{A}] \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{U}(x)}{\partial x^2} &= -\omega^2 L_k C_k \cdot \mathbf{U}(x) + j\omega(G_k L_k + R_k C_k) \cdot \mathbf{U}(x) + R_k G_k \cdot \mathbf{U}(x) = \\ &= (R_k + j\omega L_k) \cdot (G_k + j\omega C_k) \cdot \mathbf{U}(x) = \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{Y}_k \cdot \mathbf{U}(x) \end{aligned} \quad [\text{V}] \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{I}(x)}{\partial x^2} &= -\omega^2 L_k C_k \cdot \mathbf{I}(x) + j\omega(G_k L_k + R_k C_k) \cdot \mathbf{I}(x) + R_k G_k \cdot \mathbf{I}(x) = , \\ &= (R_k + j\omega L_k) \cdot (G_k + j\omega C_k) \cdot \mathbf{I}(x) = \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{Y}_k \cdot \mathbf{I}(x) \end{aligned} \quad [\text{A}] \quad (5.8)$$

kde $\mathbf{U}(x)$ [V] a $\mathbf{I}(x)$ [A] jsou fázory napětí a proudu závislé na vzdálenosti (od konce vedení).

Obecným řešením diferenciální rovnice (5.8), je

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{A}_1 \cdot e^{\gamma x} + \mathbf{A}_2 \cdot e^{-\gamma x}, \quad [\text{A}] \quad (5.9)$$

kde $\mathbf{A}_1$ a $\mathbf{A}_2$ jsou fázory integračních konstant.

Obdobně jako v rovnici (5.9) pro $\mathbf{I}(x)$ lze určit obecné řešení pro $\mathbf{U}(x)$. Ovšem z rovnice (5.6) (i z rovnice (5.5)) je zřejmá závislost mezi $\mathbf{U}(x)$ a $\mathbf{I}(x)$. Následně je možné pro obecné řešení $\mathbf{U}(x)$ využít stejných integračních konstant

$$\mathbf{U}(x) = \mathbf{Z}_0 \mathbf{A}_1 \cdot e^{\gamma x} - \mathbf{Z}_0 \mathbf{A}_2 \cdot e^{-\gamma x}. \quad [\text{V}] \quad (5.10)$$

Pro určení integračních konstant $\mathbf{A}_1$ a $\mathbf{A}_2$ se předpokládá, že je známo napětí a proud na konci vedení (tzv. okrajové podmínky) a tím pádem $x = 0$. Pro jejich vyjádření se využijí rovnice (5.9) a (5.10) a po úpravě je

$$\mathbf{A}_1 = \frac{\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2}{2 \cdot \mathbf{Z}_0} \quad [\text{A}] \quad (5.11)$$

$$\mathbf{A}_2 = \frac{\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_2 - \mathbf{U}_2}{2 \cdot \mathbf{Z}_0}, \quad [\text{A}] \quad (5.12)$$

kde $\mathbf{U}_2$ [V] je fázor napětí na konci vedení a $\mathbf{I}_2$ [A] je fázor proudu na konci vedení.

Následně lze dosazením integračních konstant do obecného řešení $\mathbf{U}(x)$ a $\mathbf{I}(x)$ v rovnicích (5.9) a (5.10) zjistit průběh napětí a proudu v každém místě vedení

$$\mathbf{U}(x) = \frac{\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2}{2} \cdot e^{\gamma x} + \frac{\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_2 - \mathbf{U}_2}{2} \cdot e^{-\gamma x} = \mathbf{U}_2 \cosh \gamma x + \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_0 \sinh \gamma x \quad [\text{V}] \quad (5.13)$$

$$\mathbf{I}(x) = \frac{\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2}{2 \cdot \mathbf{Z}_0} \cdot e^{\gamma x} + \frac{\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_2 - \mathbf{U}_2}{2 \cdot \mathbf{Z}_0} \cdot e^{-\gamma x} = \frac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{Z}_0} \sinh \gamma x + \mathbf{I}_2 \cosh \gamma x. \quad [\text{A}] \quad (5.14)$$

5.1.2 Modely vedení používané pro soustavy vvn a zvn

Model vedení s rovnoměrně rozloženými parametry je „relativně“ složitý. Proto se v elektroenergetice často pro zjednodušení používá náhrada silnoprůdného vedení pomocí dvojbranů. Tato náhrada je dostatečně přesná pro homogenní vedení v ustáleném stavu. Takovéto dvojbrany se používají tři a to tzv. π článek, Γ článek a T článek. Každý model se skládá z podélné impedance $\mathbf{Z}$ a příčné admitance $\mathbf{Y}$. Pomocí dvojbranu lze nahradit jak celé vedení, tak i jenom určitý úsek vedení. Pro větší přesnost lze jedno vedení nahradit více články za sebou.

U modelu vedení s rovnoměrně rozloženými parametry je snaha respektovat skutečné rozložení parametrů na vedení a závislost napětí (proudu) na geometrickém rozměru. Bylo však zjištěno, že pro účely přenosu elektrické energie je náhrada vedení dvojbranou dostačující (parametry vedení jsou soustředěny pouze do jednoho bodu a napětí a proud jsou v jednom čase stejné ve všech místech vedení). Lze tak stanovit na základě porovnání délky vlny napětí (proudu)

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad [\text{m}] \quad (5.15)$$

kde c [m/s] je rychlost šíření elektromagnetického pole, a délky vedení (l). Pokud bude splněna podmínka $l \ll \lambda$, lze použít náhradu vedení pomocí dvojbranů.

Rychlost šíření elektromagnetického pole ve vakuu je přibližně $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a pro naše účely lze říci, že rychlost šíření ve vodiči je v podstatě stejná. V elektroenergetice je síťový kmitočet 50 Hz. Za předchozích předpokladů je délka vlny přibližně 6000 km.

Pro popis dvojbranů z hlediska přenosu elektrické energie se nejčastěji využívá tzv. kaskádní tvar rovnic

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_2 + \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}_2 \quad [\text{V}] \quad (5.16)$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_2 + \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_2, \quad [\text{A}] \quad (5.17)$$

kde $\mathbf{A}$ [–], $\mathbf{B}$ [Ω], $\mathbf{C}$ [S], $\mathbf{D}$ [–] jsou tzv. Blondelovy konstanty, $\mathbf{U}_1$ [V] je fázor napětí na začátku vedení a $\mathbf{I}_1$ [A] je fázor proudu na začátku vedení.

Předchozí vztahy (5.16) a (5.17) slouží pro určení napětí a proudu na začátku vedení, když jsou známé poměry na konci vedení. Pokud je situace opačná využije

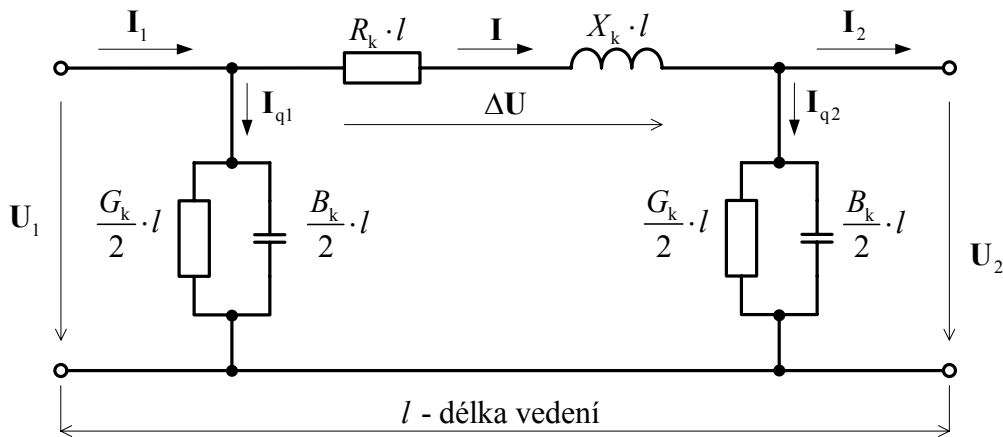
$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_1 - \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}_1 \quad [\text{V}] \quad (5.18)$$

$$\mathbf{I}_2 = -\mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_1 + \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_1. \quad [\text{A}] \quad (5.19)$$

Tyto rovnice ((5.16), (5.17), (5.18) a (5.19)) jsou platné pro všechny tři články. Rozdílné jsou jen velikosti Blondelových konstant u každého dvojbranu. Tyto konstanty se určují pomocí Kirchhoffových zákonů a ze specifického zapojení prvků v každém článku.

5.1.2.1 π článek

Tento dvojbran je nejpoužívanějším modelem elektrického vedení. Je složen z jedné podélné impedance a dvou příčných admitancí. Obvykle jsou obě admitance stejně velké ($\frac{1}{2} Y$). Schématické zapojení π článku je znázorněno na Obr. 5-2. Dvojbran této struktury je možné použít pro vedení o délce až 400 km [1].



Obr. 5-2 Model vedení vvn a zvn - π článek

Dle Kirchhoffových zákonů lze pro napětí a proud na začátku vedení (π článku) psát

$$U_1 = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot U_2 + Z \cdot I_2 \quad [V] \quad (5.20)$$

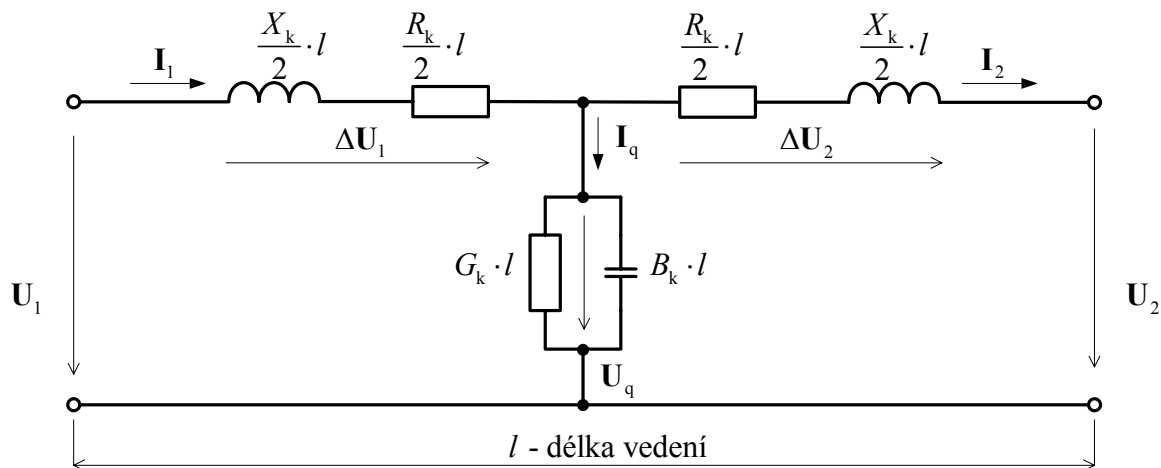
$$I_1 = \left(Y + \frac{Z \cdot Y^2}{4}\right) \cdot U_2 + \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot I_2 \quad [A] \quad (5.21)$$

Porovnáním rovnic (5.16) a (5.17) s (5.20) a (5.21) lze stanovit Blondelovy konstanty pro π článek

$$\begin{aligned} A &= 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} = 1 + \frac{Z_k \cdot Y_k \cdot l^2}{2} & [-] \\ B &= Z = Z_k \cdot l & [\Omega] \\ C &= Y + \frac{Z \cdot Y^2}{4} = Y_k \cdot l + \frac{Z_k \cdot Y_k^2 \cdot l^3}{4} & [S] \\ D &= A. & [-] \end{aligned} \quad (5.22)$$

5.1.2.2 T článek

T článkem lze nahradit relativně krátká elektrická vedení a je méně používán než π článek. Model se skládá ze dvou podélných impedancí ($\frac{1}{2}Z$) a jedné příčné admitance viz Obr. 5-3.



Obr. 5-3 Model vedení vvn a zvn - T článek

Pomocí Kirchhoffových zákonů pro napětí a proud na začátku vedení platí vztahy

$$U_1 = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot U_2 + \left(Z + \frac{Z^2 \cdot Y}{4}\right) \cdot I_2 \quad [\text{V}] \quad (5.23)$$

$$I_1 = Y \cdot U_2 + \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot I_2 \quad [\text{A}] \quad (5.24)$$

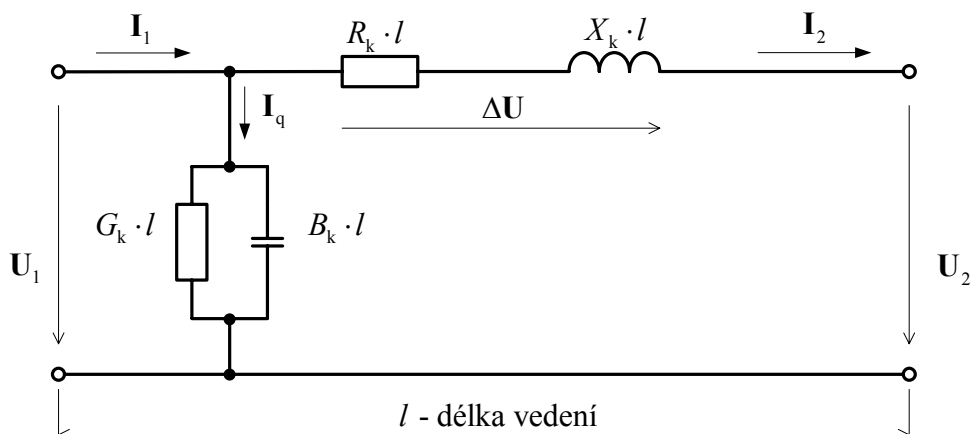
Srovnáním vztahů (5.16) a (5.17) s (5.23) a (5.24) se zjistí Blondelovy konstanty pro T článek

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} = 1 + \frac{Z_k \cdot Y_k \cdot l^2}{2} & [-] \\ \mathbf{B} &= Z + \frac{Z^2 \cdot Y}{4} = Z_k + \frac{Z_k^2 \cdot Y_k}{4} & [\Omega] \\ \mathbf{C} &= Y = Y_k \cdot l & [\text{S}] \\ \mathbf{D} &= \mathbf{A} & [-] \end{aligned} \quad (5.25)$$

T článek a π článek jsou tzv. symetrické dvojbrany. Na základě rovnic (5.22) a (5.25) lze říci, že pro symetrické dvojbrany platí $\mathbf{A} = \mathbf{D}$.

5.1.2.3 Γ článek

Γ článek se skládá z jedné podélné impedance a jedné příčné admitance. Zapojení tohoto dvojbranu je na následujícím obrázku Obr. 5-4.

Obr. 5-4 Model vedení vvn a zvn - Γ článek

Opět jako u předchozího dvojbranu se dle Kirchhoffových zákonů zjistí napětí a proud na začátku vedení

$$U_1 = U_2 + Z \cdot I_2 \quad [V] \quad (5.26)$$

$$I_1 = Y \cdot U_2 + (1 + Z \cdot Y) \cdot I_2. \quad [A] \quad (5.27)$$

Následně porovnáním vztahů (5.16) a (5.17) s (5.26) a (5.27) je možno určit Blondelovy konstanty pro Γ článek

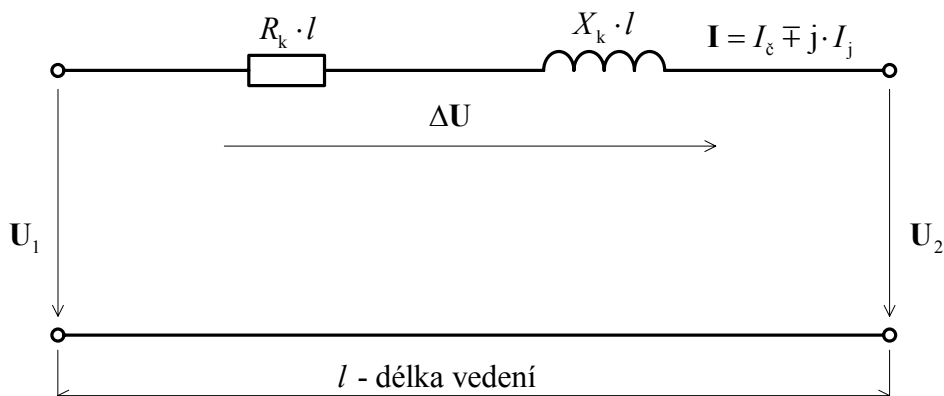
$$\begin{aligned} A &= 1 & [-] \\ B &= Z = Z_k \cdot l & [\Omega] \\ C &= Y = Y_k \cdot l & [S] \\ D &= 1 + Z \cdot Y = 1 + Z_k \cdot Y_k \cdot l^2. & [-] \end{aligned} \quad (5.28)$$

5.1.3 Model vedení používaný pro soustavy nn a vn

Pro řešení vedení nízkého a vysokého napětí se v elektroenergetice většinou využívá model zobrazený na Obr. 5-5. Jak je vidět, model se skládá pouze z podélné impedance. Důvodem jsou zanedbatelné proudy tekoucí příčnou admitancí (nemají významný vliv na ztráty výkonu) a relativně krátké vedení. Tento model vedení lze popsat pomocí Kirchhoffových zákonů. Je zřejmé, že proud na začátku vedení bude stejný jako na konci ($I_1 = I_2 = I$). Pro napětí na začátku vedení lze psát

$$U_1 = U_2 + \Delta U = U_2 + Z \cdot I = U_2 + Z_k \cdot l \cdot I, \quad [V] \quad (5.29)$$

kde ΔU [V] je úbytek napětí způsobený podélnou impedancí



Obr. 5-5 Model vedení nn a vn

5.2 Modely datových vedení

Pro popis datových vedení, je používán výhradně model homogenního vedení [2]. Jedná se v podstatě o model s rovnoměrně rozloženými parametry (popsaný v kapitole 5.1.1) používaný pro silnoproudá vedení. Zásadním rozdílem mezi silnoproudým a telekomunikačním vedením je způsob zakončení vedení. V elektroenergetice je vedení zakončeno tzv. odběrem a většinou se často mění. Pro účely přenosu elektrické energie se nejedná o problém, protože se především sleduje úbytek napětí a ztráty na vedení. Oproti tomu jsou telekomunikační vedení navrhována na základě známých poměrů na jeho konci a ve valné většině případů se zatížení nemění. Způsob zakončení vedení ovlivňuje tzv. vstupní impedanci vedení

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{\mathbf{U}_1}{\mathbf{I}_1} = \frac{\mathbf{U}_2 \cdot \cosh \gamma l + \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l}{\frac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{Z}_0} \sinh \gamma l + \mathbf{I}_2 \cdot \cosh \gamma l}, \quad [\Omega] \quad (5.30)$$

kde $\mathbf{Z}_1$ [Ω] je vstupní impedance vedení.

Pro lepší názornost závislosti vstupní impedance na způsobu zakončení (výstupní impedance vedení) se předchozí vztah upraví na

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{\mathbf{Z}_2 \cdot \cosh \gamma l + \mathbf{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l}{\frac{\mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_0} \sinh \gamma l + \cosh \gamma l} = \mathbf{Z}_0 \frac{\mathbf{Z}_2 \cdot \cosh \gamma l + \mathbf{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l}{\mathbf{Z}_2 \cdot \sinh \gamma l + \mathbf{Z}_0 \cdot \cosh \gamma l}, \quad [\Omega] \quad (5.31)$$

kde $\mathbf{Z}_2$ [Ω] je výstupní impedance vedení

Pro účely datového přenosu, se řeší celá řada možných stavů a zakončení vedení. Pro účel této práce budou uvedeny jen některé z nich.

5.2.1 Vedení zakončené charakteristickou impedancí

Pro každé vedení, lze určit tzv. charakteristickou impedanci. Pokud je vedení zakončeno právě charakterickou impedancí ($Z_2 = Z_0$), tak dosazením do vztahu (5.31) se zjistí, že

$$Z_1 = Z_0 \frac{Z_0 \cdot \cosh \gamma l + Z_0 \cdot \sinh \gamma l}{Z_0 \cdot \sinh \gamma l + Z_0 \cdot \cosh \gamma l} = Z_0. \quad [\Omega] \quad (5.32)$$

Takto zakončená vedení se v telekomunikacích využívají často. Na jeho konci nevznikají odrazy (tzv. korektní zakončení) [2]. Na základě známé výstupní impedance se vedení navrhne tak, aby byla splněna podmínka $Z_2 = Z_0$. Protože nedochází k odrazům na konci vedení, lze pro napětí a proud psát

$$U(y) = U_1 \cdot e^{-\gamma y} \quad [V] \quad (5.33)$$

$$I(y) = I_1 \cdot e^{-\gamma y}, \quad [A] \quad (5.34)$$

kde $U(y)$ [V] je napětí na vedení závislé na vzdálenosti od začátku vedení, $I(y)$ [A] je proud tekoucí vedením závislý na vzdálenosti od začátku vedení.

5.2.2 Vedení zakončené obecnou impedancí

Jedná se o vedení zakončené v podstatě jakoukoli impedancí (ne však charakteristickou impedancí). Taková situace nastává u elektroenergetických vedení. Rovnici (5.31) upravíme tak, že ji podělíme výrazem $Z_0 \cdot \cosh \gamma l$. Poměr $p = \frac{Z_2}{Z_0} = |p| \cdot e^{j\varphi_p}$ je možné položit hyperbolické tangentě komplexní veličiny ψ , tedy $p = \tanh \psi$ [2]. Následně je možné pro vstupní impedanci vedení psát

$$Z_1 = Z_0 \cdot \tanh(\gamma l + \psi). \quad [\Omega] \quad (5.35)$$

V tomto druhu vedení vznikají na jeho konci odražené vlny, které působí nepříznivě na přenos dat (rozvlňují frekvenční charakteristiku vstupní impedance).

5.2.3 Vedení prakticky nekonečně dlouhé

Je vedení na kterém nevznikají odražené vlny. Dle literatury [2] u tzv. nekonečně dlouhého vedení, není důležité jak je zakončeno, protože se vstupní impedance vždy rovná charakteristické impedanci (i ve stavu nakrátko a naprázdno). Vedení prakticky nekonečně dlouhé má takový měrný útlum, že se chová jako vedení nekonečně dlouhé. Je tedy zřejmé, že musí být splněna podmínka

$$Z_1 = Z_{lk} = Z_{lp} = Z_0, \quad [\Omega] \quad (5.36)$$

kde Z_{1k} [Ω] je vstupní impedance vedení nakrátko a Z_{1p} [Ω] je vstupní impedance vedení naprázdno.

Pro vedení nakrátko platí $Z_2 = 0 \Rightarrow U_2 = 0$, následně lze pro vstupní impedanci psát vztah

$$Z_{1k} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{I_2 \cdot Z_0 \cdot \sinh \gamma l}{I_2 \cdot \cosh \gamma l} = Z_0 \cdot \tanh \gamma l. \quad [\Omega] \quad (5.37)$$

Pro vedení naprázdno platí $Z_2 = \infty \Rightarrow I_2 = 0$ a pro vstupní impedanci tohoto vedení platí

$$Z_{1p} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2 \cdot \cosh \gamma l}{\frac{U_2}{Z_0} \sinh \gamma l} = Z_0 \cdot \coth \gamma l \quad [\Omega], \quad (5.38)$$

Nyní je možno dosazením (5.37) a (5.38) do (5.36) a úpravou upřesnit podmínku pro prakticky nekonečně dlouhé vedení

$$\tanh \gamma l = \coth \gamma l = 1. \quad [-] \quad (5.39)$$

Literatura [2] uvádí, že je možno pro hodnotu útlumu vedení $\alpha \cdot l \geq 3$ uvažovat vedení za prakticky nekonečně dlouhé.

6 PROBLEMATIKA DATOVÝCH PŘENOSŮ PO SILNOPROUDÉM VEDENÍ

Problematikou datových přenosů po silnoprůdém vedení se zabývá technologie PLC (Power Line Communication) [7]. Někdy se objevuje i zkratka BPL (Broadband over Power Line), která se používá pro širokopásmovou komunikaci. Hlavním důvodem pro využití silnoprůdého vedení k přenosu dat je, že elektrická síť je velmi rozvinutá. Proto lze říci, že téměř každý objekt již má možnost vytvoření PLC komunikace a nemusí instalovat datové kabely. Hlavní nevýhodou technologie PLC je, že k přenosu dat se využívá silnoprůdé vedení, které není na toto přednostně určeno. Silnoprůdé vedení má pro datový přenos velký útlum. Rušení signálu mohou způsobovat zařízení zapojené do sítě. Zatížení silnoprůdého vedení je proměnné v čase, a tak v okamžiku připojení a odpojení zařízení dochází k přechodovým jevům. Tyto jevy mají za následek vysokofrekvenční oscilace. Problémem je také impedanční nepřizpůsobenost vedení.

Širokopásmová technologie PLC je vhodná pro odběratele elektrické energie. Využívá kmitočtové pásmo $1 \div 30$ MHz. Jeho prostřednictvím je možno vytvořit připojení k službám jako internet, telefonie, video přenos, atd. Ovšem v dnešní době tato technologie má problém s nízkou přenosovou rychlostí a krátkým dosahem. Dále se práce bude zabývat jen o úzkopásmové systémy.

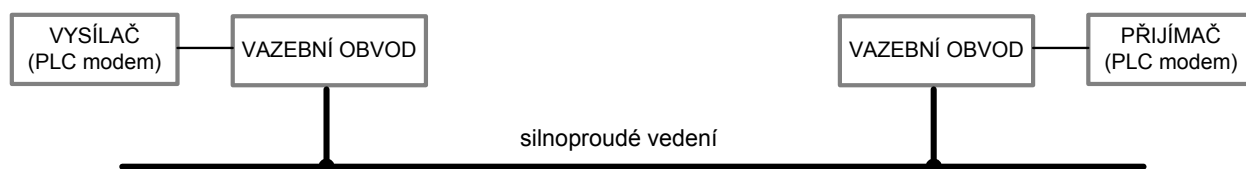
Úzkopásmové PLC lze využít pro automatizační systémy (např. klimatizace, osvětlení, topení, požární hlásiče) a pro dálkový sběr dat z elektroměrů. Využívají šířku pásma $3 \div 148,5$ kHz a dosahují přenosové rychlosti v řádech stovek kbit/s. Tato frekvenční oblast je dále rozdělena na 4 pásma:

- pásmo A – v rozsahu $9 \div 95$ kHz slouží pro účely dodavatele elektrické energie,
- pásmo B – v rozsahu $95 \div 125$ kHz slouží pro privátní účely odběratelů,
- pásmo C – v rozsahu $125 \div 140$ kHz slouží pro privátní účely odběratelů a je požadován protokol o přistoupení k dohodě,
- pásmo D – v rozsahu $140 \div 148,5$ kHz slouží pro privátní účely odběratelů.

Pro úzkopásmové technologie PLC byl vytvořen soubor evropských norem CENELEC EN 50065 [4].

V dnešní době je vývoj úzkopásmových systémů zaměřen především na sítě nn. Topologie sítě může hrát určitou roli pro spolehlivost datového přenosu, protože při odpojení úseku vedení (např. kvůli poruše) není PLC komunikace možná. Jestliže je místo odběru napájeno z více stran a z více zdrojů, tak při odpojení určitého úseku vedení může být komunikace stále uskutečněna.

Princip datového přenosu je na obrázku Obr. 6-1. Na nosný signál o určitém kmitočtu (z oblasti šířky pásma) se pomocí modemu namodulují data. Modem se připojí přes vazební obvod do sítě. Nejčastěji se používá kapacitní vazba (existuje i induktivní a přímá vazba). Pro galvanické oddělení slaboprůdých zařízení lze použít oddělovací transformátor.



Obr. 6-1 Princip datového přenosu po silnoprůdém vedení

7 VYTVOŘENÍ MODELU SILNOPROUDÉHO VEDENÍ PRO SIMULACI DATOVÝCH PŘENOSŮ

Z kapitoly 5 vyplývá, že pro vysoké kmitočty je třeba vedení nahradit modelem s rovnoměrně rozloženými parametry. Dále je vhodné (pro přenos dat), aby vedení bylo zakončeno charakteristickou impedancí. Samozřejmě silnoprůdové vedení je zakončeno obecnou impedancí, která se v čase mění. Je tedy třeba určit, jakých hodnot nabývá charakteristická impedance silnoprůdových vedení a jakou impedancí bývají zakončena. Veškeré simulace budou provedeny v počítačovém programu Micro-Cap 9 [3]. Protože vývoj úzkopásmových PLC technologií se zatím směřuje na sítě nn, bude se dále práce zabývat především o komunikaci v sítích nn.

7.1 Navrhování vedení

Silnoprůdové vedení je konstruováno pro přenos elektrické energie s co nejmenšími ztrátami, ale s určitou mírou hospodárnosti. To znamená, že je třeba nalézt správný poměr mezi malými ztrátami a náklady na stavbu vedení. Tuto záležitost řeší investor vedení a to většinou návrhem vedení dle dovolených ztrát činného výkonu vedení. Podmínka, která je stanovena zákonem pro vedení nn a vn musí být dodržena u každého vedení a to dovolená odchylka od jmenovitého napětí na konci vedení. Proto bude proveden návrh vedení dle dovoleného úbytku napětí.

7.1.1 Navrhování vedení dle dovoleného úbytku napětí

Jedná se o návrh vedení z podmínky maximálního poklesu napětí na konci vedení [1]. Všeobecně je úbytek napětí na vedení způsoben činným odporem a induktivní reaktancí. U vedení nn a vn se provádí návrh vedení dle jednofázového modelu viz Obr. 5-5. Pro úbytek napětí platí

$$\Delta U_f = U_1 - U_2 = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} = (R \cdot I_{2\check{c}} \pm X \cdot I_{2j}) + j(X \cdot I_{2\check{c}} \mp R \cdot I_{2j}), \quad [\text{V}] \quad (7.1)$$

kde ΔU_f [V] je fázor fázového úbytku napětí na vedení.

Pro snazší řešení se neuvažuje jalová část úbytku napětí, protože je zanedbatelná vůči reálné části. Lze tedy říci, že činná část úbytku napětí je téměř stejná jako absolutní hodnota úbytku napětí

$$\Delta U_f \cong \text{Re}\{\Delta U_f\} = R \cdot I_{2\check{c}} \pm X \cdot I_{2j} = \rho \frac{l}{s_n} I_{2\check{c}} \pm X \cdot I_{2j}. \quad [\text{V}] \quad (7.2)$$

Úbytek napětí je tedy závislý na proudu (je známý daným odběrem) a na podélné impedanci. Odpor vedení je závislý na délce, materiálu a průřezu vodiče dle vztahu (4.5). Neznámý je zde průřez vodiče. Induktivní reaktance je závislá na poměru rozpětí vedení a průřezu vodiče.

Nejčastěji se induktivní reaktance předem odhadne. Potom lze ze vztahu (7.2) určit vhodný průřez vedení

$$s \cong \frac{\rho \cdot I_{2\check{x}} \cdot l}{\Delta U_f - X_k \cdot I_{2j} \cdot l} \quad [\text{mm}^2] \quad (7.3)$$

Z vypočítaného průřezu vedení se z normalizované řady průřezů určí nejbližší vyšší jmenovitý průřez.

Následně se pro navržené vedení určí konstrukční uspořádání vodičů a provede se kontrola induktivní reaktance, jestliže se liší od odhadnuté, provede se dle této hodnoty nový výpočet průřezu.

7.1.2 Dílčí vedení používaná v ČR

U vedení je dovolená odchylka napětí pro sítě nn a vn $\pm 10\%$. Pro venkovní vedení v ČR se induktivní reaktance odhaduje přibližně $0,3 \Omega/\text{km}$ pro sítě nn a pro sítě vn přibližně $0,35 \Omega/\text{km}$. U kabelových vedení se induktivní reaktance odhaduje na $0,09 \Omega/\text{km}$ (pro nn) a $0,12 \Omega/\text{km}$ (pro vn) [1]. Dále se dle norem má účinník odběru pohybovat mezi hodnotami $1 \div 0,95$ (Většinou je účinník jiný u velkých odběratelů, kteří musí provádět kompenzace). Velmi často se účinník kompenzuje na hodnotu $0,98$. Pro venkovní vedení se ve valné většině případů používají lana typu AlFe6. Vedení nízkého napětí se používá pro rozvod elektrické energie na velmi krátké vzdálenosti, ve valné většině na stovky metrů a pro výkony do 1 MW . Vedení vysokého napětí se nazývá též distribuční a slouží pro místní rozvod elektrické energie a to většinou na vzdálenosti menší než 30 km a pro výkony nepřesahující 10 MW .

Dle předchozích informací budou navržena určitým způsobem dílčí vedení pro technologii PLC používaná v ČR (Tab. 7-1 a Tab. 7-2). Navržení vedení bude dle dovoleného úbytku napětí. Budou zvoleny dvě napěťové hladiny ($0,4 \text{ kV}$ a 22 kV). Pro porovnání budou zvoleny dva druhy zatížení a to čistě činná zátěž (v praxi se v podstatě nevyskytuje) a kombinace zátěže činné a jalové. Pro názornost budou vypočítány primární parametry vedení R_k, L_k, C_k pro kmitočet 50 Hz . Pro venkovní vedení jsou vypočteny dle postupu uvedeném v kapitole 4.1 a pro kabelová vedení jsou určeny z katalogu výrobce kabelů [10].

Tab. 7-1 Příklad venkovních vedení

	U_n	P_2	$\cos \varphi_2$	lano	s_n	d	h	l	R_k	L_k	C_k
	[kV]	[kW]	[-]		$[\text{mm}^2]$	[m]	[m]	[km]	$[\Omega/\text{km}]$	$[\text{mH}/\text{km}]$	$[\text{nF}/\text{km}]$
1.	0,4	50	1	AlFe6	95	0,6	6	1	0,313	0,9465	12,382
2.	0,4	50	0,98	AlFe6	120	0,6	6	1	0,253	0,9125	12,869
3.	22	5000	1	AlFe6	95	1	12	30	0,313	1,0485	11,116
4.	22	5000	0,98	AlFe6	120	1	12	30	0,253	1,0146	11,507

Tab. 7-2 Příklad kabelových vedení

	U_n	P_2	$\cos \varphi_2$	jádro	s_n	l	R_k	L_k	C_k
	[kV]	[kW]	[-]		[mm ²]	[km]	[Ω/km]	[mH/km]	[nF/km]
5.	0,4	50	1	Al	95	1	0,313	0,34	370
6.	0,4	50	0,98	Al	120	1	0,253	0,32	390
7.	22	5000	1	Al	95	30	0,313	0,42	220
8.	22	5000	0,98	Al	120	30	0,253	0,40	240

Samozřejmě existuje mnohem více druhů vedení používaných v Česku, ale pro účely práce není potřebné je zde všechny vypisovat. Pro datový přenos je důležitým faktorem především charakteristická impedance vedení a zátěž.

7.2 Silnoprůdové vedení zakončená charakteristickou impedancí

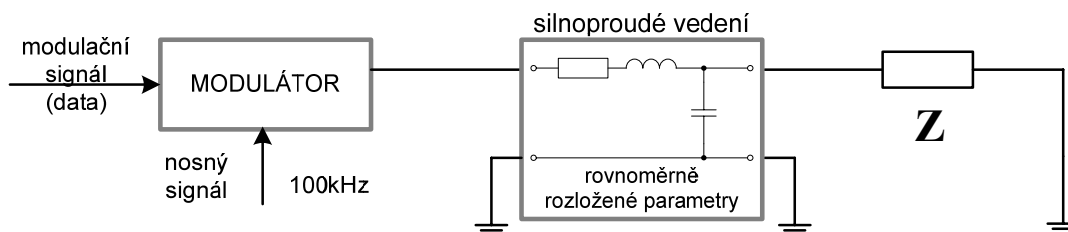
Jak se liší charakteristická impedance vedení od impedance zátěže, bude pro názornost provedeno vyčíslení těchto hodnot pro výše navržená vedení. Pro následné simulace datového přenosu bude předpokládán nosný signál o kmitočtu 100 kHz. Je tedy třeba pro výpočet charakteristické impedance přepočítat hodnoty činného odporu a indukčnosti (dle vztahů (4.46), (4.34), (4.33)), protože se zde projevuje vliv skin efektu. Kapacita vedení se s frekvencí v podstatě nemění a bude vypočítána dle stejného postupu jako pro kmitočet 50 Hz. Pro kmitočet 100 kHz se budou podmínky $\omega C \gg G$ a $\omega L \gg R$ považovat za splněné, proto lze konduktanci a rezistanci vedení pro výpočet charakteristické impedance zanedbat. V tabulce Tab. 7-3 jsou vypočteny hodnoty charakteristické impedance a parametrů silnoprůdových vedení při použití signálu o kmitočtu 100 kHz.

Tab. 7-3 Charakteristická impedance navrhnutých vedení pro kmitočet 100 kHz

Venkovní vedení					Kabelová vedení				
	R_k	L_k	C_k	Z_0		R_k	L_k	C_k	Z_0
	[Ω/km]	[mH/km]	[nF/km]	[Ω]		[Ω/km]	[mH/km]	[nF/km]	[Ω]
1.	99,27	1,8950	12,382	391,2	5.	99,27	0,3651	370	31,4
2.	90,32	1,8270	12,869	376,8	6.	90,32	0,3393	390	29,5
3.	99,27	2,0993	11,116	434,6	7.	99,27	0,6395	220	53,9
4.	90,32	2,0313	11,507	420,1	8.	90,32	0,5875	240	49,5

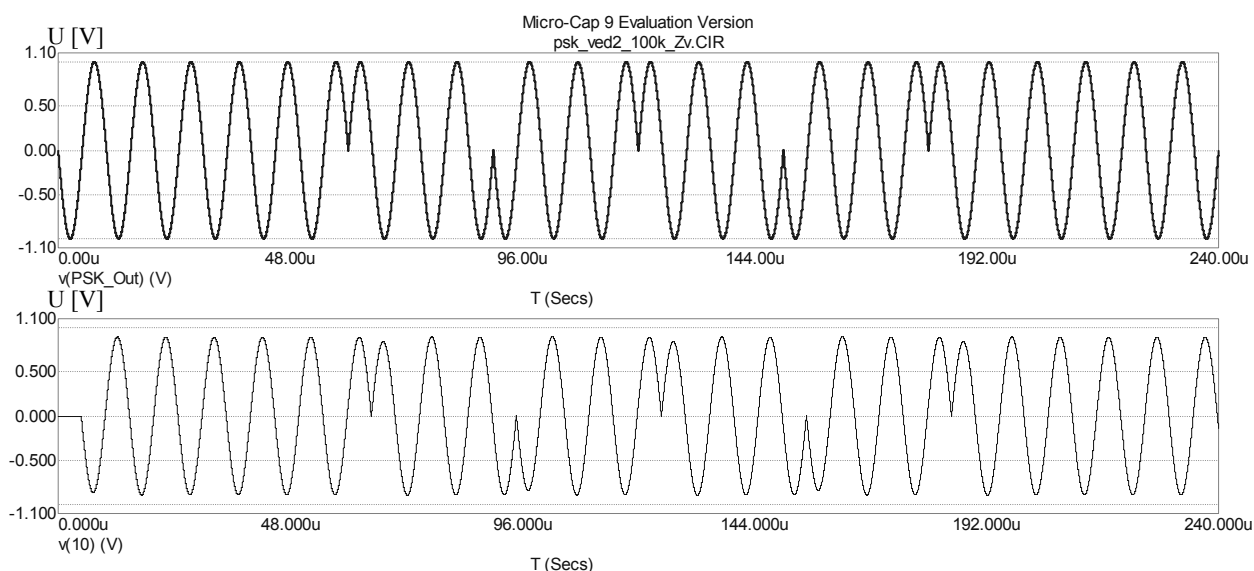
Pro ověření, zda při výpočtu charakteristické impedance lze konduktanci a rezistanci vedení zanedbat, bude provedena simulace přenosu vysokofrekvenčního signálu skrze silnoprůdové vedení zakončené vypočtenou charakteristickou impedancí. Následné simulace budou provedeny pro navržená vedení 2 a 6, to znamená vedení kabelové a venkovní pro síť nn. Na začátek modelu s rovnoměrně rozloženými parametry bude připojen zdroj modulovaného signálu a konec vedení bude zakončen výše vypočítanou charakteristickou impedancí. Schéma zapojení je

uvedeno na následujícím obrázku Obr. 7-1. Toto schéma zapojení je v podstatě shodné s obecným modelem používaným pro datová vedení.



Obr. 7-1 Model pro simulaci přenosu dat obecně zakončeného vedení

Pro následné simulace byl vytvořen zkušební modulační signál (data), který zapsán v binárním kódu je 00101011. Na nosný signál (sinusového průběhu) o kmitočtu 100 kHz a amplitudě 1 V byly pomocí BPSK namodulovány data a výsledkem je modulovaný signál viz Obr. 7-2 (horní křivka).



Obr. 7-2 průběh výstupního signálu na vedení zakončeném charakteristickou impedancí

Výsledkem simulace je průběh napětí na konci vedení (spodní křivka na Obr. 7-2). Porovnáním obou průběhů je vidět, že amplituda napětí na konci vedení je menší, což je způsobeno vlivem útlumu vedení. Dále je zřejmé zpoždění signálu zapříčiněné posuvem fáze. Jedná se o předpokládané rozdíly a proto lze konstatovat, že signál na konci vedení je v podstatě stejný jako signál modulační. Tím pádem se jedná o „korektně“ zakončené vedení. Z těchto poznatků je možno potvrdit, že zanedbání konduktance a rezistance při výpočtu charakteristické impedance (pro kmitočet 100 kHz) nemá zásadní vliv na přenos dat. Pro kontrolu byla provedena simulace na vedení zakončeném „přesnější“ charakteristickou impedancí (bez zanedbání R a G při výpočtu). Průběh na konci vedení nebyl znatelně odlišný, proto zde není třeba tento průběh uvádět. Simulace byla provedena na navrhnutém vedení 2. Průběh napětí na konci kabelového vedení je obdobný. Amplituda výstupního signálu je menší vlivem většího útlumu. Ten je závislý především na poměru $\sqrt{C/L}$ a u kabelových vedení je větší než u venkovních vedení. Posuv signálu je také větší než u venkovního vedení, protože měrný posuv je závislý na $\sqrt{C \cdot L}$ a ten je větší u kabelového vedení.

Z výsledků simulace lze tvrdit, že silnoprůdové vedení zakončené charakteristickou impedancí se chová jako „korektně“ zakončené datové vedení a pro výpočet charakteristické impedance lze zanedbat R a G .

7.3 Reálně zakončená silnoprůdová vedení

Pro přenos dat je vhodné, aby vedení bylo stále zakončeno charakteristickou impedancí. Ve skutečnosti tomu tak není a zakončení vedení se v průběhu času různě mění (od plně zatíženého vedení po téměř nezatížené vedení, pokud se neuvažují zvláštní stavy jako chod naprázdno a nakrátko). Je tedy třeba provést vyčíslení impedance zátěží, které se mohou na konci vedení vyskytnout. Následně je možno porovnat impedance zátěží s charakteristickou impedancí a provést simulaci přenosu dat na reálně zakončeném silnoprůdovém vedení.

Nejčastěji je odběr elektrické energie popisován činným výkonem a účínkem na konci vedení (uvažuje se třífázové vedení). Pro simulaci je třeba, aby všechny odběry byly reprezentovány impedancí. Výpočet impedance zátěže může probíhat následovně:

z obecně známého vztahu pro výpočet třífázového výkonu

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad [\text{W}] \quad (7.4)$$

lze odvodit vztah

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_2} \angle \arccos \varphi_2 \quad [\text{A}] \quad (7.5)$$

pro výpočet proudu na konci vedení. Velikost úhlu φ je známá a jeho orientace se určí dle charakteru zátěže. Ve skutečnosti bývá účinník induktivního charakteru (napětí „předbíhá“ proud). Následně je možno vypočítat impedanci zátěže

$$Z_z = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_2}, \quad [\Omega] \quad (7.6)$$

kterou je zakončena každá fáze vedení.

Protože se zátěž vedení v čase mění, budou pro další simulace zvoleny 3 různé druhy zatížení vedení (pro následnou lepší identifikaci se jednotlivé impedance zátěže očíslovají):

1. $P_2 = 50 \text{ kW}$, $\cos \varphi_2 = 0,98$ (na toto zatížení bylo vedení navrženo) -
 $Z_{z1} = (3,073 + j0,624) \Omega$, $L_{z1} = 1,986 \text{ mH}$,
2. $P_2 = 25 \text{ kW}$, $\cos \varphi_2 = 0,95$ - $Z_{z2} = (5,751 + j1,892) \Omega$, $L_{z2} = 6,016 \text{ mH}$,
3. $P_2 = 20 \text{ kW}$, $\cos \varphi_2 = 0,75$ - $Z_{z3} = (4,482 + j3,953) \Omega$, $L_{z3} = 12,583 \text{ mH}$.

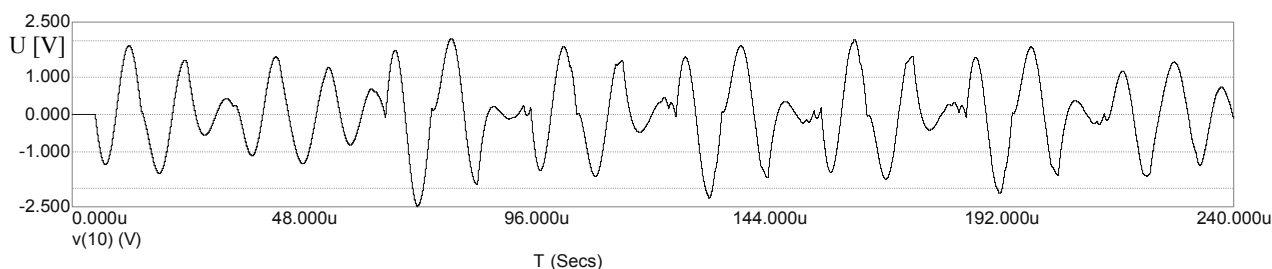
Zvolené zátěže jsou vybrány tak, aby bylo možno jednoznačně ověřit přenos dat po silnoproudém vedení. Kromě různých činných výkonů jsou zde i různé účinníky (i takové, které by se neměly vyskytnout).

Porovnáním charakteristické impedance s impedancemi zvolených zátěží je zřejmé, že se značně liší. Pro názornost lze obdobným způsobem zjistit, jak velká elektrická energie je odebírána při zakončení vedení charakteristickou impedancí. V tomto případě se pro výpočet třífázového výkonu použije vzorec

$$P_2 = \frac{U_n^2}{Z_2}, \quad [\Omega] \quad (7.7)$$

protože se jedná o čistě činnou zátěž. Pro venkovní vedení 2 je $P_2 = 424,63 \text{ W}$ a pro kabelové 6 je $P_2 = 5,424 \text{ kW}$. V obou případech se jedná o mnohem nižší zátěž, než na kterou byla vedení navrhuta. Tato situace může nastat, ale nelze na tom stavět možnost přenosu dat. V takovém případě by nebyl možný současný přenos dat a rozvod elektrické energie.

Nyní je třeba nasimulovat přenos dat na reálně zakončeném vedení. Není totiž zřejmé, zda a případně jak, bude ovlivněn průběh signálu na konci vedení. Protože se zátěž různě mění, bude nasimulováno více možných zatížení vedení. Konkrétně budou vedení postupně zakončena Z_{z1} , Z_{z2} , Z_{z3} a kombinací Z_{z2} a Z_{z3} . Bude použit model na Obr. 7-1, stejný modulovaný signál a silnoproudé vedení jako v kapitole 7.2. Průběh signálu na konci silnoproudého vedení zakončeném Z_{z1} je na obrázku Obr. 7-3. Průběh signálu při ostatních zakončeních jsou obdobné, proto není potřeba je zde všechny uvádět.



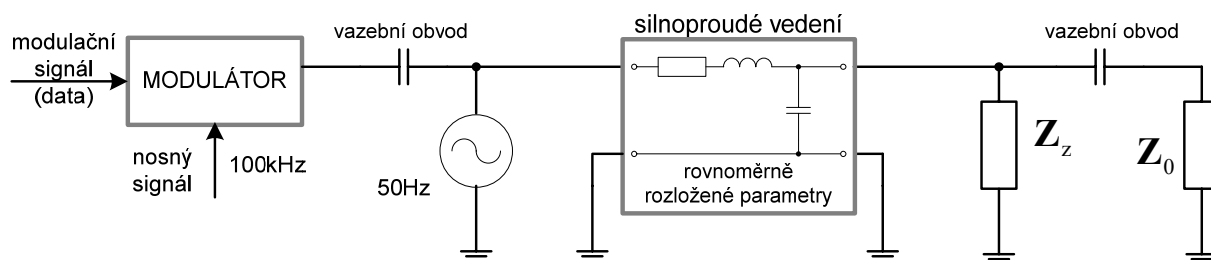
Obr. 7-3 Průběh výstupního signálu na reálně zakončeném vedení

Tento průběh je evidentně jiný, než modulovaný signál a proto nelze zjistit, jaký signál byl přiveden na vstup vedení. Potvrdil se předpoklad, že reálně zakončená vedení nejsou pro přenos dat vhodná.

Závěr z této kapitoly je, že tím, jak bývají silnoproudá vedení zakončena je znemožněn „přímý“ přenos dat. Je tedy třeba nalézt takové řešení, aby bylo možno zároveň přenášet data a elektrickou energii.

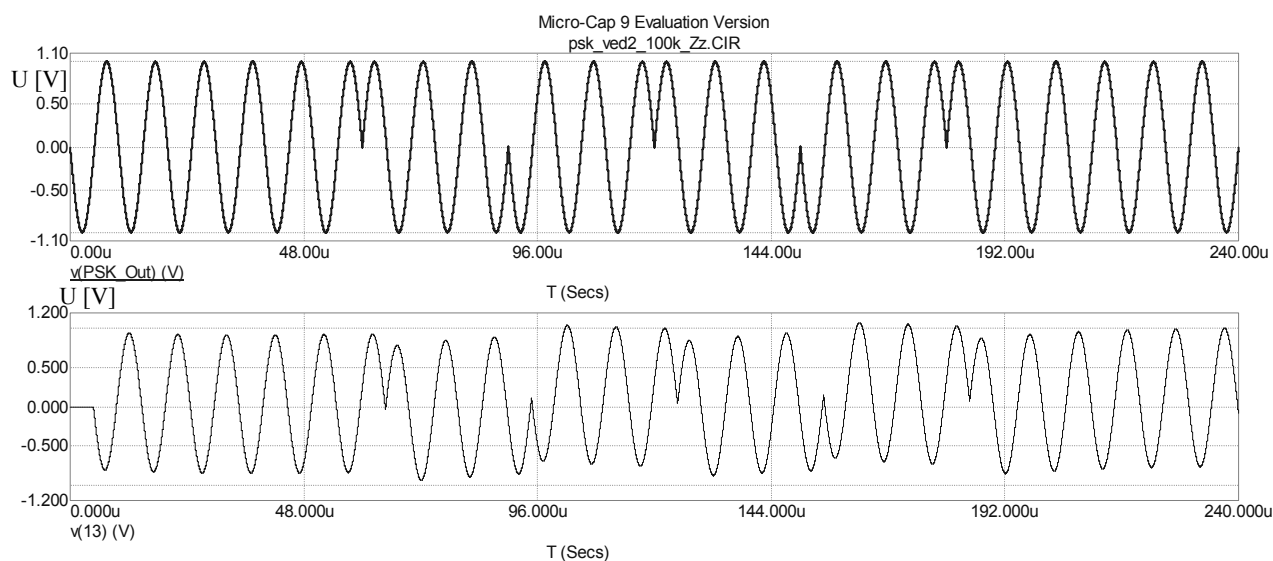
7.4 Model pro simulaci současného rozvodu elektrické energie a přenosu dat po silnoproudém vedení

Z předešlých kapitol plyne, že všeobecně známé a používané modely jsou pro technologii PLC nevhodné. Bude tedy vytvořen model pro simulaci současného přenosu dat a rozvodu elektrické energie. Podmínkou je stálé připojení zátěže. Protože pro přenos dat je vhodné zakončení charakteristickou impedancí, nabízí se zakončit vedení kombinací zátěže a charakteristické impedance. V kapitole 6 je uvedeno, že modulátor a demodulátor signálu se k vedení připojují pomocí vazebního obvodu. Této informace se využije a provede se vytvoření modelu viz Obr. 7-4. Pomocí prvního vazebního obvodu se modulovaný signál „připojí“ na vedení tak, že je možno uskutečnit současný přenos dat a elektrické energie. Druhý vazební obvod zajistí oddělení vysokofrekvenčního signálu od síťového. Průběh přeneseného modulovaného signálu se zjišťuje na charakteristické impedanci.



Obr. 7-4 Vytvořený model pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie

Nyní bude provedena simulace na tomto modelu, aby byla ověřena správná funkčnost. Opět se použije stejný modulovaný signál a silnoproudé vedení jako v kapitole 7.2 a různé zátěže jako v kapitole 7.3. Vazební obvody ve formě kapacitorů byly zvoleny o velikosti 0,1 F a 20 nF.

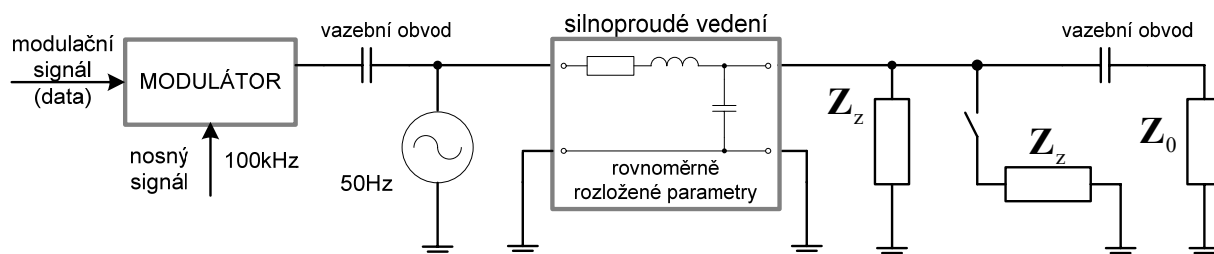


Obr. 7-5 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie - modulace PSK, venkovní vedení

Ze simulace je zřejmé, že z průběh signálu změřeném na charakteristické impedanci, je možné odhadnout průběh modulovaného signálu. Znatelný rozdíl mezi signály je amplituda některých

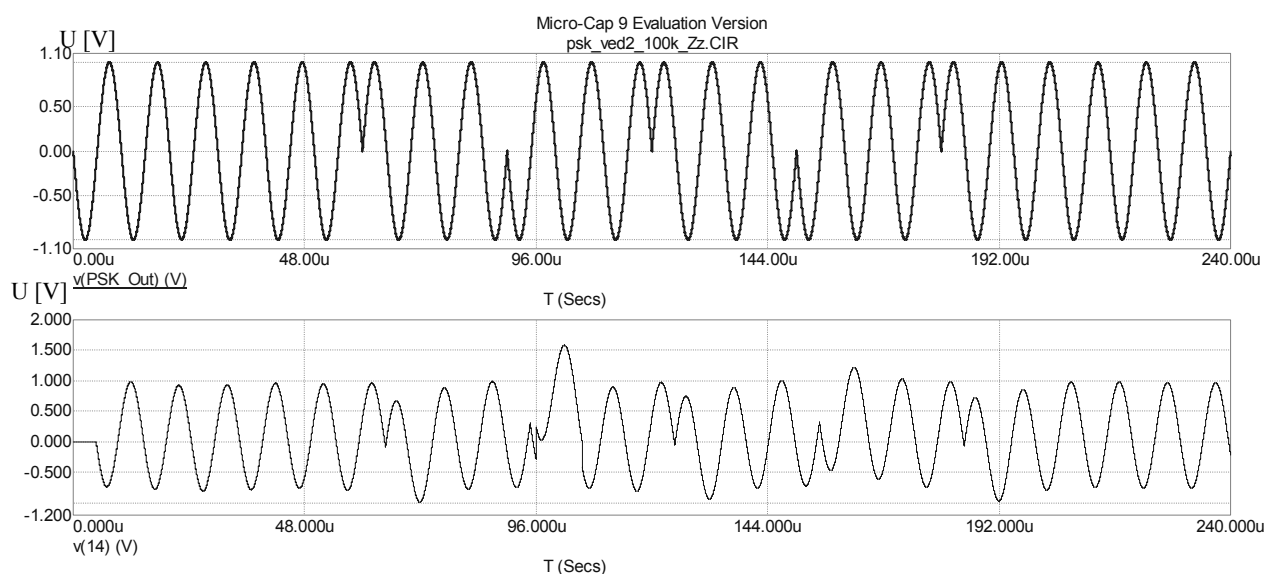
„špiček“. Je vidět, že rozdíl nastává při změně fáze modulačního signálu a ovlivňuje pouze první „špičku“. Na tuto skutečnost lze reagovat změnou parametrů modulace a demulace (např. změna přenosové rychlosti, kmitočtu nosného signálu, atd.), proto se nejedná o neřešitelný problém. S tím souvisí volba modulatorů. Dále se tento problém nebude rozebírat, protože se nejedná o cíl práce. Výsledek simulace je v podstatě stejný pro všechna navržená zatížení. Takto vytvořený model je vhodný pro simulaci datového přenosu na vedení bez přechodných dějů.

Bylo ukázáno, že přenos dat prostřednictvím silnoproudého vedení v ustáleném stavu je možný. Nelze ovšem zaručit, že v okamžiku přenosu dat bude vedení v ustáleném stavu. Zátěž se v čase mění a jedná se o nejčastější přechodný děj na silnoproudém vedení. Proto je třeba vytvořený model upravit tak, aby bylo možno tuto skutečnost simulovat. Paralelně ke stále připojené zátěži se vloží časový spínač, který v daný okamžik připojí (odpojí) zátěž (Obr. 7-6). Tento navržený model je cílem práce.



Obr. 7-6 Vytvořený model pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží

Pro zjištění, jak je ovlivňován přenesený signál, budou provedeny simulace. Opět za stejných podmínek (modulovaný signál, vedení 2, zátěže) jako v předešlé kapitole byla provedena simulace. Z Obr. 7-7 je vidět, že lze z průběhu napětí na charakteristické impedanci rozpoznat, jak vypadal průběh modulovaného signálu. Byly použity všechny tři navrhnuté zátěže v různých kombinacích a vždy byl průběh signálu „čitelný“.

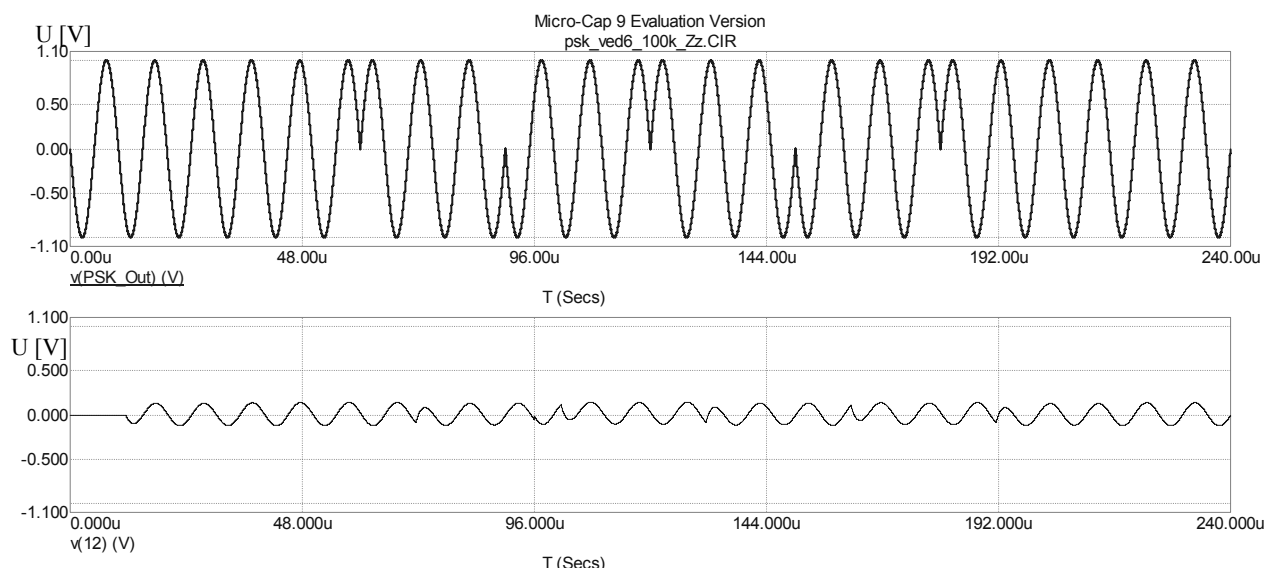


Obr. 7-7 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží - modulace PSK, venkovní vedení

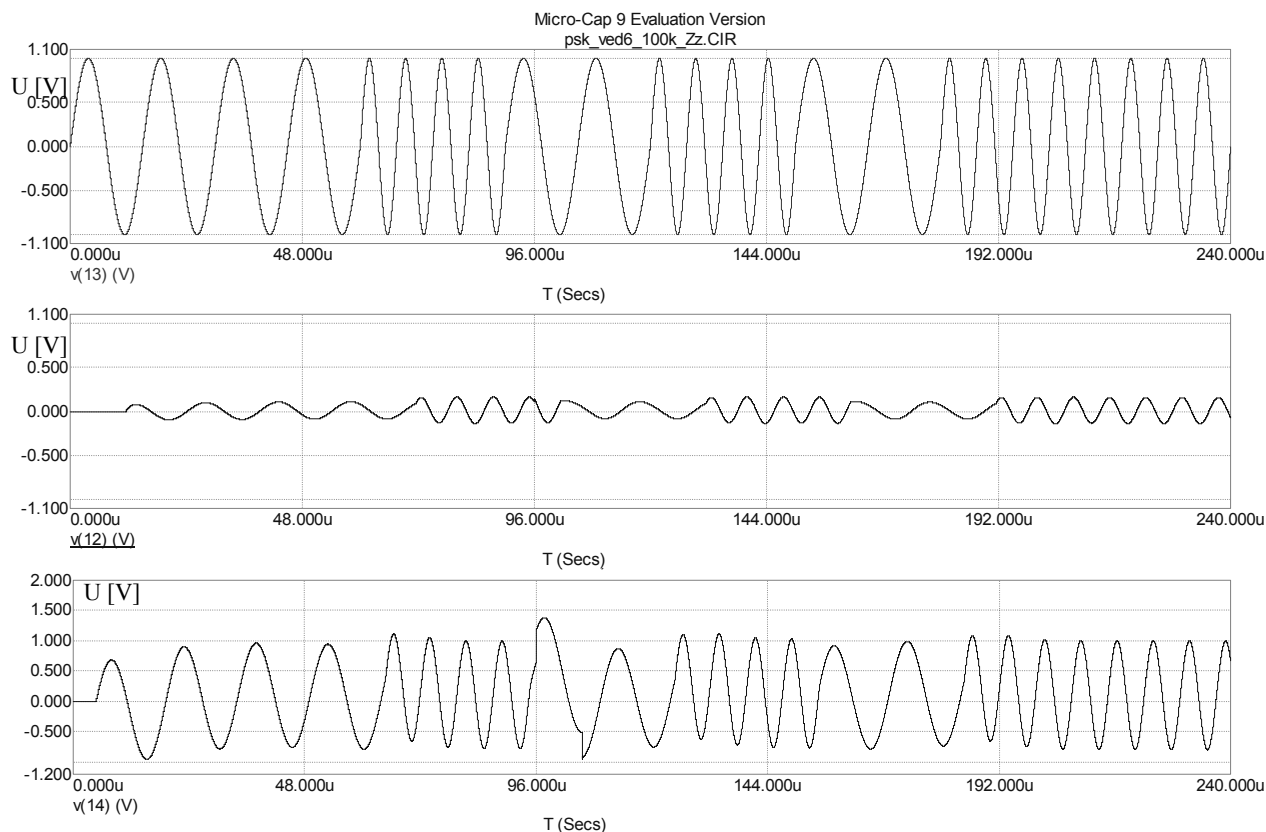
Při připojení zátěže v čase 48 μs nenastává viditelný problém, ovšem při odpojení zátěže dochází ke zkreslení signálu. V čase 96 μs byla odpojena zátěž a na Obr. 7-7 je vidět, že průběh signálu byl zkreslen. V „relativně“ krátkém časovém úseku vliv přechodného děje odezněl a dále je signál opět „čitelný“.

Protože se jedná o finální vytvořený model, bude na něm provedeno více simulací pro možné zhodnocení. Do této chvíle byly ukazovány simulace na venkovním vedení při použití jednoho druhu modulace. Pro porovnání budou ukázány i simulace na kabelovém vedení a při použití modulace FSK.

Nyní bude provedena simulace na kabelovém vedení 6 (Obr. 7-8). Jedná se o vedení stejné délky a navrhnuté pro stejný výkon, jako je venkovní vedení 2. Pro možnost porovnání druhu vedení z hlediska přenosu dat. Modulační signál a zátěž (časově proměnná) jsou též zvoleny stejně jako v simulaci na Obr. 7-7.



Obr. 7-8 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží-modulace PSK, kabelové vedení



Obr. 7-9 Průběh signálu na modelu pro simulaci datových přenosů a současného rozvodu elektrické energie s časově proměnlivou zátěží-modulace FSK

Z výsledků simulací (Obr. 7-7, Obr. 7-8 a Obr. 7-9) je zřetelný vyšší vliv útlumu a posuvu signálu kabelového vedení, oproti venkovnímu. Vyšší měrný posuv nepředstavuje problém pro přenos dat. Útlum vedení je popsán vztahem (4.37). Pro porovnání útlumu venkovního a kabelového vedení pro přenos dat lze tento vztah zjednodušit na

$$\alpha = \frac{R_k}{2} \sqrt{\frac{C_k}{L_k}}, \quad [\text{km}^{-1}] \quad (7.8)$$

kde parametry vedení jsou vypočítány pro kmitočet nosného signálu (100 kHz). V takovém případě je útlum venkovního vedení 0,119 a útlum kabelového vedení je 1,525. Tím se potvrdil správný výsledek simulace. Útlum signálu má zásadní vliv na přenos dat. Pro síť nn se ve většině případů využívá kabelové vedení, což může být problém. Dle literatury [7], se pro omezení vlivu útlumu vedení mohou použít tzv. opakovače. Tato zařízení se připojí v určitém místě na vedení a modulovaný signál „opraví“.

V této kapitole byl vytvořen model pro simulaci současného rozvodu elektrické energie a přenosu dat po silnoproudém vedení, s časově proměnlivou zátěží (Obr. 7-6). Byly provedeny simulace k ověření správné funkčnosti modelu. Bylo konstatováno, že kabelová vedení mají mnohem vyšší útlum, než vedení venkovní.

8 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

V této práci byl vytvořen model pro simulaci současného rozvodu elektrické energie a přenosu dat po silnoprůdém vedení, s časově proměnlivou zátěží (dále bude nazýván, jako základní model pro simulaci datových přenosů po silnoprůdém vedení) Obr. 7-6.

Pro účel práce byl proveden popis datové komunikace, aby bylo možno vysvětlit některé důležité termíny.

Byl proveden popis silnoprůdých vedení z hlediska elektroenergetiky a z hlediska datových přenosů. Pro popis silnoprůdých vedení se používají čtyři základní parametry (rezistance R [Ω], indukčnost L [H], konduktance G [S], kapacita C [F]). Pro obě hlediska bylo rozebráno určení parametrů výpočtem. Závěrem kapitoly byl popsán způsob určení parametrů měřením na vedení.

Dále byly ukázány používané modely silnoprůdých a datových vedení. Bylo ukázáno, že datová vedení jsou navrhována na základě známého zakončení tak, aby charakteristická impedance vedení byla stejná jako zakončení vedení. Silnoprůdá vedení jsou navrhována pro přenos elektrické energie s co možno nejmenšími ztrátami a zátěž vedení se mění v čase. Následně bylo konstatováno, že žádný model není vhodný pro simulaci datových přenosů.

Poslední část práce se zabývá vytvořením vhodného modelu pro simulaci datových přenosů po silnoprůdém vedení. Bylo vysvětleno, jak se provádí návrh silnoprůdých vedení a bylo navrženo několik dílčích vedení. Následně byly provedeny simulace na různě zakončeném vedení. Bylo zjištěno, že reálně zatížená vedení jsou pro přenos dat nevhodná. Z výsledků simulací byl postupně vytvořen základní model pro simulaci datových přenosů po silnoprůdém vedení (Obr. 7-6). Ze simulací na tomto modelu bylo konstatováno, že kabelová vedení mají mnohem vyšší útlum, než venkovní vedení.

9 ZÁVĚR

Hlavním přínosem práce je vytvoření základního modelu pro simulaci datových přenosů po silnoproudém vedení. Jedná se o jeden z mnoha kroků k prozkoumání funkčnosti technologie PLC. Lze na něm simulovat datový přenos různě zatížených vedení (i zatížení měnící se v čase). Jedná se o „ideální“ model, protože se zde neobjevují rušivé signály, které mohou být příčinou špatné funkce PLC. Jsou zde také rozebrány důležité parametry silnoproudých vedení z hlediska technologie PLC.

V návaznosti na tuto práci, by další práce měla model vedení doplnit o zdroj možných druhů rušení v silnoproudém vedení. Mělo by se zjistit, jaké druhy rušení se vyskytují nejčastěji a jaký mají charakter. V podstatě každé zařízení do sítě zapojené vytváří rušení, které nepříznivě ovlivňuje přenos dat. Tato problematika se nazývá EMC a řeší rušení každého zařízení, tedy i PLC. V průběhu práce bylo zjištěno, že útlum kabelových vedení je mnohem vyšší, než u venkovních vedení. Útlum signálu má zásadní vliv na přenos dat, proto by mělo být zjištěno, zda vysoký útlum kabelových vedení neznemožňuje správnou funkčnost technologie PLC.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V., SKALA, P. *Distribuce elektrické energie* [on line]. Elektronický učební text FEKT VUT v Brně. 2004 [cit. 2009-03-12].
https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/ueen/Distribuce_el_energie_S.pdf
- [2] FILKA, M. *Telekomunikační vedení*. 1. vyd. VUT v Brně, 1981 (1980 tisk), 225 s. 55-558-81.
- [3] SPECTRUM SOFTWARE. *Micro-Cap9* [počítačový program, on line]. Ver. 9.0.1.0 Evaluation. Freeware for student's uses. <http://www.spectrum-soft.com/demoform.shtm>
- [4] CENELEC. *EN 50065* [seznam, on line].
<http://www.cenelec.eu/Cenelec/Code/Frameset.aspx>
- [5] PETERKA, J. *Základy datových komunikací. Báječný svět počítačových sítí* [on line]. 1.7.2005, [cit. 2009-03-20]. <http://www.earchiv.cz/b05/b0700001.php3>
- [6] OPEN PLC EUROPEAN RESEARCH ALLIANCE *Project objectives* [on line]. 23.2.2007, [cit. 2009-02-06]. <http://www.ist-opera.org/drupal2/?q=node/16>
- [7] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LEHNERT, R. *Broadband Powerline Communications Networks*. England: Wiley, 2004. 275 s. ISBN 10: 0-470-85741-2
- [8] HERMAN, I. *Komunikační technologie* [on line]. Elektronický učební text FEKT VUT v Brně. 2003 [cit. 2009-03-19].
https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/utko/Komunikacni_techologie_S.pdf
- [9] *Modulation* [on line]. 2007, last modified on 18 April 2009 [cit. 2009-04-21]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Modulation>
- [10] NKT CABLES S.R.O. *Kabely na jmenovité napětí* [on line]. 2006, [cit. 2009-02-10]
http://www.nktcables.cz/sitecore/content/nktcables,-d-.cz/Products/1%20MV%20cables/~/_media/648BDB599E6246929F4B4519F012BC7E.ashx