

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

PARAMETRY VEDENÍ VN

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

MARTIN DOHNAL

BRNO 2013

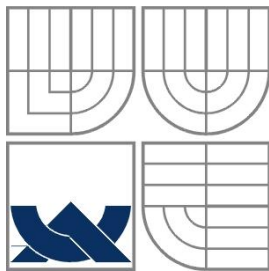
Bibliografická citace práce:

DOHNAL, M. *Parametry vedení vn.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 68 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Zároveň bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Petru Tomanovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky a panu Ing. Janu Novotnému za pomoc při přípravě na praktickou část bakalářské práce.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Parametry vedení vn

Martin Dohnal

vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

The parameters of MV line

by

Martin Dohnal

Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výpočtem parametrů vedení a jejich měřením. První část práce se zabývá výpočtem parametrů vedení. Druhá část práce se zabývá měřením parametrů vedení. Třetí část práce se zabývá měřením parametrů reálného vedení vn použitím měřicí soustavy OMICRON CPC 100 + CP CU1. Naměřené hodnoty jsou porovnány s hodnotami vypočtenými.

KLÍČOVÁ SLOVA: parametry vedení; výpočet parametrů vedení; měření parametrů vedení; omicron cpc 100; podélná impedance; příčná admitance

ABSTRACT

This work deals with calculation of parameters of power lines and measuring of them. First part deals with calculation of parameters of power lines. Second part deals with measurement of parameters of power lines. Third part deals with measurement of parameters of real MV line using measuring system OMICRON CPC 100 + CP CU1. Measured values are compared with calculated values.

KEY WORDS:

parameters of power lines; calculation of parameters of power lines; measuring of parameters of power lines; omicron cpc 100; longitudinal impedance; transverse admittance

OBSAH

OBSAH.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	15
1.1 CÍLE	15
2 ÚDAJE PRO VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ.....	16
2.1 MATERIÁL A KONSTRUKCE VODIČŮ	16
2.2 VZDÁLENOST VODIČŮ A JEJICH USPOŘÁDÁNÍ NA STOŽÁRECH	16
3 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ VENKOVNÍCH VEDENÍ.....	17
3.1 PODÉLNÁ IMPEDANCE A JEJÍ SLOŽKY	17
3.1.1 REZISTANCE.....	17
3.1.2 INDUKČNOST	20
3.2 PŘÍČNÁ ADMITANCE A JEJÍ SLOŽKY	24
3.2.1 KONDUKTANCE.....	24
3.2.2 KAPACITA	26
3.3 IMPEDANCE ZEMNÍ CESTY	35
3.4 SLOŽKOVÉ PARAMETRY	36
3.5 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ VEDENÍ VN.....	37
3.5.1 VEDENÍ VN S ROVINNÝM ULOŽENÍM VODIČŮ NA SLOUPU	37
3.5.2 VEDENÍ VN S TROJÚHELNÍKOVÝM ULOŽENÍM VODIČŮ NA SLOUPU	41
3.5.3 VEDENÍ VN S ULOŽENÍM VODIČŮ DELTA NA STOŽÁRU	42
3.5.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	42
4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ VEDENÍ.....	44
5 MĚŘICÍ SOUSTAVA OMICRON CPC 100 + CP CU1	47
5.1 OMICRON CPC 100.....	47
5.2 OMICRON CP CU1	48
6 MĚŘENÍ PARAMETRŮ REÁLNÉHO VEDENÍ VN	52
6.1 NÁVOD NA MĚŘENÍ PARAMETRŮ VEDENÍ VN MĚŘICÍ SOUSTAVOU OMICRON CPC 100 + CP CU1	52
6.1.1 BEZPEČNOSTNÍ POKYNY	52
6.1.2 ODHADNUTÍ PROUDOVÉHO ROZSAHU PODLE DÉLKY VEDENÍ	53
6.1.3 ZJIŠTĚNÍ PROUDOVÉHO ROZSAHU ODHADEM INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ	53
6.1.4 PROPOJENÍ MĚŘICÍ SOUSTAVY A JEJÍ PŘIPOJENÍ K VEDENÍ	54
6.1.5 KONFIGURACE CPC 100 PRO CP CU1	55
6.1.6 MĚŘENÍ IMPEDANCE VEDENÍ A ZEMNÍHO POMĚRU (K-FAKTORU)	55
6.2 PROVEDENÉ MĚŘENÍ.....	56

6.3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S TEORETICKÝMI HODNOTAMI	58
6.4 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI NA FREKVENCI.....	58
7 ZÁVĚR.....	60
POUŽITÁ LITERATURA	62
PŘÍLOHA A: TECHNICKÉ PARAMETRY VODIČŮ.....	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1: Princip transpozice vodičů</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3.1: Náhradní schéma venkovního vedení</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3.2: Vlastní kapacita osamělého vodiče [1]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.3: Vzájemná kapacita dvou vodičů [1]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3.4: Sloup vn s rovinným uspořádáním [10]</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 3.5: Sloup vn s trojúhelníkovým uspořádáním [10].....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 3.6: Stožár vn s uspořádáním vodičů delta [1]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4.1: Měření provozních parametrů vedení [3]</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4.2: Náhradní model jedné fáze vedení π-článkem</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5.1: Přední panel přístroje OMICRON CPC 100 [8].....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5.2: Vysokonapěťové a proudové výstupy na CPC 100 [8]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5.3: Komunikační rozhraní CPC 100 [8]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5.4: Přední panel CP CU1 [7].....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 5.5: CP GB1 zemnicí box [7].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6.1: Schéma zapojení měřicí soustavy a jejího připojení k vedení [7]</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 6.2: Konfigurace CPC 100 pro CP CU1 [7]</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6.3: Graf závislosti indukčnosti smyčky L1-L2 na frekvenci</i>	<i>59</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1: Rezistivita nepoužívanějších materiálů vodičů [1]</i>	17
<i>Tab. 3.2: Teplotní součinitele odporu [3]</i>	18
<i>Tab. 3.3: Vodorovné namáhání a tíha 1 m lana AlFe 6 [4]</i>	20
<i>Tab. 3.4: Koeficient zvýšení indukčnosti pro střídavý proud [3]</i>	22
<i>Tab. 3.5: Ztráty výkonu v izolaci a konduktance venkovního vedení vn</i>	25
<i>Tab. 3.6: Ztráty výkonu v izolaci a korónou a konduktance venkovních vedení vvn</i>	25
<i>Tab. 3.7: Měrný odpor půdy a vody [1]</i>	36
<i>Tab. 3.8: Údaje pro výpočet rovinného vedení 70 mm²</i>	37
<i>Tab. 3.9: Údaje pro výpočet rovinného vedení 95 mm² odlišné od údajů v Tab. 3.8</i>	39
<i>Tab. 3.10: Údaje pro výpočet rovinného vedení 120 mm² odlišné od údajů v Tab. 3.8</i>	40
<i>Tab. 3.11: Parametry vedení s trojúhelníkovým uspořádáním vodičů na sloupu</i>	41
<i>Tab. 3.12: Parametry vedení s uspořádáním vodičů delta na stožáru</i>	42
<i>Tab. 5.1: Popis přístroje OMICRON CPC 100 [8]</i>	48
<i>Tab. 5.2: Popis přístroje CP CU1 [7]</i>	49
<i>Tab. 5.3: Výstupní rozsahy CP CU1 [7]</i>	50
<i>Tab. 5.4: Příslušenství CP CU1 [7]</i>	51
<i>Tab. 6.1: Odhad proudového rozsahu podle délky vedení</i>	53
<i>Tab. 6.2: Proudový rozsah podle velikosti indukovaného napětí</i>	53
<i>Tab. 6.3: Výsledky měření impedance vedení VN67, úsek od US 12 po US 45, rozsah 20 A</i>	57
<i>Tab. 6.4: Výsledky měření impedance vedení VN67, úsek od US 12 po US 45, rozsah 10 A</i>	57
<i>Tab. 6.5: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot rezistance a indukance</i>	58
<i>Tab. A.1: Technické parametry měděných drátů [1]</i>	63
<i>Tab. A.2: Technické parametry měděných a hliníkových lan [1]</i>	63
<i>Tab. A.3: Technické parametry dvoumateriálových lan AlFe 6 (AlFe 8) [1]</i>	64
<i>Tab. A.4: Technické parametry dvoumateriálových lan AlFe 4 [1]</i>	64
<i>Tab. A.5: Technické parametry dvoumateriálových lan AlFe 3 [1]</i>	65

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$Z, \bar{Z}$		komplexní veličina
a	[m]	osová vzdálenost mezi vodiči
a_n	[m]	výška závitu šroubovice
a_s	[m]	střední geometrická vzdálenost mezi vodiči
B	[S]	kapacitní susceptance
C	[F]	kapacita
c	[m]	parametr řetězovky
C_k	[nF.km ⁻¹]	kapacita vedení na km délky
C_p	[nF.km ⁻¹]	provozní kapacita transponovaného třífázového vedení
C_{pd}	[nF.km ⁻¹]	provozní kapacita transponovaného třífázového vedení dvojitého
d	[m]	průměr jednoho vodiče lana
D	[m]	průměr lana
f	[Hz]	frekvence
G	[S]	konduktance
G_k	[μS.km ⁻¹]	konduktance vedení na km délky
g_1	[N.m ⁻¹]	tíha 1 metru vodiče
h	[m]	výška vodiče nad zemí
h_s	[m]	střední geometrická výška vodičů nad zemí
I_0	[A]	absolutní hodnota fázoru proudu stanovená měřením naprázdno
I_k	[A]	absolutní hodnota fázoru proudu stanovená měřením nakrátko
I_L	[A]	fázor proudu na začátku vedení
I_{meas}	[A]	proud procházející fázemi uzemněného vedení
I_R	[A]	fázor proudu na konci vedení
k	[-]	koefficient zvýšení provozní indukčnosti
k	[F]	kapacita
k	[nF.km ⁻¹]	dílčí vlastní kapacita trojfázového transponovaného vedení
k_k	[F]	vlastní kapacita
k_{km}	[F]	vzájemná kapacita
$k_s, k_l, k_p, k_\vartheta$	[-]	součinitelé zvětšení rezistance
k_v	[nF.km ⁻¹]	dílčí vzájemná kapacita trojfázového transponovaného vedení
k_z	[nF.km ⁻¹]	dílčí vlastní kapacita trojfázového transponovaného vedení se zemním lanem
k_{zv}	[nF.km ⁻¹]	dílčí vzájemná kapacita trojfázového transponovaného vedení se zemním lanem
l	[m]	délka
L	[H]	indukčnost
L_k	[mH.km ⁻¹]	indukčnost vedení na km délky
L_p	[mH.km ⁻¹]	provozní indukčnost vedení
L_z	[mH.km ⁻¹]	indukčnost země
l_s	[m]	délka řetězovky
m	[m]	střední geometrická vzdálenost mezi vodiči ve svazku
n	[-]	počet vodičů ve svazku
P_0	[W]	činný výkon stanovený měřením naprázdno
P_k	[W]	činný výkon stanovený měřením nakrátko
Q	[C]	náboj
r	[m]	poloměr vodiče
R	[Ω]	rezistance
r_e	[m]	ekvivalentní poloměr svazku

R_i	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	izolační odpor vedení
R_k	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	rezistance vedení na km délky
R_Z	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	odpor země
s	$[\text{mm}^2]$	průřez
U_0	$[\text{V}]$	absolutní hodnota fázoru napětí stanovená měřením naprázdno
U_k	$[\text{V}]$	absolutní hodnota fázoru napětí stanovená měřením nakrátko
U_L	$[\text{V}]$	fázor napětí na začátku vedení
U_R	$[\text{V}]$	fázor napětí na konci vedení
V	$[\text{V}]$	elektrický potenciál
X	$[\Omega]$	indukční reaktance
X_Z	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	indukční reaktance země
Y	$[\text{S}]$	příčná admitance
y_k	$[\text{S} \cdot \text{km}^{-1}]$	příčná admitance vedení na km délky
Y_{00}	$[\text{S}]$	admitance naprázdno
z	$[-]$	přetížení vodiče námrazou
Z	$[\Omega]$	podélná impedance
Z_0	$[\Omega]$	nulová složka impedance
Z_0, Z_{0k}	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	nulová složka impedance
Z_1	$[\Omega]$	sousledná složka impedance
Z_1, Z_{1k}	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	sousledná složka impedance
z_k	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	podélná impedance vedení na jednotku délky
Z_{kk}	$[\Omega]$	impedance nakrátko
Z_Z	$[\Omega]$	impedance zemní cesty
Z_Z, Z_{Zk}	$[\Omega]$	impedance zemní cesty
α_{kk}	$[\circ]$	argument impedance nakrátko
α_R	$[\circ \text{C}^{-1}]$	teplotní součinitel odporu
α_{00}	$[\circ]$	argument admitance naprázdno
β_R	$[\circ \text{C}^{-2}]$	teplotní součinitel odporu
γ	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}]$	měrná tíha vodiče
γ	$[\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$	kapacitní součinitel
δ	$[\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$	vlastní potenciální součinitel
δ_d	$[\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$	vlastní potenciální součinitel dvojitého trojfázového vedení
δ_{dv}	$[\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$	vzájemný potenciální součinitel dvojitého trojfázového vedení
δ_r	$[\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$	potenciální součinitel zahrnující vliv zemního lana
δ_v	$[\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$	vzájemný potenciální součinitel
δ_z	$[\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$	vlastní potenciální součinitel zahrnující vliv zemního lana
δ_z	$[\text{m}]$	hloubka vniku do země
δ_{zv}	$[\text{m} \cdot \text{F}^{-1}]$	vzájemný potenciální součinitel zahrnující vliv zemního lana
ΔP_c	$[\text{kW} \cdot \text{km}^{-1}]$	ztráty způsobené svodem přes izolátory
ε_0	$[\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$	permitivita vakua
ε_r	$[-]$	relativní permitivita
ϑ_0	$[\circ \text{C}]$	teplota
μ	$[\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$	permeabilita
μ_0	$[\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$	permeabilita vakua
μ_0	$[-]$	relativní permeabilita
ρ	$[\text{m}]$	vzdálenost
ρ_0	$[\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}]$	rezistivita
ρ_0	$[\Omega \text{m}]$	měrný odpor půdy
σ_H	$[\text{MPa}]$	vodorovné namáhání
Φ	$[\text{Wb}]$	magnetický indukční tok

ω [rad.s⁻¹] úhlová frekvence

dolní indexy

k číselné označení vodiče

m číselné označení vodiče vzdáleného od vodiče k

AC střídavý proud

DC stejnosměrný proud

G označení země

L1, L2, L3 označení fáze 1, 2, 3

nn nízké napětí

PMU phasor measurement unit (jednotka pro měření fázorů)

US12 úsekový odpojovač č. 12

US45 úsekový odpojovač č. 45

vn vysoké napětí

vvv velmi vysoké napětí

zvz zvlášť vysoké napětí

1ÚVOD

Znalost elektrických parametrů elektrických vedení je důležitá pro řešení stacionárních i nestacionárních jevů elektrických sítí. Umožňuje nám správné nastavení ochran, vyšší přesnost při estimaci (odhadu) stavu elektrizační soustavy. Také nám dává podklady pro výpočty elektrických sítí v ustáleném stavu a výpočty přechodných jevů v elektrizační soustavě.

Prvky elektrických sítí (vedení, transformátory, reaktory, kompenzační kondenzátory apod.) reprezentujeme pomocí čtyř základních parametrů a parametrů od nich odvozených. Jsou to rezistance R a indukčnost L v podélném směru, konduktance G a kapacita C v příčném směru.

V soustavách se stejnosměrným proudem se uplatní jen dva základní elektrické parametry, a to rezistance a konduktance.

V soustavách se střídavým proudem se uplatňují všechny čtyři základní elektrické parametry, přičemž na základě použité hladiny napětí a provedení elektrického vedení lze počet základních parametrů snížit na tři (R, L, C) dva (R, L nebo L, C), nebo jen jeden (R nebo L). Při zvláštních výpočtech (např. při sledování funkce ochranných zařízení nebo při porovnání změřených výsledků s vypočtenými) je třeba respektovat všechny čtyři elektrické parametry.

Pro soustavy se střídavým proudem se zavádí odvozené parametry. Prvním odvozením je vyjádření indukční reaktance $X = \omega L$ a kapacitní susceptance $B = \omega C$. Kde ω je úhlový kmitočet vyjádřený vztahem $\omega = 2\pi f$.

Sdružením podélných elektrických parametrů dostáváme odvozenou podélnou impedanci Z , pro kterou platí

$$Z = R + jX = R + j\omega L. \quad (1.1)$$

Sdružením příčných elektrických parametrů dostáváme odvozenou příčnou admitanci Y , pro kterou platí

$$Y = G + jB = G + j\omega C. \quad (1.2)$$

Pro řešení přechodných dějů v elektrizační soustavě je důležitá znalost impedance zemní návratné cesty.

Pro vyšetřování nesymetrických stavů na vedeních je podle [1] vhodný rozklad elektrických parametrů do symetrických složek. Elektrické parametry prvků elektrických sítí jsou rozloženy na složku souslednou Z_1 , zpětnou Z_2 a nulovou Z_0 . Pro netočivé stroje a vedení je $Z_1 = Z_2$.

1.1 Cíle

Cílem teoretické části bakalářské práce je seznámení se s problematikou výpočtu elektrických parametrů venkovních vedení a jejich měření. V praktické části bakalářské práce je cílem seznámení se s měřicí soustavou OMICRON CPC 100 + CP CU1, vytvoření návodu pro měření parametrů vedení touto soustavou a následným změřením parametrů reálného vedení vn. Cílem bakalářské práce je srovnání výsledků parametrů vedení vn zjištěných výpočtem a měřením.

2 ÚDAJE PRO VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ

Pro výpočet elektrických parametrů venkovních vedení musíme znát údaje o vlastnostech materiálu, konstrukci vodičů, izolaci a uspořádání vodičů v hlavě stožáru.

2.1 Materiál a konstrukce vodičů

Vodiče venkovních vedení jsou nejčastěji hliníková nebo měděná, konstruované jako dráty nebo lana. Zvláštním typem vodičů jsou lana dvoumateriálová (ocelohliníková), které se skládají z ocelové duše sloužící ke zlepšení mechanických vlastností lana a hliníkového pláště sloužícího jako vodič. Tento typ lan je u nás používán nejčastěji. Do napětí 22kV se používají i vodiče izolované a slané závěsné kabely. K izolaci mezi vodiči a stožáry se používá podpěrných nebo závěsných izolátorů. Podpěrné izolátory se používají pro hladinu nn a vn a závěsné izolátory pro hladinu vn, vvn a zvn.

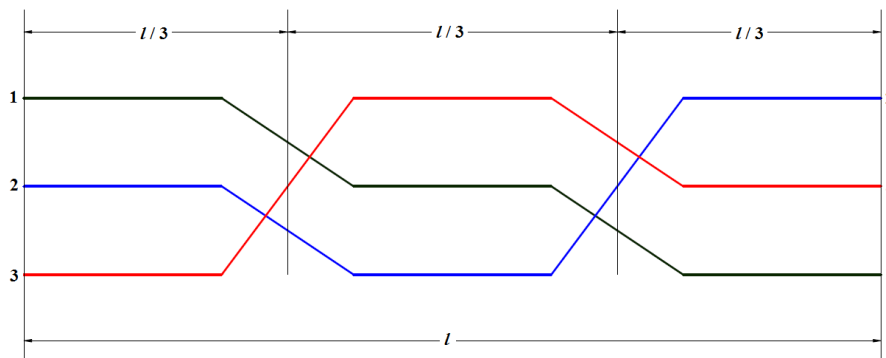
U vodičů rozlišujeme jmenovitý a matematický průřez. Jmenovitý průřez je zaokrouhlená hodnota přesného matematického průřezu. Pro přesnější výpočty je nutné počítat s matematickým průřezem vodiče. Jako další parametry vodičů se uvádí hmotnost na km délky a největší dovolený odpor na km délky. Technické parametry různých vodičů jsou v tabulkách v **Příloha A: Technické parametry vodičů**.

2.2 Vzdálenost vodičů a jejich uspořádání na stožárech

Vzdálenost mezi jednotlivými vodiči má vliv na velikost indukčnosti a kapacity vedení. Vzdálenost mezi vodiči a zemí má vliv na velikost kapacity vedení.

Uspořádání vodičů na stožárech bývá v jedné rovině, v obecném trojúhelníku nebo v případě dvojnásobných vedení ve tvaru soudku nebo dvou rovnoramenných trojúhelníků.

Vedení, jehož vodiče jsou v obecném uspořádání, vykazuje nesymetrii v podélných i příčných složkách. Tento jev má nepříznivý vliv na účinnost přenosu elektrické energie. Tato nesymetrie se odstraňuje prostřídáním fázových vodičů, tzv. transpozicí. Úplná transpozice znamená, že na celém úseku vedení l prošel fázový vodič všemi polohami v hlavě stožáru. Princip transpozice je vyobrazen na **Obr. 2.1**. U dvojitého vedení lze provést tzv. souhlasnou transpozici (obě paralelní vedení jsou transponovány souhlasně), nebo tzv. kompenzační transpozici (na jednom vedení je provedena jedna úplná transpozice, zatímco druhé vedení je transponováno třikrát). Podle [1] není transpozice nutná pro vedení vn. Pro vedení vvn (110kV a 220 kV) není transpozice nutná do 100km délky. U vedení zvn (400kV) stačí jedna úplná transpozice na 300 km délky.

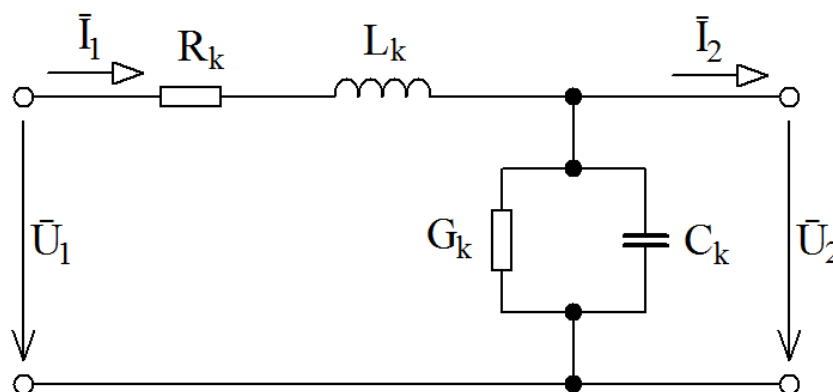


Obr. 2.1: Princip transpozice vodičů

3 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ VENKOVNÍCH VEDENÍ

Elektrické parametry venkovních vedení udáváme v jednotkách na km délky a označujeme je indexem k. Tedy R_k [Ω/km], L_k [mH/km], G_k [$\mu\text{S}/\text{km}$], C_k [nF/km].

Náhradní schéma venkovního vedení je na **Obr. 3.1**.



Obr. 3.1: Náhradní schéma venkovního vedení

3.1 Podélná impedance a její složky

Podélná impedance na jednotku délky je

$$z_k = R_k + jX_k = R_k + j\omega L_k. \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3.1)$$

3.1.1 Rezistance

Rezistance (dříve činný odpor) je reálnou složkou podélné impedance. Způsobuje ztráty činného výkonu a vzniká na ní úbytek napětí. Je závislá na rezistivitě materiálu, jmenovitém průřezu a délce vedení. Vliv má také teplota, povrchový jev (skinefekt), kroucení drátů v lanech, odchylka od skutečného průřezu a průhyb.

Při ustáleném stejnosměrném proudu a konstantní teplotě platí pro rezistanci vodiče vztah

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{s}, \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}, \text{mm}^2] \quad (3.2)$$

kde ρ_0 je rezistivita při teplotě ϑ_0 ,
 l je délka vodiče,
 s je průřez vodiče.

Rezistivita nepoužívanějších materiálů vodičů při teplotě $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ je uvedena v **Tab. 3.1**.

Tab. 3.1: Rezistivita nepoužívanějších materiálů vodičů [1]

Materiál	Rezistivita ρ_0 [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]
Cu	0,01786
Al	0,02941

Vliv rozdílné teploty na rezistanci vodiče vyjadřujeme činitelem k_{ϑ} . Změna rezistivity vlivem rozdílné teploty oproti teplotě ϑ_0 se podle [2] vyjádří vztahem

$$k_{\vartheta} = \frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \alpha_R(\vartheta - \vartheta_0) + \beta_R(\vartheta - \vartheta_0)^2 \quad [-; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}; ^\circ\text{C}^{-1}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}^{-2}, ^\circ\text{C}], \quad (3.3)$$

kde ρ, ρ_0 jsou rezistivity při teplotě ϑ a ϑ_0
 α_R, β_R jsou teplotní součinitelé odporu.

Pro provozní teploty vodičů stačí uvažovat jen teplotní součinitel α_R . Pro případ oteplení při zkratech se uplatní i teplotní součinitel β_R . Teplotní součinitelé základních materiálů jsou uvedeny v **Tab. 3.2**.

Tab. 3.2: Teplotní součinitelé odporu [3]

Materiál	Teplotní součinitelé odporu	
	$\alpha_R [1/^\circ\text{C}]$	$\beta_R [1/^\circ\text{C}^2]$
Cu	$4,17 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$
Al	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$
Fe	$6,20 \cdot 10^{-3}$	$9,00 \cdot 10^{-6}$

Povrchový jev (skinefekt) je nerovnoměrné rozložení střídavého proudu po průřezu vodiče. Způsobuje při průchodu střídavého proudu zvětšování proudové hustoty ve směru k povrchu vodiče. Důsledkem tohoto jevu je zvětšení rezistance při průchodu střídavého proudu oproti proudu stejnosměrnému. Vyjadřuje se zavedením činitele zvětšení rezistance vlivem povrchového jevu k_s . Tento součinitel je dán poměrem rezistance při průchodu střídavého proudu R_{st} a rezistance při průchodu stejnosměrného proudu R_{ss} . Lze podle [2] vyjádřit použitím Besselových funkcí, pro jejíž vyjádření bývá použito většinou tabelárně zpracovaných vztahů. Zavedeme-li pomocný koeficient m , daný vztahem

$$m = \sqrt{\frac{\mu f}{2R_{ss}}} \quad [-; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{Hz}, \Omega \cdot \text{m}^{-1}], \quad (3.4)$$

kde μ je permeabilita, $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, $\mu_r [-]$,
 f je frekvence,
 R_{ss} je stejnosměrná rezistance na jednotku délky daná vztahem $R_{ss} = \rho_0/s$,

lze pro vodič kruhového průřezu z jednoho materiálu Al nebo Cu psát vztahy pro činitel zvětšení rezistance vlivem povrchového jevu. Podle [2] platí

$$k_s = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} \quad \text{pro } m \leq 1,2 \quad [-; -], \quad (3.5)$$

$$k_s = 0,25 + 0,708m + 0,06625m^{-1} \quad \text{pro } m > 1,2 \quad [-; -]. \quad (3.6)$$

U vodičů z feromagnetického materiálu (Fe) je relativní permeabilita funkcí proudu. Pro výpočet činitele zvětšení rezistance vlivem povrchového jevu se zde používá vztahů podle [2]

$$k_s = 1 + 0,85m^2 - 0,3m^3 + 0,05m^4 \text{ pro } m \leq 2 [-; -], \quad (3.7)$$

$$k_s = 1,4m \text{ pro } m > 1,2 [-; -]. \quad (3.8)$$

Pro dvoumateriálová AlFe lana se používají vztahy podle konstrukce lan. U lan s jednou vrstvou drátů Al na jednom drátu Fe lze použít vztahy pro lana z jednoho materiálu. Při větším počtu vrstev Al než jedna lze použít vztah pro dutá lana. Podle [2] platí

$$k_s = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-12} \left[\frac{(r_2 - r_1)f}{r_2 R_{ss}} \right]^2 [-; m, Hz, m, \Omega \cdot m^{-1}], \quad (3.9)$$

kde r_2 je vnější poloměr vrstvy Al,
 r_1 je vnitřní poloměr vrstvy Al.

Zvětšení rezistance vlivem povrchového jevu při průchodu proudu o frekvenci 50Hz u hliníkových vodičů, lan a dvoumateriálových lan není větší než 1,5 % a u měděných vodičů a lan většinou nepřesahuje 1 % [3].

Kroucení drátů v lanech způsobí zvětšení rezistance oproti plnému vodiči stejné osově délky. Jednotlivé vodiče lana mají mezi sebou přechodový odpor vlivem nečistot, což způsobí rozdělení proudu po těchto vodičích, které prochází šroubovicí. Činitel zvětšení rezistance kroucením drátů v lanech je dán poměrem délky závitu šroubovice k její výšce a_n , měřené v ose vodiče. Podle [2] platí

$$k_l = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \pi^2}}{a_n}, \quad (3.10)$$

kde a_n je výška závitu šroubovice,
 D_n je průměr lana,
 d je průměr jednoho vodiče.

Kroucení drátů v lanech způsobí zvětšení rezistance asi o 2 % u měděných lan, o 2 až 5 % u lan hliníkových a dvoumateriálových.

Průhyb zavěšeného vodiče způsobuje zvětšení délky vodiče proti topografické délce vedení. Pro délku vodiče zavěšeného ve dvou stejně vysokých bodech ve vzdálenosti a mezi sebou platí podle [4] vztah pro délku řetězovky

$$l_s = 2c \sinh \frac{a}{2c}, \quad (3.11)$$

kde c je parametr řetězovky, $c = \sigma_H / \gamma z$,
 σ_H je vodorovné namáhání ve vodiči [MPa],
 γ je měrná tíha vodiče, $\gamma = g_1 / s$ [N.mm⁻².m⁻¹],
 g_1 je tíha 1 m samotného vodiče [N.m⁻¹]
 z je přetížení vodiče námrazou.

V **Tab. 3.3** jsou uvedeny hodnoty vodorovného namáhání σ_H a tíhy vodiče g_1 pro dvoumateriálové lano AlFe 6.

Tab. 3.3: Vodorovné namáhání a tíha 1 m lana AlFe 6 [4]

s [mm ²]	16	25	35	50	70	95	120	150	185	210	240	300	450
g_1 [N.m ⁻¹]	0,61	0,91	1,37	1,71	2,35	3,23	4,41	4,93	6,22	6,84	7,70	9,60	14,6
σ_H [MPa]	97	95	92	92	96	96	96	93	92	96	90	91	87

Činitel zvětšení rezistance průhybem je podle [2] vyjádřen vztahem

$$k_p = \frac{l_s}{a}. \quad (3.12)$$

Výslednou rezistanci venkovních vedení lze vypočítat ze vztahu

$$R_k = R_0 k_\vartheta k_s k_l k_p. \quad (3.13)$$

Obvykle se respektuje jen vliv teploty a povrchového jevu.

U kabelového vedení platí pro výpočet rezistance stejné vztahy jako u venkovního vedení. Pouze vliv průhybu se zanedbává.

3.1.2 Indukčnost

Indukčností vyjadřujeme vliv magnetického pole způsobeného proudem procházejícím vodičem na daný vodič. U více vodičů umístěných v nevelké vzdálenosti od sebe, vznikají vzájemně magneticky vázané proudové obvody jednotlivých vodičů. Časově proměnné magnetické pole způsobené proudem procházejícím vodičem na daný vodič způsobuje indukci napětí nejen na tomto vodiči, ale i na vodičích od něj vzdálených. Vzniká na ní úbytek napětí.

U trojfázových symetrizovaných vedení se souměrnou zátěží lze indukční vlivy vyjádřit tzv. provozní indukčností a proudem jedné fáze. U nesouměrného vedení, nebo nesouměrné zátěži (případně kombinaci obou) je nutno indukční vlivy vyjádřit odděleně pomocí vlastí a vzájemné indukčnosti a proudů v příslušných obvodech.

Udává se v [mH.km⁻¹]. Od indukčnosti je odvozený parametr indukční reaktance, který je imaginární složkou podélné impedance vedení.

3.1.2.1 Indukčnost dvouvodičového vedení

Výpočet indukčnosti smyčky (na jednotku délky) vychází ze statické definice indukčnosti. Podle [1] platí

$$L_e = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{a}{r} \text{ [H.m}^{-1}\text{; Wb, A; H.m}^{-1}\text{, m, m]}, \quad (3.14)$$

kde Φ je magnetický indukční tok
 I je proud,
 a je osová vzdálenost mezi vodiči,
 r je poloměr vodiče.

Pro výpočet elektrických vedení se vyjadřuje indukčnost na jeden vodič. Po úpravě dostaneme

$$L_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a}{r}. \quad (3.15)$$

Dosazením za $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$, převedením přirozeného logaritmu na dekadický ($\ln x = 2,3 \log x$) a vyjádřením indukčnosti v $[\text{mH.km}^{-1}]$ dostaneme výraz pro indukčnost vztaženou na jeden vodič (bez respektování povrchového jevu)

$$L_e = 0,46 \log \frac{a}{r} [\text{mH.km}^{-1}; \text{m, m}]. \quad (3.16)$$

Podle energetické definice indukčnosti je indukčnost od magnetického toku uvnitř vodiče, která je nezávislá na poloměru i vzdálenosti vodičů, dána vztahem [1]

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} [\text{H.m}^{-1}; \text{H.m}^{-1}]. \quad (3.17)$$

Dosazením za $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ a vyjádřením indukčnosti v $[\text{mH.km}^{-1}]$ dostaneme pro jeden vodič hodnotu vnitřní indukčnosti $L_i = 0,05 \text{ mH.km}^{-1}$.

Spojením vnější a vnitřní indukčnosti a respektováním, že jde o magnetický materiál, dostaneme celkovou indukčnost vztaženou na jeden vodič s plným kruhovým průřezem. Platí

$$L = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05\mu_r [\text{mH.km}^{-1}; \text{m, m}]. \quad (3.18)$$

Indukčnost celé smyčky tvořené dvěma vodiči ve vzdálenosti a je pak dvojnásobná.

Část vnitřní indukčnosti je třeba doplnit o korekční člen α , respektující vliv povrchového jevu. Podle [1] platí

$$L = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05\alpha\mu_r [\text{mH.km}^{-1}]. \quad (3.19)$$

Zavedením koeficientu zvýšení provozní indukčnosti (zmenšení poloměru) pro střídavý proud k a dosazením za druhý člen v rovnici výraz $0,46 \log \frac{1}{k}$ můžeme psát

$$L = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,46 \log \frac{1}{k} = 0,46 \log \frac{a}{kr} [\text{mH.km}^{-1}; \text{m, m, -}], \quad (3.20)$$

kde k je podle [1] dáno vztahem (3.21).

$$k = 10^{-\frac{0,05\alpha\mu_r}{0,46}}. \quad (3.21)$$

Obvykle se koeficient k určuje měřením indukčnosti. Je závislý na frekvenci, materiálu a tvaru průřezu vodiče. V **Tab. 3.4** jsou uvedeny orientační hodnoty koeficientu k pro hliníkové vodiče.

Tab. 3.4: Koeficient zvýšení indukčnosti pro střídavý proud [3]

Vodič		k	Poznámka
Al drát kruhového průřezu		0,779	$\mu_r = 1,$ $f = 50 \text{ Hz},$ neplatí pro svazkové vodiče
Al lana	7 drátů	0,726	
	19 drátů	0,758	
	37 drátů	0,768	
	61 drátů	0,772	
	91 drátů	0,774	
	127 drátů	0,776	
Dvoumateriálová lana AlFe	1 vrstva Al drátů	0,550 až 0,700	
	26 drátů ve 2 vrstvách	0,809	
	36 drátů ve 2 vrstvách	0,826	
	54 drátů ve 3 vrstvách	0,810	

3.1.2.2 Indukčnost trojvodičového vedení

Při výpočtu indukčnosti trojvodičového vedení se vychází z rovnice (3.18) pro výpočet indukčnosti dvouvodičového vedení. Pro indukčnost jednoho vodiče trojfázového nesouměrného vedení musí být zahrnut vliv magnetického pole působeného proudem ve vodiči a vliv magnetických polí, kterými působí sousední dva vodiče na vodič první. Lze tedy pro výpočet provozní indukčnosti vodiče 1 psát vztah

$$L_{p1} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12}a_{13}}}{r} + 0,05\mu_r [\text{mH.km}^{-1}; \text{m, m}], \quad (3.22)$$

kde L_{p1} je provozní indukčnost vodiče 1,
 a_{12} je vzdálenost mezi vodičem 1 a 2,
 a_{13} je vzdálenost mezi vodičem 1 a 3.

Podobně lze napsat i vztahy pro výpočet provozní indukčnosti vodičů 1 a 2. Platí

$$L_{p2} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12}a_{23}}}{r} + 0,05\mu_r [\text{mH.km}^{-1}; \text{m, m}], \quad (3.23)$$

$$L_{p3} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{13}a_{23}}}{r} + 0,05\mu_r [\text{mH.km}^{-1}; \text{m, m}], \quad (3.24)$$

V případě uspořádání vodičů v hlavě stožáru v rovnostranném trojúhelníku (tzv. souměrné uspořádání) jsou všechny vzdálenosti mezi vodiči stejné. Důsledkem toho jsou i provozní indukčnosti všech vodičů stejné a platí pro ně stejný vztah jako pro dvouvodičové vedení. Platí

$$L_{p1} = L_{p2} = L_{p3} = L_p = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05\mu_r [\text{mH.km}^{-1}; \text{m, m}], \quad (3.25)$$

Je-li u jednoduchého trojfázového vedení provedena úplná transpozice, bude celková indukčnost tohoto vedení rovna součtu tří za sebou řazených indukčností rozdělených na

vzdálenosti $l_{t1} = l_{t2} = l_{t3} = l_t/3$, kde l_t je délka tohoto transponovaného vedení. Pro výpočet provozní indukčnosti jednoho vodiče platí

$$L_p = L_{pt1} + L_{pt2} + L_{pt3} = \frac{l_t}{3} \left(0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12}a_{13}}}{r} + 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12}a_{23}}}{r} + 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{13}a_{23}}}{r} + 3 \cdot 0,05\mu_r \right) [\text{mH}]. \quad (3.26)$$

Po úpravě a vztažení indukčnosti vodiče na délku vedení obdržíme vztah pro výpočet provozní indukčnosti jednoho vodiče třífázového transponovaného vedení na jednotku délky. Platí

$$L_p = 0,46 \log \frac{a_s}{r} + 0,05\mu_r [\text{mH.km}^{-1}], \quad (3.27)$$

kde $a_s = \sqrt[3]{a_{12}a_{13}a_{23}}$ je střední vzdálenost mezi vodiči. Indukčnost celého trojfázového transponovaného vedení je pak trojnásobná.

Provozní indukčnost plně transponovaného vedení je v podstatě střední hodnota provozních indukčností vodičů netransponovaného vedení [3]. Platí

$$L_p = \frac{L_{p1} + L_{p2} + L_{p3}}{3} [\text{mH.km}^{-1}]. \quad (3.28)$$

Pro dvojité transponované vedení, tj. obvykle pro dva trojfázové systémy paralelně pracující musíme pro výpočet provozní indukčnosti vodiče 1 uvažovat mimo jiné i vliv magnetických polí, kterými působí vodiče paralelního vedení na tento vodič. Podle [1] platí pro provozní indukčnost dvojitého třífázového transponovaného vedení

$$L_p = 0,46 \log \frac{a_s a_s''}{r a_s'} + 0,05\mu_r [\text{mH.km}^{-1}], \quad (3.29)$$

kde a_s je střední vzdálenost mezi vodiči soustavy I, resp. II,
 a_s' je střední vzdálenost mezi stejnojmennými vodiči soustavy I a II,
 a_s'' je střední vzdálenost mezi nestejnojmennými vodiči soustavy I a II.

Platí

$$\begin{aligned} a_s &= \sqrt[3]{a_{12}a_{23}a_{13}}, \\ a_s' &= \sqrt[3]{a_{14}a_{25}a_{36}}, \\ a_s'' &= \sqrt[3]{a_{15}a_{16}a_{26}}, \end{aligned} \quad (3.30)$$

Pro dvojité trojfázové vedení, na kterém je provedena kompenzační transpozice je vztah pro provozní indukčnost stejný, jako pro jednoduché transponované trojfázové vedení (3.27).

Jsou-li jednotlivé fáze vedení tvořeny svazkovými vodiči, používá se v zásadě stejných vzorců, pouze s tím rozdílem, že uvažujeme náhradní poloměr svazku. Pro náhradní poloměr svazku platí podle [1]

$$r_e = r^{\frac{1}{n}} \cdot m^{\frac{n-1}{n}} [\text{m;m, m}], \quad (3.31)$$

kde	r_e	je ekvivalentní poloměr svazku,
	r	je poloměr vodiče,
	m	je střední geometrická vzdálenost mezi vodiči ve svazku,
	n	je počet vodičů ve svazku.

Pro 4 vodiče ve svazku, kde strana čtverce je a se střední geometrická vzdálenost m vypočítá podle [1] ze vztahu

$$m = a\sqrt[6]{2} \text{ [m; m]}. \quad (3.32)$$

Pokud je počet vodičů ve svazku větší než 4, je výhodné ekvivalentní poloměr r_e počítat ze vztahu

$$r_e = \sqrt[n]{nr \cdot r_k^{n-1}} \text{ [m; m, m]}, \quad (3.33)$$

kde r_k je poloměr kružnice procházející středy vodičů, které jsou rovnoměrně rozloženy na této kružnici.

Vliv povrchového jevu se vyjadřuje stejným způsobem jako u dvouvodičového vedení. Zavede se tedy koeficient zmenšení poloměru vodiče k , jehož přibližné hodnoty jsou uvedeny v **Tab. 3.4**.

U kabelových vedení lze podle [3] použít vztahů pro transponované venkovní vedení. Vlivem menší vzdálenosti vodičů mezi sebou je provozní indukčnost kabelového vedení podstatně menší než u venkovních vedení. Provozní indukčnost kabelového vedení bývá o 70 % až 75 % menší než provozní indukčnost vedení venkovního s vodiči stejných průřezů.

3.2 Příčná admitance a její složky

Příčná admitance na jednotku délky je

$$y_k = G_k + jB_k = G_k + j\omega C_k. \text{ [S/km]} \quad (3.34)$$

3.2.1 Konduktance

Konduktance je reálnou složkou příčné admitance. Způsobuje ztráty činného výkonu (příčné ztráty), které závisí na napětí a povětrnostních vlivech. Při výpočtech se velmi často zanedbává, protože se za provozu může pohybovat v poměrně velkém rozmezí. Tím se značně zvyšuje nepřesnost výpočtu. Při přesném výpočtu, se musí uvažovat krajní možné hodnoty konduktance, aby bylo možné posoudit, v jakém rozmezí se může při provozu pohybovat.

Příčné ztráty jsou dány ztrátami svodem přes izolátory a ztrátami korónou.

3.2.1.1 Příčné ztráty

Jsou způsobeny svodem přes izolátory (izolační odpor izolátoru má konečnou hodnotu) a propouštěním proudu po povrchu izolace vlivem znečištění a působení povětrnostních vlivů na izolátory. Označíme-li izolační odpor 1 km vedení jako R_i , je jemu odpovídající svod G daný podle [1] vztahem

$$G = \frac{1}{R_i} \text{ [}\Omega\cdot\text{km; }\mu\text{S}\cdot\text{km}^{-1}\text{]} \quad (3.35)$$

a svodový proud I při daném fázovém napětí U_f daný vztahem $I = GU_f$, potom budou ztráty v jedné fázi

$$\Delta P = IU_f = GU_f^2 \text{ [W; A, V; S, V]}. \quad (3.36)$$

Vyjádřením svodu v [$\mu\text{S}\cdot\text{km}^{-1}$] a převedením fázového napětí na sdružené dostaneme vztah pro výpočet celkových trojfázových ztrát způsobených svodem přes izolátory.

Platí

$$\Delta P_c = U^2 G \cdot 10^{-3} \text{ [kW}\cdot\text{km}^{-1}; \text{kV; S}\cdot\text{km}^{-1}]. \quad (3.37)$$

V **Tab. 3.5** jsou podle [3] s přihlédnutím k [1] uvedeny přibližné hodnoty ztrát způsobených svodem přes izolátory pro napěťovou hladinu v_n a jim odpovídající hodnoty svodu. Minimální, resp. maximální hodnoty jsou při dobrých, resp. špatných povětrnostních podmínkách.

Tab. 3.5: Ztráty výkonu v izolaci a konduktance venkovního vedení v_n

Napětí U_n [kV]	Ztráty ΔP_c [W.km ⁻¹]		Konduktance G [$\mu\text{S}\cdot\text{km}^{-1}$]	
	min.	max.	min.	max.
1	0,28	1,37	0,28	1,37
10	2,8	13,7	0,028	0,137
22	6,16	30,14	0,013	0,062

3.2.1.2 Ztráty korónou

Koróna se objeví při překročení kritického napětí mezi vodiči, je-li intenzita elektrického pole na vodiči tak velká, že umožní nárazovou ionizaci v přilehlé vrstvě vzduchu. Projevuje se jako modrofialový málo viditelný výboj doplněný slyšitelným zvukovým efektem – sršením. Kritické napětí závisí na vzdálenosti a poloměru vodičů, hladkosti jejich povrchu a na atmosférických podmínkách. Ztráty korónou vznikají při napětí 80kV a vyšším. V **Tab. 3.6** jsou podle [3] uvedeny přibližné hodnoty ztrát vlivem svodu přes izolátory a ztrát způsobené korónou pro napěťovou hladinu v_{vn} a v_{zn} , a jim odpovídající hodnoty konduktance. Minimální, resp. maximální hodnoty jsou při dobrých, resp. špatných povětrnostních podmínkách.

Tab. 3.6: Ztráty výkonu v izolaci a korónou a konduktance venkovních vedení v_{vn}

Napětí U_n [kV]	Ztráty ΔP_c [kW.km ⁻¹]				Konduktance $G \cdot 10^{-2}$ [$\mu\text{S}\cdot\text{km}^{-1}$]					
	v izolaci		korónou		izolace		korónou		celkem	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
110	0,07	3,6	0	6	1	30	3,3	5	4,3	35
220	0,12	0,77	0	15	0,25	1,6	2,5	3,6	2,75	5,2
400	0,16	1,4	0,15	70	0,1	0,9	1,3	2	1,4	2,9

Ztráty vlivem konduktance jsou u kabelových vedení dány především ztrátami v dielektriku způsobenými namáháním izolace procházejícím střídavým napětím.

3.2.2 Kapacita

Kapacitou se vyjadřuje zpětný vliv elektrického pole působeného v prostoru vedení napětím mezi vodiči na dané vedení. Je třeba uvažovat dílčí kapacity mezi vodiči (kapacity vzájemné) a dílčí kapacity mezi vodičem a zemí (kapacity vlastní). U obecného systému n -fázových vodičů existuje n -dílčích kapacit proti zemi a $n(n+1)/2$ dílčích kapacit mezi jednotlivými vodiči.

Udává se většinou v $[\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}]$. Od kapacity je odvozen parametr kapacitní susceptance, který je imaginární složkou příčné admitance.

Pro určení kapacit mezi vodičem a zemí se využívá metody zrcadlení. U jednovodičového vedení lze zem nahradit vodičem umístěným v zemi v hloubce, která je stejná jako výška vodiče nad terénem. Tato náhrada je nezávislá na frekvenci a materiálových konstantách země i vodiče.

Pro obecné uspořádání n -vodičů jsou vztahy mezi potenciály jednotlivých vodičů a mezi náboji na nich dány funkční závislostí vyjádřenou v maticové formě [1]

$$[V] = [\delta] \cdot [Q] \quad (3.38)$$

kde $[V]$ je sloupcová matice potenciálů jednotlivých vodičů (1 až n),
 $[\delta]$ je čtvercová symetrická matice potenciálních součinitelů řádu n ,
 $[Q]$ je sloupcová matice nábojů na vodičích (1 až n).

Řešením této soustavy rovnic pro neznámé náboje Q na jednotku délky obdržíme soustavu rovnic

$$[Q] = [\delta]^{-1} \cdot [V] = [\gamma] \cdot [V], \quad (3.39)$$

kde $[\gamma]$ je čtvercová symetrická matice kapacitních součinitelů řádu n .

Rovnici (3.39) lze rozepsat

$$Q_k = \gamma_{kk} V_k + \sum_{m=1, m \neq k}^n \gamma_{km} V_m \quad (k = 1 \text{ až } n), \quad (3.40)$$

kde k značí vodič, jehož náboj je počítáný,
 m značí vodič, jehož elektrické pole působí na vodič k ,
 Q_k je náboj na vodiči k ,
 γ_{kk} je vlastní kapacitní součinitel vodiče k ,
 V_k je potenciál vodiče k ,
 γ_{km} je vzájemný kapacitní součinitel mezi vodičem k a m ,
 V_m je potenciál vodiče m .

Soustava rovnic (3.39) nám dává kapacitní součinitele vzájemné a vlastní, z nichž pak můžeme přímo, nebo nepřímo určit dílčí kapacity mezi jednotlivými vodiči k_{km} (tzv. vzájemné kapacity) a dílčí kapacity mezi vodiči a zemí k_k (tzv. vlastní kapacity). Náboje na vodičích lze určit také pomocí vlastních a vzájemných kapacit. Platí

$$[Q] = [k] \cdot [V], \quad (3.41)$$

kde $[k]$ je čtvercová symetrická matice vzájemných a vlastních kapacit.

Podle [3] lze rovnici (3.41) rozepsat

$$Q_k = k_{kk}V_k - \sum_{m=1, m \neq k}^n k_{km}V_m \quad (k = 1 \text{ až } n), \quad (3.42)$$

kde k_{kk} je náhradní vzájemná kapacita daná vztahem

$$k_{kk} = k_k \sum_{m=1, m \neq k}^n k_{km}. \quad (3.43)$$

Srovnáním rovnic (3.40) a (3.41) dostaneme

$$\gamma_{kk} = k_{kk} = k_k \sum_{m=1, m \neq k}^n k_{km} \quad (3.44)$$

a

$$\gamma_{km} = -k_{km}. \quad (3.45)$$

Odtud dostaneme obecný vztah pro výpočet vzájemných kapacit

$$k_{km} = -\gamma_{km} \quad (3.46)$$

a vlastních kapacit

$$k_k = \gamma_{kk} \sum_{m=1, m \neq k}^n \gamma_{km} \quad (k = 1 \text{ až } n). \quad (3.47)$$

Uvážíme-li vodič 1 válcového průřezu s rovnoměrně rozloženým nábojem Q , u kterého chceme určit potenciál v bodě P podle **Obr. 3.2**, můžeme pro potenciál v tomto bodě od osamělého vodiče za použití principu zrcadlení a principu superpozice podle [1] psát

$$V_P = \frac{Q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{\rho_{p1}}{\rho_{p1'}}, \quad (3.48)$$

kde V_P je potenciál v bodě P ,
 ϵ_0 je permitivita vakua $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$,
 ϵ_r je relativní permitivita (pro vzduch $\epsilon_r = 1$),
 ρ_{p1} je vzdálenost mezi povrchem vodiče 1 a bodem P ,
 $\rho_{p1'}$ je vzdálenost mezi zrcadlovým vodičem v zemi $1'$ a bodem P .

Přejdeme-li s bodem P na povrch vodiče 1, kde $\rho_{p1} = r$ a $\rho_{p1'} = 2h$ (za předpokladu, že $2h \gg r$), dostaneme pro potenciál mezi vodičem 1 a zemí V_{11} vztah

$$V_{11} = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} = \delta_{11}Q_1, \quad (3.49)$$

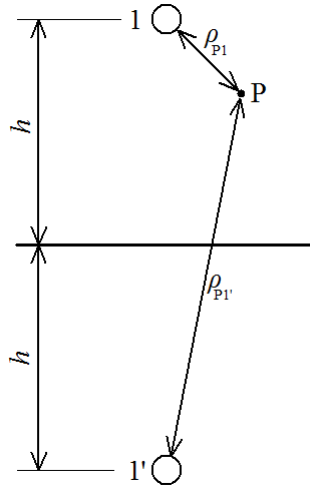
kde Q_1 je náboj ve vodiči 1,
 h_1 je výška vodiče 1 nad zemí,
 r je poloměr vodiče 1 nad zemí,
 δ_{11} je potenciální součinitel vlastní vodiče 1.

Podle rovnice (3.49) pak lze napsat obecnou rovnici pro výpočet vlastního potenciálního součinitele vodiče k (předpokládáme, že poloměr všech vodičů v systému je stejný). Platí

$$\delta_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{2h_k}{r} [\text{m.F}^{-1}; \text{F.m}^{-1}, \text{m}, \text{m}]. \quad (3.50)$$

Dosazením do této rovnice za $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$, $\epsilon_r = 1$, $\ln x = 2,3 \log x$ a vyjádřením v jednotce $[\text{km.nF}^{-1}]$ dostaneme zjednodušený vztah

$$\delta_{kk} = 0,0413 \log \frac{2h_k}{r} [\text{km.nF}^{-1}; \text{m}, \text{m}]. \quad (3.51)$$



Obr. 3.2: Vlastní kapacita osamělého vodiče [1]

Při dvou vodičích je vliv vodiče 2 při umístění bodu P na vodiči 1 (**Obr. 3.3**) vyjádřen vzájemným potenciálem V_{12} . Podle [1] platí

$$V_{12} = \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{\rho_{12'}}{a_{12}} = \delta_{12} Q_2, \quad (3.52)$$

kde Q_2 je náboj ve vodiči 2,
 a_{12} je vzdálenost mezi vodičem 1 a 2,
 $\rho_{12'}$ je vzdálenost mezi vodičem 1 a zrcadlovým vodičem 2' daný vztahem
 $\rho_{12'} = \sqrt{4h_1h_2 + a_{12}^2}$,
 δ_{12} je potenciální součinitel vzájemný.

Podle rovnice (3.52) můžeme napsat obecnou rovnici pro výpočet vzájemného potenciálního činitele mezi vodičem k a m . Platí

$$\delta_{km} = \frac{1}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{4h_kh_m + a_{km}^2}}{a_{km}} [\text{m.F}^{-1}; \text{F.m}^{-1}, \text{m}, \text{m}]. \quad (3.53)$$

Stejným postupem jako u rovnice (3.51) vztah zjednodušíme na

$$\delta_{km} = 0,0413 \log \frac{\sqrt{4h_kh_m + a_{km}^2}}{a_{km}} [\text{km.nF}^{-1}; \text{m}, \text{m}]. \quad (3.54)$$

Pro třífázový trojvodičový systém bez zemních lan dostáváme podle rovnice (3.38) matici potencionálních součinitelů, jejíž prvky jsou dány podle rovnic (3.51) a (3.53)(3.54).

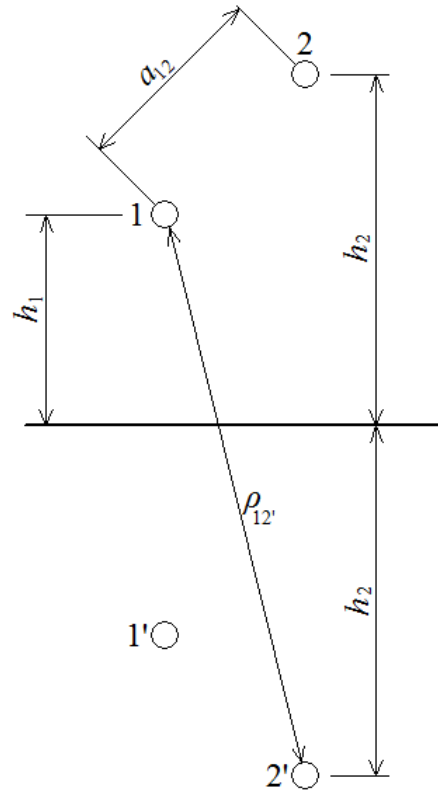
Platí

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} [\text{km.nF}^{-1}]. \quad (3.55)$$

Podle rovnice (3.39) dostaneme matici kapacitních součinitelů

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\delta}^{-1} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} [\text{nF.km}^{-1}], \quad (3.56)$$

která je inverzní maticí matice potencionálních součinitelů. Dosazením jednotlivých kapacitních činitelů do rovnic (3.46) a (3.47) dostáváme vypočtené hodnoty vzájemných kapacit k_{12}, k_{23}, k_{13} a vlastních kapacit k_1, k_2, k_3 . Tyto kapacity však v obecném uspořádání nabývají šesti různých hodnot. Tato kapacitní nesouměrnost způsobuje nesymetrii kapacitních nabíjecích proudů po připojení do souměrné soustavy napětí. Vlivem proudové nesymetrie vznikají ztráty výkonu a může dojít k nesymetrii napětí. Kapacitní nesouměrnost odstraníme transpozicí vodičů.



Obr. 3.3: Vzájemná kapacita dvou vodičů [1]

3.2.2.1 Kapacita třífázového transponovaného vedení

Transpozicí vodičů dosáhneme zjednodušení, protože lze zavést střední potenciální součinitele. Pro střední potenciální součinitel vlastní platí podle [1] vztah

$$\delta = 0,0413 \log \frac{2h_s}{r} [\text{km.nF}^{-1}; \text{m, m}]. \quad (3.57)$$

kde δ je vlastní potenciální součinitel,
 h_s je střední výška vodičů nad zemí daná vztahem $h_s = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}$.

Pro střední potenciální součinitel vzájemný platí podle [1] vztah

$$\delta_v = 0,0413 \log \frac{\sqrt{4h_s^2 + a_s^2}}{a_s} [\text{km.nF}^{-1}; \text{m, m}]. \quad (3.58)$$

kde a_s je střední vzdálenost mezi vodiči daná vztahem $a_s = \sqrt[3]{a_{12}a_{23}a_{13}}$.

Tím se matice potenciálních součinitelů změní na

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta & \delta_v & \delta_v \\ \delta_v & \delta & \delta_v \\ \delta_v & \delta_v & \delta \end{bmatrix} [\text{km.nF}^{-1}]. \quad (3.59)$$

Pro vyjádření kapacitních součinitelů spočítáme nejprve determinant matice δ , pro který platí

$$\Delta = \delta^3 + 2\delta_v^3 - 3\delta\delta_v^2 = (\delta - \delta_v)(\delta - \delta_v)(\delta + 2\delta_v). \quad (3.60)$$

Pro vlastní kapacitní součinitel můžeme psát

$$\gamma = \frac{\delta^2 - \delta_v^2}{\Delta} = \frac{(\delta + \delta_v)(\delta - \delta_v)}{(\delta - \delta_v)(\delta - \delta_v)(\delta + 2\delta_v)} = \frac{\delta + \delta_v}{(\delta - \delta_v)(\delta + 2\delta_v)} [\text{nF.km}^{-1}], \quad (3.61)$$

a pro vzájemný kapacitní součinitel

$$\gamma_v = \frac{-\delta_v(\delta - \delta_v)}{\Delta} = \frac{-\delta_v(\delta - \delta_v)}{(\delta - \delta_v)(\delta - \delta_v)(\delta + 2\delta_v)} = \frac{-\delta_v}{(\delta - \delta_v)(\delta + 2\delta_v)} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.62)$$

Podle rovnice (3.40) můžeme pro transponované vedení psát

$$Q_1 = \gamma V_1 + \gamma_v(V_2 + V_3). \quad (3.63)$$

Pro symetrickou soustavu zdrojových napětí platí, že součet vektorů jednotlivých fázových napětí je roven nule. Za předpokladu, že soustava zdrojových napětí je symetrická a potenciály jednotlivých vodičů jsou rovny příslušným fázovým napětím, můžeme podle [1] psát

$$Q_1 = \gamma U_{1f} + \gamma_v(U_{2f} + U_{3f}) = \gamma U_{1f} - \gamma_v U_{1f} = U_{1f}(\gamma - \gamma_v) = C_p U_{1f}, \quad (3.64)$$

kde C_p je provozní kapacita třífázového transponovaného vedení, která je směrodatná pro určení nabíjecích proudů.

Vyjádřením provozní kapacity z rovnice (3.64) a dosazením za kapacitní součinitele z rovnic (3.61) a (3.62) dostaneme

$$C_p = \gamma - \gamma_v = \frac{1}{\delta - \delta_v}. \quad (3.65)$$

Dosazením do rovnice (3.65) z rovnic (3.57) a (3.58) dostaneme vztah pro výpočet provozní kapacity trojfázového transponovaného vedení. Platí

$$C_p = \frac{24,2}{\log \frac{2h_s}{r} \frac{a_s}{\sqrt{4h_s^2 + a_s^2}}} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.66)$$

Za předpokladu že $4h_s^2 \gg a_s^2$, je možné výsledný vztah pro provozní kapacitu zjednodušit a psát

$$C_p = \frac{24,2}{\log \frac{a_s}{r}} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.67)$$

Z rovnice (3.47) platí pro dílčí kapacitu proti zemi transponovaného vedení

$$k = \gamma + 2\gamma_v. \quad (3.68)$$

Dosazením z rovnic (3.61) a (3.62) a se stejným předpokladem jako u rovnice (3.67) lze psát vztah pro výpočet dílčí kapacity proti zemi transponovaného vedení

$$k = \frac{24,2}{\log \frac{8h_s^3}{ra_s^2}} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.69)$$

Z rovnice (3.47) platí pro dílčí kapacitu mezi vodiči transponovaného vedení

$$k_v = -\gamma_v. \quad (3.70)$$

Dosazením z rovnice (3.62) a se stejným předpokladem jako u rovnice (3.67) lze psát vztah pro výpočet dílčí kapacity mezi vodiči transponovaného vedení

$$k_v = \frac{24,2 \log \frac{2h_s}{a_s}}{\log \frac{a_s}{r} \log \frac{8h_s^3}{ra_s^2}} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.71)$$

Provozní kapacitu lze také vyjádřit dosazením rovnic (3.68) a (3.70) do rovnice (3.65). Vyjádření provozní kapacity pomocí kapacity vlastní a kapacity vzájemné je

$$C_p = k + 3k_v. \quad (3.72)$$

3.2.2.2 Kapacita třífázového transponovaného vedení se zemními lany

Vliv jednoho zemního lana lze vyjádřit zavedením náhradního potenciálního součinitele zemního lana δ_r , pro který platí [1]

$$\delta_r = \frac{\delta_{vz}^2}{\delta_{zz}}, \quad (3.73)$$

kde δ_{vz} je střední potenciální součinitel vzájemný mezi vodiči a zemním lanem
 δ_{zz} je potenciální součinitel vlastní mezi zemním lanem a zemí.

Podle [1] platí

$$\delta_{zz} = 0,0413 \log \frac{2h_z}{r_z},$$

$$\delta_{vz} = 0,0413 \log \frac{\sqrt{4h_s h_z + a_{zs}^2}}{a_{zs}}, \quad (3.74)$$

kde h_z je výška zemního lana nad zemí,
 r_z je poloměr zemního lana,
 h_s je střední výška fázových vodičů nad zemí,
 a_{zs} je střední vzdálenost mezi vodiči a zemním lanem daná vztahem

$$a_{zs} = \sqrt[3]{a_{z1}a_{z2}a_{z3}}.$$

Pro matici potenciálních součinitelů zahrnujících vliv zemního lana platí

$$\delta_z = \begin{bmatrix} \delta_z & \delta_{zv} & \delta_{zv} \\ \delta_{zv} & \delta_z & \delta_{zv} \\ \delta_{zv} & \delta_{zv} & \delta_z \end{bmatrix}, \quad (3.75)$$

kde δ_z je vlastní potenciální součinitel zahrnující vliv zemního lana,
 δ_{zv} je vzájemný potenciální součinitel zahrnující vliv zemního lana.

Platí

$$\begin{aligned} \delta_z &= \delta - \delta_r \quad \text{a} \\ \delta_{zv} &= \delta_v - \delta_r. \end{aligned} \quad (3.76)$$

Vztahy pro výpočet provozní kapacity a dílčích kapacit transponovaného vedení se zemním lanem jsou analogické vztahům pro výpočet transponovaného vedení bez zemního lana s tím rozdílem, že místo δ dosazujeme δ_z a místo δ_v dosazujeme δ_{zv} . Podle rovnice (3.65) platí pro provozní kapacitu

$$C_{pz} = \frac{1}{\delta_z - \delta_{zv}} = \frac{1}{\delta - \delta_r - (\delta_v - \delta_r)} = \frac{1}{\delta - \delta_v} = C_p. \quad (3.77)$$

Z toho je patrné, že zemní lano nemá vliv na provozní kapacitu transponovaného vedení. Podle rovnic (3.68) a (3.61) a (3.62) lze pro dílčí vlastní kapacitu proti zemi psát

$$k_z = \frac{1}{\delta_z + 2\delta_{zv}} = \frac{1}{\delta - \delta_r + 2(\delta_v - \delta_r)} = \frac{1}{\delta + 2\delta_v - 3\delta_r}. \quad (3.78)$$

Dosazením do vztahu (3.78) z rovnic (3.57), (3.58) a (3.73), (3.74) dostaneme vztah pro výpočet dílčí vlastní kapacity proti zemi transponovaného trojfázového vedení se zemním lanem k_z . Zároveň zavádíme pro zjednodušení předpoklad, že $4h_s^2 \gg a_s^2$ a $4h_s h_z \gg a_{zs}^2$. Platí

$$k_z = \frac{24,2}{\log \frac{8h_s^3}{ra_s^2} - 3 \frac{\left(\log \frac{2\sqrt{h_s h_z}}{a_{zs}} \right)^2}{\log \frac{2h_z}{r_z}}} \text{ [nF.km}^{-1}\text{]}. \quad (3.79)$$

Podle rovnic (3.70) a (3.62) lze pro dílčí vzájemnou kapacitu mezi vodiči psát

$$k_{zv} = \frac{\delta_{zv}}{(\delta_z - \delta_{zv})(\delta_z + 2\delta_{zv})} = \frac{\delta_v - \delta_r}{(\delta - \delta_v)(\delta + 2\delta_v - 3\delta_r)}. \quad (3.80)$$

Dosazením do vztahu (3.80) z rovnic (3.57), (3.58) a (3.73), (3.74) dostaneme vztah pro výpočet dílčí vzájemné kapacity mezi vodiči transponovaného trojfázového vedení se zemním lanem k_{zv} . Zároveň zavádíme stejný předpoklad jako pro rovnici (3.79).

Platí

$$k_{zv} = \left[\log \frac{2h_s}{r} - \frac{\left(\log \frac{2\sqrt{h_s h_z}}{a_{zs}} \right)^2}{\log \frac{2h_z}{r_z}} \right] \cdot \frac{1}{\log \frac{a_s}{r_k}} \cdot \frac{24,2}{\log \frac{8h_s^3}{r a_s^2} - 3 \frac{\left(\log \frac{2\sqrt{h_s h_z}}{a_{zs}} \right)^2}{\log \frac{2h_z}{r_z}}} \text{ [nF.km}^{-1}\text{]}. \quad (3.81)$$

V praxi je lepší při výpočtu vyčíslit jednotlivé potenciálové koeficienty ze vztahů (3.57), (3.58) a (3.73) a tyto vyčíslené koeficienty dosadit do vztahů pro výpočet dílčích kapacit (3.78) a (3.80).

Obecně pro vedení s n zemními lany je náhradní součinitel zemních lan

$$\delta_r = \frac{n\delta_{vz}^2}{\delta_{zz} + (n-1)\delta_{vzz}}, \quad (3.82)$$

kde δ_{vzz} je vzájemný potenciální součinitel mezi jednotlivými zemními lany daný vztahem

$$\delta_{vzz} = 0,0413 \log \frac{\sqrt{4h_{zs}^2 + a_{zss}^2}}{a_{zss}}, \quad (3.83)$$

kde h_{zs} je střední výška zemních lan daní zemí,
 a_{zss} je střední vzdálenost mezi zemními lany.

3.2.2.3 Kapacita dvojitého trojfázového transponovaného vedení

Vzhledem k uvažované symetrii lze pro dvojité trojfázové transponované vedení paralelně provozované napsat podle [1] čtyři potenciální součinitele.

Vlastní potenciálový součinitel soustavy I, resp. II

$$\delta_I = 0,0413 \log \frac{2h_s}{r} \text{ [km.nF}^{-1}\text{; m, m]}, \quad (3.84)$$

vzájemný potenciální součinitel mezi vodiči uvnitř soustavy I, resp. II

$$\delta_{vI} = 0,0413 \log \frac{\sqrt{4h_s^2 + a_s^2}}{a_s} \text{ [km.nF}^{-1}\text{; m, m]}, \quad (3.85)$$

vzájemný potenciální součinitel mezi stejnojmennými vodiči soustavy I a II

$$\delta_{vI,II} = 0,0413 \log \frac{\sqrt{4h_s^2 + a_s'^2}}{a_s'} \text{ [km.nF}^{-1}\text{; m, m]}, \quad (3.86)$$

vzájemný potenciální součinitel mezi nestejnojmennými vodiči soustavy I a II

$$\delta_{vI,II}' = 0,0413 \log \frac{\sqrt{4h_s^2 + a_s''^2}}{a_s''} \text{ [km.nF}^{-1}\text{; m, m]}, \quad (3.87)$$

kde střední geometrické vzdálenosti jsou dány rovnicí (3.30) a střední výška nad zemí je

$$h_s = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}. \quad (3.88)$$

Celkový vlastní potenciálový součinitel dvojitého vedení δ_d je podle [1] dán vztahem

$$\delta_d = \delta_I + \delta_{vI,II}. \quad (3.89)$$

U dvojitého vedení se zemním lanem (nebo lany) platí

$$\delta_d = \delta_I + \delta_{vI,II} - \delta_r. \quad (3.90)$$

Celkový vzájemný potenciálový součinitel dvojitého vedení δ_{dv} je podle [1] dán vztahem

$$\delta_{dv} = \delta_{vI} + \delta'_{vI,II}. \quad (3.91)$$

U dvojitého vedení se zemním lanem (nebo lany) platí

$$\delta_{dv} = \delta_{vI} + \delta'_{vI,II} - \delta_r. \quad (3.92)$$

Z rovnic (3.90) a (3.92) lze napsat vztahy pro výpočet dílčích kapacit vlastních a vzájemných podobně jako v kapitole 0.

Podle vztahů (3.65), (3.89) a (3.91) lze napsat vztah pro výpočet provozní kapacity třífázového dvojitého transponovaného vedení C_{pd} napsat

$$C_{pd} = \frac{24,2}{\log \frac{2h_s}{r} \cdot \frac{a_s}{\sqrt{4h_s^2 + a_s^2}} \cdot \frac{\sqrt{4h_s^2 + a_s'^2}}{a_s'} \cdot \frac{a_s''}{\sqrt{4h_s^2 + a_s''^2}}} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.93)$$

Za předpokladu, že $4h_s^2 \gg a_s^2$, $4h_s^2 \gg a_s'^2$ a $4h_s^2 \gg a_s''^2$ lze pro provozní kapacitu dvojitého třífázového transponovaného vedení napsat zjednodušený vztah

$$C_{pd} = \frac{24,2}{\log \frac{a_s a_s''}{r a_s'}} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.94)$$

Výsledná provozní kapacita obou větví je pak dvojnásobná.

Při kompenzační transpozici se výsledný vztah ještě zjednoduší podle na

$$C_{pd} = \frac{24,2}{\log \frac{a_s}{r}} [\text{nF.km}^{-1}]. \quad (3.95)$$

3.2.2.4 Vliv svazkových vodičů

U vedení se svazkovými vodiči se výpočty nezmění. Pouze se poloměr vodiče r nahradí náhradním poloměrem svazku r_e , pro který platí vztah (3.31) nebo (3.33).

U kabelových vedení izolovaných jednoduchou izolací vznikají kapacitní vazby obdobně jako u venkovních vedení. Pokud jsou kabely stíněny nebo vybaveny ochrannými vodivými plášti, nevznikají kapacitní vazby mezi vodiči, ale pouze mezi vodičem a stíněním či pláštěm. Materiál stínění je závislý na teplotě, předchozím elektrickém namáhání a podléhá stárí. Proto je stanovení těchto kapacit obtížné, a v praxi se stanovuje měřením naprázdno. Provozní kapacita kabelového vedení je podstatně vyšší než u venkovního vedení [3].

3.3 Impedance zemní cesty

Impedance zemní cesty se skládá ze dvou složek. Reálnou složkou je odpor země R_Z a imaginární složkou je indukční reaktance země X_Z .

$$\mathbf{Z}_Z = R_Z + jX_Z = R_Z + j\omega L_Z [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (3.96)$$

kde L_Z je indukčnost země.

Podle [1] lze při přibližném výpočtu odporu země uvažovat jeho nezávislost na měrném odporu půdy. Pro odpor země platí podle [1]

$$R_Z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (3.97)$$

Při frekvenci 50 Hz je odpor země R_Z roven $0,05 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$.

Indukčnost země je závislá na měrném odporu půdy nebo vody, který může nabývat různých hodnot podle složení. Hodnoty měrného odporu půdy a vody jsou v tabulce **Tab. 3.7**.

Pro indukčnost země platí podle [1] vztah

$$L_Z = 0,46 \log \frac{0,795 \delta_Z}{h} [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (3.98)$$

kde δ_Z je hloubka vniku do země,
 h je výška vodiče nad zemí.

Pro hloubku vniku do země při frekvenci 50 Hz platí podle [1] vztah

$$\delta_Z = 100 \sqrt{\rho_Z}, \quad (3.99)$$

kde ρ_Z je měrný odpor půdy $[\Omega \cdot \text{m}]$.

Tab. 3.7: Měrný odpor půdy a vody [1]

Prostředí	Měrný odpor ρ [$\Omega \cdot m$]
Humusovitá půda	50 až 150
Hlinitá půda	80 až 150
Písčité půda	250 až 500
Písek jemný (suchý)	800
Voda pramenitá	1 až 100
Voda povrchová	10 až 10000
Voda spodní (bez odtoku)	0,1 až 1
Voda mořská	1

3.4 Složkové parametry

Při zkratové poruše se podle [6] vyskytují případy, kdy je postižena jenom jedna nebo dvě fáze. Tudíž se všechny fáze neúčastní stejnou mírou na hodnotě zkratového proudu. Při takových případech se výpočet zkratových proudů usnadní rozkladem napětí a proudů v souměrné složky.

Podstatou metody je podle [6] rozklad daného obvodu na tři samostatné soustavy: souslednou ($\mathbf{Z}_1$), zpětnou ($\mathbf{Z}_2$) a nulovou ($\mathbf{Z}_0$). U vedení je zpětná složka impedance vždy rovna sousledné složce impedance.

Sousledná složka impedance je podle [6] rovna podélné impedanci vedení. Platí

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{z}_k [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (3.100)$$

Zpětná složka impedance je podle [7] dána vztahem

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{z}_k + 3\mathbf{Z}_Z [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (3.101)$$

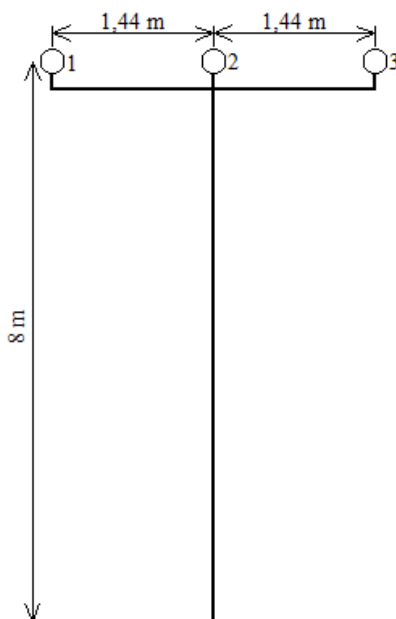
Z toho plyne, že velikost nulové složky impedance vedení je závislá na konstrukci vedení a vlastnostech zemní návratné cesty, jakož i přítomnosti či nepřítomnosti zemních lan.

3.5 Výpočet elektrických parametrů vedení vn

V této kapitole bude proveden výpočet elektrických parametrů tří nejčastějších konstrukcí venkovního vedení vn. U každé konstrukce bude proveden výpočet pro tři nejčastější průřezy lana. Pro zjednodušení uvažujeme transponované vedení.

3.5.1 Vedení vn s rovinným uložením vodičů na sloupu

Uspořádání vodičů na sloupu s rovinným uložením je zobrazeno na **Obr. 3.4**.



Obr. 3.4: Sloup vn s rovinným uspořádáním [10]

3.5.1.1 Dvoumateriálové lano AlFe 6, 70 mm²

Základní údaje pro výpočet jsou shrnuty v **Tab. 3.8**.

Tab. 3.8: Údaje pro výpočet rovinného vedení 70 mm²

Veličina	Hodnota	Zdroj
Matematický průřez duše s_1 [mm ²]	11,56	Tab. A.3
Matematický průřez pláště s_2 [mm ²]	66,16	Tab. A.3
Vzdálenost mezi vodiči 1 a 2 a_{12} [m]	1,44	Obr. 3.4
Vzdálenost mezi vodiči 1 a 3 a_{13} [m]	2,88	Obr. 3.4
Vzdálenost mezi vodiči 2 a 3 a_{23} [m]	1,44	Obr. 3.4
Výška vodiče 1 nad zemí h_1 [m]	8	Obr. 3.4
Výška vodiče 2 nad zemí h_2 [m]	8	Obr. 3.4
Výška vodiče 3 nad zemí h_3 [m]	8	Obr. 3.4
Rezistivita hliníku ρ_0 [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]	0,02941	Tab. 3.1
Koeficient zvětšení indukčnosti pro střídavý proud k [-]	0,809	Tab. 3.4

Rezistance při procházejícím střídavém proudu a při teplotě 20 °C je vypočtena podle vztahů (3.2), (3.9) a (3.13). Zvětšení rezistance vlivem průhybu a vlivem kroucení drátů v lanech je zanedbáno.

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{s_2} = 0,02941 \cdot \frac{1000}{66,16} = 0,4445 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{s_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{11,56}{\pi}} = 1,9182 \, \text{mm}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{s_1 + s_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{11,56 + 66,16}{\pi}} = 4,9738 \, \text{mm}$$

$$k_s = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-12} \left[\frac{(r_2 - r_1)f}{r_2 R_{ss}} \right]^2 = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-12} \left[\frac{(4,9738 - 1,9182) \cdot 50}{1,9182 \cdot \frac{0,4445}{1000}} \right]^2 = 1,0002$$

$$R_k = R_0 k_s = 0,4445 \cdot 1,0002 = 0,4446 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Indukčnost je vypočtena ze vztahu (3.27), doplněného o koeficient zvětšení indukčnosti pro střídavý proud podle rovnice (3.20). Podle [11] je relativní permeabilita hliníku $\mu_r = 1,000023$. Protože ovlivňuje výsledek jen nepatrně, lze ji při výpočtu zanedbat.

$$r = \sqrt{\frac{s_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{66,16}{\pi}} = 4,5891 \, \text{mm}$$

$$a_s = \sqrt[3]{a_{12} a_{13} a_{23}} = \sqrt[3]{1,44 \cdot 2,88 \cdot 1,44} = 1,8143 \, \text{m}$$

$$L_p = 0,46 \log \frac{a_s}{kr} + 0,05 \mu_r = 0,46 \log \frac{1,8143}{0,809 \cdot 4,5891 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = 1,287 \, \text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

Konduktance je určena jako střední hodnota nejmenší a největší možné konduktance pro napětí 22 kV z **Tab. 3.5**.

$$G_k = 0,0375 \, \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

Vlastní kapacita je vypočtena ze vztahu (3.69), vzájemná kapacita ze vztahu (3.71) a provozní kapacita ze vztahu (3.72).

$$h_s = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3} = \sqrt[3]{8 \cdot 8 \cdot 8} = 8 \, \text{m}$$

$$k = \frac{24,2}{\log \frac{8h_s^3}{ra_s^2}} = \frac{24,2}{\log \frac{8 \cdot 8^3}{4,5891 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8143^2}} = 4,4541 \, \text{nF} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$k_v = \frac{24,2 \log \frac{2h_s}{a_s}}{\log \frac{a_s}{r} \log \frac{8h_s^3}{ra_s^2}} = \frac{24,2 \log \frac{2 \cdot 8}{1,8143}}{\log \frac{1,8143}{4,5891 \cdot 10^{-3}} \cdot \log \frac{8 \cdot 8^3}{4,5891 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8143^2}} = 1,6215 \, \text{nF} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C_p = k + 3k_v = 4,4541 + 3 \cdot 1,6215 = 9,3185 \, \text{nF} \cdot \text{km}^{-1}$$

Výsledná podélná impedance venkovního vedení AlFe 6, 70 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je vypočtena dosazením R_k a L_p do vztahu (3.1), kde $L_k = L_p$.

$$\mathbf{z}_k = R_k + j\omega L_k = 0,4446 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,287 \cdot 10^{-3} = (0,4446 + j0,4043) \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Výsledná příčná admitance venkovního vedení AlFe 6, 70 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je vypočtena dosazením G_k a C_p do vztahu (3.34), kde $C_k = C_p$.

$$\mathbf{y}_k = G_k + j\omega C_k = 0,0375 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9,3185 \cdot 10^{-3} = (0,0375 + j2,9275) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

3.5.1.2 Dvoumateriálové lano AlFe 6, 95 mm²

Základní údaje pro výpočet jsou uvedeny v **Tab. 3.8**. Pouze hodnoty průřezu pláště a duše jsou rozdílné a jsou uvedeny v **Tab. 3.9**.

Tab. 3.9: Údaje pro výpočet rovinného vedení 95 mm² odlišné od údajů v **Tab. 3.8**

Veličina	Hodnota	Zdroj
Matematický průřez duše s_1 [mm ²]	14,97	Tab. A.3
Matematický průřez pláště s_2 [mm ²]	90,05	Tab. A.3

Výpočet parametrů venkovního vedení AlFe 6, 95 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je proveden stejně jako v kapitole 3.5.1.1. Výsledky rezistance, indukčnosti, konduktance a kapacity jsou

$$R_k = 0,3267 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$L_p = 1,2562 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$G_k = 0,0375 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C_p = 9,5651 \text{ nF} \cdot \text{km}^{-1}$$

Výsledná podélná impedance venkovního vedení AlFe 6, 95 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je vypočtena dosazením R_k a L_p do vztahu (3.1), kde $L_k = L_p$.

$$\mathbf{z}_k = R_k + j\omega L_k = 0,3267 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,2562 \cdot 10^{-3} = (0,3267 + j0,3946) \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Výsledná příčná admitance venkovního vedení AlFe 6, 95 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je vypočtena dosazením G_k a C_p do vztahu (3.34), kde $C_k = C_p$.

$$\mathbf{y}_k = G_k + j\omega C_k = 0,0375 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9,5651 \cdot 10^{-3} = (0,0375 + j3,0037) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

3.5.1.3 Dvoumateriálové lano AlFe 6, 120 mm²

Základní údaje pro výpočet jsou uvedeny v **Tab. 3.8**. Pouze hodnoty průřezu pláště a duše jsou rozdílné a jsou uvedeny v **Tab. 3.10**.

Tab. 3.10: Údaje pro výpočet rovinného vedení 120 mm² odlišné od údajů v Tab. 3.8

Veličina	Hodnota	Zdroj
Matematický průřez duše s_1 [mm ²]	20,91	Tab. A.3
Matematický průřez pláště s_2 [mm ²]	122,57	Tab. A.3

Výpočet parametrů venkovního vedení AlFe 6, 120 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je proveden stejně jako v kapitole 3.5.1.1. Výsledky rezistance, indukčnosti, konduktance a kapacity jsou

$$R_k = 0,2401 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$L_p = 1,2254 \, \text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$G_k = 0,0375 \, \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C_p = 9,8251 \, \text{nF} \cdot \text{km}^{-1}$$

Výsledná podélná impedance venkovního vedení AlFe 6, 120 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je vypočtena dosazením R_k a L_p do vztahu (3.1), kde $L_k = L_p$.

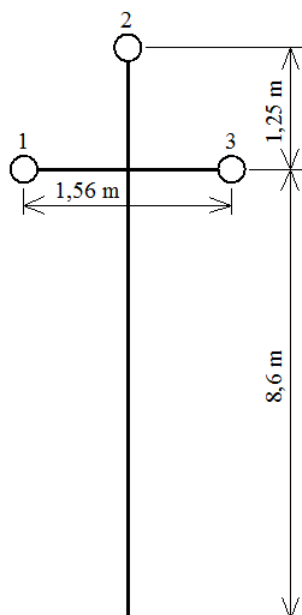
$$\mathbf{z}_k = R_k + j\omega L_k = 0,2401 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,2254 \cdot 10^{-3} = (0,2401 + j0,3850) \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Výsledná příčná admitance venkovního vedení AlFe 6, 120 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je vypočtena dosazením G_k a C_p do vztahu (3.34), kde $C_k = C_p$.

$$\mathbf{y}_k = G_k + j\omega C_k = 0,0375 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9,8251 \cdot 10^{-3} = (0,0375 + j3,0866) \, \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

3.5.2 Vedení vn s trojúhelníkovým uložením vodičů na sloupu

Uspořádání vodičů na sloupu s trojúhelníkovým uložením je zobrazeno na **Obr. 3.5**.



Obr. 3.5: Sloup vn s trojúhelníkovým uspořádáním [10]

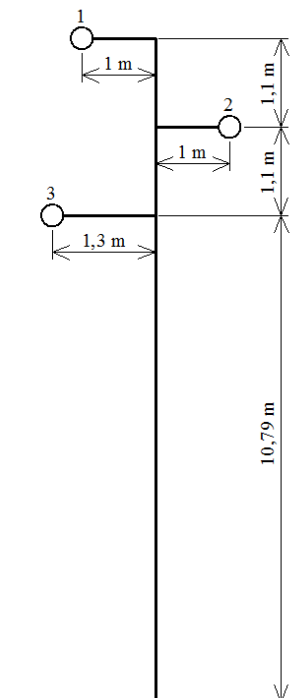
Výpočet elektrických parametrů vedení s trojúhelníkovým uspořádáním vodičů na sloupu je proveden stejným způsobem jako v kapitole 3.5.1 **Vedení vn s rovinným uložením vodičů na sloupu**. Proto není třeba výpočty opakovat a v **Tab. 3.11** jsou uvedeny pouze výsledky elektrických parametrů vedení pro různé průřezy.

Tab. 3.11: Parametry vedení s trojúhelníkovým uspořádáním vodičů na sloupu

$s \text{ [mm}^2\text{]}$	70	95	120
$R_k \text{ [}\Omega\text{.km}^{-1}\text{]}$	0,4446	0,3267	0,2401
$L_p \text{ [mH.km}^{-1}\text{]}$	1,2489	1,2181	1,1873
$G_k \text{ [}\mu\text{S.km}^{-1}\text{]}$	0,0375	0,0375	0,0375
$C_p \text{ [nF.km}^{-1}\text{]}$	9,6253	9,8886	10,1668
$z_k \text{ [}\Omega\text{.km}^{-1}\text{]}$	$(0,4446 + j0,3924)$	$(0,3267 + j0,3827)$	$(0,2401 + j0,3730)$
$y_k \text{ [}\mu\text{S.km}^{-1}\text{]}$	$(0,0375 + j3,0239)$	$(0,0375 + j3,1066)$	$(0,0375 + j3,1940)$

3.5.3 Vedení vn s uložením vodičů delta na stožáru

Uspořádání vodičů delta na stožáru je zobrazeno na **Obr. 3.6**.



Obr. 3.6: Stožár vn s uspořádáním vodičů delta [1]

Výpočet elektrických parametrů vedení s uspořádáním vodičů delta na stožáru je proveden stejným způsobem jako v kapitole 3.5.1 **Vedení vn s rovinným uložením vodičů na sloupu**. Proto není třeba výpočty opakovat a v **Tab. 3.12** jsou uvedeny pouze výsledky elektrických parametrů vedení pro různé průřezy.

Tab. 3.12: Parametry vedení s uspořádáním vodičů delta na stožáru

s [mm ²]	70	95	120
R_k [Ω.km ⁻¹]	0,4446	0,3267	0,2401
L_p [mH.km ⁻¹]	1,3383	1,3075	1,2767
G_k [μS.km ⁻¹]	0,0375	0,0375	0,0375
C_p [nF.km ⁻¹]	8,9347	9,1611	9,3993
z_k [Ω.km ⁻¹]	(0,4446 + j0,4204)	(0,3267 + j0,4108)	(0,2401 + j0,4011)
y_k [μS.km ⁻¹]	(0,0375 + j2,8069)	(0,0375 + jk, 8780)	(0,0375 + jk, 9529)

3.5.4 Zhodnocení výsledků

Z vypočtených hodnot je zřejmé, že rezistance je nezávislá na konstrukci sloupu nebo stožáru. Rezistance je nepřímo úměrná průřezu vodiče, se zvětšujícím se průřezem klesá rezistance vodiče. Při srovnání vypočtených hodnot s hodnotami největšího dovoleného odporu v **Tab. A.3** lze říci, že se hodnoty shodují. Je mezi nimi malý rozdíl, který je v průměru 2,4 %. Jelikož ve zdroji [1] není uveden původ ani způsob výpočtu hodnot největšího dovoleného

odporu, nelze přesně říci důvod neshody. Při tak malé neshodě ale může být důvodem zaokrouhlování na jiný počet desetinných míst při výpočtu, nebo vyjádření čísla π na jiný počet desetinných míst.

Indukčnost vedení je závislá na průřezu vodiče i na způsobu uložení vodičů na sloupu či stožáru. Při větším průřezu vodiče je indukčnost menší. Při větší vzdálenosti mezi vodiči je indukčnost větší. Nejnižší hodnota indukčnosti je tedy u trojúhelníkového uspořádání vodičů a nejvyšší hodnota indukčnosti je u uspořádání vodičů delta.

Konduktance vedení je závislá na napětí a povětrnostních vlivech, nebo také na stáří izolátoru. Při stejných povětrnostních vlivech může být tedy konduktance vedení s různým uspořádáním vodičů stejná.

Kapacita vedení je závislá na průřezu vodiče, vzdálenosti mezi vodiči a vzdálenosti mezi vodiči a zemí. Při větším průřezu vodiče je větší hodnota kapacity. Při větší vzdálenosti vodiče nad zemí je vlastní kapacita vedení menší a při větší vzdálenosti mezi vodiči je vzájemná kapacita vedení také menší. Provozní kapacita je největší u vedení s trojúhelníkovým uspořádáním vodičů a nejmenší u vedení s uspořádáním vodičů delta.

4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ VEDENÍ

Pro stanovení provozních parametrů vedení měřením musí být podle [3] dodrženy některé základní podmínky. Především musíme zajistit symetričnost soustavy. Měřené vedení musíme napájet ze zdroje, který dodává souměrné harmonické napětí a vedení musí být symetrické. Tj. buď transponované vedení, nebo vedení, u kterého se předpokládá symetričnost a není třeba provádět transpozici (viz kapitola 2.2).

Máme-li třífázové symetrické vedení o délce l a zdroj dodávající souměrné harmonické napětí, můžeme podle [3] provést dvě měření. Měření naprázdno a měření nakrátko.

Měření naprázdno se podle [3] provádí nejvýše se jmenovitým napětím a proudy procházející v podélném směru jsou velmi malé. Proto lze zanedbat vliv podélné impedance na admitanci naprázdno. Z měření naprázdno lze tedy vyhodnotit provozní admitanci naprázdno Y_{00} , která je kapacitního charakteru. Pro admitanci naprázdno platí

$$Y_{00} = \frac{I_0}{U_0} \angle \alpha_{00}, \quad (4.1)$$

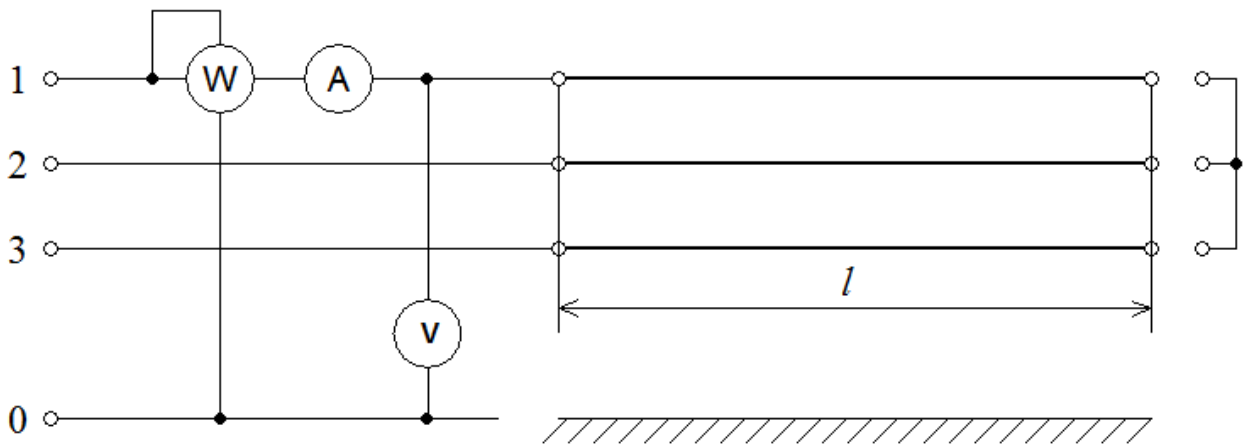
kde α_{00} je argument admitance Y_{00} ,
 I_0 je absolutní hodnota fázoru proudu stanovená měřením naprázdno,
 U_0 je absolutní hodnota fázoru napětí stanovená měřením naprázdno.

Měření nakrátko se podle [3] provádí nejvýše se jmenovitým proudem a napětím sníženým oproti jmenovitému napětí. Proudů procházející v příčném směru jsou velmi malé, a proto lze zanedbat vliv příčné admitance na impedanci nakrátko. Z měření nakrátko lze tedy vyhodnotit provozní impedanci nakrátko Z_{kk} , která je kapacitního charakteru. Pro impedanci nakrátko platí

$$Z_{kk} = \frac{U_k}{I_k} \angle \alpha_{kk}, \quad (4.2)$$

kde α_{kk} je argument impedance Z_{kk} ,
 I_k je absolutní hodnota fázoru proudu stanovená měřením nakrátko,
 U_k je absolutní hodnota fázoru napětí stanovená měřením nakrátko.

Princip měření provozních parametrů vedení je na **Obr. 4.1**. Měří se proud, napětí a činný výkon jedné fáze vedení, které je na konci naprázdno nebo nakrátko.



Obr. 4.1: Měření provozních parametrů vedení [3]

Měřením naprázdno podle **Obr. 4.1** byly stanoveny hodnoty proudu I_0 , napětí U_0 a činného výkonu P_0 . Pro výpočet argumentu příčné admitance podle [3] platí

$$\alpha_{00} = \cos^{-1} \frac{P_0}{U_0 I_0} [^\circ; W, V, A]. \quad (4.3)$$

Pro výpočet modulu příčné admitance platí

$$|Y_{00}| = \frac{I_0}{U_0} [S; A, V]. \quad (4.4)$$

Pro výpočet provozní admitance daného vedení platí

$$Y_{00} = |Y_{00}| \cos(\alpha_{00}) + j|Y_{00}| \sin(\alpha_{00}) = G + jB [S]. \quad (4.5)$$

Výsledné příčné provozní parametry, vyjádřené v jednotkách na km délky, daného vedení jsou dány vztahy

$$G_k = \frac{G}{l} [S.km^{-1}; S, km], \quad (4.6)$$

$$C_k = \frac{B_k}{\omega} = \frac{B}{2\pi f l} [F.km^{-1}; S.km^{-1}, rad.s^{-1}; S, Hz, km].$$

Měřením nakrátko podle **Obr. 4.1** byly stanoveny hodnoty proudu I_k , napětí U_k a činného výkonu P_k . Pro výpočet argumentu podélné impedance podle [3] platí

$$\alpha_{kk} = \cos^{-1} \frac{P_k}{U_k I_k} [^\circ; W, V, A]. \quad (4.7)$$

Pro výpočet modulu podélné impedance platí

$$|Z_{kk}| = \frac{U_k}{I_k} [\Omega; V, A]. \quad (4.8)$$

Pro výpočet provozní impedance daného vedení platí

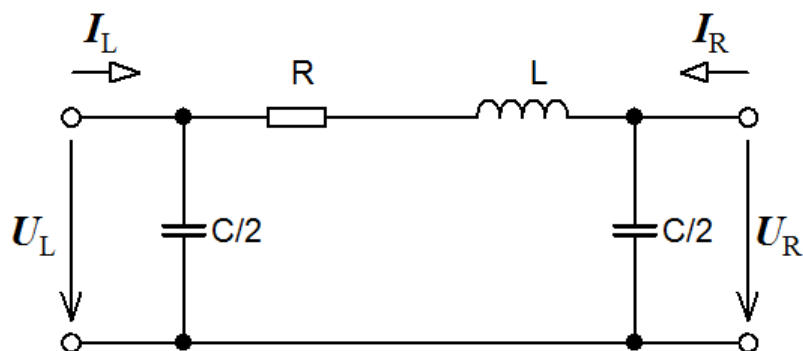
$$Z_{kk} = |Z_{kk}| \cos(\alpha_{kk}) + j|Z_{kk}| \sin(\alpha_{kk}) = R + jX [\Omega]. \quad (4.9)$$

Výsledné podélné provozní parametry, vyjádřené v jednotkách na km délky, daného vedení jsou dány vztahy

$$R_k = \frac{R}{l} [\Omega.km^{-1}; \Omega, km], \quad (4.10)$$

$$L_k = \frac{X_k}{\omega} = \frac{X}{2\pi f l} [H.km^{-1}; \Omega.km^{-1}, rad.s^{-1}; \Omega, Hz, km].$$

U tohoto způsobu měření musí být měřené vedení vypnuté. Pro měření provozních parametrů za chodu (při zatížení) se podle [5] využívá metody měření synchronních fázorů napětí a proudů. Tato metoda spočívá v měření fázorů napětí a proudů na začátku a na konci vedení ve stejném čase. Měření se realizuje pomocí fázorových měřicích jednotek (PMU), na jejichž vstupy se přivádí výstupy z měřicích transformátorů napětí a proudů. Pro výpočet provozní impedance se využívá modelu jedné fáze vedení π -článkem (**Obr. 4.2**).

Obr. 4.2: Náhradní model jedné fáze vedení π -článkem [5]

kde $\mathbf{I}_L, \mathbf{U}_L$ jsou fázory napětí a proudu na začátku vedení,
 $\mathbf{I}_R, \mathbf{U}_R$ jsou fázory napětí a proudu na konci vedení.

Výpočet provozní impedance jedné fáze vychází z náhradního schématu vedení na **Obr. 2.1**. Podle [5] platí

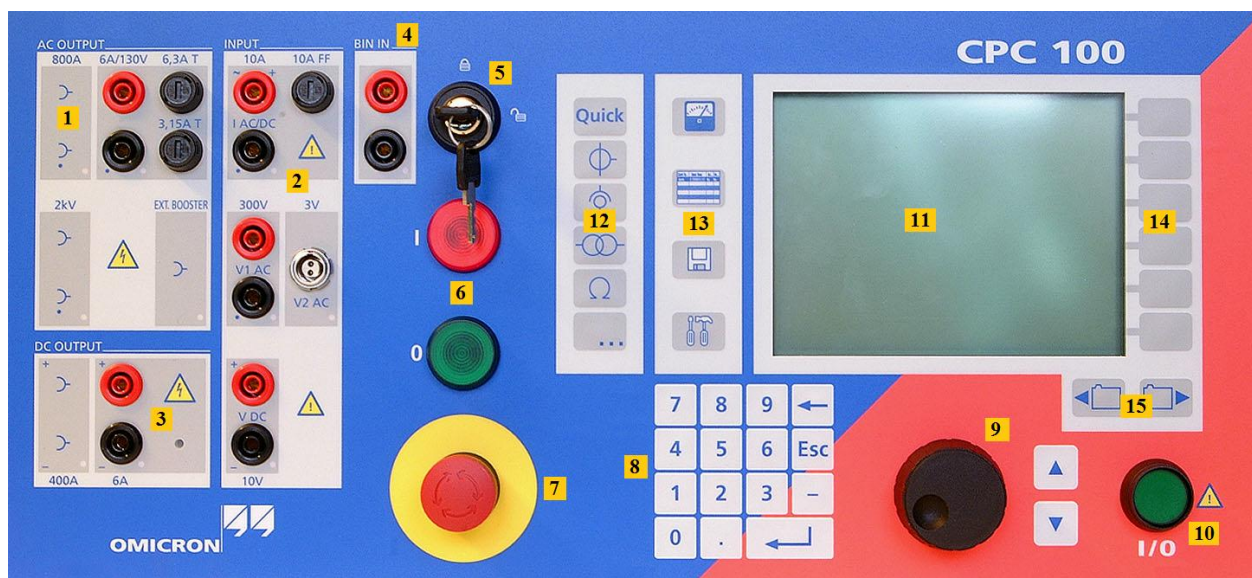
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{U}_L^2 - \mathbf{U}_R^2}{\mathbf{I}_L \mathbf{U}_R - \mathbf{I}_R \mathbf{U}_L} \quad [\Omega; \text{V}, \text{A}]. \quad (4.11)$$

Nevýhodou tohoto způsobu měření je, že musí existovat komunikace mezi začátkem a koncem vedení.

5 MĚŘICÍ SOUSTAVA OMICRON CPC 100 + CP CU1

5.1 OMICRON CPC 100

OMICRON CPC 100 je podle [9] univerzální přístroj umožňující testování výkonových transformátorů, přístrojových transformátorů proudu a napětí, elektrických vedení a silových kabelů, spínacích a jisticích prvků, uzemnění, točivých strojů, ochranných relé, GIS systémů (plynem izolovaná rozvodná zařízení) a instalace IEC 61850.



Obr. 5.1: Přední panel přístroje OMICRON CPC 100 [8]



Obr. 5.2: Vysokonapěťové a proudové výstupy na CPC 100 [8]



Obr. 5.3: Komunikační rozhraní CPC 100 [8]

Tab. 5.1: Popis přístroje OMICRON CPC 100 [8]

1	AC výstup 6A / 130V	14	Tlačítka pro výběr funkcí
2	Měřicí vstupy	15	Přepínání testovacích karet
3	DC výstup 6A	16	Uzemnění
4	Binární vstup	17	DC výstup 400A / 4-4,5V
5	Bezpečnostní zámek	18	AC výstup 800A / 6,1-6,5V
6	Bezpečnostní světelné indikátory	19	AC výstup 2kV
7	Nouzové stop tlačítko	20	Ext. BOOSTER výstup
8	Popisová klávesnice	21	Napájení 85-264V AC
9	Navigační prvky	22	Zapnutí / Vypnutí napájení
10	Spuštění / Vypnutí testování	23	Sériové rozhraní pro připojení zařízení
11	Displej	24	Připojení externích bezpečnostních funkcí
12	Rychlý výběr aplikace	25	Připojení k PC nebo k síti
13	Výběr zobrazení	26	Připojení USB paměti

Parametry přístroje [8]:

- Napájení 85 až 240 V, 16 A, 50/60 Hz;
- Příkon do 3500 VA, krátkodobě až 7000 VA (méně než 10s);
- Výstupní proud AC až 800 A s frekvencí 15 až 400 Hz, nebo DC až 400 A;
- Výstupní napětí AC až 2 kV (s příslušenstvím až 12 kV);
- Váha 29 kg;
- Rozměry 468 x 394 x 233 mm;
- Provozní teplota -10 až 55 °C;

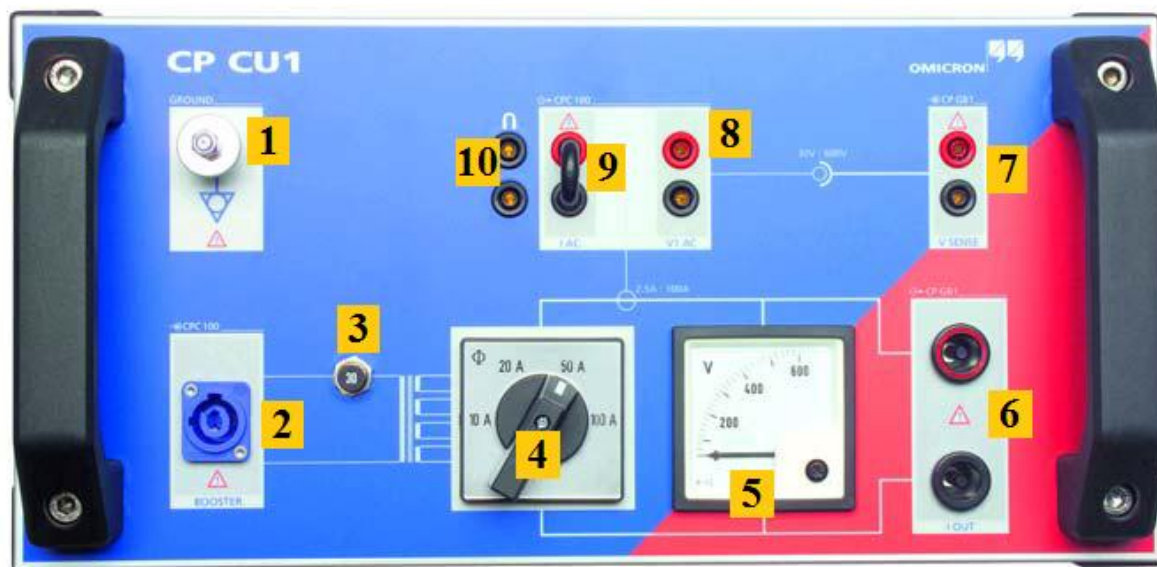
Příslušenství [9]:

- **CP TD1** lze použít pro měření kapacity, ztrátového činitele, účinníku, výkonových ztrát, výkonu a impedance při výstupním napětí až 12 kV;
- **CP CU1** lze použít pro měření impedance a zemního poměru venkovních vedení a silových kabelů, zemní impedance rozsáhlých systémů, krokové a dotykové napětí, vazební impedance a vazební zemní poměr u dvojitých vedení;
- **CP CB2** proudový zesilovač pro zvýšení výstupního napětí až na 2000 A;
- **CP SB1** přepínač pro automatické testování třífázových transformátorů;
- **CP RC** set pro testování plynem izolovaných rozvodných zařízení;

5.2 OMICRON CP CU1

Přídavná jednotka k CPC 100, která podle [9] umožňuje měření impedance a zemního poměru venkovních vedení a silových kabelů, zemní impedance rozsáhlých systémů, vazební impedance u dvojitých vedení a měření indukovaného napětí do sousedních elektrických systémů nebo kovových konstrukcí. Spolu s příslušenstvím CP AL1 umožňuje měření krokového a dotykového napětí. Pro připojení přístroje k měřenému objektu se používá CP GB1 zemnicí box.

Měřicí soustava CPC 100 + CP CUI používá pro měření proměnnou frekvenci, která je navíc odlišná od síťové frekvence. To podle [9] umožňuje efektivní potlačení rušení související se síťovou frekvencí. Výsledky měření jsou automaticky interpolovány na výsledky pro síťovou frekvenci. To zajišťuje velmi přesné výsledky měření.



Obr. 5.4: Přední panel CP CUI [7]

Tab. 5.2: Popis přístroje CP CUI [7]

1	Uzemnění	6	I OUT výstup
2	BOOSTER - vstup	7	V SENSE vstup
3	Pojistka 30 A	8	V1 AC výstup
4	Přepínač proudového rozsahu	9	I AC výstup
5	Voltmetr	10	Svorky pro odložení zkratovací tyčinky

Parametry přístroje [7]:

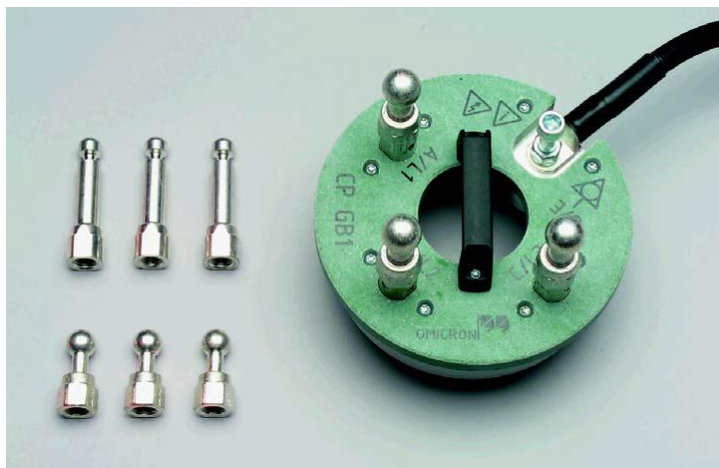
- Výstupní rozsahy jsou uvedeny v **Tab. 5.3**;
- Převod měřicího transformátoru napětí 600 V : 30 V;
- Převod měřicího transformátoru proudu 100 A : 2,5 A;
- Výstupní výkon až 5000 VA;
- Výstupní frekvence 15 až 400 Hz;
- Váha 28,5 kg;
- Rozměry 450 x 220 x 220 mm;
- Provozní teplota -10 až 55 °C;

Tab. 5.3: Výstupní rozsahy CP CUI [7]

Rozsah	Proud	Napětí při frekvenci větší než 45 Hz
10 A	0 až 10 A	500 V
20 A	0 až 20 A	250 V
50 A	0 až 50 A	100 V
100 A	0 až 100 A	50 V

Příslušenství:

- CP GB1 zemnicí box slouží podle pro připojení měřeného objektu k měřicí soustavě. Obsahuje kabel pro uzemnění a tři šrouby pro připojení jednotlivých fází. Tyto šrouby jsou podle [7] odděleny od země pomocí svodičů přepětí. Krátkodobé přepětí je svedeno bez destrukce svodičů a při dlouhodobém přepětí dojde k roztavení svodičů přepětí a je třeba je vyměnit. Destruktivní přepětí je 1000 V [7]. Zemnicí box je na **Obr. 5.5**.



Obr. 5.5: CP GB1 zemnicí box [7]

- další příslušenství, včetně vysvětlení použití je v **Tab. 5.4**;

Tab. 5.4: Příslušenství CP CU1 [7]

Kabel BOOSTER		Napájení CP CU1. Propojení Ext. BOOSTER výstupu (CPC 100) a BOOSTER vstupu (CP CU1)
V1 AC koaxiální kabel		Propojení V1 AC vstupu (CPC 100) a V1 AC výstupu (CP CU1)
4 x propojovací kabel		Propojení I AC vstupu (CPC 100) a I AC výstupu (CP CU1), připojení V SENSE vstupu ke kleštím Kelvinových kabelů
2 x Kelvinův kabel		Připojení I OUT výstupu (CP CU1) ke šroubům na zemnicím boxu CP GB1
Kabel pro uzemnění		Uzemnění CP CU1
Zkratovací tyčinka		Tyčinka pro zkratování svorek I AC výstupu (CP CU1) vždy, když nejsou připojeny k I AC vstupu (CPC 100)
Tříkontaktní kabel		Zkratování fází na zemnicím boxu CP GB1

Princip funkce [7]:

Měřicí soustava CPC 100 + CP CU1 je mezi sebou propojena rozhraním BOOSTER. CP CU1, ovládané přes CPC 100 poskytuje programovatelné proudové signály vysílané na svorky testovaného objektu. Zároveň obsahuje měřicí transformátory proudu a napětí, jejichž primární vinutí jsou připojena na výstupní svorky I OUT (CP CU1), a sekundární vinutí jsou připojena k CPC 100 pomocí svorek V1 AC a I AC. Tyto signály jsou zpracovány softwarem CPC 100 ve výsledky měření. Proudový rozsah měření je nastavován softwarem CPC 100 a uživatelem pomocí přepínače proudového rozsahu na CP CU1.

6 MĚŘENÍ PARAMETRŮ REÁLNÉHO VEDENÍ VN

6.1 Návod na měření parametrů vedení vn měřicí soustavou OMICRON CPC 100 + CP CU1

Tato kapitola je zpracována podle [7] a slouží jako univerzální návod pro měření parametrů vedení vn měřicí soustavou OMICRON CPC 100 + CP CU1. Návod lze využít také pro měření vedení vvn nebo zvn pouze s tím rozdílem, že vedení je zkratováno a uzemněno použitím instalovaných odpojovačů v rozvodně, zatímco vedení vn je zkratováno a uzemněno zkratovacími soupravami.

6.1.1 BEZPEČNOSTNÍ POKYNY

- ⚠ Vedení musí být odpojeno a zabezpečeno proti nežádoucímu připojení.
- ⚠ Vedení musí být zkratováno a uzemněno na obou stranách.
- ⚠ Před manipulací musí být provedena kontrola, zda vedení není pod napětím.
- ⚠ Pokud hrozí výskyt bouřky nad částí měřeného vedení, je připojování měřicí soustavy k vedení nebezpečné. Doporučuje se neprovádět měření.
- ⚠ Měřicí soustava musí být připojena k vedení přes zemnicí box CP GB1.
- ⚠ Připojování měřicí soustavy k vedení se zapnutým paralelním vedením je nebezpečné, protože je zde riziko vysokého napětí indukovaného magnetickým polem od proudů paralelního vedení. Je doporučeno paralelní vedení vypnout.
- ⚠ Připojování měřicí soustavy k vedení a propojování částí měřicí soustavy provádět pouze pokud je vedení uzemněno a CPC 100 vypnuto.
- ⚠ V závislosti na typu zemnicího bodu v rozvodně použijte odpovídající klešťovou objímku pro připojení CP GB1 k zemi.
- ⚠ Ujistěte se, že všechny šrouby na CP GB1 jsou pevně utaženy a svodiče přepětí nejsou zničeny.
- ⚠ CPC 100 a CP CU1 musejí být připojeny k zemi kabelem minimálně 6 mm².
- ⚠ Pokud není vedení na bližším konci uzemněno, a je připojeno k měřicí soustavě, je oblast 5 m okolo CP GB1 a 2 m okolo CP CU1 nebezpečná.
- ⚠ Napájení CP CU1 provádět pouze z CPC 100 rozhraním BOOSTER.
- ⚠ Proudový rozsah nastavovat pouze pokud je vedení uzemněno a CPC 100 vypnuto.
- ⚠ Proudový rozsah v testovací kartě CPC 100 a na předním panelu CP CU1 musí být stejný.
- ⚠ Vedení musí být vždy uzemněno, pokud není prováděno měření.
- ⚠ Pokud je vidět nebo slyšet něco neobvyklého na měřicím zařízení, například zvuk elektrického výboje nebo rozsvěcení svodičů přepětí, nedotýkejte se měřicí soustavy, dokud není vedení uzemněno.
- ⚠ Při měření nesmí být v blízkém okolí osoby s kardiostimulátorem.
- ⚠ Zkratovací tyčinka musí být připojena na výstupní svorky I AC (CP CU1) vždy, když není výstup I AC (CP CU1) připojen ke vstupním svorkám I AC (CPC 100).

6.1.2 Odhadnutí proudového rozsahu podle délky vedení

Odhad proudového rozsahu podle délky vedení je uveden v **Tab. 6.1**.

Tab. 6.1: Odhad proudového rozsahu podle délky vedení

Impedance vedení	Délka vedení	Proudový rozsah	Napětí
0 až 1,6 Ω	0 až 2 km	100 A	50 V
0,8 až 8 Ω	1 až 10 km	50 A	100 V
4 až 40 Ω	5 až 50 km	20 A	250 V
> 16 Ω	> 20 km	10 A	500 V

6.1.3 Zjištění proudového rozsahu odhadem indukovaného napětí

- Vypněte vedení. Zkratujte a uzemněte vedení na konci a na začátku použitím zkratovacích souprav (u vedení vvn a zvn pomocí odpojovačů instalovaných v rozvodně).
- Ujistěte se, že uzemnění na vzdáleném konci vedení není ani nemůže být odstraněno.
- Na blízkém konci změřte klešťovým ampérmetrem proud procházející každou fází zkratovací soupravy do země (u vedení vvn a zvn je nutno za zemnicí odpojovače připojit tzv. pracovní zem pomocí zkratovací soupravy; poté je třeba odpojit uzemnění odpojovači a na pracovní zemi změřit procházející proud každou fází).
- Vypočítat velikost indukovaného napětí podle vztahu

$$U \text{ [V]} = I_{meas} \text{ [A]} \cdot 0,4 [\Omega/\text{km}] \cdot 2 \cdot l \text{ [km]}$$

kde I_{meas} je hodnota změřeného proudu,
 l je délka vedení.

Pomocí **Tab. 6.2** zjistěte proudový rozsah vhodný pro měření.

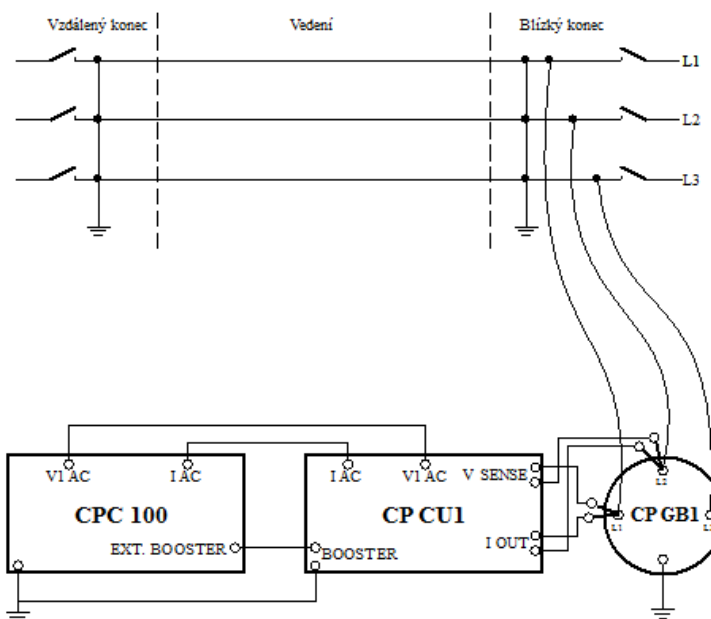
Tab. 6.2: Proudový rozsah podle velikosti indukovaného napětí

U	Proudový rozsah
> 500 V	Nelze měřit
250...500 V	10 A
100...250 V	10 nebo 20 A
50...100 V	10, 20, nebo 50 A
< 50 V	Všechny rozsahy

- Pokud je takto zjištěný proudový rozsah menší než proudový rozsah zjištěný v kapitole **6.1.2**, nastavte proudový rozsah na tuto menší hodnotu.

- ⚠ Vedení musí být zkratováno a uzemněno na obou stranách.
- ⚠ Pokud hrozí výskyt bouřky nad částí měřeného vedení, měření na vedení je nebezpečné. Doporučuje se neprovádět měření.
- ⚠ Měření vedení se zapnutým paralelním vedením je nebezpečné, protože je zde riziko vysokého napětí indukovaného magnetickým polem od proudů paralelního vedení. Je doporučeno paralelní vedení vypnout.

6.1.4 Propojení měřicí soustavy a její připojení k vedení



Obr. 6.1: Schéma zapojení měřicí soustavy a jejího připojení k vedení [7]

- Ujistěte se, že je vedení stále na obou koncích uzemněno.
- Připojte zemnicí box CP GB1 k zemi (zemnicí tyč, nebo zemnicí bod v rozvodně).
- Za stávajícím uzemněním na blízkém konci připojte pomocí zkratovací soupravy jednotlivé fáze vedení na jednotlivé šrouby zemnicího boxu CP GB1 (u vedení vvn a zvn se vedení připojí k zemnicímu boxu zkratovací soupravou, kterou byla vytvořena pracovní zem). Zkratovací soupravu je třeba upravit rozdělením na jednotlivé fáze.
- Pozice CP CU1 musí být minimálně 5 m od pozice zemnicího boxu CP GB1.
- Uzemněte CP CU1 použitím kabelu minimálně 6 mm² blízko k pozici operátora (pomocí zemnicí tyče nebo zemnicího bodu v rozvodně).
- Pozice CPC 100 musí být minimálně 5 m od pozice CP CU1 a minimálně 10 m od pozice zemnicího boxu CP GB1.
- Uzemněte CPC 100 použitím kabelu minimálně 6 mm² blízko k pozici operátora (pomocí zemnicí tyče nebo zemnicího bodu v rozvodně).
- Připojte CP CU1 k zemnicímu boxu CP GB1 a CPC 100 k CP CU1 podle schématu na **Obr. 6.1**. Protože se měřicí soustava propojuje několika druhy kabelů, využijte **Tab. 5.4** pro zjištění příslušnosti jednotlivých kabelů k jednotlivým svorkám.
- Označte prostor 5m okolo CP GB1 a 2m okolo CP CU1 jako nebezpečnou zónu.
- Odpojte uzemnění na blízkém konci a na voltmetru umístěném na předním panelu CP CU1 odečtete bezpečné vzdálenosti napětí. Podle **Tab. 6.2** a odečteného napětí zkontrolujte zvolený proudový rozsah. Pokud je zjištěný proudový rozsah menší než proudový rozsah zjištěný v kapitole 6.1.3, nastavte proudový rozsah na tuto menší hodnotu.
- Připojte uzemnění na blízkém konci.

⚠ Měřicí soustava musí být připojena k vedení přes zemnicí box CP GB1.

⚠ Připojování měřicí soustavy k vedení a propojování částí měřicí soustavy provádět pouze pokud je vedení uzemněno a CPC 100 vypnuto.

- ⚠ V závislosti na typu zemnicího bodu v rozvodně použijte odpovídající klešťovou objímku pro připojení CP GB1 k zemi.
- ⚠ Ujistěte se, že všechny šrouby na CP GB1 jsou pevně utaženy a svodiče přepětí nejsou zničeny.
- ⚠ CPC 100 a CP CU1 musejí být připojeny k zemi kabelem minimálně 6 mm².
- ⚠ Pokud není vedení na bližším konci uzemněno, a je připojeno k měřicí soustavě, je oblast 5 m okolo CP GB1 a 2 m okolo CP CU1 nebezpečná.
- ⚠ Napájení CP CU1 provádět pouze z CPC 100 rozhraním BOOSTER.
- ⚠ Proudový rozsah nastavovat pouze pokud je vedení uzemněno a CPC 100 vypnuto.
- ⚠ Vedení musí být vždy uzemněno, pokud není prováděno měření.

6.1.5 Konfigurace CPC 100 pro CP CU1

- Na předním panelu CPC 100 stiskněte tlačítko *Nastavení* (Obr. 5.1, klávesy č. 13).
- Vyberte kartu *Device Setup*
- Jako *External booster* zvolte *CU1*, ostatní se nastaví automaticky. Na Obr. 6.2 je zobrazena konfigurace CPC 100 pro CP CU1.

Obr. 6.2: Konfigurace CPC 100 pro CP CU1 [7]

6.1.6 Měření impedance vedení a zemního poměru (k-faktoru)

Měření je kontrolováno šablonami vytvořenými výrobcem. Tyto šablony jsou dodány výrobcem a je třeba je nahrát z PC nebo laptopu do CPC 100.

- Připojte CPC 100 k PC nebo laptopu a spusťte program *CPC Start page*.
- Vyberte program *Transfer wizard* a v seznamu *Cables & Transmission Lines* otevřete položku *Line impedance*. Vyberte šablonu s odpovídajícím proudovým rozsahem a zkopírujte ji do CPC 100.
- Na předním panelu CPC 100 stiskněte *správce souborů* (Obr. 5.1, klávesy č. 13, klávesa označená disketou).
- Vyberte požadovanou šablonu a otevřete ji. Zobrazí se jednotlivé karty, podle kterých je prováděno měření.
- Vyberte první kartu, která měří impedanci smyčky L1-L2. Připojte kleště Kelvinových kabelů ke šroubům L1 a L2 na CP GB1.
- Odpojte uzemnění a spusťte měření.
- Po skončení měření připojte uzemnění.

- Nyní přejděte na další kartu a postupujte stejným způsobem jako při měření podle první karty.
- Celkem provedete měření impedance smyček L1-L2, L1-L3, L2-L3, L1-G, L2-G, L3-G a L1||L2||L3-G.
- Pro měření všech fází proti zemi L1||L2||L3-G použijte tříkontaktní kabel pro zkratování fází L1, L2 a L3.
- Po skončení všech měření šablonu uložte.
- Pomocí programu *OMICRON Device Browser* uložte šablonu s příponou *xml* do PC nebo laptopu.
- V programu *CPC Start page* spusťte *CPC Excel File Loader* a načtěte šablonu s naměřenými výsledky. V programu *Excel* se zobrazí naměřené a dopočtené výsledky měření.

- ⚠ Proudový rozsah v testovací kartě CPC 100 a na předním panelu CP CU1 musí být stejný.
- ⚠ Vedení musí být vždy uzemněno, pokud není prováděno měření.
- ⚠ Přepojování částí měřicí soustavy provádět pouze pokud je vedení uzemněno a CPC 100 vypnuto.
- ⚠ Pokud je vidět nebo slyšet něco neobvyklého na měřicím zařízení, například zvuk elektrického výboje nebo rozsvícení svodičů přepětí, nedotýkejte se měřicí soustavy, dokud není vedení uzemněno.
- ⚠ Při měření nesmí být v blízkém okolí osoby s kardiostimulátorem.

6.2 Provedené měření

V rámci praktické části bakalářské práce bylo provedeno měření impedance úseku vedení VN 67 od US12 po US45, odbočka Kuřim. Vodiče AIFe 95 jsou uloženy na sloupech s rovinným uspořádáním. Délka vedení je 2708 m.

Měření probíhalo za deštivého počasí při teplotě 25 °C.

Vzdálený konec vedení byl u US12, kde bylo vedení zkratováno a uzemněno zkratovací soupravou. Blízký konec vedení byl u US 45, kde bylo vedení zkratováno a uzemněno zkratovací soupravou, a bylo zde provedeno měření. Na vzdáleném konci bylo vedení uzemněno ve vzdálenosti 10 m od úsekového odpojovače. Na blízkém konci bylo vedení připojeno k měřicí soustavě ve vzdálenosti 12 m od úsekového odpojovače. Přesná délka měřeného vedení je tedy 2686 m.

Měření bylo provedeno podle zpracovaného návodu (viz kapitola 6.1). Podle délky vedení byl odhadnut proudový rozsah 50 A, indukované napětí na uzemněném vedení bylo nulové. Při měření na proudovém rozsahu 50 A docházelo k přetížení soustavy. To mohlo být způsobeno tím, že pro zvýšení frekvence bylo třeba zvýšit napětí pro dosažení zvoleného proudu. Tím mohl být překročen maximální zdánlivý příkon měřicí soustavy. Proto byl zvolen proudový rozsah 20 A.

Postupně bylo provedeno měření smyček fáze-fáze (L1-L2, L1-L3, L2-L3), fáze-zem (L1-G, L2-G, L3-G) a všechny tři fáze paralelně-zem (L1||L2||L3-G). Pro každé zapojení byla změřena impedance při frekvenci 30, 70, 90, 110 a 130 Hz. Z těchto výsledků impedancí pak byla interpolována hodnota impedance při síťové frekvenci 50 Hz. Výsledky byly staženy do laptopu a načteny programem *CPC Excel file loader*, ve kterém byly zobrazeny změřené hodnoty a automaticky dopočteny výsledky měření.

Z měření smyček fáze-fáze byly dopočteny podélné impedance jednotlivých fází a podélná impedance vedení při uvažování symetrických parametrů. Z měření smyček fáze-zem byly dopočteny různé hodnoty impedance země a z měření smyčky všech fází paralelně-zem byla stanovena přesná hodnota impedance země. Z podélné impedance vedení a impedance země byly dopočteny složkové parametry. Jednotlivé výsledky impedancí při teplotě 20 °C jsou v **Tab. 6.3**.

Tab. 6.3: Výsledky měření impedance vedení VN67, úsek od US 12 po US 45, rozsah 20 A

	$Z = R + jX [\Omega]$	$L [\text{mH}]$	$R_k [\Omega.\text{km}^{-1}]$	$L_k [\text{mH.km}^{-1}]$
Impedance fáze L1	$0,826 + j1,059$	3,371	0,308	1,255
Impedance fáze L2	$0,815 + j0,818$	2,604	0,303	0,969
Impedance fáze L3	$0,836 + j1,047$	3,333	0,311	1,241
Podélná impedance vedení	$0,826 + j0,974$	3,100	0,308	1,154
Impedance země	$Z_Z = R_Z + jX_Z [\Omega]$		$Z_{Zk} = R_{Zk} + jX_{Zk} [\Omega.\text{km}^{-1}]$	
	65,341 – j0,014		24,327 – j0,005	
Sousledná impedance	$Z_1 [\Omega]$	$0,826 + j0,974$	$Z_{1k} [\Omega.\text{km}^{-1}]$	$0,308 + j0,363$
Nulová impedance	$Z_0 [\Omega]$	$196,849 + j0,931$	$Z_{0k} [\Omega.\text{km}^{-1}]$	$73,287 + j0,347$

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky:

$$L = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1,059}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,371 \text{ mH}$$

$$R_k = \frac{R}{l} = \frac{0,826}{2,686} = 0,308 \Omega.\text{km}^{-1}$$

$$L_k = \frac{L}{l} = \frac{3,371}{2,686} = 1,255 \text{ mH.km}^{-1}$$

Poté bylo provedeno opakované měření, při proudovém rozsahu 10 A. Měření impedancí smyček fáze-fáze proběhlo bez problémů. Při měření smyček fáze-zem docházelo již při frekvenci 70 Hz k překročení maximálního napětí 500 V, při kterém podle [7] začínají působit svodiče přepětí zemnicího boxu CP GB1. Impedanci země proto nebylo možné změřit při proudovém rozsahu 10 A. V **Tab. 6.4** jsou výsledky podélné impedance vedení změřené při rozsahu 10 A.

Tab. 6.4: Výsledky měření impedance vedení VN67, úsek od US 12 po US 45, rozsah 10 A

	$Z = R + jX [\Omega]$	$L [\text{mH}]$	$R_k [\Omega.\text{km}^{-1}]$	$L_k [\text{mH.km}^{-1}]$
Impedance fáze L1	$0,834 + j1,059$	3,371	0,310	1,255
Impedance fáze L2	$0,829 + j0,816$	2,597	0,309	0,967
Impedance fáze L3	$0,874 + j1,045$	3,326	0,325	1,238
Podélná impedance vedení	$0,846 + j0,973$	3,097	0,315	1,153

Po srovnání **Tab. 6.3** a **Tab. 6.4** lze říci, že měření na proudovém rozsahu 10 A vykazuje téměř shodné výsledky jako měření na proudovém rozsahu 20 A. Pro měření impedance vedení

lze proto použít jakýkoliv rozsah s přihlédnutím k pokynům v kapitole 6.1. Omezením je pouze možnost přetížení soustavy, nebo překročení maximálního napětí 500 V.

Změřená hodnota impedance země není přesná, protože od této hodnoty nebyla odečtena hodnota odporu uzemnění. Vzhledem k povětrnostním podmínkám, při kterých bylo prováděno měření, tato hodnota nebyla změřena.

6.3 Porovnání naměřených výsledků s teoretickými hodnotami

Výpočet impedance venkovního vedení AlFe 6, 95 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je v kapitole 3.5.1.2. Pro srovnání bude použit výsledek měření při proudovém rozsahu 20 A (Tab. 6.3). Srovnání naměřených a vypočtených hodnot podélné impedance venkovního vedení AlFe 6, 95 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu je v Tab. 6.5.

Tab. 6.5: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot rezistance a indukance

	$R_k [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	$L_k [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}]$
Naměřené hodnoty	0,308	1,154
Vypočtené hodnoty	0,3267	1,2562

Hodnoty rezistance i indukčnosti se nepatrně liší. Podle [1] se skutečný průřez vodiče může pohybovat mezi 95 % a 105 % jmenovitého průřezu. To může mít vliv na velikost rezistance i indukčnosti. Na velikost indukčnosti může mít také vliv konstrukce sloupu, kde se skutečné vzdálenosti mezi vodiči můžou mírně lišit od vzdáleností podle Obr. 3.4.

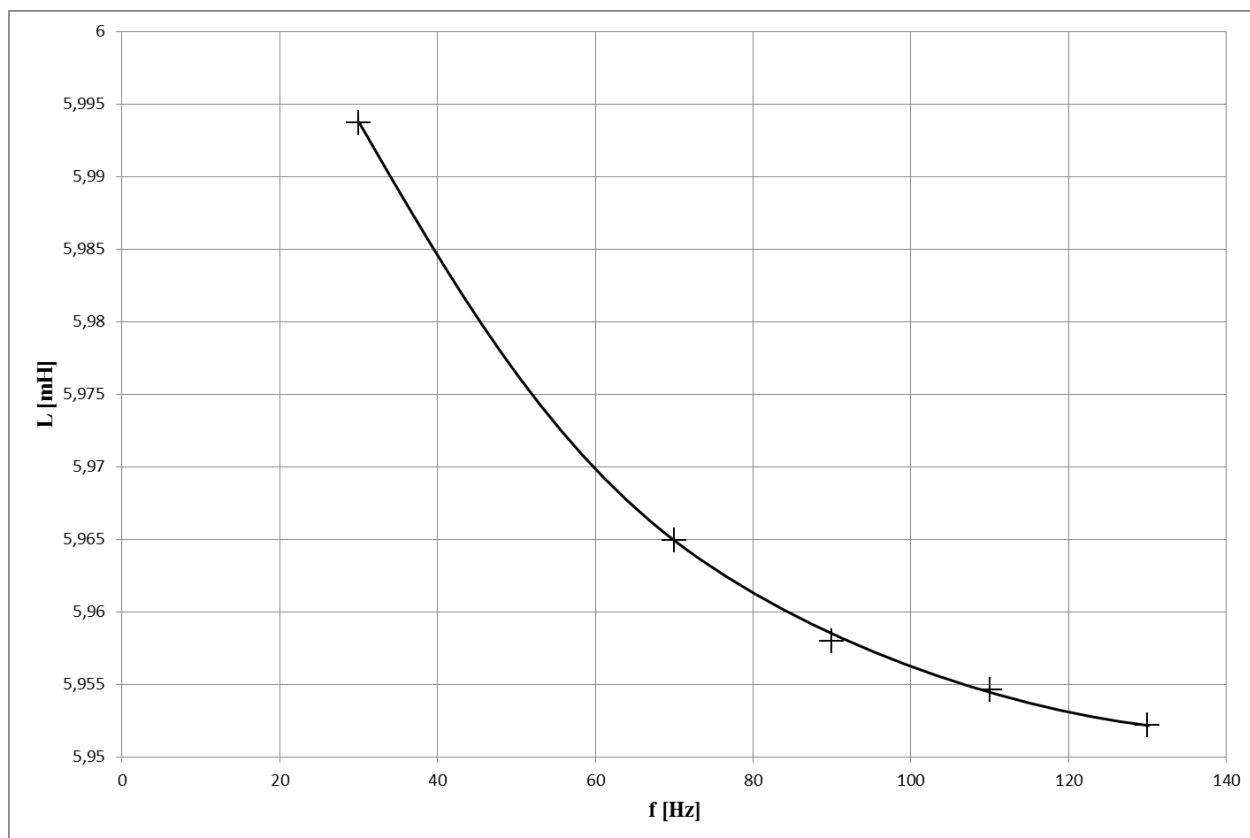
Lze říci, že pro většinu výpočtů elektrických sítí jsou hodnoty rezistance a indukčnosti zjištěné výpočtem postačující. Při přesných výpočtech je ale třeba znát přesnou (změřenou) hodnotu. Například pro správné nastavení distančních ochranných (zajištění selektivity) je podle [12] třeba znát přesnou hodnotu impedance vedení, aby vlivem nepřesného výpočtu nedošlo k překrytí impedančně časové charakteristiky.

Srovnání naměřené a vypočtené hodnoty impedance země není provedeno, protože vzhledem k povětrnostním podmínkám, při kterých bylo prováděno měření, nebyla změřena jak hodnota rezistance uzemnění, tak měrný odpor půdy. Podle [1] by bylo třeba pro přesný výpočet impedance zemní cesty použít Carsonovy nebo Pollaczekovy metody. Ty jsou oproti metodě uvedené v kapitole 3.3 založené na faktu, že rezistance zemní cesty je hodnota závislá na měrném odporu půdy.

6.4 Závislost indukčnosti na frekvenci

Na velikost rezistance i indukčnosti má podle [1] vliv skinefekt. Jelikož je měření prováděno při frekvenci v rozsahu 30 až 130 Hz, naskytla se možnost zjištění, jak výraznou měrou se může skinefekt podílet na velikosti impedance AlFe lana. Podle [2] se s rostoucí frekvencí zvětšuje činitel zvětšení rezistance vlivem povrchového jevu. Rezistance tedy s rostoucí frekvencí roste. Na tak malém rozsahu frekvencí hodnota rezistance nevykazuje jasný rostoucí trend.

Podle [3] je koeficient zvětšení provozní indukčnosti pro střídavý proud závislý na frekvenci. U všech naměřených hodnot indukčnosti smyček fáze-fáze (při rozsahu 10 A i 20 A) vykazuje indukčnost klesající trend v závislosti na rostoucí frekvenci. Pro příklad je na Obr. 6.3 zobrazen graf závislosti indukčnosti smyčky L1-L2 na frekvenci změřené při proudovém rozsahu 20 A.



Obr. 6.3: Graf závislosti indukčnosti smyčky L1-L2 na frekvenci

Zobrazená závislost na **Obr. 6.3** je pouze orientační. Pro přesné zobrazení závislosti indukčnosti AlFe lana na frekvenci je třeba provést opakovaná měření s větším rozsahem frekvencí.

7 ZÁVĚR

V úvodu své práce popisuji elektrické parametry venkovního vedení a potřebu jejich znalosti pro výpočet elektrických sítí. V následující části se zabývám teoretickým výpočtem elektrických parametrů venkovních vedení a je zde proveden výpočet některých vedení vn. Elektrické parametry venkovních vedení jsou závislé na materiálu, konstrukci vodičů, izolaci, uspořádání vodičů v hlavě stožáru a výšce vodičů nad zemí.

Rezistance vodičů vedení se při procházejícím stejnosměrném proudu stanovuje pomocí rezistivity, jmenovitého průřezu a délky vedení. Tato rezistance se při průchodu střídavého proudu zvýší o hodnotu, kterou udává součinitel zvětšení rezistance vlivem skinefektu. Další vliv má průhyb lana, kroucení drátů v lanech a teplota.

Provozní indukčnost vedení je závislá na poloměru vodičů a vzdálenostech jednotlivých vodičů mezi sebou. Na provozní indukčnost vedení má také vliv skinefekt. Je vyjádřen pomocí koeficientu zvýšení provozní indukčnosti pro střídavý proud, který je obtížné stanovit výpočtem a v praxi se stanovuje měřením. Provozní indukčnost kabelových vedení je výrazně menší než vedení venkovních.

Konduktance je dána ztrátami svodem přes izolátory a ztrátami způsobené korónou. Je závislá na napětí a povětrnostních podmínkách. Stanovení výpočtem je proto silně nepřesné a v praxi se stanovuje pouze měřením. Pro dobrou znalost konduktance venkovního vedení je třeba určit jednotlivé krajní hodnoty.

Při výpočtu kapacity se využívá metody zrcadlení. Určí se potenciálové koeficienty vlastní a vzájemné, ze kterých se sestrojí matice potenciálních součinitelů. Inverzí této matice vznikne matice kapacitních součinitelů, ze kterých lze určit hodnoty vlastních a vzájemných kapacit. Vlastní potencionální součinitelé jsou závislé na výšce jednotlivých vodičů nad zemí. Vzájemné potencionální součinitelé jsou závislé na výšce jednotlivých vodičů nad zemí a na vzdálenostech mezi nimi. U obecného trojfázového vedení nabývají vlastní kapacity třech různých hodnot a vzájemné kapacity šesti různých hodnot. Tato nesymetrie je nežádoucí, proto se využívá transpozice vodičů. U transponovaného třífázového vedení existuje jedna vlastní kapacita, jedna vzájemná kapacita. Při souměrných napájecích napětích lze tyto kapacity vyjádřit tzv. provozní kapacitou, která je nezávislá na přítomnosti nebo nepřítomnosti zemních lan. U stíněných kabelových vedení se uvažuje pouze kapacita mezi vodičem a stíněním.

V další části práce se zabývám způsobem měření parametrů venkovních vedení. Pro stanovení podélné impedance a tím i rezistance a indukčnosti se vedení měří zapojené nakrátko. Pro stanovení podélné admitance a tím i konduktance a kapacity se vedení měří naprázdno.

V následující části práce jsem shrnul informace o měřicí soustavě OMICRON CPC 100 + CP CU1, která slouží k měření impedance a zemního poměru elektrických vedení a silových kabelů, zemní impedance rozsáhlých systémů, krokového a dotykového napětí, vazební impedance a vazebního zemního poměru u dvojítych vedení.

V poslední části práce se zabývám měřením impedance reálného vedení vn měřicí soustavou OMICRON CPC 100 + CP CU1. Je zde zpracován návod na měření impedance vedení touto soustavou a popsán průběh měření impedance úseku vedení VN67 od US12 po US45 touto soustavou. Vedení AlFe 6, 95 mm² s rovinným uspořádáním vodičů na sloupu bylo měřeno za deštivého počasí při teplotě 25 °C. Výsledkem měření je hodnota rezistance vedení $R_k = 0,308 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, hodnota indukčnosti vedení $L_k = 1,154 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$ a velikost impedance zemní cesty $Z_z = (24,327 - j0,005) \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Rezistance měřeného vedení zjištěná výpočtem je $0,327 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ a indukčnost měřeného vedení zjištěná výpočtem je $1,256 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$. Odchylka naměřených a vypočtených hodnot může být způsobena rozdílem velikosti skutečného průřezu od jmenovitého průřezu vodiče. Skutečný průřez vodiče může nabývat hodnot 95 až 105 % jmenovitého průřezu. Vzhledem k tomu, že nebyl změřen měrný odpor půdy, nemohl být proveden teoretický výpočet impedance zemní cesty.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1980, 307 s.
- [2] HODINKA, Miloslav, František NĚMEČEK a Štefan FECKO. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 323 s.
- [3] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. *Distribuce elektrické energie*. Brno, 2003. Skriptum. VUT v Brně.
- [4] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení: 1. část*. Brno, 2012. Skriptum. VUT v Brně.
- [5] AIS SPOL. S R.O. BRNO. *SYNCHRONNÍ FÁZORY NAPETÍ A PROUDU V ENERGETICE, IDENTIFIKACE PARAMETRU VEDENÍ ZA PROVOZU*. Brno, 2006. Dostupné z: <http://www.ais-brno.cz/clanky/egu2006.pdf?lang=cz>
- [6] HODINKA, Miroslav. VUT V BRNĚ. *Přechodné jevy v elektrizační soustavě*. 3. vyd. Brno: VUT v Brně, 1990. ISBN 80-214-0083-8.
- [7] OMICRON ELECTRONICS GmbH. *CP CU1 Reference Manual*. 2005, 58 s.
- [8] OMICRON ELECTRONICS GmbH. *CPC 100 Reference Manual*. 2007, 368 s.
- [9] OMICRON ELECTRONICS GMBH. *Omicron* [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.omicron.at/>
- [10] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR, David TOPOLÁNEK a kol. *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Provoz distribučních soustav*. Vydání první. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [11] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [12] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení: 2. část*. Brno, 2011. Skriptum. VUT v Brně.

PŘÍLOHA A: TECHNICKÉ PARAMETRY VODIČŮ

Tab. A.1: Technické parametry měděných drátů [1]

Průřez [mm ²]		Hmotnost [kg.km ⁻¹]	Největší dovolený odpor [Ω.km ⁻¹]
jmenovitý	matematický		
4	3,976	35,4	4,487
6	5,940	52,8	3,003
10	10,179	90,5	1,753
16	15,904	141,4	1,122
25	25,518	226,9	0,699

Tab. A.2: Technické parametry měděných a hliníkových lan [1]

Průřez [mm ²]		Počet poloh	Hmotnost Cu [kg.km ⁻¹]	Hmotnost Al [kg.km ⁻¹]	Největší dovolený odpor Cu [Ω.km ⁻¹]	Největší dovolený odpor Al [Ω.km ⁻¹]
jmenovitý	matematický					
10	10,017	1	90,1	-	1,806	-
16	15,890		143,4	43,5	1,138	1,834
25	25,417		229,3	69,6	0,712	1,147
35	34,363		309,5	94,1	0,526	0,848
50	49,483		445,8	135,5	0,366	0,589
50	51,072	2	464,2	140,7	0,356	0,574
70	68,989		626,0	190,0	0,264	0,425
95	93,271		845,0	256,9	0,195	0,314
120	121,201		1098,9	333,8	0,150	0,242
150	147,112	3	1340,5	406,5	0,124	0,200
185	181,633		1651,0	501,9	0,101	0,162
240	236,023		2147,1	652,2	0,077	0,125
240	242,536	4	2214,7	671,6	0,075	0,122
300	299,449		2727,7	829,2	0,061	0,098

Tab. A.3: Technické parametry dvoumateriálových lan AlFe 6 (AlFe 8) [1]

Jmenovitý průřez [mm ²]	Duše		Plášť		Hmotnost ± 2,5 % [kg.km ⁻¹]	Největší dovolený odpor [Ω.km ⁻¹]
	Matematický průřez [mm ²]	Počet drátů	Matematický průřez [mm ²]	Počet drátů		
16	2,55	1	15,27	6	62,5	1,882
25	3,98		23,86		97,6	1,205
35	5,73		34,35		140,5	0,837
50	8,04		48,25		197,3	0,596
70	11,56	1 + 6	66,16	10 + 16	277,1	0,434
95	14,97		90,05		370,9	0,319
120	20,91		122,57		509,2	0,234
150	25,41		148,86		619,4	0,193
185	31,67		183,78		765,5	0,156
210	35,75		209,10		868,7	0,137
240	40,08		236,06		979,2	0,122
300	49,48		294,87		1217,5	0,097
450	73,89	12	445,31	28	1832,6	0,066
(450)	52,49		426,5	12 + 8	1607,4	0,0674
(500)	58,90		490,70		1837,2	0,0586
(670)	84,83		671,10		2547,1	0,0428

Tab. A.4: Technické parametry dvoumateriálových lan AlFe 4 [1]

Jmenovitý průřez [mm ²]	Duše		Plášť		Hmotnost ± 2,5 % [kg.km ⁻¹]	Největší dovolený odpor [Ω.km ⁻¹]
	Matematický průřez [mm ²]	Počet drátů	Matematický průřez [mm ²]	Počet drátů		
50	14,07	1 + 6	60,32	12 + 8	280,8	0,476
70	17,81		76,34		355,4	0,376
95	21,99		94,25		438,8	0,305
120	27,83		119,28		555,3	0,241
150	35,75		153,21		713,3	0,188
185	43,10		184,73		860,0	0,156
210	49,48		212,06		987,2	0,136
240	56,74	1 + 6 + 12	241,06		1126,9	0,119
300	75,55		305,36		2456,1	0,094
350	85,95		340,23		1636,8	0,085

Tab. A.5: Technické parametry dvoumateriálových lan AlFe 3 [1]

Jmenovitý průřez [mm ²]	Duše		Plášť		Hmotnost ± 2,5 % [kg.km ⁻¹]	Největší dovolený odpor [Ω.km ⁻¹]
	Matematický průřez [mm ²]	Počet drátů	Matematický průřez [mm ²]	Počet drátů		
35	11,93	3	35,78	9	195,3	0,803
50	17,18		51,53		281,3	0,558
70	24,13		72,38		395,1	0,397
95	31,67	1 + 6	91,61	15 + 21	509,2	0,514
120	43,10		124,69		693,1	0,230
150	49,48		143,14		795,6	0,201
185	61,28	3 + 9	183,85		1003,7	0,156
210	68,71		206,12		1125,2	0,139
240	79,26		237,79		1298,1	0,121
300	97,03	1 + 6 + 12	310,15	2 + 26 + 32	1642,1	0,093
350	108,79		332,86		1855,3	0,088