

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2014

David Škráček

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Simulace dlouhého vedení velmi vysokého napětí - laboratorní
úloha**

**Long extra high voltage power line simulation - laboratory
exercise**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **David Škráček**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Simulace dlouhého vedení velmi vysokého napětí - laboratorní úloha
Long extra high voltage power line simulation - laboratory exercise

Zásady pro vypracování:

Výpočet parametrů dlouhého vedení
Simulace vedení naprázdno, nakrátko, přirozený výkon
Teoretický rozbor laboratorní úlohy
Long power line parameters calculation
Simulation of short circuit, no-load and natural power states
Theory for laboratory exercise

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Rusek, S.: Teoretická elektroenergetika, VŠB, Ostrava, 1999.
2. Santarious, P.: Elektroenergetika I., VŠB, Ostrava, 1984.
3. Hradílek, Z.: Elektroenergetika, VŠB, Ostrava, 1992
4. Kočandrle, V.: Elektroenergetika, Praha, 1953

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 5. 5. 2014



.....

David Škráček

Poděkování:

Rád bych poděkoval panu Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt:

V téhle bakalářské práci je mým cílem přiblížit problematiku simulace dlouhého vedení velmi vysokého napětí, zejména pro přenos při stavech naprázdno, nakrátko a přirozený výkon.

V úvodu práce se zabývám historickým vývojem přenosu a rozvodu elektrické energie. Poté je zde popsána problematika parametrů vedení, a odvození teoretického výpočtu střídavého vedení velmi vysokého napětí.

V praktické části se snažím o výpočet náhradního schématu, simulaci pomocí programu QUCS a laboratorní měření. Vedení je řešeno pomocí π a T článku.

Klíčová slova:

Velmi vysoké napětí (vvn), činný odpor vedení, indukčnost vedení, kapacita vedení, svodová vodivost, T-článek, π -článek

Abstract:

My primary aim in this bachelor's thesis is to approximate the issue of simulation the long lines of very high voltages, especially in case of no-load transfer, short-circuit transfer and the transfer with natural load.

The introduction is concerning about historical progress in transfer and distribution of energy whereas the next chapter refers to matters of wiring parameters. In the last chapter, alternating current of very high voltages is derived by theoretical calculation.

In the practical part is an attempt at calculation of the substitution diagram, a simulation by QUCS program and the laboratory measurement. After all, the electric wiring is solved by π and T – network.

Key words:

Extra high voltage power, active wiring resistance, inductance wiring, capability of wiring, leaky conductance, T - network, π - network.

Popis některých použitých symbolů:

Značka	Popis	Jednotka
U_1	Napětí na začátku vedení (fázové)	(V)
U_2	Napětí na konci vedení (fázové)	(V)
I_1	Proud na začátku vedení	(A)
I_2	Proud na konci vedení	(A)
R	Činný odpor	(Ω)
L	Indukčnost	(H)
G	Svodová vodivost	(S)
C	Kapacita	(F)
Z	Podélná impedance	(Ω)
$\omega = 2\pi f$	Kruhová frekvence	(s^{-1})
F	Frekvence	(Hz)
Y	Příčná admitance	(S)
P	Měrný odpor vodiče	($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)
L	Délka vodiče	(m)
S	Průřez vedení	(mm^2)
R_{ϑ}	Činný odpor při teplotě ϑ	(Ω)
R_{20}	Činný odpor při teplotě 20°C	(Ω)
A	Teplotní součinitel odporu	(K^{-1})
$\Delta\vartheta$	Teplotní rozdíl od 20°C	(K)
R_Z	Činný odpor země	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
R	Poloměr vodiče	(km)
M	Vzájemná indukčnost	($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)
A	Vzdálenost mezi vodiči vodiče	(km)
U	Potenciál	(V)
Q	Náboj vodiče	($\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$)
E	Permitivita	($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)
P	Vzdálenost od vodiče	(m)
ρ_0	Vzdálenost od vodiče, ve které se předpokládá nulový potenciál	(m)
ΔP_s	Svodové ztráty	($\text{W} \cdot \text{km}^{-1}$)
U_f	Fázové napětí	(V)
U_s	Sdružené napětí	(V)
G_s	Svodová vodivost	($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)

Obsah

Úvod.....	1
1. Historický vývoj.....	2
2. Parametry vedení.....	3
2.1 Činný odpor vedení.....	4
2.2 Indukčnost vedení.....	5
2.3 Kapacita vedení.....	6
2.4 Svodová vodivost.....	6
3. Výpočet střídavých vedení vvn.....	7
3.1 Přesné řešení trojfázových vedení vvn.....	7
3.2 Náhrada střídavých vedení vvn soustředěnými parametry.....	10
3.2.1 Řešení pomocí náhradního T-článku.....	11
3.2.2 Řešení pomocí náhradního π -článku.....	12
4. Vypracování.....	14
4.1 Výpočet náhradního schématu vedení pomocí π a T článků.....	15
4.2 Simulace.....	20
4.3 Laboratorní měření.....	27
4.4 Porovnání výsledků.....	31
Závěr.....	33
Literatura.....	34

Úvod

Vedení velmi vysoké napětí je v rozsahu od 52 kV až po 300 kV. Používá se pro přenos velkých výkonů obvykle i na velké vzdálenosti, s co největší účinností přenosu energie. Přenos energie pomocí velmi vysokého napětí má řadu výhod, snadná distribuce až po možnost spojovat velké propojené soustavy, které vyvažují oblastní deficity.

Pomocí velmi vysokého napětí se výrazně snižují ztráty na vedení. Je to dáno tím, že: Přenesená energie je rovná součinu elektrického napětí a proudu, ale přenosové ztráty zaleží na druhé mocnině hodnoty proudu, zvýšením elektrického napětí v přenosové soustavě na dvojnásobek klesnou ztráty na jednu čtvrtinu. Pro přenos po vedení velmi vysokého napětí se většinou používá střídavý proud, ale u dálkových vedení se používá i stejnosměrný proud.

Úvodní kapitola poukazuje na historický vývoj vedení. Druhá kapitola poukazuje na parametry vedení - činný odpor, indukčnost, kapacita vedení, svodová vodivost. Následující kapitola poukazuje na teoretický výpočet střídavých sítí velmi vysokého napětí.

Ve své bakalářské práci se zabývám výpočtem vedení velmi vysokého napětí pomocí π a T článku. Simulací vedení velmi vysokého napětí v programu Qucs. Laboratorním měřením vedení velmi vysokého napětí.

1. Historický vývoj

Historický vývoj přenosu a rozvodu elektrické energie je svázán s historií elektrotechniky a zejména s vývojem elektrických strojů a elektrických spotřebičů. Počátky rozvoje lze najít na začátku 19. století, kdy Siemensův vynález dynamoelektrického stroje v roce 1866 umožňoval výrobu elektrické energie ve větším množství a tím podnítil rozvoj elektroenergetiky. V devadesátých letech vznikaly první elektrárny, u nás vznikla první stejnosměrná elektrárna v roce 1884 v Praze – Žižkově.

První pokusy s přenosem elektrické energie započaly v roce 1873 – stejnosměrný přenos na 2 km ve Vídni, pak přenos z Mnichova do Miesbachu v roce 1882 na vzdálenost 57 km se stejnosměrným napětím 1,5 kV.

K dalšímu rozvoji dochází přechodem na střídavý proud, což bylo podmíněno vynálezem transformátoru v roce 1886 Nikolou Teslou a vynálezem asynchronního motoru v roce 1888 Dolivo Dobrovolskij. V roce 1891 uskutečnil Dolivo Dobrovolskij přenos výkonu 170 kW mezi Lauferem a Frankfurtem na vzdálenost 175 km střídavým trojfázovým proudem s napětím 16 kV. Systém byl napájen trojfázovými generátory a obsahoval i transformátor a asynchronní motory. Na tehdejší dobu to byla z hlediska technického provedení mimořádná událost.

Zvyšováním přenášených výkonů i přenosových vzdáleností vyvolalo zvyšování provozních napětí elektrického vedení. Už v roce 1908 byl v USA uskutečněn přenos vysokým napětím 110 kV. Dále pak vývoj pokračoval takto:

1923 – přenos napětím 220 kV - USA

1952 – přenos napětím 380 kV - Švédsko

1955 – přenos napětím 500 kV - SSSR

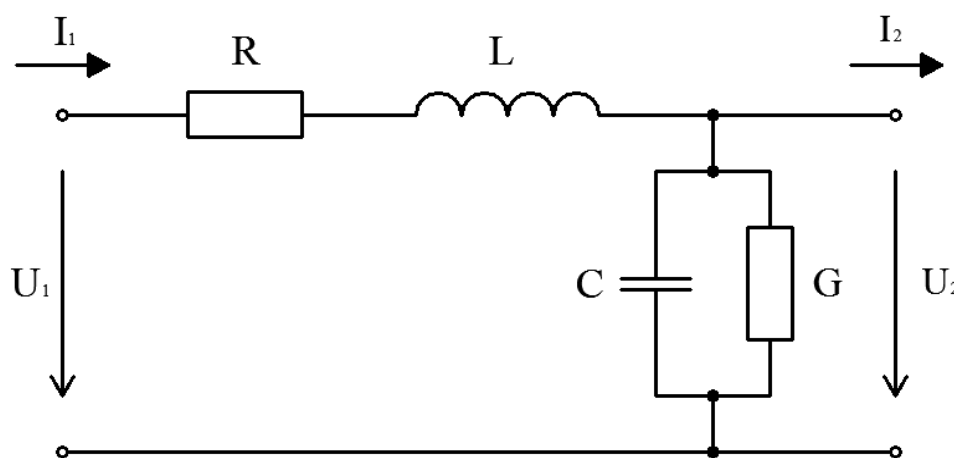
1958 – přenos napětím 740 kV - Kanada

Problémy při přenosu elektrické energie velmi vysokým napětím střídavým (stabilita, velké zkratové výkony, atp.) vyvolaly potřebu rozvoje stejnosměrného přenosu. Potřebná zařízení jsou moc nákladná, a proto se stejnosměrné přenosy používají jen na velké vzdálenosti. První zkušební přenos byl uskutečněn v roce 1951 v SSSR za Kaširy do Moskvy na vzdálenost 112 km – přenos 30 MW stejnosměrným napětím 200 kV. [3]

2. Parametry vedení

Při studiu jevů v elektrických a magnetických obvodech je základní úlohou stanovení jejich parametrů. Při řešení se opíráme o zavedení parametrů jednotlivých úseků obvodu, viz obr. 3.1. V obecném případě mají vodiče čtyři parametry:

- Činný odpor R
- Indukčnost L
- Kapacitu C
- Svodovou vodivost G



Obr. 2. 1.: Jednofázový model vedení s uvedenými jednotlivými parametry [1]

U výpočtu stejnosměrných vedení bude brán v úvahu jeden parametr a to bude činný odpor. U výpočtu střídavých vedení velmi vysokého napětí budou brány všechny čtyři parametry vedení.

Činný odpor a indukčnost vedení tvoří podélnou impedanci, dle vztahu (2.1).

$$\hat{Z} = R + j\omega L \quad (2.1)$$

Reálnou část podélné impedance tvoří činný odpor, imaginární část tvoří induktivní reaktance.

Kapacita vedení a svodová vodivost tvoří příčnou admitanci, dle vztahu (2.2).

$$\hat{Y} = G + j\omega C \quad (2.2)$$

Reálnou část podélné impedance tvoří svodová vodivost, imaginární část tvoří kapacitní admitance. [1]

2.1 Činný odpor vedení

Činný odpor vedení je závislý na vodivém materiálu vedení. Činný odpor vedení je přímo úměrný měrnému odporu vedení, délce vedení a nepřímo úměrný průřezu vedení, dle vztahu (2.3).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.3)$$

Činný odpor se udává při teplotě 20°C, je totiž teplotně závislý. Pro vodiče platí, že odpor s rostoucí teplotou roste a naopak. Tuto závislost zohledňuje teplotní součinitel odporu α . Pro odpor libovolné teploty platí vztah (2.4).

$$R_g = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta) \quad (2.4)$$

Činný odpor vedení při průchodu střídavým proudem se především uplatní vliv skinefektu, který způsobuje nerovnoměrné rozložení proudu v průřezu vodiče a v tom důsledku se zvětšuje odpor vodiče, dle vztahu (2.5).

$$R_{\text{STR}} = k \cdot R_{\text{SS}} \quad (2.5)$$

Pro činitel k platí následující empirické vztahy pro hliník a měď (2.6, 2.7).

$$k_{\text{Al}} = 1 + 1,04 \cdot f^2 \cdot S^2 \cdot 10^{-10} \quad (2.6) ; k_{\text{Cu}} = 1 + 0,405 \cdot f^2 \cdot S^2 \cdot 10^{-10} \quad (2.7)$$

Pro průmyslové kmitočty je ovšem zvýšení odporu nepatrné a není s ním obvykle uvažováno. Protože se v elektrických sítích používají jako vodiče především lana, je použití základního vztahu pro činný odpor problematické. Výrobce vodiče určena stanovená hodnota činného odporu vztažená na jednotku délky R_K . Pro výsledný odpor lana pak platí vztah (2.8).

$$R = R_K \cdot l \quad (2.8)$$

Ke stanovení skutečného činného odporu vodiče bychom měli respektovat i další vlivy, např. prodloužení vodiče vlivem průhybu, vlivem kroucení dílčích vodičů u lan, odchylky skutečného průřezu od jmenovitého. Obvykle se přesné stanovení odporu provádí měřením vodiče. [1]

Činný odpor země

V místě ve kterém proud vstupuje do země nebo z ní vystupuje, závisí poměry převážně na uspořádání elektrod a elektrického odporu půdy přechodových vrstev země, která je obecně nehomogenní. Empiricky bylo zjištěno, že činný odpor země při průchodu střídavým proudem závisí na kmitočtu a lze jej stanovit ze vztahu (2.9). Pro síťový kmitočet 50 Hz je činný odpor země $0,05 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. [1] [6]

$$R_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad (2.9)$$

2.2 Indukčnost vedení

Indukčnost je zpětný vliv magnetických polí proudu na vedení. U vodiče kruhového průřezu, kterým protéká elektrický proud je obklopen magnetickými siločarami. Odvození indukčnosti vedení vychází ze znalostí řešení elektromagnetického pole. Rozlišujeme vlastní indukčnost vodiče a vzájemnou indukčnost mezi jednotlivými vodiči. Pro vlastní indukčnost vodiče lze odvodit následující vztah, který udává indukčnost vztaženou na jednotku délky vodiče (zpravidla na kilometr), dle vztahu (2.10).

$$L = 0,46 \log \frac{2l}{r} - 0,1 \quad (2.10)$$

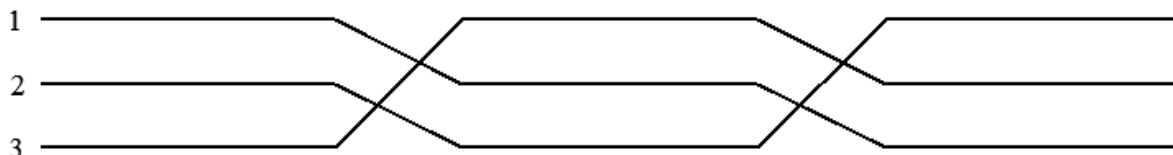
Pro vzájemnou indukčnost na kilometr platí vztah (2.11).

$$M = 0,46 \log \frac{2l}{a} - 0,2 \quad (2.11)$$

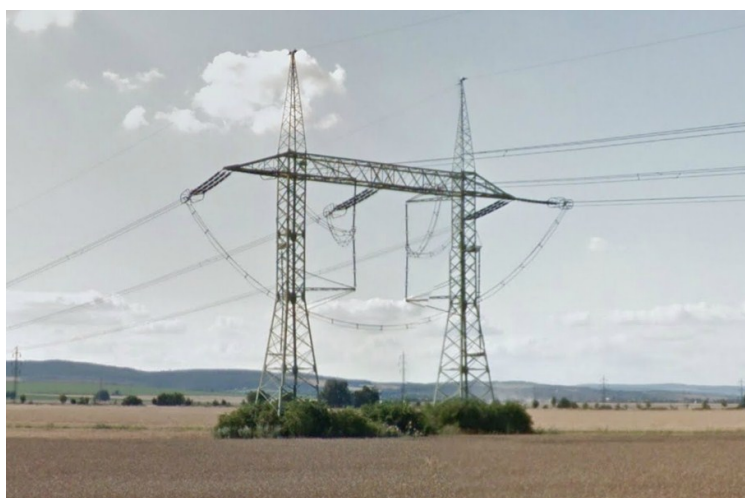
Oba uvedené vztahy již v sobě zahrnují hodnotu permeability. [1] [4]

Transpozice jednoduchého trojfázového vedení

Transpozicí vedení myslíme, že vyměníme polohy vodičů tak, že každý vodič je výsledně v určité poloze na stožáru v jedné třetině délky, viz obr. 3. 2. Jeden zákut se provádí do 200 km délky vedení, na 300 km vedení je pak proveden plný zákut. [1] [2]



Obr. 2. 2.: Provedení zákutu [1]



Obr. 2. 3.: Provedení zákutu na stožáru [7]

2.3 Kapacita vedení

Kolem vodiče se vytváří elektrické pole, které působí na okolní vodiče i na vodič samotný. Proto vykazuje každé vedení také kapacitu. Odvozením kapacity vedení vychází ze znalostí řešení elektromagnetického pole. Při stanovení kapacity vedení se jedná o soustavu stejných vodičů značné délky oproti ostatním rozměrům. Vodiče jsou přímkové, rovnoběžné navzájem i s povrchem země. Základním vztahem, ze kterého vycházíme při odvození kapacity vedení, je vztah pro elektrický potenciál (2.12). [1] [5]

$$U = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad (2.12)$$

2.4 Svodová vodivost

Svodová vodivost způsobuje na vedení činné ztráty výkonu, které jsou nezávislé na zatížení, ale jsou značně závislé na napětí. Ztráty způsobené svodovou vodivostí se dělí na ztráty přes izolaci a ztráty korónou, které zpravidla převládají. Jsou závislé na napětí a povětrnostních vlivech, nedají se vyjádřit fyzikálními vzorci. Hodnota svodového odporu je velká a obvykle se v praxi uvažuje až u vedení velmi vysokého napětí. Svod se obvykle uvádí v hodnotách svodových ztrát na kilometr, dle vztahu (2.13).

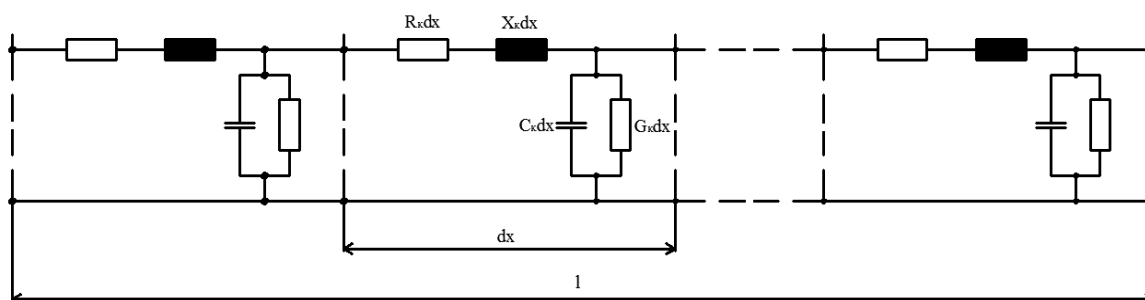
$$\Delta P_s = 3 \cdot U_f^2 \cdot G_s = U_s^2 \cdot G_s \quad (2.13)$$

Z předchozího vztahu si vyjádříme svodovou vodivost (2.14). [6] [1]

$$G_s = \frac{\Delta P_s}{U_s^2} \quad (2.14)$$

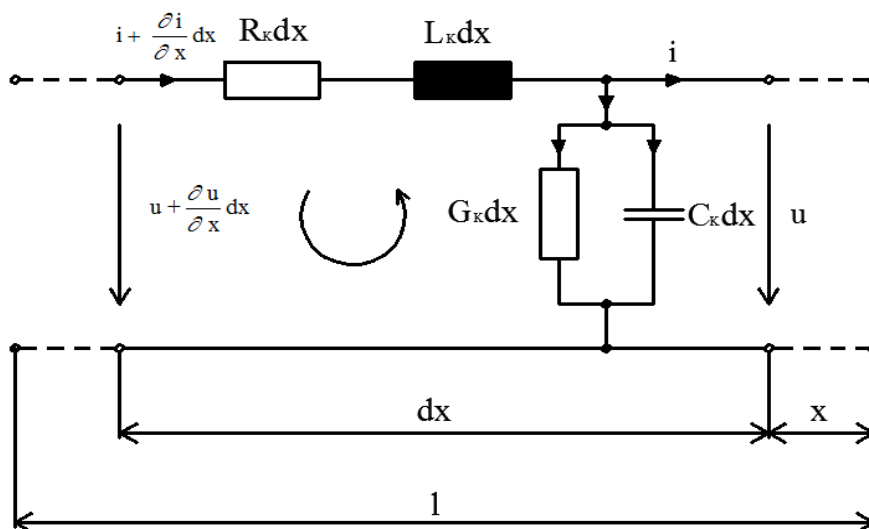
3. Výpočet střídavých vedení vvn

Při řešení vedení nás zajímají poměry na jednom konci vedení při zadaných poměrech na druhém konci. Pro přesné řešení je nutno respektovat kromě podélné impedance i příčnou admitanci, neboť u nejvyšších napětí jsou proudy podélnými větvemi srovnatelné s příčnými větvemi. Parametry vedení uvažujeme s rovnoměrně rozloženými parametry. Pro objasnění poměrů na vedení uvažujeme, že vedení délky l je rozděleno na nekonečné množství elementárních částí o délce dx dle obr. 4. 1. [3]



Obr. 3. 1.: Vedení rozděleno na nekonečné množství elementárních částí [3]

3.1 Přesné řešení trojfázových vedení vvn



Obr. 3. 2.: Náhradní schéma pro řešení trojfázového vedení vvn [3]

Pro řešení předpokládáme symetrické uspořádání i symetrické zatížení vedení, a proto další řešení bude jednofázové. Element homogenního vedení délky dx , který je ve vzdálenosti x od konce vedení má náhradní schéma dle obr. 4. 2. U tohoto elementu vedení jsou na konci proud $i(x)$ a napětí $u(x)$. Na začátku vedení ve vzdálenosti $(x+dx)$ od konce vedení je pak proud $i(x+dx)$ a napětí $u(x+dx)$. Pomocí Taylorovy řady lze pak např. napětí (obdobně i proud) na začátku elementu vedení vyjádřit dle vztahu (3.1).

$$u(x+dx) = u(x) + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx^2 + \dots \quad (3.1)$$

zanedbáme-li členy rozvoje s vyššími mocninami dx .

S využitím Kirchhoffových zákonů lze element vedení odvodit tyto vztahy (3.2, 3.3).

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u - R_k i dx - R_k \frac{\partial i}{\partial x} dx^2 - L_k \frac{\partial i}{\partial t} dx - L_k \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} dx^2 = 0 \quad (3.2)$$

$$i + \frac{\partial i}{\partial x} dx - i - G_k u dx - C_k \frac{\partial u}{\partial t} dx = 0 \quad (3.3)$$

Po úpravě a zanedbání členů s dx^2 dostaneme základní rovnice vedení, které vyjadřují časovou a prostorovou závislost napětí a proudu (3.4, 3.5).

$$\frac{\partial u}{\partial x} = R_k i + L_k \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = G_k u + C_k \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.5)$$

Rovnice můžeme dále derivovat dle vztahu (3.6)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R_k \frac{\partial i}{\partial x} + L_k \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} ; \quad \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = G_k \frac{\partial u}{\partial t} + C_k \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.6)$$

po dosazení (3.7).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_k C_k \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (R_k C_k + L_k G_k) \frac{\partial u}{\partial t} + R_k G_k u \quad (3.7)$$

Obdobně (3.8)

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = G_k \frac{\partial u}{\partial x} + C_k \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} ; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = R_k \frac{\partial i}{\partial t} + L_k \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

po dosazení (3.9).

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_k G_k \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (R_k C_k + L_k G_k) \frac{\partial u}{\partial t} + R_k G_k i \quad (3.9)$$

Matematické úpravy vedou k rovnicím určujícím fázory napětí a proudu v libovolné vzdálenosti x od počátku vedení. Napětí jsou fázová. Základními rovnicemi pro přesné řešení dlouhých střídavých vedení vvn. Máme-li hodnoty napětí na začátku vedení a zajímají nás hodnoty na začátku, dle vztahu (3.10, 3.11).

$$\hat{U}_{2f} = \hat{U}_{1f} \cosh(\hat{\gamma} l) + \hat{Z}_v \hat{I}_1 \cosh(\hat{\gamma} l) \quad (3.10)$$

$$\hat{I}_{2f} = \frac{\hat{U}_{1f}}{\hat{Z}_v} \cosh(\hat{\gamma} l) + \hat{I}_1 \cosh(\hat{\gamma} l) \quad (3.11)$$

Podle analogie se základními rovnicemi čtyřpólů (3.12, 3.13).

$$\hat{U}_1 = \hat{A} \hat{U}_2 + \hat{B} \hat{I}_2 \quad (3.12)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{C} \hat{U}_2 + \hat{D} \hat{I}_2 \quad (3.13)$$

můžeme stanovit Blondelovy konstanty (3.14, 3.15, 3.16, 3.17).

$$\hat{A} = \cosh(\hat{\gamma} l) = \cosh(l\sqrt{\hat{Z}_k \hat{Y}_k}) \quad (3.14)$$

$$\hat{B} = \hat{Z}_v \sinh(\hat{\gamma} l) = \frac{\hat{Z}_k}{\hat{Y}_k} \sinh(l\sqrt{\hat{Z}_k \hat{Y}_k}) \quad (3.15)$$

$$\hat{C} = \frac{1}{\hat{Z}_v} \sinh(\hat{\gamma} l) = \sqrt{\frac{\hat{Y}_k}{\hat{Z}_k}} \sinh(l\sqrt{\hat{Z}_k \hat{Y}_k}) \quad (3.16)$$

$$\hat{D} = \hat{A} \quad (3.17)$$

Činitel šíření γ

Je definována vztahem (3.18).

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\hat{Z}_k \hat{Y}_k} = \sqrt{(R_k + j\omega C_k)(G_k + j\omega L_k)} = \alpha + j\beta \quad (3.18)$$

Činitel šíření je obecně komplexní veličina, kde reálnou část tvoří α nazýváme konstantou útlumu (určuje míru změny amplitudy proudu nebo napětí na jednotku délky vedení) a imaginární část β nazýváme fázovou konstantou (určuje uhlové natočení proudu nebo napětí na jednotku délky). [3]

Vlnová impedance vedení Z_v

Je definována vztahem (3.19).

$$\hat{Z}_v = \sqrt{\frac{\hat{Z}_k}{\hat{Y}_k}} = \sqrt{\frac{R_k + j\omega L_k}{G_k + j\omega C_k}} \quad (3.19)$$

Charakterizuje přenosovou schopnost systému (přenos přirozeného výkonu). Obecně má komplexní charakter, pouze při zanedbání R_k a G_k (bezztrátové vedení) má charakter činného odporu. V případě, že vedení bude na konci zatíženo odběrovou impedancí rovnou vlnové impedanci, bude vedením přenášen tzv. *přirozený výkon* a z hlediska energetického přenosu je to optimální stav. Při tomto přenosu jsou minimální ztráty způsobené pouze odporem vedení a v případě bezztrátového vedení by napětí na začátku a konci vedení byla stejná. Je-li přenášený výkon menší než přirozený, bude napětí na konci vedení vyšší než na jeho začátku. Je-li přenášený výkon větší než přirozený, bude napětí na konci vedení nižší než na jeho začátku. [3]

Přirozený výkon

Je komplexní veličina, ovšem vzhledem k převaze činné složky nad jalovou bývá přirozený výkon chápán jako čistě činný. Velikost přirozeného výkonu závisí na kvadrátu provozního napětí. Vlnová impedance bývá u venkovního vedení 270 – 400 Ω , zatímco u kabelového přibližně 20 – 80 Ω . Z toho vyplývá, že přirozený výkon kabelového vedení je přibližně desetkrát větší než venkovního. Je definován vztahem (3.20). [3]

$$\hat{S}_p = \frac{U_2^2}{\hat{Z}_v} \quad (3.20)$$

3.2 Náhrada střídavých vedení vvn soustředěnými parametry

Pro orientační výpočty a pro kreslení náhradních schémat sítí se používají náhradní články. V podstatě se jedná o pasivní čtyřpóly, kde proud a napětí na začátku (I_1, U_{1f}) a na konci (I_2, U_{2f}) jsou navzájem vázané vztahy (3.21, 3.22).

$$\hat{U}_{1f} = \hat{A} \hat{U}_{2f} + \hat{B} \hat{I}_2 \quad (3.21)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{C} \hat{U}_{2f} + \hat{D} \hat{I}_2 \quad (3.22)$$

Blondelovy konstanty jsou vázány vztahem (3.23).

$$\hat{A} \cdot \hat{D} - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (3.23)$$

Jestliže je čtyřpól symetrický lze zaměnit výstupní a vstupní svorky, aniž by se změnila přenosové poměry), platí vztah (3.24).

$$\hat{A} = \hat{D} \quad (3.24)$$

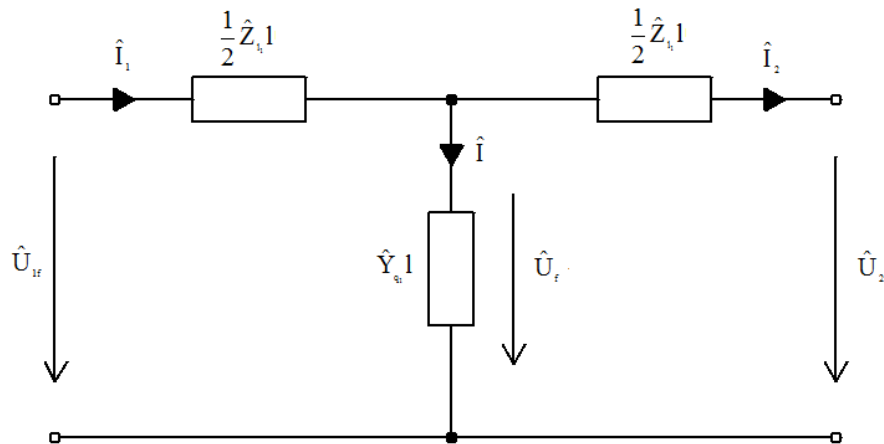
A rovnice se zjednoduší na tvar (3.25).

$$\hat{A}^2 - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (3.25)$$

Vedení vvn nahrazujeme několika typy pasivních náhradních článků, které nazýváme podle vnitřního uspořádání (t-článek, π -článek). Všechny použité náhradní články jsou symetrické. [3]

3.2.1 Řešení pomocí náhradního T-článku

T-článek se vytvoří tak, že se podélná impedance rozdělí na dvě stejné části a příčná admittance se umístí uprostřed vedení, viz obr. 3. 3.



Obr. 3. 3.: Náhradní schéma T-článku [5]

Napětí na začátku vedení (3.26).

$$\hat{U}_{1f} = \hat{U}_{2f} + \frac{1}{2} \hat{Z}_1 \hat{I}_2 + \frac{1}{2} \hat{Z}_1 \hat{I}_1 \quad (3.26)$$

Proud na začátku vedení (3.27).

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 + i \quad (3.27)$$

po úpravě vztahu napětí na začátku (3.28).

$$\hat{U}_{1f} = \hat{U}_{2f} \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \hat{Y}_{q1} l^2}{2}\right) + \hat{I}_2 \hat{Z}_1 l \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \hat{Y}_{q1} l^2}{4}\right) \quad (3.28)$$

po úpravě vztahu proudu na začátku (3.29).

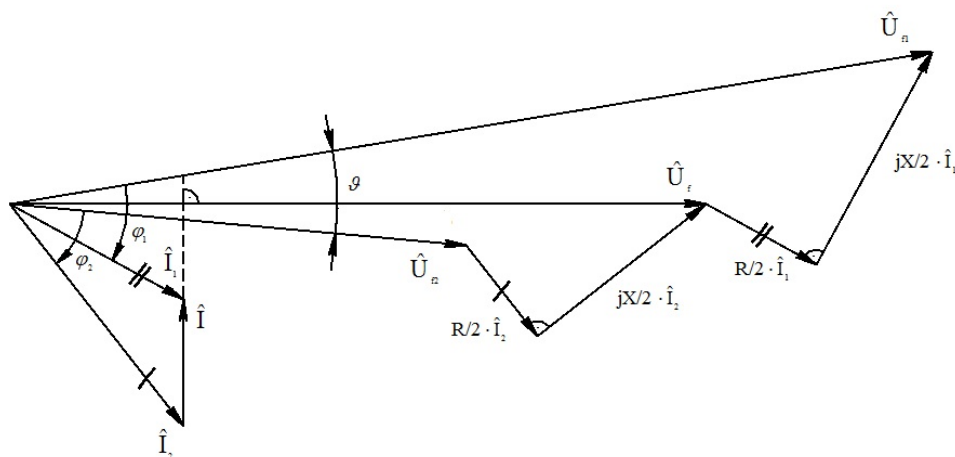
$$\hat{I}_1 = \hat{U}_{2f} \hat{Y}_{q1} l + \hat{I}_2 \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \hat{Y}_{q1} l^2}{2}\right) \quad (3.29)$$

Srovnáním s předchozími vztahy, lze stanovit Blondelovy konstanty (3.30, 3.31, 3.32). [5]

$$\hat{A}_T = \hat{D}_T = 1 + \frac{\hat{Z}_1 \hat{Y}_{q1} l^2}{2} \quad (3.30)$$

$$\hat{B}_T = \hat{Z}_1 l \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \hat{Y}_{q1} l^2}{4}\right) \quad (3.31)$$

$$\hat{C}_T = \hat{Y}_{q1} \cdot 1 \quad (3.32)$$

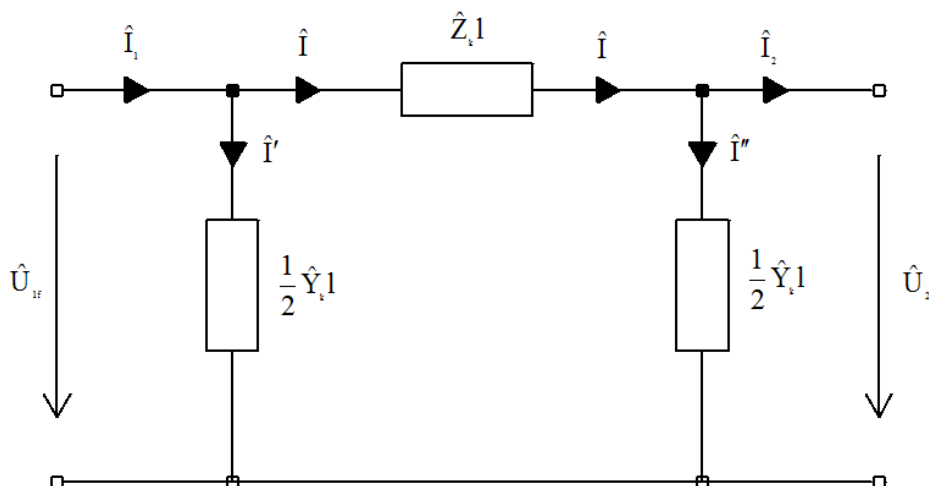


Obr. 3. 4.: Fázorový diagram T-článku [4]

Napětíové a proudové poměry jsou zřejmé z fázorového diagramu na obr. 3. 3., u kterého jsme pro zjednodušení předpokládali v příčné větvi pouze kapacitu a zanedbali jsme svodovou vodivost ($G=0$). [3]

3.2.2 Řešení pomocí náhradního π -článku

π -článek se vytvoří tak, že podélná impedance se soustředí do středu, příčná admittance se rozdělí na polovinu a umístí na začátek a konec vedení dle náhradního schématu, viz obr. 3. 5.

Obr. 3. 5.: Náhradní schéma π -článku [3]

Napětí na začátku (3.33).

$$\hat{U}_{1f} = \hat{U}_{2f} + \hat{Z}_k \hat{I}_1 \quad (3.33)$$

Proud na začátku (3.34):

$$\hat{I}_1 = \hat{I}' + \hat{I}'' + \hat{I}_2 \quad (3.34)$$

po úpravě vztahu napětí na začátku (3.35).

$$\hat{U}_{1f} = \hat{U}_{2f} \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \hat{Y}_k l^2}{2}\right) + \hat{I}_2 \hat{Z}_k l \quad (3.35)$$

po úpravě vztahu proudu na začátku (3.36).

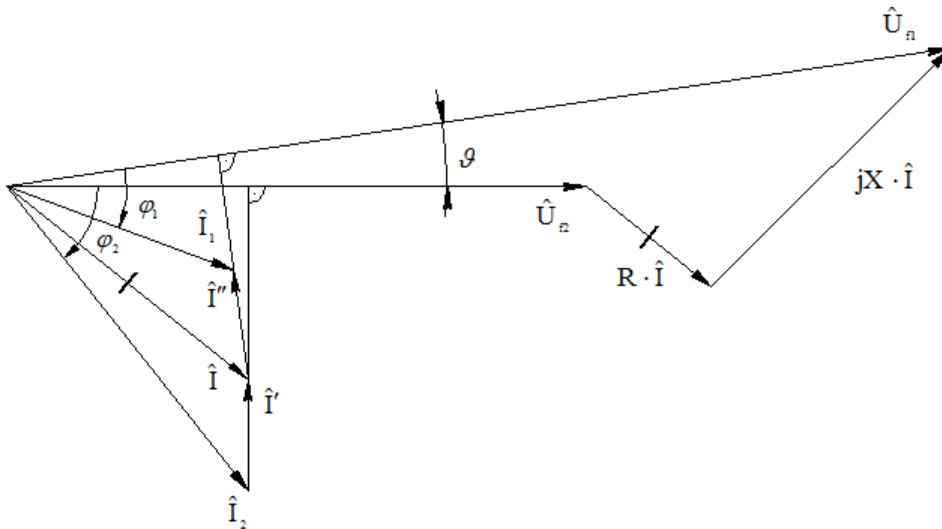
$$\hat{I}_1 = \hat{U}_{2f} \hat{Y}_k l \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \hat{Y}_k l^2}{4}\right) + \hat{I}_2 \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \hat{Y}_k l^2}{2}\right) \quad (3.36)$$

Srovnáním s předchozími vztahy, lze stanovit Blondelovy konstanty (3.37, 3.38, 3.39).

$$\hat{A}_\pi = \hat{D}_\pi = 1 + \frac{\hat{Z}_k \hat{Y}_k l^2}{2} \quad (3.37)$$

$$\hat{B}_\pi = \hat{Z}_k l \quad (3.38)$$

$$\hat{C}_\pi = \hat{Y}_k l \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \hat{Y}_k l^2}{4}\right) \quad (3.39)$$



Obr. 3. 6.: Fázorový diagram π -článku [3]

Napět'ové a proudové poměry jsou zřejmé z fázorového diagramu na obr. 3. 6. (při zanedbání svodu G). [3]

4. Vypracování

Zadání

1. Měřením na modelu určete velikost proudu, napětí, výkonu a účinníku na začátku vedení při odběru 100 % zadaného výkonu P_2 při $\cos \varphi_2 = 1$.
2. Sestrojte grafickou závislost veličin na začátku vedení na hodnotě Z .

Teoretický rozbor

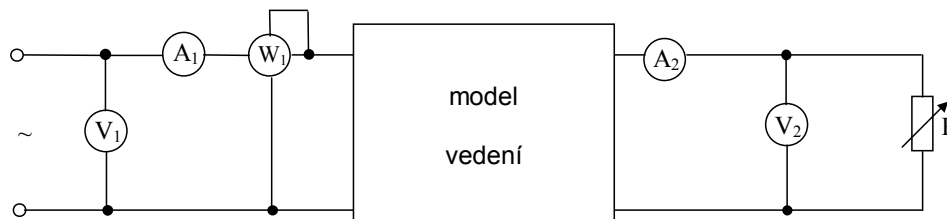
Přenosové vedení lze řešit jednofázově jako souměrný pasivní čtyřpól. Vedení je možno nahradit různými články (T, Π) a popsat soustavou rovnic (4.1, 4.2):

$$\bar{U}_1 = \bar{A}\bar{U}_2 + \bar{B}\bar{I}_2 \quad (4.1)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C}\bar{U}_2 + \bar{D}\bar{I}_2 \quad (4.2)$$

$\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ jsou tzv. Blondelovy konstanty vedení. Pro souměrný čtyřpól, tedy i pro vedení platí: $\bar{A} = \bar{D}$

Schéma zapojení:



Obr. 4. 1.: Schéma zapojení

Postup měření

1. Provést zapojení dle schématu.
2. Vypočítat modelové hodnoty proudů a napětí na konci vedení pro $P_2 = 100\%$ zadaného výkonu P_2 . (Příklad výkonu: $P_2 = 120$ MW.)
3. Pomocí proměnlivé zátěže R a zdroje napětí nastavit modelové hodnoty na konci vedení a odečíst příslušné hodnoty na začátku vedení.

Parametry modelu

$3 \times 220 / 127$ kV, $l = 280$ km, $R_k = 0,15 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $X_k = 0,5 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $B_k = 3 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$

$m_U = 10^{-3}$, $m_I = 10^{-3}$, $m_Z = 1$

4.1 Výpočet náhradního schématu vedení pomocí π a T článků

a) Řešení pomocí T-článku:

Proud na konci vedení vypočtený pomocí P_2 (4.3):

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_{2n} \cdot \cos \varphi_2} = \frac{120 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3} = \underline{\underline{314,918 A}} \quad (4.3)$$

Výpočet impedance a admitance vedení (4.4, 4.5):

$$\bar{Z}_K = R_K + jX_K = (0,15 + j 0,5) = \underline{\underline{0,522 \angle 73,3^\circ \Omega \cdot km^{-1}}} \quad (4.4)$$

$$\bar{Y}_K = G_K + jB_K = j 3 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{3 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ S \cdot km^{-1}}} \quad (4.5)$$

Určení Blondelových konstant (4.6, 4.7, 4.8):

$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{2} = 1 + \frac{(0,15 + j 0,5) \cdot j 3 \cdot 10^{-6} \cdot 280^2}{2} = (0,941 + j 0,018) = \underline{\underline{0,941 \angle 1,096^\circ}} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \bar{Z}_K \cdot \ell \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{4} \right) = (0,15 + j 0,5) \cdot 280 \cdot \left(1 + \frac{(0,15 + j 0,5) \cdot j 3 \cdot 10^{-6} \cdot 280^2}{4} \right) \\ &= (39,53 + j 136,25) = \underline{\underline{141,869 \angle 73,821^\circ S}} \quad (4.7) \end{aligned}$$

$$\bar{C} = \bar{Y}_K \cdot \ell = j 3 \cdot 10^{-6} \cdot 280 = j 8,4 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{8,4 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \Omega}} \quad (4.8)$$

Přenos vedení naprázdno:

Proud na konci vedení (4.9):

$$I_2 = \underline{\underline{0 A}} \quad (4.9)$$

Napětí a proud na začátku vedení (4.10, 4.11):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,941 + j 0,018) \cdot 127 \cdot 10^3 + (39,53 + j 136,25) \cdot 0 = \\ &= (1,195 \cdot 10^5 + j 2,24 \cdot 10^3) = \underline{\underline{119520,992 \angle 1,074^\circ V}} \quad (4.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = j 8,4 \cdot 10^{-4} \cdot 127 \cdot 10^3 + (0,941 + j 0,018) \cdot 0 \\ &= (0 + j 106,68) = \underline{\underline{106,68 \angle 89,463^\circ A}} \quad (4.11) \end{aligned}$$

Účinník (4.12, 4.13):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 1,074 - (89,463) = \underline{\underline{-88,389^\circ}} \quad (4.12)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-88,389^\circ) = \underline{\underline{0,028}} \quad (4.13)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (4.14):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 119520,992 \cdot 106,68 \cdot 0,028 = \underline{\underline{1,071 MW}} \quad (4.14)$$

Přenos vedení nakrátko:

Proud na konci vedení (4.15)::

$$I_2 = \underline{\underline{314,918 A}} \quad (4.15)$$

Napětí na konci vedení (4.16)::

$$U_2 = \underline{\underline{0 V}} \quad (4.16)$$

Napětí a proud na začátku vedení (4.17, 4.18):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,941 + j 0,018) \cdot 0 + (39,53 + j 136,25) \cdot 314,918 = \\ &= (12,449 \cdot 10^3 + j 42,908 \cdot 10^3) = \underline{\underline{44677,445 \angle 73,821^\circ V}} \quad (4.17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = j 8,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0 + (0,941 + j 0,018) \cdot 314,918 = \\ &= (296,338 + j 5,669) = \underline{\underline{296,392 \angle 1,096^\circ A}} \quad (4.18) \end{aligned}$$

Účinnost (4.19, 4.20):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 73,821 - (1,096) = \underline{\underline{72,745^\circ}} \quad (4.19)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(72,745^\circ) = \underline{\underline{0,297}} \quad (4.20)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (4.21):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 44677,445 \cdot 296,392 \cdot 0,297 = \underline{\underline{11,799 MW}} \quad (4.21)$$

Přenos přirozeného výkonu:

Vlnová impedace (4.22):

$$\bar{Z}_V = \sqrt{\frac{\bar{Z}_K}{\bar{Y}_K}} = \sqrt{\frac{(0,15 + j 0,5)}{j 3 \cdot 10^{-6}}} = (412,72 - j 60,574) = \underline{\underline{417,141 \angle -8,35^\circ \Omega}} \quad (4.22)$$

Zdánlivý výkon na konci vedení (4.23):

$$S_2 = \frac{U_2^2}{Z_V} = \frac{(220 \cdot 10^3)^2}{(412,72 - j 60,574)} = (114,8 \cdot 10^6 + j 16,85 \cdot 10^6) = \underline{\underline{116,03 \cdot 10^6 \angle 8,35^\circ VA}} \quad (4.23)$$

Proud na konci vedení (4.24):

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{(116,03 \cdot 10^6 + j 16,85 \cdot 10^6)}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3} = (301,27 + j 44,217) = \underline{\underline{304,498 \angle 8,35^\circ A}} \quad (4.24)$$

Napětí a proud na začátku vedení (4.25, 4.26):

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,941 + j 0,018) \cdot 127 \cdot 10^3 + (39,53 + j 136,25) \cdot (301,27 + j 44,217) = \\ &= (1,254 \cdot 10^5 + j 4,504 \cdot 10^4) = \underline{\underline{133243,242 \angle 19,757^\circ V}} \quad (4.25)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = j 8,4 \cdot 10^{-4} \cdot 127 \cdot 10^3 + (0,941 + j 0,018) \cdot (301,27 + j 44,217) = \\ &= (282,77 + j 153,61) = \underline{\underline{321,799 \angle 28,512^\circ A}} \quad (4.26)\end{aligned}$$

Účinník (4.27, 4.28):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 19,757 - (28,512) = \underline{\underline{-8,755^\circ}} \quad (4.27)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-8,755^\circ) = \underline{\underline{0,988}} \quad (4.28)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (4.29):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 133243,242 \cdot 321,799 \cdot 0,988 = \underline{\underline{127,089 MW}} \quad (4.29)$$

Činný výkon odebíraný z vedení (4.30):

$$P_2 = 3 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 127000 \cdot 304,498 \cdot 0,989 = \underline{\underline{114,738 MW}} \quad (4.30)$$

Ztráty ve vedení (4.31):

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 127,089 \cdot 10^6 - 114,738 \cdot 10^6 = \underline{\underline{12,351 MW}} \quad (4.31)$$

Účinnost (4.32):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{114,738 \cdot 10^6}{127,089 \cdot 10^6} \cdot 100 = \underline{\underline{90,282 \%}} \quad (4.32)$$

b) Řešení pomocí π -článku:

Určení Blondelových konstant (4.33, 4.34, 4.35):

$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{2} = 1 + \frac{(0,15 + j 0,5) \cdot j 3 \cdot 10^{-6} \cdot 280^2}{2} = (0,941 + j 0,018) = \underline{\underline{0,941 \angle 1,096^\circ}} \quad (4.33)$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_K \cdot \ell = (0,941 + j 0,018) \cdot 280 = (42 + j 140) = \underline{\underline{146,164 \angle 73,301^\circ S}} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned}\bar{C} &= \bar{Y}_K \cdot \ell \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{4} \right) = (j 3 \cdot 10^{-6}) \cdot 280 \cdot \left(1 + \frac{(0,15 + j 0,5) \cdot j 3 \cdot 10^{-6} \cdot 280^2}{4} \right) = \\ &= -7,407 \cdot 10^{-6} + j 8,153 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{8,153 \cdot 10^{-4} \angle 89,479^\circ \Omega}} \quad (4.35)\end{aligned}$$

Přenos vedení naprázdno:

Proud na konci vedení (4.36):

$$I_2 = \underline{\underline{0 \text{ A}}} \quad (4.36)$$

Napětí a proud na začátku vedení (4.37, 4.38):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,941 + j 0,018) \cdot 127 \cdot 10^3 + (39,53 + j 136,25) \cdot 0 = \\ &= (1,195 \cdot 10^5 + j 2,24 \cdot 10^3) = \underline{\underline{119520,992 \angle 1,074^\circ V}} \quad (4.37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (-7,407 \cdot 10^{-6} + j 8,153 \cdot 10^{-4}) \cdot 127 \cdot 10^3 + (0,941 + j 0,018) \cdot 0 = \\ &= (-0,941 + j 103,543) = \underline{\underline{103,547 \angle 89,479^\circ A}} \quad (4.38) \end{aligned}$$

Účinitík (4.39, 4.40):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 1,074 - (89,479) = \underline{\underline{-88,405^\circ}} \quad (4.39)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-88,405^\circ) = \underline{\underline{0,028}} \quad (4.40)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (4.41):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 119520,992 \cdot 103,547 \cdot (0,028) = \underline{\underline{1,04 \text{ MW}}} \quad (4.41)$$

Přenos vedení nakrátko:

Proud na konci vedení (4.42):

$$I_2 = \underline{\underline{314,918 \text{ A}}} \quad (4.42)$$

Napětí na konci vedení (4.43):

$$U_2 = \underline{\underline{0 \text{ V}}} \quad (4.43)$$

Napětí a proud na začátku vedení (4.44, 4.45):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,941 + j 0,018) \cdot 0 + (42 + j 140) \cdot 314,918 = \\ &= (13,227 \cdot 10^3 + j 44,089 \cdot 10^3) = \underline{\underline{46030,354 \angle 73,3^\circ V}} \quad (4.44) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (-7,407 \cdot 10^{-6} + j 8,153 \cdot 10^{-4}) \cdot 0 + (0,941 + j 0,018) \cdot 314,918 = \\ &= (296,338 + j 5,669) = \underline{\underline{296,392 \angle 1,096^\circ A}} \quad (4.45) \end{aligned}$$

Účinitík (4.46, 4.47):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 73,3 - (1,096) = \underline{\underline{72,204^\circ}} \quad (4.46)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(72,745^\circ) = \underline{\underline{0,306}} \quad (4.47)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (4.48):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 46030,354 \cdot 296,338 \cdot 0,306 = \underline{\underline{12,522 MW}} \quad (4.48)$$

Přenos přirozeného výkonu:

Vlnová impedance (4.49):

$$\overline{Z}_V = \sqrt{\frac{\overline{Z}_K}{\overline{Y}_K}} = \sqrt{\frac{(0,15 + j0,5)}{j3 \cdot 10^{-6}}} = (412,72 - j60,574) = \underline{\underline{417,141 \angle -8,35^\circ \Omega}} \quad (4.49)$$

Zdánlivý výkon na konci vedení (4.50):

$$S_2 = \frac{U_2^2}{\overline{Z}_V} = \frac{(220 \cdot 10^3)^2}{(412,72 - j60,574)} = (114,8 \cdot 10^6 + j16,85 \cdot 10^6) = \underline{\underline{116,03 \cdot 10^6 \angle 8,35^\circ VA}} \quad (4.50)$$

Proud na konci vedení (4.51):

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U_S} = \frac{(116,03 \cdot 10^6 + j16,85 \cdot 10^6)}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3} = (301,27 + j44,217) = \underline{\underline{304,498 \angle 8,35^\circ A}} \quad (4.51)$$

Napětí a proud na začátku vedení (4.52, 4.53):

$$\begin{aligned} \overline{U}_1 &= \overline{A} \cdot \overline{U}_{2f} + \overline{B} \cdot \overline{I}_2 = (0,941 + j0,018) \cdot 127 \cdot 10^3 + (42 + j140) \cdot (301,27 + j44,217) = \\ &= (1,26 \cdot 10^5 + j4,628 \cdot 10^4) = \underline{\underline{134230,542 \angle 20,168^\circ V}} \quad (4.52) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{I}_1 &= \overline{C} \cdot \overline{U}_{2f} + \overline{A} \cdot \overline{I}_2 = (-7,407 \cdot 10^{-6} + j8,153 \cdot 10^{-4}) \cdot 127 \cdot 10^3 + (0,941 + j0,018) \cdot (301,27 + j44,217) = \\ &= (281,83 + j150,47) = \underline{\underline{319,483 \angle 28,098^\circ A}} \quad (4.53) \end{aligned}$$

Účinník (4.54, 4.55):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 20,168 - (28,098) = \underline{\underline{-7,93^\circ}} \quad (4.54)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-7,93^\circ) = \underline{\underline{0,99}} \quad (4.55)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (4.56):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 134230,542 \cdot 319,483 \cdot 0,99 = \underline{\underline{127,366 MW}} \quad (4.56)$$

Činný výkon odebíraný z vedení (4.57):

$$P_2 = 3 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 127000 \cdot 304,498 \cdot 0,989 = \underline{\underline{114,738 MW}} \quad (4.57)$$

Ztráty ve vedení (4.58):

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 127,336 \cdot 10^6 - 114,738 \cdot 10^6 = \underline{\underline{12,598 MW}} \quad (4.58)$$

Účinnost (4.59):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{114,738 \cdot 10^6}{127,366 \cdot 10^6} \cdot 100 = \underline{\underline{90,106 \%}} \quad (4.59)$$

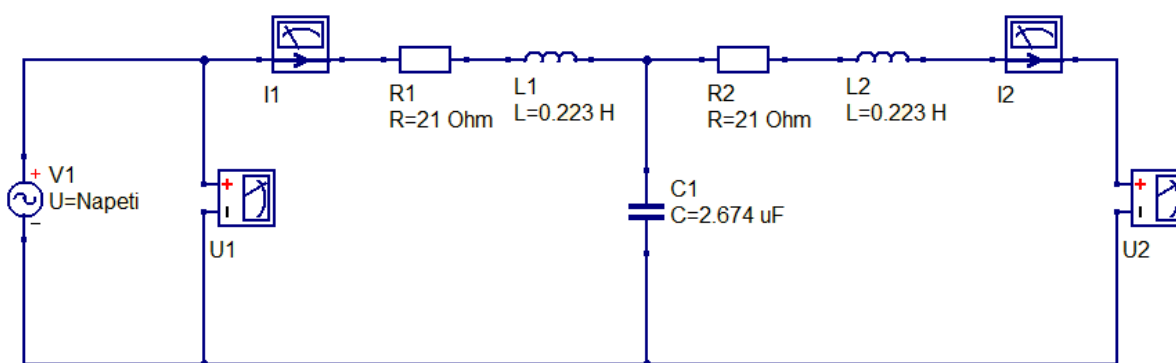
4.2 Simulace

Simulaci vedení provádíme pomocí programu Qucs, ve kterém si vytvoříme model obvodu. Pomocí bloku AC-Simulace zajišťujeme výpočet ustáleného chodu sítě. Primárně slouží pro zjišťování frekvenčních charakteristik, pro naše potřeby je frekvence zafixována na 50Hz. Blok Variace parametru zajišťuje výpočet variant, které nás zajímají. V našem případě počítá AC-Simulaci s názvem AC1. Měníme parametr zátěžného odporu R3 tím, že proměnná Zátěž přiřazuje nastavené hodnoty odporu. Odpor R3 se mění v rozsahu od 1 do 1500 Ω a cívka L3 je zafixována na 0,0001 H. Pro simulace naprázdno a nakrátko měníme parametr zdroje V1 tím, že proměnné Napětí přiřazuje nastavené hodnoty napětí. Nasimulované hodnoty jsou v maximálních hodnotách, pro nás si hodnoty musíme přepočítat na efektivní hodnoty.

a) Řešení pomocí T-článku:

Přenos vedení naprázdno:

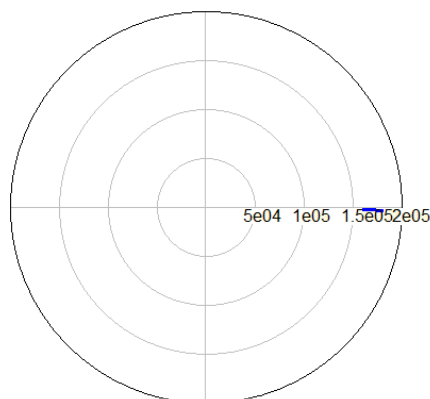
Schéma:



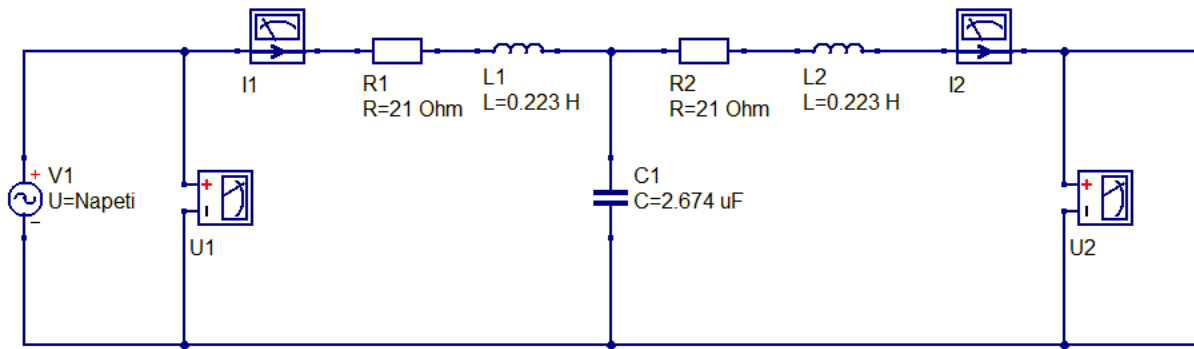
Obr. 4. 2.: Simulační model vedení T-článku naprázdno

Tab. 1: Simulované hodnoty

Napeti	U1	I1	P1	U2	I2	P2	Q2	ϕ_1
1.5e05	1.06e+05	94.7	5.78e+05	1.13e+05	0	0	0	-88.9
1.52e05	1.08e+05	96	5.95e+05	1.14e+05	0	0	0	-88.9
1.54e05	1.09e+05	97.3	6.11e+05	1.16e+05	0	0	0	-88.9
1.56e05	1.11e+05	98.7	6.29e+05	1.17e+05	0	0	0	-88.9
1.59e05	1.12e+05	100	6.46e+05	1.19e+05	0	0	0	-88.9
1.61e05	1.14e+05	101	6.65e+05	1.21e+05	0	0	0	-88.9
1.63e05	1.15e+05	103	6.83e+05	1.22e+05	0	0	0	-88.9
1.65e05	1.17e+05	104	7.03e+05	1.24e+05	0	0	0	-88.9
1.68e05	1.19e+05	106	7.22e+05	1.26e+05	0	0	0	-88.9
1.7e05	1.2e+05	107	7.43e+05	1.28e+05	0	0	0	-88.9



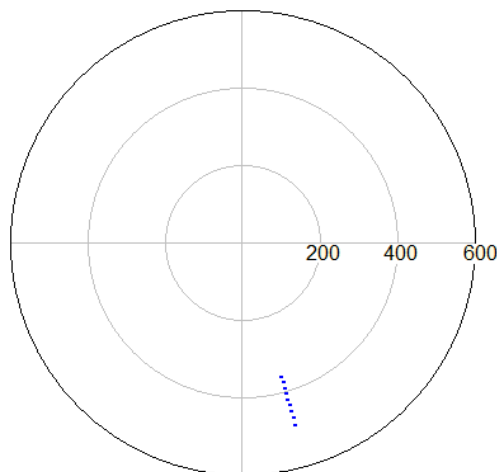
Obr. 4. 3.: Kruhový diagram proudu U_2

Přenos vedení nakrátko:

Obr. 4. 4.: Simulační model vedení T-článku nakrátko

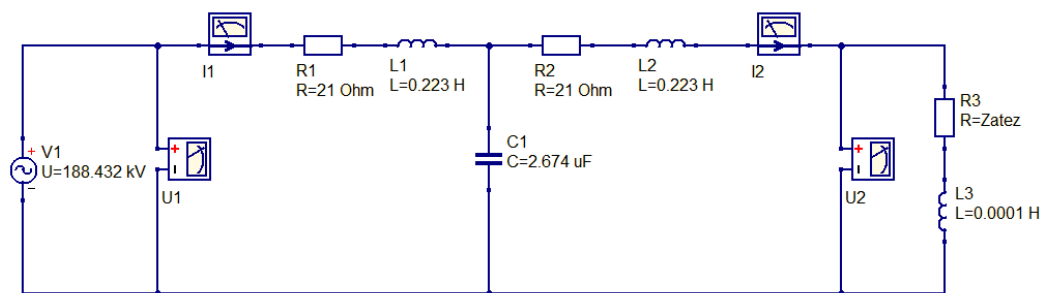
Tab. 2: Simulované hodnoty

Napeti	U1	I1	P1	U2	I2	P2	Q2	φ_1
5e04	3.54e+04	234	7.36e+06	0	249	0	0	72.8
5.19e04	3.67e+04	243	7.93e+06	0	259	0	0	72.8
5.39e04	3.81e+04	253	8.55e+06	0	268	0	0	72.8
5.59e04	3.96e+04	262	9.21e+06	0	279	0	0	72.8
5.81e04	4.11e+04	272	9.93e+06	0	289	0	0	72.8
6.03e04	4.26e+04	283	1.07e+07	0	300	0	0	72.8
6.26e04	4.42e+04	293	1.15e+07	0	312	0	0	72.8
6.5e04	4.59e+04	305	1.24e+07	0	324	0	0	72.8
6.74e04	4.77e+04	316	1.34e+07	0	336	0	0	72.8
7e04	4.95e+04	328	1.44e+07	0	349	0	0	72.8

Obr 4. 5.: Kruhový diagram proudu I_2

Přenos přirozeného výkonu:

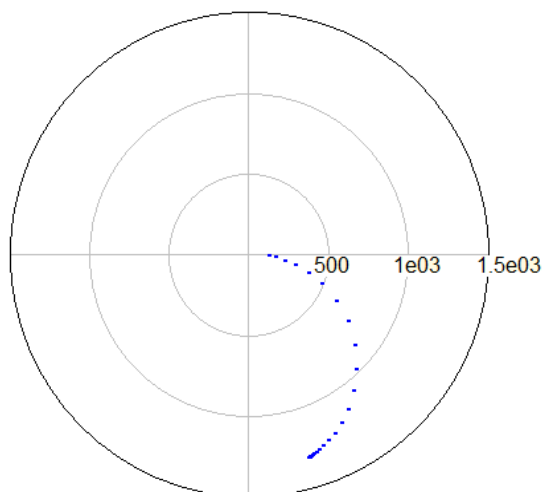
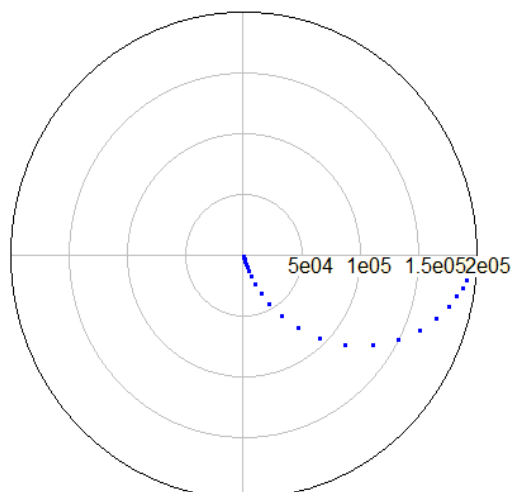
Schéma:



Obr. 4. 6.: Simulační model vedení T-článku přirozený výkon

Tab. 3: Simulované hodnoty

Zatez	U1	I1	U2	I2	P1	P2	Q2	ϕ_1
1	1.33e+05	881	937	936	3.52e+08	-5.96e+05	2.56e+06	72.4
1.36	1.33e+05	881	1.27e+03	936	3.52e+08	8.6e+05	3.46e+06	72.2
1.84	1.33e+05	880	1.72e+03	935	3.52e+08	2.69e+06	4e+06	72
2.49	1.33e+05	879	2.33e+03	934	3.51e+08	4.9e+06	4.31e+06	71.7
3.38	1.33e+05	877	3.15e+03	932	3.51e+08	7.6e+06	4.47e+06	71.4
4.59	1.33e+05	875	4.27e+03	930	3.5e+08	1.1e+07	4.55e+06	70.9
6.22	1.33e+05	872	5.76e+03	926	3.49e+08	1.54e+07	4.57e+06	70.2
8.44	1.33e+05	868	7.78e+03	922	3.47e+08	2.1e+07	4.55e+06	69.3
11.4	1.33e+05	862	1.05e+04	915	3.44e+08	2.84e+07	4.51e+06	68.1
15.5	1.33e+05	854	1.41e+04	906	3.41e+08	3.8e+07	4.43e+06	66.5
21.1	1.33e+05	842	1.88e+04	894	3.36e+08	5.03e+07	4.31e+06	64.4
28.6	1.33e+05	825	2.5e+04	876	3.3e+08	6.56e+07	4.14e+06	61.6
38.7	1.33e+05	801	3.29e+04	850	3.2e+08	8.39e+07	3.9e+06	57.9
52.5	1.33e+05	768	4.28e+04	814	3.07e+08	1.04e+08	3.58e+06	53.3
71.2	1.33e+05	723	5.45e+04	765	2.89e+08	1.25e+08	3.16e+06	47.5
96.6	1.33e+05	664	6.78e+04	701	2.65e+08	1.43e+08	2.66e+06	40.6
131	1.33e+05	592	8.16e+04	623	2.36e+08	1.53e+08	2.09e+06	32.7
178	1.33e+05	511	9.49e+04	534	2.04e+08	1.52e+08	1.54e+06	24
241	1.33e+05	428	1.07e+05	442	1.71e+08	1.41e+08	1.06e+06	14.7
327	1.33e+05	350	1.16e+05	355	1.4e+08	1.24e+08	6.81e+05	5.02
443	1.33e+05	283	1.23e+05	278	1.13e+08	1.03e+08	4.18e+05	-4.99
601	1.33e+05	230	1.29e+05	214	9.2e+07	8.25e+07	2.47e+05	-15.4
815	1.33e+05	191	1.32e+05	162	7.62e+07	6.44e+07	1.42e+05	-26.2
1.11e03	1.33e+05	163	1.35e+05	122	6.51e+07	4.94e+07	8.05e+04	-37
1.5e03	1.33e+05	145	1.37e+05	91.2	5.79e+07	3.75e+07	4.5e+04	-47.2

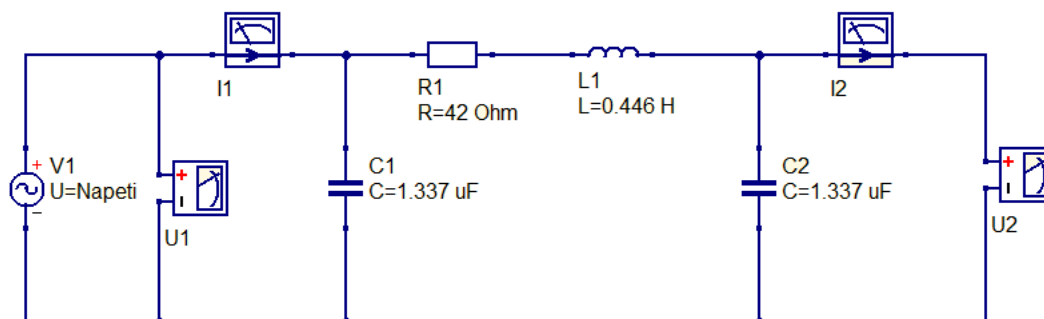
Obr 4. 7.: Kruhový diagram proudu I_2 Obr 4. 8.: Kruhový diagram napětí U_2

Pro Body v kruhovém diagramu proudu I_2 (obr. 4. 7.) blíže k okraji odpovídá hodnota proudu $I_2 = 936$ A, se snižující se hodnotou proudu se hodnoty vektorů proudu posouvají blíže k středu kruhového diagramu. Pro Body v kruhovém diagramu napětí U_2 (obr. 4. 8.) blíže k středu odpovídá hodnota napětí $U_2 = 937$ V, se zvyšující se hodnotou napětí se hodnoty vektorů napětí posouvají blíže k okraji kruhového diagramu.

b) Řešení pomocí π -článku:

Přenos vedení naprázdno:

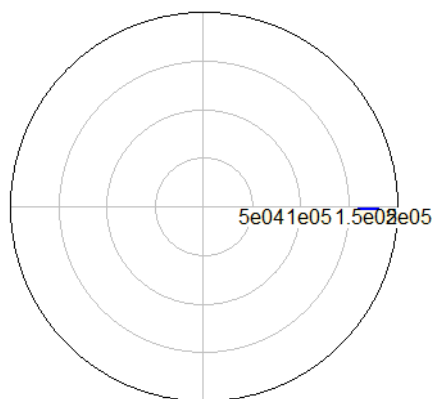
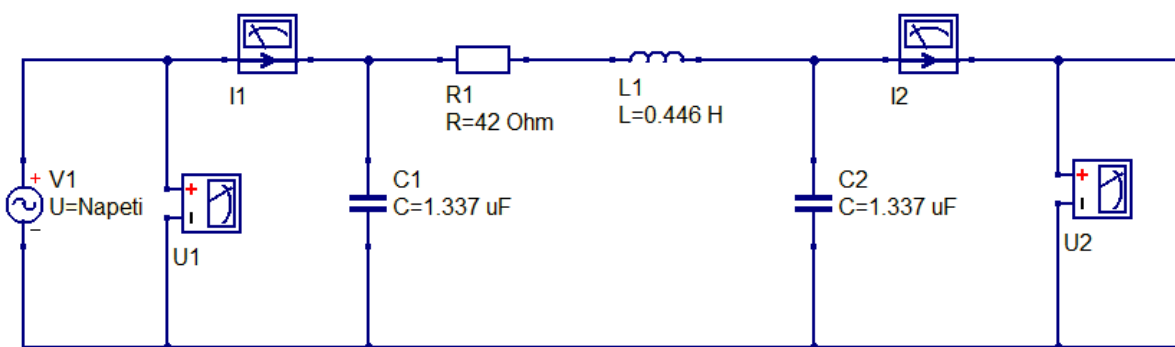
Schéma:



Obr. 4. 9.: Simulační model vedení T-článku naprázdno

Tab. 4: Simulované hodnoty

Napeti	U1	I1	P1	U2	I2	P2	Q2	φ_1
1.5e05	1.06e+05	91.9	3.07e+05	1.13e+05	0	0	0	-89.4
1.52e05	1.08e+05	93.2	3.16e+05	1.14e+05	0	0	0	-89.4
1.54e05	1.09e+05	94.5	3.25e+05	1.16e+05	0	0	0	-89.4
1.56e05	1.11e+05	95.8	3.34e+05	1.17e+05	0	0	0	-89.4
1.59e05	1.12e+05	97.1	3.43e+05	1.19e+05	0	0	0	-89.4
1.61e05	1.14e+05	98.5	3.53e+05	1.21e+05	0	0	0	-89.4
1.63e05	1.15e+05	99.9	3.63e+05	1.22e+05	0	0	0	-89.4
1.65e05	1.17e+05	101	3.73e+05	1.24e+05	0	0	0	-89.4
1.68e05	1.19e+05	103	3.83e+05	1.26e+05	0	0	0	-89.4
1.7e05	1.2e+05	104	3.94e+05	1.28e+05	0	0	0	-89.4

Obr. 4. 10.: Kruhový diagram proudu U_2 **Přenos vedení nakrátko:**

Obr. 4. 11.: Simulační model vedení T-článku nakrátko

Tab. 5: Simulované hodnoty

Napeti	U1	I1	P1	U2	I2	P2	Q2	φ_1
5e04	3.54e+04	228	7.38e+06	0	242	0	0	72.2
5.19e04	3.67e+04	236	7.96e+06	0	251	0	0	72.2
5.39e04	3.81e+04	245	8.58e+06	0	260	0	0	72.2
5.59e04	3.96e+04	255	9.24e+06	0	270	0	0	72.2
5.81e04	4.11e+04	264	9.96e+06	0	281	0	0	72.2
6.03e04	4.26e+04	274	1.07e+07	0	291	0	0	72.2
6.26e04	4.42e+04	285	1.16e+07	0	302	0	0	72.2
6.5e04	4.59e+04	296	1.25e+07	0	314	0	0	72.2
6.74e04	4.77e+04	307	1.34e+07	0	326	0	0	72.2
7e04	4.95e+04	319	1.45e+07	0	338	0	0	72.2

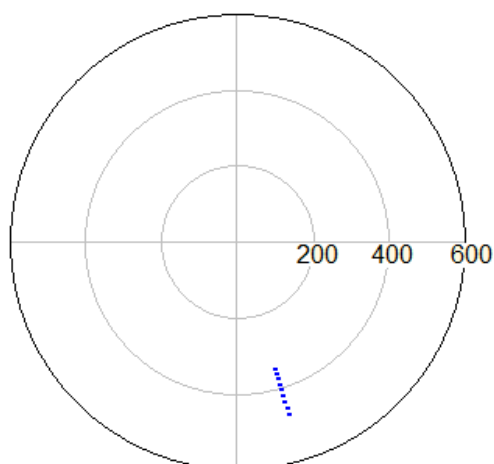
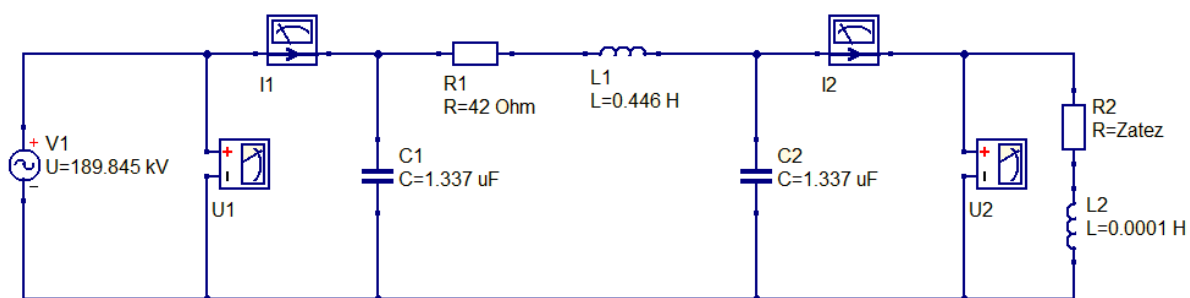
Obr. 4. 12.: Kruhový diagram proudu I_2 **Přenos přirozeného výkonu:**

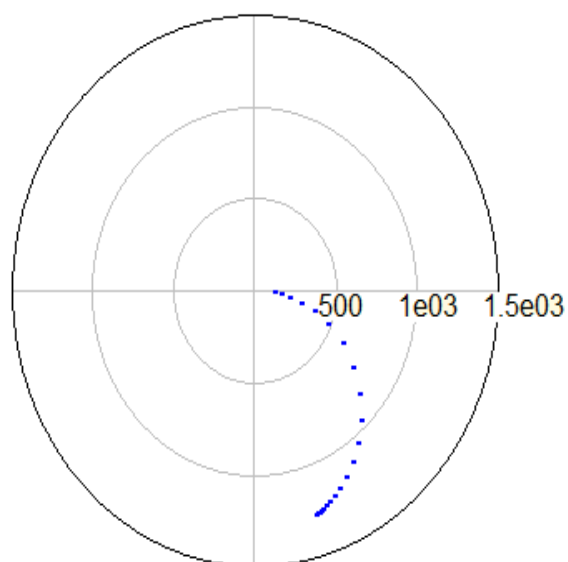
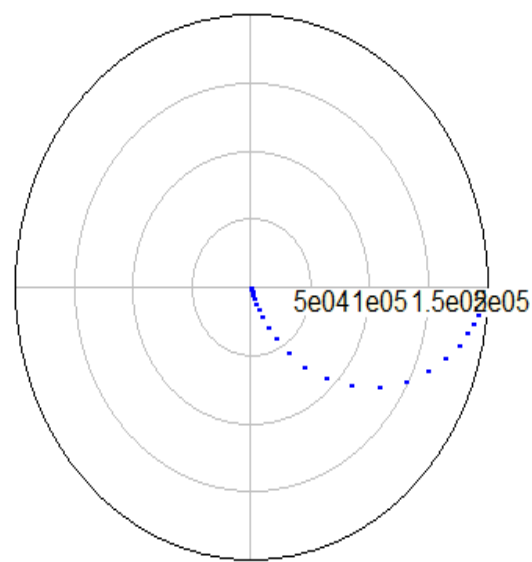
Schéma:

Obr. 4. 13.: Simulační model vedení π -článku

Tab. 6: Simulované hodnoty

Zatez	U1	I1	P1	U2	I2	P2	Q2	φ_1
1	1.34e+05	862	3.47e+08	916	916	-5.7e+05	2.45e+06	71.8
1.36	1.34e+05	861	3.47e+08	1.24e+03	915	8.23e+05	3.31e+06	71.7
1.84	1.34e+05	861	3.47e+08	1.68e+03	914	2.58e+06	3.83e+06	71.5
2.49	1.34e+05	859	3.46e+08	2.28e+03	913	4.68e+06	4.12e+06	71.2
3.38	1.34e+05	858	3.45e+08	3.08e+03	911	7.26e+06	4.28e+06	70.9
4.59	1.34e+05	856	3.45e+08	4.17e+03	909	1.05e+07	4.35e+06	70.4
6.22	1.34e+05	853	3.43e+08	5.64e+03	906	1.47e+07	4.37e+06	69.8
8.44	1.34e+05	849	3.42e+08	7.61e+03	901	2.01e+07	4.35e+06	68.9
11.4	1.34e+05	843	3.39e+08	1.02e+04	895	2.72e+07	4.31e+06	67.8
15.5	1.34e+05	835	3.36e+08	1.38e+04	887	3.64e+07	4.24e+06	66.2
21.1	1.34e+05	823	3.32e+08	1.84e+04	874	4.81e+07	4.12e+06	64.1
28.6	1.34e+05	807	3.25e+08	2.45e+04	857	6.28e+07	3.97e+06	61.4
38.7	1.34e+05	785	3.16e+08	3.23e+04	833	8.05e+07	3.74e+06	57.9
52.5	1.34e+05	753	3.03e+08	4.19e+04	799	1e+08	3.44e+06	53.4
71.2	1.34e+05	709	2.86e+08	5.36e+04	752	1.21e+08	3.05e+06	47.8
96.6	1.34e+05	653	2.63e+08	6.67e+04	691	1.38e+08	2.57e+06	41
131	1.34e+05	583	2.35e+08	8.06e+04	615	1.49e+08	2.04e+06	33.2

178	1.34e+05	505	2.03e+08	9.41e+04	529	1.49e+08	1.51e+06	24.6
241	1.34e+05	424	1.71e+08	1.06e+05	440	1.4e+08	1.04e+06	15.4
327	1.34e+05	348	1.4e+08	1.16e+05	354	1.23e+08	6.78e+05	5.81
443	1.34e+05	281	1.13e+08	1.23e+05	278	1.03e+08	4.18e+05	-4.15
601	1.34e+05	228	9.2e+07	1.29e+05	214	8.29e+07	2.48e+05	-14.5
815	1.34e+05	189	7.59e+07	1.33e+05	163	6.49e+07	1.43e+05	-25.3
1.11e03	1.34e+05	161	6.47e+07	1.36e+05	123	4.99e+07	8.12e+04	-36.2
1.5e03	1.34e+05	142	5.73e+07	1.38e+05	91.7	3.79e+07	4.54e+04	-46.6

Obr 4. 14.: Kruhový diagram proudu I_2 Obr 4. 15.: Kruhový diagram napětí U_2

Pro Body v kruhovém diagramu proudu I_2 (obr. 4. 14.) blíže okraji odpovídá hodnota proudu $I_2 = 916$ A, se snižující se hodnotou proudu se hodnoty vektorů proudu posouvají blíže k středu kruhového diagramu. Pro Body v kruhovém diagramu napětí U_2 (obr. 4. 15.) blíže středu odpovídá hodnota napětí $U_2 = 916$ V, se zvyšující se hodnotou napětí se hodnoty vektorů napětí posouvají blíže k okraji kruhového diagramu.

4.3 Laboratorní měření

Použité přístroje:

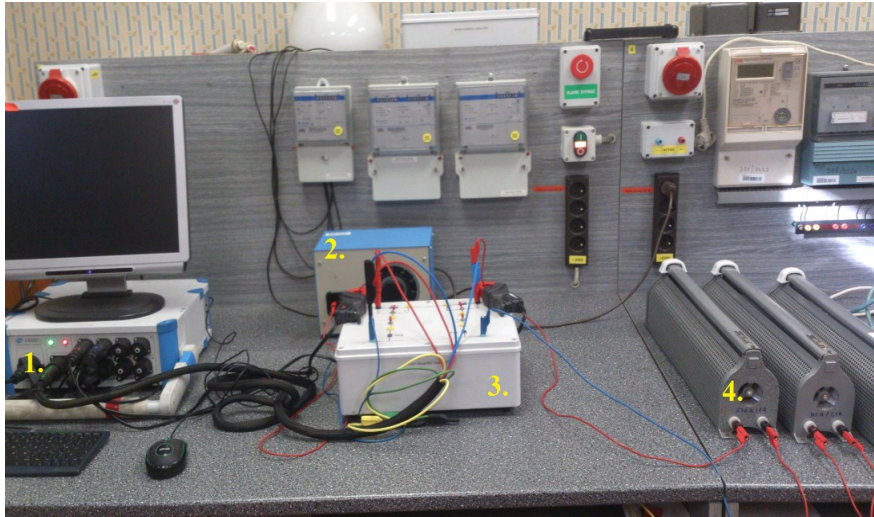
Analyzátor kvality elektrické energie - Elcom ENA 500.12, výr. číslo: 27761/0

Autotransformátor pro regulaci nástupního napětí – výr. číslo:541/662

Model dlouhého vedení vvn – Jednofázový model 220 kV

2x Reostat – 570 Ω / 1 A, 105 Ω / 2,5 A

Schéma zapojení:

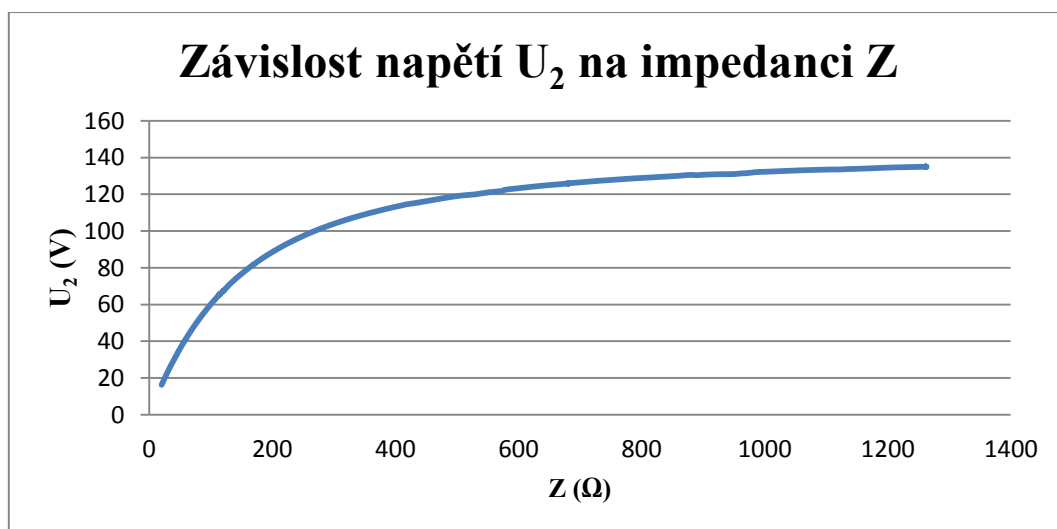


Obr. 4. 16.: Schéma zapojení

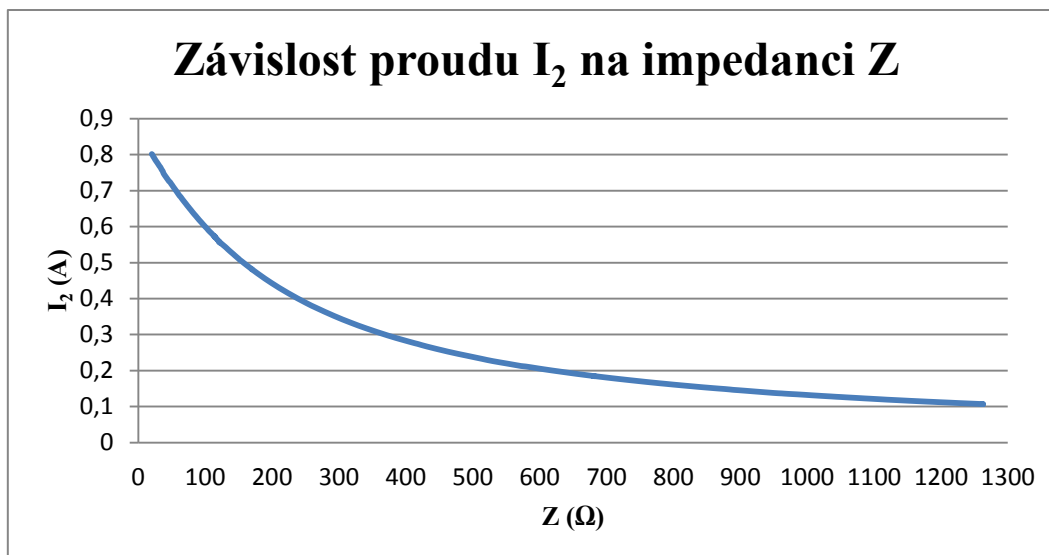
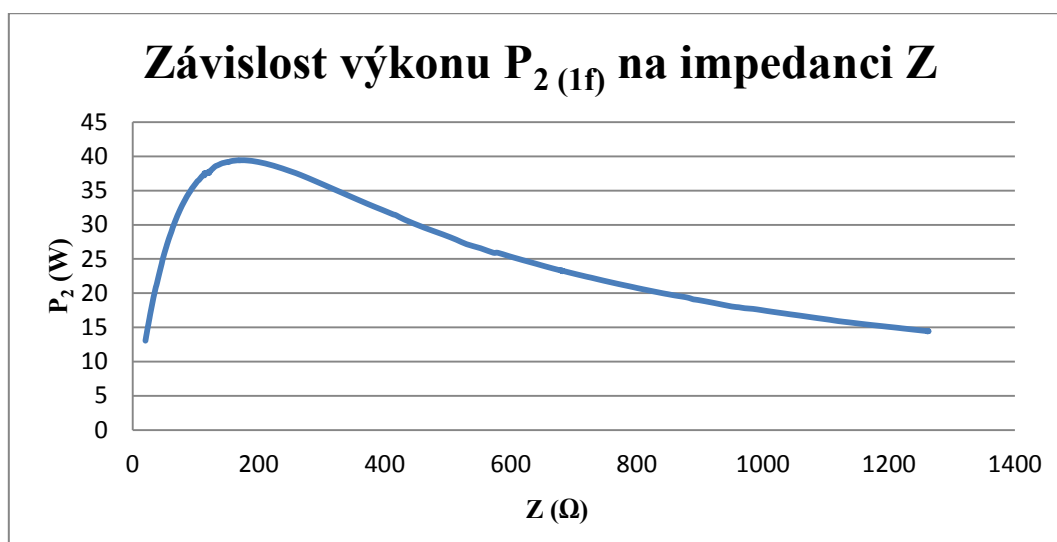
1. Analyzátor kvality elektrické energie
2. Autotransformátor
3. Model dlouhého vedení
4. Reostat

Vypracování

- a) Měření pomocí T-článku



Obr. 4. 17.: Graf závislosti napětí U_2 na impedanci Z

Obr. 4. 18.: Graf závislosti proudu I_2 na impedanci Z Obr. 4. 19.: Graf závislosti výkonu P_2 na impedanci Z

Tab. 7: Naměřené hodnoty pro přenos vedení naprázdno

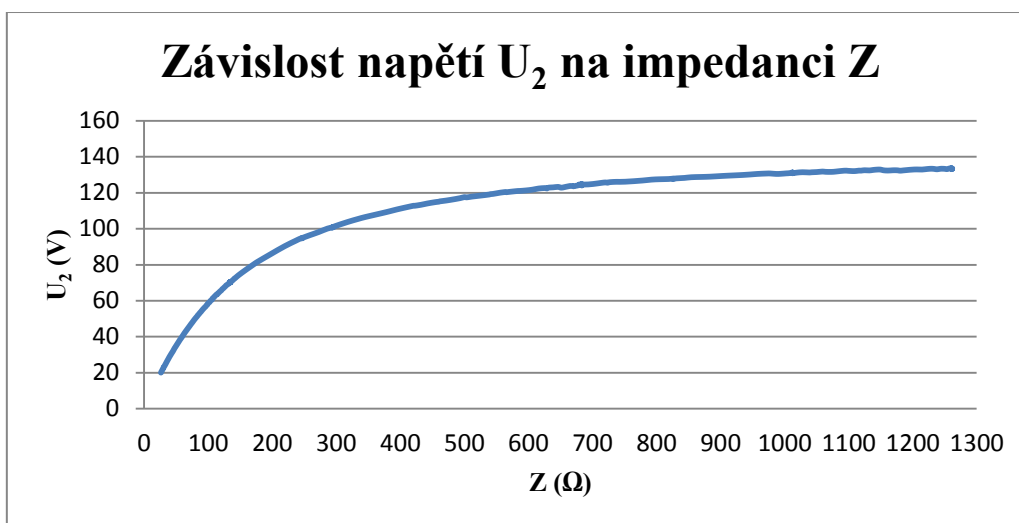
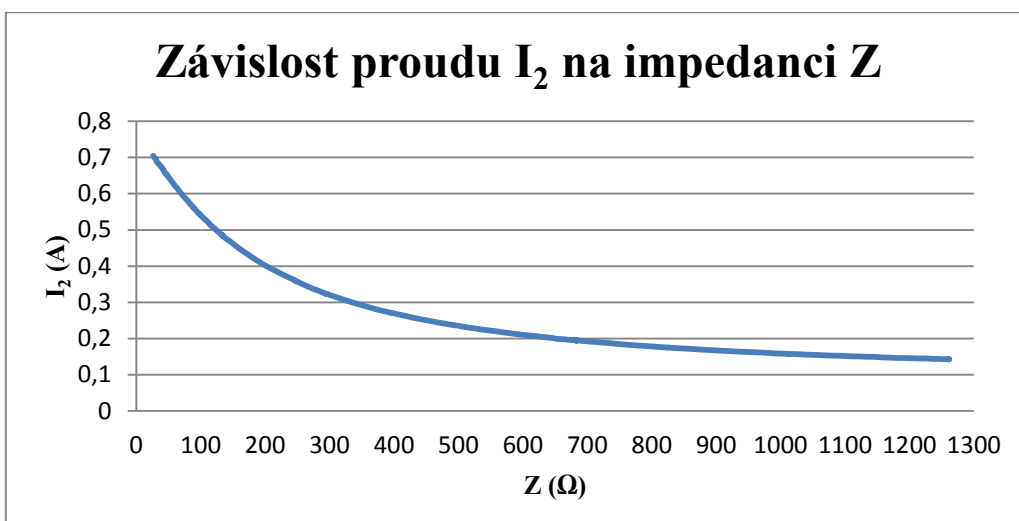
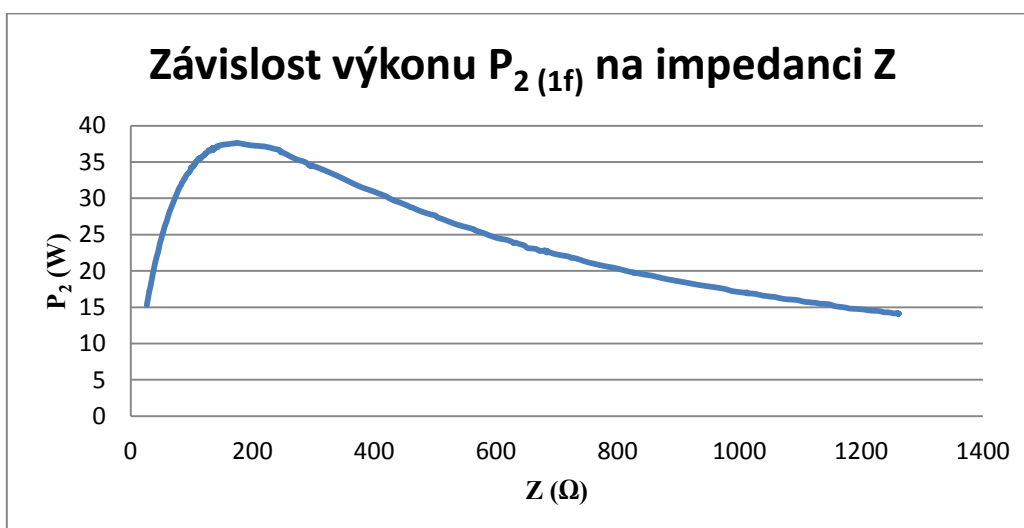
U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	$P_{1(1f)}$ (W)	$P_{2(1f)}$ (W)
119,623	127,622	0,101	0	0,642	0

Tab. 8: Naměřené hodnoty pro přenos vedení nakrátko

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	$P_{1(1f)}$ (W)	$P_{2(1f)}$ (W)
44,4	0	0,24	0,26	4,648	0

Tab. 9: Naměřené hodnoty pro přenos přirozeného výkonu

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	$P_{1(1f)}$ (W)	$P_{2(1f)}$ (W)	Impedance (Ω)
135,25	114,42	0,27	0,27	36,63	31,46	416,1

b) Měření pomocí π -čláčkuObr. 4. 20.: Graf závislosti napětí U_2 na impedanci Z Obr. 4. 21.: Graf závislosti proudu I_2 na impedanci Z Obr. 4. 22.: Graf závislosti výkonu P_2 na impedanci Z

Tab. 10: Naměřené hodnoty pro přenos vedení naprázdno

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	$P_{1(1f)}$ (W)	$P_{2(1f)}$ (W)
119,47	126,42	0,10	0	0,42	0

Tab. 11: Naměřené hodnoty pro přenos vedení nakrátko

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	$P_{1(1f)}$ (W)	$P_{2(1f)}$ (W)
46,10	0	0,24	0,26	5,01	0

Tab. 12: Naměřené hodnoty pro přenos přirozeného výkonu

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	$P_{1(1f)}$ (W)	$P_{2(1f)}$ (W)	Impedance (Ω)
134,8	112,4	0,26	0,27	35,5	30,4	415,4

U laboratorního měření měříme pomocí jednofázového modelu vedení, a proto musíme výkony $P_{1(1f)}$ a $P_{2(1f)}$ přepočítat na trojfázové vedení.

Přepočet se provádí pomocí vztahu (4.60, 4.61):

$$P_1 = 3 \cdot P_{1(1f)}, P_2 = 3 \cdot P_{2(1f)} \quad (4.60, 4.61)$$

4.4 Porovnání výsledků

T-článek:

Tab. 13: Přenos vedení naprázdno

	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	φ_1
Výpočty	119,5 kA	127 kA	0,107 kA	0	1,071 MW	0	-88,389
Simulace	119 kA	126 kA	0,106 kA	0	0,722 MW	0	-88,9
Rozdíl oproti výpočtům	-0,42 %	-0,79 %	-0,93 %	0 %	-32,59 %	0 %	1,01 %
Měření	119,6 A	127,6 kA	0,101 A	0	1,93 W	0	-
Rozdíl oproti výpočtům	0,08 %	0,47 %	-5,61 %	0 %	80,59 %	0 %	-

Tab. 14: Přenos vedení nakrátko

	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	φ_1
Výpočty	44,67 kV	0	0,296 kA	0,315 kA	11,8 MW	0	72,745
Simulace	44,2 kV	0	0,293 kA	0,312 kA	11,5 MW	0	72,8
Rozdíl oproti výpočtům	-1,01 %	0 %	-1,01 %	-0,95 %	-2,54 %	0 %	0,08 %
Měření	44,4 V	0	0,24 A	0,26 A	14 W	0	-
Rozdíl oproti výpočtům	-0,6 %	0 %	-18,92 %	-17,46 %	18,6 %	0 %	-

Tab. 15: Přenos přirozeného výkonu

	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	φ_1	Z (Ω)
Výpočty	133,2 kV	127 kV	0,32 kA	0,305 kA	127 MW	115 MW	-8,76	417,1
Simulace	133 kV	122 kV	0,3 kA	0,293 kA	118 MW	107 MW	-2,85	416
Rozdíl oproti výpočtům	-0,15 %	-3,94 %	-1,01 %	-6,25 %	-7,09 %	-6,96 %	-67 %	-0,3 %
Měření	135,3 V	114,4 V	0,27 A	0,27 A	110 W	94 W	-	416,1
Rozdíl oproti výpočtům	1,35 %	-9,92 %	-15,6 %	-11,48 %	-13,86 %	-18,26 %	-	-0,2 %

π -článek:

Tab. 16: Přenos vedení naprázdno

	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	φ_1
Výpočty	119,5 kV	127 kV	0,104 kA	0	1,04 MW	0	-88,4
Simulace	119 kV	126 kV	0,103 kA	0	0,38 MW	0	-89,4
Rozdíl oproti výpočtům	-0,42 %	-0,79 %	-0,96 %	0 %	-63,46 %	0 %	1,01 %
Měření	119,47 V	126,4 V	0,10 A	0	1,26 W	0	-
Rozdíl oproti výpočtům	-0,03 %	-0,47 %	-3,85 %	0 %	21,15 %	0 %	-

Tab. 17: Přenos vedení nakrátko

	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	φ_1
Výpočty	46 kV	0	0,296 kA	0,315 kA	12,52 MW	0	72,204
Simulace	45,9 kV	0	0,296 kA	0,314 kA	12,5 MW	0	72,2
Rozdíl oproti výpočtům	-0,21 %	0 %	0 %	-0,32 %	-0,16 %	0 %	0,83 %
Měření	46,1 V	0	0,24 A	0,26 A	15 W	0	-
Rozdíl oproti výpočtům	0,22 %	0 %	-18,92 %	-17,46 %	19,81 %	0 %	-

Tab. 18: Přenos přirozeného výkonu

	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	φ_1	Z (Ω)
Výpočty	134,2 kV	127 kV	0,32 kA	0,305 kA	127 MW	115 MW	-7,93	417,1
Simulace	134 kV	122 kV	0,29 kA	0,293 kA	119 MW	107 MW	-2,02	416
Rozdíl oproti výpočtům	-0,15 %	-3,94 %	-9,38 %	-3,93 %	-6,3 %	-6,96 %	-75%	-0,3 %
Měření	134,8 V	112,4 V	0,26A	0,27 A	107 W	91 W	-	415,4
Rozdíl oproti výpočtům	0,45 %	-11,5 %	-18,8 %	-11,48 %	-15,75 %	-20,87 %	-	-0,4 %

Závěr

V této bakalářské práci je nastíněn historický vývoj přenosu a rozvodu elektrické energie, který začal v roce 1873 – stejnosměrný přenos na 2 km ve Vídni. Podrobněji se zabývám parametry vedení, konkrétně se zabývám činným odporem, indukčností, kapacitou a svodovou vodivostí. Dále se zabývám teoretickým výpočtem střídavých vedení velmi vysokého napětí, při řešení vedení nás zajímají poměry na jednom konci vedení při zadaných poměrech na druhém konci. Pro přesné řešení je nutno respektovat kromě podélné impedance i příčnou admitanci, neboť u nejvyšších napětí jsou proudy podélnými větvemi srovnatelné s příčnými větvemi. Podrobněji se zabývám náhradou střídavých vedení velmi vysokého napětí soustředěnými parametry, u kterých nás zajímá řešení pomocí náhradního π a T článku.

Hlavním cílem této bakalářské práce je přiblížit a tematicky zpracovat simulaci dlouhého vedení velmi vysokého napětí pro stavy naprázdno, nakrátko a přenos přirozeného výkonu. Zabývám se výpočtem náhradního schématu, simulací a laboratorním měřením.

V praktické části se zabývám výpočtem náhradního schématu vedení pomocí π a T článku pro stavy naprázdno, nakrátko a přirozený výkon se vypočtené hodnoty od sebe téměř neliší. V další části bakalářské práce se zabývám simulací modelu vedení v programu QUCS. Hodnoty parametrů pro simulační obvod jsem převzal z parametru modelu a pro přenos přirozeného výkonu jsou hodnoty zátěže parametru odporu R_3 v rozsahu od 1 do 1500 Ω a cívka L_3 je zafixována na 0,0001 H. Simulace vedení pro stavy naprázdno, nakrátko a přirozený výkon se od sebe téměř neliší. Nasimulované hodnoty se liší od vypočtených, je to způsobeno rozdílnými hodnoty fázového uhlu φ_1 . Při laboratorním měření pomocí přístroje Elcom ENA 500.12 (analyzátor kvality elektrické energie) jsem změřil stavy naprázdno, nakrátko a přenos přirozeného výkonu. Naměřené hodnoty se od sebe téměř neliší. U měřeného modelu se musí hodnoty výkonů P_1 a P_2 přepočítat na trojfázové vedení. Změřené hodnoty se liší od vypočtených, rozdíly jsou způsobeny fázovými uhly a vlastnostmi jednofázového modelu vedení. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách, ve kterých jsou mezi sebou porovnané a je uveden procentní rozdíl od vypočítaných hodnot náhradního schématu vedení (viz tab. 13 - 18).

Literatura

- [1] Rusek S. : Teoretická elektroenergetiky, skripta VŠB-TU Ostrava 1999
- [2] Hradílek Z. : Elektroenergetiky, skripta VŠB-TU Ostrava 1992
- [3] Santarious P. : Elektroenergetiky I., skripta VŠB-TU Ostrava 1984
- [4] Hodinka M. : Elektrické sítě I., skripta VŠB-TU Ostrava 1973
- [5] Fejt Z., Čermák J. : Elektroenergetika, skripta ČVUT Praha 1981
- [6] Němeček F. : Teorie elektrických sítí I. , skripta ČVUT Praha 1981
- [7] Zákut vedení [online]. [cit.2013-11-26]. Dostupné z:
<https://maps.google.com/?ll=49.524576,17.153749&spn=0.000629,0.002411&t=h&z=19&layer=c&cbll=49.524576,17.153237&panoid=MEy6tuEvmh2VMol4ubX5pQ&cbp=11,284.71,,1,-6.07>