

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh vysokonapětového vazebního prvku pro  
komunikaci po silovém vedení 22kV**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan SIKÁ**  
Osobní číslo: **E12B0056P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Návrh vysokonapěťového vazebního prvku pro komunikaci po silovém vedení 22kV**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Prozkoumejte možnosti komunikace po silovém vedení a standardizace v této oblasti.
2. Analyzujte problematiku navázání malovýkonového signálu na hladinách NN a VN.
3. Prozkoumejte součástkovou základnu a specifikujte klíčové součásti NN a VN vazebního prvku.
4. Proveďte návrh vysokonapěťového vazebního prvku a verifikujte jeho chování proti teoretickým výpočtům.
5. Diskutujte dosažené výsledky a kriticky zhodnoťte zejména problematické části návrhu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. H.C.Ferreira, L.Lampe, J.Newbury, T.G.Swart, Power Line Communication. ISBN: 978-0-470-74030-9
2. Firemní stránky výrobců diskretních a polovodičových součástek.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Aleš Krutina**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na teorii přenosu informace přes silové vodiče, která se zaměřuje hlavně na fyzické zapojení a používané prvky. Dále je zde možné nalézt simulační návrh vazebního prvku pro napěťovou hladinu 22kV.

## **Klíčová slova**

Vysokonapěťový, PLC, vazební prvek, vazební kondenzátor, komunikace

## **Abstract**

The master theses presents the principles theorie of sending information by power lines. The theorie is focus on physical wiring and components, which are used. Also i tis possible to find a simulation proposal of coupling element for 22kV voltage level.

## **Key words**

Coupler, high voltage, PLC, coupling element, coupling capacitor, communication

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 4.6.2015

Jan Sika

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Alešovi Krutinovy za cenné rady, připomínky, dobré vedení práce a snahu o mojí, co největší samostatnost.

## Obsah

ÚVOD .....	9
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	11
<b>1 ÚVOD DO KOMUNIKACE PO SILOVÉM VEDENÍ .....</b>	<b>12</b>
1.1 ÚVOD.....	12
1.2 VÝHODY A NEVÝHODY PLCC .....	13
1.3 HLAVNÍ KOMPONENTY PLCC .....	13
1.4 PRINCIPY VAZEBNÍCH PRVKŮ.....	14
1.4.1 Elektrické spojení.....	14
1.4.2 Indukční vazba .....	14
1.5 MOŽNOSTI PŘIPOJENÍ.....	15
1.5.1 Přenos jednou fází.....	15
1.5.2 Přenos dvěma, či třemi fázemi .....	15
1.6 NORMOVANÉ HODNOTY SIGNÁLŮ A JEJICH KMITOČET .....	16
1.7 HDO.....	17
<b>2 PROBLEMATIKA NAVÁZÁNÍ MALOVÝKONOVÉHO SIGNÁLU NA VEDENÍ.....</b>	<b>18</b>
2.1 MODULACE SIGNÁLU .....	18
2.1.1 OFDM.....	18
2.2 IMPEDANČNÍ PŘIZPŮSOBENÍ.....	19
2.3 PROBLEMATIKA ÚTLUMU A RUŠENÍ .....	20
2.3.1 Zdroje rušení a útlumu .....	21
2.3.2 Druhy rušení .....	21
<b>3 PRVKY UŽÍVANÉ PRO PLC .....</b>	<b>22</b>
3.1 REZISTOR.....	23
3.1.1 Vysokonapětové aplikace: .....	24
3.1.2 Nízkonapětové aplikace: .....	24
3.2 CÍVKA.....	25
3.3 KONDENZÁTOR.....	27
3.4 TRANSFORMÁTOR.....	28
<b>4 NÁVRH VYSOKONAPĚŤOVÉHO VAZEBNÍHO PRVKU .....</b>	<b>30</b>
4.1 SIMULACE PŘIJMUTÍ SIGNÁLU .....	31
4.2 SIMULACE NAVÁZÁNÍ SIGNÁLU .....	36
4.3 MĚŘENÍ .....	41
<b>5 ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>45</b>
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....	47
PŘÍLOHY.....	1



## **Úvod**

Bakalářská práce je zaměřena na teorii přenosu informací po silovém vedení a popisu konstrukčních prvků.

Problematika je rozdělena do čtyř částí. První pojednává obecně o problematice přenosu, druhá seznamuje se změnami a vlastnostmi přenášeného signálu a třetí popisuje používané součástky. V poslední části se pak nachází simulační a fyzický návrh vysokonapěťového vazebního prvku.

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: SCHÉMA KOMPONENTŮ PLCC [7] .....	14
OBRÁZEK 2: SCHÉMA PRO PŘENOS JEDNOU FÁZÍ .....	15
OBRÁZEK 3: SCHÉMA PRO PŘENOS DVĚMA FÁZEMI .....	16
OBRÁZEK 4: VÝŇATEK Z NORMY CENELEC [3].....	16
OBRÁZEK 5: POROVNÁNÍ ÚZKOPÁSMOVÝCH SYSTÉMU (NARROWBAND) A ŠIROKOPÁSMOVÝCH (BROADBAND) [6]19	
OBRÁZEK 6: SLOŽKY IMPEDANCE A ADMITANCE.....	22
OBRÁZEK 7: NÁHRADNÍ OBVOD REZISTORU [5].....	23
OBRÁZEK 8: FREKVENČNÍ ZÁVISLOST IMPEDANCE REZISTORU [5] .....	23
OBRÁZEK 9: NÁHRADNÍ SCHÉMA CÍVKY. A) VZDUCHOVÉ JÁDRO B) CÍVKA S JÁDREM [5] .....	25
OBRÁZEK 10: FREKVENČNÍ ZÁVISLOST IMPEDANCE CÍVKY [5].....	25
OBRÁZEK 11: NÁHRADNÍ OBVOD KONDENZÁTORU [5].....	27
OBRÁZEK 12: FREKVENČNÍ ZÁVISLOST IMPEDANCE KONDENZÁTORU [5] .....	27
OBRÁZEK 13: NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU [5].....	28
OBRÁZEK 14: PŘÍJEM SIGNÁLU PRO RŮZNÉ HODNOTY C1.....	31
OBRÁZEK 15: FREKVENČNÍ ANALÝZA .....	32
OBRÁZEK 16: PŘÍJEM SIGNÁLU (POUZE VF ZDROJ).....	32
OBRÁZEK 17: ČASOVÁ ANALÝZA, 30KHZ .....	33
OBRÁZEK 18: FREKVENČNÍ ANALÝZA .....	33
OBRÁZEK 19: PŘÍJEM SIGNÁLU (POUZE NF ZDROJ).....	34
OBRÁZEK 20: ČASOVÁ ANALÝZA, 50HZ.....	34
OBRÁZEK 21: PŘÍJEM SIGNÁLU, A) .....	35
OBRÁZEK 22: PŘÍJEM SIGNÁLU, B).....	35
OBRÁZEK 23: ČASOVÁ ANALÝZA, A).....	35
OBRÁZEK 24: ČASOVÁ ANALÝZA, B).....	36
OBRÁZEK 25: NAVÁZÁNÍ - VF SIGNÁL.....	36
OBRÁZEK 26: ČASOVÁ ANALÝZA .....	37
OBRÁZEK 27: NAVÁZÁNÍ SIGNÁLU - NAPRÁZDNO .....	37
OBRÁZEK 28: ČASOVÁ ANALÝZA, A).....	38
OBRÁZEK 29: ČASOVÁ ANALÝZA, DETAIL, B).....	38
OBRÁZEK 30: NAVÁZÁNÍ SIGNÁLU - SE ZÁTĚŽÍ .....	39
OBRÁZEK 31: ČASOVÁ ANALÝZA, A).....	39
OBRÁZEK 32: ČASOVÁ ANALÝZA, B).....	40
OBRÁZEK 33: ČASOVÁ ANALÝZA, C).....	40
OBRÁZEK 34: SCHÉMA PRO MĚŘENÍ .....	41
OBRÁZEK 35: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA .....	42
OBRÁZEK 36: ČASOVÝ PRŮBĚH PRO 3KHZ .....	43
OBRÁZEK 37: ČASOVÝ PRŮBĚH PRO 13KHZ .....	44
OBRÁZEK 38: ČASOVÝ PRŮBĚH PRO 95KHZ.....	44

## Seznam symbolů a zkratk

PLC	Power line communication (komunikace po silových vodičích)
PLCC	Power line carrier communication
PLT	Power line telecommunications
DLC	Distribution line communications
BPL	Broadband over power lines
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
HDO	Hromadné dálkové ovládání
ASK	Amplitudové klíčování
FSK	Frekvenční klíčování
PSK	Fázové klíčování
vf	Vysokofrekvenční
TR	Transformátor
R	Rezistor
L	Cívka
C	Kondenzátor

# 1 Úvod do komunikace po silovém vedení

## 1.1 Úvod

O problematiku přenosu informací po silových vodičích se vědci začali zajímat již v době druhé světové války, ovšem největší rozmach se jí dostalo až od osmdesátých a devadesátých let 20. století. V dnešní době sem spadá hned několik problematik. V první řadě nám mohou silové vodiče pro přenos elektrické energie nahrazovat klasické datové cesty. Telefonní linky, optické kabely, či bezdrátové spojení. Také je zde možnost ovládat zapínání vysokovýkonných spotřebičů (boilery, topení), známo jako HDO, které je zmíněno níže, či možnost na dálku odečítat spotřebované množství elektřiny, jakožto i vody a plynu. Ovšem jednou z největších oblastí použití PLC, jsou domácnosti. Ať už se jedná o ovládání světel a zásuvek, senzorů či alarmů, až opět po přenos dat. V zásadě se tedy velká část výzkumu PLC týká sítí nízkého napětí, jelikož je nejrozsáhlejší a máme přístup k jednotlivým odběrným místům.

Pokud jde o využití PLC pro VN a VVN (zde využíváme zkratku PLCC), kterým se předkládaná práce zabývá, zde připadají v úvahu další možnosti využití. Přenášení provozních informací o soustavě, hlášení poruchových stavů, popřípadě možnost ovládání rozvodné sítě. Ale také je zde již zmíněná možnost přenášet telefonní hovory, internet, nebo poplašné zprávy. Konkurencí PLC obecně je, v dnešní době velice se rozmáhající bezdrátová komunikace a speciálně pro PLCC jsou to silové vodiče se zabudovanými optickými vlákny. Ovšem zde širšímu využití brání hlavně vysoká pořizovací cena.

Jako jedno z mnoha výhodných použití přenosu telefonního spojení, televize, či poplašných zpráv je v odlehlých oblastech, či v rozvojových zemích, kde není možnost bezdrátového pokrytí, či výstavby nových linek a elektrizační sítí je jediné spojení s okolním světem.

Co se týče názvosloví, na které je možné v různých materiálech narazit, zde se objevuje hned několik zkratk. Pro komunikaci v sítích NN je možné nalézt označení PLT (Power line telecommunications, nebo Power line transmission) a také DLC (Distribution line communications). PLC (Power line communication) zahrnuje obecně komunikaci po vedení. Zkratky PLCC (Power line carrier communication) a BPL (což je PLCC vyžadující širokopásmový kanál) se užívají pro přenos v sítích vysokého a velmi vysokého napětí.

## 1.2 Výhody a nevýhody PLCC

Některé výhody i nevýhody byli řečeny v úvodu, ale pro větší přehlednost a úplnost jsou shrnuty zde:

- Pro komunikační účely není zapotřebí výstavba nového vedení, ale využijeme již postavené.
- Silové vodiče a stožáry mají větší pevnost a odolnost oproti telefonním a tím zaručují větší spolehlivost přenosu.
- V přenosové soustavě jsou vodiče mezi rozvodnami vedeny co nejkratší možnou cestou a tím se snižuje potřeba znovu zesílení signálu po trase.
- Silové vodiče svým velkým průřezem (malý odpor) a velkou vzdáleností mezi sebou (malá kapacita) zmenšují útlum oproti telefonním vedením.
- Je zapotřebí zajistit ochranu jak součástkám, tak obsluze před vysokým napětím
- Žádná rozvodná soustava se neobejde bez transformátorů, které jsou však navrženy na 50Hz (popřípadě 60Hz) a pro vf signál znamenají značný útlum.
- Vf signál může být rušen vyššími harmonickými, které se v síti vyskytují například z důvodu koróny, či poruchovými a vypínacími ději.

## 1.3 Hlavní komponenty PLCC

### Vazební prvek

Rozumíme tím součástky vstupního filtru, který přímo oddělí vf signál od síťové frekvence a předává ho dál.

### Impedanční přizpůsobení

Zařídíme, že impedance přijímacího zařízení bude rovna impedanci přenosového vedení a tudíž nám nebudou vznikat žádné odražené vlny.

### Zdroj signálu / zařízení na zpracování signálu

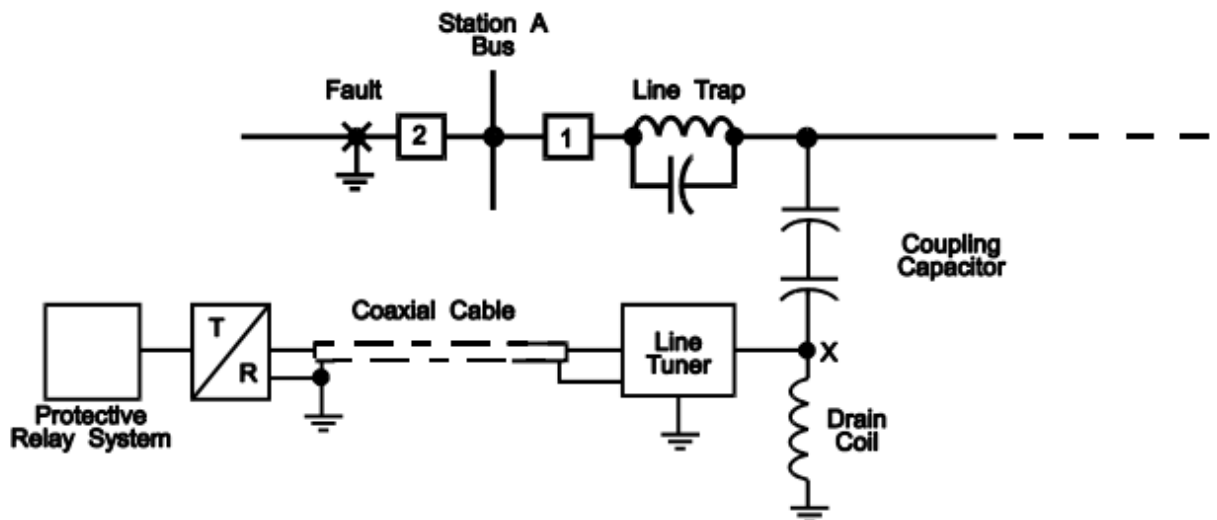
Připraví nám přenášený signál pro přenos, nebo vyhodnotí signál, který jsme přijmuli.

### Line trap

Zabraňuje vstupu vf signálu do části, kde nemá být, aby se nesmíchal s dalším signálem, nebo nerušil zařízení umístěné dále po síti (nejvíce však využívané pro HDO).

### Přepět'ové ochrany

Chrání komponenty před atmosférickými a spínacími ději.



Obrázek 1: Schéma komponentů PLCC

## 1.4 Principy vazebních prvků

### 1.4.1 Elektrické spojení

Součástky jsou paralelně připojeny k vedení, tedy je na nich jmenovitá hodnota napětí sítě a to znamená, nutnost klást velký důraz na jejich elektrickou pevnost. Jak bylo řečeno výše, jedná se o filtr, přesněji pásmovou propust. Ta oddělí námi přenášený signál od síťového kmitočtu a ten přes vf transformátor (pro impedanční přizpůsobení) putuje dále ke zpracování. Máme více řádů pásmové propusti a více možností jejich sestavení. Nejjednodušší a nejčastější možností pro VN a VVN, a kterou se zabývá i praktická část této práce, je použití kondenzátoru. Tudíž kondenzátor musí být navržen na jmenovité napětí soustavy. Další možné varianty propustí jsou s více kondenzátory, kombinace s cívkou, nebo nejlépe aktivní propust. Tyto možnosti bychom však našli spíše na hladině NN.

### 1.4.2 Indukční vazba

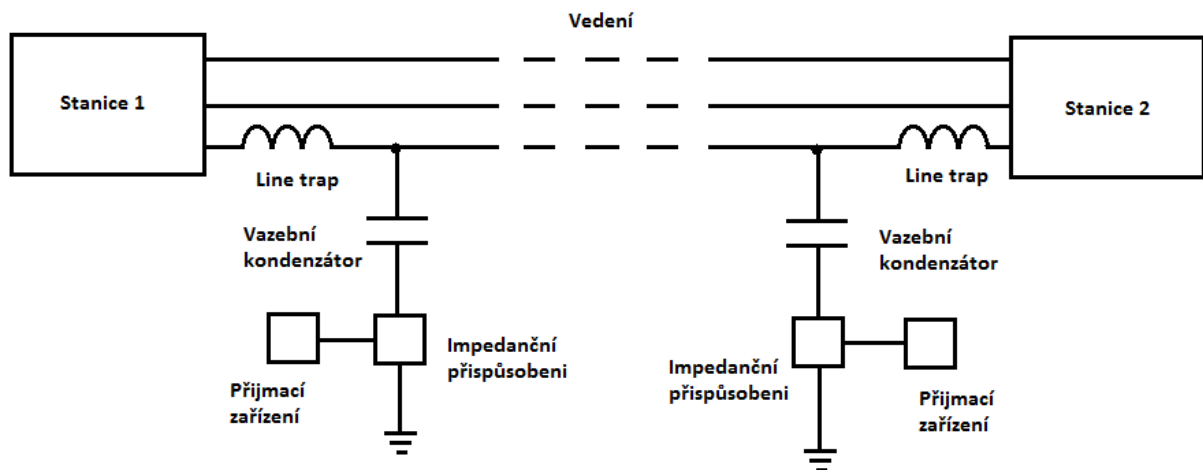
Prvkem, který zde odděluje vf signál z vedení je kruhová cívka (Rogowského cívka), která je umístěná okolo vodiče. Jádro má vzduchové. V ní se pomocí elektromagnetické vazby indukuje napětí, které má ovšem menší úroveň než síťové (v závislosti na počtu závitů). Poté následuje opět pásmová propust, která již nemusí být na stejné napětí, jako je v síti. Je tedy jasné, že celý vazební prvek je galvanicky oddělen od vedení a tím bezpečnější. Kvůli menšímu napětí je možné použít lepší pásmové propusti a tak jde tato vazba použít na vyšší frekvence než předchozí, až do 30MHz.

## 1.5 Možnosti připojení

Máme několik možností, jak můžeme vazební prvek připojit na síť. Jakou možnost využijeme, vždy závisí na kompromisu mezi spolehlivostí, cenou a technickými požadavky.

### 1.5.1 Přenos jednou fází

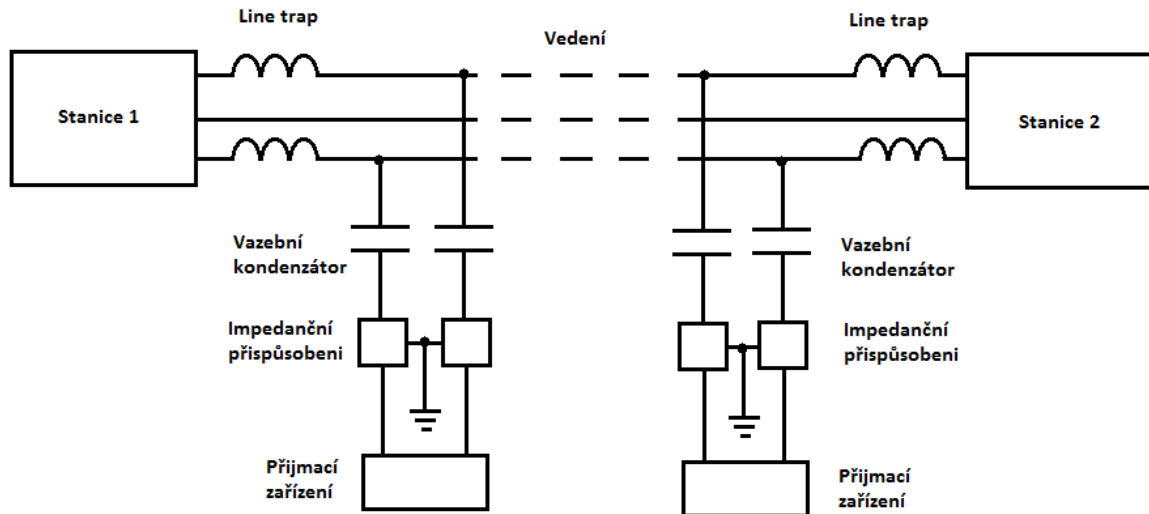
Vazební prvek je připojen pouze k jedné fázi, většinou k prostřední. Náklady na tuto možnost jsou nejmenší (např. pouze jedenkrát kondenzátor, line trap a transformátor), ovšem zaplatíme za to menší spolehlivostí (pokud dojde k přerušení fáze, přenos není možný) a větším útlumem. Využijeme tedy tuto možnost převážně pro přenos na krátké vzdálenosti.



Obrázek 2: Schéma pro přenos jednou fází

### 1.5.2 Přenos dvěma, či třemi fázemi

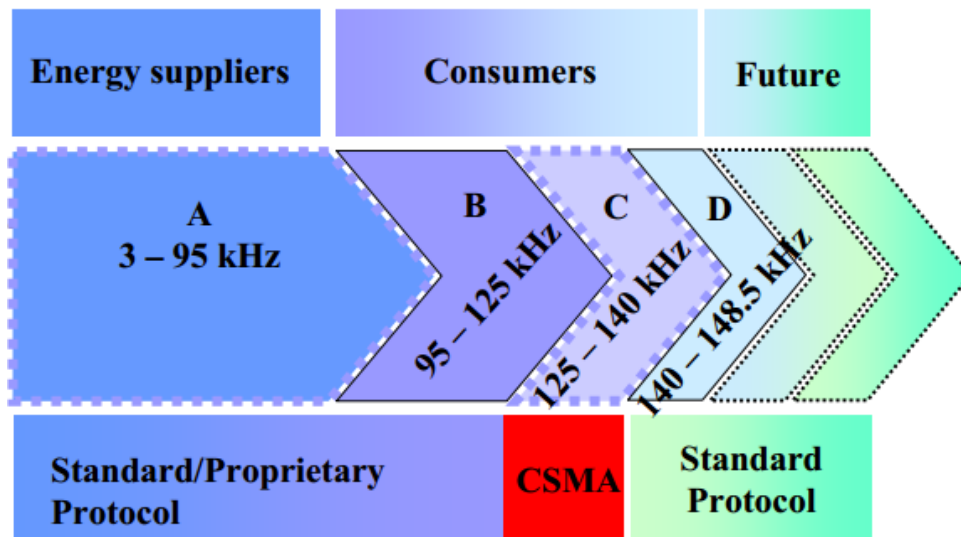
Máme vyšší náklady (musíme pořídit připojení na více fázích), ovšem dosáhneme menšího zkreslení přenosu a také při přerušení jedné fáze jsme pořád schopni zajistit fungování komunikace. Dvě fáze se využijí pro střední vzdálenosti a tři pro ty nejdéší.



Obrázek 3: Schéma pro přenos dvěma fázemi

## 1.6 Normované hodnoty signálů a jejich kmitočty

Pro PLCC jsou dle normy CENELEC přiřazeny určitá kmitočtová pásma. Pro Evropu se frekvenční pásmo pohybuje od 3 do 148,5kHz (viz Obrázek 44), v Americe jsou to frekvence do 450kHz a v Číně do 500kHz.



Obrázek 4: Výňatek z normy CENELEC



## 1.7 HDO

Jedná se o další verzi komunikace po vedení. Ve velkých rozvodnách, obvykle na hladinách 400kV jsou instalovány vysílače. Ty pracují na kmitočtu řádově stovky hertz. Vyslané signály tak poměrně dobře projdou na hladinu VN, a poté i NN, kde je nejčastěji umístěn přijímač. Co se týče využití, to vychází přímo z názvu. HDO znamená hromadné dálkové ovládání. Využívá se pro hromadné spínání elektrických zařízení s větším příkonem, v době menšího využití elektrické energie, aby se co nejvíce zrovnoměnil denní diagram zatížení. Každý toto zná pod pojmem „levný tarif“. Vysílače a přijímače HDO a PLCC se příliš neliší. Výkonová část je obdobná, pouze navrhnutá pro jiné frekvence. Liší se druhy signálů a jejich výkon.

## 2 Problematika navázání malovýkonového signálu na vedení

Tato problematika se nechá rozdělit na dvě části. První částí, jsou softwarové problémy, kde je nutné nejprve vyřešit úpravu přenášeného signálu (informace), správné navázání do silových vodičů a poté jeho přenos a správné vyhodnocení. Tím se zabývá následující kapitola. Druhou částí je hardware. Zde se musí vyřešit konstrukce používaných součástek zejména těch, na kterých je napětí sítě, nebo se na něm může objevit. A také posoudit součástky z hlediska chování při vysokých frekvencích. To lze nalézt v kapitole 3.

### 2.1 Modulace signálu

Před samotným navázáním musíme nejprve signál vhodně upravit pomocí modulace. Modulace signálu znamená, jeho úpravu na optimální frekvenci, tvar a velikost pro daný přenosový kanál. V našem případě je přenosový kanál vodič vedení VVN, VN, či NN a snažíme se zajistit největší odolnost signálu proti rušení a útlumu, abychom byli schopni přenášený signál přijmout a správně vyhodnotit. V závislosti jakou modulaci použijeme a jakou přenosovou rychlost vyžadujeme, se rozlišují, úzkopásmové PLC systémy a širokopásmové PLC systémy.

Základní druhy modulace jsou analogové a digitální. Analogové máme amplitudové (AM), frekvenční (FM) a fázové (PM). Do digitálních řadíme amplitudové (ASK), frekvenční (FSK), fázové (PSK) a modulaci QAM. Všechny typy mají své využití, ovšem stručně popíšeme jen ty, které se využívají pro PLC. Kvůli tomu musíme rozšířit dělení modulace, ještě o pojem frekvenční multiplex. Pro PLC se používá modulace OFDM (ortogonální multiplex s frekvenčním dělením) v kombinaci s ASK, FSK, PSK a nejvíce QAM.

#### 2.1.1 OFDM

Spočívá v použití širokého kmitočtového pásma. Signál je modulován některým z výše uvedeným způsobem (např. 64-QAM, či 128-QAM) a poté je stejná informace přenášena pomocí stovek různých kmitočtů. Díky tomu je signál velice odolný vůči rušení a má malou chybovost. [11].

Následující obrázek ukazuje porovnání úzkopásmových a širokopásmových systémů. SS značí rozšířené spektrum.

	Narrowband PLC	Broadband PLC
Data rate	Up to 200kbps	Over 1Mbps
Frequency	Up to 500kHz	Over 2MHz
Modulation	FSK, S-FSK, BPSK, SS, OFDM	OFDM
Applications	Building Automation Renewable Energy Advanced Metering Street Lighting Electric Vehicle Smart Grid	Internet HDTV Audio Gaming

**Obrázek 5: Porovnání úzkopásmových systému (narrowband) a širokopásmových (broadband)**

Podle uvedeného obrázku lze tedy říci, že úzkopásmové systémy lze využít jak pro hladiny NN, tak VN. Pro nízké napětí je to hlavně z důvodu menšího útlumu plynoucího z použití nižší frekvence a u VN jsme omezeni normou CENELEC.

## 2.2 Impedanční přizpůsobení

Poté co máme vhodně namodulovaný signál, je nutné ho co nejlépe dostat na vedení. V případě indukční vazby (viz 1.4.2) je největším problémem vzduchová mezera mezi cívkou a vodičem. Co se týče elektrické vazby (viz 1.4.1), zde se setkáváme s pojmem impedanční přizpůsobení. Při elektrické vazbě přechází náš vysílaný signál mezi prostředím s různou impedancí. Z modemu, kde je signál modulován (ten má obvykle impedanci 50Ω) do silových vodičů (ty mají impedanci rovnou vlnové impedanci). Zde nastává první problém. Pokud obě impedance nejsou v nejlepším případě stejné (impedančně přizpůsobené), signál se může od rozhraní odrážet a zhoršuje se kvalita přenosu. S tím souvisí i problém, že vlnová impedance vedení není konstantní. Je závislá na parametrech vedení a definujeme ji jak pro hladiny VN, tak i NN. Parametry vedení, se mohou měnit například se změnou teploty, vlhkosti, či zatížení.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

**Rovnice 1: Výpočet vlnové impedance**

Nejjednodušší variantou, jak realizovat impedanční přizpůsobení je pomocí transformátoru s převodem jiným, než 1:1. Může se dokázat, že transformátor nejenže převádí napětí a proud na jinou úroveň, ale také mění velikost impedance, díváme-li se ze strany primárního vinutí, či sekundárního vinutí.

$$p = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$U_2 * I_2 = U_1 * I_1$$

$$\frac{U_2 * I_2}{I_1 * I_2} = \frac{U_1 * I_1}{I_1 * I_2} \rightarrow Z_2 * \frac{I_2}{I_1} = Z_1 * \frac{I_1}{I_2}$$

$$Z_1 = Z_2 * \frac{I_2^2}{I_1^2} = Z_2 * \frac{1}{p^2}$$

### Rovnice 2: Odvození převodu impedance TR

Ovšem pouze transformátor s vhodným převodem nestačí. Jak již bylo řečeno, impedance sítě se neustále mění, tudíž musíme měnit i převod. Proto pro dobré impedanční přizpůsobení je nejlepší použít elektronické řízení. Obecně problematika impedančního přizpůsobení je složitá a týká se všech oblastí spojených s přenášením signálů. Detailněji se lze s tím seznámit například v [1].

#### Hlavní důsledky impedančního nepřizpůsobení:

- a) Útlum signálu
- b) Odražení signálu
- c) Rezonance dlouhého vedení (vzniká velké zkreslení)

## 2.3 Problematika útlumu a rušení

Nyní postoupíme v našem pomyslném řetězci dál. Signál máme upraven, víme jak ho správně dostat do přenosového kanálu, a nyní se můžeme seznámit s tím, jak může být rušen a utlumován. Zaprvé je důležité si říct, kde všude může rušení vzniknout. Toto je přehledně popsáno v [6].

### 2.3.1 Zdroje rušení a útlumu

a) Impedance zátěže

Charakter a velikost zátěže je proměnná v čase, jak jsou určitá zařízení odpojovány a připojovány do sítě. Tento problém se týká jak hladin NN, tak VN.

b) Více fází

Tento problém se týká především sítí NN. Zde můžeme mít každou fázi z třífázového rozvodu vedenou do jiných míst a jinak zatíženou. Proto je důležité jak PLC zařízení do sítě zapojíme, jestli jej zapojíme mezi fázi a střední vodič, nebo můžeme použít fáze-fáze, atd. Pro hladiny VN volíme různé možnosti hlavně z důvodu spolehlivosti.

c) Transformátory

Ty jsou obecně příčinou velkého útlumu signálu, pokud máme vysílač a přijímač umístěný na rozdílných stranách transformátoru.

d) Vedení

Vlnová impedance vedení je také zdrojem velkého útlumu. Zejména na hladině VN, kde překonáváme velké vzdálenosti a vedení je venkovního provedení.

Je tedy zřejmé, že útlum signálu je závislý na topologii sítě, zátěži, umístění vysílače a přijímače, jakožto i na čase a použité frekvenci. Není proto nijak překvapivé, že se útlum může pohybovat od 15dB do 60dB a více.

### 2.3.2 Druhy rušení

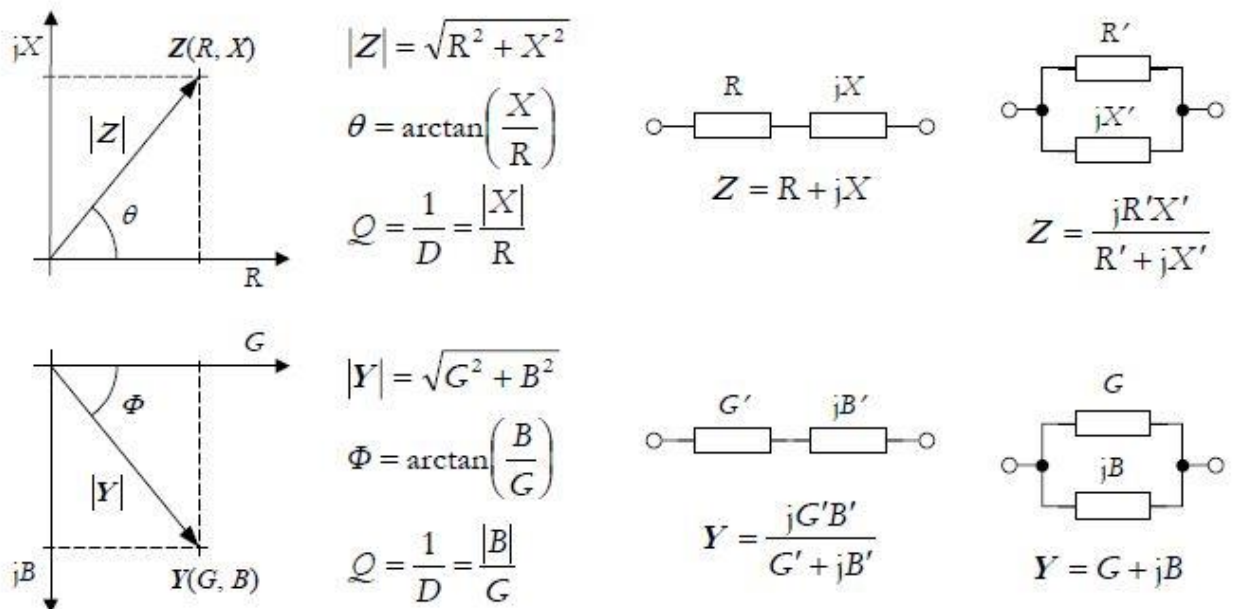
- a) Impulzní – časová posloupnost jednotlivých impulzů, nebo přechodových dějů
- b) Spojité – v čase je nepřerušované
- c) Úzkopásmové – vytvářeno zejména amplitudovým modulováním
- d) Širokopásmové
- e) Nízkofrekvenční – může vzniknout například kartáči motorů
- f) Vysokofrekvenční – vzniká v důsledku spínacích procesů, například vypínání indukčních a kapacitních zátěží, či rušení z měničů

### 3 Prvky užívané pro PLC

V této kapitole se zaměříme na jednotlivé součástky, které využíváme při tvorbě vazebního prvku pro PLC. K tomu využíváme všechny pasivní součástky, ovšem pokusíme se je prezentovat z pohledu práce s vysokými frekvencemi a napětím. Je důležité zmínit, že každá část PLC vyžaduje použití různých součástek. Pro vazební prvek využijeme kondenzátor, či cívku, impedanční přizpůsobení a následné obvody se neobejdou také bez rezistoru a transformátoru.

Jestli je výsledné zapojení použito na hladinu VN, či NN nehraje roli. Principy a potřebné součástky jsou stejné, pouze se budou lišit jejich parametry a výsledný design.

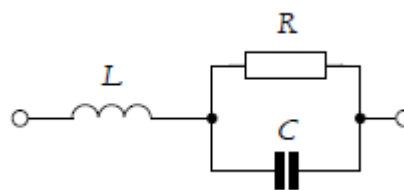
Jak již bylo zmíněno, je důležité se zaměřit na napěťové parametry, především u vazebního prvku, aby snesl trvalé zatížení, ovšem také i na chování součástek při vysokých frekvencích. To z důvodu parazitních složek, které obsahuje každý pasivní prvek. Tyto složky se poté musí zohlednit v jejich náhradním schématu a tedy, mají vliv na chování součástky. Jako příklad lze uvést mezizávitovou kapacitu, či indukčnost rezistorů. Pro matematický popis reálných součástek při vysoké frekvenci, proto musíme použít komplexní impedanci, nebo admitanci, která vyjadřuje jejich skutečnou hodnotu.



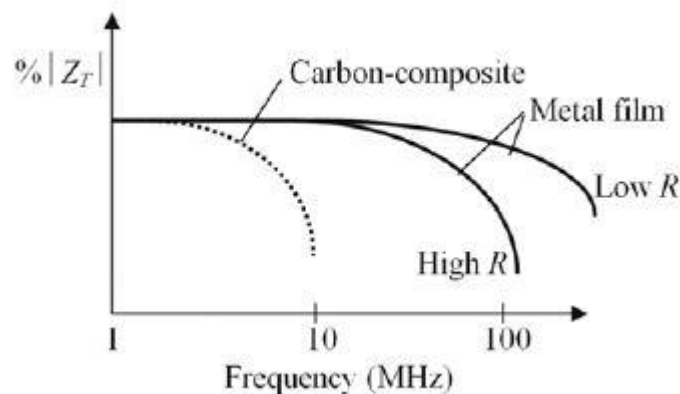
Obrázek 6: Složky impedance a admitance

### 3.1 Rezistor

Je to pasivní elektronická součástka charakterizovaná hlavně činnou reaktancí. Jak je zmíněno výše, takto můžeme uvažovat pouze u malých (síťových) frekvencí. U vyšších frekvencí, se kterými obvodové prvky pracují, se však projevují i jeho parazitní složky, jimiž je indukčnost a kapacita. Náhradní schéma je na Obrázek 77. Tyto parazitní prvky nám pro vyšší frekvence zmenšují výslednou hodnotu rezistoru a to se nepříjemně projevuje jednak do návrhu obvodu, tak do jeho následného provozu a musíme s nimi počítat. Chování několika druhů rezistoru je na Obrázek 88.



Obrázek 7: Náhradní obvod rezistoru



Obrázek 8: Frekvenční závislost impedance rezistoru

Rezistory v PLC využijeme pro měření proudu, jako dělič napětí, omezování proudů, a také jsou nedílnou součástí všech obvodů v modemu.

Materiálů, z kterých se rezistory vyrábějí, je celá řada. Nejvíce používané jsou konstantan, manganin, nikelin, či chromnikl. Z pohledu druhu výroby a použití je můžeme rozdělit do několika kategorií.

V následujících kapitolách uvádíme druhy rezistorů dle [9].

### 3.1.1 Vysokonapětové aplikace:

a) Drátový rezistor (Wirewound resistor)

Tento rezistor tvoří kovový vodič, navinutý na nevodivém jádře. Vodič se obvykle vyrábí z Chromniklu, či slitiny měď-nikl-mangan. Jádro rezistoru může být z keramiky, plastu, nebo skelného vlákna. Nejčastější použití je elektrické trakci, jako brzdné odpory. Kvůli své konstrukci není vhodný pro vysokofrekvenční aplikace, jelikož má větší parazitní indukčnost.

b) Vrstvový uhlíkový rezistor (Carbon film resistor)

Skládá se z keramického jádra a tenkého pásku z čistého uhlíku, omotaným kolem jádra, který slouží jako odporový materiál. Dají se využít hlavně ve vysokonapětových a tepelně náročných aplikacích.

c) Objemový rezistor (Carbon composition resistor)

Vyrábějí se z uhlíkových částic smíchaných s pojivem (například s jilem) Smíchaná hmota se speče a vytvoří pevnou látku. Používají se hlavně pro ochranu obvodů, omezení proudů a také v ochranách před atmosférickými jevy.

### 3.1.2 Nízkonapětové aplikace:

d) Vrstvový kovový rezistor (Metal film)

Konstrukce je obdobná jako u Carbon film resistor, ale zde, je namísto křemíkového pásku, použit kovový pásek. Pro své přesné hodnoty, nízké rušení a vysokou linearitu, jsou použity v nízkonapětových a vysokofrekvenčních zapojeních, jako například aktivní filtry, či můstkové obvody.

e) Vrstvový rezistor (Metal oxide film)

Opět se jedná o rezistor s keramickým jádrem, na který je nanesen čistý kov, při vysoké teplotě.

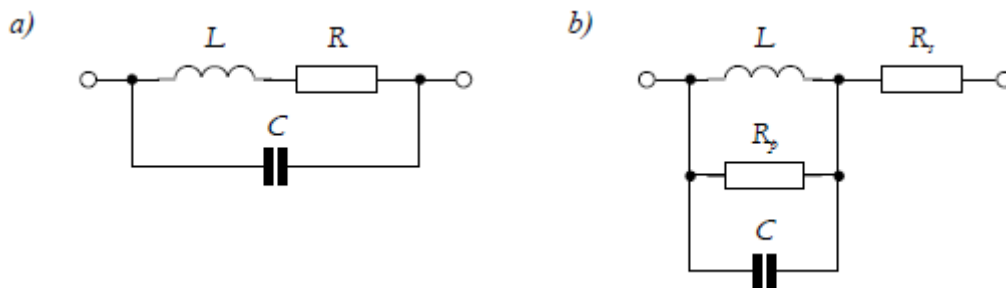
f) Fóliový rezistor (Foil resistor)

Jedná se o rezistor s nejlepšími vlastnostmi, ze všech výše zmíněným typům. Má dobrou dlouhodobou stabilitu, nízkou kapacitu a indukčnost a nízké rušení. Je vyroben z tenké kovové fólie (obvykle chromnikl s přísadami), nanesené na keramickém nosiči.



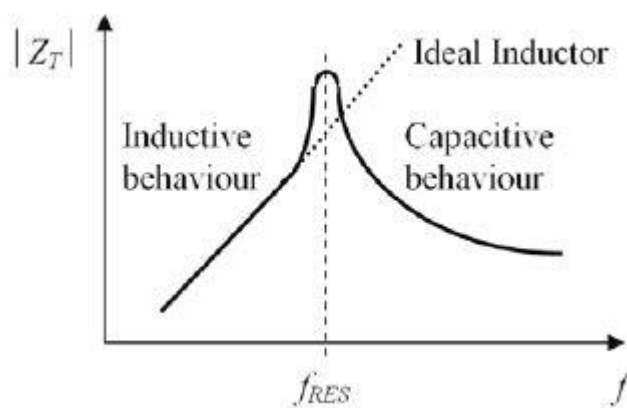
### 3.2 Cívka

Stejně jako rezistor i cívka má parazitní složky. Navíc kvůli velké frekvenční závislosti jádra je obtížné stanovit jejich přesné hodnoty. Schémata na Obrázek 99, jsou pro vysoké frekvence, kde uvažujeme i mezi závitové kapacity, dále kapacity přívodů a závitů proti zemi. Pokud bychom používali cívku pro síťové kmitočty, tedy v oblasti nízkých kmitočtů, kapacitu bychom mohli zanedbat.



Obrázek 9: Náhradní schéma cívky. a) vzduchové jádro b) cívka s jádrem

Chování ideální a reálné cívky, lze dobře vidět na Obrázek 1010. Ideálně, se charakteristika řídí dle vzorce  $X_L = 2\pi fL$  a tedy při zvyšující se frekvenci, zvyšuje i svojí impedanci. Chová se tedy jako dolní propust. Reálně se ovšem při vyšších kmitočtech zvětšuje vliv parazitních kapacit, což způsobí zlom charakteristiky v okolí rezonanční frekvence a vytváří charakteristiku pásmové zadržky.



Obrázek 10: Frekvenční závislost impedance cívky

Cívky pro nízké napětí se vyrábějí z izolovaného vodiče, navinutého na feromagnetickém jádře, nebo mají jádro vzduchové. Pro nízké kmitočty se nejvíce používají cívky s feromagnetickým jádrem, vytvořeným ze vzájemně izolovaných plechů. Tím docílíme zmírnění ztrát vlivem vířivých proudů. U vysokých kmitočtů, se vyrábějí cívky bez jádra, nebo v případě vysokých hodnot indukčnosti (stovky  $\mu\text{H}$ ) použijeme feritové jádro. Z pohledu výkonů, jsou vzduchové cívky využívány do napětí 121kV a výkonu 100MVar. Pro vyšší výkony a napěťové hladiny využijeme cívky s jádrem a olejovým provedením.

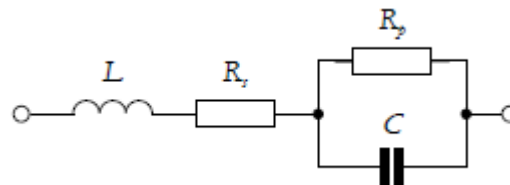
Když bychom se blíže podívali na výhody a nevýhody cívek s jádrem a bez jádra, dostaneme pro každou variantu specifické použití. Vzduchová jádra jsou vysoce lineární, protože u vzduchu nemůže dojít k přesycení. Vzduchové jádro má ovšem za následek nižší indukčnost a tím pro požadovanou hodnotu dostáváme větší rozměry a počet závitů, než pro jádro železné. S tím souvisí i větší činný odpor a mezi závitová kapacita. Zřejmá nevýhoda železného jádra je saturace, při přílišném zatížení. [5].

Jak bylo řečeno výše, cívky využíváme i pro napětí VN i VVN. Proto musíme klást také velký důraz na elektrickou pevnost. To znamená správné nadimenzování vodičů a konstrukce, kvalitní provedení izolace vodičů, nevodivé vrstvy mezi jednotlivými vrstvami vinutí a navíjení vodičů co nejbližší u sebe, aby mezi nimi byl co možná nejmenší rozdíl potenciálů. Pokud tedy vezmeme v potaz i izolaci a konstrukci, můžeme dělení cívek o něco rozšířit. Podle druhu použitého chladícího a izolačního média, na suché cívky a olejové cívky (to závisí na požadovaném výkonu a velikosti). Dále záleží na tom, zda bude cívka využívána venku (nutná ochrana před přírodními vlivy), či v uzavřených prostorách a také na již zmíněném provedení jádra (vzduchové či feromagnetické). Podle použití pak rozlišujeme cívky, filtrační, kompenzační, omezovací, či zhašecí.

Pokud jde o použití cívek v PLC, je možné s jejich pomocí realizovat samotný vazební prvek a také jsou nedílnou součástí dalších filtračních a ladících obvodů. Pak se také jedná o použití jako pásmové zádrže (line trap), kdy zamezíme vstupu signálu o vyšší frekvenci do určitých částí sítě a tím možnému rušení. Toho se používá pro signály HDO.

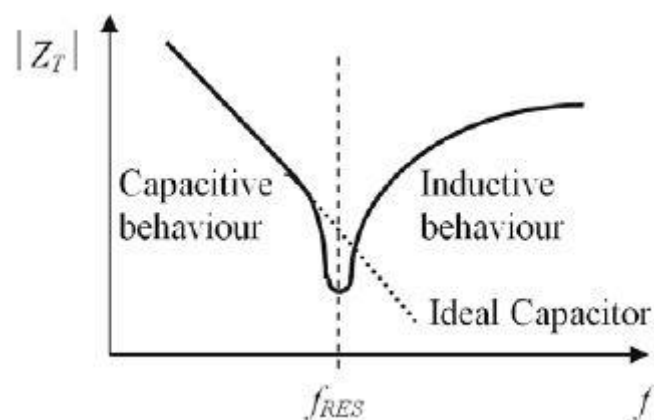
### 3.3 Kondenzátor

I u této pasivní součástky, můžeme na Obrázek 1111 vidět jeho parazitní složky, které se projevují ve vysokých frekvencích. Kondenzátor je nejvíce využívaná součástka v PLC. Nejčastěji pro navázání a odebrání signálu z vedení, ale také jako součást dalších filtrů, nebo v modemových obvodech.



Obrázek 11: Náhradní obvod kondenzátoru

Obdobně jako u cívky a rezistoru, má i kondenzátor ideální a reálné chování. Ideálně se impedance kondenzátoru snižuje s rostoucí frekvencí ( $X_c = \frac{1}{2\pi f * C}$ ), ovšem ve skutečnosti při zvyšující se frekvenci, se více uplatňuje indukčnost a místo horní propusti, dostáváme pásmovou propust. Toto chování lze vidět na Obrázek 12.



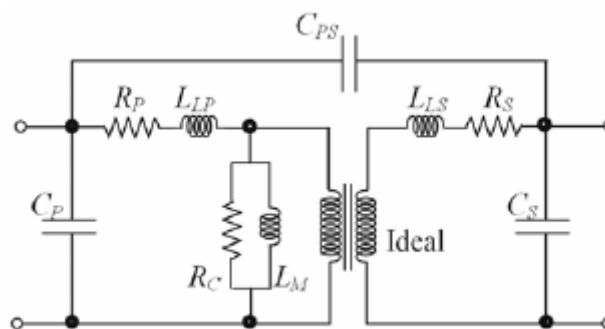
Obrázek 12: Frekvenční závislost impedance kondenzátoru

Kondenzátory lze rozdělit do tří základních skupin, podle druhu dielektrika. Se vzduchovým, pevným a kapalným dielektrikem. Kondenzátory se vzduchovým dielektrikem nejvíce využijeme pro ladící obvody. Pevná dielektrika se hodí do vysokofrekvenčních aplikací. Vyrábějí se z papíru, plastu, ale nejvíce z keramiky. Kapalná dielektrika, včetně elektrolytů používáme pro kondenzátory velkých kapacit. [5]

Dielektrikum je pak rozhodující z hlediska jmenovitého dovoleného napětí. Námí zvolený materiál musí totiž být schopen vydržet elektrické namáhání pracovní hodnotou napětí. Pro napětí vyšší než 100kV se používá keramika, speciální polymery, nebo olejem impregnovaný papír.

### 3.4 Transformátor

Opět hojně využívaná pasivní součástka. Transformátor využíváme hlavně kvůli transformaci, zejména impedance, jak bylo probíráno v kapitole 2, ale také pro galvanické oddělení. Jelikož ve většině aplikací používáme transformátor až za vstupním filtrem (vazebním prvkem), nemusí mít stejnou elektrickou pevnost jako součástky filtru, ale nižší, pouze pro amplitudu vf signálu. Každý transformátor lze znázornit pomocí náhradního schématu (viz Obrázek 133). Můžeme vidět, že zde je více parazitních složek, které jsou s rostoucí frekvencí výraznější.  $L_M$  a  $R_C$  znázorňují magnetickou reaktanci a ztráty v železe (vířivými proudy a hysterézí),  $L_{LP}$  a  $L_{LS}$  rozptylovou reaktanci primárního a sekundárního vinutí a  $R_P$  s  $R_S$  jeho činný odpor.  $C_P$  a  $C_S$  jsou mezizávitové kapacity jednotlivých vinutí a  $C_{PS}$  je kapacita primárního a sekundárního vinutí. S těmito všemi parametry musíme opět při návrhu počítat, a čím větší jsou na TR nároky, tím přesněji musí být složky určeny.



Obrázek 13: Náhradní schéma transformátoru

I přesto, že nebude transformátor namáhán vysokým napětím, je i tak zapotřebí, aby fungoval spolehlivě. Proto je důležité, aby vydržel jednak elektricky, tak tepelně. Elektrická izolace se provádí použitím izolovaných vodičů, prokládání jednotlivých vrstev a nakonec konečné vinutí zalijeme například do pryskyřice (suché TR pro NN a VN), nebo jej umístíme do olejové nádoby (olejové TR pro VVN). Pokud jde o tepelnou odolnost, všechny materiály musí mít dobrou tepelnou vodivost a pro velké výkony je vhodné využít žebra, popřípadě ventilátory pro chlazení.

## 4 Návrh vysokonapěťového vazebního prvku

Návrh zahrnuje, výpočet pásmové propusti, prvků náhradního schématu vedení, simulaci příjmu i navázání vysokofrekvenčního signálu na síť 22kV a na závěr sestavení a měření. Frekvenci pro vf signál jsem si vybral 30kHz a prvky vedení jsou vypočítány na jeden kilometr délky. Vedení je do simulace zařazeno kvůli snaze přiblížit se reálnému stavu. Simulace je provedena v programu PSpice 16.6 demo.

Nejprve je tedy potřeba uvést výpočet kapacity vazebního kondenzátoru a prvků náhradního schéma vedení.

### Vazební kondenzátor

$$C = \frac{1}{\omega^2 * L} = \frac{1}{2\pi * 30 * 10^3 * 0,87 * 10^{-3}} = 32,35nF$$

### **Rovnice 3: Výpočet kondenzátoru**

Indukčnost L je parazitní indukčnost vf transformátoru od firmy Würth elektronik

### Vedení

$$L = 0,46 * \log \frac{a_s}{r} + 0,05 = 0,46 * \log \frac{1200}{5,499} + 0,05 = 1,13mH/km$$

$$C = \frac{1}{18 * \ln \frac{a_s}{r}} = \frac{0,0242}{\log \frac{a_s}{r}} = \frac{0,0242}{\log \frac{1200}{5,499}} = 10nF/km$$

$$R = \rho * \frac{l}{S} = 0,0285 * \frac{1000}{95} = 0,3\Omega$$

Svod zanedbáváme

### **Rovnice 4: Výpočet parametrů vedení**

Kde:

$a_s$  Střední vzdálenost vodičů

1,2 m

r Poloměr vodiče

5,499 mm

S Průřez vodiče

95 mm<sup>2</sup>

$\rho$  Měrný elektrický odpor

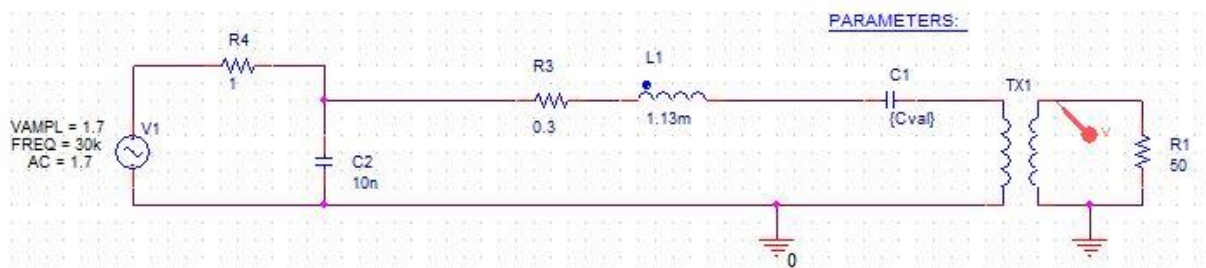
0,0285  $\Omega * mm^2/m$

V níže uvedených simulacích budou tedy použity následující prvky. Prvky L,C a R tvořící náhradní schéma vedení a C jako vazební kondenzátor. TR s indukčností vstupních a výstupních cívek 0,87mH a R znázorňující impedanci modemu. Ta bude mít obecně uvažovanou hodnotu  $50\Omega$ . Také budou použity dva napěťové zdroje. Jeden s amplitudou 22kV a frekvencí 50Hz jakožto zdroj síťového napětí a druhý s amplitudou 1,7V a frekvencí 30kHz znázorňující zdroj přenášeného signálu. Jak frekvence, tak napětí byli náhodně zvoleny s přihlédnutím na skutečné parametry signálu.

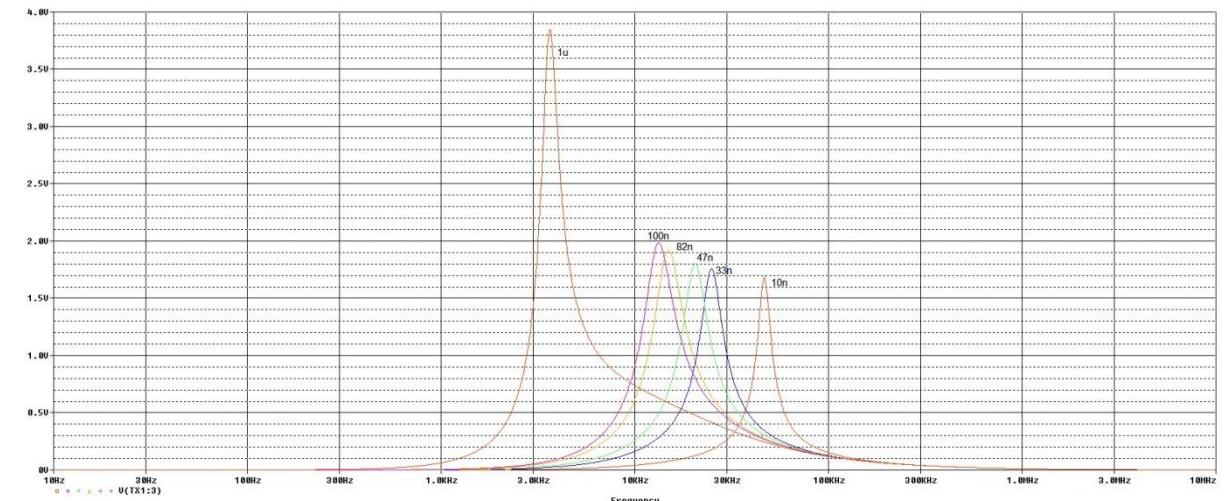
#### 4.1 Simulace přijetí signálu

Následující simulace ukazují fungování obvodu pouze s vysílaným signálem (obrázek 14 - 18), poté se síťovým kmitočtem (obrázek 19 a 20) a nakonec skutečnou práci obvodu pro síťový průběh s nasuperponovaným vf signálem (obrázek 21 - 24).

Vypočtená hodnota vazebního kondenzátoru, nemusí vždy odpovídat realitě. Ve skutečnosti může být potřeba jiná, nebo popřípadě nemůže být možné přesně vyrobit námi požadovanou hodnotu. Jelikož se pasivní součástky vyrábějí nejvíce v normalizačních řadách, nejprve provedeme frekvenční analýzu pro mnou vybrané hodnoty z řady E12 a to 10n, 33n, 47n, 82n, 100n a  $1\mu\text{F}$ . (Obrázek 144 a Obrázek 155). Simulace obsahuje zdroj vf signálu V1, náhradní schéma vedení (C2, R3 a L1), přes které musí signál projít. Poté je k němu připojen vazební kondenzátor (prvek C1), následuje transformátor (uvažujeme převod 1:1, pro zjednodušení) a za transformátorem se nachází modem zpracovávající signál, představený odporem R1, s obecně uvažovanou impedancí  $50\Omega$ .



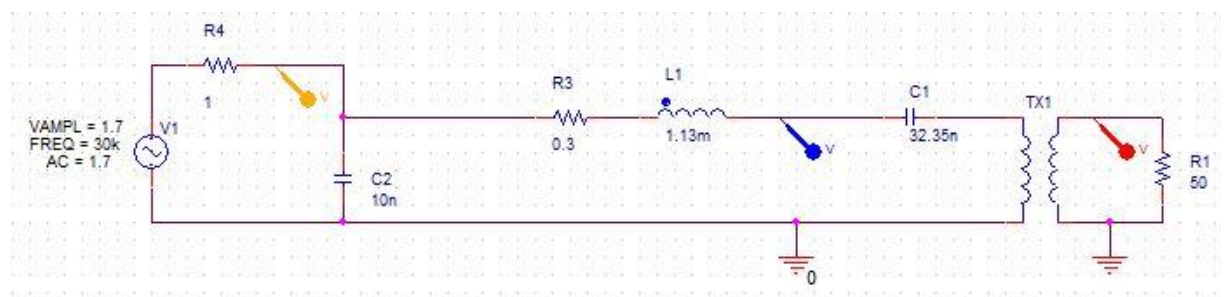
Obrázek 14: Příjem signálu pro různé hodnoty C1



Obrázek 15: Frekvenční analýza

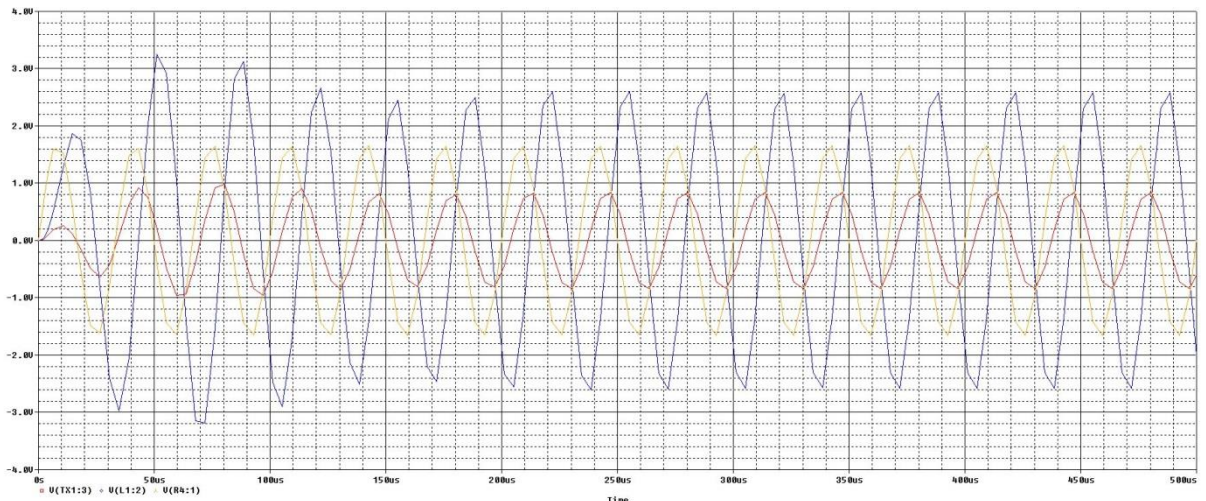
Dle Obrázek 15: 5 se simulace shodují s výpočty. Vazební prvek je spočten na 30kHz a nejbližší hodnota 47nF má opravdu své maximum u této frekvence. Ovšem pokud bychom chtěli využívat převážně frekvence mezi 3 a 10kHz, je zde pro tuto hodnotu kondenzátoru veliký útlum. V tom případě by bylo rozumnější použít velikost 100nF.

Následující simulace (Obrázek 177 a Obrázek 188) ukazují časovou a frekvenční analýzu vypočtené hodnoty kondenzátoru v různých místech obvodu. Vf signál je opět reprezentován napěťovým zdrojem V1. Prvky C2, R3 a L1 představují vedení.



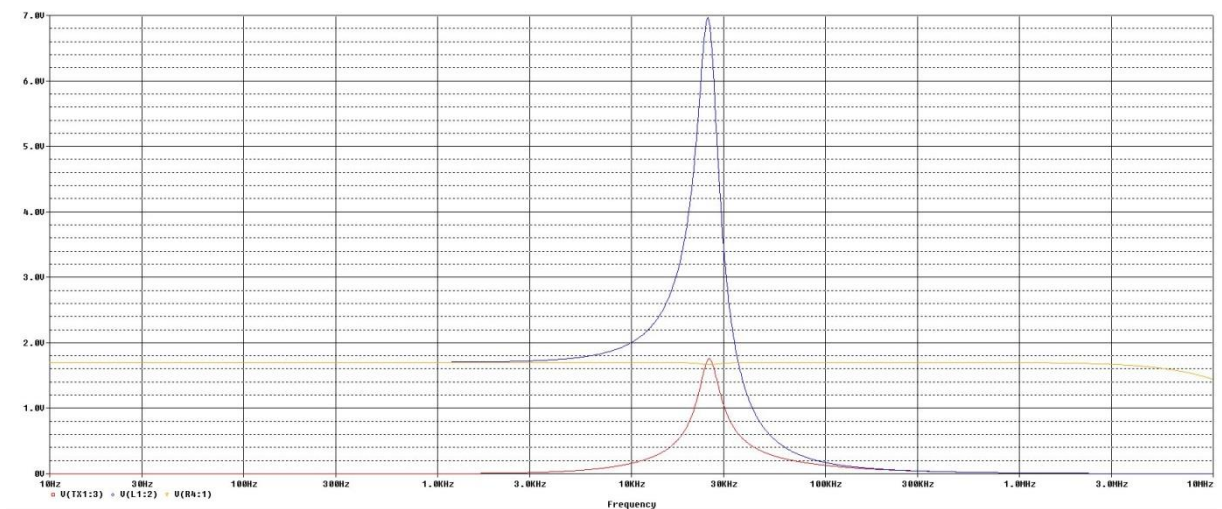
Obrázek 16: Příjem signálu (pouze vf zdroj)





Obrázek 17: Časová analýza, 30kHz

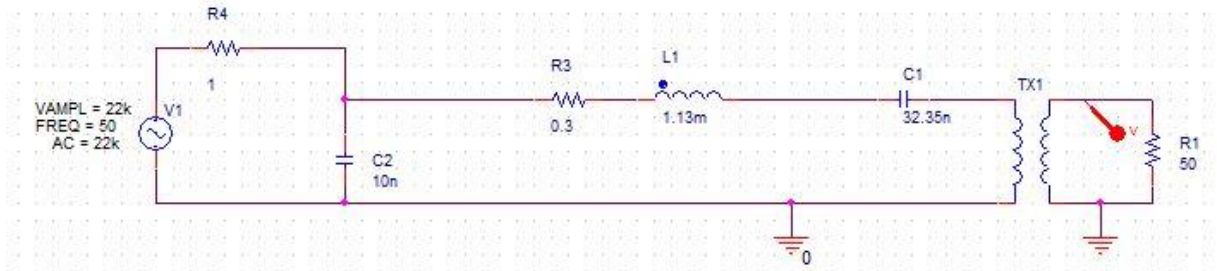
Zde můžeme vidět, že na výstup TR přijde vysílaný signál, zmenšený o úbytky na vedení a také díky prvkům vedení je posunutá i fáze. Amplituda zeleného průběhu měřeného před vazebním kondenzátorem je zvětšená díky frekvenčnímu zdvihu. Při použití jiné zdrojové frekvence se bude zmenšovat. To je možné vidět na následující frekvenční analýze.



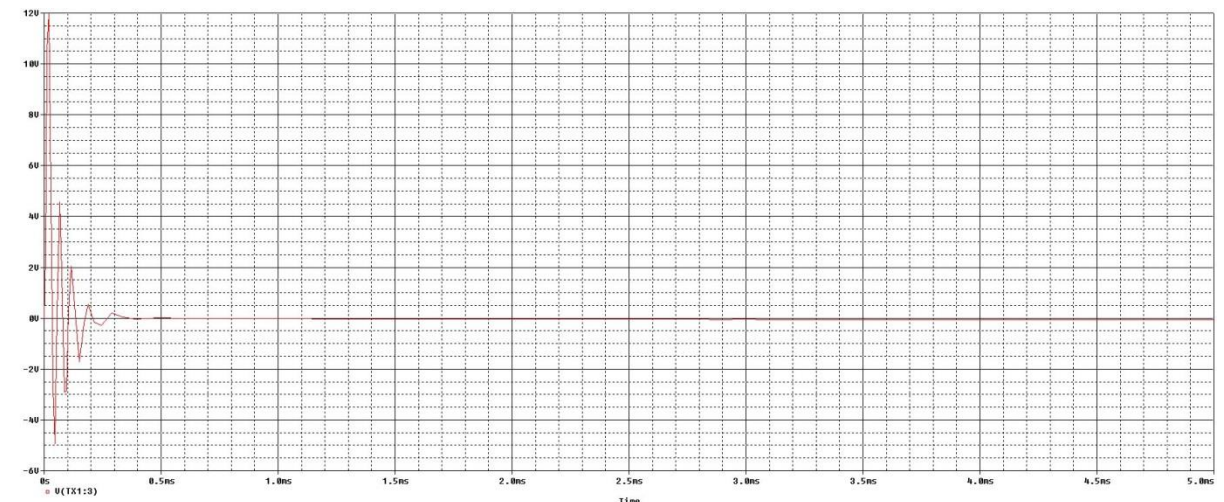
Obrázek 18: Frekvenční analýza

Na frekvenční analýze (obrázek 18) je ukázána změna amplitudy (útlumu) v závislosti na frekvenci. Na zeleném průběhu je vidět výše zmiňovaný frekvenční zdvih a je zřejmé že pro jiné frekvence mimo 30kHz je tento problém menší.

Je také důležité si ukázat chování obvodu pouze pro síťovou frekvenci 50Hz a amplitudě 22kV (obrázek 19).



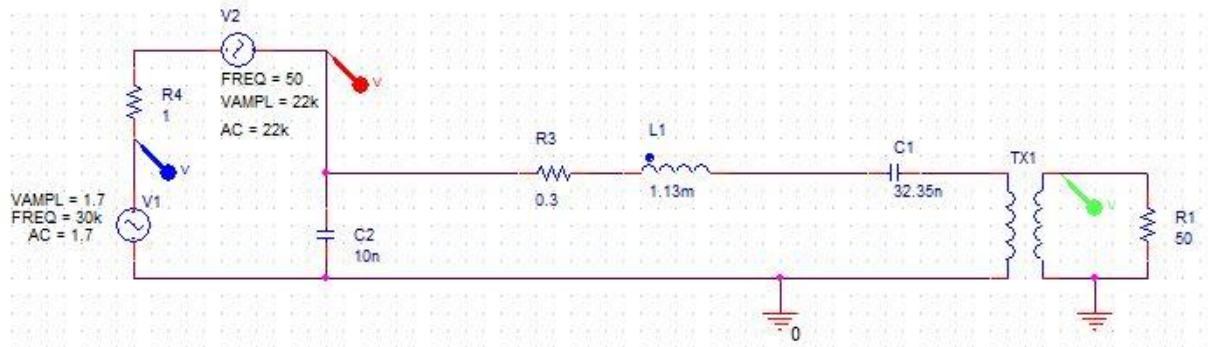
Obrázek 19: Příjem signálu (pouze nf zdroj)



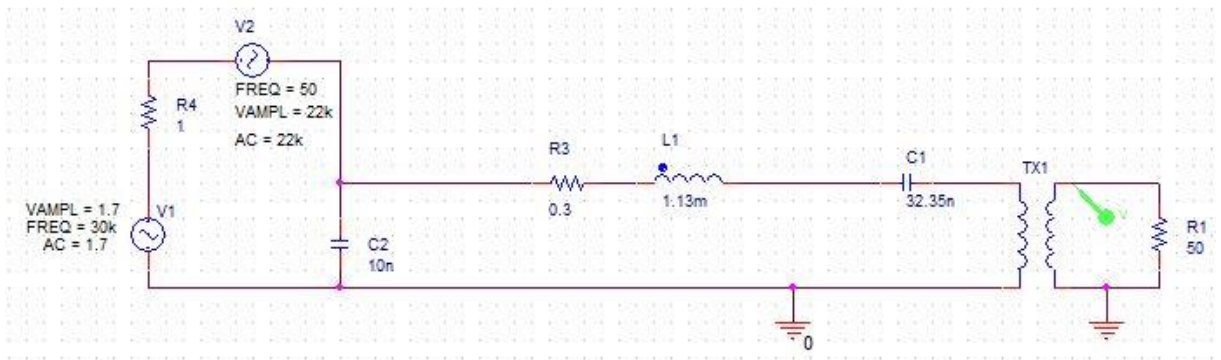
Obrázek 20: Časová analýza, 50Hz

Na obrázku 20 je možné vidět průběh napětí na výstupu vazebního prvku při použití zdroje 22kV s frekvencí 50Hz. Rozkmit v začátku simulace je způsoben přechodovými ději. Jeho velikost dosáhla maximálně 13V, což bych považoval za hodnotu, na kterou můžeme vyhodnocovací obvody bez problému nadimenzovat, a nebo je před ní chránit. To ukazuje na správnou funkci vazebního kondenzátoru.

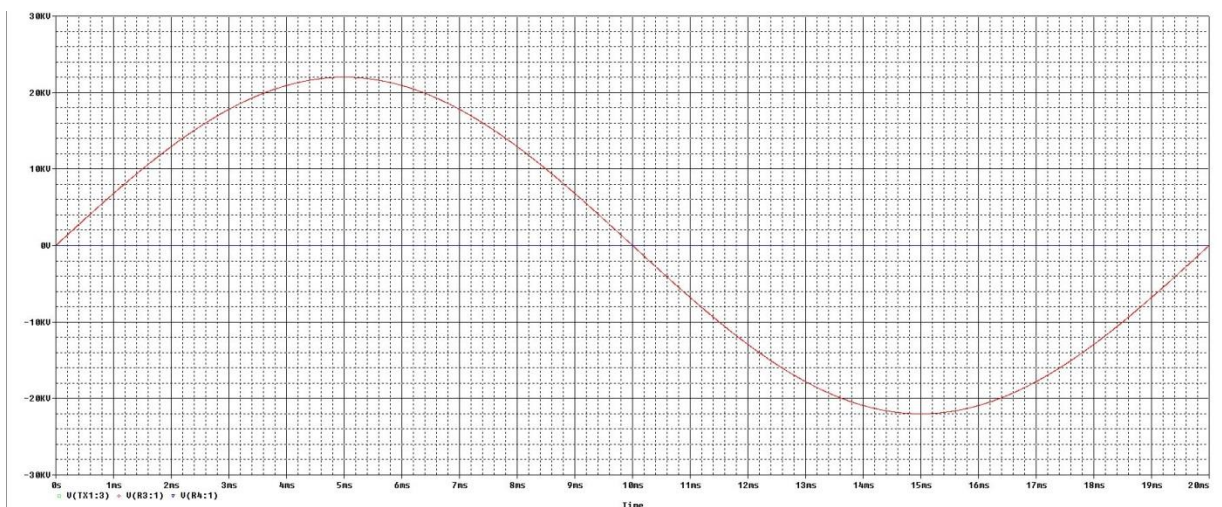
Nyní je již možné ukázat chování obvodu při použití obou zdrojů. Zdroje síťové frekvence o amplitudě 22kV, na jehož amplitudu se nasuperponuje signál ze zdroje o amplitudě 1,7V a frekvenci 30kHz. Zdroje jsou řazeny sériově, a tudíž nepředstavují simulaci skutečného principu spojení průběhů, ale znázorňují přímo průběh, který se již šíří po vedení. Neřešíme tedy, jak se vf signál dostal na síťový kmitočet, ale vytvořili jsme již výsledný průběh, ze kterého může být odebrána vysílána informace prostřednictvím vazebního prvku.



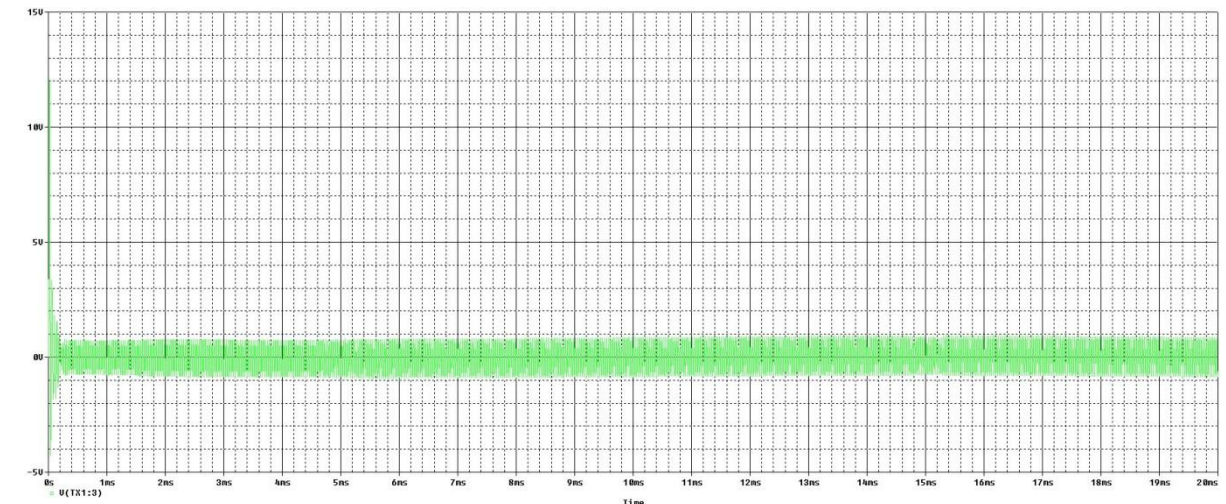
Obrázek 21: Příjem signálu, a)



Obrázek 22: Příjem signálu, b)



Obrázek 23: Časová analýza, a)



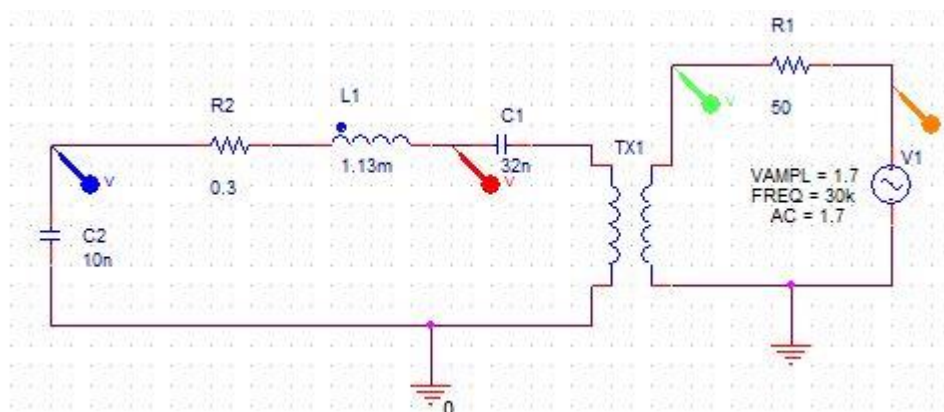
Obrázek 24: Časová analýza, b)

Časová analýza varianty a), jen informačně ukazuje, jaká amplituda napětí se nachází před vazebním prvkem. Důležitější je simulace b). Zde je jasně zřetelné, že kondenzátor propustil ze síťového průběhu pouze vf signál, který může být dále zpracován. Objevuje se nám zde opět menší napěťová špička díky přechodovým dějům, zmiňovaná u Obrázek 207.

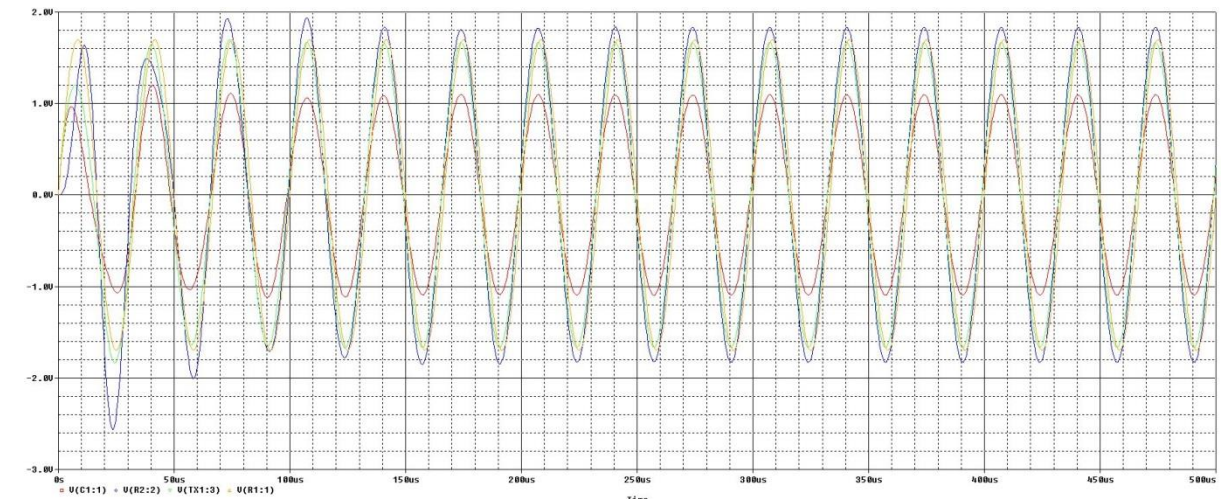
## 4.2 Simulace navázání signálu

Nyní je potřeba také ukázat princip navázání vf signálu na síť. Nejprve bude ukázáno jen, že signál snadno projde z modemu, přes TR, kondenzátor a vedení naprázdno (obrázek 26), poté samotné navázání, s vedením opět naprázdno (obrázek 28 a obrázek 29) a nakonec chování pro různé velikosti zátěže připojené k vedení.

Prvky C2, L1, R2 opět představují náhradní schéma vedení, C1 je vazební kondenzátor, zdroj V1 je náš vysílaný signál a rezistor R1 je opět impedance modemu.



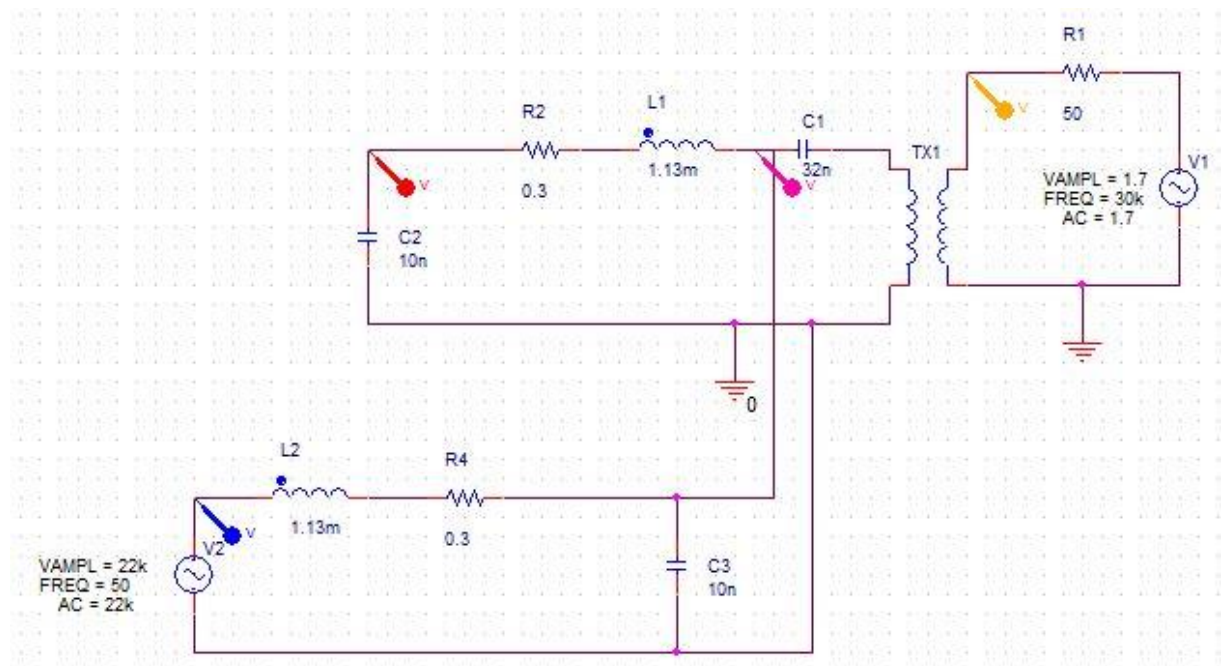
Obrázek 25: Navázání - Vf signál



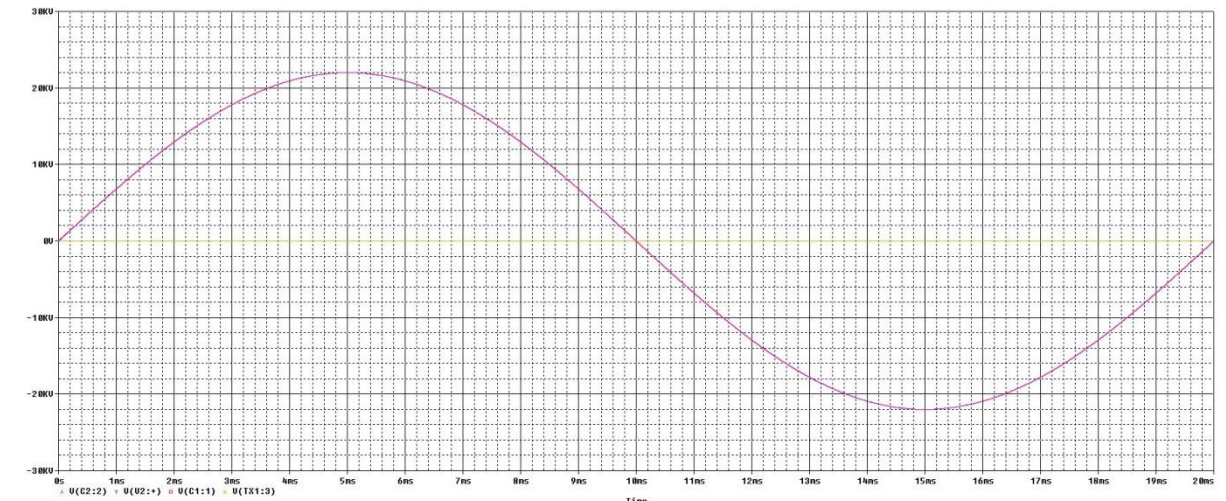
Obrázek 26: Časová analýza

Zde je tedy dobře vidět, že vf signál projde z modemu až nakonec, ovšem se sníženou amplitudou. Můžeme si povšimnout větší amplitudy na konci vedení, oproti začátku. Důvodem je opět frekvenční zdvih zmíněný u obrázku 17.

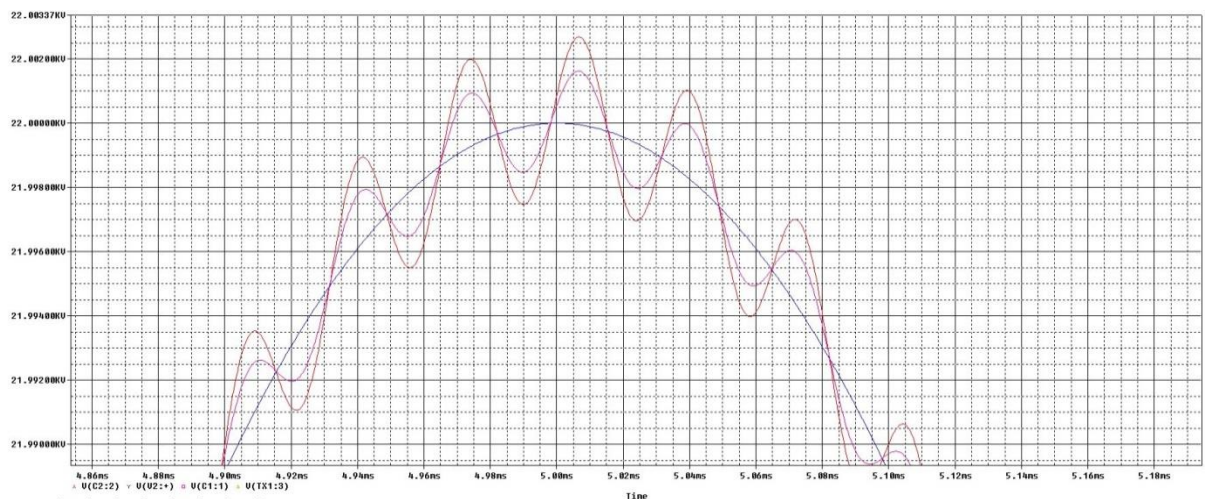
Na Obrázek 27 je schéma pro navázání signálu na síť. Prvky L1, C2, R2 reprezentují náhradní schéma vedení, kterým prochází již navázaný signál a součástky L2, C3, R4 znázorňují vedení, po kterém přichází čistá síťová frekvence. Koncové vedení není zatíženo.



Obrázek 27: Navázání signálu - naprázdno



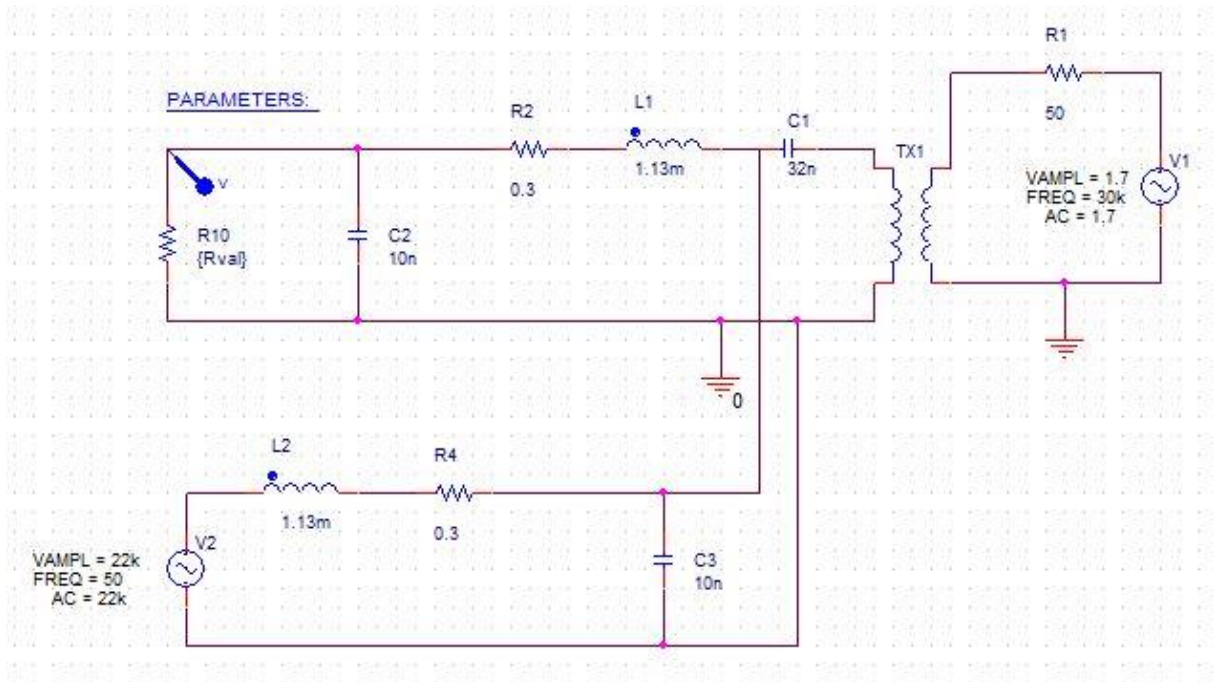
Obrázek 28: Časová analýza, a)



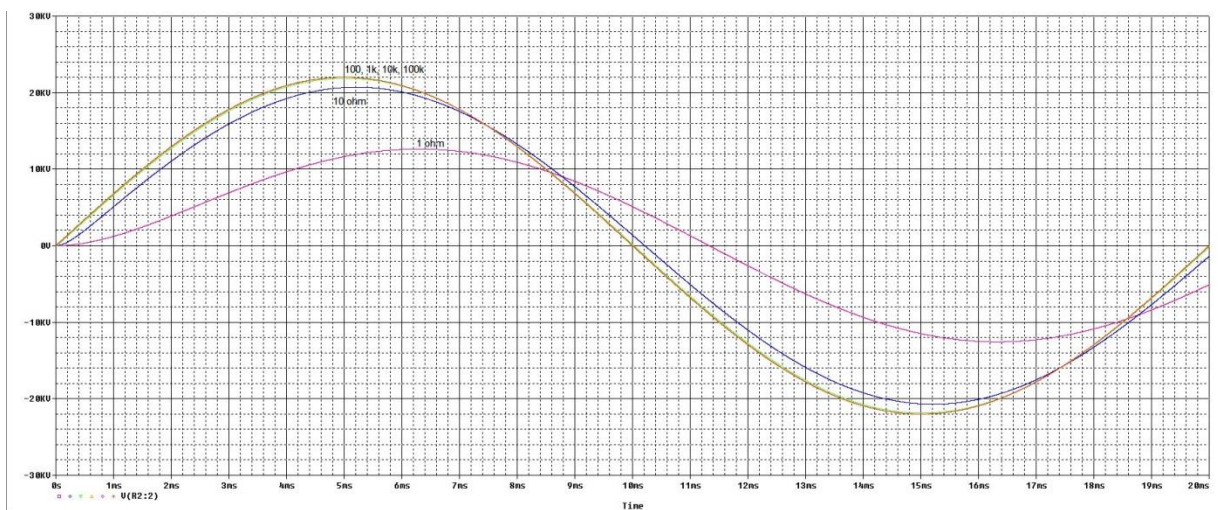
Obrázek 29: Časová analýza, detail, b)

Simulace a) názorně ukazuje, že na vedeních je opravdu napětí o amplitudě 22kV. Varianta b) je přibližný vrchol sinusovky o síťové amplitudě 22kV, na které je dobře vidět nasuperponovaný vf signál. Dále by pak mohl následovat opět vazební kondenzátor pro příjem signálu simulovaný v kapitole 4.1.

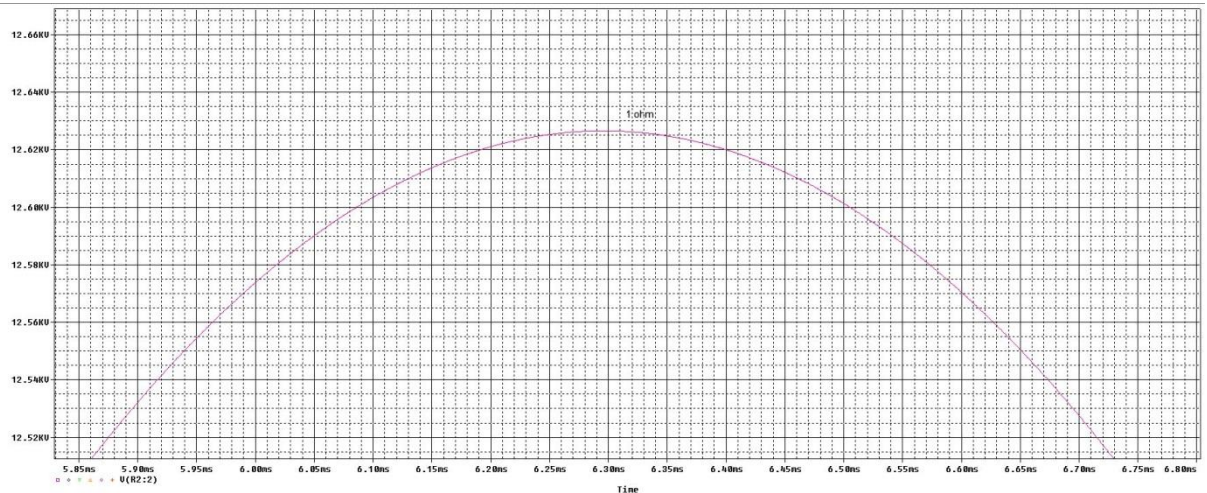
Předchozí simulace je pro případ, že vedení je nezátíženo. Ve skutečnosti bude k vedení vždy nějaká zátěž připojena. To jakou hodnotu a jakého charakteru by měla přesně být, není řešeno. Budeme uvažovat ideální odporovou zátěž s proměnnou velikostí. Ta bude nabývat hodnot 1,10,100,1k,10k a 100k $\Omega$ . Zapojení je ukázáno na obrázku 30.



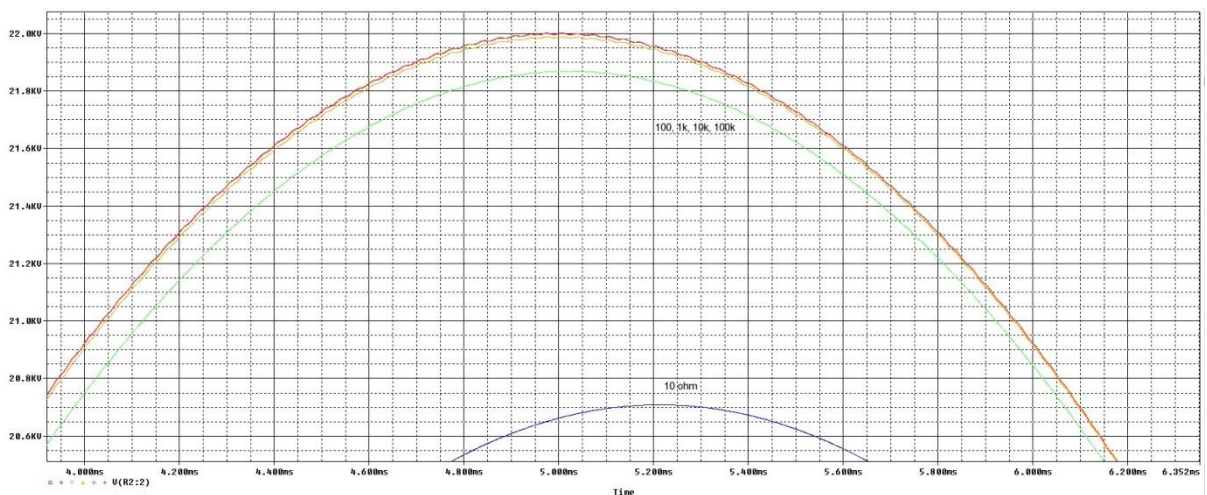
Obrázek 30: Navázání signálu - se zátěží



Obrázek 31: Časová analýza, a)



Obrázek 32: Časová analýza, b)



Obrázek 33: Časová analýza, c)

Na simulacích můžeme vidět, že s rostoucí zátěží (odpor nám klesá), se zvětšuje odebraný proud a zmenšuje se napětí na zátěži (obrázek 31). S tím souvisí i zvětšující se útlum signálu. Při zátěži  $1\Omega$  je vedení téměř zkratováno, protékající proud je velký a přenášený signál není téměř rozpoznatelný, jak se dá povšimnout na obrázku 32. Pro rostoucí odpor zátěže se útlum zmenšuje a signál je výraznější (obrázek 33). Tyto simulace nám potvrzují teorii v kapitole 2.3.1, že na útlum signálu má vliv i impedance zátěže.

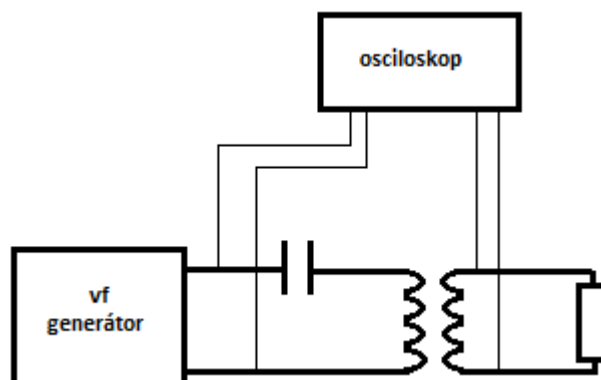


### 4.3 Měření

Poslední kapitola praktické části této práce, je fyzický návrh a jeho změřeni. Měřili jsme frekvenční charakteristiku zatíženého vazebního prvku pro příjem signálu. Tudiž, signál generovaný vf zdrojem jsme přivedli na vstup kondenzátoru, jehož výstup byl spojen s transformátorem zatíženým činným odporem. Pomocí osciloskopu se snímaly průběhy na vstupu a výstupu vazebního prvku. Pro sestavení obvodu se použil tantalový kondenzátor na 100V s hodnotou 33nF, vf transformátor od firmy Wurth electronic s převodem 1:1 (viz příloha 1) a rezistor o hodnotě 50Ω. Všechny součástky, spolu s přívodním vodičem od generátoru byli spájeny, aby se zamezilo zkreslení vlivem propojovacích vodičů. Schéma je možné vidět na obrázku 34.

Měření jsme zahájili na frekvenci 1kHz a zvyšovali ji, až do hodnoty 100kHz. Vstupní napětí bylo nastaveno na hodnotu 2,1V. Průběh zvyšování frekvence a odpovídající výstupní hodnota napětí je vidět v tabulce 1. Na obrázku 34 je poté průběh vykreslen. Výsledný graf lze porovnat se simulací na obrázku 18. Změřená křivka má oproti simulaci své maximum při frekvenci 14kHz. Tato odchylka je zapříčiněná několika faktory. Hrají zde roli reálné parametry přívodního vodiče, drobná odlišnost v hodnotě kondenzátoru a také jeho reálné vlastnosti, odlišná indukčnost TR a v neposlední řadě i nedokonalé spoje, mezi jednotlivými součástkami.

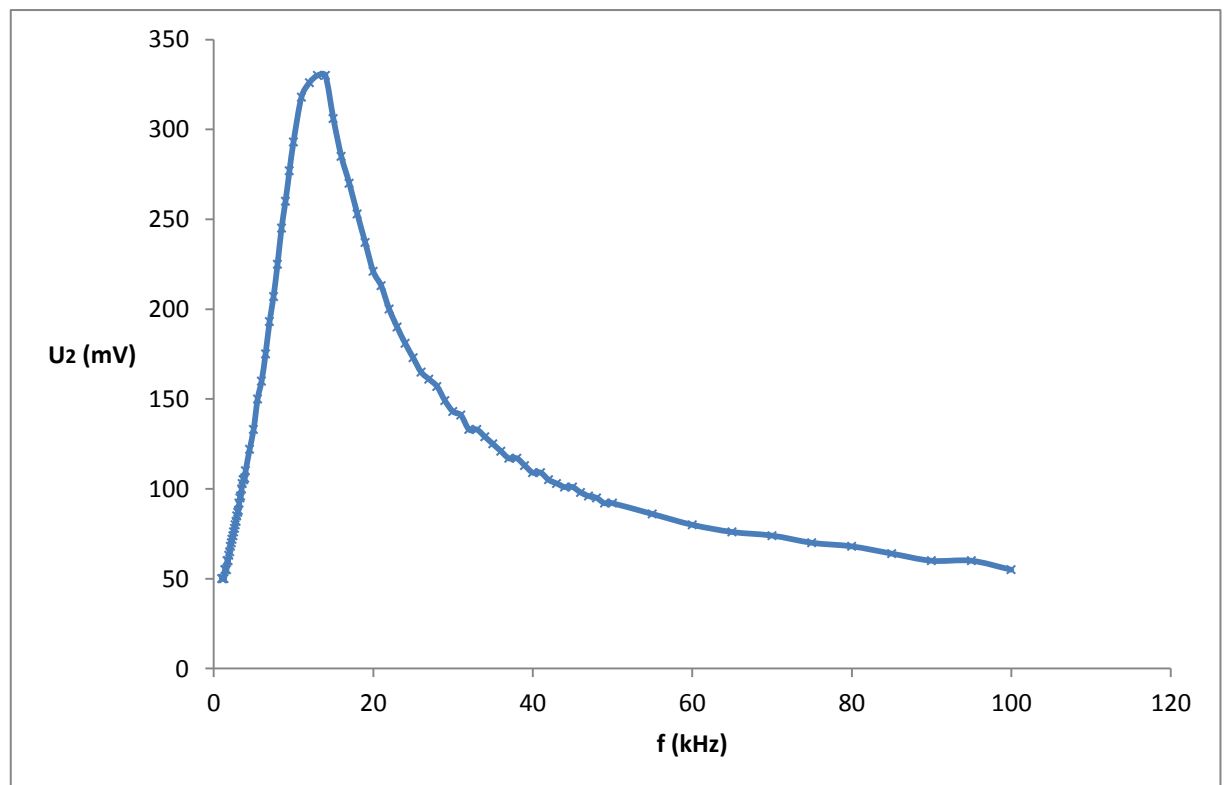
I přesto lze tvrdit, že vazební prvek funguje správně. Mimo naše používané pásmo (3 – 95kHz) má napětí na výstupu pouze velikost šumu a tak lze spolehlivě říci, že nám kondenzátor propustí pouze požadované frekvenční pásmo.



Obrázek 34: Schéma pro měření

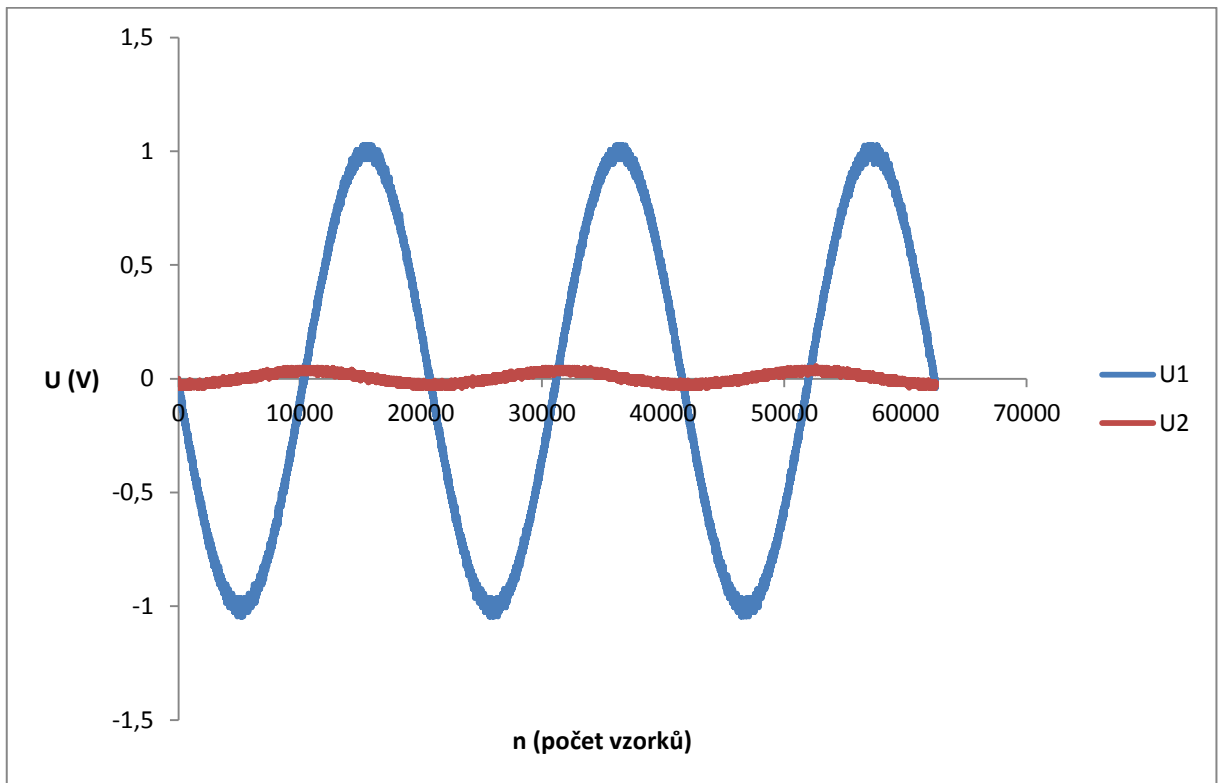
Tabulka 1 Měření výstupního napětí vzhledem k frekvenci

f (kHz)	U <sub>2</sub> (mV)	f (kHz)	U <sub>2</sub> (mV)	f (kHz)	U <sub>2</sub> (mV)	f (kHz)	U <sub>2</sub> (mV)	f (kHz)	U <sub>2</sub> (mV)
1	50	2,9	85	8	225	25	173	44	101
1,1	50	3	87	8,5	245	26	165	45	101
1,2	50	3,1	88	9	260	27	161	46	98
1,3	50	3,2	92	9,5	277	28	157	47	96
1,4	55	3,3	95	10	293	29	149	48	95
1,5	55	3,4	96	11	318	30	143	49	92
1,6	55	3,5	100	12	326	31	141	50	92
1,7	60	3,6	103	13	330	32	133	55	86
1,8	60	3,7	105	14	330	33	133	60	80
1,9	63	3,8	105	15	306	34	129	65	76
2	65	3,9	106	16	285	35	125	70	74
2,1	68	4	110	17	270	36	121	75	70
2,2	70	4,5	122	18	253	37	117	80	68
2,3	72	5	133	19	237	38	117	85	64
2,4	74	5,5	150	20	221	39	113	90	60
2,5	76	6	160	21	213	40	109	95	60
2,6	78	6,5	175	22	200	41	109	100	55
2,7	80	7	193	23	190	42	105		
2,8	82	7,5	207	24	181	43	103		

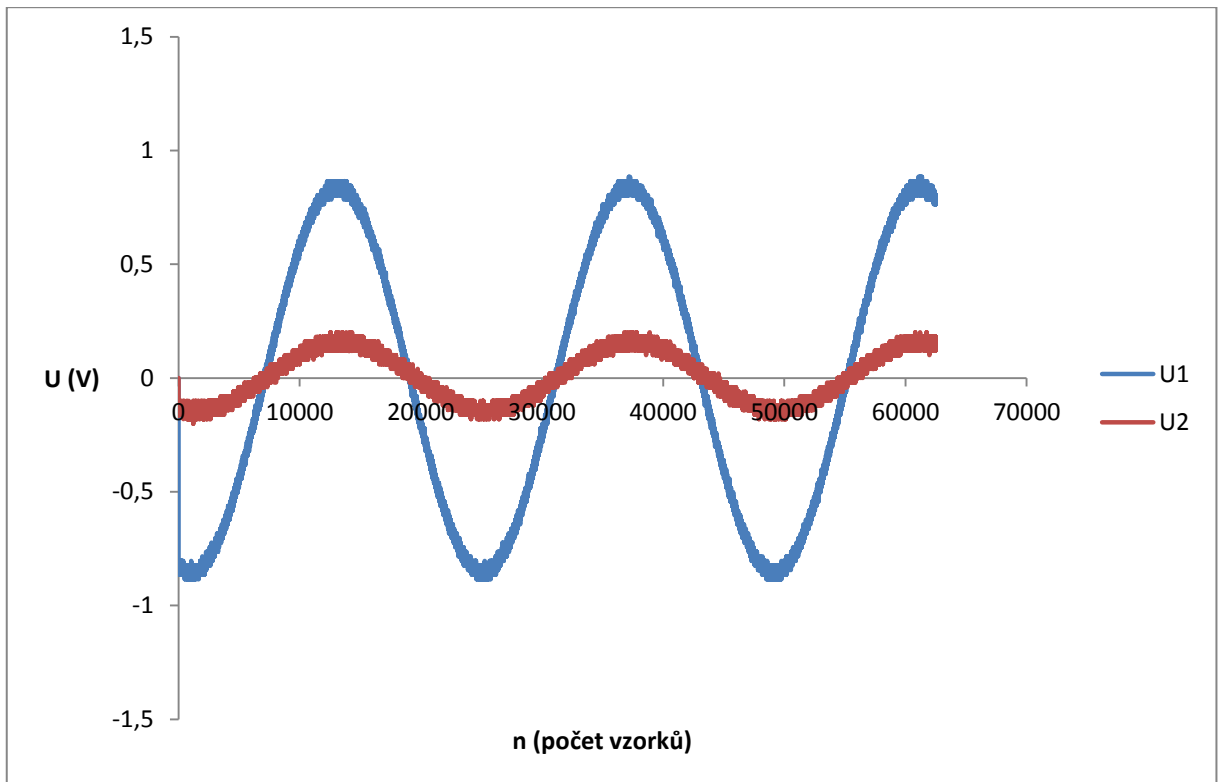


Obrázek 35: Frekvenční charakteristika

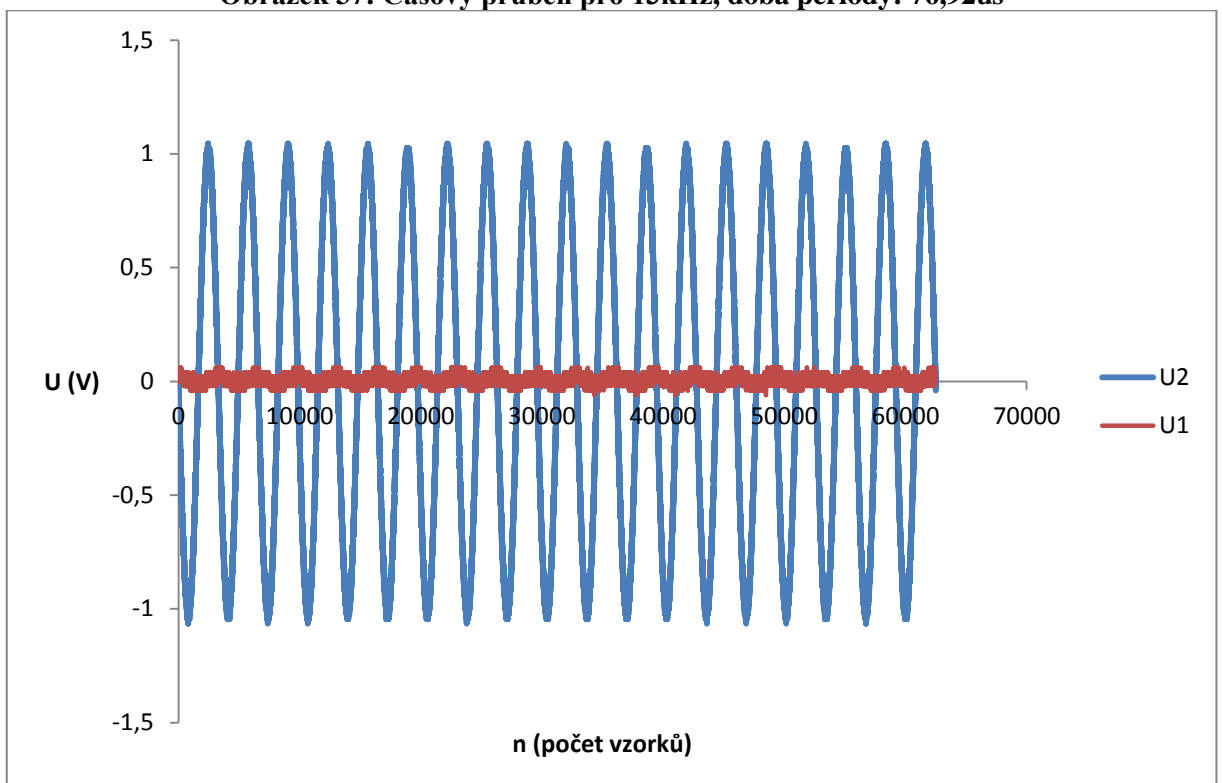
Nyní si pouze ilustrativně ukážeme, vykreslené průběhy z osciloskopu pro některé hodnoty měřené frekvence. Obrázek 36 je pro frekvenci 3kHz a je možné pozorovat, že výstupní průběh je nízký. Pouze 87mV. Obrázek 37 ukazuje výstupní napětí o největší amplitudě (330mV) pro frekvenci 14kHz. Poslední průběh (obrázek 38) odpovídá druhému kraji frekvenčního pásma, 95kHz, a opět vidíme malou hodnotu napětí, 60mV.



Obrázek 36: Časový průběh pro 3kHz, doba periody: 333,3 $\mu$ s



Obrázek 37: Časový průběh pro 13kHz, doba periody: 76,92us



Obrázek 38: Časový průběh pro 95kHz, doba periody: 10,53us

## 5 Zhodnocení

Úkolem práce bylo navrhnout a popsat vysokonapěťový vazební prvek pro komunikaci po silovém vedení 22kV. V prvních třech kapitolách je teoretický popis dané problematiky. Kapitola jedna se věnuje základním pojmům této oblasti. Jak je dělená, co vše pro přenos potřebujeme a jaké máme možnosti. Druhá kapitola se zaměřuje na softwarovou stránku věci. Popisuje problémy při tvorbě přenášeného signálu, jeho navázání a také například jak je rušen a tlumen. Obsahem třetí kapitoly pak je popis všech pasivních součástek, využívaných pro technologii komunikace po vedení.

Ve čtvrté kapitole, jsem se pokusil pomocí simulačního programu PSpice 16.6. demo, navrhnout a zjednodušeně ukázat fungování vazebního prvku a poté postavený zjednodušený model i fyzicky proměřit. Nejprve bylo potřeba vypočítat hodnotu samotného vazebního prvku. Pro ten jsem si zvolil pracovní frekvenci 30kHz z povoleného kmitočtového pásma a vyhledal reálný vf transformátor se vstupní indukčností 0,87mH. Vypočtená hodnota kondenzátoru vyšla 32nF. S touto hodnotou jsem provedl simulace. V kapitole 4.1 jsou uvedeny simulace přijmutí signálu. Zde je postupně ukázáno, že vazební kondenzátor skutečně nepropustí VN složku a na jeho výstup projde jen vf signál. Kapitola 4.2 pak ukazuje, navázání signálu do přenosového kanálu, tedy vedení. Největší problémy byly s tím, jaká zjednodušení přijmout, abych byl schopen simulace provést. Tím jsem tedy do návrhu zanesl nepřesnosti. Nejprve je jen demonstrativně ukázána správná funkce navázání, snímaná na uvažovaném konci nezátíženého vedení. Největší nepřesnosti vznikly při simulaci změny zátěže. Ta ve skutečnosti není pouze jedna a téměř vždy je mezi ní a vedením 22kV transformátor. Navíc, síť 22kV je nejčastěji provozována jako paprsková, tedy postupně jsou na ní připojeny zátěže o různé velikosti a charakteru a tak mohou být podmínky na vedení v různých místech velice odlišné. Pokud bych toto vše chtěl do simulací zahrnout, bylo by to velice náročné.

I přesto lze ze simulací vyvodit závěr. Potvrdilo se mi, že tato problematika funguje a informace je možné takto přenášet. Pouze je důležité přesně popsat chování daného vedení a dle toho upravit a zabezpečit vf signál.

V kapitole 4.3 je pak popsáno měření skutečného zapojení. Můžeme namítnout, že celá práce i samotné simulace se týká VN vazebního prvku a tak není správné, že měření proběhlo na NN součástkách. Tato námitka je zcela oprávněná, ovšem pro pouhé ověření mých

simulací jsou malovýkonové součástky plně dostačující. Získané výsledky při měření s prvky na VN, by se od uvedených výrazně nelišili, jelikož jediný parametr, který by se změnil, by byla elektrická pevnost a ta se v průběžích neprojevuje. Přesto byla snaha VN kondenzátor zajistit. Ovšem narazil jsem na nezáměr společností, pouze dvě z pěti na můj dotaz odpověděli a také cena, která se šplhá ke statisícům, je pro mé účely zbytečně vysoká. Rozhodně by to však mohl být dobrý námět na další bakalářskou, či diplomovou práci.

Z mého pohledu je tedy technologie komunikace po silovém vedení zajímavá a z některých hledisek rozhodně výhodná. Především kvůli nulové investici do přenosového kanálu a snadnému přístupu, do téměř všech míst v zemi, jelikož je elektrická síť velice rozsáhlá. Otázkou, kterou jsem se však ve své práci nezabýval je, jak si toto řešení stojí v porovnání celkových nákladů a požadovaných parametrů s ostatními technologiemi, jako je například bezdrátová komunikace, či optické kabely.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Hendrik C. Ferreira, Lutz Lampe, John Newbury and Theo G. Swart. Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines. 2010 John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-74030-9.
- [2] Mloyiswa P. Sibanda, Petrus A. Janse van Rensburg, and Hendrik C. Ferreira. A Compact Economical PLC Band-Pass Coupler with Impedance Matching. 2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Pp 339 – 344
- [3] Don Shaver. Low Frequency, Narrowband PLC Standards for Smart Grid – The PLC Standards Gap. Texas Instruments Incorporated.
- [4] Vítězslav Pankrác. Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice; Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice (Část 2). Elektrevue 1213-1539.
- [5] P.A. Janse Van Rensburg. Effective Coupling for Power-Line Communications. A dissertation submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment, as partial fulfilment of the requirements for the degree. January 2008
- [6] Bogdan Baraboi, Ariane Controls Inc. Narrowband Powerline Communication Applications and Challenges.
- [7] A Working Group Report From the H15 WG Of the H – Relaying Communications Subcommittee IEEE Power and Energy Society/Power Systems Relaying Committee. Redundancy in Coupling Power Line Carrier Channels to the Power Line. February 2011.
- [8] Dong-Seok In , Sugoog Shon, Jae-Jo Lee. A Study on the Implementation of Inductive Coupler with Rogowski Coil for BPLC. 2008 International Conference on Advanced Technologies for Communications. Pp 327 – 330.
- [9] resistorguide [online], [vid. 15.2.2015], dostupné z <http://www.resistorguide.com/materials/>
- [10] slideshare [online], [vid. 30.1.2015], dostupné z <http://www.slideshare.net/aishugenius/plc-30418817>

- [11] engineergarage [online], [vid. 6.3.2015], dostupné z  
<http://www.engineersgarage.com/articles/plcc-power-line-carrier-communication?page=4>



# Přílohy

SOLDER SUFFIX	CUSTOMER TERMINAL	RoHS	LEAD(Pb)-FREE	(6J)
	Sn100%	No	No	(6A)
LF3	Sn100%	Yes	Yes	

TERM. NO.'s FOR REF. ONLY

.110/.140 [2.79/3.58]

.025 SQ. (4) [.64]

SURFACE A IN RECOMMENDED GRID PART MUST INSERT FULLY TO

PRI (Line)      SEC (Modern)

.490 MAX. [12.45]

.945 MAX. [24.00]

.908 MAX. [23.00]

TAB LOCATES TERM. #3-4 SIDE

DOT LOCATES TERM #1 \*

82111 WE-MIDCOM

LOT CODE & DATE CODE

SOLDER SUFFIX

6.060(4) [1.52]

.550 [13.97]

.450 [11.43]

RECOMMENDED P.C. PATTERN, COMPONENT SIDE

**ELECTRICAL SPECIFICATIONS @ 25°C unless otherwise noted:**

**IMPEDANCE:** Designed to reflect 800 ohm on PRI with 470 ohm load on SEC.

**LONGITUDINAL BALANCE:** 66dB min., 80 - 1000Hz; 46dB min., 1-2, 1000 - 4000Hz; per FCC Part 68.310, with terminal 3 or 4 grounded.

**D.C. RESISTANCE (@20°C):** PRI, 100 ohms ±10%. SEC, 112 ohms ±10%.

**FREQUENCY RESPONSE:** ±1.0dB, 600Hz - 3600Hz; ±4.0dB, 300Hz - 600Hz.

**INSERTION LOSS:** 8.6dB max., 1000Hz, per IEEE method, 20°C, D - 80mADC.

**DIELECTRIC RATING:** 1600VAC, 1 minute tested by applying 1875VAC for 1 second between PRI - SEC.

**TURNS RATIO:** (4-3):(1-2) = 1:1, ±2%.

**OPERATING CONDITIONS:** All specs. except as noted to be from -20 to +40°C, 0 to 100mADC in PRI, 600 ohm source resistance on PRI, 470 ohm load on SEC.

Designed to comply with the following requirements as defined by IEC60050-1, EN60950-1, UL60950-1/CSA60950-1 and AS/NZS60950.1:  
 Supplementary insulation for a primary circuit at a working voltage of 250Vrms.

Midcom p/n 82111-LF3 is eSes p/n: 750082111

**OPERATING TEMPERATURE RANGE:** -40°C to +85°C.

\* Marking detail may be rotated 90° clockwise. Locating dot will not move.

DETAILS SUBJECT TO CHANGE

Příloha 1: Datasheet transformátoru