

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza nesymetrie parametrů přenosových vedení  
pro různé konfigurace stožárů ZVN**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal BRŮNA**

Osobní číslo: **E17N0073P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Analýza nesymetrie parametrů přenosových vedení pro různé konfigurace stožárů ZVN**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte způsob výpočtu parametrů přenosových vedení s více trojfázovými systémy.
2. Proveďte výpočet parametrů pro transponovaná a netransponovaná vedení pro různé varianty stožárů.
3. Porovnejte výhody a nevýhody kompenzace nesymetrie parametrů způsobených geometrickým uspořádáním vodičů a jejich ekonomickou náročnost.
4. Formulujte doporučení pro projektování přenosových vedení s ohledem na parametry vedení.



*[Handwritten signature in blue ink]*

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mayer, D., Benešová, Z.: Algorithm for computation of inductances of various three-phase lines. Acta Technica CSAV, 2003.
2. Benešová, Z.; Šroubová, L. Omezení vlivu geometrické nesymetrie u paralelních venkovních vedení. In EE 2003 Elektroenergetika . Košice : Technical University of Košice, 2003. s. 124-125. ISBN 80-8906180-X.
3. Nazarčík, T.: Výpočet činných ztrát a nesymetrií fázových proudů na přenosovém vedení 400 kV, studie pro ČEPS 2015.
4. Nazarčík, T.: Analýza provozu kombinovaných vedení, studie pro ČEPS 2016.

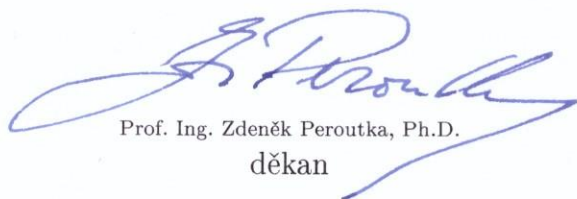
Vedoucí diplomové práce:

**Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.**


Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá nesymetrií pasivních parametrů venkovních vedení a vlivem vzájemných induktivních a kapacitních vazeb na proudovou a napěťovou nesymetrii. V první části je proveden rozbor nesymetrie napětí a proudů, její dopady a původ vzniku z pohledu venkovních vedení. Dále je uvedena problematika transpozice fázových vodičů zahrnující motivaci, různá provedení a ilustrativní ukázky nejen z české přenosové soustavy, praktické aspekty a metodiku. Poté jsou popsány a odvozeny pasivní parametry náhradního schéma vedení, jež jsou následně i vyčísleny pro netransponované a ideálně transponované dvojité přenosové vedení provozované na napěťové hladině 400 kV v případě dvou stožárových konstrukcí Dunaj 2012 a Soudek 2014, využitého pro sestavení obvodového modelu. Pomocí vytvořeného počítačového modelu v programu MATLAB je pro netransponované vedení a různé druhy transponovaných vedení jednak analyzována proudová nesymetrie v závislosti na přenášeném výkonu a délce vedení a jednak zkoumána souvislost mezi nesymetrií napětí na zátěži a nesymetrií indukovaných napětí a proudů. U uvažovaných typů transponovaných vedení je rovněž diskutována jejich ekonomická náročnost.

## **Klíčová slova**

Přenosové vedení, obvodový model vedení, výpočet pasivních parametrů, nesymetrie pasivních parametrů, modelování dvojitého přenosového vedení, netransponované vedení, transponované vedení, vyhodnocení proudové a napěťové nesymetrie, ekonomická náročnost transpozice fázových vodičů.



# Abstract

Brůna, Michal. *Analysis of asymmetry of transmission line parameters for different MV mast configurations.*

Submitted master thesis deals with the asymmetry of transmission line parameters and impact of mutual inductances and capacitances on current and voltage asymmetry. Voltage and current asymmetry, its impact and cause from the perspective of overhead lines is analysed in the first part. Next, the problem of phase conductor transposition including its motivation, different types and illustrative examples not only from czech transmission system, practical aspects and methodology is mentioned. After that there are described and derived passive parameters of overhead line diagram, which are subsequently also calculated for untransposed and ideally transposed 400 kV level double transmission line in case of Dunaj 2012 and Soudek 2014 mast configurations, used in equivalent circuit model. Both current asymmetry in relation with transmitted power and line length is analysed and connection between load voltage and induced voltage and current is investigated for untransposed and different types of transposed line by created computer model in MATLAB. Economic aspect in case of considered types of transposed lines is also discussed.

## Key words

Transmission line, circuit line model, transmission line parameters calculation, asymmetry of transmission line parameters, model of double transmission line, untransposed line, transposed line, current and voltage asymmetry evaluation, economic aspect of phase conductors transposition.

# Prohlášení

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

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

V Plzni dne 24.5.2019

Michal Brůna

.....

podpis

## Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní Prof. Ing. Zdeňce Benešové, CSc. za velmi vřelý přístup a věnovaný čas, metodické vedení diplomové práce a cenné profesionální rady, připomínky a poskytnuté materiály při vypracování této diplomové práce i mé předchozí bakalářské práce.

Rovněž velice děkuji konzultantovi diplomové práce panu Ing. Tomášovi Nazarčíkovi, Ph.D. za velmi vřelý přístup a věnovaný čas, cenné profesionální rady, připomínky a poskytnuté materiály ze společnosti ČEPS, a.s. při vypracování této diplomové práce i mé předchozí bakalářské práce spolu s jejím metodickým vedením.

Dále děkuji zaměstnancům společnosti ČEPS Invest, a.s. ze sekce Projektování vedení za velmi vřelý přístup a věnovaný čas, cenné profesionální rady, připomínky a poskytnuté materiály.

V neposlední řadě bych velice rád poděkoval všem vyučujícím Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, kteří mají velikou zásluhu na mém vzdělání, za jejich odváděnou práci a to i velice často nad rámec jejich povinností.

V závěru bych velice rád vyjádřil obrovský dík a neskonalé uznání celé mé rodině, jež mě podporovala během mého studia, stála při mně za všech okolností a vytvořila mi to nejlepší možné zázemí.

# Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Proudová a napěťová nesymetrie .....	2
3.	Transpozice fázových vodičů.....	5
3.1	Motivace k provádění transpozice .....	5
3.2	Ideální případ transpozice jednoduchého vedení.....	6
3.3	Reálný případ transpozice jednoduchého vedení.....	7
3.4	Transpozice dvojitých vedení .....	8
3.5	Transpozice v české přenosové soustavě.....	9
3.6	Náročnost provedení transpozice.....	11
3.7	Metodika určující provedení transpozice.....	12
4.	Obvodový model vedení .....	14
4.1	Základní elementy.....	14
4.2	Činný odpor .....	16
4.2.1	Odpor vodičů venkovního vedení.....	16
4.2.2	Odpor fiktivního zemního vodiče .....	18
4.3	Indukčnost.....	19
4.3.1	Indukčnost vodičů venkovního vedení .....	19
4.3.2	Ideální případ transpozice po třetinách délky trasy vedení.....	24
4.3.3	Indukčnost fiktivního zemního vodiče .....	27
4.4	Kapacita .....	28
4.4.1	Ideální případ transpozice po třetinách délky trasy vedení.....	35
4.5	Svod .....	36
5.	Výpočet pasivních parametrů.....	38
5.1	Uvažované typy stožárů.....	39
5.1.1	Dunaj 2012.....	39
5.1.2	Soudek 2014 .....	40
5.2	Činný odpor vodičů a svod .....	41
5.3	Indukčnost fiktivního zemního vodiče .....	41

5.4	Matice indukčností.....	41
5.4.1	Netransponované vedení.....	41
5.4.2	Ideálně transponované vedení.....	43
5.4.3	Vzájemné porovnání .....	45
5.5	Matice kapacit.....	46
5.5.1	Netransponované vedení.....	46
5.5.2	Ideálně transponované vedení.....	48
5.5.3	Vzájemné porovnání .....	50
6.	Modelování venkovního vedení .....	51
6.1	Model tvořený kaskádou dvojbranů .....	52
6.2	Matematický model vedení.....	54
6.3	Numerické řešení matematického modelu vedení .....	58
6.4	Řešené typy vedení .....	60
6.4.1	Netransponované vedení.....	62
6.4.2	Ideálně a reálně transponované vedení .....	63
6.4.3	Reálně transponované vedení s částečnými zákruty.....	64
7.	Ekonomická náročnost provedení transpozice.....	65
7.1	Přibližné stanovení zvýšených investičních nákladů uvažovaných typů transpozic .....	66
7.1.1	Ideálně a reálně transponované vedení .....	66
7.1.2	Reálně transponované vedení s částečnými zákruty.....	67
8.	Analýza nesymetrie v závislosti na přenášeném výkonu a délce vedení .....	68
8.1	Závislosti činitelů nesymetrie NTV na přenášeném výkonu .....	68
8.1.1	Vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 .....	68
8.1.2	Vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 .....	72
8.2	Závislosti mezního přenášeného výkonu na délce vedení .....	76
8.2.1	Vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 .....	76
8.2.2	Vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 .....	78
8.2.3	Vzájemné porovnání řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014 .....	80
9.	Způsoby hodnocení proudové a napěťové nesymetrie.....	82

9.1	Vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 .....	84
9.1.1	Napětí zátěže .....	84
9.1.2	Indukovaná napětí .....	90
9.1.3	Indukované proudy .....	96
9.2	Vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 .....	102
9.2.1	Napětí zátěže .....	102
9.2.2	Indukovaná napětí .....	108
9.2.3	Indukované proudy .....	114
9.3	Vzájemné porovnání řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014.....	120
Závěr	.....	121
Použitá literatura.....		123
Přílohy .....		I
Příloha A.....		I
Příloha B .....		XI

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$R_{ss}$	stejnoseměrný odpor vodiče	( $\Omega$ )
$\rho$	měrný odpor vodiče	( $\Omega\text{m}$ )
$l$	délka vodiče	(m)
$S$	průřez vodiče	( $\text{m}^2$ )
$\kappa$	souhrnný násobný opravný koeficient	(-)
$\kappa_{\theta}$	činitel oteplení vodiče	(-)
$\kappa_s$	činitel vlivu skinefektu	(-)
$\kappa_z$	činitel prodloužení délky vodiče kroucením	(-)
$\kappa_p$	činitel respektující průhyb vodiče	(-)
$R_{01}$	odpor zemnicího lana	( $\Omega/\text{km}$ )
$R_{02}$	odpor kombinovaného zemnicího lana	( $\Omega/\text{km}$ )
$R_{FV}$	odpor fázového vodiče	( $\Omega/\text{km}$ )
$\zeta$	teplotní součinitel	( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$\eta$	teplotní součinitel	( $^{\circ}\text{C}^{-2}$ )
$R$	odpor svazkového vodiče	( $\Omega/\text{km}$ )
$R_g$	odpor fiktivního zemního vodiče	( $\Omega/\text{km}$ )
$f$	frekvence	(Hz)
$L_i$	vlastní indukčnost $i$ -tého vodiče	(H/m)
$\mu_0$	permeabilita vakua	(H/m)
$D_0$	vzdálenost vodiče od místa s nulovým magnetickým vektorovým potenciálem	(m)
$r_i$	poloměr $i$ -tého vodiče	(m)
$L_{ij}$	vzájemná indukčnost mezi $i$ -tým a $j$ -tým vodičem	(H/m)
$D_{ij}$	vzdálenost $i$ -tého vodiče od $j$ -tého vodiče	(m)
$\bar{U}_{\Sigma Li}$	fázor celkového indukovaného napětí $i$ -tého vodiče	(V)
$j$	imaginární jednotka	(-)
$\omega$	úhlová frekvence	(rad/s)
$m$	počet fázových vodičů a zemnicích lan v systému	(-)
$\bar{I}_i$	fázor proudu $i$ -tého vodiče	(A)



$\ell_k$	délka $k$ -tého úseku vedení	(m)
$D_{ig}$	vzdálenost $i$ -tého vodiče od fiktivního zemního vodiče	(m)
$r_{ekv}$	ekvivalentní poloměr svazkového vodiče	(m)
$n$	počet parciálních vodičů ve svazku	(-)
$r_v$	poloměr parciálního vodiče	(m)
$s$	svazkový krok	(m)
$L_g$	indukčnost fiktivního zemního vodiče	(mH/km)
$h_s$	střední výška fázových vodičů nad zemí	(m)
$\gamma_p$	vodivost půdy	(S/m)
$m_{FV}$	počet fázových vodičů v systému	(-)
$D_g$	hloubka fiktivního zemního vodiče v zemi	(m)
$\bar{U}_{Li}$	fázor indukovaného napětí do $i$ -tého vodiče díky vzájemným induktivním vazbám	(V)
$\underline{U}$	vektor fázorů napětí na vodičích	(V)
$\mathbf{A}$	matice potenciálových koeficientů	(V/C)
$\underline{q}$	vektor fázorů elektrických nábojů na vodičích	(C)
$\alpha_{ii'}$	vlastní potenciálový koeficient	(V/C)
$\varepsilon_0$	permitivita vakua	(F/m)
$\alpha_{ij}$	vzájemný potenciálový koeficient	(V/C)
$d_{ii'}$	vzdálenost $i$ -tého vodiče od obrazu $i$ -tého vodiče	(m)
$d_{ij'}$	vzdálenost $i$ -tého vodiče od obrazu $j$ -tého vodiče	(m)
$\mathbf{B}$	matice kapacitních koeficientů	(F)
$\beta_{ij}$	kapacitní koeficient	(F)
$\mathbf{D}$	matice kapacitních koeficientů	(F)
$\delta_{ij}$	kapacitní koeficient	(F)
$C_{i0}$	kapacita fázových vodičů proti zemi	(F)
$C_{ij}$	parciální kapacita mezi $i$ -tým a $j$ -tým vodičem	(F)
$\bar{I}_{\Sigma Ci}$	fázor celkového kapacitního proudu $i$ -tého vodiče	(A)
$\bar{I}_{Ci}$	fázor indukovaného proudu do $i$ -tého vodiče díky vzájemným kapacitním vazbám	(A)

$\overline{U}_i$	fázor napětí $i$ -tého vodiče proti zemi	(V)
$G$	svod	(S/km)
$\Delta P_{J0}$	celkové Jouleovy ztráty vedení naprázdno	(W/km)
$\Delta P_{R0}$	činné ztráty na podélných odporech vedení naprázdno	(W/km)
$U_f$	efektivní hodnota fázového napětí	(V)
$N$	celkový počet dvojbranů v modelu	(-)
$K$	počet dvojbranů v kaskádě	(-)
$m_{ZL}$	počet zemnicích lan	(-)
$m_g$	počet fiktivních zemních vodičů	(-)
$M$	celkový počet formulovaných rovnic	(-)
$\mathbf{A}$	čtvercová matice soustavy	(-)
$\mathbf{x}$	sloupcový vektor neznámých	(-)
$\mathbf{b}$	sloupcový vektor pravých stran	(-)
$P_{12\max}$	mezní přenášený výkon	(W)
$\overline{U}_{Zi}$	fázor napětí zátěže	(V)
$u_{Zi}$	poměrná hodnota napětí zátěže vzhledem k napětí zdroje	(%)
$\overline{U}_{Zj}^{(i)}$	fázor napětí zdroje $i$ -té složkové soustavy $j$ -tého potahu	(V)
$u_{Zj}^{(i)}$	poměrná hodnota napětí zátěže $i$ -té složkové soustavy $j$ -tého potahu vzhledem k napětí zdroje	(%)
$p_{i1j}$	činitel nesymetrie $i$ -té složkové soustavy $j$ -tého potahu	(%)

# 1. Úvod

Postupným útlumem výroby elektrické energie v jaderných a uhelných elektrárnách a neustále rostoucí poptávkou po elektrické energii dochází k nárůstu již značného instalovaného výkonu obnovitelných zdrojů elektrické energie na severu Evropy vedoucího k přesunu zdrojové základny. Při současném výrazném deficitu zdrojů elektrické energie na jihu tak dochází k přenosu jejího obrovského množství napříč Evropou. Z tohoto důvodu je zde realizována výstavba nových přenosových vedení a posílení přenosové schopnosti vedení stávajících. Česká přenosová soustava je vzhledem k jejímu umístění jednou z nejméně exponovaných. Její provozovatel společnost ČEPS, a.s. řeší tuto situaci modernizací a výstavbou nových jednoduchých či dvojitých přenosových vedení provozovaných na napěťové hladině 400 kV. Vzhledem k ochraně životního prostředí, vysokým cenám pozemků, nemožnosti jejich záboru kvůli okolní infrastruktuře či nesouhlasu ze strany dotčených subjektů se v mnoha případech upřednostňuje výstavba dvojitých vedení či zdvojování vedení stávajících.

Jedním z problémů tohoto technického řešení je však nesymetrie pasivních parametrů dvojitého vedení, jež je zapříčiněna geometrickým uspořádáním fází na stožárové konstrukci, ale i výrazné vzájemné induktivní a kapacitní vazby díky malé vzdálenosti mezi jednotlivými potahy. Obojí přispívá k nesymetrii proudů a napětí v elektrizační soustavě s mnohými negativními dopady na elektrická zařízení podílející se na výrobě, přenosu a užití elektrické energie.

Z tohoto důvodu se již při samotném návrhu vedení vyhodnocuje proudová nesymetrie. V případě její nedovolené hodnoty se realizuje opatření vedoucí k jejímu omezení spočívající v tzv. transpozici fázových vodičů lišící se v počtu, umístění a provedení zákrutů.

Cílem této diplomové práce je jednak analyzovat vliv nesymetrie pasivních parametrů a vzájemných induktivních a kapacitních vazeb na proudovou nesymetrii v závislosti na přenášeném výkonu a délce vedení a jednak zkoumat souvislost mezi nesymetrií napětí zátěže a nesymetrií indukovaných napětí a proudů. Toto je prováděno na počítačovém modelu netransponovaného a různých druhů transponovaných dvojitých přenosových vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014 provozovaných na napěťové hladině 400 kV napájených symetrickým zdrojem a zatížených symetrickou zátěží, jež byl vytvořen v programu MATLAB. U uvažovaných typů vedení je rovněž diskutována ekonomická náročnost.

## 2. Proudová a napět'ová nesymetrie

Při uvažování třífázové soustavy at' již při odvozeních, výpočtech či simulacích se v převážné většině případů řešení ustálených stavů vychází z předpokladu, že se jedná o soustavu symetrickou (souměrnou). Ta je při řešení pomocí symbolicko-komplexní metody charakterizována tím, že jednotlivé fázory proudů a napětí mají shodnou velikost a jejich vzájemné fázové natočení činí  $120^\circ$ . V každém okamžiku je tedy jejich součet nulový.

V případě, že alespoň jedno z těchto dvou charakteristických kritérií není splněno, tak se již jedná o nesymetrickou (nesouměrnou) třífázovou soustavu. Ty se dělí na vyvážené, kdy je součet fázorů roven nule, a na nevyvážené. V tomto případě se řešení daných úloh podstatně komplikuje, jelikož není možné použít mnohá zjednodušení. Naproti tomu však tento přístup věrohodněji postihuje zkoumanou realitu.

Vzhledem ke skutečnosti, že se v každé reálné třífázové soustavě vyskytuje nesymetrie, je nezbytné pro dosažení objektivnějších výsledků při výpočtech a to zejména při přechodných dějích a správném nastavení ochran přistupovat ke každé řešené třífázové soustavě jako nesymetrické a toto adekvátně zohlednit při prováděných výpočtech a simulacích.

Proudová a napět'ová nesymetrie je velmi nežádoucí a je nutno se jí zabývat vzhledem k mnoha negativním dopadům jak na elektrická zařízení podílející se na výrobě elektrické energie a jejím přenosu do místa spotřeby, tak i na připojené spotřebiče. Dochází totiž k nárůstu Jouleových ztrát elektrické energie, díky čemuž se snižuje účinnost a zrychluje degradace použitých konstrukčních materiálů, což zkracuje životnost elektrických zařízení. U venkovních vedení protékají fázemi proudy rozdílných velikostí, rostou ztráty elektrické energie v zemnicích lanech a jsou rušena blízká sdělovací vedení. U transformátorů dochází k jednosměrné magnetizaci jádra a uzavírání magnetického toku přes nádobu transformátorů. Toto v konečném důsledku neumožňuje zatížit elektrická zařízení jejich jmenovitým výkonem a snižuje se provozní využití. U točivých strojů se nesymetrie projevuje vznikem vibračních momentů, což vede ke zvýšenému mechanickému namáhání. Nesymetrie také negativně ovlivňuje správnou funkci řídicích a regulačních zařízení a u elektrických ochran může vyvolat jejich chybné působení.

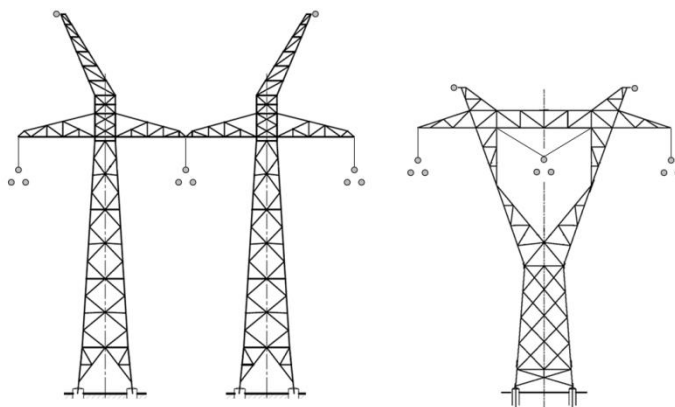
Nesymetrie napětí a proudů může být způsobena nesymetrickými napájecími zdroji, transformátory, nesymetrií pasivních parametrů elektrických vedení, nesymetrickým

zatížením či vznikem příčných nebo podélných poruch. V případě prvních čtyř uvedených příčin se jedná o tzv. dlouhodobou nesymetrii. Při vzniku některých jednofázových či dvoufázových poruch se pak hovoří o krátkodobých nesymetriích.

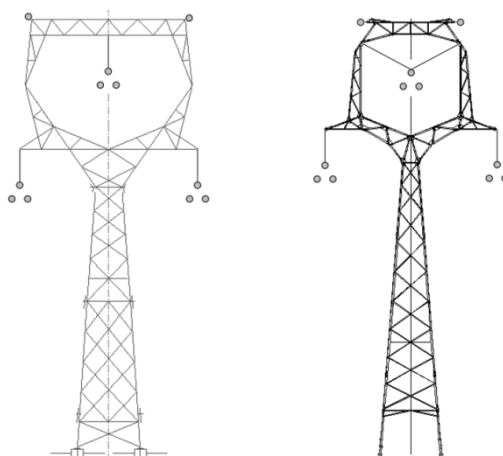
U venkovních přenosových vedení je nesymetrie zapříčiněna díky samotné stožárové konstrukci, jež pevně definuje geometrické uspořádání fázových vodičů a zemnicích lan, nerovností okolního terénu a případnou přítomností dalších vedení či okolních objektů. V okolí vedení vzniká nesymetrické rozložení elektrického či magnetického pole, jež se projeví v nesymetrii pasivních parametrů vedení. Nemožnost umístit zároveň všechny fázové vodiče ve stejné vzdálenosti od ostatních fázových vodičů, zemnicích lan, stožárové konstrukce, země a případných dalších vedení či okolních objektů vede k poměrně výrazné nesymetrii ve velikostech jednotlivých vlastních a vzájemných indukčností a mezifázových kapacit a kapacit proti zemi. Obecně se předpokládá, že nesymetrie nemá vliv na velikost podélného činného odporu a příčného svodu.

U dvojitých či vícenásobných vedení je proudová a napěťová nesymetrie ještě umocněna díky malé vzdálenosti od sousedního vedení umístěného na téže stožárové konstrukci. Mezi jednotlivými potahy jsou výrazné induktivní a kapacitní vazby a dochází ke vzájemnému se ovlivňování jak během ustáleného stavu, tak i při přechodných dějích. Z výše uvedených důvodů se u vedení a to zejména u dvojitých provádí transpozice fázových vodičů (podrobněji popsána v následující kapitole 3. Transpozice fázových vodičů), ale i při jejím důsledném provedení nelze u dvojitých vedení vzájemné vazby zcela eliminovat.

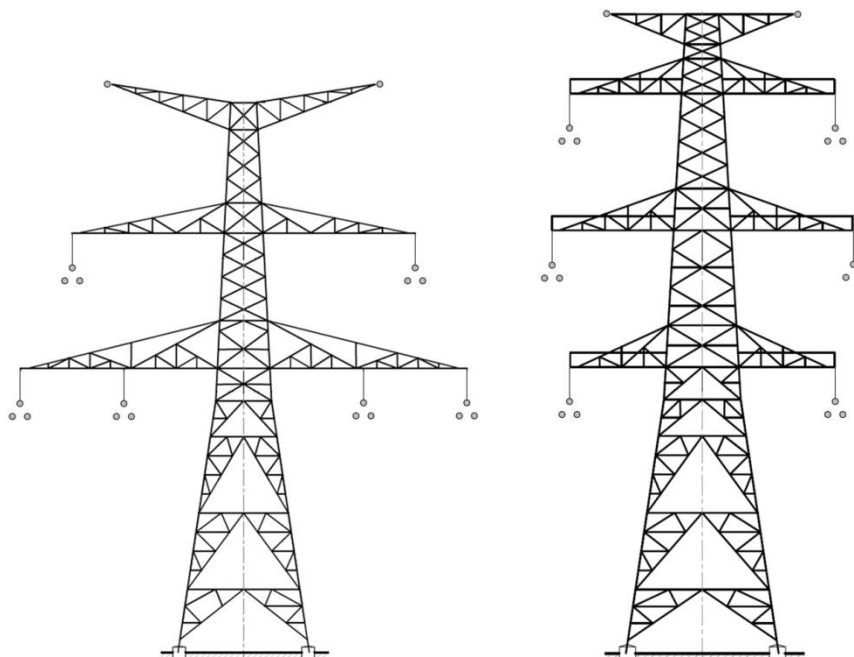
Jednotlivé druhy stožárových konstrukcí používané pro vedení na napěťové hladině 400 kV vyskytující se v české přenosové soustavě mají různý předpoklad k velikosti nesymetrie pasivních parametrů díky různému geometrickému uspořádání fázových vodičů a zemnicích lan. Jednoduchá vedení jsou tvořena stožárovými konstrukcemi typu Portál a Kočka (viz Obr. 1), u kterých jsou jednotlivé fázové vodiče umístěny v jedné rovině nad zemí a typu Delta a Mačka (viz Obr. 2) s fázovými vodiči v rozích pomyslného trojúhelníku. Pro dvojitá vedení je určena stožárová konstrukce typu Dunaj s fázovými vodiči jednotlivých potahů v rozích pomyslného trojúhelníku symetricky podle osy stožáru a Soudek s vertikálním umístěním fázových vodičů jednotlivých potahů po obou stranách stožáru podél jeho osy (viz Obr. 3).



**Obr. 1:** Schematické znázornění stožárové konstrukce typu Portál (vlevo) a Kocika (vpravo) [1]



**Obr. 2:** Schematické znázornění stožárové konstrukce typu Delta (vlevo) a Mačka (vpravo) [1]



**Obr. 3:** Schematické znázornění stožárové konstrukce typu Dunaj (vlevo) a Soudek (vpravo) [1]

### 3. Transpozice fázových vodičů

Pod pojmem transpozice fázových vodičů (dále jen transpozice) je myšlena fyzická výměna pozice jednotlivých fázových vodičů na závěsných bodech – izolátorových řetězcích dané stožárové konstrukce (viz Obr. 4) dle přesně definovaného schéma označovaného jako schéma sledu fází. Vedení s transpozicí se pak označuje jako transponované a naopak vedení bez transpozice jako netransponované. Pro transpozici se lze rovněž setkat s výrazy kroucení či křížení fázových vodičů vedení. Dále se v literatuře vyskytuje i výrok, že se vedení zkrucují.



**Obr. 4:** Detail transpozice fázových vodičů na stožáru typu Dunaj [2]

Jednotlivé druhy transpozic se liší v počtu a typu provedených zákrutů fázových vodičů (vzájemná výměna pozice fázových vodičů na stožáru – dále jen zákrut) a jejich umístěním v trase vedení. Dle typu zákrutů je lze rozdělit na úplný zákrut – všechny tři fázové vodiče vedení vymění svoji pozici a částečný zákrut – pouze dva fázové vodiče vedení vymění svoji pozici. Pokud dojde v trase vedení u všech fázových vodičů vedení k výměně veškerých možných příslušných pozic a jejich návratu na výchozí pozici (ve které byly na počátku), tak se jedná o úplnou transpozici. Podle počtů úplných transpozic na vedení se transpozice označují jako jednoduchá (jedna úplná transpozice), dvojitá (dvě úplné transpozice), atd.

#### 3.1 Motivace k provádění transpozice

Z předcházející kapitoly (2. Proudová a napěťová nesymetrie) vyplývá, že je vhodné se otázkou nesymetrie pasivních parametrů přenosových vedení zabývat, a to hned ze dvou důvodů. Prvním je omezení samotné proudové a napěťové



nesymetrie v elektrizační soustavě a z ní plynoucích dopadů a druhým je minimalizace ztrát elektrické energie při jejím přenosu a tím i provozních nákladů.

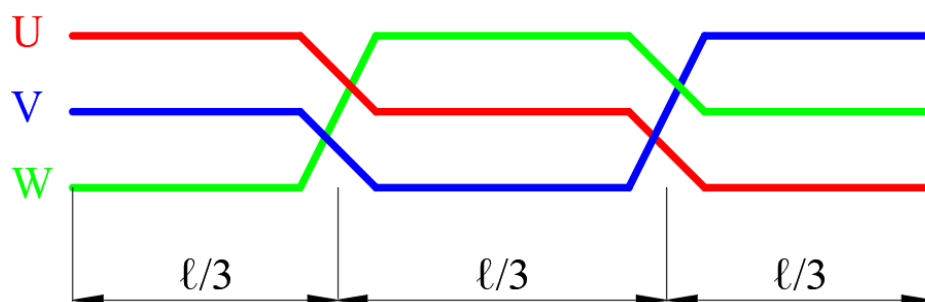
Nezbytnou a zároveň postačující podmínkou vyžadovanou u přenosových vedení je omezení proudové nesymetrie pod normou předepsanou hodnotu. Tohoto požadovaného cíle lze dosáhnout různými druhy transpozic. Jednotlivé varianty však omezí nesymetrii rozdílným způsobem, což se projeví zároveň i ve velikosti vznikajících Jouleových ztrát. Z tohoto důvodu lze optimalizovat provedení transpozice i z ekonomického hlediska a zabývat se nejvýhodnějším poměrem mezi zvýšenými jednorázově vynaloženými investičními náklady na výstavbu jedné varianty transponovaného vedení a zvýšenými provozními náklady vynakládanými na pokrytí ztrát elektrické energie vznikajících po celou dobu předpokládané životnosti druhé varianty transponovaného vedení či netransponovaného vedení.

Úplné či částečné zákruty se však nemusí vždy provádět jen z důvodu omezení nesymetrie a Jouleových ztrát, ale i kvůli zaústění vedení do rozvodny, kdy je potřeba dodržet určitý sled fází.

Dle normy PNE 33 3300 [3] se díky transpozici dosáhne zvýšení využití přenosové kapacity vedení, zlepšení funkce distančních ochranných (pomocí přesnějšího měření a současně i přesnější lokalizace místa poruchy), snížení netočivé složky proudu (sousledná, zpětná a netočivá (nulová) složka je označení pro symetrické složkové soustavy v metodě souměrných složek) a tím pádem omezení ztrát na vedení a v magnetických obvodech transformátorů a zmenšení vlivu na souběžná telekomunikační vedení a potrubí.

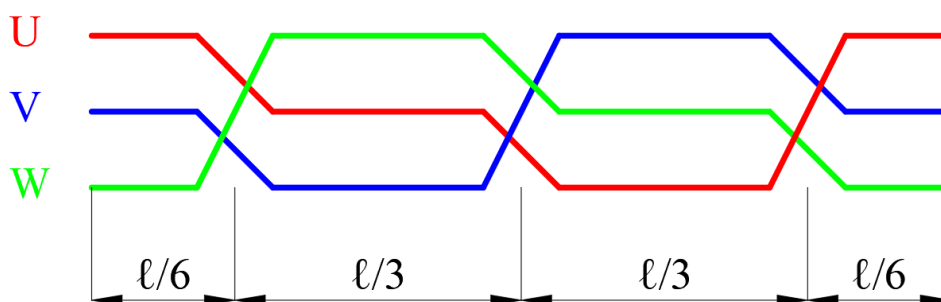
### 3.2 Ideální případ transpozice jednoduchého vedení

V případě nejznámějšího případu transpozice, kterým je ideální provedení transpozice jednoduchého vedení (viz Obr. 5), je pak každá fáze třífázového vedení (U, V, W) umístěna v jedné ze tří možných pozic přesně po jednu třetinu délky trasy  $\ell$ . Uváží-li se dále, že je vedení v celé trase tvořeno stožárovými konstrukcemi stejného typu, zem je dokonale rovná a je zanedbán vliv případných okolních objektů či jiných vedení, tak dochází k eliminaci vzájemných induktivních a kapacitních vazeb a zprůměrované hodnoty pasivních parametrů vedení vycházejí stejné. Tímto se dosáhne stavu, kdy přenosové vedení nezpůsobuje proudovou a napěťovou nesymetrii. Zpětná a netočivá složka proudu je nulová a nepodílí se na Jouleových ztrátách.



Obr. 5: Ideální případ transpozice jednoduchého vedení – rozdílný sled fází

Přidáním jednoho úplného zákrutu a rozdělením prvního úseku vedení na dvě poloviny dle Obr. 6 je odstraněn rozdílný sled fází na začátku a konci vedení a jedná se tak již o jednoduchou transpozici.



Obr. 6: Ideální případ transpozice jednoduchého vedení – stejný sled fází

### 3.3 Reálný případ transpozice jednoduchého vedení

Reálný případ transpozice snaží se co nejvíce přiblížit výše zmíněnému ideálnímu případu se však liší hned v několika skutečnostech. Každá fáze třífázového vedení je rovněž umístěna v jedné ze tří možných pozic avšak ne již přesně po jednu třetinu trasy vedení. To je způsobeno tím, že se zákruty v české přenosové soustavě provádí pouze na stožárech a nikoliv v rozpětí mezi nimi. Jelikož se umístění stožárů neřídí požadavkem na provedení transpozice, tak nejsou přesně ve třetinách délky trasy vedení. Zákrut se rovněž neprovádí na nosných stožárech, ale pouze na zákrutových stožárech, což jsou modifikované kotevní stožáry či v některých případech speciální typizované stožáry. Za místo provedení zákrutu se tak v praxi volí pozice kotevního stožáru umístěného co nejbližší třetině délky trasy vedení. Dále je snaha provádět transpozici pouze v přímé trase vedení a nikoliv v jejích lomech, což velmi ulehčuje technické provedení. Toto má za následek, že jsou jednotlivé fázové vodiče umístěny na jednotlivých pozicích nestejnou část trasy vedení. Rovněž samotné vedení je v naprosté většině případů tvořeno různými typy a druhy stožárových konstrukcí vyznačujícími se odlišnými geometrickými rozměry, takže dochází ke změně vzdáleností fázových vodičů od ostatních fázových vodičů, zemnicích lan, stožárových konstrukcí, od měničích se terénu, a to někdy i dosti výrazně,

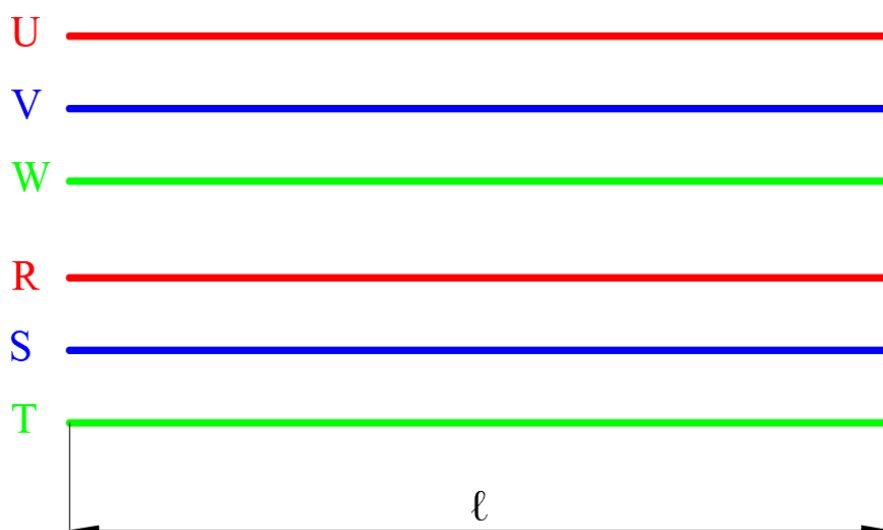
a případně se vyskytujících okolních objektů a vedení. Nepochází tak již k eliminaci vzájemných induktivních a kapacitních vazeb, zprůměrované hodnoty pasivních parametrů vedení již nejsou stejné a přenosové vedení se podílí na proudové a napět'ové nesymetrii. Z těchto důvodů je vhodné při výpočtech a simulacích uvažovat každý úsek (reálně) transponovaného vedení mezi dvěma zákruty jako dílčí netransponované vedení, což umožní věrohodněji postihnout zkoumanou realitu.

### 3.4 Transpozice dvojitých vedení

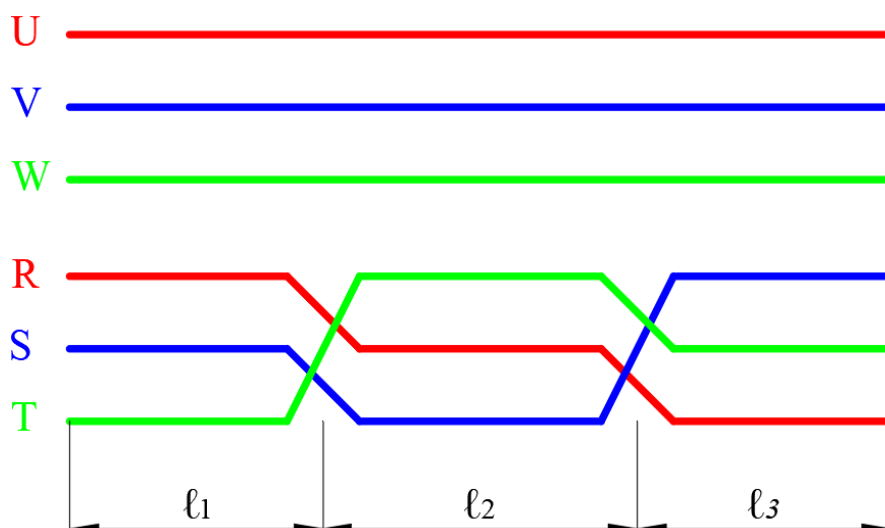
U dvojitých vedení lze rovněž rozlišovat ideální a reálný případ transpozice a to včetně vyplývajících závěrů ohledně velikosti induktivních a kapacitních vazeb a hodnot pasivních parametrů, jako tomu bylo v případě jednoduchého vedení.

Oproti jednoduchému vedení zde však existuje kromě dvou možných variant provedení vedení (netransponované a transponované) i třetí možnost, kdy je jedno vedení transponované a druhé netransponované. Nejznámější způsoby lišící se v počtu úplných zákrutů jsou schematicky znázorněny na následujících obrázcích. Jednotlivé varianty se pak liší velikostí vzájemných induktivních a kapacitních vazeb a tedy vzájemným se ovlivňováním. Platí, že s větším počtem úplných zákrutů klesá vzájemný vliv mezi vedeními.

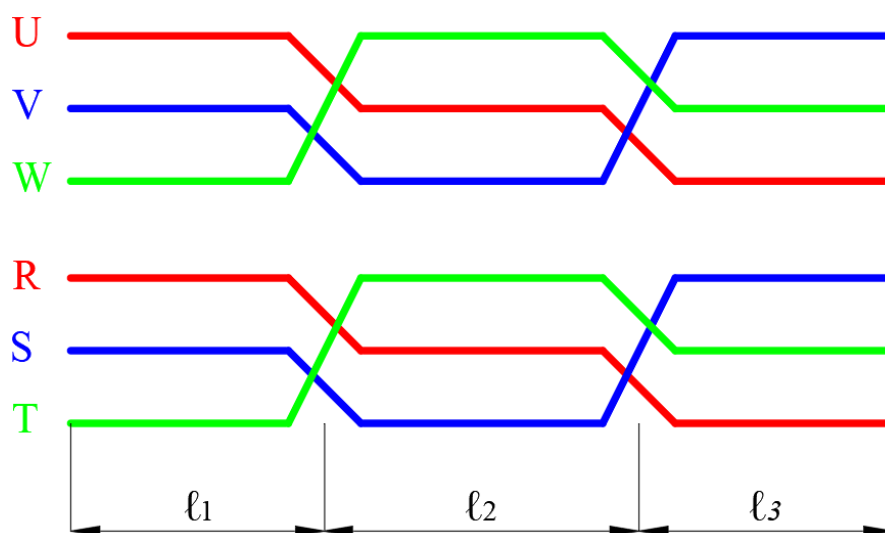
V prvním případě (Obr. 7) jsou obě vedení netransponovaná (vedení 1 - fáze U, V, W, vedení 2 - fáze R, S, T). Na dalším obrázku (Obr. 8) je poté vedení 1 netransponované a na vedení 2 jsou provedeny dva úplné zákruty. Ve třetím uvedeném způsobu (Obr. 9) jsou na obou vedeních provedeny dva úplné zákruty. V posledním případě (Obr. 10) jsou na vedení 1 provedeny dva úplné zákruty a na vedení 2 osm úplných zákrutů.



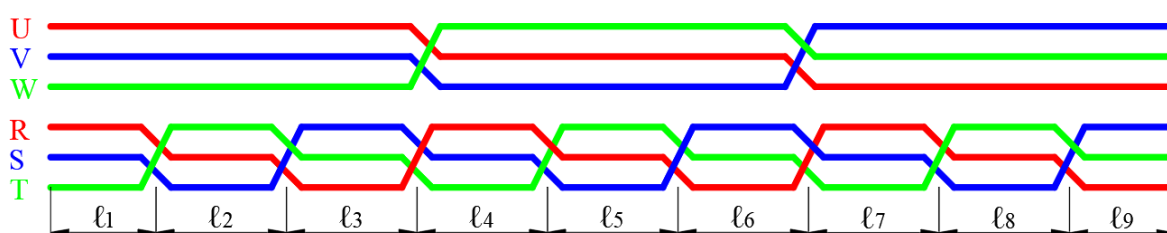
Obr. 7: Obě vedení netransponovaná



Obr. 8: Vedení 1 netransponované, vedení 2 transponované



Obr. 9: Obě vedení shodně transponovaná



Obr. 10: Obě vedení transponovaná

### 3.5 Transpozice v české přenosové soustavě

Podkapitola 3.5, ostatně jako podkapitoly 3.6 a 3.7, byly vytvořeny na základě údajů poskytnutých společností ČEPS, a.s. a informací sdělených v rámci konzultací se zaměstnanci společnosti ČEPS Invest, a.s. Z důvodu citlivosti těchto údajů jsou uváděny pouze rámcově.

Po důkladné analýze poskytnutých údajů platných ke konci roku 2018 byla zjištěna následující data (viz Tab. 1).

**Tab. 1:** Data ohledně vedení na hladině 400 kV týkající se transpozic v české přenosové soustavě (ke konci roku 2018)

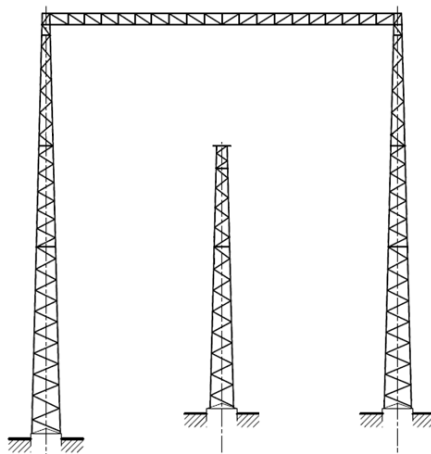
Počet transponovaných vedení	42 ze 70
Délka transponovaných vedení	$x$ km až více než 200 km
Způsob provozu transponovaných vedení	jednoduché, dvojnásobné, (trojnásobné, čtyřnásobné)
Poměr mezi délkou úseků jednoduchých a dvojnásobných transponovaných vedení	26 / 16
Počet úplných zákrutů na transponovaných vedení	1 až 6
Počet částečných zákrutů na transponovaných vedení	1, 2, 4, 6, (9)
Nejčastěji se vyskytující typ stožárové konstrukce u transponovaných vedení	Dunaj

Ke konci roku 2018 bylo celkem 42 ze 70 přenosových vedení provozovaných na napěťové hladině 400 kV transponováno. Délka těchto vedení se pohybovala od jednotek km do více než 200 km. Až na ojedinělé výjimky byla transponovaná vedení provozována v části trasy jako jednoduchá a ve zbývající části jako dvojnásobná. Délky jednotlivých úseků těchto vedení byly ve prospěch jednoduchého vedení oproti dvojnásobnému v poměru 26 ku 16. Vyskytovala se však i výjimka, kdy na velmi malou část trasy, do 1 km, přecházelo dvojnásobné vedení ve trojnásobné a dokonce i čtyřnásobné.

Na jednotlivých transponovaných vedeních se vyskytovaly různé počty a kombinace částečných zákrutů a úplných zákrutů. Ze schémat sledu fází bylo zjištěno, že počet úplných zákrutů se pohyboval od 1 do 6. Částečné zákruty nabývaly hodnot 1, 2, 4, 6 a v ojedinělém případě i 9. Největší zastoupení bylo ve prospěch menších počtů úplných i částečných zákrutů.

Nejčastěji se vyskytující stožárovou konstrukcí byl u transponovaných vedení stožár typu Dunaj.

V české přenosové soustavě se nevyskytují zákrutové stožáry všech typů používaných stožárových konstrukcí. Na napěťové hladině 400 kV se lze setkat se zákrutovými stožáry typu Portál, Delta, Třídřík a Dunaj. Výjimku však tvoří stožárové konstrukce typu Kočka, Soudek a Mačka. To však nevylučuje teoretickou možnost provedení transpozice i v těchto případech.



**Obr. 11:** Schematické znázornění zákrutového stožáru typu Třídřík [1]

V zahraničí se dají objevit i ukázky, kdy na stožárové konstrukci velice se podobající stožárové konstrukci Kočka je transpozice uskutečněna (viz Příloha A Obr. A.17, Obr. A.18, Obr. A.19). V případě stožáru Soudek se lze na území České republiky setkat s transpozicí na konstrukcích tohoto typu na napěťových hladinách 110 kV a 220 kV (viz Příloha A Obr. A.16), z čehož lze usuzovat možnost provedení transpozice i na stožárové konstrukci určené pro napěťovou hladinu 400 kV.

V příloze A jsou uvedeny ilustrativní příklady zákrutových stožárů všech zmíněných typů stožárových konstrukcí spolu s ukázkou již neexistující transpozice v rozpětí mezi stožáry (viz Obr. A.14, Obr. A.15).

### 3.6 Náročnost provedení transpozice

Transpozice zvyšuje investiční náklady a prodlužuje dobu výstavby vedení (zákruty se zhotovují během výstavby, dodatečně pouze v ojedinělých případech). Nároky na její provedení se liší dle typu zákrutů a stožárů. Existují totiž různá provedení zákrutů pro jednotlivé druhy stožárů a zároveň i vícero provedení zákrutů pro ten samý typ stožáru.

V některých případech není nutné u kotevního stožáru provádět větší konstrukční úpravy, v jiných případech je postačující stožár osadit jednou či více pomocnými konstrukcemi – konzolami a upravit uchycení fázových vodičů. V obou těchto případech lze použít klasický kotevní stožár. Ve zbývajících případech je použit speciální typ stožáru konstrukčně přímo uzpůsobený pro zákrut fázových vodičů - typizovaný zákrutový stožár. Toto je dobře patrné například na stožáru typu Portál. V dřívějších dobách byl pouze nosný stožár typu Portál a zákrut byl prováděn na speciálním stožáru typu Třídřík, takto tomu bylo i dále po zavedení kotevních stožárů typu Portál. Poté byl pro zákrut

používán typizovaný zákrutový stožár typu Portál, který se vyznačoval větší osovou vzdáleností dřívů.

Dále rostou nároky na spotřebu materiálu na fázové vodiče, kterými je samotný zákrut realizován – pomocí přeponek přechází fáze ze své pozice na jedné straně stožárové konstrukce na svou novou pozici na druhé straně téže stožárové konstrukce. Přeponky jsou ostatně tvořeny stejným vodičem, jako fázové vodiče, tedy v případě svazkových vodičů stejným počtem parciálních vodičů ve svazku, což vyžaduje umístění rozpěrek i do samotných přeponek. Pro dodržení bezpečných vzdáleností přeponek od stožárové konstrukce, ostatních fázových vodičů a všech případně se vyskytujících okolních objektů a vedení za všech možných povětrnostních podmínek je mnohdy nutné instalovat pomocné nosné zákrutové izolátorové závěsy se závažím.

Rychlost, se kterou je zákrut zhotoven, a jeho výsledné provedení jsou velmi závislé na zručnosti a zkušenosti montérů. Vzhledem k tomu, že každá přeponka je tvarována ručně, je pak každá transpozice unikátní.

Dle konkrétního případu se transpozice projeví v různé míře ve zvýšených nákladech na konstrukční úpravy stožárové konstrukce, vodiče, rozpěrky, izolátorové závěsy, výlohy za práci montérů a pronájem a provoz stavební techniky a v prodloužení doby výstavby vedení.

Další nevýhodou je, že zákrut je slabým místem z hlediska mechanických i elektrických vlastností a dochází tak ke snížení provozní spolehlivosti. Zákrut rovněž komplikuje provádění údržby na vedení a vyžaduje větší pozornost.

### **3.7 Metodika určující provedení transpozice**

V počátcích výstavby české přenosové soustavy se u všech vedení prováděla úplná transpozice. Při jejím dalším rozvoji docházelo k výstavbě nových rozvodů a zahušťování sítě spojené se zasmyčkováním vedení a budováním kratších úseků vedení. V těchto případech se mnohdy z důvodu úspory investičních nákladů transpozice neprováděla. Na tento trend se zareagovalo tím, že se stanovila povinnost úplné transpozice u vedení o délce nad 100 km.

Dnes již neplatná norma ČSN 34 1100 poté doporučovala u vedení 110 a 220 kV o délce do 200 km jeden plný zákrut a u vedení 400 kV do délky 300 km jednoduchou transpozici.

V dnešní době se tato problematika řídí dle normy PNE 33 3300 [3], respektive příslušnou interní technickou normou společnosti ČEPS, a.s., která z ní vychází.



O tom, zdali bude či nebude transpozice na vedení provedena, předem nerozhoduje jestli se jedná o jednoduché, nebo dvojité vedení, popřípadě jeho délka, typ použitých stožárů či velikost zatížení. Ve všech případech modernizace/rekonstrukce či výstavby nového vedení se vždy provede studie, v rámci které se zkoumá velikost nesymetrie procházejících proudů za pomoci metody souměrných složek na základě velikosti podílů netočivé (nulové) a souměrné složky, respektive zpětné a souměrné složky při maximálním přenášeném výkonu všech souběžných vedení.

V případě, je-li trojnásobek podílu netočivé složky proudu a sousledné složky proudu vyšší nežli 5 % a/nebo podíl zpětné a sousledné složky větší nežli 5 %, tak se dále posoudí, zdali je v konkrétním případě přípustná zvýšená míra proudové nesymetrie. Při negativním stanovisku se přijmou nápravná opatření vedoucí k jejímu snížení a to ve formě transpozice. O konkrétní podobě a způsobu jejího provedení se následně rozhodne v rámci dalších studiích. V opačném případě není nutné realizovat opatření ke snížení nesymetrie.

Lze však předem usuzovat, že v případě dvojitého vedení, vedení o velké délce, stožárové konstrukci s nerovnoměrným uspořádáním vodičů, nebo velkým zatížením či kombinací několika těchto faktorů existuje velká pravděpodobnost potřeby provedení transpozice.

## 4. Obvodový model vedení

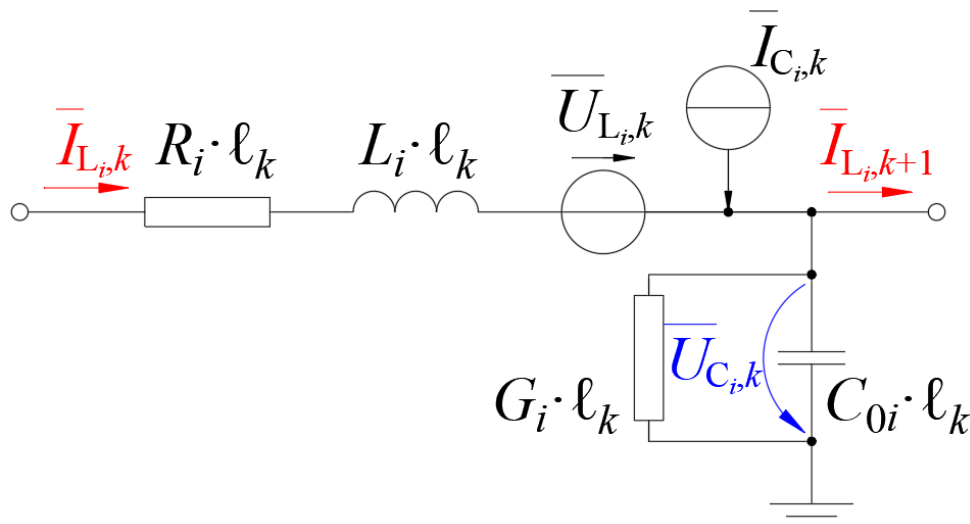
### 4.1 Základní elementy

Při výpočtech se jednotlivé vodiče vedení nahrazují pomocí kaskádního zapojení náhradních článků – dvojbranů lišících se svou topologií. Typ a počet použitých článků pak závisí na druhu řešeného děje, velikosti zatížení, požadované přesnosti řešení s ohledem na délku vedení a výpočetní náročnosti. Dále je nutné zohlednit poměr mezi délkou vedení a rozměrem šířící se elektromagnetické vlny v rozložení pasivních parametrů podél jeho délky - využití modelu s rozprostřenými, nebo soustředěnými parametry. Při uvážení maximální délky vedení v české přenosové soustavě pohybující se do 300 km a velikosti průmyslové frekvence 50 Hz nastává situace, kdy je délka vedení mnohonásobně menší než vlnová délka elektromagnetické vlny a lze provést popis vedení pomocí soustředěných pasivních parametrů.

S přihlédnutím k rozdílnému poměru mezi jednotlivými pasivními parametry danými konstrukčním provedením vedení a velikostí napětí lze s ohledem na typ řešeného děje (rychlost změn) a povaze analyzovaného problému v některých případech určité parametry zanedbat. U vedení ZVN se velmi často přistupuje k zanedbání svodu a odporu. Jelikož je v této práci řešena nesymetrie pasivních parametrů vedení a jejich vliv na proudovou a napěťovou nesymetrii, tak jsou uvažovány veškeré pasivní parametry, vzájemné induktivní a kapacitní vazby a je respektován vliv země i jakožto zpětná návratová cesta proudu. V této práci je předpokládáno homogenní vedení, tedy jeho pasivní parametry jsou lineární funkcí délky a hodnoty vztažené na jednotku délky jsou konstantní.

Vzhledem k řešení harmonického ustáleného stavu, délce přenosového vedení a náročnosti tvorby modelu vedení na základě přímé aplikace Kirchhoffových zákonů je v této práci použit jako základní element vedení  $i$ -tého vodiče  $k$ -tého úseku vedení pravostranný  $\Gamma$  článek (viz Obr. 12) vzájemně induktivně a kapacitně vázaný s ostatními elementy, jehož podoba spolu se způsobem popisu vychází ze studie [4], a využito řešení pomocí symbolicko-komplexní metody. Článek, vhodný pro modelování venkovních vedení do délky 100 km, obsahuje jednak podélný činný odpor vodiče  $R$ , vlastní indukčnost vodiče  $L$ , kapacitu vodiče proti zemi  $C_0$  a příčný svod  $G$ , jež jsou vztaženy na jednotku délky vedení  $\ell$  a jednak zdroj napětí  $\bar{U}_L$  respektující indukované napětí díky vzájemným induktivním vazbám a zdroj proudu  $\bar{I}_C$  injektující indukovaný proud díky vzájemným kapacitním vazbám.

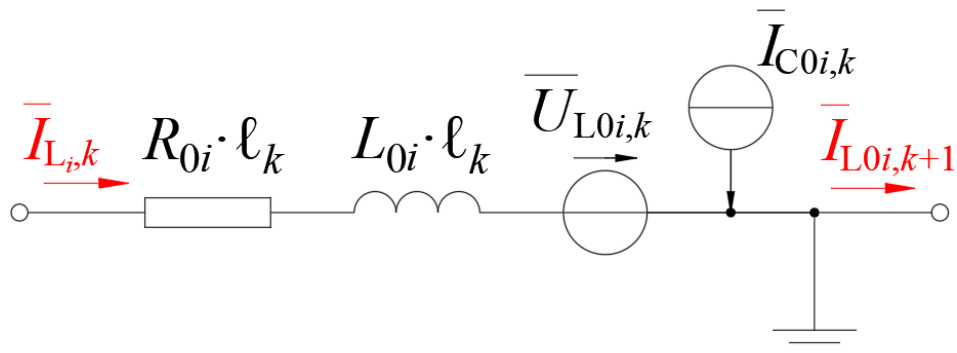
Opodstatněnost respektování indukovaného proudu díky vzájemným kapacitním vazbám a zejména pak indukovaného napětí vlivem vzájemných induktivních vazeb byla potvrzena na základě provedených testovacích výpočtů na definovaném modelovém vedení, jejichž výsledky jsou uvedeny v příloze B.



**Obr. 12:** Základní element vedení  $i$ -tého vodiče  $k$ -tého úseku vedení (element fázového vodiče) [4]

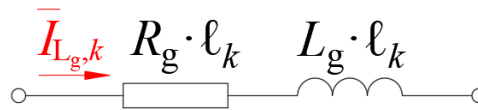
Základní element vedení uvedený na Obr. 12  $k$ -tého úseku vedení je v této práci beze změny použit pro náhradu všech fázových vodičů obou potahů dvojitého vedení obecně označených indexem  $i$ . Pozicím na stožáru (dále jen pozicím) jednotlivých fázových vodičů prvního potahu jsou v této práci přiřazeny pojmenování  $a_1$ ,  $b_1$  a  $c_1$ , respektive v případě druhého potahu  $a_2$ ,  $b_2$  a  $c_2$ .

U elementu zemnicího lana  $k$ -tého úseku vedení v této práci označeného indexem 01, respektive kombinovaného zemnicího lana pod označením 02, již však dochází k jeho modifikaci. Jeho výsledná podoba je zobrazena na Obr. 13. Je uvažováno dokonalé vodivé spojení se zemí, z čehož vyplývá, že velikost svodu se blíží k nekonečnu a kapacita proti zemi je nulová (příčná větev je nahrazena dokonalým vodičem).



**Obr. 13:** Element zemnicího lana respektive kombinovaného zemnicího lana  $k$ -tého úseku vedení [4]

Zpětná návratová cesta proudu zemí je respektována pomocí fiktivního zemního vodiče s odporem  $R_g$  a indukčností  $L_g$  uloženého v zemi v hloubce  $D_g$  pod jejím povrchem. Podoba tohoto elementu  $k$ -tého úseku vedení je zachycena na Obr. 14.



**Obr. 14:** Element fiktivního zemního vodiče  $k$ -tého úseku vedení [4]

V následujících podkapitolách jsou uvedeny vztahy pro výpočet jednotlivých pasivních parametrů a zmíněných zdrojů napětí a proudů.

## 4.2 Činný odpor

### 4.2.1 Odpor vodičů venkovního vedení

Tato subkapitola byla vytvořena na základě doplnění a modifikace textu obsaženého v autorovo bakalářské práci [5].

Hodnota činného odporu vodiče vyrobeného z jednoho materiálu při teplotě  $20\text{ °C}$  a průchodu stejnosměrného proudu  $R_{ss}$  se spočte podle následujícího vztahu:

$$R_{ss} = \rho_{20} \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

kde  $\rho_{20}$  je měrný odpor vodiče při teplotě  $\vartheta = 20\text{ °C}$ ,

$l$  je délka vodiče,

$S$  je průřez vodiče.

Tato hodnota je zpravidla udávána výrobcem a v mnoha aplikacích je dostatečně přesná i pro střídavé obvody.

Vodiče venkovních vedení jsou však velice často tvořeny AlFe lany. Pro zjednodušení se v některých případech předpokládá, že proud protéká pouze hliníkovou částí. Pro přesnější vyjádření se uvažuje paralelní kombinace ocelové duše a hliníkového opletu, vztah tedy přejde do podoby:

$$R_{ss} = \frac{1}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{R_{Fe}}} = \frac{1}{\rho_{Al} \cdot \frac{l}{S_{Al}} + \rho_{Fe} \cdot \frac{l}{S_{Fe}}} \quad (2)$$

kde  $\rho_{Al} = 0,02941\ \mu\Omega m$ ,  $\rho_{Fe} = 0,13\ \mu\Omega m$ .

V reálných podmínkách má na velikost odporu vodiče vliv nerovnoměrnost průřezu, prodloužení délky kroucením jednotlivých vodičů v laně, průhyb vodiče v rozpětí mezi závěsnými body a vliv spojek. Dále se rovněž projevuje teplota a při průchodu

střídavého proudu i skinefekt. Velikost jednotlivých faktorů na výslednou hodnotu odporu vodiče se vyjadřuje pomocí dílčích násobných opravných koeficientů, jež utvářejí souhrnný násobný opravný koeficient  $\kappa$ . Poněvadž je takřka nemožné matematicky popsat vliv nerovnoměrnosti průřezu vodiče a spojek, tak se při výpočtech nezohledňují. Potom lze koeficient  $\kappa$  zapsat jako:

$$\kappa = \kappa_{\vartheta} \cdot \kappa_s \cdot \kappa_z \cdot \kappa_p \quad (3)$$

kde  $\kappa_{\vartheta}$  je činitel respektující oteplení vodiče,  
 $\kappa_s$  je činitel respektující vliv skinefektu,  
 $\kappa_z$  je činitel respektující prodloužení délky kroucením jednotlivých vodičů v laně,  
 $\kappa_p$  je činitel respektující průhyb vodiče v rozpětí mezi závěsnými body.

Respektování či zanedbání uvedených vlivů závisí na konkrétním řešeném problému a požadované přesnosti řešení. Při přihlédnutí k běžným podmínkám se ve výpočtech obvykle provádí korekce pouze na teplotu či její kombinaci spolu se skinefektem.

S ohledem na v této práci řešenou problematiku a velikost procházejícího proudu jednotlivými vodiči bude při výpočtech a simulacích zohledněn pouze vliv teploty a to jen u fázových vodičů, tedy:

$$R_{01} = R_{ssZL} \quad (4)$$

$$R_{02} = R_{ssKZL} \quad (5)$$

$$R_{FV} = \kappa_{\vartheta} \cdot R_{ssFV} \quad (6)$$

kde  $R_{01}$  je odpor zemnicího lana,  
 $R_{02}$  je odpor kombinovaného zemnicího lana,  
 $R_{FV}$  je odpor fázového vodiče.

Velikost dovolené provozní teploty vodiče u venkovního vedení obvykle činí 80 °C. Provozní teplota se však nejčastěji pohybuje v rozsahu od 0 °C do 60 °C. V tomto rozmezí lze činitel respektující oteplení vodiče  $\kappa_{\vartheta}$  vyjádřit předpisem:

$$\kappa_{\vartheta} = 1 + \zeta \cdot (\vartheta - \vartheta_{20}) + \eta \cdot (\vartheta - \vartheta_{20})^2 \quad (7)$$

kde  $\zeta$  a  $\eta$  jsou teplotní součinitelé při teplotě  $\vartheta_{20} = 20$  °C (pro Al  $\zeta = 3,87 \cdot 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup>,  
 $\eta = 1,10 \cdot 10^{-6}$  °C<sup>-2</sup>; pro Fe  $\zeta = 6,20 \cdot 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup>,  $\eta = 9,00 \cdot 10^{-6}$  °C<sup>-2</sup>),  
 $\vartheta$  je skutečná teplota vodiče.

Vzhledem k poměru mezi velikostmi  $\zeta$  a  $\eta$  se v tomto případě velmi často kvadratický člen  $\eta$  zanedbává a vztah přechází do zjednodušeného tvaru, jež bude v této práci uvažován:

$$\kappa_{\vartheta} = 1 + \zeta \cdot (\vartheta - \vartheta_{20}) \quad (8)$$

Jsou-li fázové vodiče tvořeny tzv. svazkovými vodiči skládajícími se z  $n$  totožných parciálních vodičů (paralelních vodičů), tak se výsledná hodnota odporu svazku  $R$  vypočte jako:

$$R = \frac{R_{FV}}{n} \quad (9)$$

V české přenosové soustavě jsou u vedení na hladině 400 kV fázové vodiče tvořeny trojsvazkovými vodiči uspořádanými do rovnostranného trojúhelníku a drženými rozpěrkami ve vzájemné vzdálenosti (svazkovém kroku) 40 cm. Vztah (9) pak přechází do tvaru:

$$R = \frac{R_{FV}}{3} \quad (10)$$

### 4.2.2 Odpor fiktivního zemního vodiče

Odpor fiktivního zemního vodiče  $R_g$  se vypočte podle Růdenbergerovy teorie podle vztahu (11), jehož výsledky s dobrou přesností odpovídají realitě. [6]

$$R_g = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad (11)$$

kde  $f$  je frekvence.

Takto stanovená hodnota  $R_g$  je předpokládána podél celé trasy vedení konstantní. Odpor stožárové konstrukce a jeho uzemnění není v této práci uvažován.

## 4.3 Indukčnost

### 4.3.1 Indukčnost vodičů venkovního vedení

Jednotlivé vodiče vedení lze charakterizovat pomocí vlastní indukčnosti (tvořené vnitřní a vnější indukčností) a vzájemných indukčností mezi uvažovanými vodiči a ostatními vodiči v systému, jež vyjadřují vzájemné induktivní vazby.

Celkové indukované napětí  $i$ -tého vodiče při průchodu proudu dané úbytkem napětí na vlastní indukčnosti vodiče  $L_i$  (1. člen výrazu (12)) a indukovaným napětím od všech induktivně vázaných vodičů v systému vyjádřeným pomocí vzájemných indukčností  $L_{ij}$  (2. člen výrazu (12))  $k$ -tého úseku vedení lze zapsat jako:

$$\bar{U}_{\Sigma Li,k} = j\omega L_i \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{i,k} + \sum_{j=01,02,a_1,\dots,j \neq i}^m j\omega L_{ij} \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{j,k} \quad (12)$$

kde  $j$  je imaginární jednotka,

$\omega$  je úhlová frekvence,

$L_i$  je vlastní indukčnost  $i$ -tého vodiče,

$\ell_k$  je délka  $k$ -tého úseku vedení,

$\bar{I}_{i,k}$  je fázor proudu  $i$ -tého vodiče  $k$ -tého úseku vedení,

$m$  je počet fázových vodičů a zemnicích lan v systému,

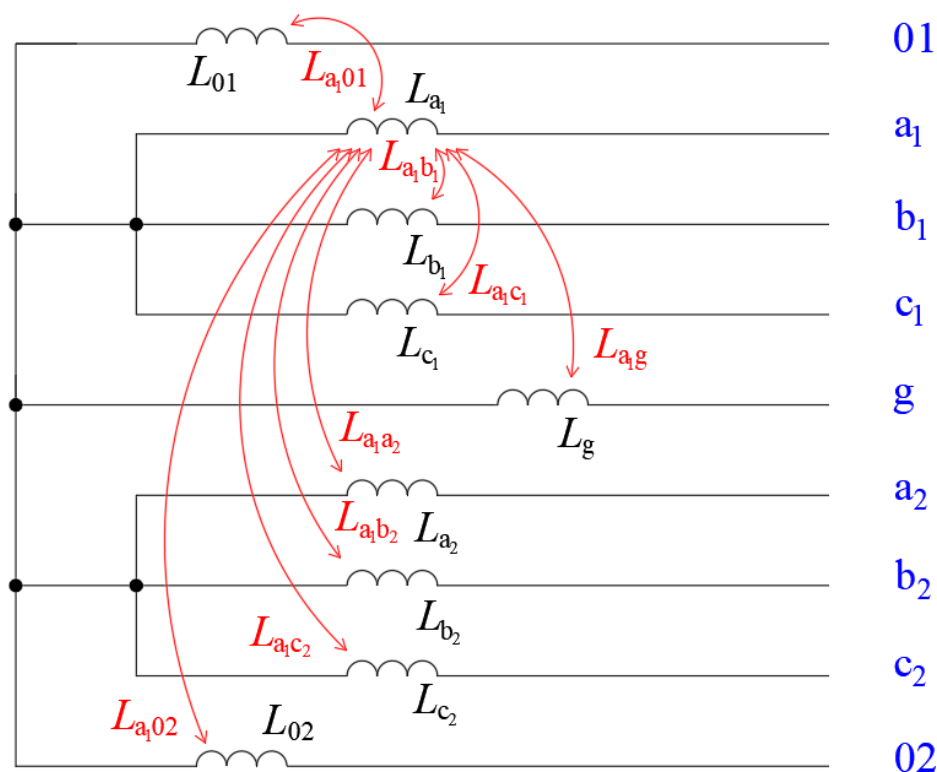
$L_{ij}$  je vzájemná indukčnost mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým vodičem,

$\bar{I}_{j,k}$  je fázor proudu  $j$ -tého vodiče  $k$ -tého úseku vedení.

2. člen výrazu (12) je v elementu  $i$ -tého fázového vodiče  $k$ -tého úseku vedení na Obr. 12 respektovaný zdroj napětí označeným jako  $\bar{U}_{Li,k}$ , respektive jako  $\bar{U}_{L0i,k}$  v elementu  $i$ -tého zemnicího lana potažmo kombinovaného zemnicího lana  $k$ -tého úseku vedení na Obr. 13.

Pro případ v této práci řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany je na Obr. 15 naznačeno všech 9 vlastních indukčností vodičů spolu s 8 červeně vyznačenými vzájemnými induktivními vazbami pro pozici fázového vodiče  $a_1$ .





**Obr. 15:** Naznačení vlastních indukčností a vzájemných induktivních vazeb pro pozici fázového vodiče  $a_1$

V publikaci [7] byly odvozeny následující vztahy pro výpočet vlastní indukčnosti  $i$ -tého vodiče  $L_i$  (13) a vzájemné indukčnosti mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým vodičem  $L_{ij}$  (14):

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{D_0}{r_i} \right) \right) \quad (13)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,

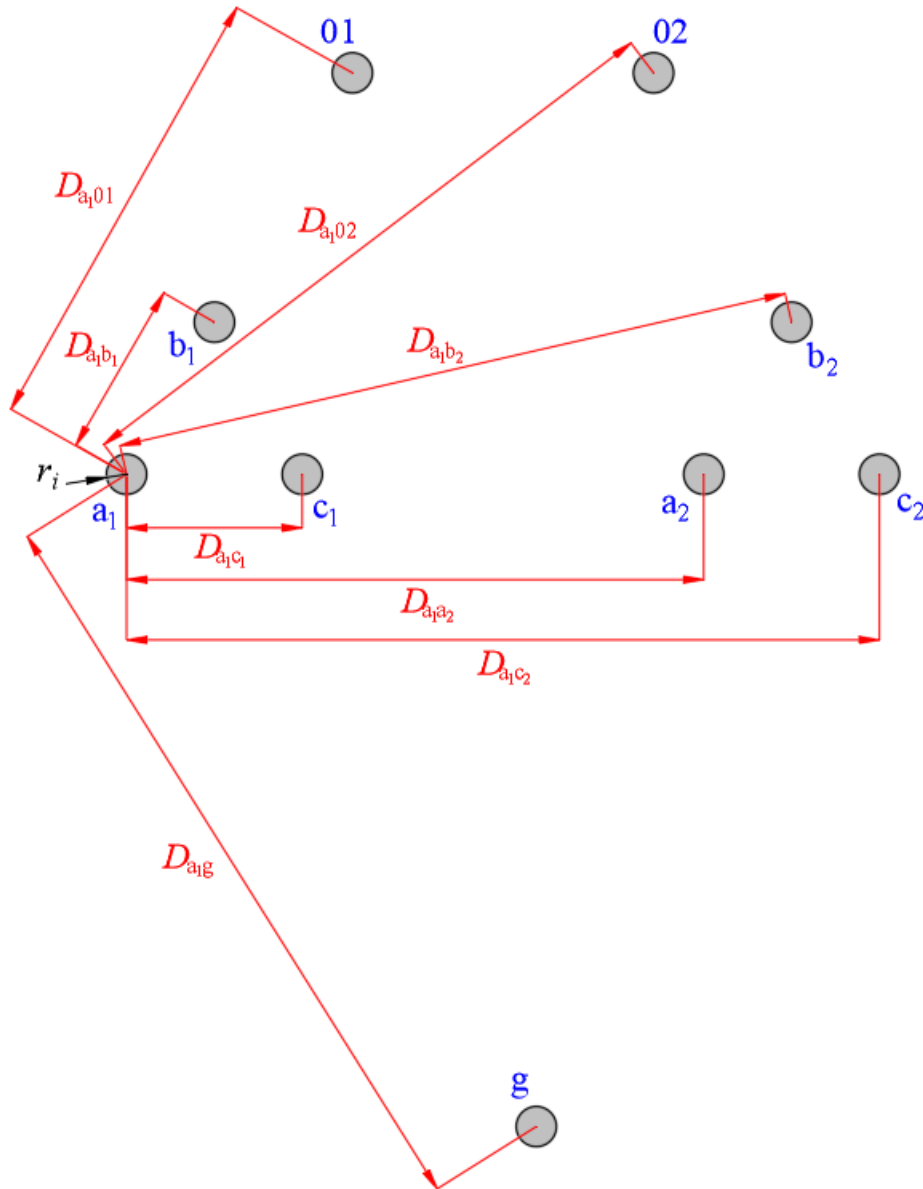
$D_0$  je vzdálenost vodiče od místa s nulovým magnetickým vektorovým potenciálem,

$r_i$  je poloměr  $i$ -tého vodiče.

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{D_0}{D_{ij}} \right) \quad (14)$$

kde  $D_{ij}$  je vzdálenost  $i$ -tého vodiče od  $j$ -tého vodiče.

Na Obr. 16 jsou naznačeny jednotlivé vzdálenosti pro výpočet vlastních, respektive vzájemných indukčností fázového vodiče na pozici  $a_1$  v případě řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany pro uspořádání odpovídající stožárové konstrukci Dunaj vyjma vzdálenosti  $D_0$ , jejíž hodnota bude stanovena na základě následujícího odvození (viz vztahy (15) až (19)).



**Obr. 16:** Naznačení geometrických vzdáleností pro výpočet vlastní a vzájemných indukčností fázového vodiče na pozici  $a_1$

Celkové indukované napětí fázového vodiče na pozici  $a_1$   $k$ -tého úseku řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany lze vyjádřit dle vztahu (12) jako:

$$\bar{U}_{\Sigma L_{a_1,k}} = j\omega L_{a_1} \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{a_1,k} + \sum_{j=01,02,b_1,\dots,j \neq a_1}^{c_2} j\omega L_{a_1j} \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{j,k} \quad (15)$$

Po rozepsání (15) a úpravě platí:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\Sigma L_{a_1,k}} = j\omega \cdot \ell_k \cdot [ & L_{a_1} \cdot \bar{I}_{a_1,k} + L_{a_1b_1} \cdot \bar{I}_{b_1,k} + L_{a_1c_1} \cdot \bar{I}_{c_1,k} + L_{a_1a_2} \cdot \bar{I}_{a_2,k} \\ & + L_{a_1b_2} \cdot \bar{I}_{b_2,k} + L_{a_1c_2} \cdot \bar{I}_{c_2,k} + L_{a_101} \cdot \bar{I}_{01,k} + L_{a_102} \cdot \bar{I}_{02,k} + L_{a_1g} \cdot \bar{I}_{g,k} ] \end{aligned} \quad (16)$$

Po dosazení vztahu pro vlastní indukčnost z (13), respektive pro vzájemné indukčnosti z (14) do rovnice (16) a úpravě přejde (16) do tvaru:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_{\Sigma La_1,k} = j\omega \cdot \ell_k \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot & \left[ \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{D_0}{r_i} \right) \right) \cdot \bar{I}_{a_1,k} + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 b_1}} \right) \cdot \bar{I}_{b_1,k} \right. \\
& + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 c_1}} \right) \cdot \bar{I}_{c_1,k} + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 a_2}} \right) \cdot \bar{I}_{a_2,k} + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 b_2}} \right) \cdot \bar{I}_{b_2,k} + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 c_2}} \right) \cdot \bar{I}_{c_2,k} \\
& \left. + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 o_1}} \right) \cdot \bar{I}_{01,k} + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 o_2}} \right) \cdot \bar{I}_{02,k} + \ln \left( \frac{D_0}{D_{a_1 g}} \right) \cdot \bar{I}_{g,k} \right] \quad (17)
\end{aligned}$$

Dále pro vyváženou soustavu lze psát:

$$\bar{I}_{a_1,k} + \bar{I}_{b_1,k} + \bar{I}_{c_1,k} + \bar{I}_{a_2,k} + \bar{I}_{b_2,k} + \bar{I}_{c_2,k} + \bar{I}_{01,k} + \bar{I}_{02,k} + \bar{I}_{g,k} = 0 \quad (18)$$

Po vyjádření proudu  $\bar{I}_{g,k}$  z (18) a dosazení do rovnice (17) přejde postupnými úpravami do finální podoby (19):

$$\begin{aligned}
\bar{U}_{\Sigma La_1,k} = j\omega \cdot \ell_k \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot & \left[ \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{r_i} \right) \right) \cdot \bar{I}_{a_1,k} + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{D_{a_1 b_1}} \right) \cdot \bar{I}_{b_1,k} \right. \\
& + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{D_{a_1 c_1}} \right) \cdot \bar{I}_{c_1,k} + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{D_{a_1 a_2}} \right) \cdot \bar{I}_{a_2,k} + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{D_{a_1 b_2}} \right) \cdot \bar{I}_{b_2,k} + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{D_{a_1 c_2}} \right) \cdot \bar{I}_{c_2,k} \\
& \left. + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{D_{a_1 o_1}} \right) \cdot \bar{I}_{01,k} + \ln \left( \frac{D_{a_1 g}}{D_{a_1 o_2}} \right) \cdot \bar{I}_{02,k} \right] \quad (19)
\end{aligned}$$

Z rovnice (19) je patrné, že došlo k zahrnutí vzájemných induktivních vazeb mezi fiktivním zemním vodičem a ostatními vodiči v systému do vlastních a vzájemných indukčností vodičů v systému a vztahy pro jejich výpočet (13), respektive (14) tak přecházejí do výsledného tvaru:

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{D_{ig}}{r_i} \right) \right) \quad (20)$$

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{D_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (21)$$

kde  $D_{ig}$  je vzdálenost  $i$ -tého vodiče od fiktivního zemního vodiče.

Jsou-li fázové vodiče tvořeny svazkovými vodiči, tak lze pro výpočet využít výše uvedené vztahy (20) a (21) s jediným rozdílem spočívajícím v náhradě vlastního poloměru  $i$ -tého vodiče  $r_i$  ve vztahu (20) ekvivalentním poloměrem svazkového vodiče  $r_{ekv}$ , jež se vypočte podle následujícího předpisu:

$$r_{ekv} = \sqrt[n]{r_v \cdot s^{n-1}} \quad (22)$$

kde  $r_v$  je poloměr parciálního vodiče,

$s$  je svazkový krok.

Pro vedení na hladině 400 kV v české přenosové soustavě tvořené trojsvazkovým vodičem se svazkovým krokem 40 cm pak vztah (22) přechází do tvaru:

$$r_{ekv} = \sqrt[3]{r_v \cdot 0,4^2} \quad (23)$$

Např. pro fázový vodič na pozici  $a_1$  řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany platí:

Vlastní indukčnost fázového vodiče na pozici  $a_1$ :

$$L_{a_1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{D_{a_1g}}{r_{ekv}} \right) \right) \quad (24)$$

Analogicky pro vodiče na pozici 01, 02,  $b_1$ ,  $c_1$ , atd.

Vzájemná indukčnost mezi fázovými vodiči na pozicích  $a_1$  a  $b_1$ :

$$L_{a_1b_1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{D_{a_1g}}{D_{a_1b_1}} \right) \quad (25)$$

Obdobně pro  $L_{a_101}$ ,  $L_{a_102}$ ,  $L_{a_1c_1}$ , atd. Analogicky pro vodiče na pozici 01, 02,  $b_1$ , atd.

Celková indukovaná napětí jednotlivých fázových vodičů prvního potahu na příslušných pozicích  $k$ -tého úseku řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany lze vyjádřit pomocí následujícího maticového zápisu:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{\Sigma La_1,k} \\ \bar{U}_{\Sigma Lb_1,k} \\ \bar{U}_{\Sigma Lc_1,k} \end{bmatrix} = j\omega \cdot \mathbf{L}_1 \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_1,k} \\ \bar{I}_{b_1,k} \\ \bar{I}_{c_1,k} \end{bmatrix} + j\omega \cdot \mathbf{L}_{12} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_2,k} \\ \bar{I}_{b_2,k} \\ \bar{I}_{c_2,k} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$+ j\omega \cdot \mathbf{L}_{10} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{01,k} \\ \bar{I}_{02,k} \end{bmatrix}$$

kde  $\mathbf{L}_1$ ,  $\mathbf{L}_{12}$  a  $\mathbf{L}_{10}$  jsou matice vlastních a vzájemných indukčností, jež lze zapsat jako:

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} L_{a_1} & L_{a_1b_1} & L_{a_1c_1} \\ L_{b_1a_1} & L_{b_1} & L_{b_1c_1} \\ L_{c_1a_1} & L_{c_1b_1} & L_{c_1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{L}_{12} = \begin{bmatrix} L_{a_1a_2} & L_{a_1b_2} & L_{a_1c_2} \\ L_{b_1a_2} & L_{b_1b_2} & L_{b_1c_2} \\ L_{c_1a_2} & L_{c_1b_2} & L_{c_1c_2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{L}_{10} = \begin{bmatrix} L_{a_101} & L_{a_102} \\ L_{b_101} & L_{b_102} \\ L_{c_101} & L_{c_102} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Analogickým způsobem lze zapsat i celková indukovaná napětí jednotlivých fázových vodičů druhého potahu na příslušných pozicích.

Celková indukovaná napětí zemnicího lana, respektive kombinovaného zemnicího lana na příslušných pozicích  $k$ -tého úseku řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany lze vyjádřit pomocí následujícího maticového zápisu:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{\Sigma L01,k} \\ \bar{U}_{\Sigma L02,k} \end{bmatrix} = j\omega \cdot \mathbf{L}_0 \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{01,k} \\ \bar{I}_{02,k} \end{bmatrix} + j\omega \cdot \mathbf{L}_{01} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_1,k} \\ \bar{I}_{b_1,k} \\ \bar{I}_{c_1,k} \end{bmatrix} + j\omega \cdot \mathbf{L}_{02} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_2,k} \\ \bar{I}_{b_2,k} \\ \bar{I}_{c_2,k} \end{bmatrix} \quad (30)$$

kde  $\mathbf{L}_0$ ,  $\mathbf{L}_{01}$  a  $\mathbf{L}_{02}$  jsou matice vlastních a vzájemných indukčností, jež lze zapsat jako:

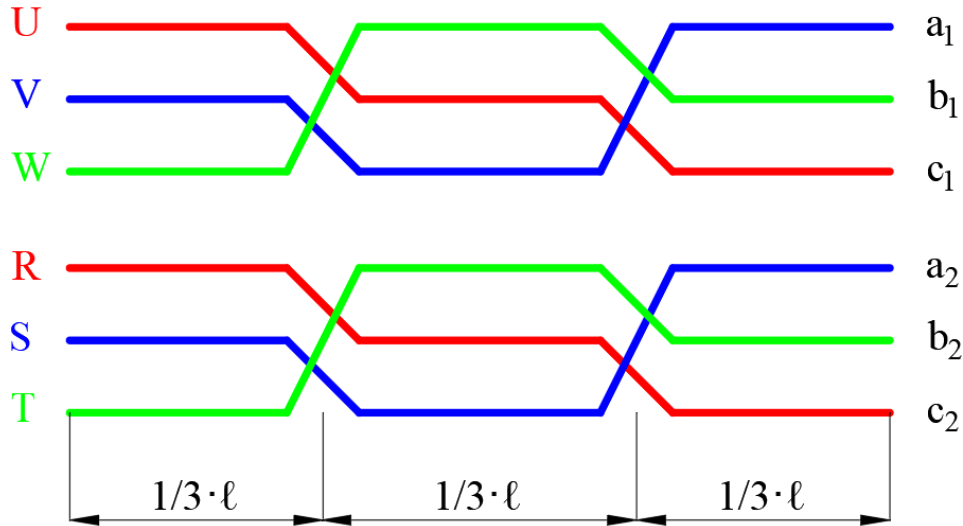
$$\mathbf{L}_0 = \begin{bmatrix} L_{01} & L_{0102} \\ L_{0201} & L_{02} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{L}_{01} = \begin{bmatrix} L_{01a_1} & L_{01b_1} & L_{01c_1} \\ L_{02a_1} & L_{02b_1} & L_{02c_1} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{L}_{02} = \begin{bmatrix} L_{01a_2} & L_{01b_2} & L_{01c_2} \\ L_{02a_2} & L_{02b_2} & L_{02c_2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

### 4.3.2 Ideální případ transpozice po třetinách délky trasy vedení

Velikost vlastních a vzájemných indukčností fázových vodičů lze pro ideální případ transpozice po třetinách délky trasy řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany (dále jen ideálně transponované vedení) viz Obr. 17 určit na základě následujícího zjednodušeného odvození (vztahy (34) až (39)). To popisuje celkové indukované napětí fáze  $U$  dané úbytky napětí na vlastních indukčnostech vodičů a indukovanými napětími od všech induktivně vázaných vodičů v systému v jednotlivých úsecích podél celé trasy vedení při uvažování pouze vlastní a vzájemné indukčnosti a současném zanedbání podélných odporů a příčných větví elementů vodičů vedení.



**Obr. 17:** Ideální případ transpozice po třetinách délky trasy vedení

Celkové napětí fáze U v 1. třetině délky trasy vedení - pozice fázového vodiče  $a_1$ :

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\Sigma LU,1} = j\omega \cdot \frac{1}{3} \cdot \ell \cdot [L_{a_1} \cdot \bar{I}_U + L_{a_1 b_1} \cdot \bar{I}_V + L_{a_1 c_1} \cdot \bar{I}_W + L_{a_1 a_2} \cdot \bar{I}_R \\ + L_{a_1 b_2} \cdot \bar{I}_S + L_{a_1 c_2} \cdot \bar{I}_T + L_{a_1 01} \cdot \bar{I}_{01} + L_{a_1 02} \cdot \bar{I}_{02}] \end{aligned} \quad (34)$$

Celkové napětí fáze U ve 2. třetině délky trasy vedení - pozice fázového vodiče  $b_1$ :

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\Sigma LU,2} = j\omega \cdot \frac{1}{3} \cdot \ell \cdot [L_{b_1} \cdot \bar{I}_U + L_{b_1 a_1} \cdot \bar{I}_W + L_{b_1 c_1} \cdot \bar{I}_V + L_{b_1 a_2} \cdot \bar{I}_T \\ + L_{b_1 b_2} \cdot \bar{I}_R + L_{b_1 c_2} \cdot \bar{I}_S + L_{b_1 01} \cdot \bar{I}_{01} + L_{b_1 02} \cdot \bar{I}_{02}] \end{aligned} \quad (35)$$

Celkové napětí fáze U ve 3. třetině délky trasy vedení - pozice fázového vodiče  $c_1$ :

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\Sigma LU,3} = j\omega \cdot \frac{1}{3} \cdot \ell \cdot [L_{c_1} \cdot \bar{I}_U + L_{c_1 a_1} \cdot \bar{I}_V + L_{c_1 b_1} \cdot \bar{I}_W + L_{c_1 a_2} \cdot \bar{I}_S \\ + L_{c_1 b_2} \cdot \bar{I}_T + L_{c_1 c_2} \cdot \bar{I}_R + L_{c_1 01} \cdot \bar{I}_{01} + L_{c_1 02} \cdot \bar{I}_{02}] \end{aligned} \quad (36)$$

Celkové napětí fáze U za celou trasu vedení je dáno součtem dílčích příspěvků:

$$\bar{U}_{\Sigma LU} = \bar{U}_{\Sigma LU,1} + \bar{U}_{\Sigma LU,2} + \bar{U}_{\Sigma LU,3} \quad (37)$$

Po dosazení do vztahu (37) je celkové napětí fáze U za celou trasu vedení dáno zápisem:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\Sigma LU} = j\omega \cdot \frac{1}{3} \cdot \ell \cdot [L_{a_1} \cdot \bar{I}_U + L_{a_1 b_1} \cdot \bar{I}_V + L_{a_1 c_1} \cdot \bar{I}_W + L_{a_1 a_2} \cdot \bar{I}_R \\ + L_{a_1 b_2} \cdot \bar{I}_S + L_{a_1 c_2} \cdot \bar{I}_T + L_{a_1 01} \cdot \bar{I}_{01} + L_{a_1 02} \cdot \bar{I}_{02}] + j\omega \cdot \frac{1}{3} \cdot \ell \cdot [L_{b_1} \cdot \bar{I}_U \\ + L_{b_1 a_1} \cdot \bar{I}_W + L_{b_1 c_1} \cdot \bar{I}_V + L_{b_1 a_2} \cdot \bar{I}_T + L_{b_1 b_2} \cdot \bar{I}_R + L_{b_1 c_2} \cdot \bar{I}_S + L_{b_1 01} \cdot \bar{I}_{01} \\ + L_{b_1 02} \cdot \bar{I}_{02}] + j\omega \cdot \frac{1}{3} \cdot \ell \cdot [L_{c_1} \cdot \bar{I}_U + L_{c_1 a_1} \cdot \bar{I}_V + L_{c_1 b_1} \cdot \bar{I}_W + L_{c_1 a_2} \cdot \bar{I}_S \\ + L_{c_1 b_2} \cdot \bar{I}_T + L_{c_1 c_2} \cdot \bar{I}_R + L_{c_1 01} \cdot \bar{I}_{01} + L_{c_1 02} \cdot \bar{I}_{02}] \end{aligned} \quad (38)$$

Po úpravě lze vztah (38) přepsat do tvaru:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\Sigma LU} = j\omega \cdot \ell \cdot \left[ \bar{I}_U \cdot \left( \frac{L_{a_1} + L_{b_1} + L_{c_1}}{3} \right) + \bar{I}_V \cdot \left( \frac{L_{a_1 b_1} + L_{b_1 c_1} + L_{c_1 a_1}}{3} \right) \right. \\ \left. + \bar{I}_W \cdot \left( \frac{L_{a_1 c_1} + L_{b_1 a_1} + L_{c_1 b_1}}{3} \right) + \bar{I}_R \cdot \left( \frac{L_{a_1 a_2} + L_{b_1 b_2} + L_{c_1 c_2}}{3} \right) + \bar{I}_S \cdot \left( \frac{L_{a_1 b_2} + L_{b_1 c_2} + L_{c_1 a_2}}{3} \right) \right. \\ \left. + \bar{I}_T \cdot \left( \frac{L_{a_1 c_2} + L_{b_1 a_2} + L_{c_1 b_2}}{3} \right) + \bar{I}_{01} \cdot \left( \frac{L_{a_1 01} + L_{b_1 01} + L_{c_1 01}}{3} \right) + \bar{I}_{02} \cdot \left( \frac{L_{a_1 02} + L_{b_1 02} + L_{c_1 02}}{3} \right) \right] \end{aligned} \quad (39)$$

Analogicky pro fáze V, W, atd.

Ze vztahu (39) je patrné, že velikost vlastních a vzájemných indukčností fázových vodičů je v případě ideálně transponovaného vedení dána aritmetickým průměrem.

Pro vlastní a vzájemné indukčnosti fázových vodičů prvního potahu ideálně transponovaného vedení tedy platí:

$$L_1 = L'_{a_1} = L'_{b_1} = L'_{c_1} = \frac{L_{a_1} + L_{b_1} + L_{c_1}}{3} \quad (40)$$

kde  $L_{a_1}$ ,  $L_{b_1}$ ,  $L_{c_1}$  jsou vlastní indukčnosti fázových vodičů prvního potahu vypočtené ze vztahu (20),

$L'_{a_1}$ ,  $L'_{b_1}$ ,  $L'_{c_1}$  jsou vlastní indukčnosti fázových vodičů prvního potahu ideálně transponovaného vedení vypočtené ze vztahu (40).

$$L_{111} = L'_{a_1 b_1} = L'_{b_1 c_1} = L'_{c_1 a_1} = \frac{L_{a_1 b_1} + L_{b_1 c_1} + L_{c_1 a_1}}{3} \quad (41)$$

$$L_{112} = L'_{a_1 c_1} = L'_{b_1 a_1} = L'_{c_1 b_1} = \frac{L_{a_1 c_1} + L_{b_1 a_1} + L_{c_1 b_1}}{3} \quad (42)$$

$$L_{101} = L'_{a_1 01} = L'_{b_1 01} = L'_{c_1 01} = \frac{L_{a_1 01} + L_{b_1 01} + L_{c_1 01}}{3} \quad (43)$$

$$L_{011} = L'_{01 a_1} = L'_{01 b_1} = L'_{01 c_1} = \frac{L_{01 a_1} + L_{01 b_1} + L_{01 c_1}}{3} \quad (44)$$

$$L_{102} = L'_{a_1 02} = L'_{b_1 02} = L'_{c_1 02} = \frac{L_{a_1 02} + L_{b_1 02} + L_{c_1 02}}{3} \quad (45)$$

$$L_{021} = L'_{02 a_1} = L'_{02 b_1} = L'_{02 c_1} = \frac{L_{02 a_1} + L_{02 b_1} + L_{02 c_1}}{3} \quad (46)$$

$$L_{121} = L'_{a_1 a_2} = L'_{b_1 c_2} = L'_{c_1 b_2} = \frac{L_{a_1 a_2} + L_{b_1 c_2} + L_{c_1 b_2}}{3} \quad (47)$$

$$L_{122} = L'_{a_1b_2} = L'_{b_1a_2} = L'_{c_1c_2} = \frac{L_{a_1b_2} + L_{b_1a_2} + L_{c_1c_2}}{3} \quad (48)$$

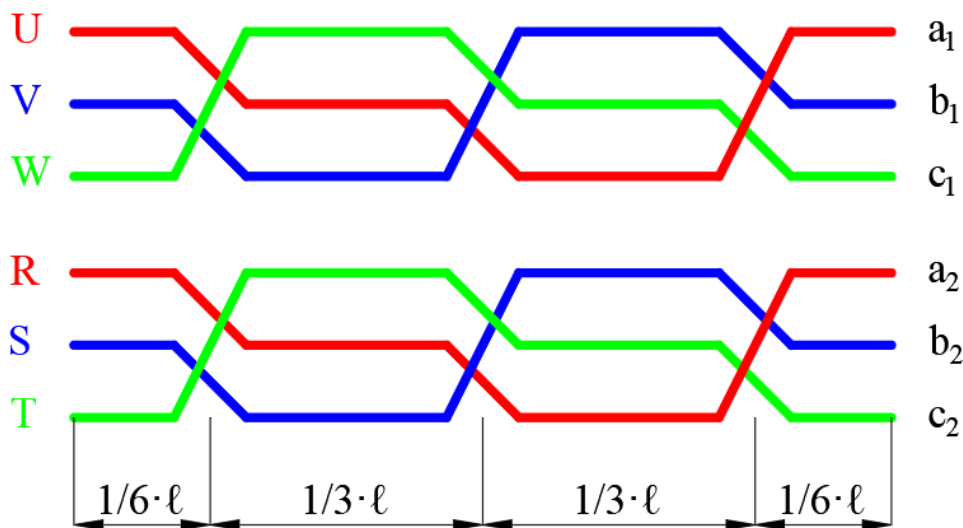
$$L_{123} = L'_{a_1c_2} = L'_{b_1b_2} = L'_{c_1a_2} = \frac{L_{a_1c_2} + L_{b_1b_2} + L_{c_1a_2}}{3} \quad (49)$$

kde  $L_{a_1b_1}$ ,  $L_{a_1c_1}$ ,  $L_{b_1c_1}$ , atd. jsou vzájemné indukčnosti fázových vodičů prvního potahu, respektive prvního a druhého potahu vypočtené ze vztahu (21),

$L'_{a_1b_1}$ ,  $L'_{a_1c_1}$ ,  $L'_{b_1c_1}$ , atd. jsou vzájemné indukčnosti fázových vodičů prvního potahu, respektive prvního a druhého potahu ideálně transponovaného vedení vypočtené ze vztahů (41) až (49).

Analogickým způsobem lze určit vlastní indukčnosti druhého potahu a vzájemné indukčnosti fázových vodičů druhého potahu, respektive prvního a druhého potahu ideálně transponovaného vedení.

Výše uvedené vztahy pro výpočet vlastních a vzájemných indukčností fázových vodičů ideálně transponovaného vedení lze použít i pro ideální případ transpozice řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany se stejným sledem fází na začátku a konci vedení naznačeného na Obr. 18.



Obr. 18: Ideální případ transpozice vedení - stejný sled fází

### 4.3.3 Indukčnost fiktivního zemního vodiče

Indukčnost fiktivního zemního vodiče  $L_g$  se vypočte podle Růdenbergerovy teorie podle vztahu (50), jehož výsledky s dobrou přesností odpovídají realitě. Tento vztah byl odvozen za předpokladu konstantní hodnoty vodivosti půdy a relativní permeability rovné jedné. [6]



$$L_g = 0,2 \cdot \ln \left( \frac{562,9}{h_s \cdot \sqrt{f \cdot \gamma_p}} \right) \quad (50)$$

kde  $\gamma_p$  je vodivost půdy,

$h_s$  je střední výška fázových vodičů nad zemí vypočtená ze vztahu:

$$h_s = \sqrt[m_{FV}]{\prod_{i=a_1, b_1, \dots}^{m_{FV}} h_i} \quad (51)$$

kde  $m_{FV}$  je počet fázových vodičů v systému,

$h_i$  je výška  $i$ -tého fázového vodiče nad zemí.

Pro případ řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany se střední výška fázových vodičů nad zemí vypočte jako:

$$h_s = \sqrt[6]{h_{a_1} \cdot h_{b_1} \cdot h_{c_1} \cdot h_{a_2} \cdot h_{b_2} \cdot h_{c_2}} \quad (52)$$

Výraz v argumentu přirozeného logaritmu ve vztahu (50) se označuje jako hloubka fiktivního zemního vodiče v zemi  $D_g$ .

Stanovení hodnoty vodivosti půdy  $\gamma_p$  je velmi nelehký úkol. Její střední hodnota se může pro běžné typy půd pohybovat od  $10^{-9}$  do  $10^{-1}$  S/m.

Složení půdy se podél trasy vedení velmi často mění a v některých případech i dosti výrazně. Je takřka nemožné určit správnou hodnotu vodivosti půdy pomocí tabelovaných hodnot, a proto se velmi často přistupuje k jejímu měření.

Pro zjednodušení je v této práci zvolena hodnota vodivosti půdy o velikosti  $10^{-4}$  S/m, která je podél celé trasy řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany uvažována konstantní. Jelikož jsou i ostatní parametry ve vztahu (50) také konstantní, tak hodnota  $L_g$  je rovněž podél celé trasy vedení konstantní.

## 4.4 Kapacita

Mezi jednotlivými fázovými vodiči vedení a mezi vodiči a zemí (zemnicími lany) vznikají kapacitní vazby, jež lze popsat pomocí parciálních kapacit mezi dvěma vodiči, respektive kapacit fázových vodičů proti zemi.

Celkový kapacitní proud  $i$ -tého fázového vodiče vedení daný napětím na kapacitě proti zemi  $C_{i0}$  (1. člen výrazu (53)) a indukovaným proudem od všech kapacitně vázaných

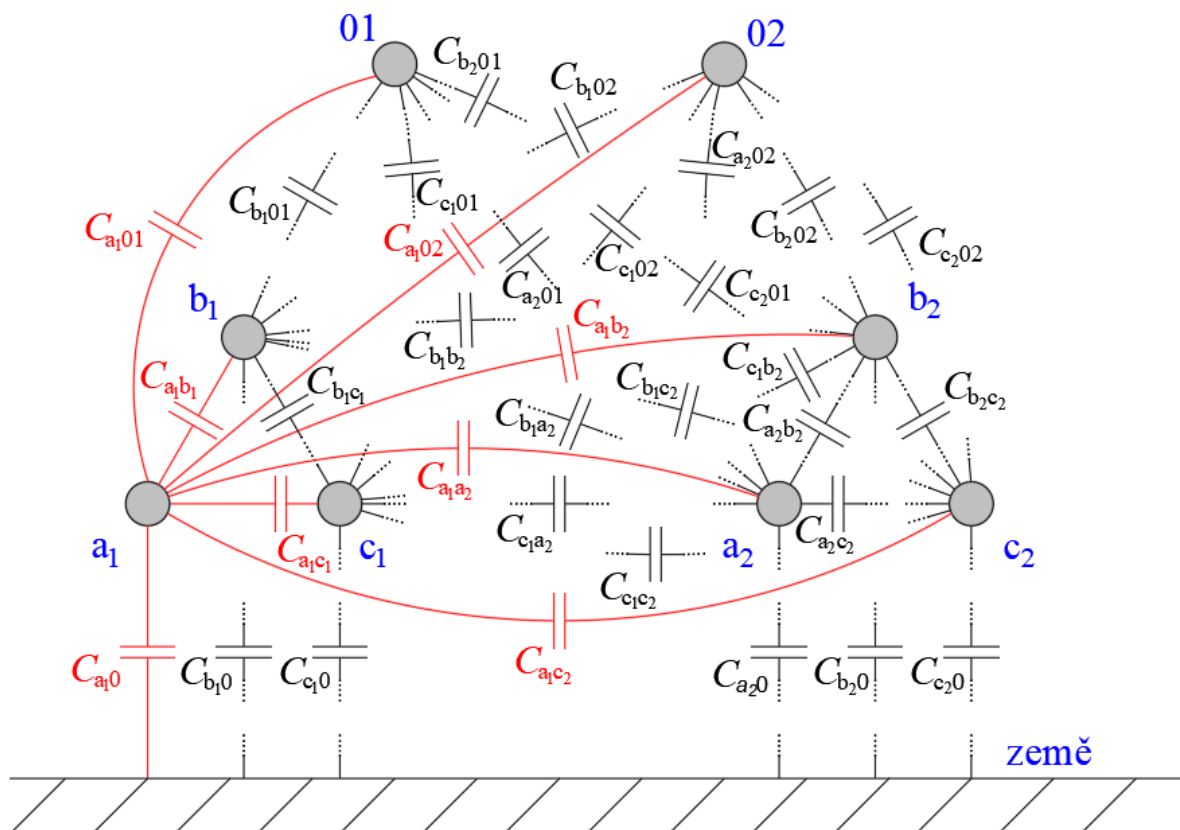
vodičů v systému vyjádřeným pomocí vzájemných parciálních kapacit  $C_{ij}$  (2. člen výrazu (53))  $k$ -tého úseku vedení lze zapsat jako:

$$\bar{I}_{\Sigma C_{i,k}} = j\omega C_{i0} \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{i,k} + \sum_{j=01,02,a_1,\dots,j \neq i}^m j\omega C_{ij} \cdot \ell_k \cdot (\bar{U}_{j,k} - \bar{U}_{i,k}) \quad (53)$$

kde  $\bar{U}_{i,k}$  a  $\bar{U}_{j,k}$  je fázor napětí  $i$ -tého, respektive  $j$ -tého vodiče proti zemi  $k$ -tého úseku vedení.

Pro  $i = 01$  a  $02$  je 1. člen výrazu (53) roven nule. 2. člen výrazu (53) je v elementu  $i$ -tého fázového vodiče  $k$ -tého úseku vedení na Obr. 12 respektovaný zdrojem proudu označeným jako  $\bar{I}_{C_{i,k}}$ , respektive jako  $\bar{I}_{C_{0i,k}}$  v elementu  $i$ -tého zemnicího lana potažmo kombinovaného zemnicího lana  $k$ -tého úseku vedení na Obr. 13.

Pro případ v této práci řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany jsou na Obr. 19 naznačeny všechny se vyskytující vzájemné kapacitní vazby za pomoci parciálních kapacit mezi dvěma vodiči a kapacit fázových vodičů proti zemi pro uspořádání odpovídající stožárové konstrukci Dunaj (červeně vyznačeno pro pozici fázového vodiče  $a_1$ ).



**Obr. 19:** Naznačení vzájemných kapacitních vazeb (červeně vyznačeno pro pozici fázového vodiče  $a_1$ )

V publikaci [8] je popsán dále uvedený způsob výpočtu výše zmíněných parciálních kapacit mezi dvěma vodiči a kapacit fázových vodičů proti zemi za pomoci potenciálových, respektive kapacitních koeficientů v systému s  $m_{\text{FV}}$  fázovými vodiči,  $m_{\text{ZL}}$  zemnicími lany a kombinovanými zemnicími lany s ohledem na geometrickou nesymetrii vedení.

Při respektování skutečnosti, že zemnicí lano a kombinované zemnicí lano je uzemněno (jejich napětí proti zemi je nulové) lze vztah mezi napětími a elektrickými náboji na vodičích v systému s  $m = m_{\text{FV}} + m_{\text{ZL}}$  vodiči vyjádřit za pomoci matice potenciálových koeficientů  $\mathbf{A}$ :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{FV}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{\text{FV}} \\ \mathbf{q}_{\text{ZL}} \end{bmatrix} \quad (54)$$

kde  $\mathbf{U}_{\text{FV}}$  je vektor napětí na fázových vodičích,

$\mathbf{q}_{\text{FV}}$  je vektor elektrických nábojů na fázových vodičích,

$\mathbf{q}_{\text{ZL}}$  je vektor elektrických nábojů na zemnicím lanu, respektive kombinovaném zemnicím lanu,

$\mathbf{A}(m, m) = \{\alpha_{ij}\}$  je matice potenciálových koeficientů, jež lze zapsat jako:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{FV FV}} & \mathbf{A}_{\text{FV ZL}} \\ \mathbf{A}_{\text{ZL FV}} & \mathbf{A}_{\text{ZL ZL}} \end{bmatrix} \quad (55)$$

kde  $\mathbf{A}_{\text{FV FV}}(m_{\text{FV}}, m_{\text{FV}})$ ,  $\mathbf{A}_{\text{FV ZL}}(m_{\text{FV}}, m_{\text{ZL}})$ ,  $\mathbf{A}_{\text{ZL FV}}(m_{\text{ZL}}, m_{\text{FV}})$  a  $\mathbf{A}_{\text{ZL ZL}}(m_{\text{ZL}}, m_{\text{ZL}})$  jsou submatice matice  $\mathbf{A}$ .

Předpisy pro výpočet vlastních potenciálových koeficientů  $\alpha_{ii'}$  (56), respektive vzájemných potenciálových koeficientů  $\alpha_{ij}$  (57) byly odvozeny pomocí metody zrcadlení. Pro  $\varepsilon_r = 1$  je lze vyjádřit jako:

$$\alpha_{ii'} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{d_{ii'}}{r_i}\right) \quad (56)$$

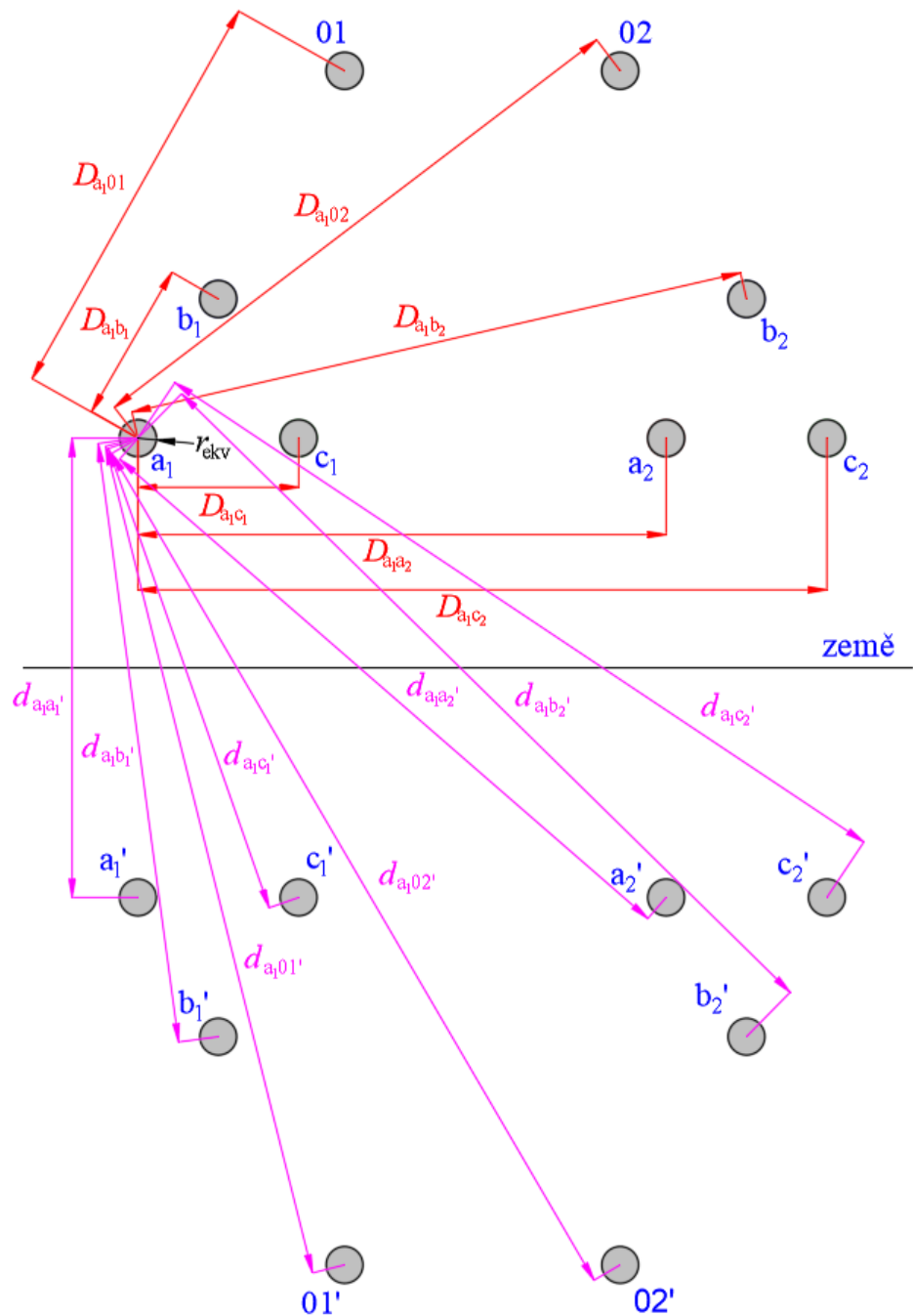
kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,

$d_{ii'}$  je vzdálenost  $i$ -tého vodiče od obrazu  $i$ -tého vodiče.

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{d_{ij'}}{D_{ij}}\right) \quad (57)$$

kde  $d_{ij'}$  je vzdálenost  $i$ -tého vodiče od obrazu  $j$ -tého vodiče.

Na Obr. 20 jsou pak naznačeny jednotlivé vzdálenosti pro výpočet potenciálových koeficientů pro pozici fázového vodiče  $a_1$  v případě řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany pro uspořádání odpovídající stožárové konstrukci Dunaj.



**Obr. 20:** Naznačení geometrických vzdáleností pro výpočet potenciálových koeficientů pro pozici fázového vodiče  $a_1$

Jelikož platí, že svazkový vodič vykazuje z hlediska rozložení elektrických nábojů a napětí stejné vlastnosti, jako jednoduchý vodič o poloměru odpovídajícímu ekvivalentnímu poloměru svazkového vodiče, tak lze v případě fázových vodičů pro výpočet potenciálových koeficientů využít výše uvedené vztahy (56) a (57) s jediným rozdílem spočívajícím v náhradě vlastního poloměru  $i$ -tého vodiče  $r_i$  ve vztahu (56) ekvivalentním poloměrem svazkového vodiče  $r_{ekv}$ .

Pro případ řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany submatice matice  $\mathbf{A}$  (viz (55)) nabývají tvaru:

$$\mathbf{A}_{\text{FV FV}} = \begin{bmatrix} \alpha_{a_1 a_1'} & \alpha_{a_1 b_1} & \alpha_{a_1 c_1} & \alpha_{a_1 a_2} & \alpha_{a_1 b_2} & \alpha_{a_1 c_2} \\ \alpha_{b_1 a_1} & \alpha_{b_1 b_1'} & \alpha_{b_1 c_1} & \alpha_{b_1 a_2} & \alpha_{b_1 b_2} & \alpha_{b_1 c_2} \\ \alpha_{c_1 a_1} & \alpha_{c_1 b_1} & \alpha_{c_1 c_1'} & \alpha_{c_1 a_2} & \alpha_{c_1 b_2} & \alpha_{c_1 c_2} \\ \alpha_{a_2 a_1} & \alpha_{a_2 b_1} & \alpha_{a_2 c_1} & \alpha_{a_2 a_2'} & \alpha_{a_2 b_2} & \alpha_{a_2 c_2} \\ \alpha_{b_2 a_1} & \alpha_{b_2 b_1} & \alpha_{b_2 c_1} & \alpha_{b_2 a_2} & \alpha_{b_2 b_2'} & \alpha_{b_2 c_2} \\ \alpha_{c_2 a_1} & \alpha_{c_2 b_1} & \alpha_{c_2 c_1} & \alpha_{c_2 a_2} & \alpha_{c_2 b_2} & \alpha_{c_2 c_2'} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$\mathbf{A}_{\text{FV ZL}} = \begin{bmatrix} \alpha_{a_1 01} & \alpha_{a_1 02} \\ \alpha_{b_1 01} & \alpha_{b_1 02} \\ \alpha_{c_1 01} & \alpha_{c_1 02} \\ \alpha_{a_2 01} & \alpha_{a_2 02} \\ \alpha_{b_2 01} & \alpha_{b_2 02} \\ \alpha_{c_2 01} & \alpha_{c_2 02} \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$\mathbf{A}_{\text{ZL FV}} = \begin{bmatrix} \alpha_{01 a_1} & \alpha_{01 b_1} & \alpha_{01 c_1} & \alpha_{01 a_2} & \alpha_{01 b_2} & \alpha_{01 c_2} \\ \alpha_{02 a_1} & \alpha_{02 b_1} & \alpha_{02 c_1} & \alpha_{02 a_2} & \alpha_{02 b_2} & \alpha_{02 c_2} \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$\mathbf{A}_{\text{ZL ZL}} = \begin{bmatrix} \alpha_{01 01'} & \alpha_{01 02} \\ \alpha_{02 01} & \alpha_{02 02'} \end{bmatrix} \quad (61)$$

kde např. pro fázový vodič na pozici  $a_1$  platí:

$$\alpha_{a_1 a_1'} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{d_{a_1 a_1'}}{r_{\text{ekv}}} \right) \quad (62)$$

$$\alpha_{a_1 b_1} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{d_{a_1 b_1'}}{D_{a_1 b_1}} \right) \quad (63)$$

Obdobně pro  $\alpha_{a_1 c_1}$ ,  $\alpha_{a_1 a_2}$ , atd. Analogicky pro fázové vodiče na pozicích  $b_1$ ,  $c_1$ , atd.

Vztah mezi elektrickými náboji a napětími na fázových vodičích lze zapsat jako:

$$\underline{\mathbf{q}}_{\text{FV}} = (\mathbf{A}_{\text{FV FV}} - \mathbf{A}_{\text{FV ZL}} \cdot \mathbf{A}_{\text{ZL ZL}}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{\text{ZL FV}})^{-1} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{\text{FV}} \quad (64)$$

Pro výraz v rovnici (64) se zavádí označení matice kapacitních koeficientů  $\mathbf{B}$ :

$$\mathbf{B}(m_{\text{FV}}, m_{\text{FV}}) = \{\beta_{ij}\} = (\mathbf{A}_{\text{FV FV}} - \mathbf{A}_{\text{FV ZL}} \cdot \mathbf{A}_{\text{ZL ZL}}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{\text{ZL FV}})^{-1} \quad (65)$$

kde  $\beta_{ij}$  je kapacitní koeficient.

V případě řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany pak matice kapacitních koeficientů  $\mathbf{B}$  vypadá následovně:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_{a_1 a_1'} & \beta_{a_1 b_1} & \beta_{a_1 c_1} & \beta_{a_1 a_2} & \beta_{a_1 b_2} & \beta_{a_1 c_2} \\ \beta_{b_1 a_1} & \beta_{b_1 b_1'} & \beta_{b_1 c_1} & \beta_{b_1 a_2} & \beta_{b_1 b_2} & \beta_{b_1 c_2} \\ \beta_{c_1 a_1} & \beta_{c_1 b_1} & \beta_{c_1 c_1'} & \beta_{c_1 a_2} & \beta_{c_1 b_2} & \beta_{c_1 c_2} \\ \beta_{a_2 a_1} & \beta_{a_2 b_1} & \beta_{a_2 c_1} & \beta_{a_2 a_2'} & \beta_{a_2 b_2} & \beta_{a_2 c_2} \\ \beta_{b_2 a_1} & \beta_{b_2 b_1} & \beta_{b_2 c_1} & \beta_{b_2 a_2} & \beta_{b_2 b_2'} & \beta_{b_2 c_2} \\ \beta_{c_2 a_1} & \beta_{c_2 b_1} & \beta_{c_2 c_1} & \beta_{c_2 a_2} & \beta_{c_2 b_2} & \beta_{c_2 c_2'} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Vztah mezi elektrickými náboji na zemnicím lanu, respektive kombinovaném zemnicím lanu a napětími na fázových vodičích lze zapsat jako:

$$\underline{\mathbf{q}}_{\text{ZL}} = -\mathbf{A}_{\text{ZLZL}}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{\text{ZL呢V}} \cdot \mathbf{B} \cdot \underline{\mathbf{U}}_{\text{FV}} \quad (67)$$

Výraz v rovnici (67) je v této práci označen jako matice kapacitních koeficientů  $\mathbf{D}$ :

$$\mathbf{D}(m_{\text{ZL}}, m_{\text{FV}}) = \{\delta_{ij}\} = -\mathbf{A}_{\text{ZLZL}}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{\text{ZL呢V}} \cdot \mathbf{B} \quad (68)$$

kde  $\delta_{ij}$  je kapacitní koeficient.

V případě řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany pak matice kapacitních koeficientů  $\mathbf{D}$  nabývá tvaru:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \delta_{a_1 01} & \delta_{b_1 01} & \delta_{c_1 01} & \delta_{a_2 01} & \delta_{b_2 01} & \delta_{c_2 01} \\ \delta_{a_1 02} & \delta_{b_1 02} & \delta_{c_1 02} & \delta_{a_2 02} & \delta_{b_2 02} & \delta_{c_2 02} \end{bmatrix} \quad (69)$$

Pomocí kapacitních koeficientů jsou definovány hledané vztahy pro výpočet kapacit fázových vodičů proti zemi  $C_{i0}$  (70) a parciálních kapacit mezi dvěma fázovými vodiči (71), respektive mezi fázovými vodiči a zemnicím lanem a kombinovaným zemnicím lanem (72)  $C_{ij}$ :

$$C_{i0} = \sum_{j=a_1, b_1, \dots}^{c_2} \beta_{ij} \quad (70)$$

$$C_{ij} = -\beta_{ij} \quad (71)$$

$$C_{ij} = -\delta_{ij} \quad (72)$$

Např. pro fázový vodič na pozici  $a_1$  řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany platí:

Kapacita fázového vodiče proti zemi na pozici  $a_1$ :

$$C_{a_1 0} = \beta_{a_1 a_1'} + \beta_{a_1 b_1} + \beta_{a_1 c_1} + \beta_{a_1 a_2} + \beta_{a_1 b_2} + \beta_{a_1 c_2} \quad (73)$$

Analogicky pro fázové vodiče na pozici  $b_1$ ,  $c_1$ , atd.

Parciální kapacita mezi fázovými vodiči na pozicích  $a_1$  a  $b_1$ :

$$C_{a_1b_1} = -\beta_{a_1b_1} \quad (74)$$

Obdobně pro  $C_{a_1c_1}$ ,  $C_{a_1a_2}$ , atd. Analogicky pro fázové vodiče na pozici  $b_1$ ,  $c_1$ , atd.

Parciální kapacita mezi fázovým vodičem na pozici  $a_1$  a zemnicím lanem na pozici 01:

$$C_{a_101} = -\delta_{a_101} \quad (75)$$

Obdobně pro  $C_{a_102}$ . Analogicky pro fázové vodiče na pozici  $b_1$ ,  $c_1$ , atd.

Celkový kapacitní proud jednotlivých fázových vodičů prvního potahu na příslušných pozicích  $k$ -tého úseku řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany lze vyjádřit pomocí následujícího maticového zápisu:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Sigma Ca_1,k} \\ \bar{I}_{\Sigma Cb_1,k} \\ \bar{I}_{\Sigma Cc_1,k} \end{bmatrix} &= j\omega \cdot \mathbf{C}_{10} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{a_1,k} & -\bar{U}_{a_1,k} & -\bar{U}_{a_1,k} \\ \bar{U}_{b_1,k} & -\bar{U}_{b_1,k} & -\bar{U}_{b_1,k} \\ \bar{U}_{c_1,k} & -\bar{U}_{c_1,k} & -\bar{U}_{c_1,k} \end{bmatrix} \\ &+ j\omega \cdot \mathbf{C}_{11} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{b_1,k} - \bar{U}_{a_1,k} & \bar{U}_{c_1,k} - \bar{U}_{a_1,k} \\ \bar{U}_{a_1,k} - \bar{U}_{b_1,k} & \bar{U}_{c_1,k} - \bar{U}_{b_1,k} \\ \bar{U}_{a_1,k} - \bar{U}_{c_1,k} & \bar{U}_{b_1,k} - \bar{U}_{c_1,k} \end{bmatrix} \\ &+ j\omega \cdot \mathbf{C}_{12} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{a_2,k} - \bar{U}_{a_1,k} & \bar{U}_{b_2,k} - \bar{U}_{a_1,k} & \bar{U}_{c_2,k} - \bar{U}_{a_1,k} \\ \bar{U}_{a_2,k} - \bar{U}_{b_1,k} & \bar{U}_{b_2,k} - \bar{U}_{b_1,k} & \bar{U}_{c_2,k} - \bar{U}_{b_1,k} \\ \bar{U}_{a_2,k} - \bar{U}_{c_1,k} & \bar{U}_{b_2,k} - \bar{U}_{c_1,k} & \bar{U}_{c_2,k} - \bar{U}_{c_1,k} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (76)$$

kde  $\mathbf{C}_{10}$ ,  $\mathbf{C}_{11}$  a  $\mathbf{C}_{12}$  jsou matice kapacit fázových vodičů proti zemi a parciálních kapacit mezi dvěma vodiči, jež lze zapsat jako:

$$\mathbf{C}_{10} = \begin{bmatrix} C_{a_10} & C_{b_10} & C_{c_10} \\ C_{a_101} & C_{b_101} & C_{c_101} \\ C_{a_102} & C_{b_102} & C_{c_102} \end{bmatrix} \quad (77)$$

$$\mathbf{C}_{11} = \begin{bmatrix} C_{a_1b_1} & C_{b_1a_1} & C_{c_1a_1} \\ C_{a_1c_1} & C_{b_1c_1} & C_{c_1b_1} \end{bmatrix} \quad (78)$$

$$\mathbf{C}_{12} = \begin{bmatrix} C_{a_1a_2} & C_{b_1a_2} & C_{c_1a_2} \\ C_{a_1b_2} & C_{b_1b_2} & C_{c_1b_2} \\ C_{a_1c_2} & C_{b_1c_2} & C_{c_1c_2} \end{bmatrix} \quad (79)$$

Analogickým způsobem lze zapsat i celkový kapacitní proud jednotlivých fázových vodičů druhého potahu na příslušných pozicích.

Celkový kapacitní proud zemnicího lana, respektive kombinovaného zemnicího lana na příslušných pozicích  $k$ -tého úseku řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany lze vyjádřit pomocí následujícího maticového zápisu:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{\Sigma C01,k} \\ \bar{I}_{\Sigma C02,k} \end{bmatrix} = j\omega \cdot \mathbf{C}_{01} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{a_1,k} \\ \bar{U}_{b_1,k} \\ \bar{U}_{c_1,k} \end{bmatrix} + j\omega \cdot \mathbf{C}_{02} \cdot \ell_k \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{a_2,k} \\ \bar{U}_{b_2,k} \\ \bar{U}_{c_2,k} \end{bmatrix} \quad (80)$$

kde  $\mathbf{C}_{01}$ ,  $\mathbf{C}_{02}$  jsou matice parciálních kapacit mezi dvěma vodiči, jež lze zapsat jako:

$$\mathbf{C}_{01} = \begin{bmatrix} C_{01a_1} & C_{01b_1} & C_{01c_1} \\ C_{02a_1} & C_{02b_1} & C_{02c_1} \end{bmatrix} \quad (81)$$

$$\mathbf{C}_{02} = \begin{bmatrix} C_{01a_2} & C_{01b_2} & C_{01c_2} \\ C_{02a_2} & C_{02b_2} & C_{02c_2} \end{bmatrix} \quad (82)$$

#### 4.4.1 Ideální případ transpozice po třetinách délky trasy vedení

Velikost kapacit fázových vodičů proti zemi a parciálních kapacit mezi dvěma vodiči lze pro ideální případ transpozice po třetinách délky trasy řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany (ideálně transponované vedení) viz Obr. 17 určit aritmetickým průměrem shodným způsobem jako v případě vlastních a vzájemných indukčností fázových vodičů (viz 4.3.2).

Pro kapacity fázových vodičů proti zemi a parciální kapacity mezi dvěma vodiči prvního potahu ideálně transponovaného vedení tedy platí:

$$C_{10} = C'_{a_10} = C'_{b_10} = C'_{c_10} = \frac{C_{a_10} + C_{b_10} + C_{c_10}}{3} \quad (83)$$

kde  $C_{a_10}$ ,  $C_{b_10}$ ,  $C_{c_10}$  jsou kapacity fázových vodičů prvního potahu proti zemi vypočtené ze vztahu (70),

$C'_{a_10}$ ,  $C'_{b_10}$ ,  $C'_{c_10}$  jsou kapacity fázových vodičů prvního potahu proti zemi ideálně transponovaného vedení vypočtené ze vztahu (83).

$$C_{11} = C'_{a_1b_1} = C'_{c_1a_1} = C'_{b_1c_1} = \frac{C_{a_1b_1} + C_{c_1a_1} + C_{b_1c_1}}{3} \quad (84)$$

$$C_{101} = C_{011} = C'_{a_101} = C'_{b_101} = C'_{c_101} = \frac{C_{a_101} + C_{b_101} + C_{c_101}}{3} \quad (85)$$

$$C_{102} = C_{021} = C'_{a_102} = C'_{b_102} = C'_{c_102} = \frac{C_{a_102} + C_{b_102} + C_{c_102}}{3} \quad (86)$$



$$C_{121} = C'_{a_1a_2} = C'_{b_1c_2} = C'_{c_1b_2} = \frac{C_{a_1a_2} + C_{b_1c_2} + C_{c_1b_2}}{3} \quad (87)$$

$$C_{122} = C'_{a_1b_2} = C'_{b_1a_2} = C'_{c_1c_2} = \frac{C_{a_1b_2} + C_{b_1a_2} + C_{c_1c_2}}{3} \quad (88)$$

$$C_{123} = C'_{a_1c_2} = C'_{b_1b_2} = C'_{c_1a_2} = \frac{C_{a_1c_2} + C_{b_1b_2} + C_{c_1a_2}}{3} \quad (89)$$

kde  $C_{a_1b_1}$ ,  $C_{a_1c_1}$ ,  $C_{b_1c_1}$ , atd. jsou parciální kapacity mezi dvěma vodiči prvního potahu, respektive prvního a druhého potahu vypočtené ze vztahu (71),

$C'_{a_1b_1}$ ,  $C'_{a_1c_1}$ ,  $C'_{b_1c_1}$ , atd. jsou parciální kapacity mezi dvěma vodiči prvního potahu, respektive prvního a druhého potahu ideálně transponovaného vedení vypočtené ze vztahů (84) až (89).

Analogickým způsobem lze určit kapacity fázových vodičů proti zemi druhého potahu a parciální kapacity mezi dvěma vodiči druhého potahu, respektive prvního a druhého potahu ideálně transponovaného vedení.

Výše uvedené vztahy pro výpočet kapacit fázových vodičů proti zemi a parciálních kapacit mezi dvěma vodiči ideálně transponovaného vedení lze použít jako v případě vlastních a vzájemných indukčností fázových vodičů i pro ideální případ transpozice řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany se stejným sledem fází na začátku a konci vedení viz Obr. 18.

## 4.5 Svod

Tato subkapitola byla vytvořena na základě doplnění a modifikace textu obsaženého v autorovo bakalářské práci [5].

Velikost svodu je ovlivněna jednak samotnou konstrukcí vedení a elektrickými parametry a jednak panujícími atmosférickými podmínkami. Jeho původci se rozdělují do dvou kategorií.

Prvním z nich je svod díky nedokonalé izolaci fázových vodičů vůči zemi. Ta je závislá na tvaru, čistotě povrchu a použitém materiálu izolátorů, relativní vlhkosti vzduchu a geometrických vzdálenostech.

Druhá část je zapříčiněna tzv. korónou. Její vznik a míra projevu je závislá jednak na maximální hodnotě intenzity elektrického pole na povrchu vodičů dané velikostí napětí, proudu a frekvence, tvarem a poloměrem vodičů, (potažmo poloměru a počtu

parciálních vodičů), stavu a čistotě jejich povrchu, vzdálenosti od ostatních vodičů a stožárové konstrukce a výšce nad zemí a jednak na aktuálních atmosférických podmínkách, a to zejména na teplotě, tlaku a vlhkosti vzduchu, popřípadě přítomnosti deště, rosy či jinovatky.

Z těchto důvodů je jeho výpočet velice nesnadný a doposud neexistuje žádný univerzální vztah, proto se velice často využívají tabelované hodnoty. V případě stávajícího vedení je nejpřesnějším způsobem jeho určení výpočet z celkových změřených Jouleových ztrát vedení naprázdno  $\Delta P_{J0}$  ponížených o vypočtené činné ztráty na podélných činných odporech  $\Delta P_{R0}$ .

$$G = \frac{\Delta P_{J0} - \Delta P_{R0}}{U_f^2} \quad (90)$$

kde  $U_f$  je fázové napětí.

U vedení v české přenosové soustavě provozovaných na hladině 400 kV se k omezení ztrát korónou, potažmo svodových ztrát používají trojsvazkové vodiče. Přesto se hodnota svodu pro jednu fázi nejčastěji pohybuje v rozmezí od 14 do 20 nS/km.

Poznámka: Problematice použití svazkových vodičů a jejich vlivu na omezení elektrického pole, respektive koróny se věnuje práce [9] a také práce [5], která se spolu s textem [10] detailně věnuje výpočtu ztrát korónou.

## 5. Výpočet pasivních parametrů

V této kapitole jsou uvedeny vypočtené hodnoty pasivních parametrů základních elementů řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany vztažené na 1 km délky vedení. Jejich hodnoty byly stanoveny pomocí skriptu vytvořeného v počítačovém programu MATLAB pro nosné stožárové konstrukce Dunaj 2012 a Soudek 2014, schematicky znázorněné v následující podkapitole 5.1 na Obr. 21, respektive Obr. 22, pro případ netransponovaného i ideálně transponovaného vedení na základě vztahů uvedených v předcházející kapitole 4.

Je uvažováno, že fázové vodiče jsou tvořeny trojsvazky z parciálních vodičů nesoucích označení 490-AL1/64-ST1A o poloměru 15,3 mm s krokem 0,4 m. Jejich ekvivalentní poloměr činí 134,773 mm. Zemnicí lano představuje jednoduchý vodič s označením 185-AL1/43-ST6C o poloměru 9,8 mm, respektive v případě kombinovaného zemnicího lana vodič 177-AL3/49 o poloměru 10,05 mm.

U základních elementů vedení jak pro netransponované, tak i ideálně transponované vedení jsou pro obě stožárové konstrukce předpokládány stejné příslušné hodnoty činných odporů vodičů a svodu. Hodnoty činných odporů vodičů nejsou vypočteny, nýbrž jsou využity katalogové údaje udávané výrobcem, jež byly poskytnuty společností ČEPS, a.s. Ze všech dílčích násobných opravných koeficientů je zohledněn jen činitel respektující oteplení vodiče a to pouze v případě fázových vodičů. Provozní teplota fázových vodičů je předpokládána 60 °C. S ohledem na velikost procházejících proudů je v případě zemnicího lana a kombinovaného zemnicího lana uvažována provozní teplota 20 °C. Hodnota teplotního součinitele  $\zeta$  je použita ve výši  $3,87 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Svod je respektován pomocí tabulkové hodnoty.

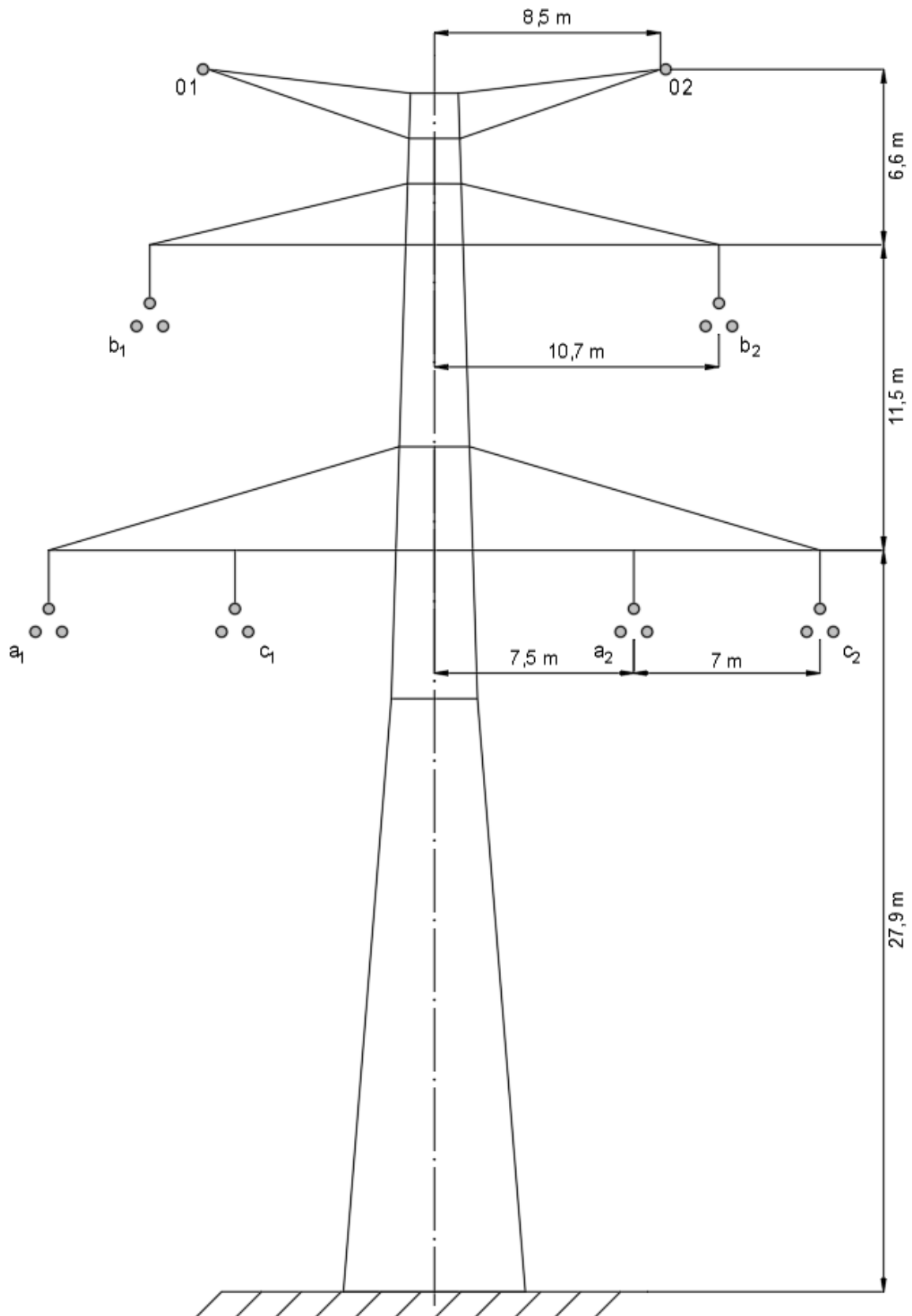
Hodnoty vlastních a vzájemných indukčností, respektive kapacit vodičů proti zemi a parciálních kapacit mezi dvěma vodiči jsou z důvodu přehlednosti prezentovány pomocí maticového zápisu představeného v podkapitolách 4.3 a 4.4 v předcházející kapitole 4.

Při výpočtu indukčnosti fiktivního zemnicího vodiče byla předpokládána konstantní hodnota vodivosti půdy  $10^{-4} \text{ S/m}$ .

Jelikož je proudová a napěťová nesymetrie vedení zapříčiněna nesymetrií pasivních parametrů a výraznými vzájemnými induktivními a kapacitními vazbami, jak již bylo dříve uvedeno, tak její prvotní posouzení bylo provedeno na základě rozboru jejich velikostí v příslušných podkapitolách 5.4 a 5.5 pro případ netransponovaného i ideálně transponovaného vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014.

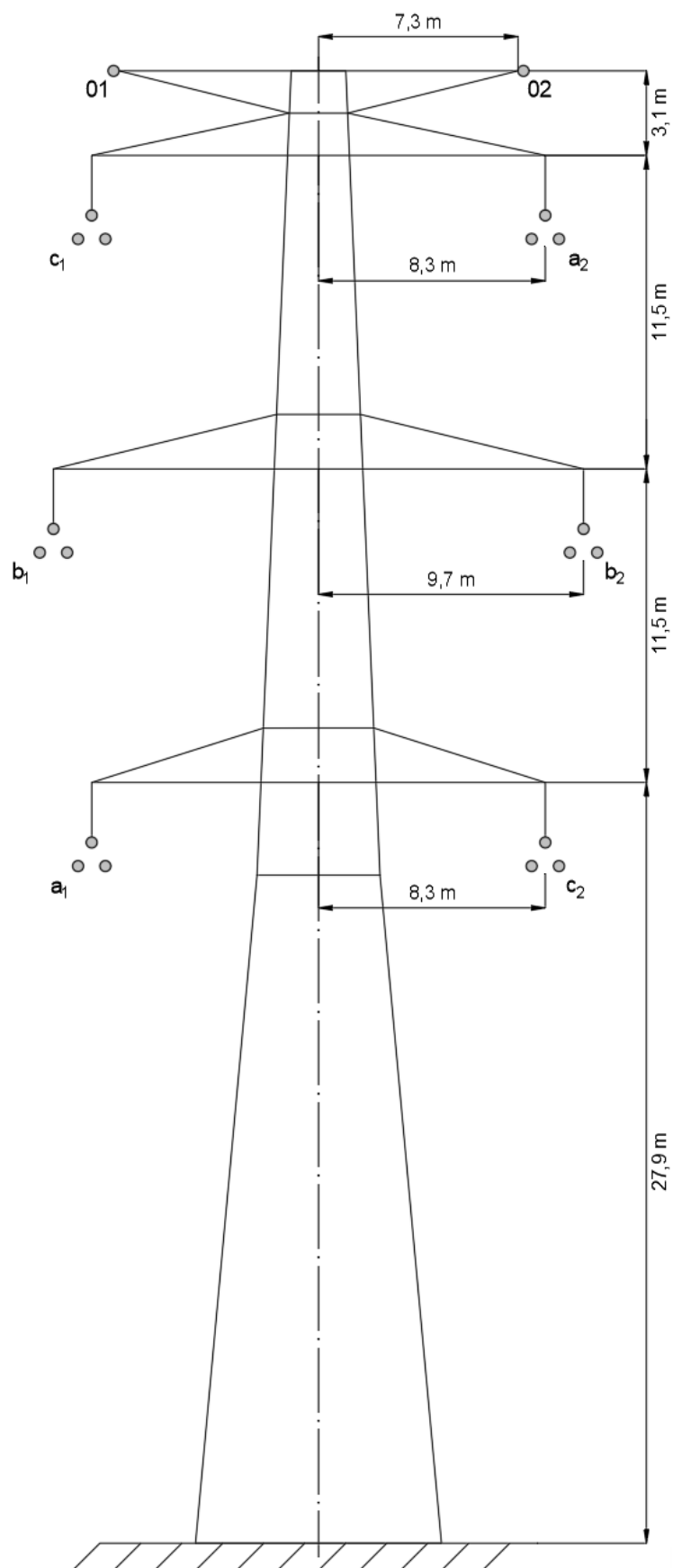
## 5.1 Uvažované typy stožárů

### 5.1.1 Dunaj 2012



Obr. 21: Schematické znázornění nosného stožáru typu Dunaj 2012 [1]

## 5.1.2 Soudek 2014



Obr. 22: Schematické znázornění nosného stožáru typu Soudek 2014 [1]

## 5.2 Činný odpor vodičů a svod

V této podkapitole jsou uvedeny hodnoty činného odporu zemnicích lan, fázových vodičů, fiktivního zemního vodiče a svodu totožné pro příslušné elementy netransponovaného i ideálně transponovaného vedení v případě obou uvažovaných stožárových konstrukcí Dunaj 2012 i Soudek 2014.

$$R_{01} = 0,1565 \Omega/\text{km} \quad (91)$$

$$R_{02} = 0,1700 \Omega/\text{km} \quad (92)$$

$$R = 0,0227 \Omega/\text{km} \quad (93)$$

$$R_g = 0,0494 \Omega/\text{km} \quad (94)$$

$$G = 20 \text{ nS}/\text{km} \quad (95)$$

## 5.3 Indukčnost fiktivního zemního vodiče

V této podkapitole je uvedena hodnota indukčnosti fiktivního zemního vodiče totožná pro příslušný element netransponovaného i ideálně transponovaného vedení. Pro možnost vzájemného porovnání jsou prezentovány číselné hodnoty pro stožárovou konstrukci Dunaj 2012 (vlevo), respektive Soudek 2014 (vpravo).

$$L_g = 1,1077 \text{ mH}/\text{km} \quad L_g = 1,0676 \text{ mH}/\text{km} \quad (96)$$

## 5.4 Matice indukčností

V této podkapitole jsou pomocí maticového zápisu uvedeny hodnoty indukčností pro netransponované vedení (viz 5.4.1) a ideálně transponované vedení (viz 5.4.2) v případě obou uvažovaných stožárových konstrukcí. Pro možnost vzájemného porovnání je vždy nejprve uveden obecný maticový zápis a následně jsou prezentovány číselné hodnoty pro stožárovou konstrukci Dunaj 2012 vlevo, respektive Soudek 2014 vpravo.

### 5.4.1 Netransponované vedení

Vlastní a vzájemné indukčnosti fázových vodičů 1. potahu

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} L_{a_1} & L_{a_1 b_1} & L_{a_1 c_1} \\ L_{b_1 a_1} & L_{b_1} & L_{b_1 c_1} \\ L_{c_1 a_1} & L_{c_1 b_1} & L_{c_1} \end{bmatrix} (\text{mH}/\text{km}) \quad (97)$$

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 1,5796 & 0,6300 & 0,7396 \\ 0,6378 & 1,5875 & 0,6407 \\ 0,7394 & 0,6327 & 1,5794 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 1,5437 & 0,6030 & 0,4658 \\ 0,6125 & 1,5533 & 0,6125 \\ 0,4844 & 0,6216 & 1,5623 \end{bmatrix} \quad (98)$$

**Vzájemné indukčnosti fázových vodičů mezi 1. a 2. potahem**

$$\mathbf{L}_{12} = \begin{bmatrix} L_{a_1a_2} & L_{a_1b_2} & L_{a_1c_2} \\ L_{b_1a_2} & L_{b_1b_2} & L_{b_1c_2} \\ L_{c_1a_2} & L_{c_1b_2} & L_{c_1c_2} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (99)$$

$$\mathbf{L}_{12} = \begin{bmatrix} 0,5106 & 0,4645 & 0,4553 \\ 0,5228 & 0,5240 & 0,4724 \\ 0,5870 & 0,5147 & 0,5104 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_{12} = \begin{bmatrix} 0,4239 & 0,4806 & 0,5310 \\ 0,4902 & 0,5094 & 0,4902 \\ 0,5496 & 0,4992 & 0,4425 \end{bmatrix} \quad (100)$$

**Vzájemné indukčnosti mezi fázovými vodiči 1. potahu a zemnicími lany**

$$\mathbf{L}_{10} = \begin{bmatrix} L_{a_101} & L_{a_102} \\ L_{b_101} & L_{b_102} \\ L_{c_101} & L_{c_102} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (101)$$

$$\mathbf{L}_{10} = \begin{bmatrix} 0,5392 & 0,4535 \\ 0,7487 & 0,5345 \\ 0,5491 & 0,4917 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_{10} = \begin{bmatrix} 0,4404 & 0,4100 \\ 0,5636 & 0,4806 \\ 0,8753 & 0,5582 \end{bmatrix} \quad (102)$$

**Vlastní a vzájemné indukčnosti fázových vodičů 2. potahu**

$$\mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} L_{a_2} & L_{a_2b_2} & L_{a_2c_2} \\ L_{b_2a_2} & L_{b_2} & L_{b_2c_2} \\ L_{c_2a_2} & L_{c_2b_2} & L_{c_2} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (103)$$

$$\mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} 1,5794 & 0,6327 & 0,7394 \\ 0,6407 & 1,5875 & 0,6378 \\ 0,7396 & 0,6300 & 1,5796 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} 1,5623 & 0,6216 & 0,4844 \\ 0,6125 & 1,5533 & 0,6125 \\ 0,4658 & 0,6030 & 1,5437 \end{bmatrix} \quad (104)$$

**Vzájemné indukčnosti fázových vodičů mezi 2. a 1. potahem**

$$\mathbf{L}_{21} = \begin{bmatrix} L_{a_2a_1} & L_{b_2a_1} & L_{c_2a_1} \\ L_{a_2b_1} & L_{b_2b_1} & L_{c_2b_1} \\ L_{a_2c_1} & L_{b_2c_1} & L_{c_2c_1} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (105)$$

$$\mathbf{L}_{21} = \begin{bmatrix} 0,5104 & 0,4724 & 0,4553 \\ 0,5147 & 0,5240 & 0,4645 \\ 0,5870 & 0,5228 & 0,5106 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_{21} = \begin{bmatrix} 0,4425 & 0,4902 & 0,5310 \\ 0,4992 & 0,5094 & 0,4806 \\ 0,5496 & 0,4902 & 0,4239 \end{bmatrix} \quad (106)$$

**Vzájemné indukčnosti mezi fázovými vodiči 2. potahu a zemnicími lany**

$$\mathbf{L}_{20} = \begin{bmatrix} L_{a_201} & L_{a_202} \\ L_{b_201} & L_{b_202} \\ L_{c_201} & L_{c_202} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (107)$$

$$L_{20} = \begin{bmatrix} 0,4917 & 0,5491 \\ 0,5345 & 0,7487 \\ 0,4535 & 0,5392 \end{bmatrix} \quad L_{20} = \begin{bmatrix} 0,5582 & 0,8753 \\ 0,4806 & 0,5636 \\ 0,4100 & 0,4404 \end{bmatrix} \quad (108)$$

#### Vlastní a vzájemné indukčnosti zemnicích lan

$$L_0 = \begin{bmatrix} L_{01} & L_{0102} \\ L_{0201} & L_{02} \end{bmatrix} \text{ (mH/km)} \quad (109)$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} 2,1161 & 0,5744 \\ 0,5744 & 2,1111 \end{bmatrix} \quad L_0 = \begin{bmatrix} 2,0889 & 0,5776 \\ 0,5776 & 2,0839 \end{bmatrix} \quad (110)$$

#### Vzájemné indukčnosti mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 1. potahu

$$L_{01} = \begin{bmatrix} L_{01a_1} & L_{01b_1} & L_{01c_1} \\ L_{02a_1} & L_{02b_1} & L_{02c_1} \end{bmatrix} \text{ (mH/km)} \quad (111)$$

$$L_{01} = \begin{bmatrix} 0,5514 & 0,7531 & 0,5616 \\ 0,4658 & 0,5389 & 0,5041 \end{bmatrix} \quad L_{01} = \begin{bmatrix} 0,4613 & 0,5750 & 0,8777 \\ 0,4309 & 0,4920 & 0,5605 \end{bmatrix} \quad (112)$$

#### Vzájemné indukčnosti mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 2. potahu

$$L_{02} = \begin{bmatrix} L_{01a_2} & L_{01b_2} & L_{01c_2} \\ L_{02a_2} & L_{02b_2} & L_{02c_2} \end{bmatrix} \text{ (mH/km)} \quad (113)$$

$$L_{02} = \begin{bmatrix} 0,5041 & 0,5389 & 0,4658 \\ 0,5616 & 0,7531 & 0,5514 \end{bmatrix} \quad L_{02} = \begin{bmatrix} 0,5605 & 0,4920 & 0,4309 \\ 0,8777 & 0,5750 & 0,4613 \end{bmatrix} \quad (114)$$

Na základě vypočtených hodnot lze konstatovat, že stožárová konstrukce Dunaj 2012 vykazuje větší hodnoty vlastních indukčností fázových vodičů i zemnicích lan a vzájemných indukčností mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů při současné menší nesymetrii. Toto lze pozorovat i u většiny vzájemných indukčností mezi fázovými vodiči obou potahů, respektive mezi fázovými vodiči a zemnicími lany. Stožárová konstrukce Soudek 2014 se vyznačuje větší hodnotou vzájemných indukčností mezi zemnicími lany. Z uvedeného vyplývá, že při totožném zatížení vedení budou v případě použití stožárových konstrukcí Dunaj 2012 nabývat indukovaná napětí do fázových vodičů a zemnicích lan větší hodnoty při současné menší nesymetrii.

### 5.4.2 Ideálně transponované vedení

#### Vlastní a vzájemné indukčnosti fázových vodičů 1. potahu

$$L'_1 = \begin{bmatrix} L_1 & L_{111} & L_{112} \\ L_{112} & L_1 & L_{111} \\ L_{111} & L_{112} & L_1 \end{bmatrix} \text{ (mH/km)} \quad (115)$$



$$\mathbf{L}'_1 = \begin{bmatrix} 1,5822 & 0,6700 & 0,6700 \\ 0,6700 & 1,5822 & 0,6700 \\ 0,6700 & 0,6700 & 1,5822 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}'_1 = \begin{bmatrix} 1,5531 & 0,5666 & 0,5666 \\ 0,5666 & 1,5531 & 0,5666 \\ 0,5666 & 0,5666 & 1,5531 \end{bmatrix} \quad (116)$$

**Vzájemné indukčnosti fázových vodičů mezi 1. a 2. potahem**

$$\mathbf{L}'_{12} = \begin{bmatrix} L_{121} & L_{122} & L_{123} \\ L_{122} & L_{123} & L_{121} \\ L_{123} & L_{121} & L_{122} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (117)$$

$$\mathbf{L}'_{12} = \begin{bmatrix} 0,4992 & 0,4992 & 0,5221 \\ 0,4992 & 0,5221 & 0,4992 \\ 0,5221 & 0,4992 & 0,4992 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}'_{12} = \begin{bmatrix} 0,4711 & 0,4711 & 0,5300 \\ 0,4711 & 0,5300 & 0,4711 \\ 0,5300 & 0,4711 & 0,4711 \end{bmatrix} \quad (118)$$

**Vzájemné indukčnosti mezi fázovými vodiči 1. potahu a zemnicími lany**

$$\mathbf{L}'_{10} = \begin{bmatrix} L_{101} & L_{102} \\ L_{101} & L_{102} \\ L_{101} & L_{102} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (119)$$

$$\mathbf{L}'_{10} = \begin{bmatrix} 0,6123 & 0,4932 \\ 0,6123 & 0,4932 \\ 0,6123 & 0,4932 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}'_{10} = \begin{bmatrix} 0,6264 & 0,4829 \\ 0,6264 & 0,4829 \\ 0,6264 & 0,4829 \end{bmatrix} \quad (120)$$

**Vlastní a vzájemné indukčnosti fázových vodičů 2. potahu**

$$\mathbf{L}'_2 = \begin{bmatrix} L_2 & L_{221} & L_{222} \\ L_{222} & L_2 & L_{221} \\ L_{221} & L_{222} & L_2 \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (121)$$

$$\mathbf{L}'_2 = \begin{bmatrix} 1,5822 & 0,6700 & 0,6700 \\ 0,6700 & 1,5822 & 0,6700 \\ 0,6700 & 0,6700 & 1,5822 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}'_2 = \begin{bmatrix} 1,5531 & 0,5666 & 0,5666 \\ 0,5666 & 1,5531 & 0,5666 \\ 0,5666 & 0,5666 & 1,5531 \end{bmatrix} \quad (122)$$

**Vzájemné indukčnosti fázových vodičů mezi 2. a 1. potahem**

$$\mathbf{L}'_{21} = \begin{bmatrix} L_{211} & L_{212} & L_{213} \\ L_{212} & L_{213} & L_{211} \\ L_{213} & L_{211} & L_{212} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (123)$$

$$\mathbf{L}'_{21} = \begin{bmatrix} 0,4992 & 0,4992 & 0,5221 \\ 0,4992 & 0,5221 & 0,4992 \\ 0,5221 & 0,4992 & 0,4992 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}'_{21} = \begin{bmatrix} 0,4711 & 0,4711 & 0,5300 \\ 0,4711 & 0,5300 & 0,4711 \\ 0,5300 & 0,4711 & 0,4711 \end{bmatrix} \quad (124)$$

**Vzájemné indukčnosti mezi fázovými vodiči 2. potahu a zemnicími lany**

$$\mathbf{L}'_{20} = \begin{bmatrix} L_{201} & L_{202} \\ L_{201} & L_{202} \\ L_{201} & L_{202} \end{bmatrix} \quad (\text{mH/km}) \quad (125)$$

$$L'_{20} = \begin{bmatrix} 0,4932 & 0,6123 \\ 0,4932 & 0,6123 \\ 0,4932 & 0,6123 \end{bmatrix} \quad L'_{20} = \begin{bmatrix} 0,4829 & 0,6264 \\ 0,4829 & 0,6264 \\ 0,4829 & 0,6264 \end{bmatrix} \quad (126)$$

**Vlastní a vzájemné indukčnosti zemnicích lan**

$$L_0 = \begin{bmatrix} L_{01} & L_{0102} \\ L_{0201} & L_{02} \end{bmatrix} \text{ (mH/km)} \quad (127)$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} 2,1161 & 0,5744 \\ 0,5744 & 2,1111 \end{bmatrix} \quad L_0 = \begin{bmatrix} 2,0890 & 0,5776 \\ 0,5776 & 2,0839 \end{bmatrix} \quad (128)$$

**Vzájemné indukčnosti mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 1. potahu**

$$L'_{01} = \begin{bmatrix} L_{011} & L_{011} & L_{011} \\ L_{021} & L_{021} & L_{021} \end{bmatrix} \text{ (mH/km)} \quad (129)$$

$$L'_{01} = \begin{bmatrix} 0,6220 & 0,6220 & 0,6220 \\ 0,5029 & 0,5029 & 0,5029 \end{bmatrix} \quad L'_{01} = \begin{bmatrix} 0,6380 & 0,6380 & 0,6380 \\ 0,4945 & 0,4945 & 0,4945 \end{bmatrix} \quad (130)$$

**Vzájemné indukčnosti mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 2. potahu**

$$L'_{02} = \begin{bmatrix} L_{012} & L_{012} & L_{012} \\ L_{022} & L_{022} & L_{022} \end{bmatrix} \text{ (mH/km)} \quad (131)$$

$$L'_{02} = \begin{bmatrix} 0,5029 & 0,5029 & 0,5029 \\ 0,6220 & 0,6220 & 0,6220 \end{bmatrix} \quad L'_{02} = \begin{bmatrix} 0,4945 & 0,4945 & 0,4945 \\ 0,6380 & 0,6380 & 0,6380 \end{bmatrix} \quad (132)$$

Na základě rozboru vypočtených hodnot lze konstatovat, že stožárová konstrukce Dunaj 2012 vykazuje větší hodnoty vlastních indukčností fázových vodičů i zemnicích lan a vzájemných indukčností mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů i mezi nimi. Naopak je tomu u vzájemných indukčností mezi zemnicími lany. Z uvedeného vyplývá, že při totožném zatížení vedení budou v případě použití stožárových konstrukcí Dunaj 2012 nabývat indukovaná napětí do fázových vodičů a zemnicích lan větší hodnoty.

**5.4.3 Vzájemné porovnání**

Na základě porovnání vypočtených hodnot pro netransponované a ideálně transponované vedení lze konstatovat, že v případě stožárové konstrukce Dunaj 2012 vykazuje ideálně transponované vedení větší hodnoty u většiny vlastních indukčností fázových vodičů, vzájemných indukčností mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů a mezi fázovými vodiči a zemnicími lany. Naopak je tomu u vzájemných indukčností mezi fázovými vodiči obou potahů. Z uvedeného vyplývá, že při totožném

zatížení vedení budou v případě ideálně transponovaného vedení nabývat indukovaná napětí do fázových vodičů a zemnicích lan větší hodnoty při současné menší nesymetrii.

V případě stožárové konstrukce Soudek 2014 vykazuje ideálně transponované vedení větší hodnoty u většiny vzájemných indukčností mezi fázovými vodiči obou potahů a mezi fázovými vodiči a zemnicími lany. Naopak je tomu u většiny vlastních indukčností fázových vodičů a vzájemných indukčností mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů. Z tohoto lze tedy vyvodit závěr, že při totožném zatížení vedení budou v případě ideálně transponovaného vedení nabývat indukovaná napětí do zemnicích lan větší hodnoty a naopak do fázových vodičů menší hodnoty, v obojím při současné menší nesymetrii.

## 5.5 Matice kapacit

V této podkapitole jsou pomocí maticového zápisu uvedeny hodnoty kapacit pro netransponované vedení (viz 5.5.1) a ideálně transponované vedení (viz 5.5.2) v případě obou uvažovaných stožárových konstrukcí. Pro možnost vzájemného porovnání je jako v předchozích případech vždy nejprve uveden obecný maticový zápis a následně jsou prezentovány číselné hodnoty pro stožárovou konstrukci Dunaj 2012 vlevo, respektive Soudek 2014 vpravo.

### 5.5.1 Netransponované vedení

**Kapacity fázových vodičů 1. potahu proti zemi a vůči zemnicím lanům**

$$C_{10} = \begin{bmatrix} C_{a_1 0} & C_{b_1 0} & C_{c_1 0} \\ C_{a_1 01} & C_{b_1 01} & C_{c_1 01} \\ C_{a_1 02} & C_{b_1 02} & C_{c_1 02} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (133)$$

$$C_{10} = \begin{bmatrix} 5,3096 & 5,9313 & 4,4920 \\ 0,5333 & 2,1522 & 0,5086 \\ 0,2290 & 0,6162 & 0,3270 \end{bmatrix} \quad C_{10} = \begin{bmatrix} 5,3814 & 4,3523 & 6,8373 \\ 0,2669 & 0,6973 & 3,3365 \\ 0,1815 & 0,3628 & 0,6887 \end{bmatrix} \quad (134)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 1. potahu**

$$C_{11} = \begin{bmatrix} C_{a_1 b_1} & C_{b_1 a_1} & C_{c_1 a_1} \\ C_{a_1 c_1} & C_{b_1 c_1} & C_{c_1 b_1} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (135)$$

$$C_{11} = \begin{bmatrix} 1,7176 & 1,7176 & 2,9445 \\ 2,9445 & 1,5893 & 1,5893 \end{bmatrix} \quad C_{11} = \begin{bmatrix} 2,0889 & 2,0889 & 0,6463 \\ 0,6463 & 1,9624 & 1,9624 \end{bmatrix} \quad (136)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 1. a 2. potahu**

$$\mathbf{C}_{12} = \begin{bmatrix} C_{a_1a_2} & C_{b_1a_2} & C_{c_1a_2} \\ C_{a_1b_2} & C_{b_1b_2} & C_{c_1b_2} \\ C_{a_1c_2} & C_{b_1c_2} & C_{c_1c_2} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (137)$$

$$\mathbf{C}_{12} = \begin{bmatrix} 0,5115 & 0,6070 & 1,2195 \\ 0,3330 & 0,7576 & 0,6068 \\ 0,2503 & 0,3331 & 0,5114 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{12} = \begin{bmatrix} 0,3768 & 0,6934 & 1,0539 \\ 0,7446 & 0,8781 & 0,6937 \\ 1,2988 & 0,7446 & 0,3770 \end{bmatrix} \quad (138)$$

**Kapacity fázových vodičů 2. potahu proti zemi a vůči zemnicím lanům**

$$\mathbf{C}_{20} = \begin{bmatrix} C_{a_20} & C_{b_20} & C_{c_20} \\ C_{a_201} & C_{b_201} & C_{c_201} \\ C_{a_202} & C_{b_202} & C_{c_202} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (139)$$

$$\mathbf{C}_{20} = \begin{bmatrix} 4,4924 & 5,9344 & 5,3102 \\ 0,3258 & 0,6136 & 0,2281 \\ 0,5104 & 2,1593 & 0,5351 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{20} = \begin{bmatrix} 6,8440 & 4,3531 & 5,3816 \\ 0,6855 & 0,3614 & 0,1808 \\ 0,3348 & 0,6998 & 0,2679 \end{bmatrix} \quad (140)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 2. potahu**

$$\mathbf{C}_{22} = \begin{bmatrix} C_{a_2b_2} & C_{a_2c_2} & C_{b_2c_2} \\ C_{a_2c_2} & C_{b_2c_2} & C_{b_2c_2} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (141)$$

$$\mathbf{C}_{22} = \begin{bmatrix} 1,5888 & 1,5888 & 2,9444 \\ 2,9444 & 1,7172 & 1,7172 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{22} = \begin{bmatrix} 1,9614 & 1,9614 & 0,6459 \\ 0,6459 & 2,0889 & 2,0889 \end{bmatrix} \quad (142)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 2. a 1. potahu**

$$\mathbf{C}_{21} = \begin{bmatrix} C_{a_1a_2} & C_{b_1a_2} & C_{c_1a_2} \\ C_{a_1b_2} & C_{b_1b_2} & C_{c_1b_2} \\ C_{a_1c_2} & C_{b_1c_2} & C_{c_1c_2} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (143)$$

$$\mathbf{C}_{21} = \begin{bmatrix} 0,5115 & 0,6070 & 1,2195 \\ 0,3330 & 0,7576 & 0,6068 \\ 0,2503 & 0,3331 & 0,5114 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{21} = \begin{bmatrix} 0,3768 & 0,6934 & 1,0539 \\ 0,7446 & 0,8781 & 0,6937 \\ 1,2988 & 0,7446 & 0,3770 \end{bmatrix} \quad (144)$$

**Parciální kapacity mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 1. potahu**

$$\mathbf{C}_{01} = \begin{bmatrix} C_{01a_1} & C_{01b_1} & C_{01c_1} \\ C_{02a_1} & C_{02b_1} & C_{02c_1} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (145)$$

$$\mathbf{C}_{01} = \begin{bmatrix} 0,5333 & 2,1522 & 0,5086 \\ 0,2290 & 0,6162 & 0,3270 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{01} = \begin{bmatrix} 0,2669 & 0,6973 & 3,3365 \\ 0,1815 & 0,3628 & 0,6887 \end{bmatrix} \quad (146)$$

**Parciální kapacity mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 2. potahu**

$$\mathbf{C}_{02} = \begin{bmatrix} C_{01a_2} & C_{01b_2} & C_{01c_2} \\ C_{02a_2} & C_{02b_2} & C_{02c_2} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (147)$$

$$\mathbf{C}_{02} = \begin{bmatrix} 0,3258 & 0,6136 & 0,2281 \\ 0,5104 & 2,1593 & 0,5351 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{02} = \begin{bmatrix} 0,6855 & 0,3614 & 0,1808 \\ 0,3348 & 0,6998 & 0,2679 \end{bmatrix} \quad (148)$$

Na základě rozboru vypočtených hodnot lze konstatovat, že stožárová konstrukce Dunaj 2012 vykazuje u většiny kapacit fázových vodičů proti zemi menší hodnoty. Toto lze pozorovat i u většiny parciálních kapacit mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů i mezi nimi. Naopak je tomu u parciálních kapacit mezi fázovými vodiči a zemnicími lany. Stožárová konstrukce Soudek 2014 se vyznačuje větší nesymetrií u kapacit fázových vodičů proti zemi i parciálních kapacit mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů i mezi nimi, respektive fázovými vodiči a zemnicími lany. Z uvedeného vyplývá, že při totožném zatížení vedení budou v případě použití stožárových konstrukcí Dunaj 2012 nabývat indukované proudy do fázových vodičů menší hodnoty a naopak do zemnicích lan větší hodnoty, v obojím při současné menší nesymetrii.

**5.5.2 Ideálně transponované vedení****Kapacity fázových vodičů 1. potahu proti zemi a vůči zemnicím lanům**

$$\mathbf{C}'_{10} = \begin{bmatrix} C_{10} & C_{10} & C_{10} \\ C_{101} & C_{101} & C_{101} \\ C_{102} & C_{102} & C_{102} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (149)$$

$$\mathbf{C}'_{10} = \begin{bmatrix} 5,2443 & 5,2443 & 5,2443 \\ 1,0647 & 1,0647 & 1,0647 \\ 0,3907 & 0,3907 & 0,3907 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{10} = \begin{bmatrix} 5,5237 & 5,5237 & 5,5237 \\ 1,4336 & 1,4336 & 1,4336 \\ 0,4110 & 0,4110 & 0,4110 \end{bmatrix} \quad (150)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 1. potahu**

$$\mathbf{C}'_{11} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{11} & C_{11} \\ C_{11} & C_{11} & C_{11} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (151)$$

$$\mathbf{C}'_{11} = \begin{bmatrix} 2,0838 & 2,0838 & 2,0838 \\ 2,0838 & 2,0838 & 2,0838 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{11} = \begin{bmatrix} 1,5659 & 1,5659 & 1,5659 \\ 1,5659 & 1,5659 & 1,5659 \end{bmatrix} \quad (152)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 1. a 2. potahu**

$$\mathbf{C}'_{12} = \begin{bmatrix} C_{121} & C_{122} & C_{123} \\ C_{122} & C_{123} & C_{121} \\ C_{123} & C_{121} & C_{122} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (153)$$

$$\mathbf{C}'_{12} = \begin{bmatrix} 0,4838 & 0,4838 & 0,7425 \\ 0,4838 & 0,7425 & 0,4838 \\ 0,7425 & 0,4838 & 0,4838 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{12} = \begin{bmatrix} 0,6050 & 0,6050 & 1,0769 \\ 0,6050 & 1,0769 & 0,6050 \\ 1,0769 & 0,6050 & 0,6050 \end{bmatrix} \quad (154)$$

**Kapacity fázových vodičů 2. potahu proti zemi a vůči zemnicím lanům**

$$\mathbf{C}'_{20} = \begin{bmatrix} C_{20} & C_{20} & C_{20} \\ C_{201} & C_{201} & C_{201} \\ C_{202} & C_{202} & C_{202} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (155)$$

$$\mathbf{C}'_{20} = \begin{bmatrix} 5,2457 & 5,2457 & 5,2457 \\ 0,3892 & 0,3892 & 0,3892 \\ 1,0682 & 1,0682 & 1,0682 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{20} = \begin{bmatrix} 5,5263 & 5,5263 & 5,5263 \\ 0,4092 & 0,4092 & 0,4092 \\ 1,4387 & 1,4387 & 1,4387 \end{bmatrix} \quad (156)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 2. potahu**

$$\mathbf{C}'_{22} = \begin{bmatrix} C_{22} & C_{22} & C_{22} \\ C_{22} & C_{22} & C_{22} \\ C_{22} & C_{22} & C_{22} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (157)$$

$$\mathbf{C}'_{22} = \begin{bmatrix} 2,0835 & 2,0835 & 2,0835 \\ 2,0835 & 2,0835 & 2,0835 \\ 2,0835 & 2,0835 & 2,0835 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{22} = \begin{bmatrix} 1,5654 & 1,5654 & 1,5654 \\ 1,5654 & 1,5654 & 1,5654 \\ 1,5654 & 1,5654 & 1,5654 \end{bmatrix} \quad (158)$$

**Parciální kapacity mezi fázovými vodiči 2. a 1. potahu**

$$\mathbf{C}'_{21} = \begin{bmatrix} C_{121} & C_{122} & C_{123} \\ C_{122} & C_{123} & C_{121} \\ C_{123} & C_{121} & C_{122} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (159)$$

$$\mathbf{C}'_{21} = \begin{bmatrix} 0,4838 & 0,4838 & 0,7425 \\ 0,4838 & 0,7425 & 0,4838 \\ 0,7425 & 0,4838 & 0,4838 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{21} = \begin{bmatrix} 0,6050 & 0,6050 & 1,0769 \\ 0,6050 & 1,0769 & 0,6050 \\ 1,0769 & 0,6050 & 0,6050 \end{bmatrix} \quad (160)$$

**Parciální kapacity mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 1. potahu**

$$\mathbf{C}'_{01} = \begin{bmatrix} C_{011} & C_{011} & C_{011} \\ C_{021} & C_{021} & C_{021} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (161)$$

$$\mathbf{C}'_{01} = \begin{bmatrix} 1,0647 & 1,0647 & 1,0647 \\ 0,3907 & 0,3907 & 0,3907 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{01} = \begin{bmatrix} 1,4336 & 1,4336 & 1,4336 \\ 0,4110 & 0,4110 & 0,4110 \end{bmatrix} \quad (162)$$

**Parciální kapacity mezi zemnicími lany a fázovými vodiči 2. potahu**

$$\mathbf{C}'_{02} = \begin{bmatrix} C_{012} & C_{012} & C_{012} \\ C_{022} & C_{022} & C_{022} \end{bmatrix} \text{ (nF/km)} \quad (163)$$

$$\mathbf{C}'_{02} = \begin{bmatrix} 0,3892 & 0,3892 & 0,3892 \\ 1,0682 & 1,0682 & 1,0682 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}'_{02} = \begin{bmatrix} 0,4092 & 0,4092 & 0,4092 \\ 1,4387 & 1,4387 & 1,4387 \end{bmatrix} \quad (164)$$

Na základě rozboru vypočtených hodnot lze konstatovat, že stožárová konstrukce Dunaj 2012 vykazuje u kapacit fázových vodičů proti zemi a parciálních kapacit mezi fázovými vodiči a zemnicími lany, respektive mezi fázovými vodiči z rozdílných potahů menší hodnotu. Naopak je tomu u parciálních kapacit mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů. Z uvedeného vyplývá, že při totožném zatížení vedení budou v případě použití stožárových konstrukcí Dunaj 2012 nabývat indukované proudy do fázových vodičů větší hodnoty a naopak do zemnicích lan menší hodnoty.

### 5.5.3 Vzájemné porovnání

Na základě porovnání vypočtených hodnot pro netransponované a ideálně transponované vedení lze konstatovat, že v případě stožárové konstrukce Dunaj 2012 vykazuje ideálně transponované vedení větší hodnoty u většiny parciálních kapacit mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů a mezi fázovými vodiči a zemnicími lany. Naopak je tomu u kapacit fázových vodičů proti zemi a parciálních kapacit mezi fázovými vodiči obou potahů. Z uvedeného vyplývá, že při totožném zatížení vedení budou v případě ideálně transponovaného vedení nabývat indukované proudy do fázových vodičů a zemnicích lan větší hodnoty při současné menší nesymetrii.

V případě stožárové konstrukce Soudek 2014 vykazuje ideálně transponované vedení větší hodnoty u většiny kapacit fázových vodičů proti zemi a parciálních kapacit mezi fázovými vodiči a zemnicími lany. Naopak je tomu u většiny parciálních kapacit mezi fázovými vodiči v rámci jednotlivých potahů i mezi fázovými vodiči obou potahů. Z tohoto lze tedy vyvodit závěr, že při totožném zatížení vedení budou v případě ideálně transponovaného vedení nabývat indukované proudy do fázových vodičů menší hodnoty a naopak do zemnicích lan větší hodnoty, v obojím při současné menší nesymetrii.

## 6. Modelování venkovního vedení

Při modelování řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany byly učiněny následující zjednodušující předpoklady. V celé délce trasy vedení platí, že:

- Je použit stejný typ fázových vodičů, zemnicího lana i kombinovaného zemnicího lana.
- Parciální vodiče ve svazku jsou drženy rozpěrkami ve stejné vzájemné vzdálenosti.
- Vodiče nejsou vychýleny vlivem žádné poruchy ani povětrnostních podmínek ze svislé polohy vůči zemi.
- Vodiče jsou ve stále stejné výšce nad zemí odpovídající místu uchycení na stožáru - zanedbána vzdálenost místa uchycení na izolátorovém řetězci od stožárové konstrukce a průhyb vodičů v rozpětí mezi závěsnými body.
- Povrch země je uvažován jako dokonale rovný.
- Jsou použity stejné druhy a typy stožárů.
- Je zanedbán rozdíl mezi nosnými a kotevními stožáry, popřípadě mezi zákrutovými stožáry či dalšími typy stožárů.
- Jsou zanedbány rozdílné výšky stožárových konstrukcí.
- Je zanedbán vliv stožárové konstrukce na rozložení elektromagnetického pole a tedy na pasivní parametry vedení.
- Jsou zanedbány krátké úseky vedení v okolí zákrutových stožárů, ve kterých dochází k samotné transpozici, a portálových konstrukcí při zaústění vedení do rozvodny.
- Je zanedbán vliv případných okolních objektů, ostatních elektrických zařízení či dalších elektrických vedení.
- Je uvažováno pouze dvojité vedení (nepřejde na jednoduché, nebo vícenásobné vedení).
- Je uvažována přímá trasa vedení, bez křížení s ostatními vedeními.
- Je uvažována stejná provozní teplota vodičů.
- Jsou uvažovány stejné atmosférické podmínky a stejné izolační vlastnosti.
- Je uvažována stejná vodivost půdy.



## 6.1 Model tvořený kaskádou dvojbranů

Dále popsaný model dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany vznikl na základě modifikace modelu kombinovaného vedení publikovaného v práci [11].

Každý fázový vodič netransponovaného vedení je modelován kaskádou netransponovaných elementů –  $\Gamma$  článků, kde hodnoty pasivních parametrů a zdrojů indukovaného napětí a proudu odpovídají geometrickému uspořádání vodičů na stožáru, potažmo hodnotě procházejícího proudu a přiloženého napětí proti zemi.

Tohoto je využito i v případě reálně transponovaného vedení. Jeho každý úsek mezi dvěma zákruty je totiž modelován jako dílčí netransponované vedení a efekt transpozice je postihnout pomocí cyklicky se měnících vazeb. Tento přístup umožňuje modelovat transponované vedení jak s libovolnými typy provedených zákrutů, tak i jejich umístěním v trase vedení, což umožní věrohodněji se přiblížit zkoumané realitě.

Naopak u ideálně transponovaného vedení je každý fázový vodič modelován kaskádou ideálně transponovaných elementů, kde hodnoty vlastních a vzájemných indukčností a kapacit proti zemi a parciálních kapacit mezi dvěma vodiči jsou dány aritmetickým průměrem (viz subkapitoly 4.3.2 a 4.4.1).

V této práci byly spolu s netransponovaným vedením modelovány i tři typy vedení transponovaných shodně se třemi současnými zákruty na každém z potahů. V těchto případech tedy dochází k rozdělení modelovaných vedení zákruty na čtyři úseky (dále označované jako 1, 2, 3 a 4). Z tohoto důvodu je každý vodič ve vytvořeném modelu tvořen kaskádou čtyř  $\Gamma$  článků. Toto umožňuje postihnout převážnou většinu případů transpozic vyskytujících se v české přenosové soustavě (viz podkapitola 3.5). Z důvodu zachování stejné přesnosti řešení i v případě netransponovaného vedení a možnosti jejich vzájemného porovnání byl shodně každý vodič modelován kaskádou čtyř  $\Gamma$  článků.

Celkový počet dvojbranů v modelu vedení  $N$  je dán vztahem:

$$N = K \cdot (m_{FV} + m_{ZL} + m_g) \quad (165)$$

kde  $K$  je počet dvojbranů v kaskádě,

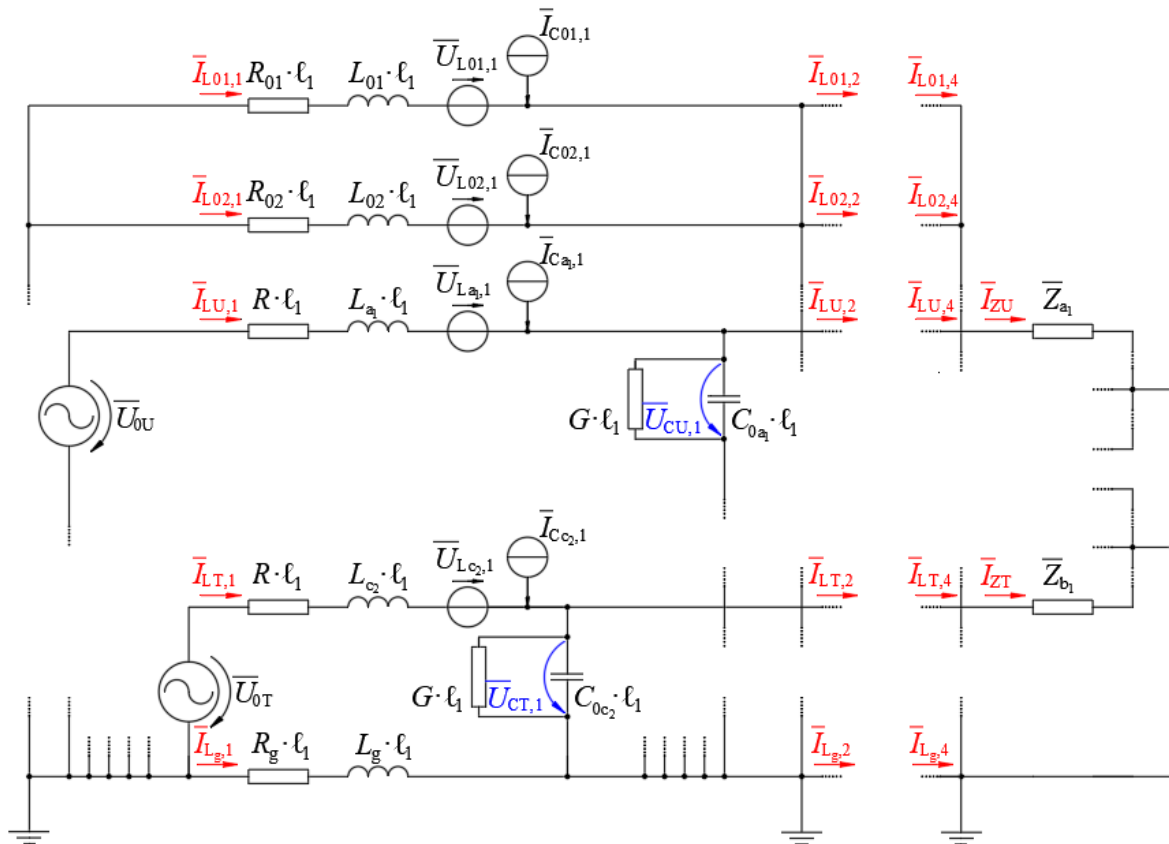
$m_g$  je počet fiktivních zemních vodičů.

Pro řešené vedení platí, že:

$$N = 4 \cdot (6 + 2 + 1) = 36 \quad (166)$$

Vytvořený matematický model může být použit pro libovolnou stožárovou konstrukci dvojitého vedení se dvěma třífázovými systémy a dvěma zemnicími lany.

Na Obr. 23 je naznačen obvodový model netransponovaného vedení.



**Obr. 23:** Naznačení obvodového modelu vedení

Na začátku každého fázového vodiče vedení je připojen ideální symetrický napěťový zdroj  $\bar{U}_{0i}$  (vnitřní impedance zdroje je nulová) s konstantní amplitudou rovnou vrcholové hodnotě fázového napětí tj.  $\sqrt{2} \cdot 400 \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 326,6$  kV a frekvencí 50 Hz. Případná impedance charakterizující část elektrické sítě mezi zdrojem a místem napájení řešeného vedení je rovněž uvažována jako nulová. Uzel zdrojů je spojen do hvězdy.

Ve všech případech byl uvažován paralelní provoz dvojitého vedení, z čehož vyplývá, že napěťové zdroje ve fázi U a R jsou stejné, obdobně ve fázích V a S a W a T a velikost třífázové symetrické zátěže  $\bar{Z}_i$  je u obou vedení totožná (přenášejí stejný výkon).

Na konci vedení je připojena symetrická zátěž čistě ohmického charakteru v zapojení do hvězdy. Její velikost odpovídá požadovanému přenášenému výkonu. Lze ji chápat jako zavlčenou impedanci přepočtenou přes transformátor v zapojení do uzemněné hvězdy představující veškerá zařízení, která jsou pomocí tohoto vedení napájena.

Je rovněž uvažováno dokonalé uzemnění uzlu zdrojů a zátěže pomocí ideálního vodiče.

## 6.2 Matematický model vedení

Matematický model řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany byl vytvořen na základě sestaveného obvodového modelu (viz předchozí podkapitola 6.1) přímou aplikací Kirchhoffových zákonů (dále jen K. z.) na všechny nezávislé uzly a smyčky.

Neznámými veličinami jsou jednotlivé proudy procházející dílčími elementy všech vodičů skrze vlastní indukčnosti spolu s fázovými proudy připojené zátěže (na Obr. 23 vyznačené červeně) a napětí na kapacitách proti zemi v dílčích elementech fázových vodičů (na Obr. 23 znázorněné modře). V případě každého elementu zemnicího lana, respektive kombinovaného zemnicího lana a fiktivního zemního vodiče je třeba určit pouze jednu neznámou veličinu – proud procházející vlastní indukčností vodiče. Obdobně je tomu i u zátěže, kde je třeba stanovit hodnotu fázového proudu. U každého elementu fázového vodiče je třeba určit dvě neznámé veličiny - proud vlastní indukčností a napětí na kapacitě proti zemi.

Celkový počet formulovaných rovnic  $M$  pro popis takto modelovaného vedení odpovídající počtu neznámých veličin lze tedy určit jako:

$$M = K \cdot (2 \cdot m_{FV} + 2 \cdot m_{ZL} + 1 \cdot m_g) \quad (167)$$

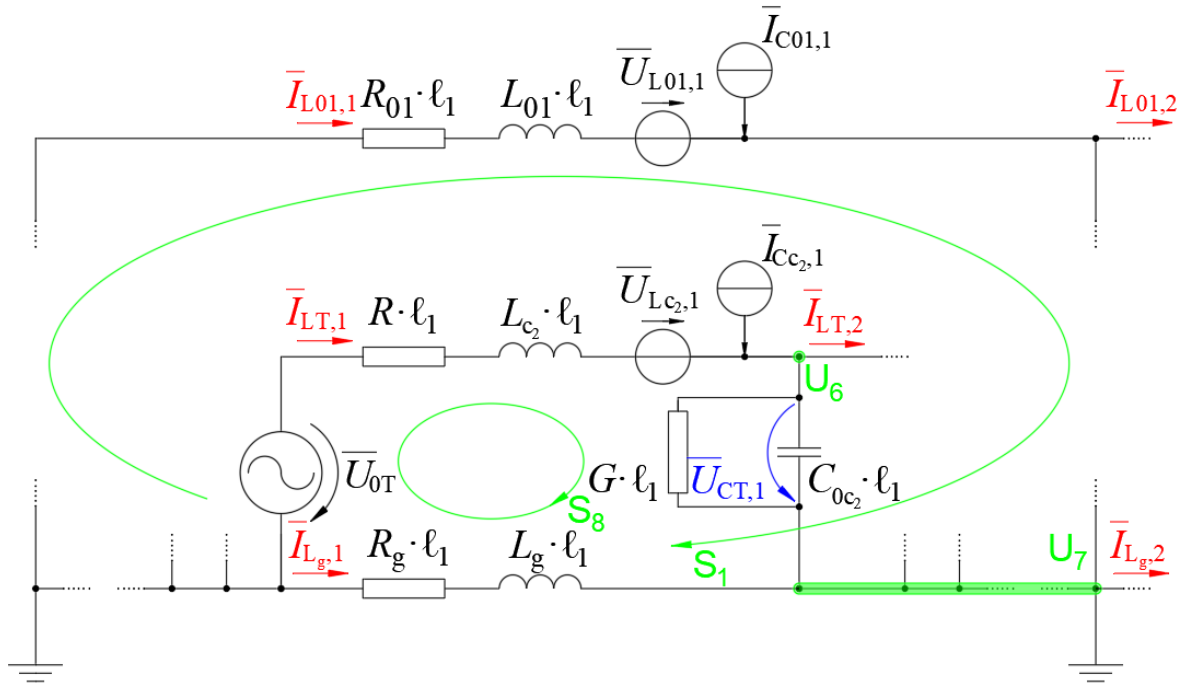
Pro řešené vedení je tedy nutno formulovat:

$$M = 4 \cdot (2 \cdot 6 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1) = 60 \quad (168)$$

Při započtení 6 rovnic pro zátěž (6 neznámých veličin na zátěži – fázových proudů) je tedy celkem nutné formulovat 66 lineárně nezávislých algebraických rovnic s komplexními koeficienty. Neznámými veličinami je 42 větvových proudů (36 na vedení a 6 na zátěži) a 24 neznámých větvových napětí.

Výše definovaný obvodový model je tvořen celkem 28 nezávislými uzly a 38 nezávislými smyčkami. Lze tedy sestavit 28 rovnic podle 1. K. z. a 38 rovnic podle 2. K. z.

Na následujícím odvození je ukázán postup při tvorbě matematického modelu řešeného vedení pro případ netransponované varianty pomocí přímé aplikace K. z. Vztahy (169) až (176) vztahující se k Obr. 24 se věnují samotnému začátku vedení - úseku modelu vedení se zdroji.



**Obr. 24:** Naznačení popisu obvodového modelu vedení pomocí K. z.- úsek se zdrojem

2. K. z. pro smyčku element zemnicího lana, respektive kombinovaného zemnicího lana – element fiktivního zemního vodiče  $k$ -tého úseku vedení:

$$\begin{aligned} R_{0i} \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{L0i,k} + j\omega L_{0i} \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{L0i,k} + \bar{U}_{L0i,k} - j\omega L_g \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{Lg,k} \\ - R_g \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{Lg,k} = 0 \end{aligned} \quad (169)$$

kde indexy  $i = 1, 2$ ;

$$k = 1, 2, 3, 4.$$

Např. pro smyčku  $S_1$ :

$$\begin{aligned} R_{01} \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{L01,1} + j\omega L_{01} \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{L01,1} + \bar{U}_{L01,1} - j\omega L_g \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{Lg,1} \\ - R_g \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{Lg,1} = 0 \end{aligned} \quad (170)$$

2. K. z. pro smyčku element  $i$ -tého fázového vodiče – element fiktivního zemního vodiče  $k$ -tého úseku vedení:

$$\begin{aligned} R \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{Lj,k} + j\omega L_i \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{Lj,k} + \bar{U}_{Li,k} + \bar{U}_{Cj,k} - j\omega L_g \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{Lg,k} \\ - R_g \cdot \ell_k \cdot \bar{I}_{Lg,k} - \bar{U}_{Cj,k-1} = 0 \end{aligned} \quad (171)$$

kde indexy  $i = a_1, b_1, \dots$ ;

$$j = U, V, \dots;$$

$$k = 1, 2, 3, 4.$$

Pro  $k = 1$  je  $\bar{U}_{Cj,k-1} = \bar{U}_{0j}$ .

Např. pro smyčku  $S_8$ :

$$\begin{aligned} R \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{LT,1} + j\omega L_{C_2} \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{LT,1} + \bar{U}_{LC_2,1} + \bar{U}_{CT,1} - j\omega L_g \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{Lg,1} \\ - R_g \cdot \ell_1 \cdot \bar{I}_{Lg,1} - \bar{U}_{0T} = 0 \end{aligned} \quad (172)$$

1. K. z. pro uzel mezi elementem  $i$ -tého fázového vodiče  $k$ -tého úseku vedení a elementem  $i$ -tého fázového vodiče  $(k + 1)$ -tého úseku vedení:

$$\bar{I}_{Lj,k} + \bar{I}_{Ci,k} - j\omega C_{0i} \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k} - G \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k} - \bar{I}_{Lj,k+1} = 0 \quad (173)$$

kde indexy  $i = a_1, b_1, \dots$ ;

$j = U, V, \dots$ ;

$k = 1, 2, 3, 4$ .

Např. pro uzel  $U_6$ :

$$\bar{I}_{LT,1} + \bar{I}_{Cc_2,1} - j\omega C_{0c_2} \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CT,1} - G \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CT,1} - \bar{I}_{LT,2} = 0 \quad (174)$$

1. K. z. pro uzel mezi elementem fiktivního zemního vodiče  $k$ -tého úseku vedení a elementem fiktivního zemního vodiče  $(k + 1)$ -tého úseku vedení:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Lg,k} + \sum_{l=1}^2 \bar{I}_{L0l,k} + \bar{I}_{C0l,k} \\ + \sum_{i=a_1, b_1, \dots; j=U, V, \dots}^{c_2; T} (j\omega C_{0i} \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k} + G \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k}) - \bar{I}_{Lg,k+1} = 0 \end{aligned} \quad (175)$$

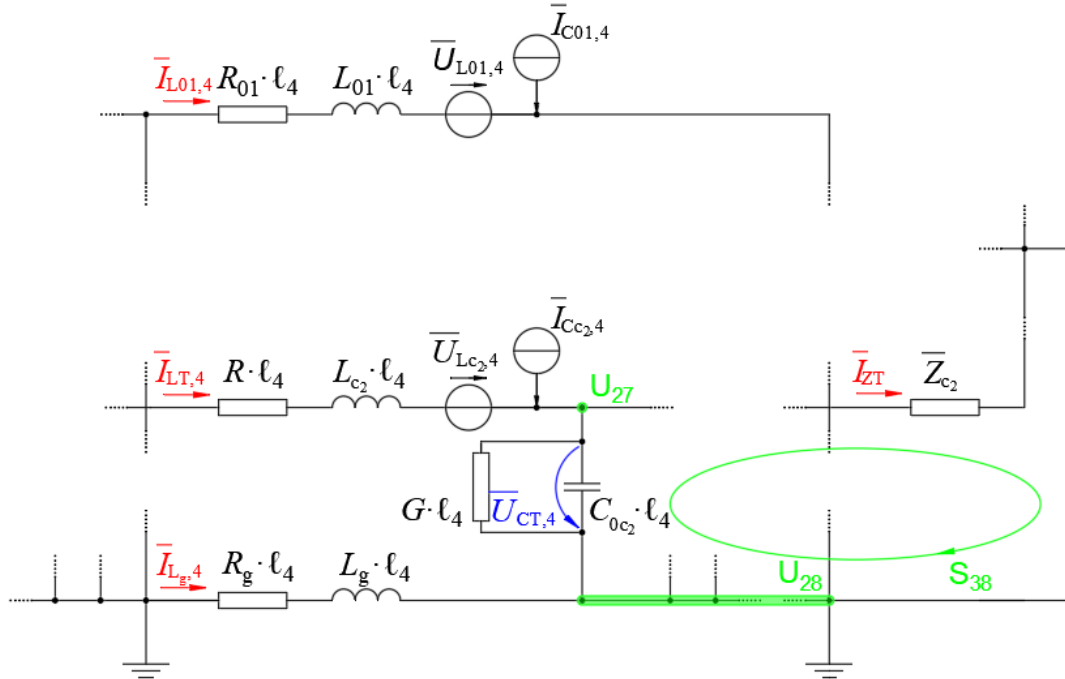
kde index  $k = 1, 2, 3, 4$ .

Např. pro uzel  $U_7$ :

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Lg,1} + \bar{I}_{L01,1} + \bar{I}_{C01,1} + \bar{I}_{L02,1} + \bar{I}_{C02,1} + j\omega C_{0a_1} \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CU,1} \\ + G \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CU,1} + j\omega C_{0b_1} \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CV,1} + G \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CV,1} + j\omega C_{0c_1} \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CW,1} \\ + G \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CW,1} + j\omega C_{0a_2} \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CR,1} + G \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CR,1} + j\omega C_{0b_2} \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CS,1} \\ + G \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CS,1} + j\omega C_{0c_2} \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CT,1} + G \cdot \ell_1 \cdot \bar{U}_{CT,1} - \bar{I}_{Lg,2} = 0 \end{aligned} \quad (176)$$

Analogickým způsobem lze formulovat i rovnice pro úsek vedení mezi jeho začátkem a koncem, tedy pro  $k = 2$  a  $3$ . Vzhledem k pouze malé odlišnosti od počátečního úseku vedení není tomuto úseku v této práci věnováno více prostoru.

Vztahy (177) až (182) vycházející z Obr. 25 popisují samotnou oblast konce vedení s připojenou zátěží - úsek modelu vedení se zátěží.



**Obr. 25:** Naznačení popisu obvodového modelu vedení pomocí K. z.- úsek se zátěží

2. K. z. pro smyčku zátěž  $i$ -té fáze vedení - ideální střední vodič zátěže:

$$\bar{Z}_i \cdot \bar{I}_{Zj} - \bar{U}_{Cj,4} = 0 \quad (177)$$

kde indexy  $i = a_1, b_1, \dots;$

$j = U, V, \dots$

Např. pro smyčku  $S_{38}$ :

$$\bar{Z}_{c_2} \cdot \bar{I}_{ZT} - \bar{U}_{CT,4} = 0 \quad (178)$$

1. K. z. pro uzel mezi posledním  $k$ -tým elementem  $i$ -tého fázového vodiče a zátěží  $i$ -té fáze vedení:

$$\bar{I}_{Lj,k} + \bar{I}_{Ci,k} - j\omega C_{0i} \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k} - G \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k} - \bar{I}_{Zj} = 0 \quad (179)$$

kde indexy  $i = a_1, b_1, \dots;$

$j = U, V, \dots;$

$k = 1, 2, 3, 4.$

Např. pro uzel  $U_{27}$ :

$$\bar{I}_{LT,4} + \bar{I}_{Cc_2,4} - j\omega C_{0c_2} \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CT,4} - G \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CT,4} - \bar{I}_{ZT} = 0 \quad (180)$$

1. K. z. pro uzel mezi posledním elementem fiktivního zemního vodiče a ideálním středním vodičem zátěže:

$$\begin{aligned} & \bar{I}_{Lg,k} + \sum_{l=1}^2 \bar{I}_{L0l,k} + \bar{I}_{C0l,k} \\ & + \sum_{i=a_1, b_1, \dots; j=U, V, \dots}^{c_2; T} (j\omega C_{0i} \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k} + G \cdot \ell_k \cdot \bar{U}_{Cj,k}) + \sum_{j=U, V, \dots}^T \bar{I}_{Zi} = 0 \end{aligned} \quad (181)$$

kde index  $k = 1, 2, 3, 4$ .

Pro jediný uzel tohoto typu  $U_{28}$  platí:

$$\begin{aligned} & \bar{I}_{Lg,4} + \bar{I}_{L01,4} + \bar{I}_{C01,4} + \bar{I}_{L02,4} + \bar{I}_{C02,4} + j\omega C_{0a_1} \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CU,1} + G \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CU,4} \\ & + j\omega C_{0b_1} \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CV,4} + G \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CV,4} + j\omega C_{0c_1} \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CW,4} + G \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CW,4} \\ & + j\omega C_{0a_2} \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CR,4} + G \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CR,4} + j\omega C_{0b_2} \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CS,4} + G \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CS,4} \\ & + j\omega C_{0c_2} \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CT,4} + G \cdot \ell_4 \cdot \bar{U}_{CT,4} + \bar{I}_{ZU} + \bar{I}_{ZV} + \bar{I}_{ZW} + \bar{I}_{ZR} + \bar{I}_{ZS} + \bar{I}_{ZT} = 0 \end{aligned} \quad (182)$$

### 6.3 Numerické řešení matematického modelu vedení

K řešení vytvořeného matematického modelu (viz předcházející podkapitola 6.2) byl použit počítačový program MATLAB. Z tohoto důvodu bylo nutné formulovanou soustavu rovnic převést do maticové podoby (184). Tomuto kroku předcházela samotná úprava rovnic, kdy na jedné straně rovnic byly osamostatněny neznámé veličiny násobené jejich příslušnými koeficienty a na druhé straně zdrojové veličiny.

Např. pro rozepsanou rovnici formulovanou pro smyčku  $S_1$  řešeného vedení (viz (170)):

$$\begin{aligned} & (R_{01} \cdot \ell_1 + j\omega L_{01} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{L01,1} + (j\omega L_{01a_1} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{LU,1} \\ & + (j\omega L_{01b_1} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{LV,1} + (j\omega L_{a_1c_1} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{LW,1} + (j\omega L_{01a_2} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{LR,1} \\ & + (j\omega L_{01b_2} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{LS,1} + (j\omega L_{01c_2} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{LT,1} + (j\omega L_{0102} \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{L02,1} \\ & + (-j\omega L_g \cdot \ell_1 - R_g \cdot \ell_1) \cdot \bar{I}_{Lg,1} = 0 \end{aligned} \quad (183)$$

Analogicky pro ostatní rovnice.

Takto upravenou soustavu rovnic lze maticově zapsat jako:

$$\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{b}} \quad (184)$$

kde  $\underline{\mathbf{A}}(M, M)$  je čtvercová matice soustavy (koeficientů),  
 $\underline{\mathbf{x}}(M, 1)$  je sloupcový vektor neznámých (proměnných),  
 $\underline{\mathbf{b}}(M, 1)$  je sloupcový vektor pravých stran (zdrojů).

V této práci má uvedená matice, respektive vektory následující podobu:

Matici  $\underline{\mathbf{A}}$  lze formálně vyjádřit jako:

$$\underline{\mathbf{A}}(M, M) = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{11} & \bar{\mathbf{A}}_{12} & \dots & \bar{\mathbf{A}}_{1M} \\ \bar{\mathbf{A}}_{21} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \bar{\mathbf{A}}_{M1} & \dots & \dots & \bar{\mathbf{A}}_{MM} \end{bmatrix} \quad (185)$$

kde:  $\bar{\mathbf{A}}_{11}, \bar{\mathbf{A}}_{12},$  atd. jsou jednotlivé submatice matice  $\underline{\mathbf{A}}$ .

Vektor neznámých proudů  $\underline{\mathbf{I}}_{Li}$   $k$ -tého úseku vedení lze zapsat:

$$\underline{\mathbf{I}}_{Li,k}(m_{FV} + m_g, 1) = \{\bar{I}_{L01,k}, \bar{I}_{L02,k}, \bar{I}_{LU,k}, \bar{I}_{LV,k}, \dots, \bar{I}_{Lg,k}\}^T \quad (186)$$

Vektor neznámých napětí  $\underline{\mathbf{U}}_{Ci}$   $k$ -tého úseku vedení je dán jako:

$$\underline{\mathbf{U}}_{Ci,k}(m_{FV}, 1) = \{\bar{U}_{CU,k}, \bar{U}_{CV,k}, \dots, \bar{U}_{CT,k}\}^T \quad (187)$$

Vektor neznámých  $\underline{\mathbf{x}}$   $k$ -tého úseku vedení lze poté formulovat způsobem:

$$\underline{\mathbf{x}}_k(2 \cdot m_{FV} + m_g, 1) = [\underline{\mathbf{I}}_{Li,k}, \underline{\mathbf{U}}_{Ci,k}]^T \quad (188)$$

Vektor neznámých proudů zátěže  $\underline{\mathbf{I}}_{Zi}$  lze sestavit:

$$\underline{\mathbf{I}}_{Zi}(m_{FV}, 1) = \{\bar{I}_{ZU}, \bar{I}_{ZV}, \dots, \bar{I}_{ZT}\}^T \quad (189)$$

Sloupcový vektor neznámých  $\underline{\mathbf{x}}$  je definován ve tvaru:

$$\underline{\mathbf{x}}(M, 1) = [\underline{\mathbf{x}}_1, \underline{\mathbf{x}}_2, \dots, \underline{\mathbf{I}}_{Zi}]^T \quad (190)$$

Sloupcový vektor pravých stran  $\underline{\mathbf{b}}$  lze formálně vyjádřit jako:

$$\underline{\mathbf{b}}(M, 1) = [\bar{b}_{11} \quad \bar{b}_{21} \quad \dots \quad \bar{b}_{M1}]^T \quad (191)$$

kde:  $\bar{b}_{11}, \bar{b}_{12},$  atd. jsou jednotlivé prvky vektoru  $\underline{\mathbf{b}}$ .

Např. pro rovnici (183) (rozepsaná rovnice formulovaná pro smyčku  $S_1$  řešeného vedení (viz (170)):

Submatice  $\underline{\mathbf{A}}_1$  (192) vyjadřující vztah mezi vektorem neznámých proudů 1. úseku vedení  $\underline{\mathbf{I}}_{Li,1}$  (193) a příslušným sloupcovým vektorem pravých stran  $\underline{\mathbf{b}}_1$  (194):

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{A}}_1 = \{ & R_{01} \cdot \ell_1 + j\omega L_{01} \cdot \ell_1, j\omega L_{0102} \cdot \ell_1, j\omega L_{01a_1} \cdot \ell_1, j\omega L_{01b_1} \cdot \ell_1, \\ & j\omega L_{a_1c_1} \cdot \ell_1, j\omega L_{01a_2} \cdot \ell_1, j\omega L_{01b_2} \cdot \ell_1, j\omega L_{01c_2} \cdot \ell_1, j\omega L_{0102} \cdot \ell_1, \\ & -j\omega L_g \cdot \ell_1 - R_g \cdot \ell_1 \} \end{aligned} \quad (192)$$



$$\underline{\mathbf{L}}_{Li,1} = \left\{ \bar{I}_{L01,1}, \bar{I}_{L02,1}, \bar{I}_{LU,1}, \bar{I}_{LV,1}, \bar{I}_{LW,1}, \bar{I}_{LR,1}, \bar{I}_{LS,1}, \bar{I}_{LT,1}, \bar{I}_{Lg,1} \right\}^T \quad (193)$$

$$\underline{\mathbf{b}}_1 = \{0\} \quad (194)$$

Řešení soustavy rovnic se poté získá pomocí předpisu:

$$\underline{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{A}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{b}} \quad (195)$$

V softwaru MATLAB byla k tomuto použita knihovní funkce – lomítkový operátor „\“ (zpětné lomítko), tedy:

$$\underline{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{A}} \backslash \underline{\mathbf{b}} \quad (196)$$

Podle textu [12] není v případě použití lomítkového operátoru při výpočtu explicitně vyčíslena inverzní matice k matici  $\underline{\mathbf{A}}$ , což obvykle zvyšuje robustnost příkazu a zkracuje dobu řešení. Podle vlastností matice  $\underline{\mathbf{b}}$  jsou pak díky sofistikovanému algoritmu voleny vhodné řešiče. V případě symetrické matice  $\underline{\mathbf{b}}$  je soustava řešena pomocí Choleského rozkladu, při výskytu obecné čtvercové matice  $\underline{\mathbf{b}}$  je použit LU rozklad. Přítomnost diagonální, pásové, trojúhelníkové či řídké matice  $\underline{\mathbf{b}}$  si vyžádá speciální způsob řešení.

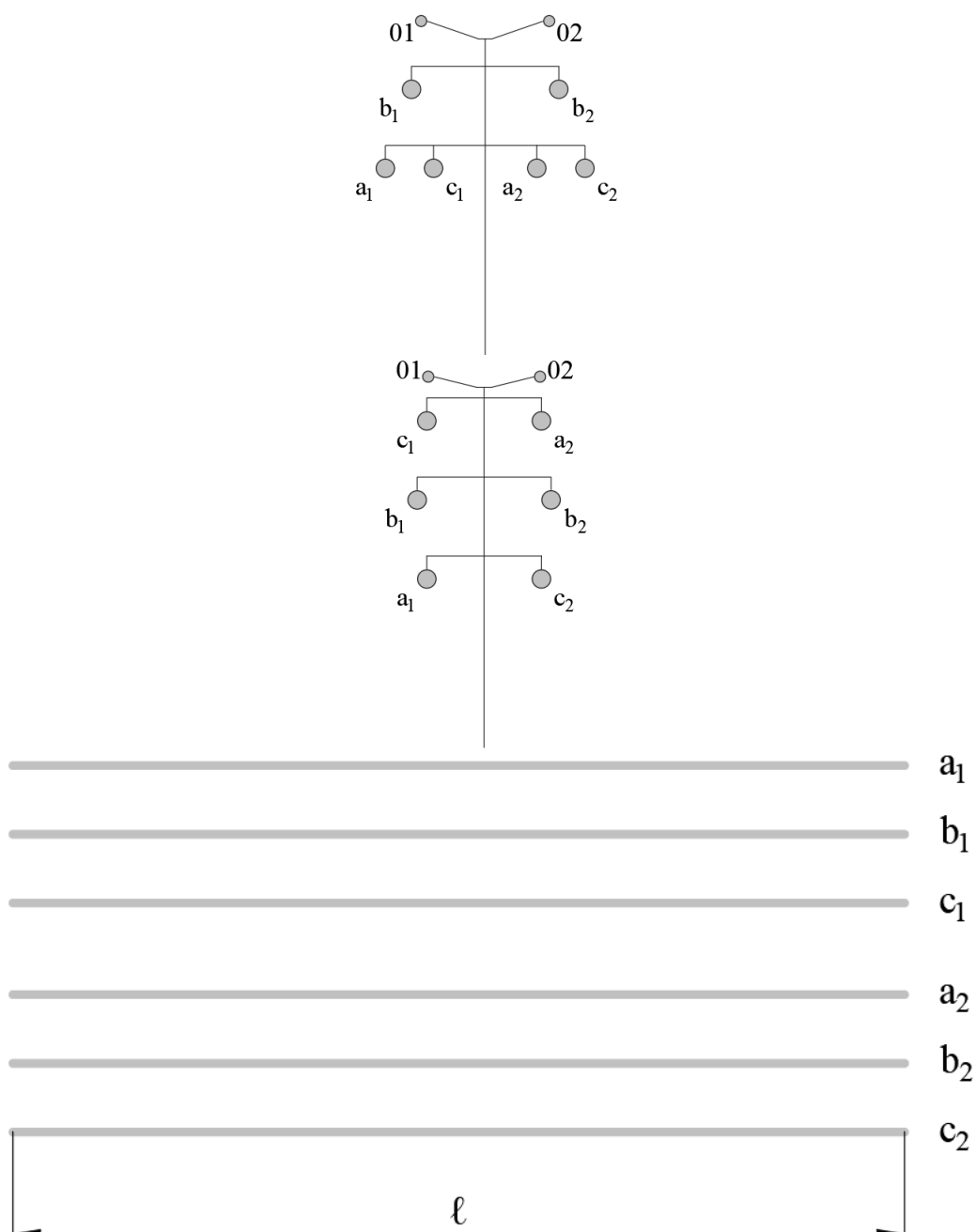
## 6.4 Řešené typy vedení

Jak již bylo dříve předesláno, v této práci jsou spolu s netransponovaným vedením (NTV) (viz Obr. 27) modelovány i tři typy vedení transponovaných shodně se třemi současnými zákruty na každém z potahů. Jedná se o ideálně (ITV) a reálně (RTV) transponované vedení se zákruty po  $1/6 \cdot \ell$ ,  $1/3 \cdot \ell$ ,  $1/3 \cdot \ell$  a  $1/6 \cdot \ell$  trasy řešeného dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany (viz Obr. 28) a reálně transponované vedení s částečnými zákruty (RTV s ČZ) (viz Obr. 29).

Konfigurace fázových vodičů na stožárové konstrukci v celé délce trasy vedení v případě NTV, ITV, RTV a 1. úseku mezi začátkem vedení a 1. zákrutem RTV s ČZ je zvolena dle doporučení formulovaných v publikaci [13] s ohledem na minimální elektrické a magnetické pole v okolí vedení a snížení tak jejich negativního vlivu na okolní prostředí z důvodu dodržení předepsaných hygienických limitů. Bylo zjištěno, že pro stožárové konstrukce Dunaj a Soudek jsou z tohoto hlediska nežádoucí ty konfigurace, kdy jsou shodné fáze obou potahů umístěny symetricky podle osy stožáru (např. U, V, W a T, S, R), nebo jsou shodné fáze blízko u sebe – v pozici u osy

stožáru (např. U a R). Naopak je tomu v případě, kdy jsou vodiče shodných fází obou potahů od sebe co nejdále a vzdálenost různých fází (např. U a S) je co nejmenší.

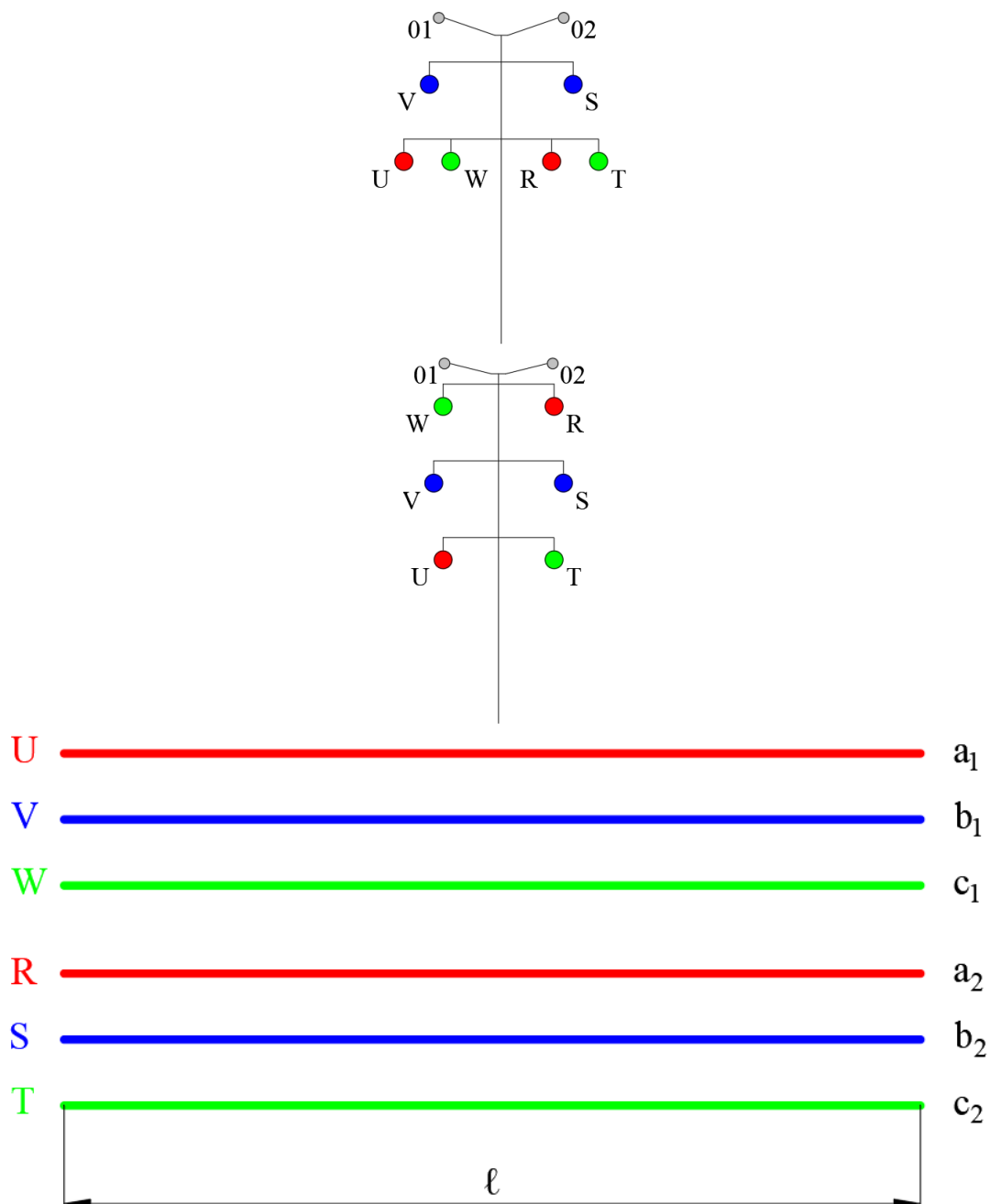
Na Obr. 26 je naznačeno umístění vodičů na pozicích na stožárové konstrukci (Dunaj 2012 nahoře, Soudek 2014 uprostřed) ve vztahu se schematickým znázorněním umístění fázových vodičů vedení z pohledu shora (dole). Tohoto způsobu je v této práci využito pro jednoznačné znázornění řešených typů vedení.



**Obr. 26:** Umístění vodičů na stožárové konstrukci ve vztahu ke schematickému znázornění umístění fázových vodičů vedení z pohledu shora

### 6.4.1 Netransponované vedení

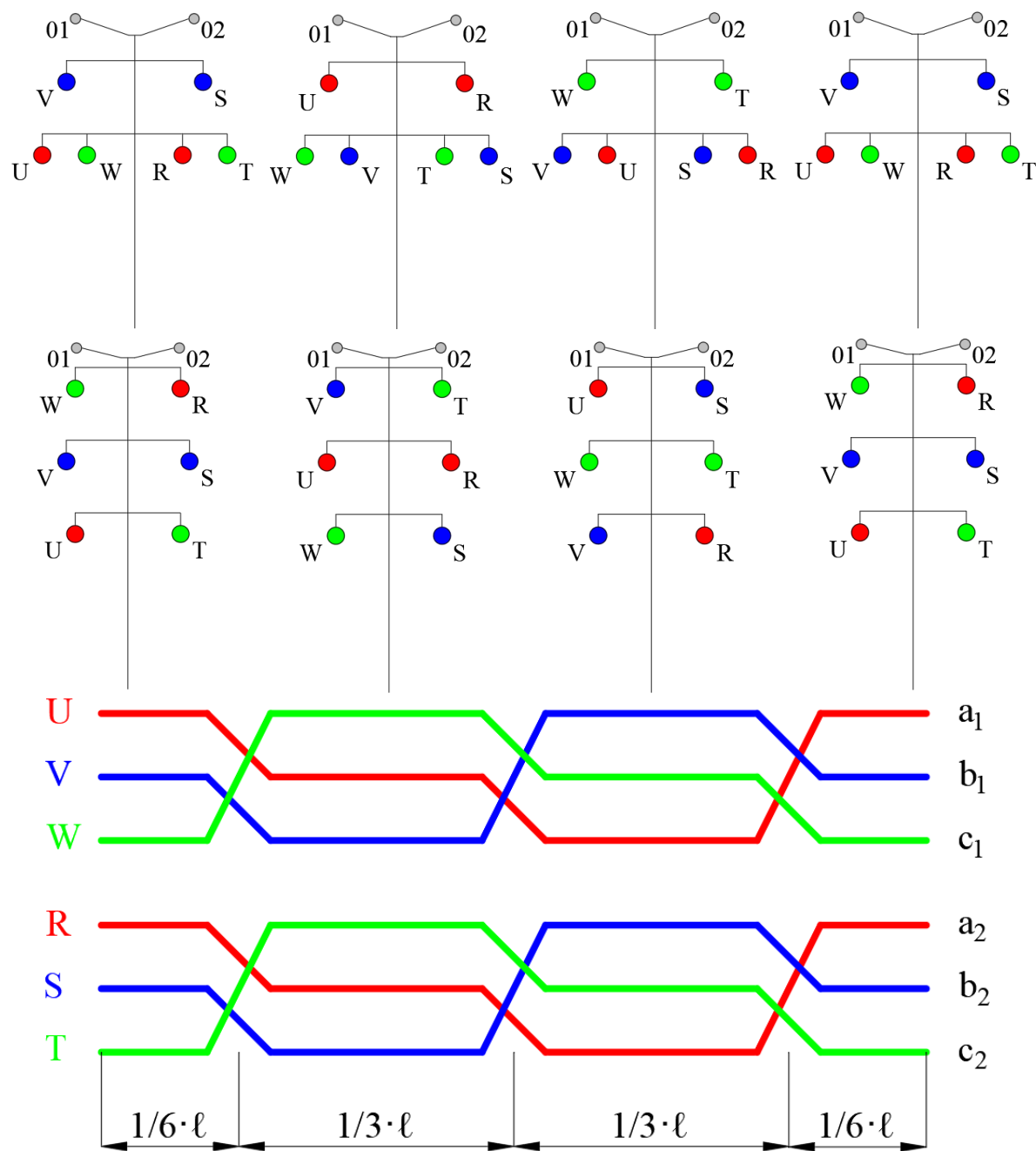
Na Obr. 27 je naznačeno umístění vodičů na pozicích na stožárové konstrukci (Dunaj 2012 nahoře, Soudek 2014 uprostřed) totožné v celé délce trasy NTV o délce  $\ell$  a schematické znázornění umístění fázových vodičů vedení z pohledu shora (dole).



Obr. 27: Netransponované vedení

### 6.4.2 Ideálně a reálně transponované vedení

Na Obr. 28 je naznačeno umístění vodičů na pozicích na stožárové konstrukci (Dunaj 2012 nahoře, Soudek 2014 uprostřed) pro jednotlivé úseky trasy ITV a RTV o délkách  $1/6 \cdot \ell$ ,  $1/3 \cdot \ell$ ,  $1/3 \cdot \ell$  a  $1/6 \cdot \ell$  a schematické znázornění umístění fázových vodičů vedení z pohledu shora (dole).

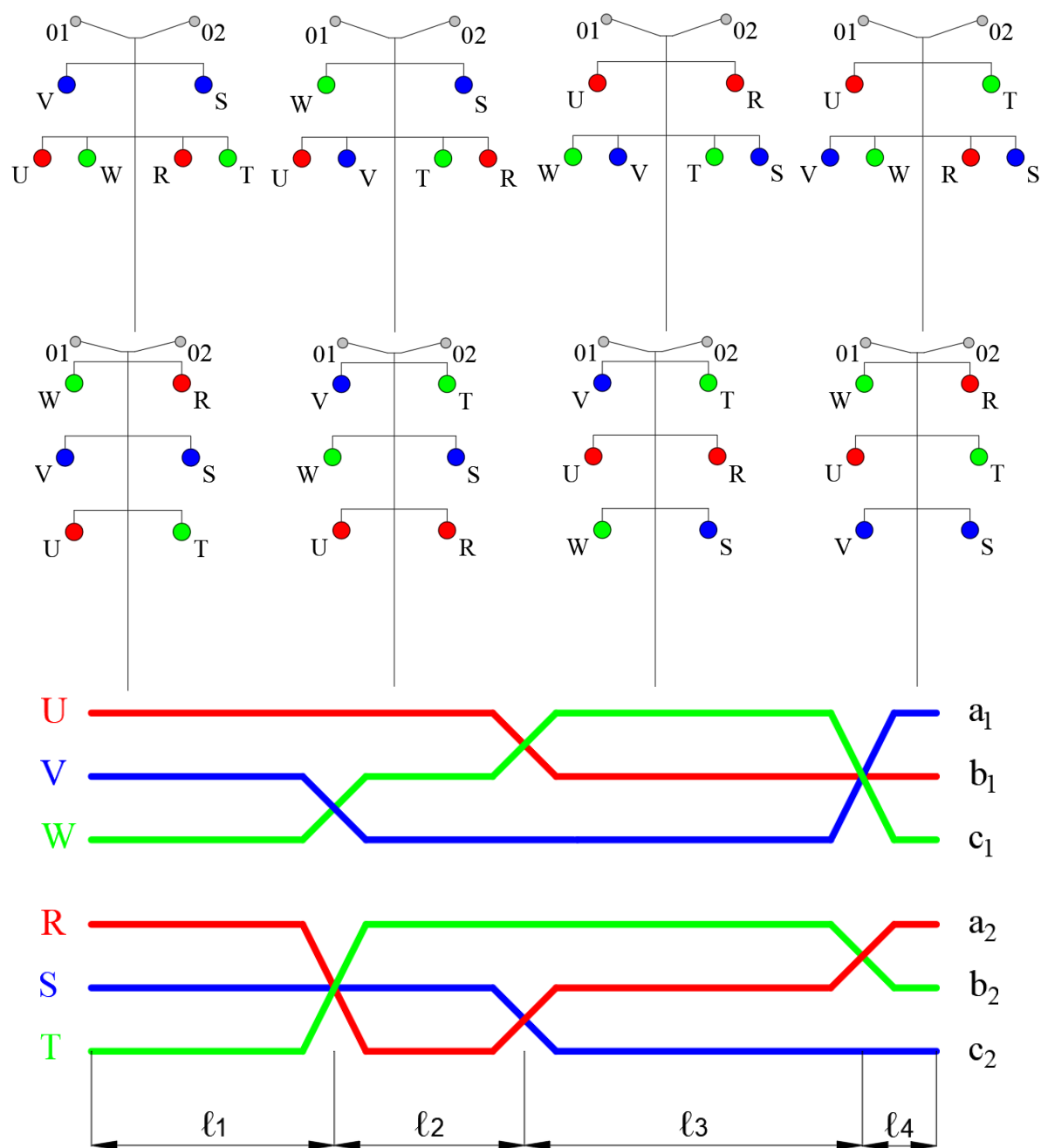


Obr. 28: Ideálně a reálně transponované vedení

### 6.4.3 Reálně transponované vedení s částečnými zákrutami

Na Obr. 29 je naznačeno umístění vodičů na pozicích na stožárové konstrukci (Dunaj 2012 nahoře, Soudek 2014 uprostřed) pro jednotlivé úseky trasy RTV s ČZ o délkách  $l_1 = 0,2875 \cdot \ell$ ,  $l_2 = 0,225 \cdot \ell$ ,  $l_3 = 0,4 \cdot \ell$  a  $l_4 = 0,0875 \cdot \ell$  a schematické znázornění umístění fázových vodičů vedení z pohledu shora (dole).

Z důvodu citlivosti údajů o reálné podobě přenosových vedeních v české přenosové soustavě se jedná pouze o modelový příklad, jež vznikl kombinací několika vyskytujících se částečných zákrutů. Jeho posláním je se co nejvěrohodněji přiblížit zkoumané realitě a demonstrovat možnosti modelu dvojitého vedení se dvěma zemnicemi lany.



Obr. 29: Reálně transponované vedení s částečnými zákrutami

## 7. Ekonomická náročnost provedení transpozice

V této práci nejsou zohledňovány případné zvýšené provozní náklady u transponovaných vedení spojené s údržbou zákrutových stožárů a zejména s jejich výzbrojí a část investičních nákladů za práci montérů a pronájem a provoz stavební techniky.

Jelikož se nároky na provedení transpozice velmi liší dle typu prováděných zákrutů (viz kapitola 3.6), tak činí tento úkol v obecném pojetí velice komplexní a náročný a je proto nutné vždy přihlížet ke konkrétní řešené situaci, což je velice dobře patrné z fotografií jednotlivých zákrutových stožárů v příloze A.

Dále uvedené informace byly vytvořeny kvalifikovaným odhadem na základě údajů poskytnutých společností ČEPS, a.s. a informací sdělených v rámci konzultací se zaměstnanci společnosti ČEPS Invest, a.s. Z důvodu citlivosti těchto údajů jsou jejich hodnoty uváděny pouze rámcově.

Jak již bylo uvedeno, v některých případech není nutné u stožáru provádět větší konstrukční úpravy, v jiných případech je postačující stožár osadit pomocnou konstrukcí – konzolí a upravit uchycení vodičů. V obou těchto případech lze použít klasický kotevní stožár. Zvýšené investiční náklady na materiál se pak pohybují okolo několika tisíc až desítek tisíc Kč. Ve zbývajících případech je použit speciální typ stožáru konstrukčně přímo uzpůsobený pro transpozici fázových vodičů - typizovaný zákrutový stožár. Zde se již náklady pohybují v rozmezí několika desítek tisíc až stovek tisíc Kč.

Dále rostou náklady na spotřebu materiálu na vodiče ve formě přeponek, jimiž je realizována transpozice, oproti klasickým přeponkám u běžných kotevních stožárů. Tento nárůst může být v řádech několika jednotek až desítek metrů. S tím je i spojen vyšší počet rozpěrek umístěných v přeponkách pohybující se v několika kusech. Tyto náklady se mohou pohybovat v několika tisících až deseti tisících Kč.

Při nutnosti instalace pomocných nosných zákrutových izolátorových závěsů a závaží se náklady zvýší o několik desítek až stovek tisíc Kč.

Z uvedeného přehledu položek navyšujících investiční náklady na výstavbu transponovaného vedení a jejich přibližném nacenění je patrné široké rozpětí ve vynaložených nákladech odvíjejících se od konkrétní řešené situace. Zvýšené investiční náklady jednoho zákrutového stožáru oproti klasickému kotevnímu stožáru se tak mohou pohybovat od několika desítek tisíc Kč, v případě varianty s minimálními konstrukčními úpravami a technicky nenáročnými zákruty, až do několika stovek tisíc Kč.

Lze tedy konstatovat, že celkové zvýšené investiční náklady dosáhnou několika stovek tisíc Kč až finanční obnos převyšující 1 milion Kč.

## 7.1 Přibližné stanovení zvýšených investičních nákladů uvažovaných typů transpozic

Zvýšené investiční náklady lze stanovit pouze pro případ transponovaných vedení s jednou z dvojice v této práci uvažovaných stožárových konstrukcí, kterou je typ Dunaj, jelikož u typu Soudek je transpozice fázových vodičů pouze teoretická a nebyla doposud v praxi realizována (viz kapitola 3.5).

### 7.1.1 Ideálně a reálně transponované vedení

Při uvážení, že se v trase ideálně či reálně transponovaného vedení (viz Obr. 28) vyskytují tři zákrutové stožáry shodné s tím, který je zachycen na Obr. 30, tak se celkové zvýšené investiční náklady na výstavbu vedení pohybují okolo 1,140 mil. Kč. Ty jsou vynaloženy u jednoho tohoto zákrutového stožáru, kterým je klasický kotevní stožár na širší horní konzole nesoucí po jednom fázovém vodiči obou potahů, pomocné konzole pro uchycení celkem 7 pomocných nosných zákrutových izolátorových závěsů s 21 závažími a přibližně na 330 m vodiče (počet rozpěrek v přeponkách je přibližně stejný jako u klasických přeponek běžných kotevních stožárů).



**Obr. 30:** Zákrutový stožár typu Dunaj s úplným zákrutem na obou potazích [2]

### 7.1.2 Reálně transponované vedení s částečnými zákruty

V trase transponovaného vedení s částečnými zákruty lze použít o poznání méně vyzbrojené zákrutové stožáry, jež se v některých případech mohou podobat tomu, který je zobrazen na Obr. 31. Celkové zvýšené investiční náklady na výstavbu v této práci řešeného reálně transponovaného vedení s částečnými zákruty (viz Obr. 29) se pohybují okolo 580 tis. Kč. Všechny tři zákrutové stožáry jsou klasickými kotevními stožáry bez větších konstrukčních úprav. U dvou z nich je provedena částečná transpozice v rámci dolního a horního vodiče na jednom potahu a dvou dolních vodičů na druhém potahu. U každého je tedy navíc potřeba 1 pomocná konzole pro uchycení celkem 2 pomocných nosných zákrutových izolátorových závěsů s 6 závažími, přibližně 95 m vodiče a 4 rozpěrky. U třetího kotevního stožáru je provedena částečná transpozice v rámci dvou dolních vodičů na obou potazích. To si vyžádá navíc 2 pomocné konzole pro uchycení celkem 4 pomocných nosných zákrutových izolátorových závěsů s 12 závažími a přibližně 110 m vodiče a 4 rozpěrky.



**Obr. 31:** Zákrutový stožár typu Dunaj s částečným zákrutem na obou potazích [2]



## 8. Analýza nesymetrie v závislosti na přenášeném výkonu a délce vedení

V podkapitole 8.1 jsou uvedeny závislosti činitelů nesymetrie proudů zátěže  $p_{21}$  a  $3 \cdot p_{01}$  používané v normě PNE 33 3300 k hodnocení nesymetrie v případě netransponovaného vedení (viz 6.4.1) pro typové délky 10, 20, 30, 50, 70 a 100 km se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 (viz 8.1.1) a Soudek 2014 (viz 8.1.2) na velikosti přenášeného výkonu v rozsahu od 200 MW do maximálního dovoleného přenášeného výkonu odpovídajícího maximální proudové zatížitelnosti vedení 2500 A (dále jen maximální dovolený přenášený výkon). V případě, že nejvyšší z činitelů nesymetrie proudů zátěže překročí mezní velikost udávanou normou o hodnotě 5 %, tak je tato hranice v příslušných grafech pro názornost rovněž vyznačena.

Dále jsou v podkapitole 8.2 uvedeny závislosti mezního přenášeného výkonu netransponovaného vedení a všech třech typů transponovaného vedení (viz 6.4), při jehož nepřekročení nenabývá nejvyšší z činitelů nesymetrie proudů zátěže velikosti větší než normou udávanou hraniční hodnotu 5 % (dále jen mezní přenášený výkon) na délce vedení v rozsahu od 1 do 100 km pro stožárovou konstrukci Dunaj 2012 (viz 8.2.1) a Soudek 2014 (viz 8.2.2).

### 8.1 Závislosti činitelů nesymetrie NTV na přenášeném výkonu

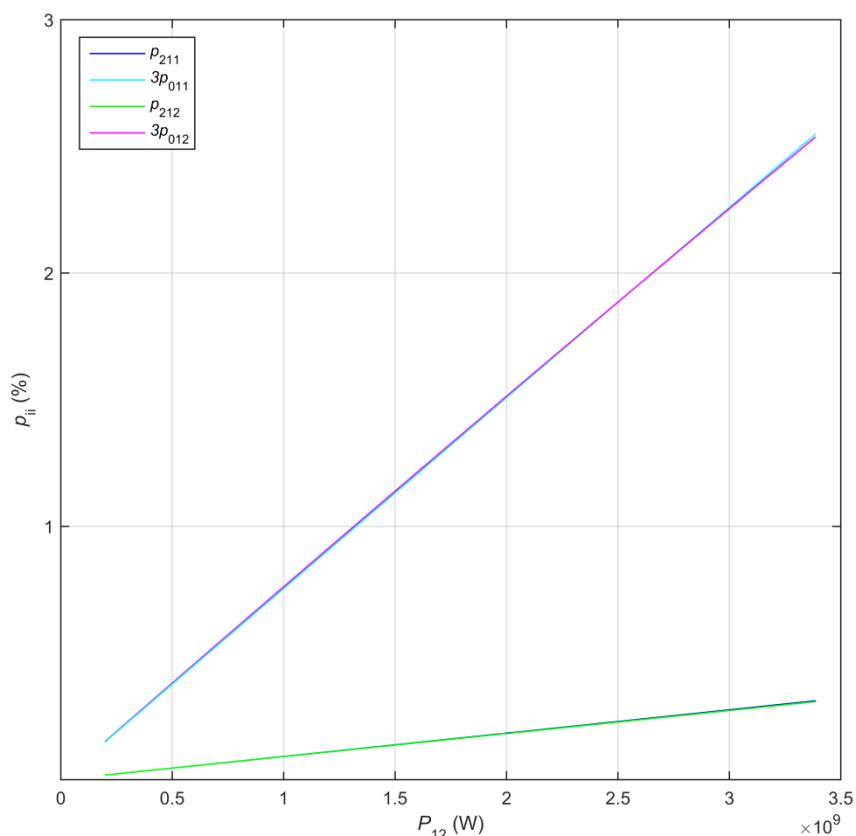
#### 8.1.1 Vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Na základě obdržených výsledků uvedených v Tab. 2 lze konstatovat, že v případě vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 není potřeba provádět transpozici při délce 10 a 20 km (viz Obr. 32 a Obr. 33). Mezní přenášený výkon v Tab. 2 uvedený pod označením  $P_{12\max}$  je totiž roven maximálnímu dovolenému přenášenému výkonu. Toto již neplatí při délce vedení 30, 50, 70 a 100 km, kde je určité pásmo přenášeného výkonu mezi hodnotou mezního přenášeného výkonu a maximálního dovoleného přenášeného výkonu (viz Obr. 34, Obr. 35, Obr. 36 a Obr. 37). Existuje-li možnost, že vedením bude přenášen výkon (maximální možný přenášený výkon) v onom výkonovém pásmu, tak je třeba posoudit, zdali je v konkrétním případě přípustná zvýšená míra proudové nesymetrie. Při negativním stanovisku je na vedení nutné provést transpozici.

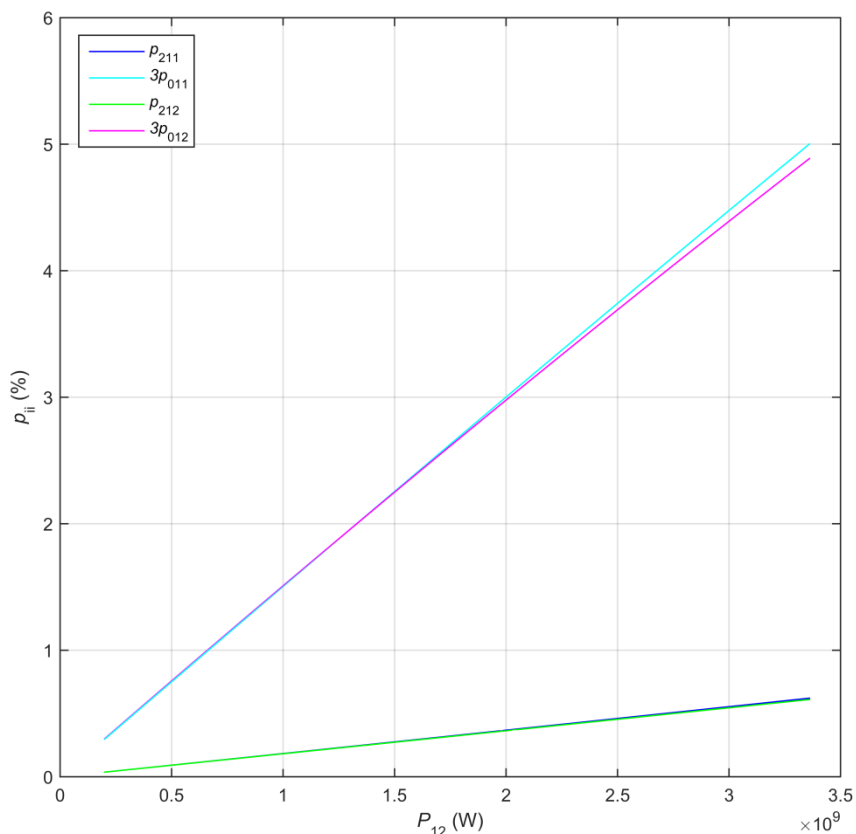
Z uvedených grafů pro typové délky vedení lze rovněž pro maximální možný přenášený výkon přímo odečíst hodnoty činitelů nesymetrie, jež je třeba uvést v příslušném stupni projektové dokumentace.

**Tab. 2:** Mezní přenášený výkon NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

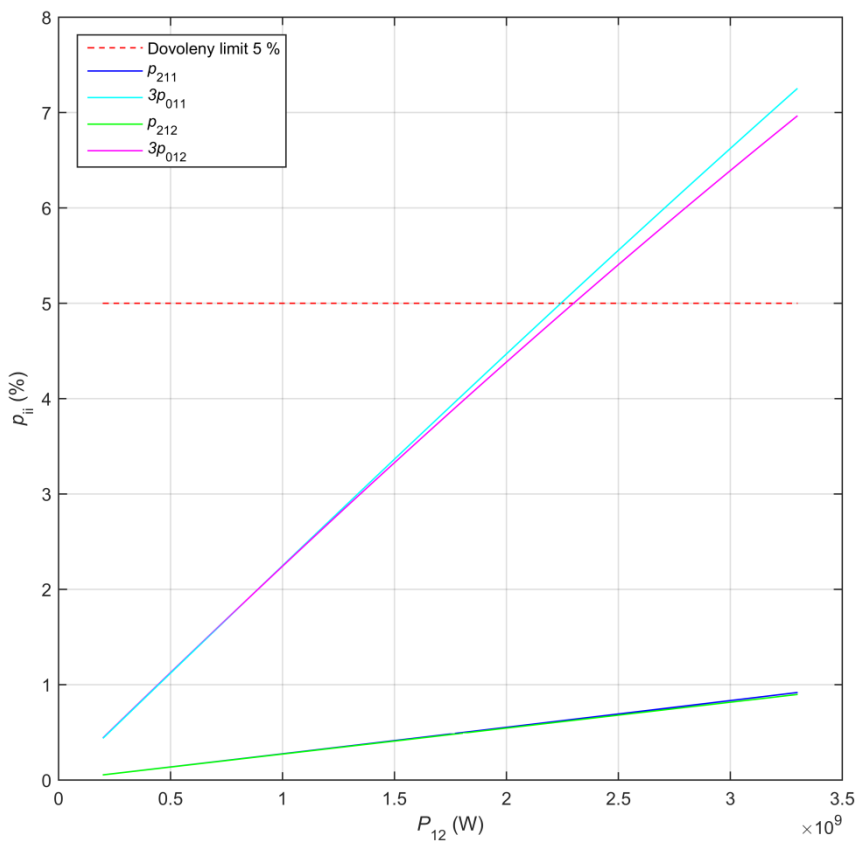
$l$ (km)	$P_{12\max}$ (MW)
10	3385,1
20	3360,8
30	2258,1
50	1354,6
70	976,0
100	692,8



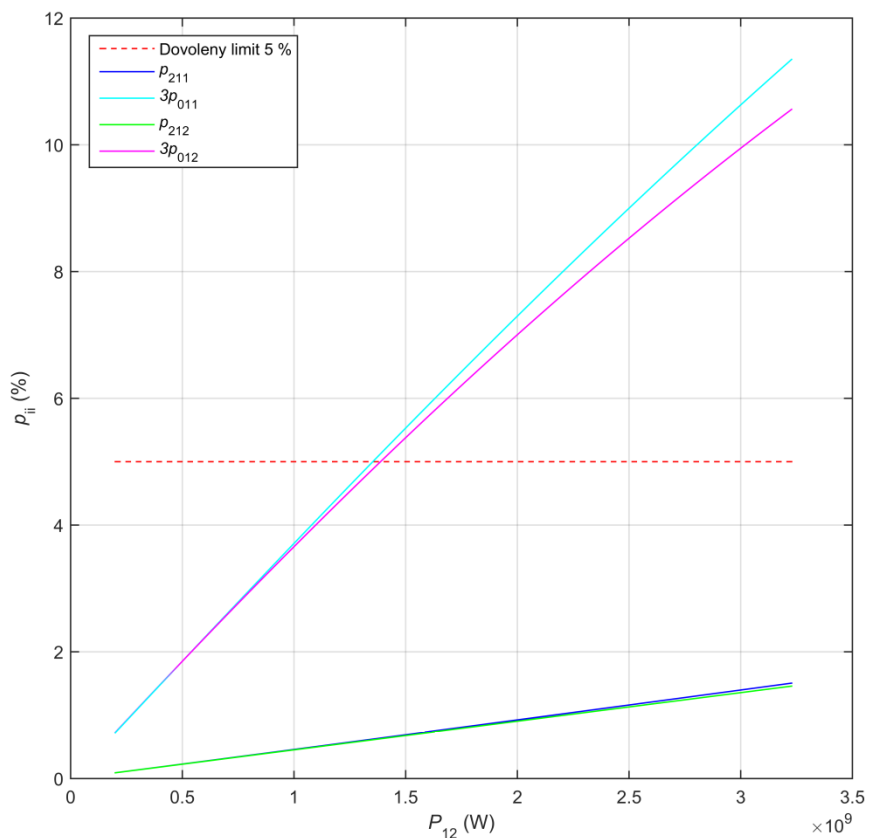
**Obr. 32:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 pro délku 10 km



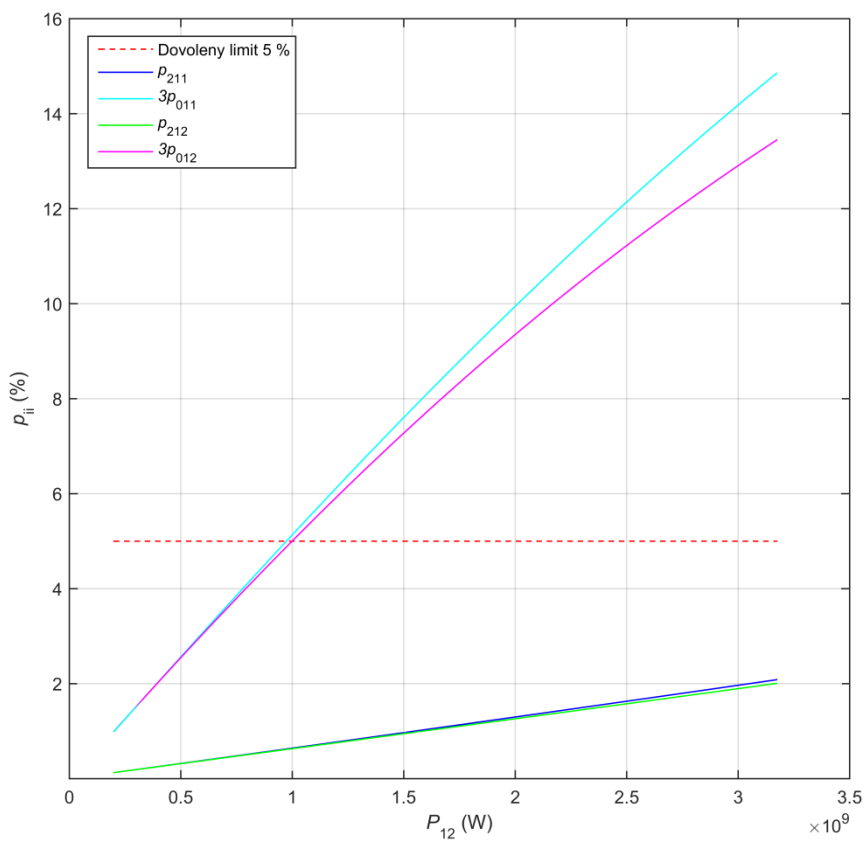
**Obr. 33:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 pro délku 20 km



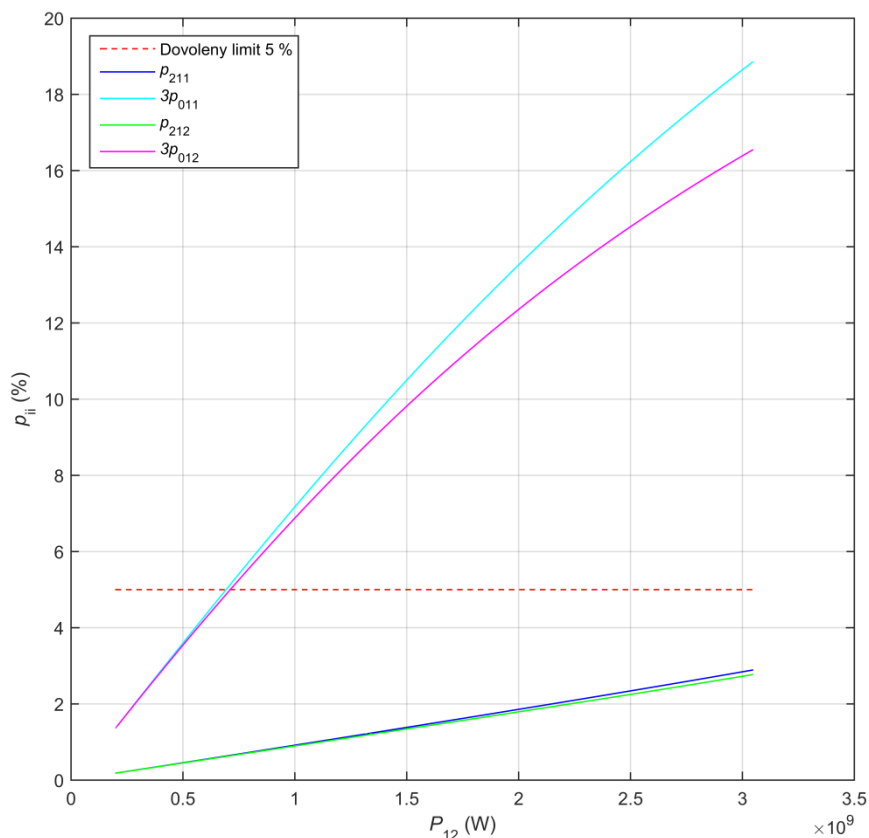
**Obr. 34:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 pro délku 30 km



**Obr. 35:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 pro délku 50 km



**Obr. 36:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 pro délku 70 km



**Obr. 37:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 pro délku 100 km

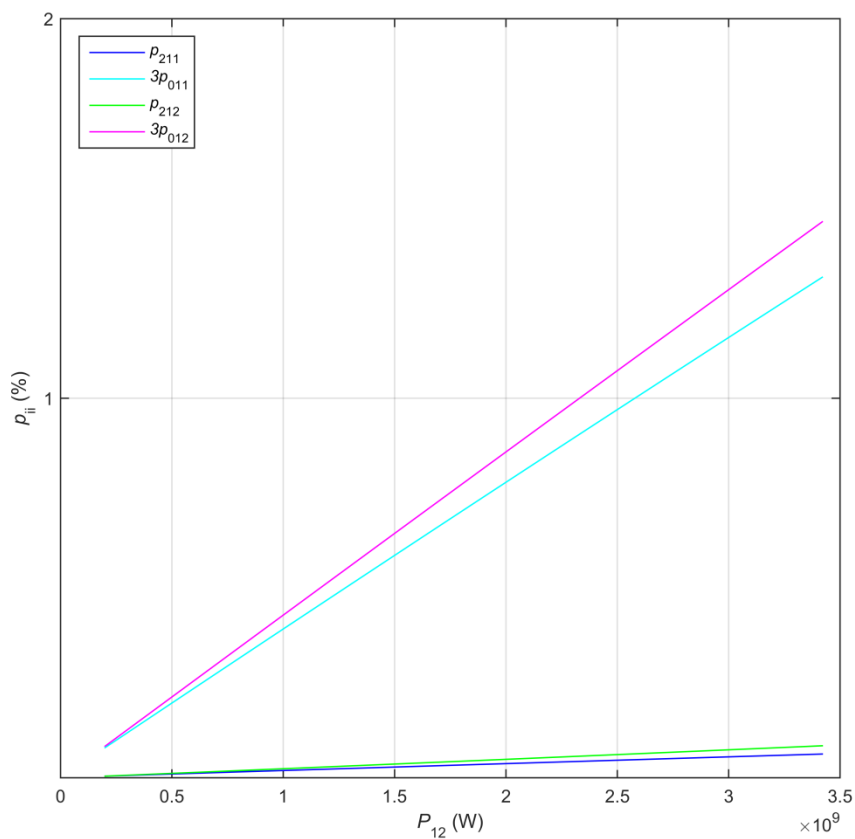
### 8.1.2 Vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

V případě stožárové konstrukce Soudek 2014 není nutné v souladu s výsledky uvedenými v Tab. 3 provádět transpozici při délce vedení 10 a 20 km jako v předchozím případě, a dokonce i při délce 30 km (viz Obr. 38, Obr. 39 a Obr. 40), jelikož mezní přenášený výkon v Tab. 3 uvedený pod označením  $P_{12\max}$  je roven maximálnímu dovolenému přenášenému výkonu. Toto již obdobně neplatí při délce vedení 50, 70 a 100 km, kde je určité pásmo přenášeného výkonu mezi hodnotou mezního přenášeného výkonu a maximálního dovoleného přenášeného výkonu (viz Obr. 41, Obr. 42 a Obr. 43). Existuje-li opět možnost, že vedením bude přenášen výkon (maximální možný přenášený výkon) v onom výkonovém pásmu, tak je třeba posoudit, zdali je v konkrétním případě přípustná zvýšená míra proudové nesymetrie. Při negativním stanovisku je na vedení nutné provést transpozici.

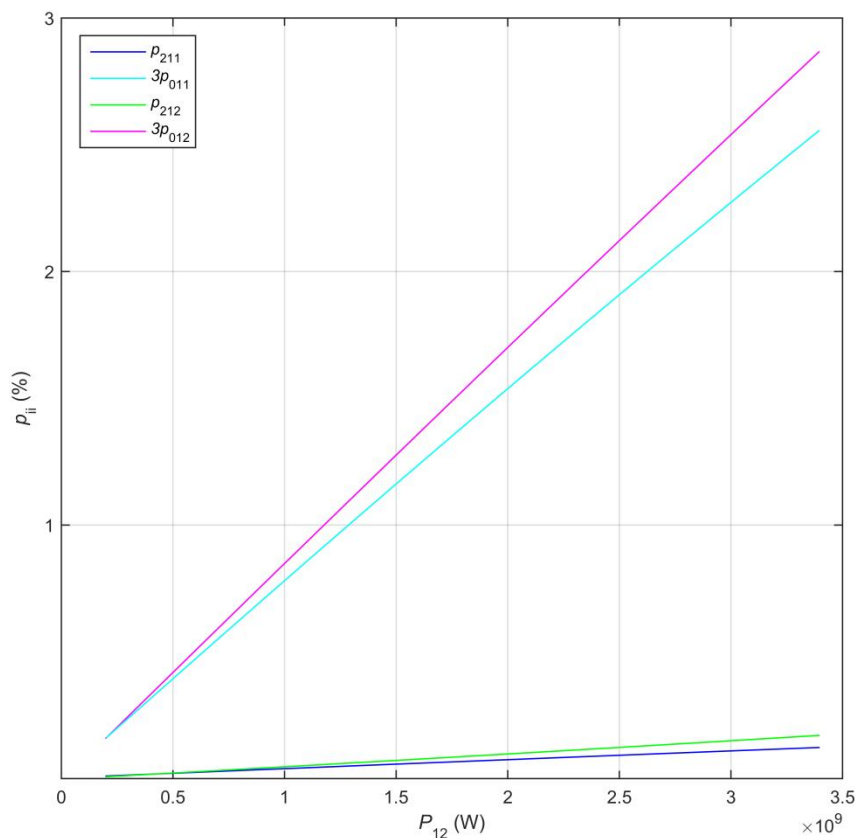
Z uvedených grafů lze rovněž jako v předchozím případě pro typové délky vedení a maximální možný přenášený výkon přímo odečíst hodnoty činitelů nesymetrie, jež je třeba uvést v příslušném stupni projektové dokumentace.

**Tab. 3:** Mezní přenášený výkon NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

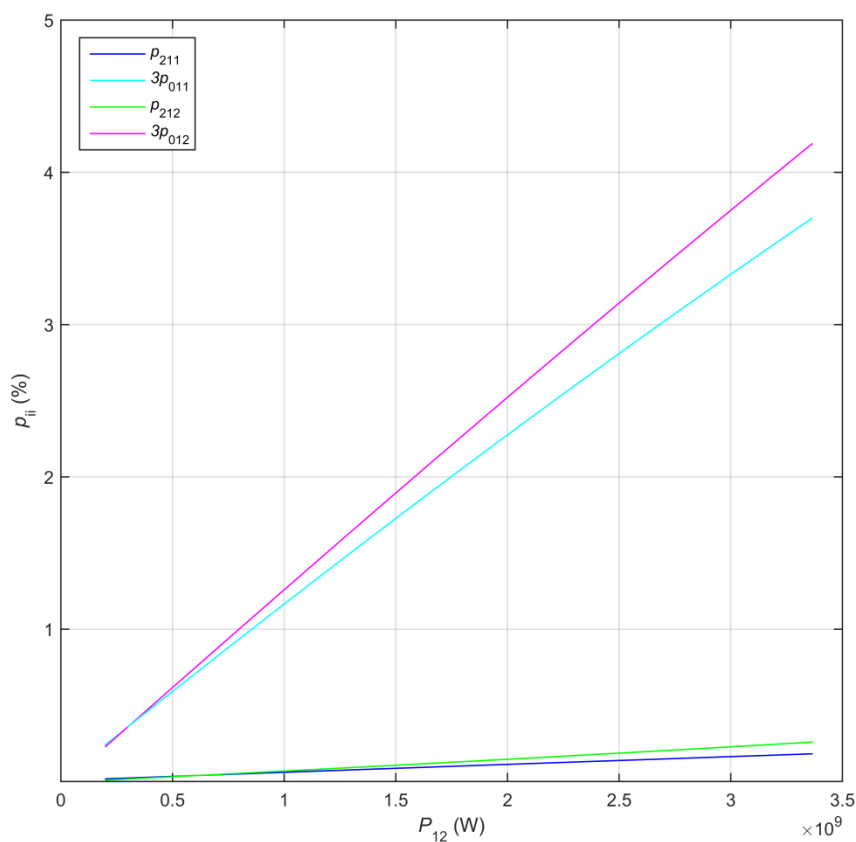
$\ell$ (km)	$P_{12\max}$ (MW)
10	3420,3
20	3394,5
30	3363,7
50	2469,5
70	1794,1
100	1299,1



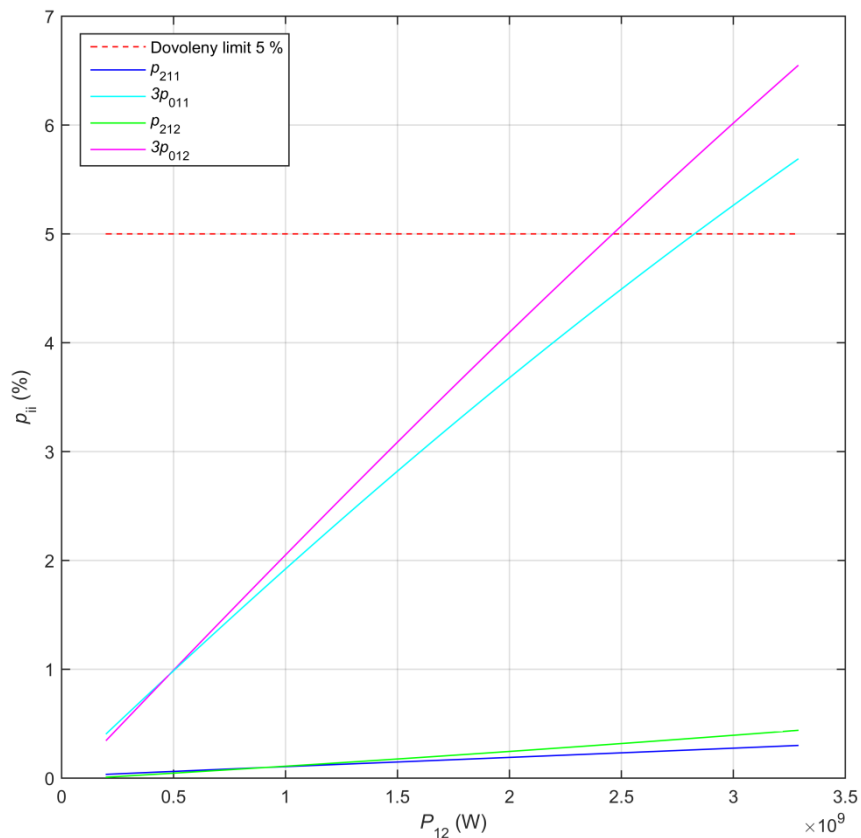
**Obr. 38:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 pro délku 10 km



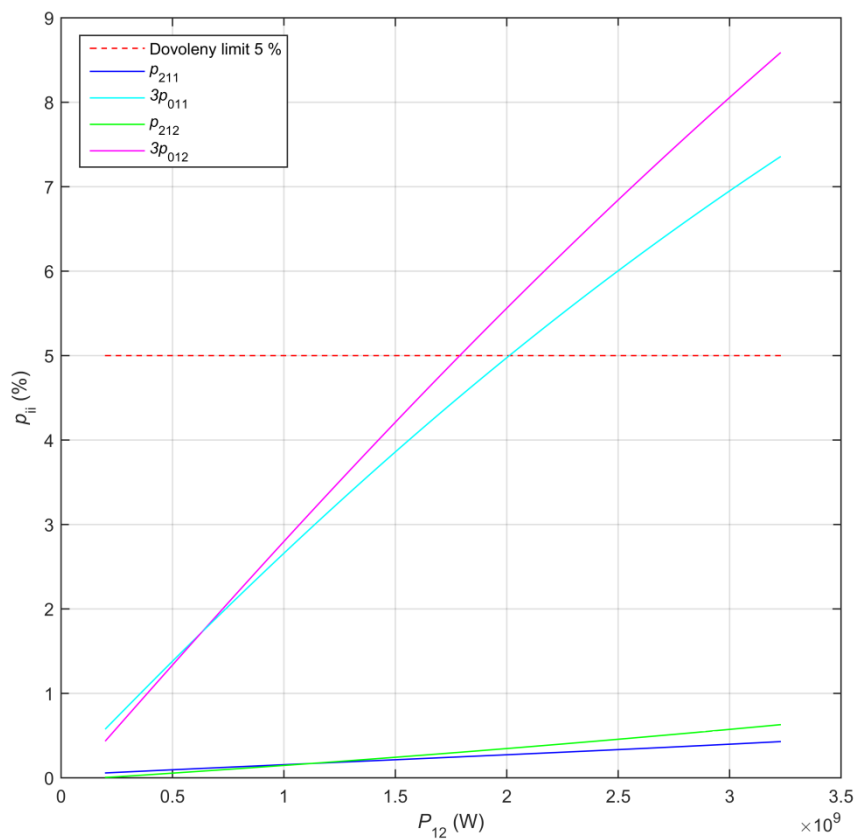
**Obr. 39:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 pro délku 20 km



**Obr. 40:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 pro délku 30 km

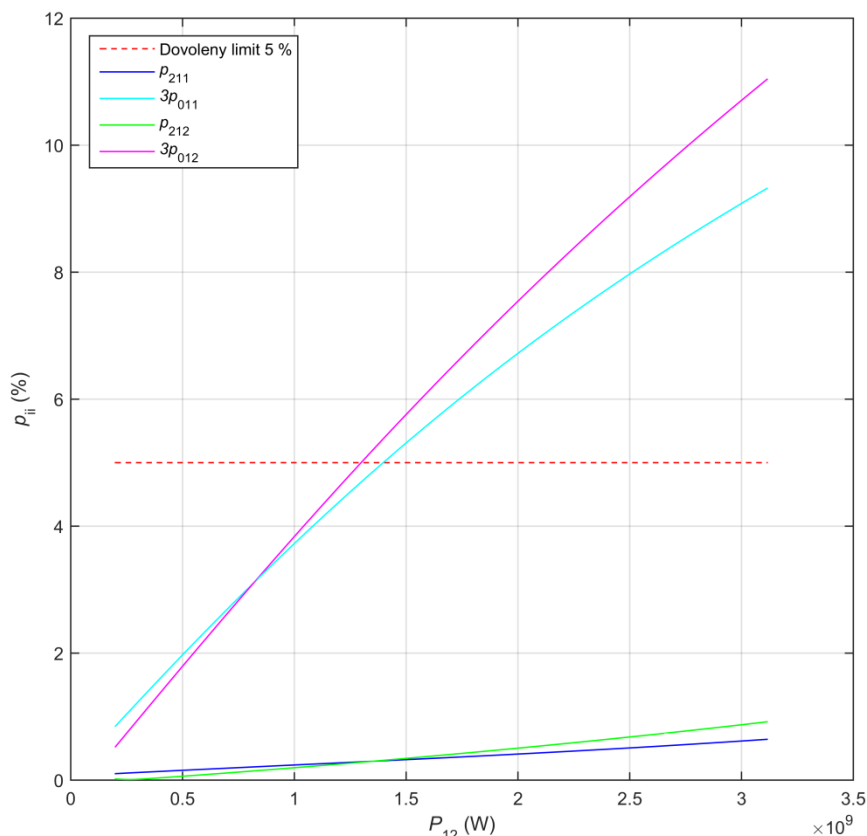


**Obr. 41:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 pro délku 50 km



**Obr. 42:** Zavislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 pro délku 70 km



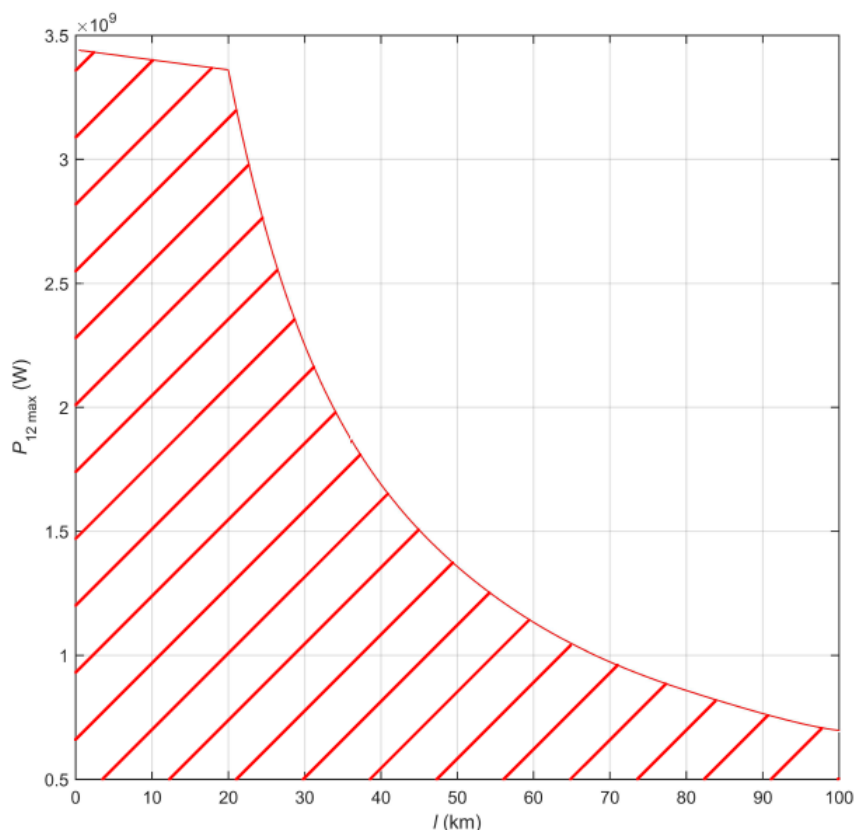


Obr. 43: Závislost činitelů nesymetrie pro NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 pro délku 100 km

## 8.2 Závislosti mezního přenášeného výkonu na délce vedení

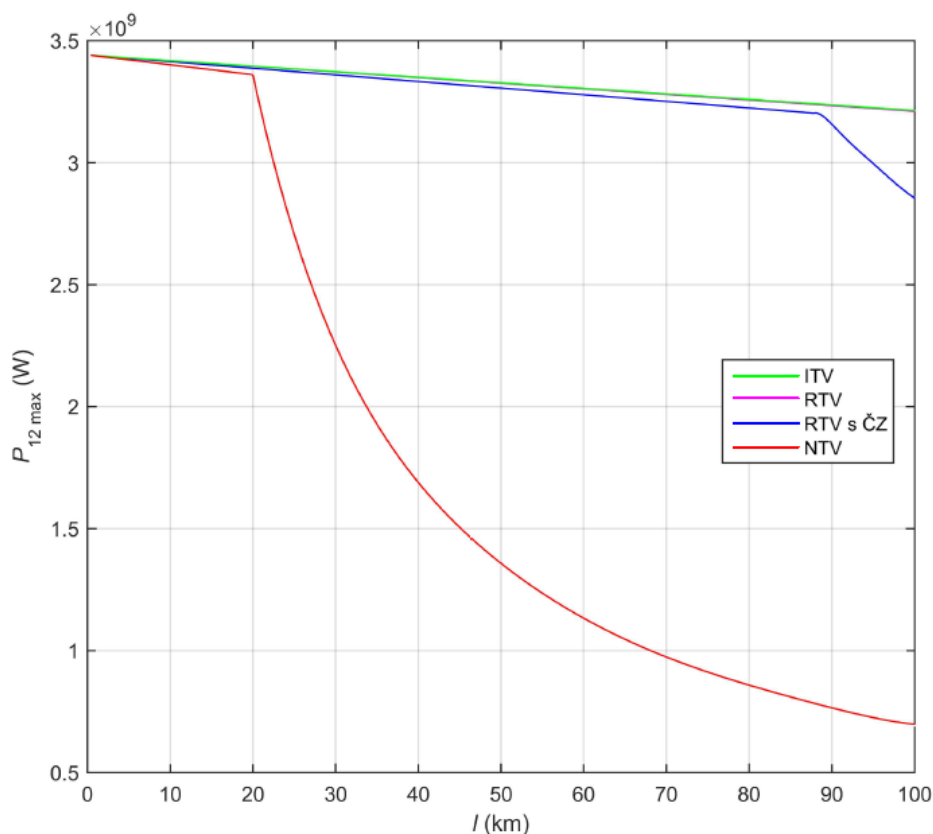
### 8.2.1 Vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Z grafu uvedeného na Obr. 44 vyplývá, že při délce vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 nepřekračující 19,85 km není potřeba provádět transpozici, jelikož je mezní přenášený výkon roven maximálnímu dovolenému přenášenému výkonu (dále jen mezní délka). U vedení s délkou větší než ona mezní délka 19,85 km je již nezbytné stanovit maximální možný přenášený výkon a ověřit, jestli je menší, nebo maximálně roven meznímu přenášenému výkonu (příslušný bod v grafu daný délkou vedení a velikostí maximálního možného přenášeného výkonu se nachází na křivce či pod ní v červeně vyšrafované dovolené oblasti). Při splnění této podmínky není potřeba vedení transponovat. V opačném případě, je třeba posoudit, zdali je v konkrétním případě přípustná zvýšená míra proudové nesymetrie. Při negativním stanovisku je na vedení nutné provést transpozici.



**Obr. 44:** Závislost mezního přenášeného výkonu NTV na délce vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 (červeně vyšrafována dovolená oblast)

Z Obr. 45 lze vypořádat, že křivky RTV a ITV (viz 6.4.2) se téměř neliší. Lze tedy konstatovat, že v tomto případě lze RTV modelovat jako ITV, což výrazně zjednodušuje a urychluje tvorbu matematického modelu, aniž by byla zásadním způsobem snížena přesnost řešení. Dále je zřejmé, že pokud se na vedení provede modelovaná transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.3), tak je možné přenášet výkon rovný maximálnímu dovolenému přenášenému výkonu až do délky vedení 88 km. Poté je již opět nezbytné stanovit maximální možný přenášený výkon a ověřit, jestli je menší, nebo maximálně roven meznímu přenášenému výkonu. V neposlední řadě vyplývá, že u RTV lze přenášet výkon rovný maximálnímu dovolenému přenášenému výkonu v celém zkoumaném rozsahu délky od 1 do 100 km.



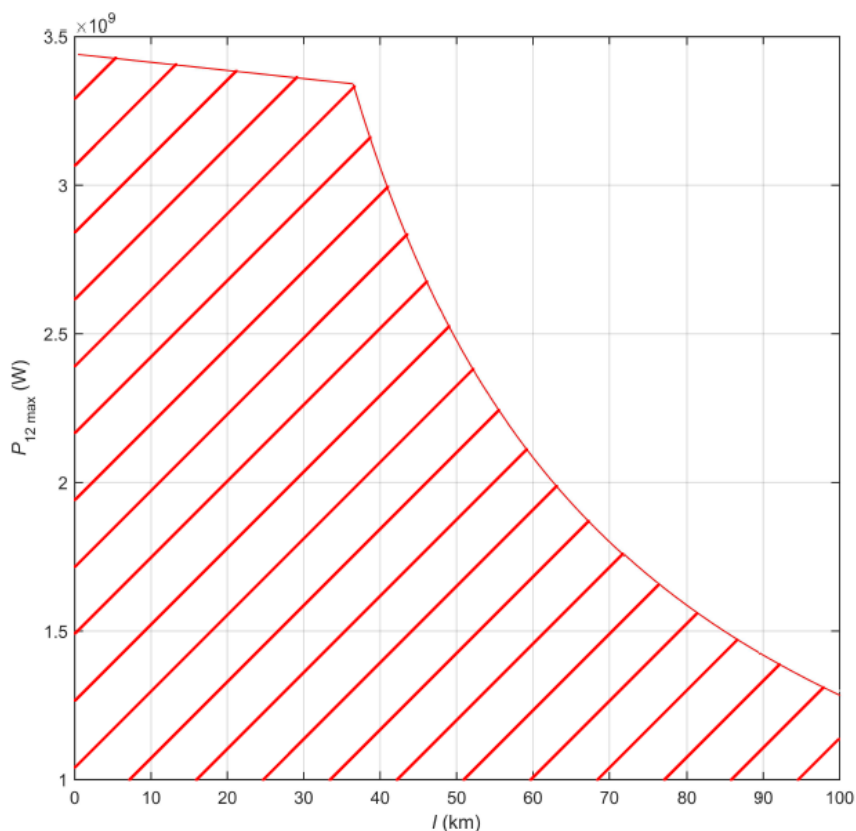
**Obr. 45:** Závislost mezního přenášeného výkonu řešených typů vedení na jejich délce pro stožárovou konstrukci Dunaj 2012

Z tohoto lze učinit následující závěry. Z důvodu maximální využitelnosti přenosové schopnosti a tedy možnosti přenášet maximální možný přenášený výkon s ohledem pouze na proudovou nesymetrii lze dvojité vedení se dvěma zemnicími lany se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 projektovat jako netransponované do délky 19,85 km. Poté se jako nejvhodnější jeví provádět na vedení transpozici ve formě částečných zákrutů (či jejich kombinaci s úplnými zákrutami) vzhledem k ekonomické náročnosti (viz 7.1) a to do délky odvíjející se od konkrétního počtu a typu provedených zákrutů a až následně přistoupit k úplným zákrutům.

### 8.2.2 Vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Pro vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 činí mezní délka dle grafu uvedeného na Obr. 46 36,5 km. Jako v předchozím případě je u vedení s délkou větší než ona mezní délka 36,5 km nezbytné stanovit maximální možný přenášený výkon a ověřit, jestli je menší, nebo maximálně roven meznímu přenášenému výkonu (příslušný bod v grafu daný délkou vedení a velikostí maximálního možného přenášeného výkonu se nachází na křivce či pod ní v červeně vyšrafované dovolené oblasti). Při splnění této podmínky opět není potřeba vedení transponovat. V opačném případě, je třeba

posoudit, zdali je v konkrétním případě přípustná zvýšená míra proudové nesymetrie. Při negativním stanovisku je na vedení nutné provést transpozici.

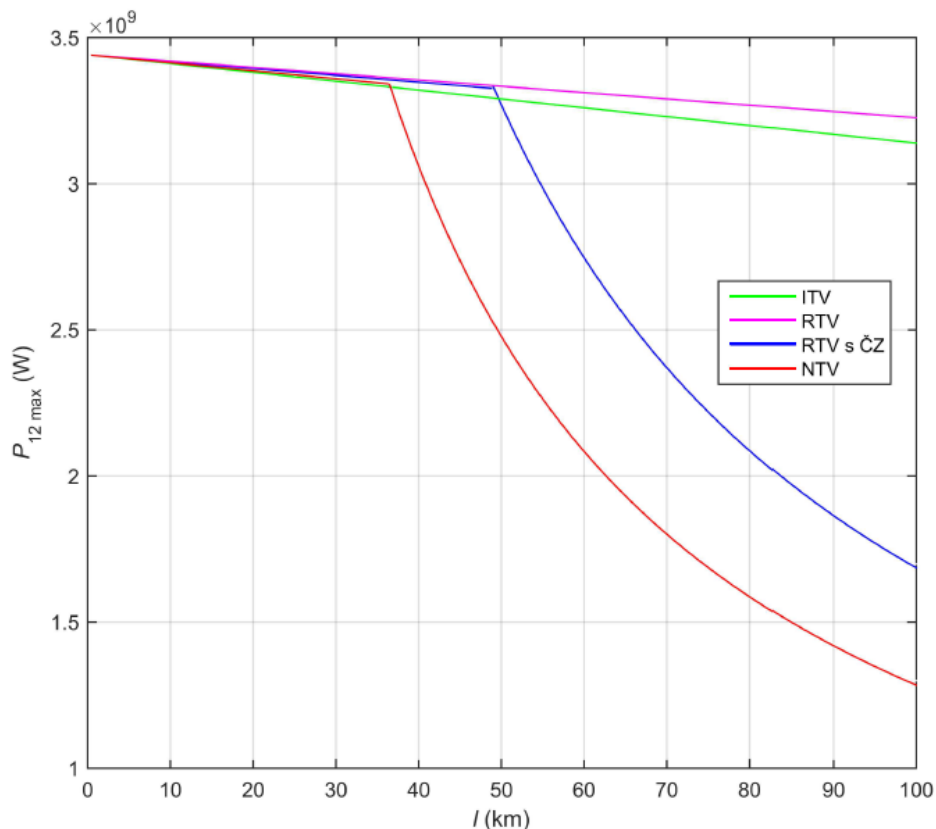


**Obr. 46:** Závislost mezního přenášeného výkonu NTV na délce vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 (červeně vyšrafována dovolená oblast)

Na Obr. 47 je patrné, že křivky RTV a ITV (viz 6.4.2) se již poměrně zásadně odlišují. V tomto případě již tedy nelze RTV modelovat jako ITV, aniž by nebyla zásadním způsobem snížena přesnost řešení, a je nutné modelovat vedení s ideální transpozicí korektním způsobem, což výrazně ztěžuje a prodlužuje tvorbu matematického modelu. Dále lze vyzorovat, že pokud se na vedení provede modelovaná transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.3), tak je možné přenášet výkon rovný maximálnímu dovolenému přenášenému výkonu až do délky vedení 48,5 km. Poté je již opět nezbytné stanovit maximální možný přenášený výkon a ověřit, jestli je menší, nebo maximálně roven meznímu přenášenému výkonu. Rovněž je zjevné, že u RTV lze jako v předchozím případě přenášet výkon rovný maximálnímu dovolenému přenášenému výkonu v celém zkoumaném rozsahu délky od 1 do 100 km.

Z tohoto lze učinit následující závěry. Z důvodu maximální využitelnosti přenosové schopnosti a tedy možnosti přenášet maximální dovolený přenášený výkon s ohledem pouze na proudovou nesymetrii lze dvojité vedení se dvěma zemnicími lany se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014 projektovat jako netransponované do délky

36,5 km. Poté se jako nejvhodnější jeví provádět na vedení transpozici ve formě částečných zákrutů (či jejich kombinaci s úplnými zákruty) a to do délky odvíjející se od konkrétního počtu a typu provedených zákrutů a až následně přistoupit k úplným zákrutům.



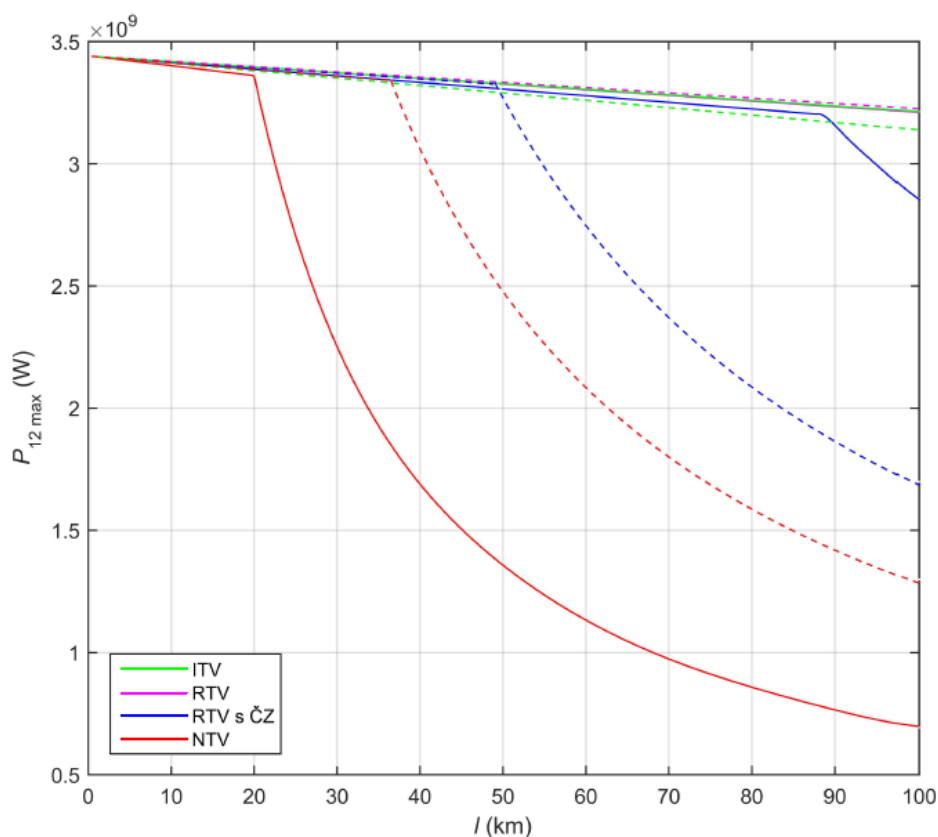
**Obr. 47:** Závislost mezního přenášeného výkonu řešených typů vedení na jejich délce se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

### 8.2.3 Vzájemné porovnání řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014

Při porovnání průběhů mezních přenášených výkonů netransponovaným vedením a všemi třemi typy řešených transponovaných vedení v případě dvojitého vedení se dvěma zemnicími lany se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014 lze učinit následující závěry.

Z důvodu maximální využitelnosti přenosové schopnosti a tedy možnosti přenášet maximální dovolený přenášený výkon s ohledem pouze na proudovou nesymetrii je při projektování vedení do délky 36,5 km vhodnější, pokud to ostatní okolnosti umožňují, zvolit stožárovou konstrukci Soudek 2014 na místo stožárové konstrukce Dunaj 2012, jelikož vykazuje větší hodnotu maximálního dovoleného přenášeného výkonu a nevyžaduje provedení transpozice.

Při větší délce než 36,5 km je vzhledem ke znalosti a zkušenosti projektantů a poměrně značnému množství úspěšně provedených a provozem prověřených zákrutů na stožárové konstrukci typu Dunaj smysluplnější přistoupit k použití stožárové konstrukce Dunaj 2012. V opačném případě by bylo nutné zhotovit první zákrutové stožáry typu Soudek pro vedení na napěťové hladině 400 kV, jelikož, jak již bylo dříve uvedeno, se v české přenosové soustavě doposud žádné nevyskytují. To však nevylučuje tuto teoretickou možnost vzhledem k případům na napěťových hladinách 110 a 220 kV. Toto by mělo význam v případě vedení s modelovanou transpozicí s částečnými zákruty (viz 6.4.3) v pásmu délky mezi 36,5 a 48,5 km, jelikož použití stožárové konstrukce Soudek 2014 umožňuje přenést větší hodnotu maximálního dovoleného přenášeného výkonu. Naopak při délkách vedení nad 48,5 km (mezní délka vedení se stožárovou konstrukcí Soudek 2014) je vhodnější stožárová konstrukce Dunaj 2012 umožňující přenášet maximální dovolený přenášený výkon až do délky vedení 88 km.



**Obr. 48:** Závislost mezního přenášeného výkonu řešených typů vedení na jejich délce se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 (plná čára) a Soudek 2014 (přerušovaná čára)

## 9. Způsoby hodnocení proudové a napět'ové nesymetrie

V této kapitole je zkoumán vliv nesymetrie pasivních parametrů a vzájemných induktivních a kapacitních vazeb pomocí definovaného modelu (viz 6.1) v případě všech řešených typů vedení (viz 6.4) o délce 100 km se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 (viz 9.1) a Soudek 2014 (viz 9.2) při přenosu maximálního dovoleného přenášeného výkonu odpovídajícího maximální proudové zatížitelnosti vedení 2500 A. Kromě konvenčního přístupu k hodnocení nesymetrie spočívajícího v rozboru napětí zátěže (viz 9.1.1, respektive 9.2.1) je v této práci posuzován i nekonvenční přístup založený na analýze indukovaných napětí díky vzájemným induktivním vazbám (viz 9.1.2, respektive 9.2.2) (dále jen indukovaná napětí) a indukovaných proudů skrze vzájemné kapacitní vazby (viz 9.1.3, respektive 9.2.3) (dále jen indukované proudy) do jednotlivých vodičů podél celé trasy dvojitého vedení se dvěma zemnicemi lany.

Cílem tohoto zkoumání je mimo jiné prokázat souvislost mezi nesymetrií napětí zátěže a nesymetrií indukovaných napětí, respektive proudů. Jak již bylo dříve uvedeno, proudová a napět'ová nesymetrie vedení je zapříčiněna nesymetrií pasivních parametrů a výraznými vzájemnými induktivními a kapacitními vazbami. Lze tedy předpokládat, že pokud budou indukovaná napětí do jednotlivých vodičů nesymetrická, tak napětí zátěže budou rovněž nesymetrická. Obdobně pro indukované proudy.

Na základě provedených testovacích výpočtů na výše definovaném modelovém vedení, jejichž výsledky jsou uvedeny v příloze B, bylo mimo jiné prokázáno, že při zanedbání indukovaných proudů vznikne poměrně malá chyba. Z této úvahy vyplývá, že by se k prvotnímu hodnocení proudové a napět'ové nesymetrie vedení mohl využít jednoduchý postup, jež by byl založen pouze na vyhodnocování indukovaných napětí. Toto by umožňovalo stejně jako v této práci používaný kompletní obvodový model (viz 6.1) vyhodnotit proudovou a napět'ovou nesymetrii na libovolně transponovaném vedení, avšak při výrazném zjednodušení a urychlení tvorby obvodového, respektive matematického modelu a zkrácení doby řešení následně vytvořeného počítačového modelu.

Pro řešené typy vedení s uvažovanými stožárovými konstrukcemi jsou v následujících podkapitolách postupně uvedeny efektivní hodnoty napětí zátěže a indukovaných napětí a proudů do fázových vodičů a zemnicích lan. Pro jejich

interpretaci je využit dále popsaný jednotný styl založený na dvou tabulkách a jednom grafu.

První z tabulek obsahuje velikost fázorů, jejich procentní hodnotou vztaženou k napětí zdroje v případě napětí zátěže či indukovaných napětí, respektive k průchozímu proudu v případě indukovaných proudů a velikost argumentu.

Ve druhé tabulce jsou uvedeny velikosti fázorů sousledné, zpětné a netočivé (nulové) složky napětí zátěže či indukovaných napětí, respektive proudů do fázových vodičů získané pomocí metody souměrných složek, jejich procentní hodnoty, jako v předchozím případě, vztažené k napětí zdroje v případě napětí zátěže či indukovaných napětí, respektive k průchozímu proudu v případě indukovaných proudů, velikost činitelů nesymetrie daných podílem velikostí zpětné ku sousledné složce, respektive netočivé (nulové) ku sousledné složce a velikost argumentu.

Následně je uveden graf zobrazující v komplexní rovině fázory napětí zátěže či indukovaných napětí, nebo proudů do fázových vodičů a zemnicích lan (hodnoty obsažené v 1. tabulce). Tohoto grafu je v této práci využito z důvodu vizualizace uváděných hodnot jednak za účelem získání rychlého povědomí a jednak z důvodu, že může být snadno využit k prvotnímu hodnocení proudové a napěťové nesymetrie vedení.

Po hodnotách napětí zátěže pro řešené typy vedení s uvažovanými stožárovými konstrukcemi je provedeno jejich vzájemné porovnání pomocí slovního komentáře vztahujícího se k uvedené souhrnné tabulce obsahující vypočtené údaje s vypovídající hodnotou.

Po následně uvedených hodnotách indukovaných napětí, nebo proudů do fázových vodičů a zemnicích lan je vždy diskutována jejich analogie s hodnotami napětí zátěže na základě uvedené souhrnné tabulky, jež je obsahově totožná jako v případě napětí zátěže. Dále je rovněž zkoumána souvislost mezi velikostí netočivé složky indukovaných napětí či proudů do fázových vodičů, respektive činitele nesymetrie  $p_{01}$  a velikostí indukovaných napětí či proudů do zemnicích lan.

V závěru této kapitoly (viz 9.3) je provedeno vzájemné porovnání hodnot napětí zátěže a indukovaných napětí a proudů do fázových vodičů a zemnicích lan řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014.



## 9.1 Vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

### 9.1.1 Napětí zátěže

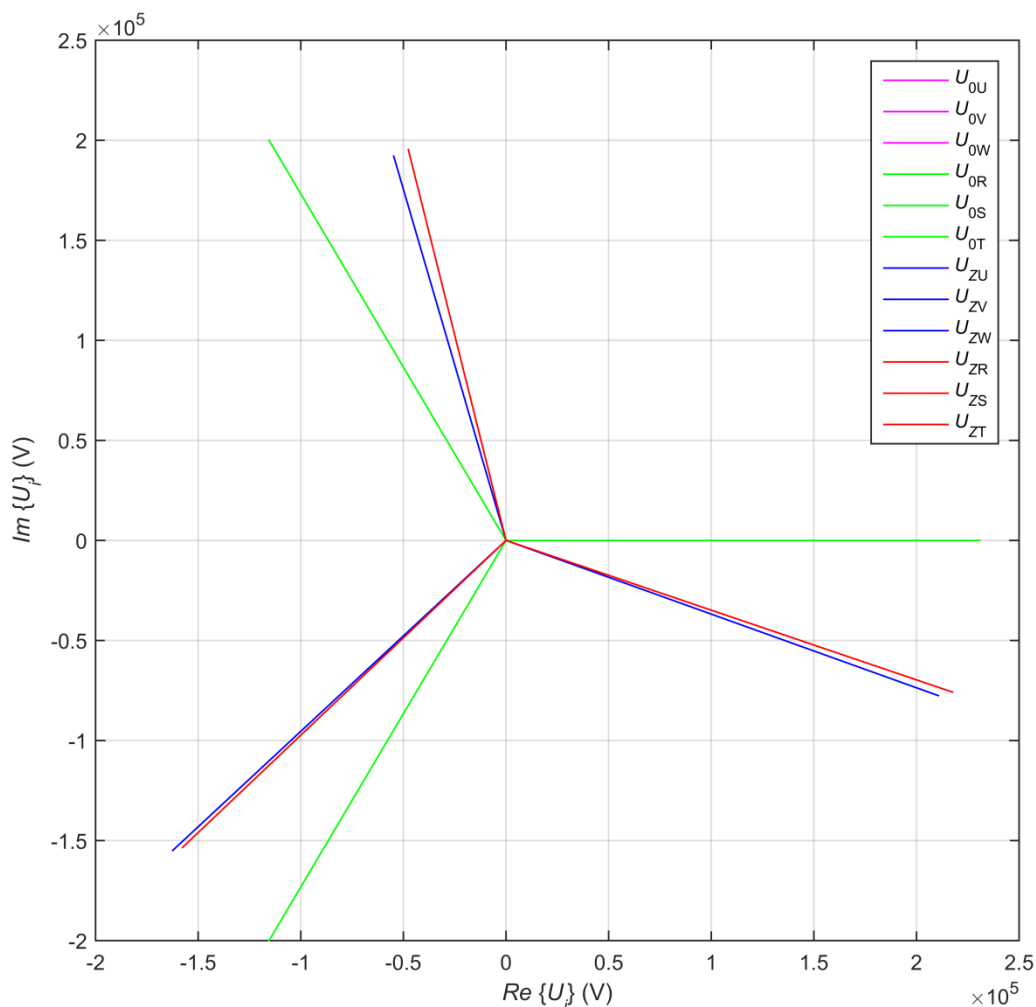
#### 9.1.1.1 Netransponované vedení

**Tab. 4:** Fázory  $U_{Zi}$  NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	224,48	224,48	199,72	230,39	219,95	201,03
$u_{zi}$ (%)	97,20	97,20	86,48	99,76	95,24	87,05
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-20,2	-136,3	105,9	-19,2	-135,8	103,7

**Tab. 5:** Analýza  $U_{Zi}$  NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	216,02	93,54		-17,0
	2. (R, S, T)	217,05	93,98		-17,2
Zpětná	1. (U, V, W)	6,30	2,72	2,92	-8,7
	2. (R, S, T)	6,07	2,63	2,80	-4,7
Netočivá	1. (U, V, W)	13,66	5,91	6,32	-99,1
	2. (R, S, T)	12,03	5,21	5,54	-70,0



**Obr. 49:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

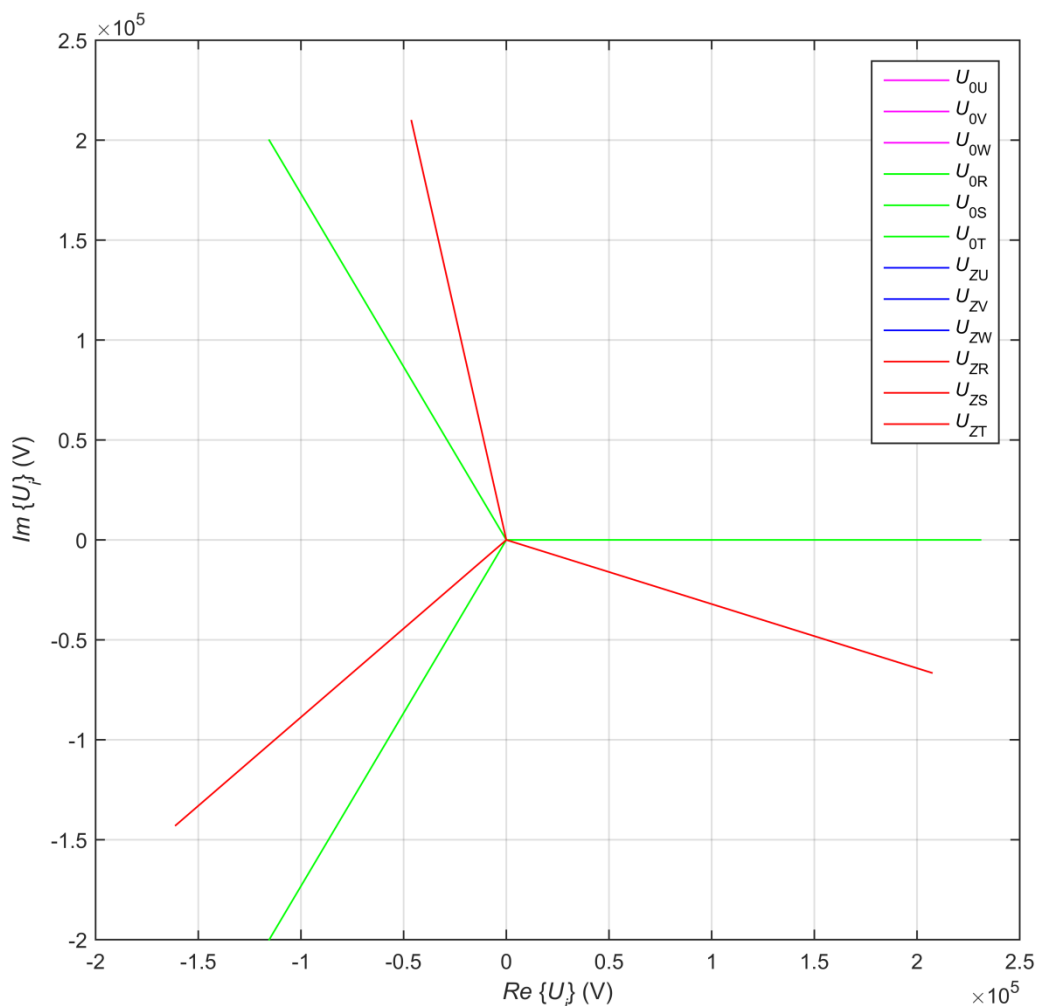
### 9.1.1.2 Ideálně transponované vedení

**Tab. 6:** Fázory  $U_{Zi}$  ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	217,63	215,24	214,75	217,63	215,24	214,75
$u_{Zi}$ (%)	94,24	93,20	92,99	94,24	93,20	92,99
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-17,8	-138,4	102,43	-17,8	-138,4	102,4

**Tab. 7:** Analýza  $U_{Zi}$  ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	215,87	93,47		-17,9
	2. (R, S, T)	215,87	93,47		-17,9
Zpětná	1. (U, V, W)	1,85	0,80	0,86	-5,5
	2. (R, S, T)	1,85	0,06	0,86	-5,2
Netočivá	1. (U, V, W)	0,13	0,80	0,06	94,8
	2. (R, S, T)	0,14	0,06	0,06	91,6



**Obr. 50:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

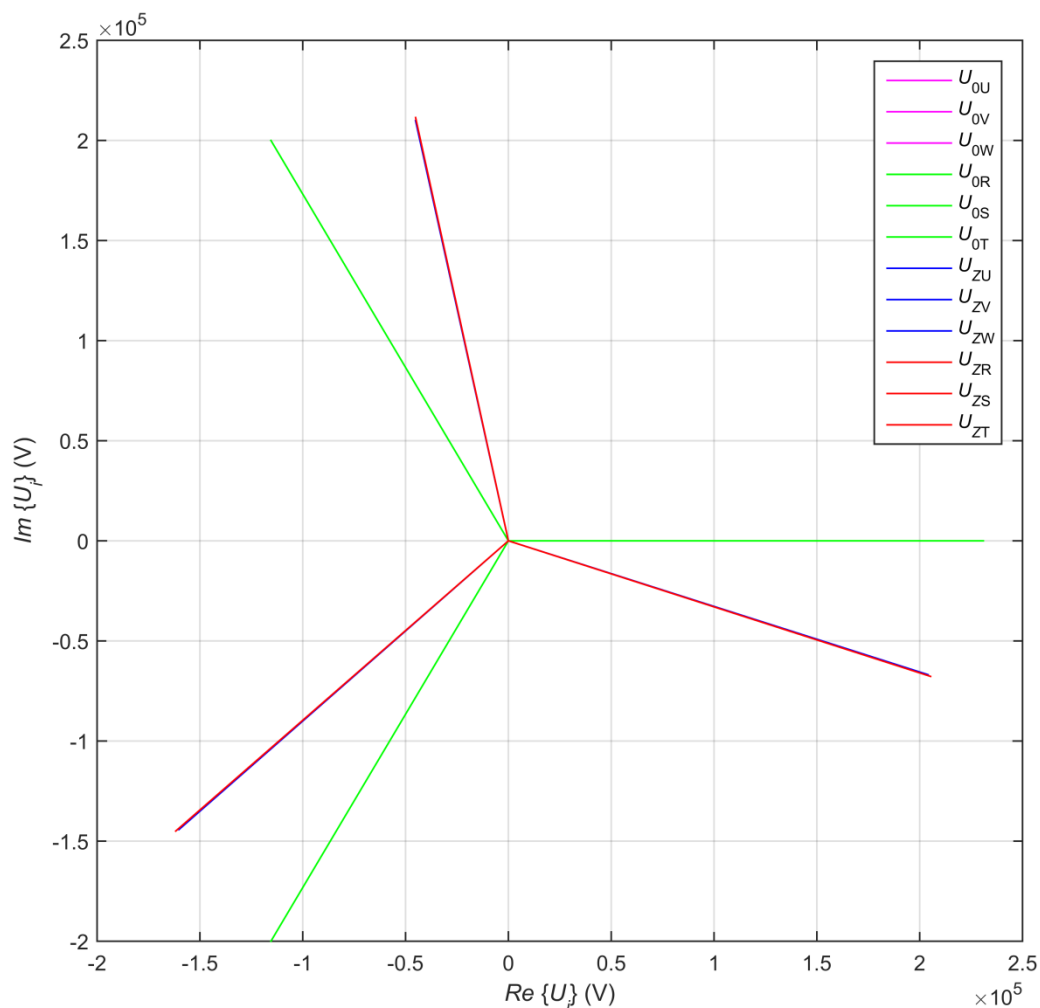
### 9.1.1.3 Reálně transponované vedení

**Tab. 8:** Fázory  $U_{Zi}$  RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	214,77	215,60	214,72	216,17	217,22	216,18
$u_{Zi}$ (%)	93,00	93,36	92,98	93,61	94,06	93,61
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-18,1	-138,0	102,1	-18,3	-138,1	102,1

**Tab. 9:** Analýza  $U_{Zi}$  RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	215,03	93,11		-18,0
	2. (R, S, T)	216,53	93,76		-18,1
Zpětná	1. (U, V, W)	0,03	0,01	0,01	-30,2
	2. (R, S, T)	0,04	0,02	0,02	-30,4
Netočivá	1. (U, V, W)	0,59	0,25	0,27	-136,9
	2. (R, S, T)	0,68	0,30	0,32	-141,5



**Obr. 51:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

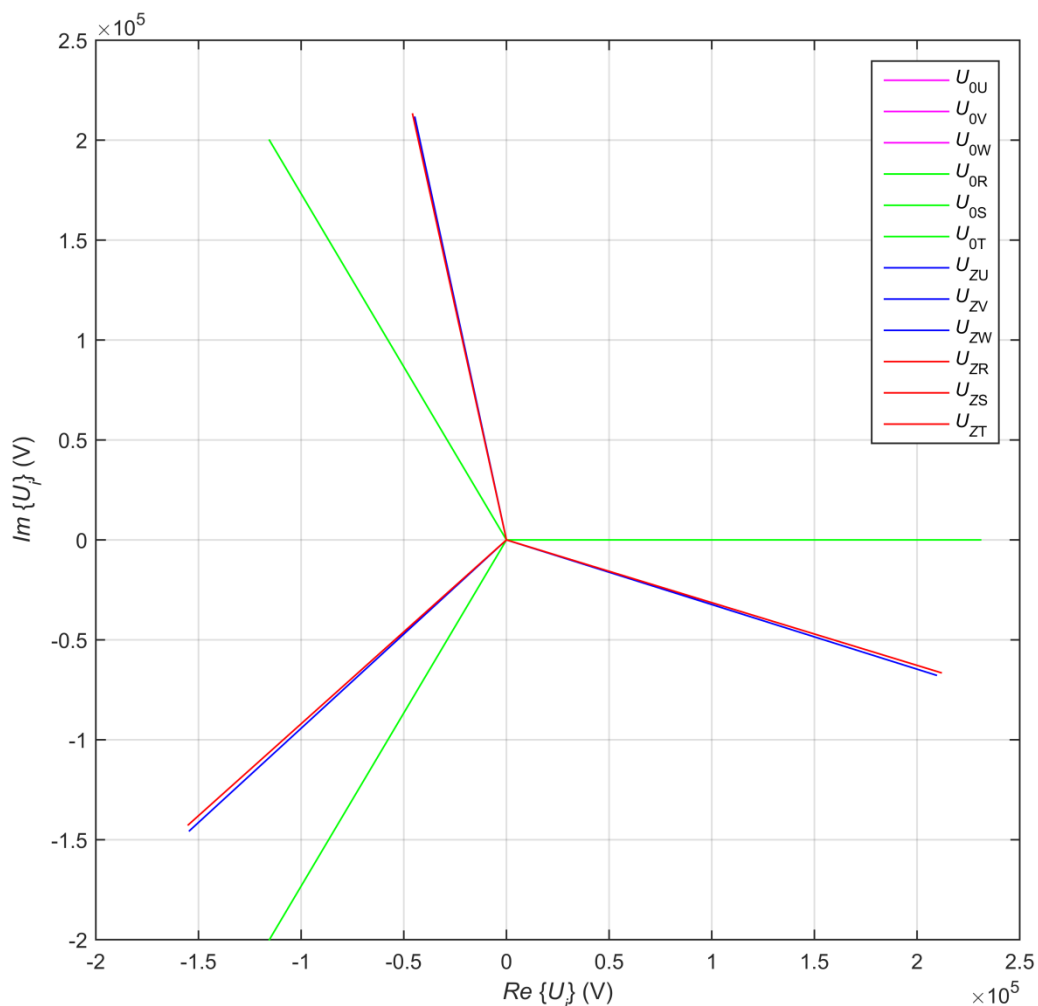
### 9.1.1.4 Reálně transponované vedení s částečnými zákruty

**Tab. 10:** Fázory  $U_{Zi}$  RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	220,03	212,15	216,08	221,90	210,57	216,89
$u_{Zi}$ (%)	95,28	91,87	93,57	96,09	91,18	94,35
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-17,9	-136,7	101,9	-17,4	-137,4	102,1

**Tab. 11:** Analýza  $U_{Zi}$  RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	216,08	93,56	—	-17,6
	2. (R, S, T)	216,78	93,87		-17,6
Zpětná	1. (U, V, W)	1,86	0,80	0,86	-92,9
	2. (R, S, T)	2,72	1,18	1,26	-59,9
Netočivá	1. (U, V, W)	3,51	1,52	1,63	-9,7
	2. (R, S, T)	3,91	1,70	1,81	20,1



**Obr. 52:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

### 9.1.1.5 Vzájemné porovnání řešených typů vedení

Na základě porovnání obdržených výsledků pro ITV a RTV uvedených v Tab. 12 lze konstatovat, že se poměrně zásadně odlišují. Toto je patrné jak v rozdílech mezi max a min velikostmi, průměrné odchylce od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů a průměrném fázovém posunu mezi fázory totožných fází, tak zejména v průměrných velikostech symetrických složek a činitelů nesymetrie. Z tohoto hlediska tedy nelze RTV modelovat jako ITV, aniž by nebyla zásadním způsobem snížena přesnost řešení, a je nutné modelovat vedení s ideální transpozicí (viz 6.4.2) korektním způsobem, což výrazně ztěžuje a prodlužuje tvorbu matematického modelu.

Dále lze učinit následující závěry. U NTV, RTV a RTV s ČZ se výrazně liší jak průměrný rozdíl mezi max a min hodnotou v rámci jednotlivých potahů, tak i rozdíl mezi max a min hodnotou, jež jsou dle očekávání nejvyšší v případě NTV. Druhý z nich je velmi výrazně omezen transpozicí, což je zřejmé z výsledků pro RTV s ČZ a zejména pak pro RTV. U prvního ukazatele si lze však povšimnout značné difference i u RTV s ČZ. Zcela totožné závěry lze učinit i u průměrné odchylky od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů. Předpoklady byly rovněž potvrzeny i u průměrného fázového posunu mezi fázory totožných fází, který je transpozicí zásadně omezen. Po aplikaci metody souměrných složek na napětí zátěže bylo zjištěno, že sousledná složka má v průměru přibližně stejnou hodnotu u všech řešených typů vedení. Značně se však liší ve velikosti zpětné a netočivé složky. Dle očekávání vykazuje NTV největší hodnotu zpětné i netočivé složky, jež je více než dvojnásobná. Vlivem transpozice dochází k jejich výraznému omezení, což je zřejmé z výsledků pro RTV s ČZ a zejména pak pro RTV.

Z celkového hlediska lze říci, že byl jednoznačně prokázán vliv transpozice na omezení nesymetrie napětí na zátěži. Dále se rovněž prokázal značný přínos modelované transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.2), jelikož při porovnání výsledků pro NTV a RTV s ČZ je patrné, že byla nesymetrie o poznání více omezena než je tomu v případě RTV s ČZ a RTV.

**Tab. 12:** Fázory  $U_{zi}$  řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Typ vedení		NTV		ITV		RTV		RTV s ČZ	
Potah		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Průměrný rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{zi} $ (kV)	24,76	29,36	2,87	2,88	0,88	1,05	7,88	11,33
	$u_{zi}$ (%)	10,72	12,71	1,25	1,25	0,38	0,45	3,41	4,91
Rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{zi} $ (kV)	30,67		2,88		2,50		11,33	
	$u_{zi}$ (%)	13,28		1,25		1,08		4,91	
Průměrná odchylka od sym. vzáj. fáz. natočení fázorů (°)		4,1	2,3	0,6	0,6	0,2	0,2	0,9	0,3
Průměrný fáz. posun mezi fázory totožných fází (°)		1,3		0,002		0,1		0,5	
Průměr sousledné složky	$ \bar{U}_z^{(1)} $ (kV)	216,53		215,87		215,78		216,43	
	$u_z^{(1)}$ (%)	93,76		93,47		93,43		93,72	
Průměr zpětné složky	$ \bar{U}_z^{(2)} $ (kV)	6,18		1,85		0,03		2,29	
	$u_z^{(2)}$ (%)	2,68		0,80		0,01		0,99	
Průměr netočivé složky	$ \bar{U}_z^{(0)} $ (kV)	12,84		0,14		0,64		3,71	
	$u_z^{(0)}$ (%)	5,56		0,06		0,28		1,61	
Průměr činitelů nesymetrie	$p_{21}$ (%)	2,86		0,86		0,02		1,06	
	$p_{01}$ (%)	5,93		0,06		0,29		1,72	

## 9.1.2 Indukovaná napětí

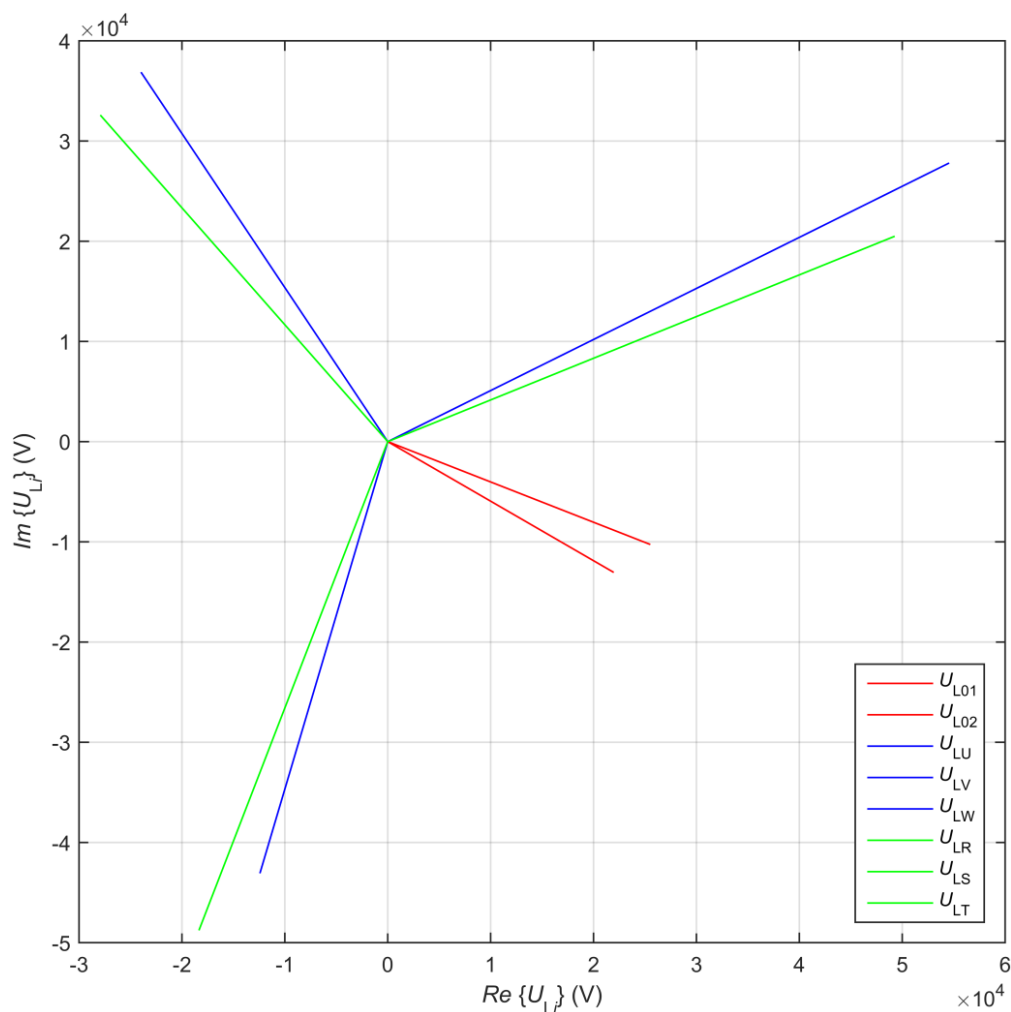
### 9.1.2.1 Netransponované vedení

**Tab. 13:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	44,75	43,90	61,15	52,03	42,84	53,28	27,42	25,47
$u_{Li}$ (%)	19,38	19,01	26,48	22,53	18,55	23,07	11,88	11,03
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-106,1	123,0	27,0	-110,6	130,6	22,6	-21,9	-30,7

**Tab. 14:** Analýza  $U_{Li}$  FV NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	49,18	21,30		-103,9
	2. (R, S, T)	49,10	21,26		-105,5
Zpětná	1. (U, V, W)	7,06	3,06	14,35	-159,6
	2. (R, S, T)	6,79	2,94	13,83	-155,5
Netočivá	1. (U, V, W)	9,40	4,07	19,11	49,9
	2. (R, S, T)	1,75	0,76	3,58	55,1



**Obr. 53:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

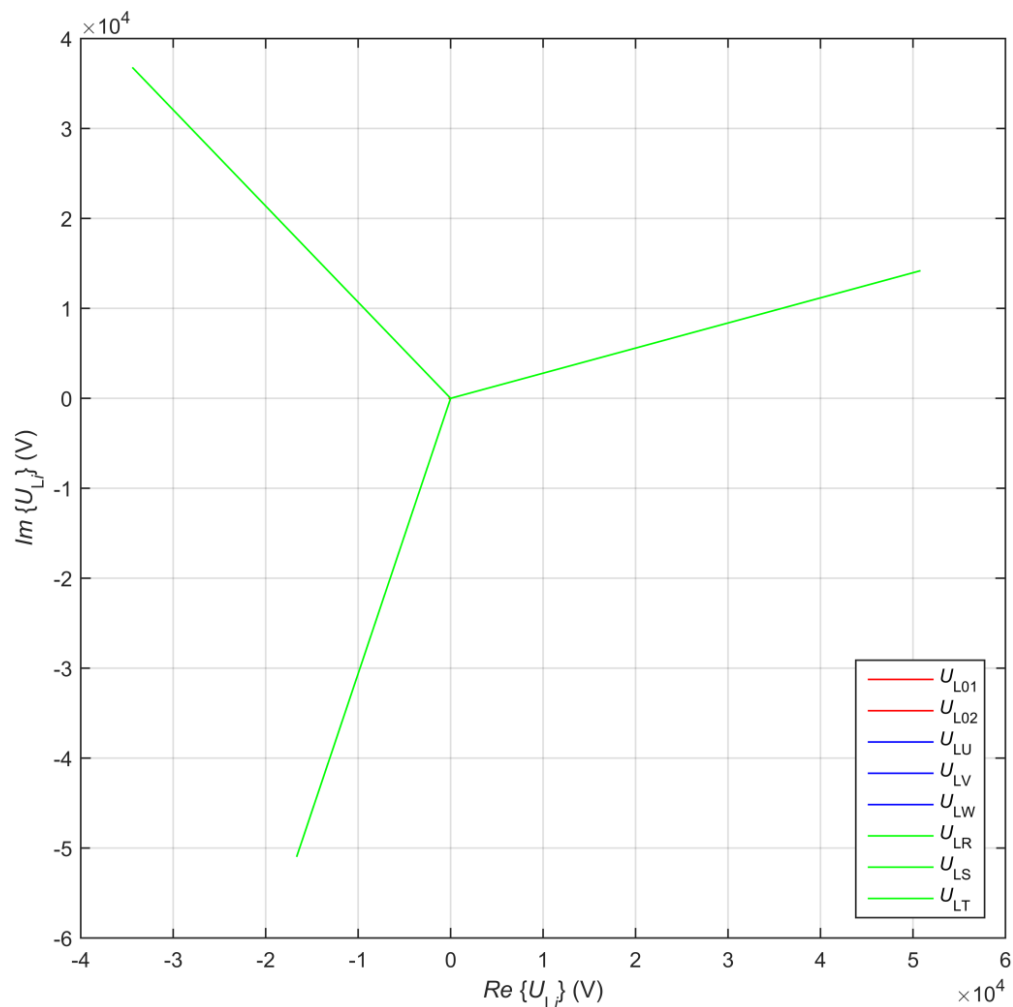
### 9.1.2.2 Ideálně transponované vedení

**Tab. 15:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	53,54	50,29	52,67	53,54	50,29	52,67	0,14	0,14
$u_{Li}$ (%)	23,19	21,78	22,81	23,19	21,78	22,81	0,06	0,06
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-108,1	133,1	15,6	-108,1	133,1	15,6	-176,9	-177,1

**Tab. 16:** Analýza  $U_{Li}$  FV ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	52,15	22,58		-106,5
	2. (R, S, T)	52,15	22,58		-106,5
Zpětná	1. (U, V, W)	1,97	0,85	3,78	-159,6
	2. (R, S, T)	1,97	0,85	3,77	-153,3
Netočivá	1. (U, V, W)	0,08	0,04	0,16	-178,6
	2. (R, S, T)	0,08	0,04	0,16	-178,3



**Obr. 54:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012



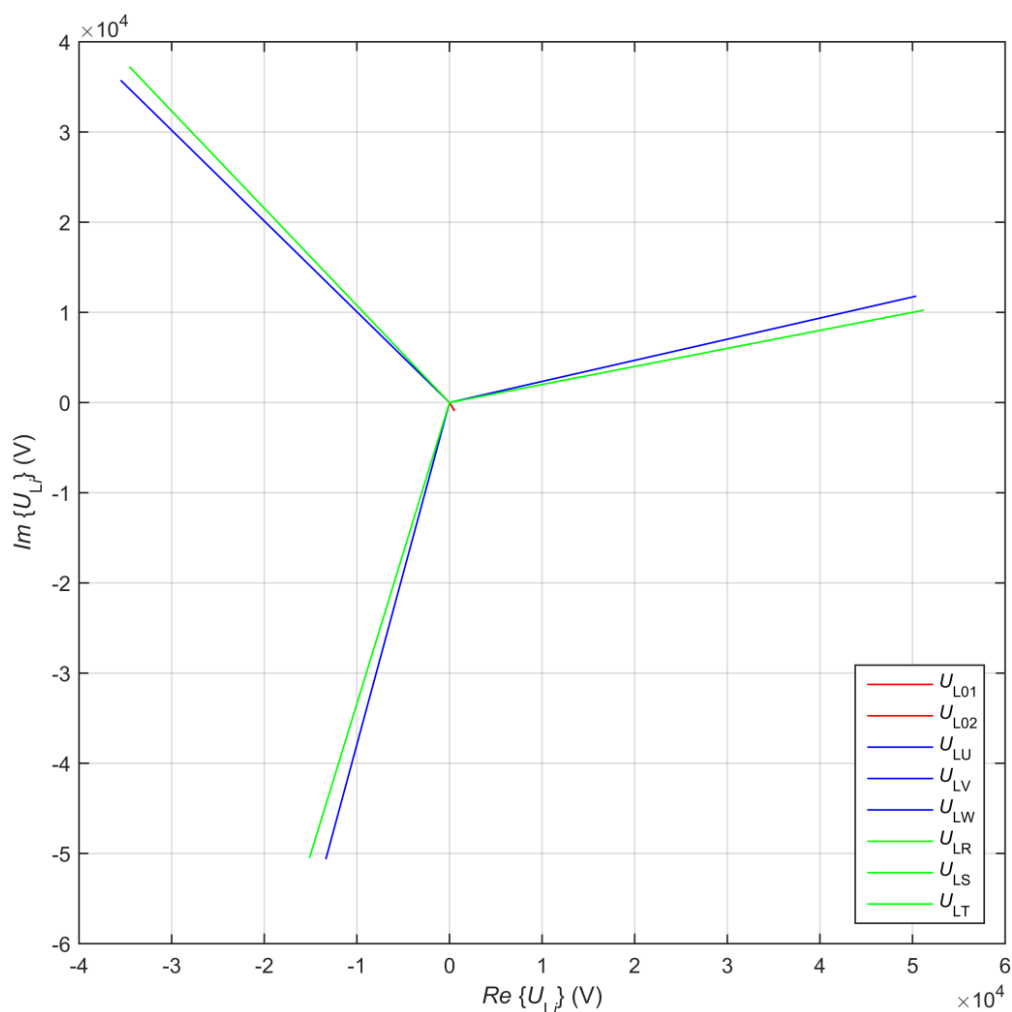
### 9.1.2.3 Reálně transponované vedení

**Tab. 17:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	52,28	50,29	51,68	52,63	50,73	52,17	0,99	0,99
$u_{Li}$ (%)	22,64	21,78	22,38	22,79	21,97	22,59	0,43	0,43
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-104,8	134,8	13,2	-106,7	132,9	11,3	-60,0	-57,9

**Tab. 18:** Analýza  $U_{Li}$  FV RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	51,41	22,26		-105,6
	2. (R, S, T)	51,84	22,45		-107,5
Zpětná	1. (U, V, W)	0,02	0,01	0,04	-172,5
	2. (R, S, T)	0,03	0,01	0,06	138,5
Netočivá	1. (U, V, W)	1,15	0,50	2,24	-63,5
	2. (R, S, T)	1,13	0,49	2,17	-62,7



**Obr. 55:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

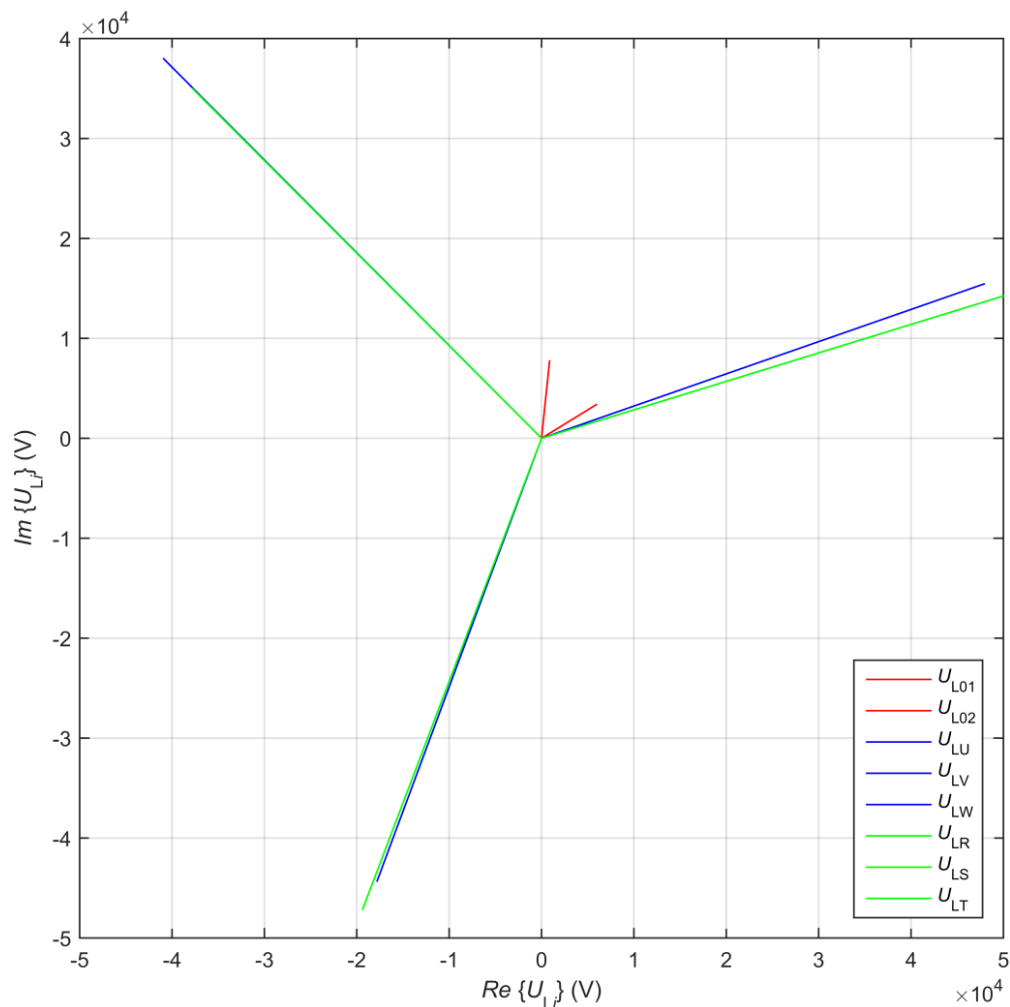
### 9.1.2.4 Reálně transponované vedení s částečnými zákruty

**Tab. 19:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	47,74	55,81	50,34	50,95	51,48	51,96	7,78	6,83
$u_{Li}$ (%)	20,67	24,17	21,80	22,06	22,29	22,50	3,37	2,96
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-111,9	137,1	17,9	112,3	137,2	15,9	83,6	29,6

**Tab. 20:** Analýza  $U_{Li}$  FV RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U,V,W)	51,15	22,15	-	-105,4
	2. (R, S, T)	51,32	22,22		-106,4
Zpětná	1. (U,V,W)	2,06	0,89	4,02	106,9
	2. (R, S, T)	2,88	1,25	5,60	150,4
Netočivá	1. (U,V,W)	4,71	2,04	9,21	139,8
	2. (R, S, T)	2,49	1,08	4,85	163,7



**Obr. 56:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

### 9.1.2.5 Vzájemné porovnání řešených typů vedení

Na základě porovnání obdržených výsledků indukovaných napětí uvedených v Tab. 21 a napětí zátěže v Tab. 12 lze prohlásit, že závěry formulované v subkapitole 9.1.1 jsou platné i pro indukovaná napětí do fázových vodičů a to beze změny jak v případě možnosti modelovat RTV jako ITV, tak i co se týče průměrných rozdílů mezi max a min hodnotou v rámci jednotlivých potahů, rozdílů mezi max a min hodnotou, průměrných odchylek od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů, průměrné velikosti sousledné, zpětné i netočivé složky a činitelů nesymetrie. Jediná odlišnost spočívá v průměrném fázovém posunu mezi fázory totožných fází, jelikož u RTV s ČZ má menší hodnotu než u RTV.

**Tab. 21:** Fázory  $U_{Li}$  FV řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Typ vedení		NTV		ITV		RTV		RTV s ČZ	
Potah		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Průměrný rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	17,25	10,44	3,25	3,25	1,99	1,89	8,07	1,01
	$u_{Li}$ (%)	7,47	4,52	1,41	1,41	0,86	0,82	3,49	0,44
Rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	18,31		3,25		2,33		8,07	
	$u_{Li}$ (%)	7,93		1,41		1,01		3,49	
Průměrná odchylka od sym. fáz. natočení fázorů 120° (°)		16,0	8,8	2,5	2,5	1,4	1,4	6,5	6,4
Průměrný fáz. posun mezi fázory totožných fází (°)		5,5		0,001		1,9		0,8	
Průměr sousledné složky	$ \bar{U}_L^{(1)} $ (kV)	49,14		52,15		51,62		51,24	
	$u_L^{(1)}$ (%)	21,28		22,58		22,35		22,19	
Průměr zpětné složky	$ \bar{U}_L^{(2)} $ (kV)	6,92		1,97		0,03		2,47	
	$u_L^{(2)}$ (%)	3,00		0,85		0,01		1,07	
Průměr netočivé složky	$ \bar{U}_L^{(0)} $ (kV)	5,57		0,08		1,14		3,60	
	$u_L^{(0)}$ (%)	2,41		0,04		0,49		1,56	
Průměr činitelů nesymetrie	$p_{21}$ (%)	14,09		3,77		0,05		4,81	
	$p_{01}$ (%)	11,33		0,16		2,21		7,03	

Lze tedy konstatovat, že se v tomto případě projevila analogie mezi nesymetrií napětí zátěže a nesymetrií indukovaných napětí.

Na výsledcích uvedených v Tab. 21 a Tab. 22 se rovněž prokázala souvislost mezi průměrnou velikostí netočivé složky indukovaných napětí do fázových vodičů, respektive činitele nesymetrie  $p_{01}$  a velikostí indukovaných napětí do zemnicích lan. Je zřejmý jednoznačný vliv transpozice na omezení velikosti indukovaných napětí do zemnicích lan. Dále se rovněž projevuje značný přínos modelované transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.2), jelikož při porovnání výsledků pro NTV a RTV s ČZ je patrné, že byla nesymetrie o poznání více omezena než je tomu v případě RTV s ČZ a RTV.

**Tab. 22:** Fázory  $U_{Li}$  ZL řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Typ vedení		NTV	ITV	RTV	RTV s ČZ
Průměrná hodnota	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	26,45	0,14	0,99	7,30
	$u_{Li}$ (%)	11,45	0,06	0,43	3,16
Průměrný rozdíl mezi ZL	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	1,96	0,0002	0,0018	0,95
	$u_{Li}$ (%)	0,85	0,0001	0,0008	0,41

## 9.1.3 Indukované proudy

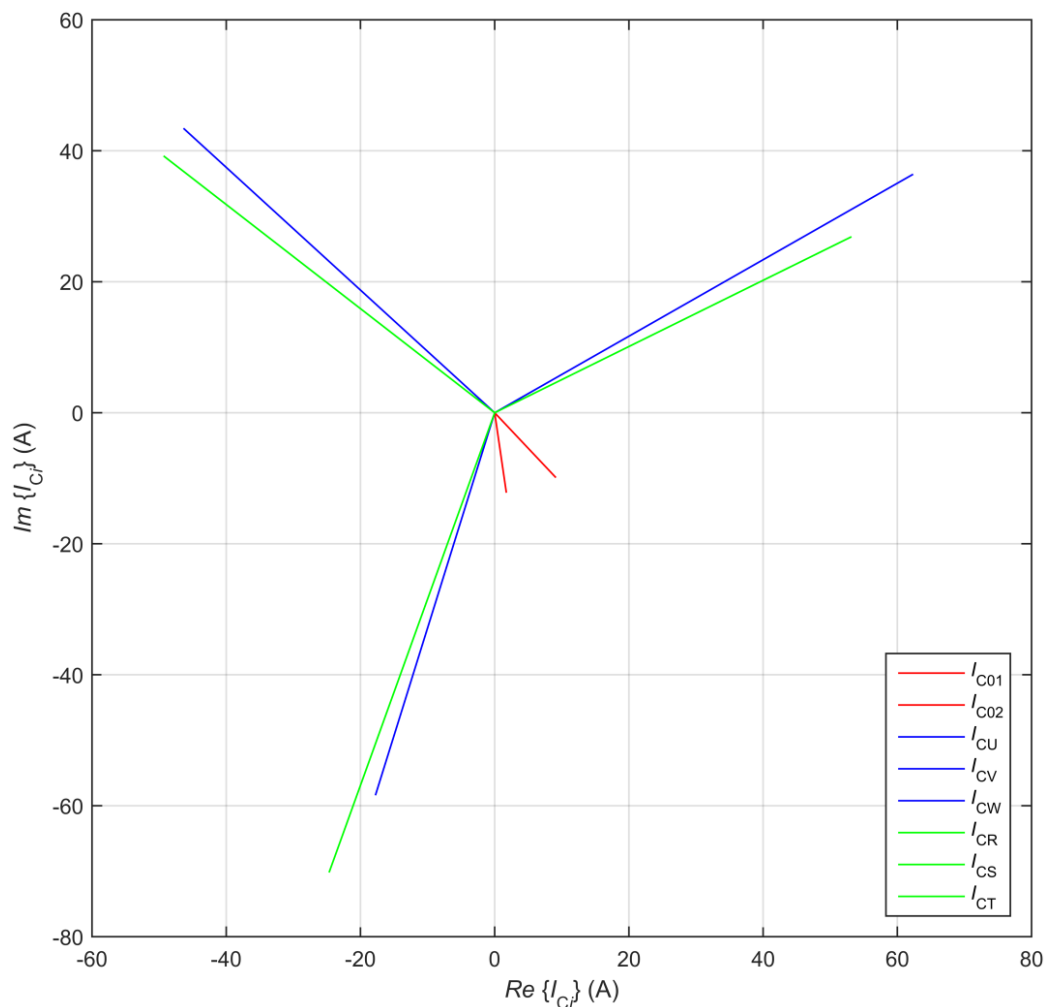
### 9.1.3.1 Netransponované vedení

**Tab. 23:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	60,93	63,40	72,08	74,28	62,90	59,44	12,21	13,34
$i_{Ci}$ (%)	2,43	2,53	2,88	2,97	2,51	2,38	0,49	0,53
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-106,9	136,9	30,29	-109,4	141,5	26,8	-81,9	-47,4

**Tab. 24:** Analýza  $I_{Ci}$  FV NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	64,91	2,59		-99,4
	2. (R, S, T)	65,07	2,60		-101,0
Zpětná	1. (U, V, W)	6,70	0,27	10,32	-168,1
	2. (R, S, T)	7,16	0,29	11,00	-137,7
Netočivá	1. (U, V, W)	7,16	0,29	11,03	94,7
	2. (R, S, T)	7,07	0,28	10,87	-168,8



**Obr. 57:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

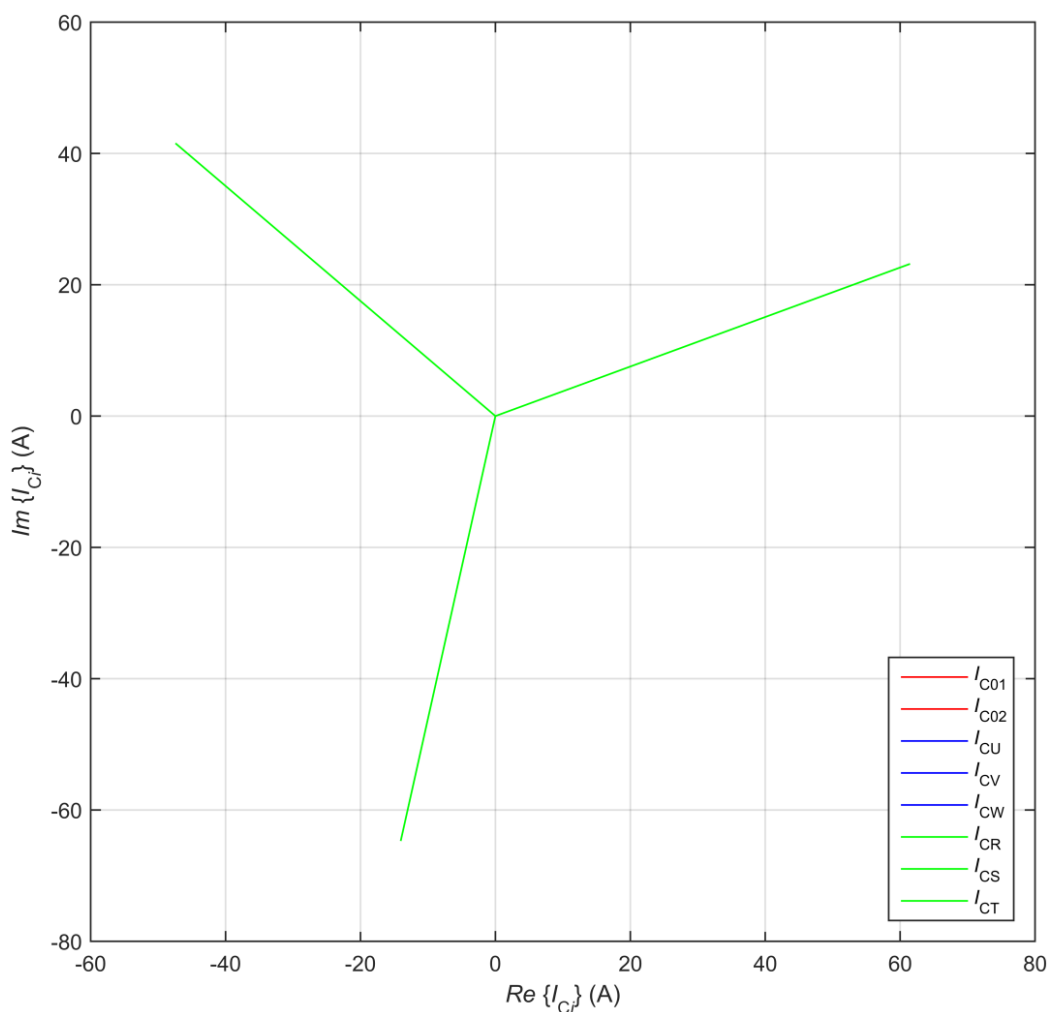
### 9.1.3.2 Ideálně transponované vedení

**Tab. 25:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	66,09	62,92	65,56	66,10	62,93	65,57	0,01	0,01
$i_{Ci}$ (%)	2,65	2,52	2,63	2,65	2,52	2,63	0,0005	0,0005
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-102,2	138,8	20,7	-102,2	138,8	20,7	-166,8	-168,3

**Tab. 26:** Analýza  $I_{Ci}$  FV ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	64,84	2,60		-100,9
	2. (R, S, T)	64,85	2,60		-100,9
Zpětná	1. (U, V, W)	1,95	0,08	3,004	-151,7
	2. (R, S, T)	1,95	0,08	3,002	-151,7
Netočivá	1. (U, V, W)	0,004	0,0002	0,006	-17,6
	2. (R, S, T)	0,004	0,0002	0,006	7,4



**Obr. 58:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

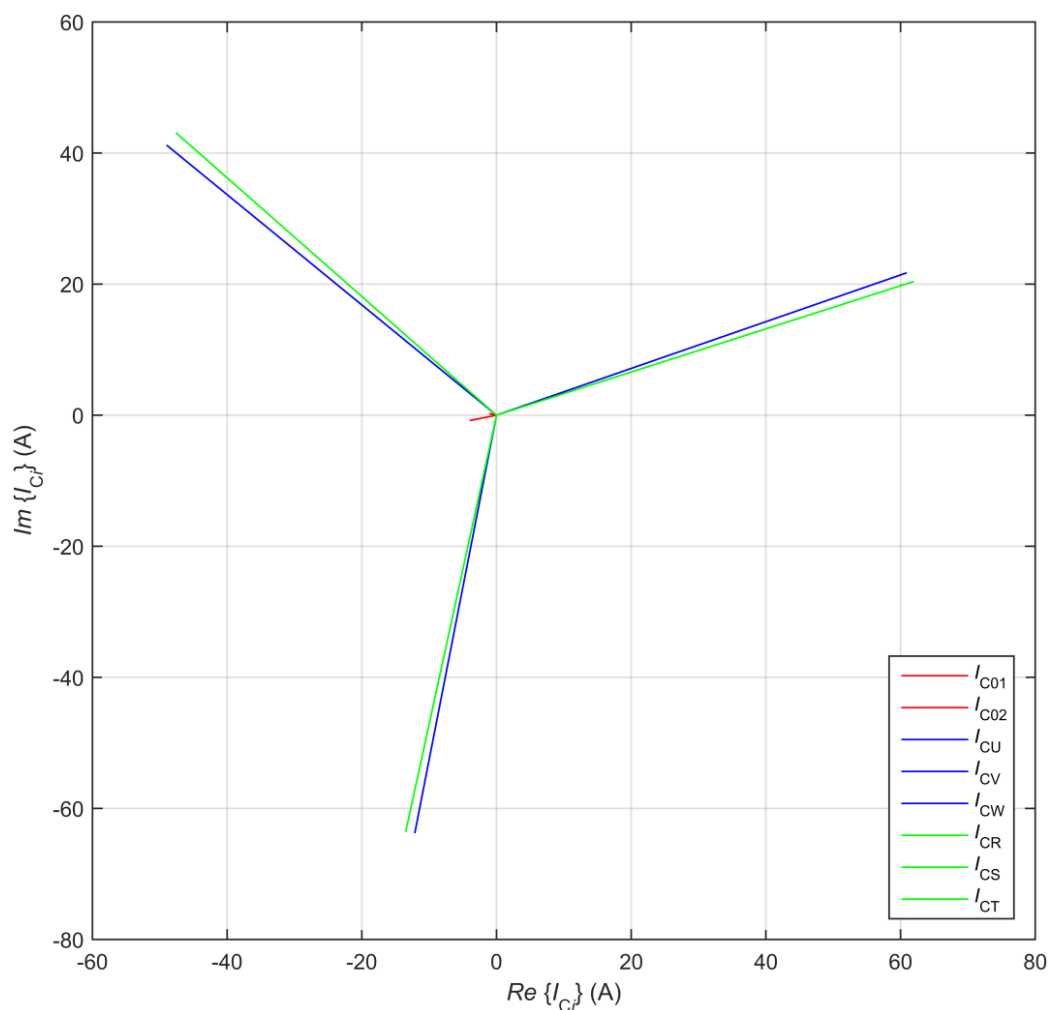
### 9.1.3.3 Reálně transponované vedení

**Tab. 27:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	64,80	63,89	64,55	64,87	64,08	65,13	3,95	0,99
$i_{Ci}$ (%)	2,60	2,57	2,59	2,61	2,58	2,62	0,16	0,04
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-100,8	139,9	19,6	-102,0	137,8	18,2	-168,5	166,5

**Tab. 28:** Analýza  $I_{Ci}$  FV RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	64,41	2,59		-100,4
	2. (R, S, T)	64,69	2,60		-102,0
Zpětná	1. (U, V, W)	0,41	0,02	0,63	-176,7
	2. (R, S, T)	0,38	0,02	0,58	-157,3
Netočivá	1. (U, V, W)	0,29	0,01	0,45	-104,0
	2. (R, S, T)	0,30	0,01	0,47	-5,6



**Obr. 59:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

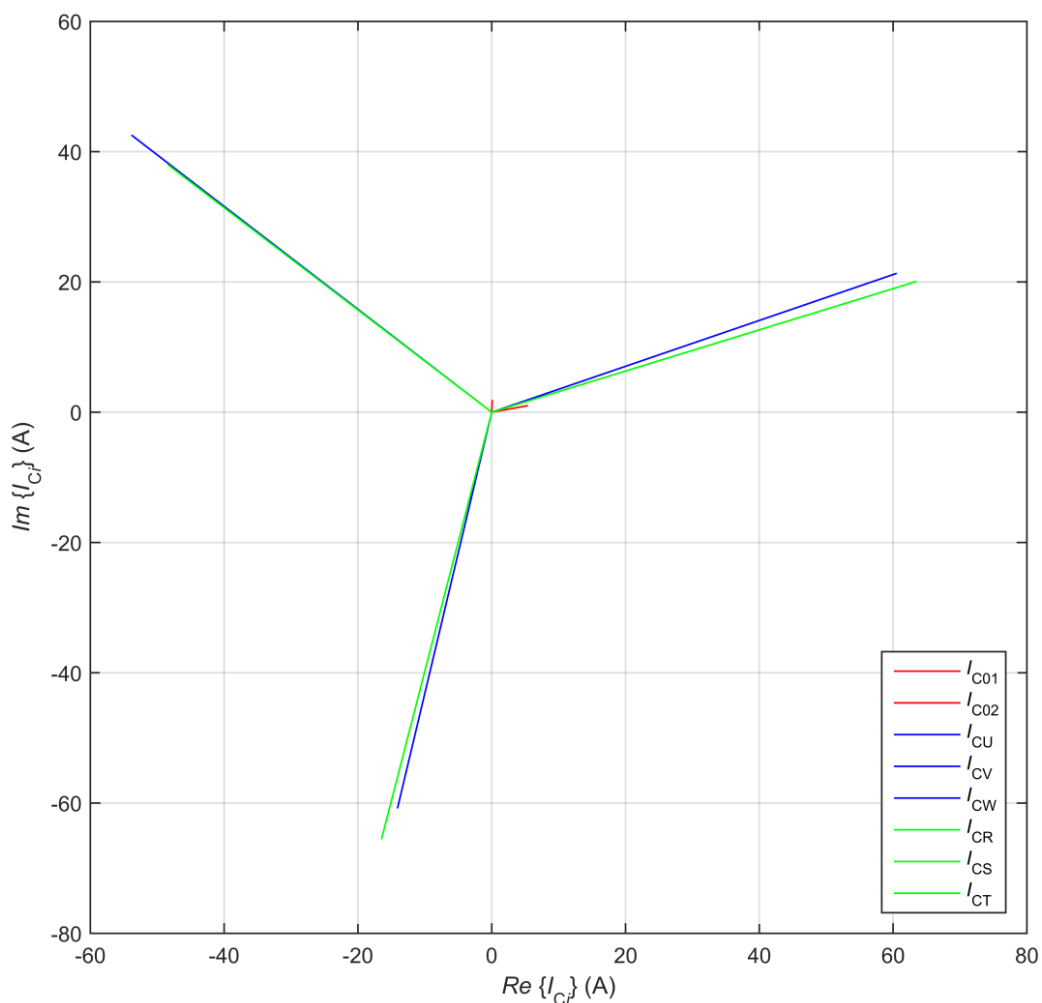
### 9.1.3.4 Reálně transponované vedení s částečnými zákruty

**Tab. 29:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	62,30	68,52	64,07	67,49	61,48	66,51	1,76	5,38
$i_{Ci}$ (%)	2,50	2,74	2,57	2,71	2,47	2,67	0,07	0,22
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-103,0	141,7	19,4	-104,1	141,9	17,5	87,6	10,6

**Tab. 30:** Analýza  $I_{Ci}$  FV RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	64,93	2,60		-100,6
	2. (R, S, T)	65,10	2,61		-101,7
Zpětná	1. (U, V, W)	2,13	0,09	3,29	81,4
	2. (R, S, T)	2,93	0,12	4,50	164,5
Netočivá	1. (U, V, W)	2,67	0,11	4,11	157,5
	2. (R, S, T)	2,53	0,10	3,88	-100,7



**Obr. 60:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012



### 9.1.3.5 Vzájemné porovnání řešených typů vedení

Na základě porovnání obdržných výsledků indukovaných proudů uvedených v Tab. 31 a napětí zátěže v Tab. 12 lze prohlásit, že závěry formulované v subkapitole 9.1.1 jsou platné i pro indukované proudy do fázových vodičů a to beze změny jak v případě možnosti modelovat RTV jako ITV, tak i co se týče průměrných rozdílů mezi max a min hodnotou v rámci jednotlivých potahů, průměrné velikosti sousledné, zpětné i netočivé složky a činitelů nesymetrie. Je zde však několik odlišností. Rozdíl mezi max a min hodnotou je výrazně omezen transpozicí, což je zřejmé z výsledků pro RTV s ČZ a zejména pak pro RTV. Totožné závěry lze učinit i u průměrné odchylky od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů. Poslední odlišnost je patrná v průměrném fázovém posunu mezi fázory totožných fází, jelikož u RTV s ČZ je menší nežli u RTV.

**Tab. 31:** Fázory  $I_{Ci}$  FV řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Typ vedení		NTV		ITV		RTV		RTV s ČZ	
Potah		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Průměrný rozdíl mezi max a min	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	11,16	14,83	3,17	3,17	0,91	1,05	6,22	6,01
	$i_{Ci}$ (%)	0,45	0,59	0,13	0,13	0,04	0,04	0,25	0,24
Rozdíl mezi max a min	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	14,83		3,18		1,24		7,04	
	$i_{Ci}$ (%)	0,59		0,13		0,05		0,28	
Průměrná odchylka od sym. vzáj. fáz. natočení fázorů (°)		11,5	10,8	1,9	1,9	0,5	0,3	3,2	4,0
Průměrný fáz. posun mezi fázory totožných fází (°)		3,5		0,001		1,6		1,0	
Průměr sousledné složky	$ I_C^{(1)} $ (A)	64,99		64,85		64,55		65,01	
	$i_C^{(1)}$ (%)	2,60		2,60		2,59		2,61	
Průměr zpětné složky	$ \bar{I}_C^{(2)} $ (A)	6,93		1,95		0,39		2,53	
	$i_C^{(2)}$ (%)	0,28		0,08		0,02		0,10	
Průměr netočivé složky	$ \bar{I}_C^{(0)} $ (A)	7,12		0,004		0,30		2,60	
	$i_C^{(0)}$ (%)	0,28		0,0002		0,01		0,10	
Průměr činitelů nesymetrie	$p_{21}$ (%)	10,66		3,00		0,61		3,89	
	$p_{01}$ (%)	10,95		0,006		0,46		4,00	

I přes tyto odlišnosti lze konstatovat, že se i v tomto případě projevila analogie mezi nesymetrií napětí zátěže a nesymetrií indukovaných proudů.

Na výsledcích uvedených v Tab. 21 a Tab. 32 se rovněž prokázala souvislost mezi průměrnou velikostí netočivé složky indukovaných proudů do fázových vodičů, respektive činitele nesymetrie  $p_{01}$  a velikostí indukovaných proudů do zemnicích lan. Je zřejmý jednoznačný vliv transpozice na omezení velikosti indukovaných proudů do zemnicích lan. Dále se rovněž projevuje značný přínos modelované transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.2), jelikož při porovnání výsledků pro NTV a RTV s ČZ je patrné, že byla nesymetrie o poznání více omezena než je tomu v případě RTV s ČZ a RTV.

**Tab. 32:** Fázory  $I_{Ci}$  ZL řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012

Typ vedení		NTV	ITV	RTV	RTV s ČZ
Průměrná hodnota	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	12,77	0,01	2,47	3,57
	$i_{Ci}$ (%)	0,51	0,0005	0,10	0,14
Průměrný rozdíl mezi ZL	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	1,13	0,00007	2,96	3,62
	$i_{Ci}$ (%)	0,05	0,000003	0,12	0,15

## 9.2 Vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

### 9.2.1 Napětí zátěže

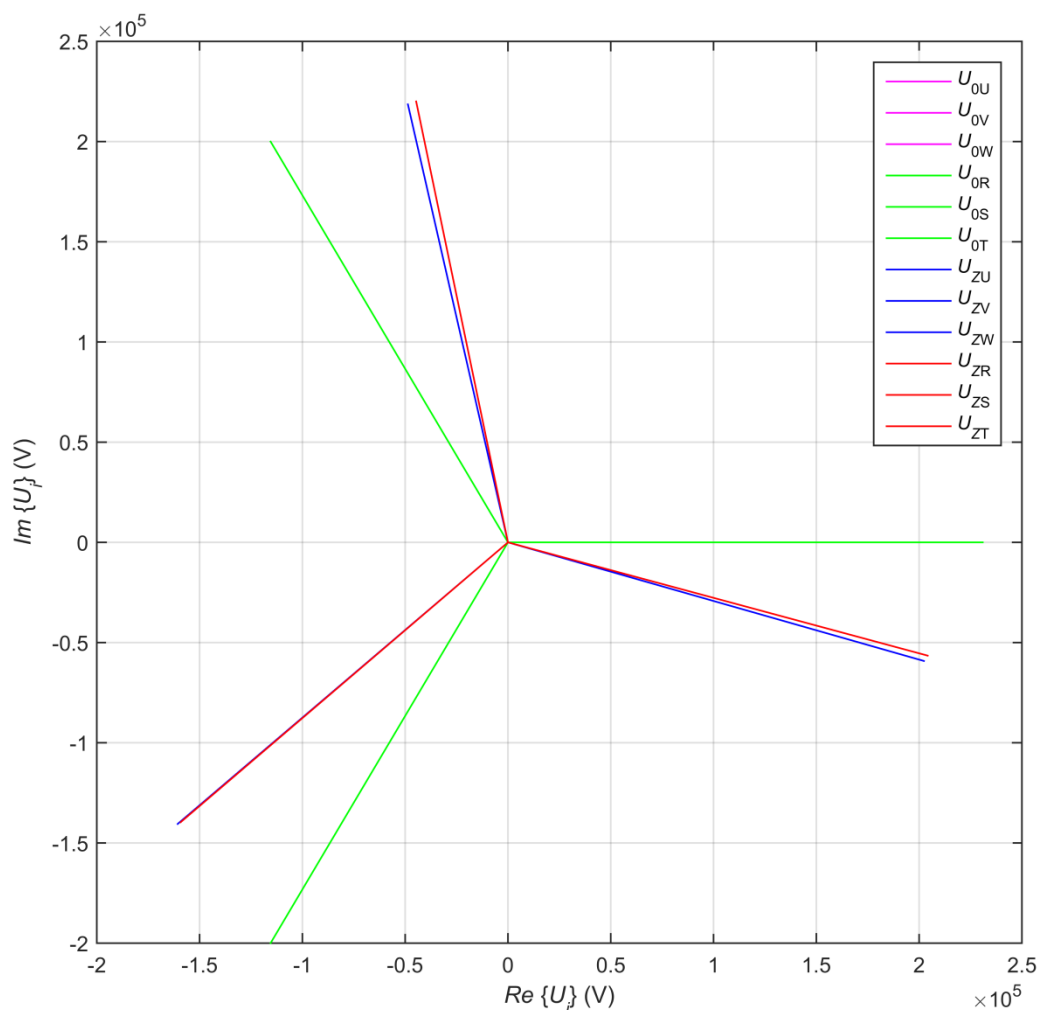
#### 9.2.1.1 Netransponované vedení

**Tab. 33:** Fázory  $U_{Zi}$  NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	210,82	213,44	223,94	211,85	211,80	224,51
$u_{Zi}$ (%)	91,29	92,42	96,97	91,73	91,71	97,22
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-16,3	-138,8	102,6	-15,5	-138,8	101,5

**Tab. 34:** Analýza  $U_{Zi}$  NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	216,03	93,54	0,64	-17,5
	2. (R, S, T)	215,98	93,52		-17,6
Zpětná	1. (U, V, W)	1,39	0,60	0,92	-162,6
	2. (R, S, T)	1,98	0,86	0,64	154,9
Netočivá	1. (U, V, W)	6,71	2,91	3,11	110,3
	2. (R, S, T)	7,95	3,44	3,68	89,3



**Obr. 61:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

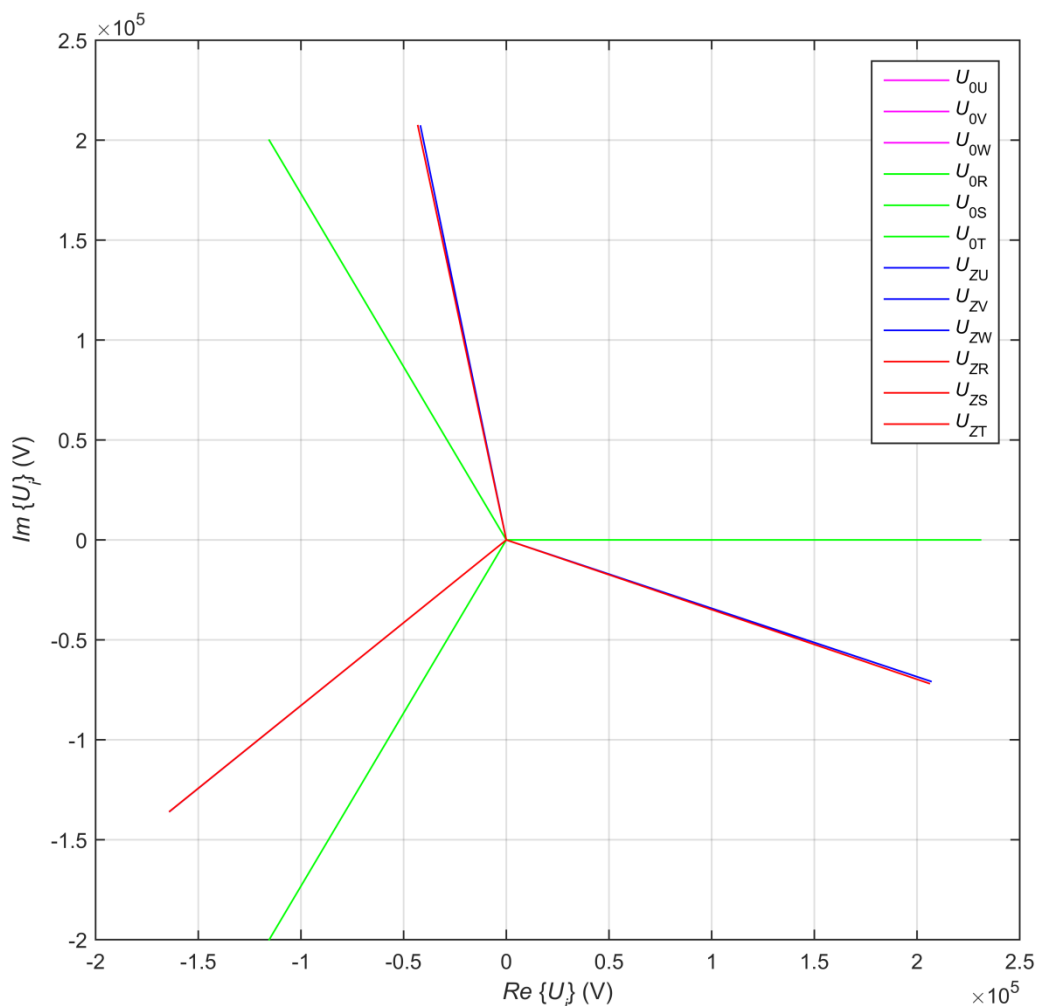
### 9.2.1.2 Ideálně transponované vedení

**Tab. 35:** Fázory  $U_{Zi}$  ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	218,55	212,90	211,22	218,11	212,86	211,66
$u_{Zi}$ (%)	94,64	92,19	91,46	94,45	92,17	91,65
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-18,9	-140,4	101,4	-19,2	-140,4	101,7

**Tab. 36:** Analýza  $U_{Zi}$  ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	214,20	92,75		-19,3
	2. (R, S, T)	214,19	92,75		-19,3
Zpětná	1. (U, V, W)	4,23	1,83	1,98	-2,7
	2. (R, S, T)	4,24	1,84	1,98	-13,1
Netočivá	1. (U, V, W)	0,38	0,16	0,18	21,4
	2. (R, S, T)	0,38	0,16	0,18	-160,0



**Obr. 62:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

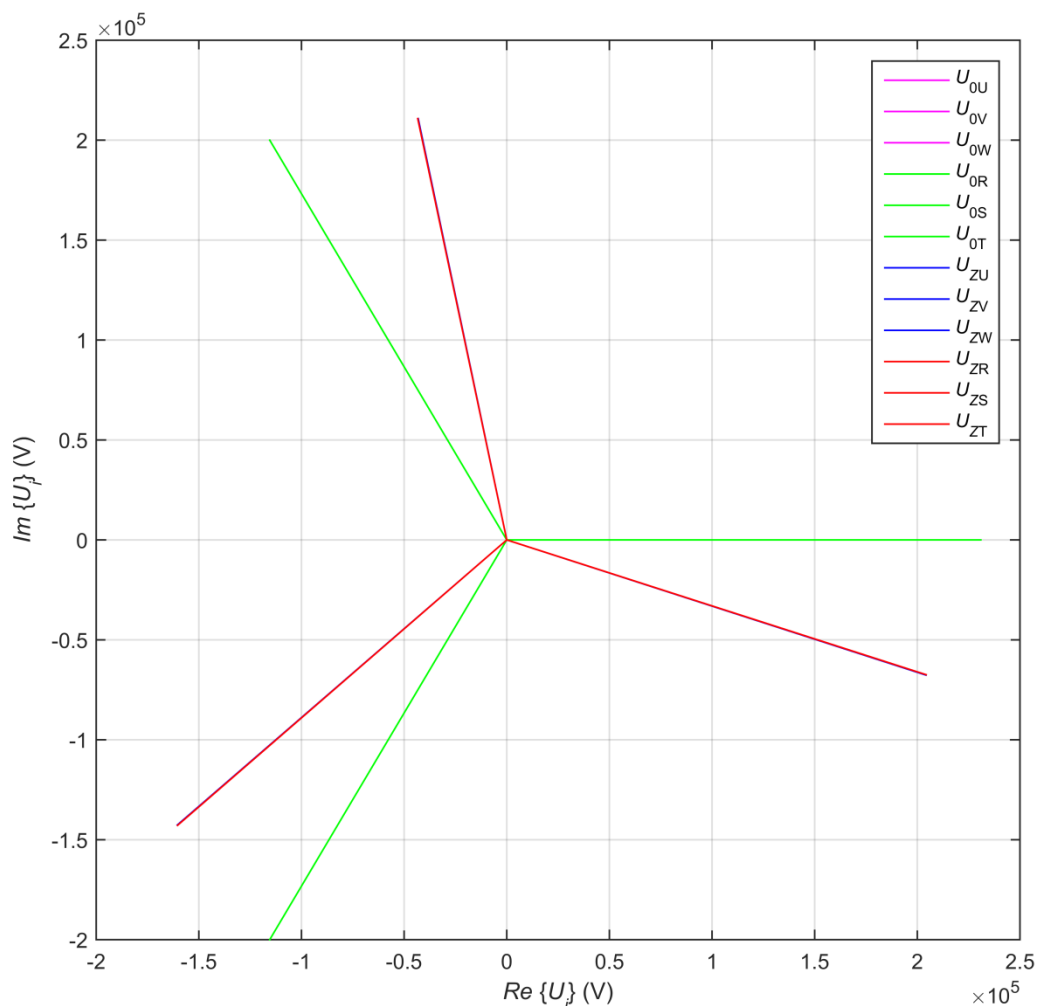
### 9.2.1.3 Reálně transponované vedení

**Tab. 37:** Fázory  $U_{Zi}$  RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	215,15	214,73	215,13	215,16	214,77	215,20
$u_{Zi}$ (%)	93,16	92,98	93,15	93,17	93,00	93,18
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-18,3	-138,4	101,6	-18,3	-138,3	101,6

**Tab. 38:** Analýza  $U_{Zi}$  RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	215,00	93,10		-18,4
	2. (R, S, T)	215,04	93,12		-18,3
Zpětná	1. (U, V, W)	0,02	0,01	0,01	-91,7
	2. (R, S, T)	0,03	0,01	0,01	-118,2
Netočivá	1. (U, V, W)	0,26	0,11	0,12	38,0
	2. (R, S, T)	0,25	0,11	0,12	42,8



**Obr. 63:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

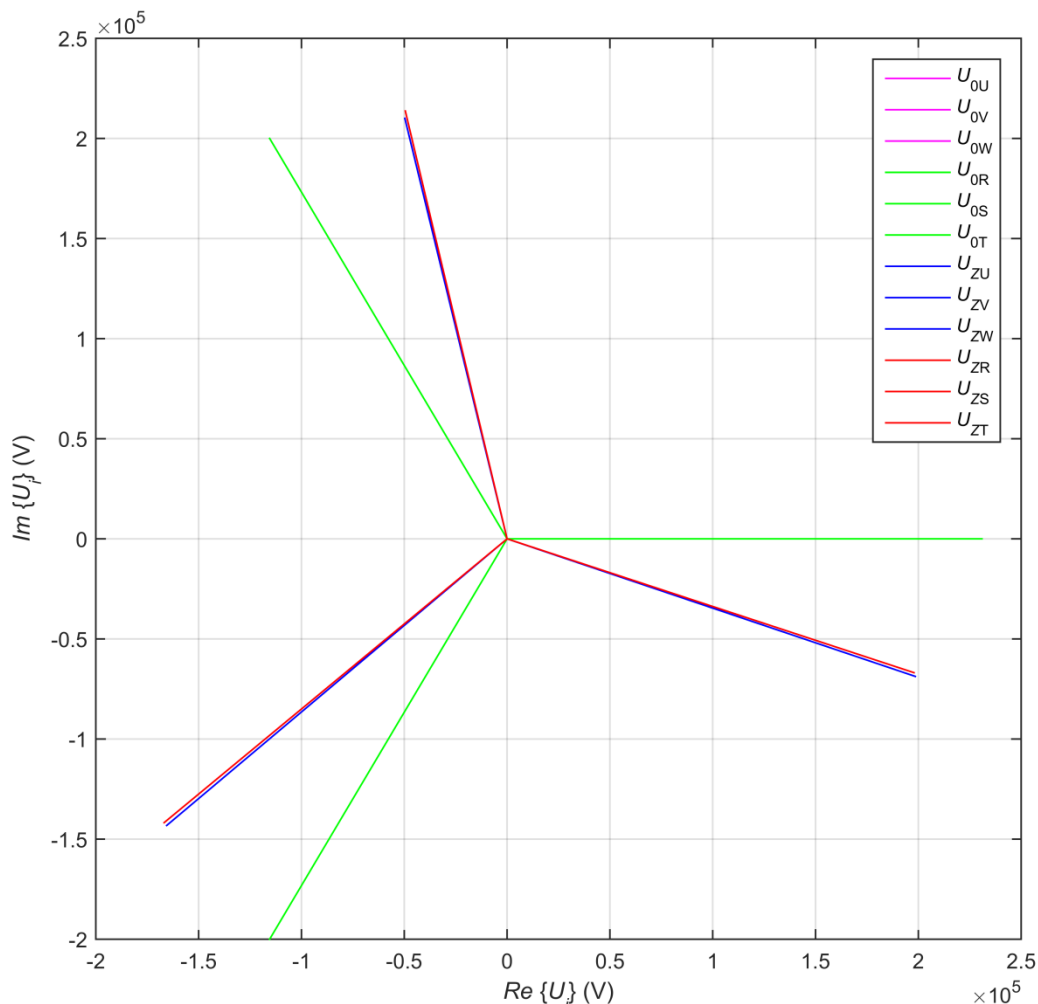
### 9.2.1.4 Reálně transponované vedení s částečnými zákruty

**Tab. 39:** Fázory  $U_{Zi}$  RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	210,10	218,88	215,85	208,87	218,90	219,38
$u_{Zi}$ (%)	90,98	94,78	93,47	90,45	94,79	94,99
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-19,1	-139,1	103,3	-18,7	-139,6	103,0

**Tab. 40:** Analýza  $U_{Zi}$  RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Zj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Zj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Zj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	214,90	93,05		-18,3
	2. (R, S, T)	215,68	93,39		-18,4
Zpětná	1. (U, V, W)	0,63	0,27	0,29	-81,8
	2. (R, S, T)	0,74	0,32	0,34	-145,7
Netočivá	1. (U, V, W)	5,61	2,43	2,61	-173,6
	2. (R, S, T)	6,36	2,76	2,95	164,6



**Obr. 64:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

### 9.2.1.5 Vzájemné porovnání řešených typů vedení

Z porovnání výsledků pro ITV a RTV uvedených v Tab. 41 vyplývá, že se značně odlišují, jako tomu bylo v případě stožárové konstrukce Dunaj 2012, a to jak v rozdílech mezi max a min velikostmi a průměrné odchylce od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů, tak zejména v průměrných velikostech symetrických složek a činitelů nesymetrie, zvláště v případě  $p_{21}$ . Z tohoto hlediska tedy opět nelze RTV modelovat jako ITV, aniž by nebyla zásadním způsobem snížena přesnost řešení, a je nutné modelovat vedení s ideální transpozicí (viz 6.4.2) korektním způsobem, což výrazně ztěžuje a prodlužuje tvorbu matematického modelu.

Dále lze konstatovat, že u NTV, RTV a RTV s ČZ se výrazně liší průměrný rozdíl mezi max a min hodnotou, jež je dle očekávání nejvyšší v případě NTV. Modelovanou transpozicí s částečnými zákruty (viz 6.4.3) je zmenšen, ale výrazně je omezen až u RTV. Největší rozdíl mezi max a min hodnotou lze pozorovat překvapivě u RTV s ČZ. Obdobně je tomu i u průměrné odchylky od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů a průměrného fázového posunu mezi fázory totožných fází, kdy v případě RTV s ČZ nabývají tyto ukazatele největší hodnoty bezprostředně po NTV. Rozklad napětí zátěže do symetrických složkových soustav ukázal, že průměrná velikost sousledné složky má přibližně stejnou hodnotu u všech řešených typů vedení. Odlišnost je však na první pohled patrná v průměrné velikosti zpětné a netočivé složky. Dle předpokladů vykazuje NTV největší hodnotu zpětné i netočivé složky, jež je více než čtyřnásobná. Vlivem transpozice dochází opět k jejich omezení, což je zřejmé z výsledků pro RTV s ČZ a zejména pak pro RTV.

Lze učinit závěr, že byl opět jednoznačně prokázán vliv transpozice na omezení nesymetrie napětí zátěže. Při porovnání výsledků pro NTV a RTV s ČZ spolu s výsledky pro RTV s ČZ a RTV lze zjistit, že přínos modelované transpozice s částečnými zákruty však není až tak veliký.

**Tab. 41:** Fázory  $U_{zi}$  řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Typ vedení		NTV		ITV		RTV		RTV s ČZ	
Potah		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Průměrný rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{zi} $ (kV)	13,12	12,71	7,33	6,46	0,42	0,43	8,78	10,50
	$u_{zi}$ (%)	5,68	5,50	3,18	2,80	0,18	0,19	3,80	4,55
Rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{zi} $ (kV)	13,69		7,33		0,47		10,50	
	$u_{zi}$ (%)	5,93		3,18		0,20		4,55	
Průměrná odchylka od sym. vzáj. fáz. natočení fázorů (°)		1,7	2,2	1,2	1,4	0,1	0,1	1,6	1,8
Průměrný fáz. posun mezi fázory totožných fází (°)		0,7		0,2		0,1		0,4	
Průměr sousledné složky	$ \bar{U}_z^{(1)} $ (kV)	216,01		214,20		215,02		215,29	
	$u_z^{(1)}$ (%)	93,53		92,75		93,11		93,22	
Průměr zpětné složky	$ \bar{U}_z^{(2)} $ (kV)	1,69		4,24		0,02		0,68	
	$u_z^{(2)}$ (%)	0,73		1,83		0,01		0,30	
Průměr netočivé složky	$ \bar{U}_z^{(0)} $ (kV)	7,33		3,76		0,25		5,99	
	$u_z^{(0)}$ (%)	3,17		0,16		0,11		2,59	
Průměr činitelů nesymetrie	$p_{21}$ (%)	0,78		1,98		0,01		0,32	
	$p_{01}$ (%)	3,39		0,18		0,12		2,78	



## 9.2.2 Indukovaná napětí

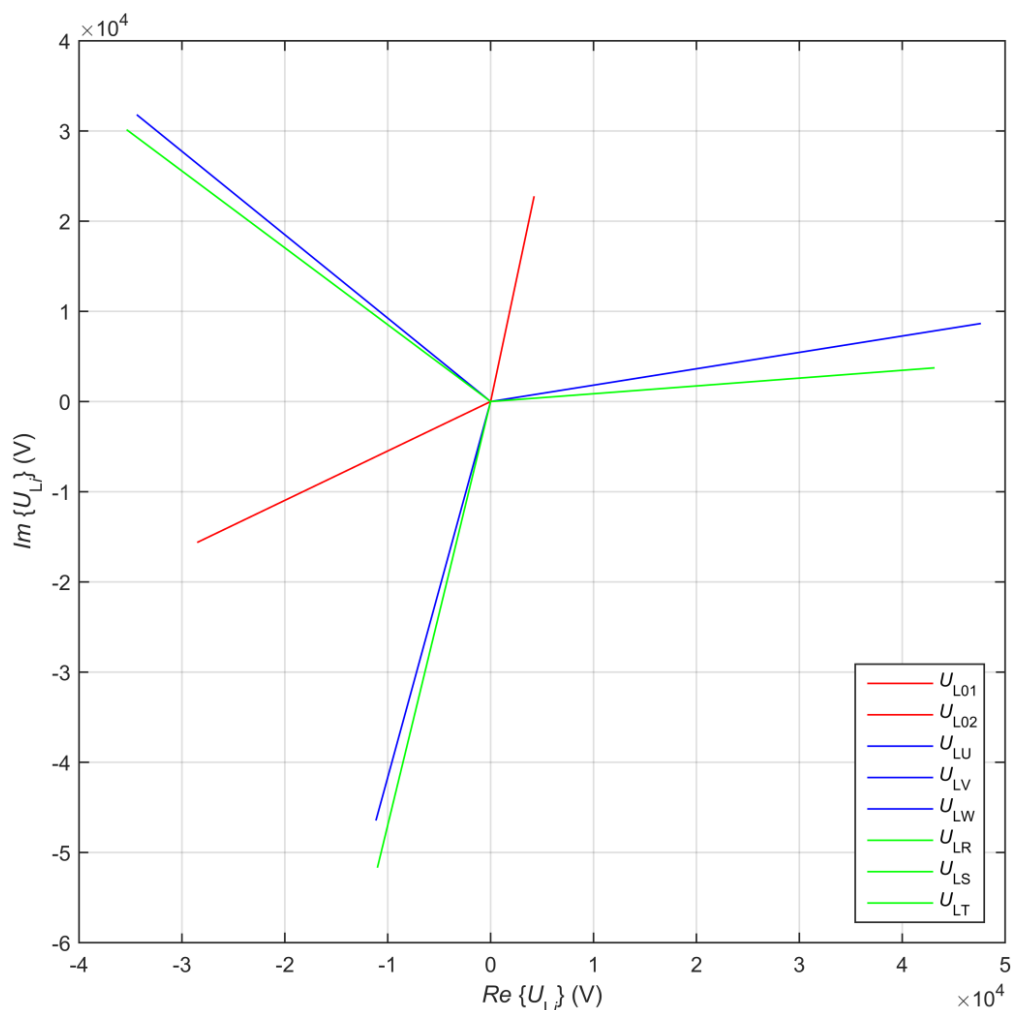
### 9.2.2.1 Netransponované vedení

**Tab. 42:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	47,68	46,76	48,35	52,76	46,39	43,23	32,44	23,07
$u_{Li}$ (%)	20,65	20,25	20,93	22,85	20,09	18,72	14,05	9,99
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-103,5	137,2	10,3	-102,0	139,6	5,0	-151,3	79,5

**Tab. 43:** Analýza  $U_{Li}$  FV NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	47,53	20,58		-105,4
	2. (R, S, T)	47,17	20,42		-105,5
Zpětná	1. (U, V, W)	1,64	0,71	3,45	62,5
	2. (R, S, T)	2,66	1,15	5,65	-4,6
Netočivá	1. (U, V, W)	2,11	0,92	4,44	-70,6
	2. (R, S, T)	6,02	2,61	12,77	-100,3



**Obr. 65:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

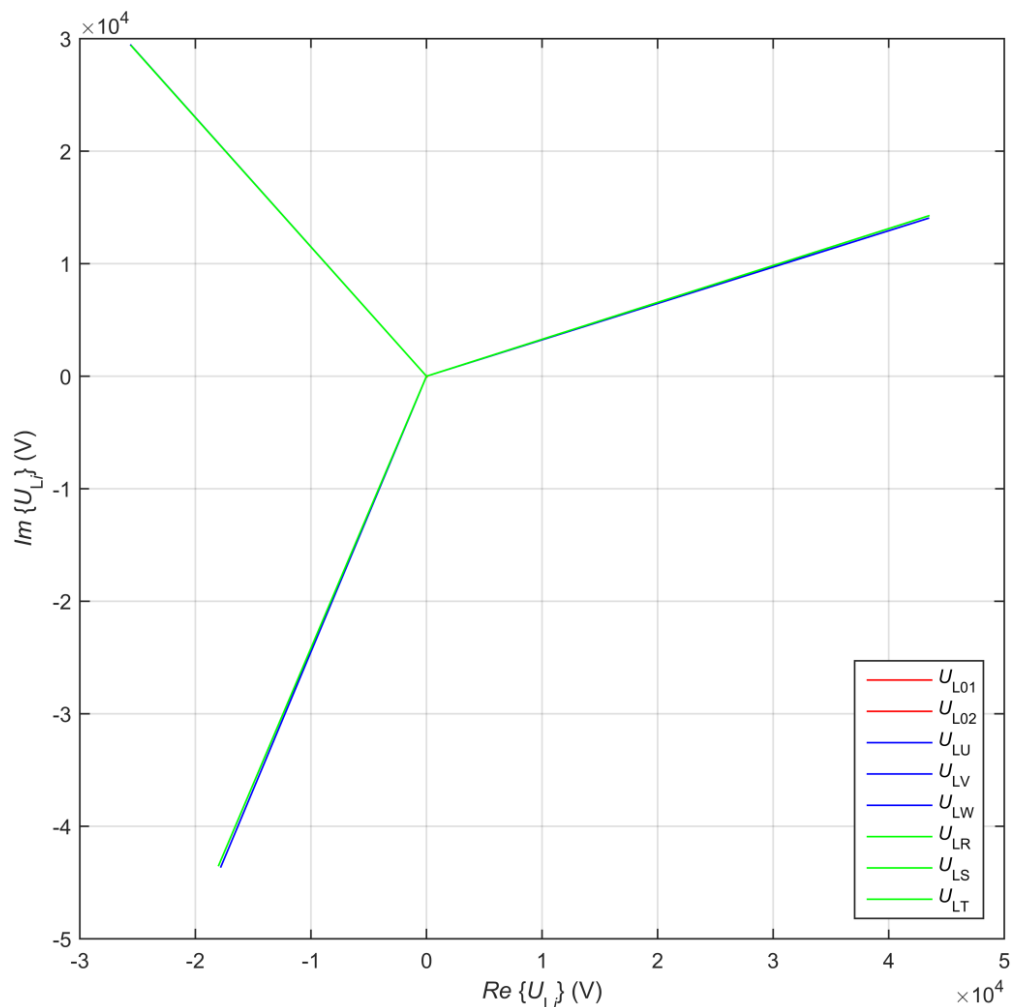
### 9.2.2.2 Ideálně transponované vedení

**Tab. 44:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	47,10	38,99	45,65	47,05	38,92	45,74	0,08	0,08
$u_{Li}$ (%)	20,39	16,88	19,77	20,37	16,85	19,81	0,04	0,03
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-112,2	131,0	17,9	-112,5	131,0	18,2	119,7	-66,7

**Tab. 45:** Analýza  $U_{Li}$  FV ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	43,79	18,96	-	-107,7
	2. (R, S, T)	43,77	18,95		-107,8
Zpětná	1. (U, V, W)	4,84	2,09	11,04	-157,4
	2. (R, S, T)	4,97	2,15	11,36	-158,3
Netočivá	1. (U, V, W)	0,05	0,02	0,12	-69,2
	2. (R, S, T)	0,05	0,02	0,12	116,1



**Obr. 66:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

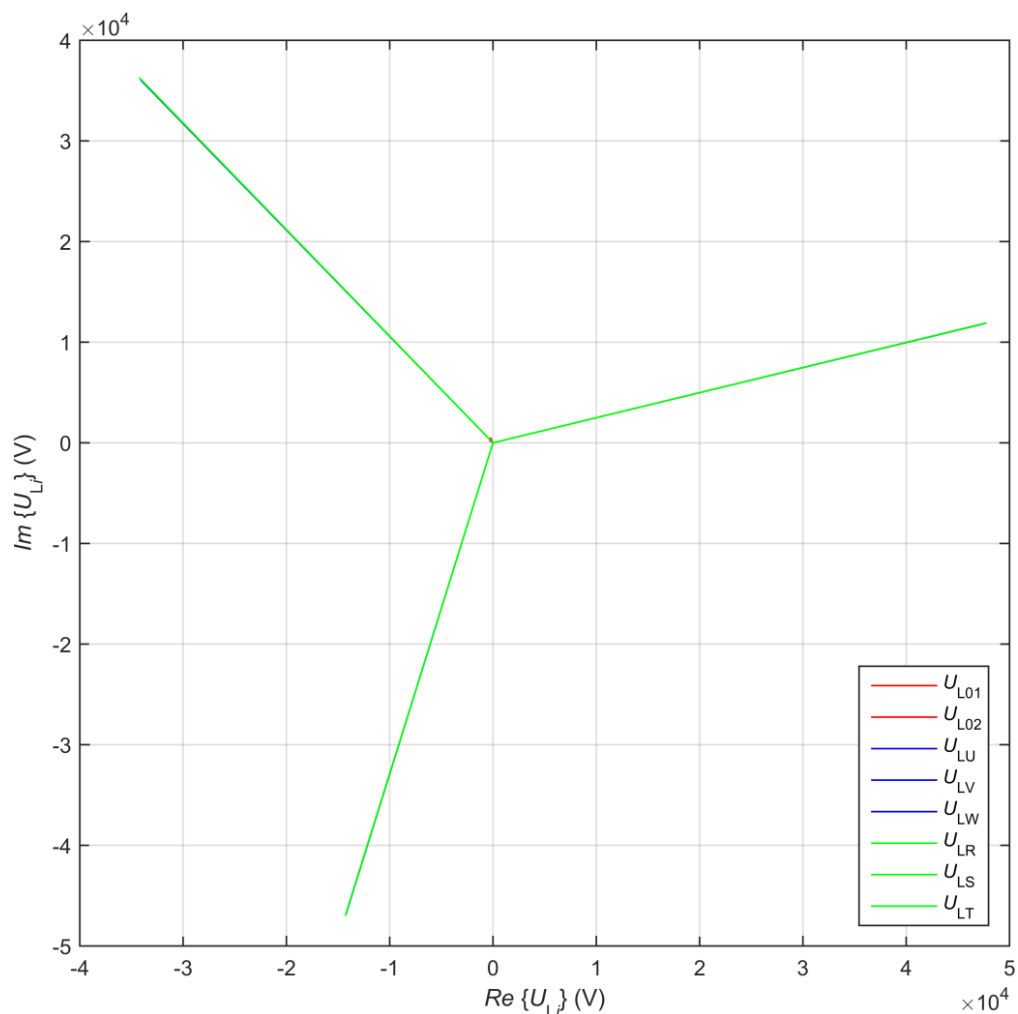
### 9.2.2.3 Reálně transponované vedení

**Tab. 46:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	48,85	49,57	48,96	49,05	49,81	49,16	0,52	0,38
$u_{Li}$ (%)	21,15	21,46	21,20	21,24	21,57	21,29	0,22	0,17
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-106,9	133,4	14,0	-106,9	133,3	14,0	117,8	144,2

**Tab. 47:** Analýza  $U_{Li}$  FV RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U,V,W)	49,12	21,27		-106,5
	2. (R, S, T)	49,34	21,37		-106,5
Zpětná	1. (U,V,W)	0,01	0,004	0,02	-58,5
	2. (R, S, T)	0,03	0,011	0,05	-65,8
Netočivá	1. (U,V,W)	0,45	0,19	0,91	124,3
	2. (R, S, T)	0,47	0,21	0,96	122,7



**Obr. 67:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

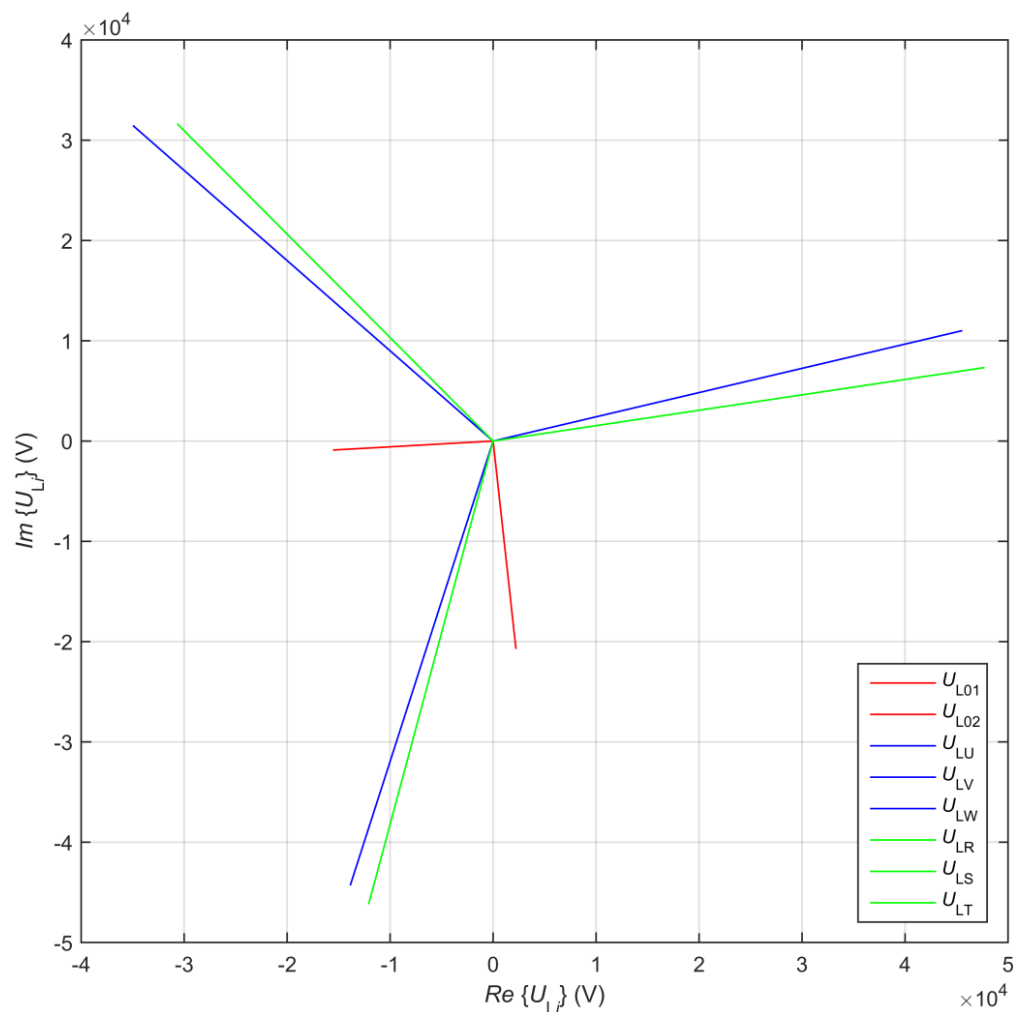
### 9.2.2.4 Reálně transponované vedení s částečnými zákruty

**Tab. 48:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	46,35	46,96	46,79	47,67	43,99	48,20	20,77	15,49
$u_{Li}$ (%)	20,07	20,34	20,26	20,64	19,05	20,87	8,99	6,71
$\arg \bar{U}_{Li}$ (°)	-107,4	138,0	13,6	-104,7	134,1	8,7	-83,9	-17,7

**Tab. 49:** Analýza  $U_{Li}$  FV RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{U}_{Lj}^{(i)} $ (kV)	$u_{Lj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{U}_{Lj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	46,66	20,21	-	-105,3
	2. (R, S, T)	46,56	20,16		107,3
Zpětná	1. (U, V, W)	1,48	0,64	3,17	109,1
	2. (R, S, T)	0,75	0,32	1,61	78,9
Netočivá	1. (U, V, W)	1,25	0,54	2,68	-150,8
	2. (R, S, T)	2,92	1,26	6,27	-55,5



**Obr. 68:** Fázory  $U_{Li}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

### 9.2.2.5 Vzájemné porovnání řešených typů vedení

Na základě porovnání obdržných výsledků indukovaných napětí uvedených v Tab. 50 a napětí zátěže v Tab. 41 lze prohlásit, že závěry formulované v subkapitole 9.2.1 jsou platné i pro indukovaná napětí do fázových vodičů a to beze změny jak v případě možnosti modelovat RTV jako ITV, tak i co se týče průměrných odchylek od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů, průměrné velikosti sousledné, zpětné i netočivé složky a činitelů nesymetrie. Je zde však několik odlišností. Průměrný rozdíl mezi max a min hodnotou v rámci jednotlivých potahů mezi NTV a RTV s ČZ, respektive RTV s ČZ a RTV je přibližně stejný. Dále největší rozdíl mezi max a min hodnotou vykazuje NTV. Naopak průměrný fázový posun mezi fázory totožných fází je největší u RTV s ČZ. Přínos modelované transpozice s částečnými zákruty je zde větší, jelikož nesymetrie mezi NTV a RTV s ČZ a mezi RTV s ČZ a RTV je přibližně stejná.

**Tab. 50:** Fázory  $U_{Li}$  FV řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Typ vedení		NTV		ITV		RTV		RTV s ČZ	
Potah		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Průměrný rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	1,58	9,53	8,10	8,13	0,72	0,76	0,61	4,21
	$u_{Li}$ (%)	0,69	4,13	3,51	3,52	0,31	0,33	0,26	1,82
Rozdíl mezi max a min	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	9,53		8,18		0,97		4,21	
	$u_{Li}$ (%)	4,13		3,54		0,42		1,82	
Průměrná odchylka od sym. vzáj. fáz. natočení fázorů (°)		4,6	9,7	6,7	7,1	0,59	0,62	3,6	4,4
Průměrný fáz. posun mezi fázory totožných fází (°)		3,1		0,2		0,03		3,8	
Průměr sousledné složky	$ \bar{U}_L^{(1)} $ (kV)	47,35		43,78		49,23		46,61	
	$u_L^{(1)}$ (%)	20,50		18,96		21,32		20,18	
Průměr zpětné složky	$ \bar{U}_L^{(2)} $ (kV)	2,15		4,90		0,02		1,11	
	$u_L^{(2)}$ (%)	0,93		2,12		0,008		0,48	
Průměr netočivé složky	$ \bar{U}_L^{(0)} $ (kV)	4,07		0,05		0,005		2,08	
	$u_L^{(0)}$ (%)	1,76		0,02		0,20		0,90	
Průměr činitelů nesymetrie	$p_{21}$ (%)	4,55		11,20		0,04		2,39	
	$p_{01}$ (%)	8,61		0,12		0,94		4,47	

I přes tyto odlišnosti lze konstatovat, že se i v tomto případě projevila analogie mezi nesymetrií napětí zátěže a nesymetrií indukovaných napětí.

Na výsledcích uvedených v Tab. 50 a Tab. 51 se rovněž prokázala souvislost mezi průměrnou velikostí netočivé složky indukovaných napětí do fázových vodičů, respektive činitele nesymetrie  $p_{01}$  a velikostí indukovaných napětí do zemnicích lan. Je zřejmý jednoznačný vliv transpozice na omezení velikosti indukovaných napětí do zemnicích lan. Přínos modelované transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.2) však nebyl až tak veliký, jak lze zjistit z porovnání výsledků pro NTV a RTV s ČZ spolu s výsledky pro RTV s ČZ a RTV.

**Tab. 51:** Fázory  $U_{Li}$  ZL řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Typ vedení		NTV	ITV	RTV	RTV s ČZ
Průměrná hodnota	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	27,75	0,08	0,45	18,13
	$u_{Li}$ (%)	12,02	0,03	0,19	7,85
Průměrný rozdíl mezi ZL	$ \bar{U}_{Li} $ (kV)	9,37	0,003	1,35	5,28
	$u_{Li}$ (%)	4,06	0,002	0,06	2,29

## 9.2.3 Indukované proudy

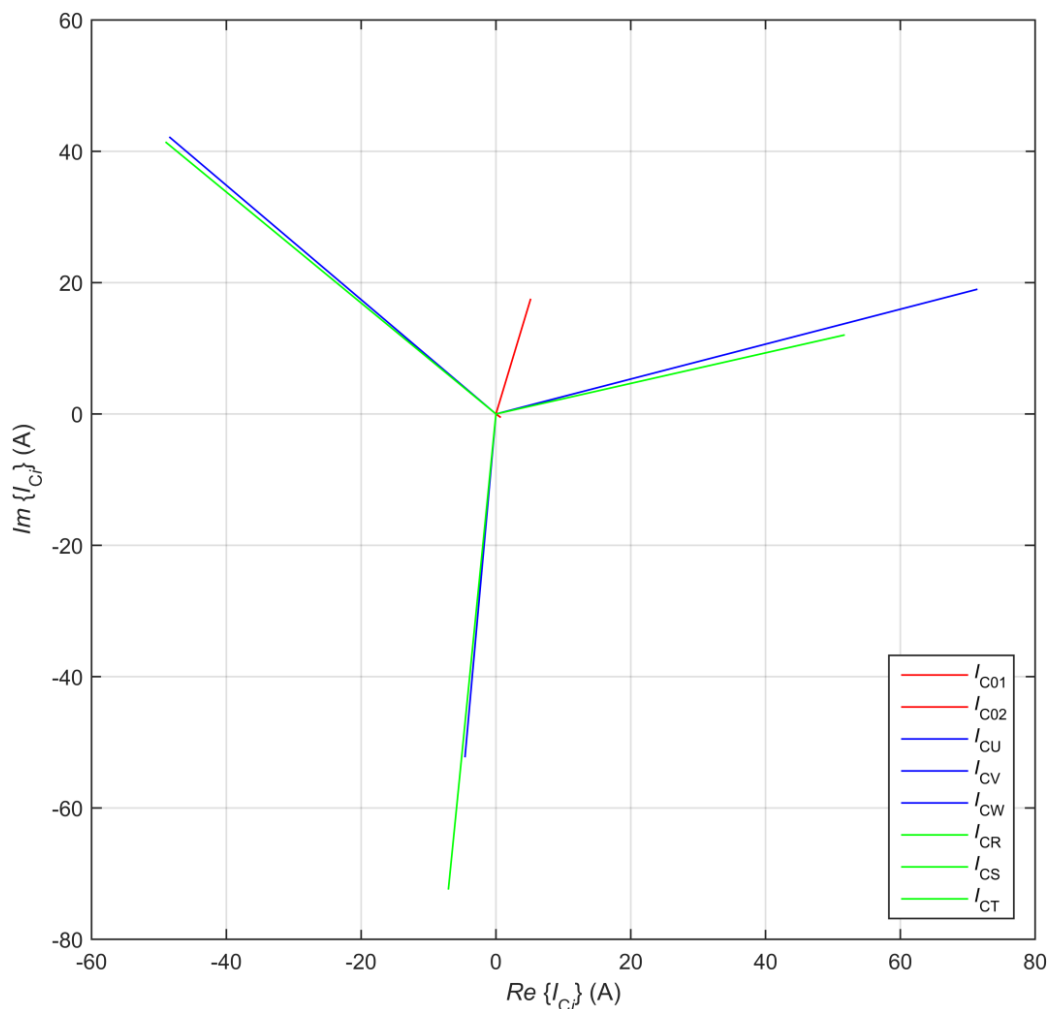
### 9.2.3.1 Netransponované vedení

**Tab. 52:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	52,37	64,14	73,80	72,65	64,07	53,02	0,77	18,17
$i_{Ci}$ (%)	2,10	2,58	2,96	2,92	2,57	2,12	0,03	0,73
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-95,0	139,0	14,9	-95,6	139,8	13,1	-36,8	73,6

**Tab. 53:** Analýza  $I_{Ci}$  FV NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	63,28	2,54		-101,0
	2. (R, S, T)	63,05	2,53		-100,3
Zpětná	1. (U, V, W)	7,11	0,29	11,24	79,2
	2. (R, S, T)	6,92	0,28	10,97	-35,0
Netočivá	1. (U, V, W)	6,80	0,27	10,75	25,9
	2. (R, S, T)	6,48	0,26	10,28	-102,9



**Obr. 69:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL NTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

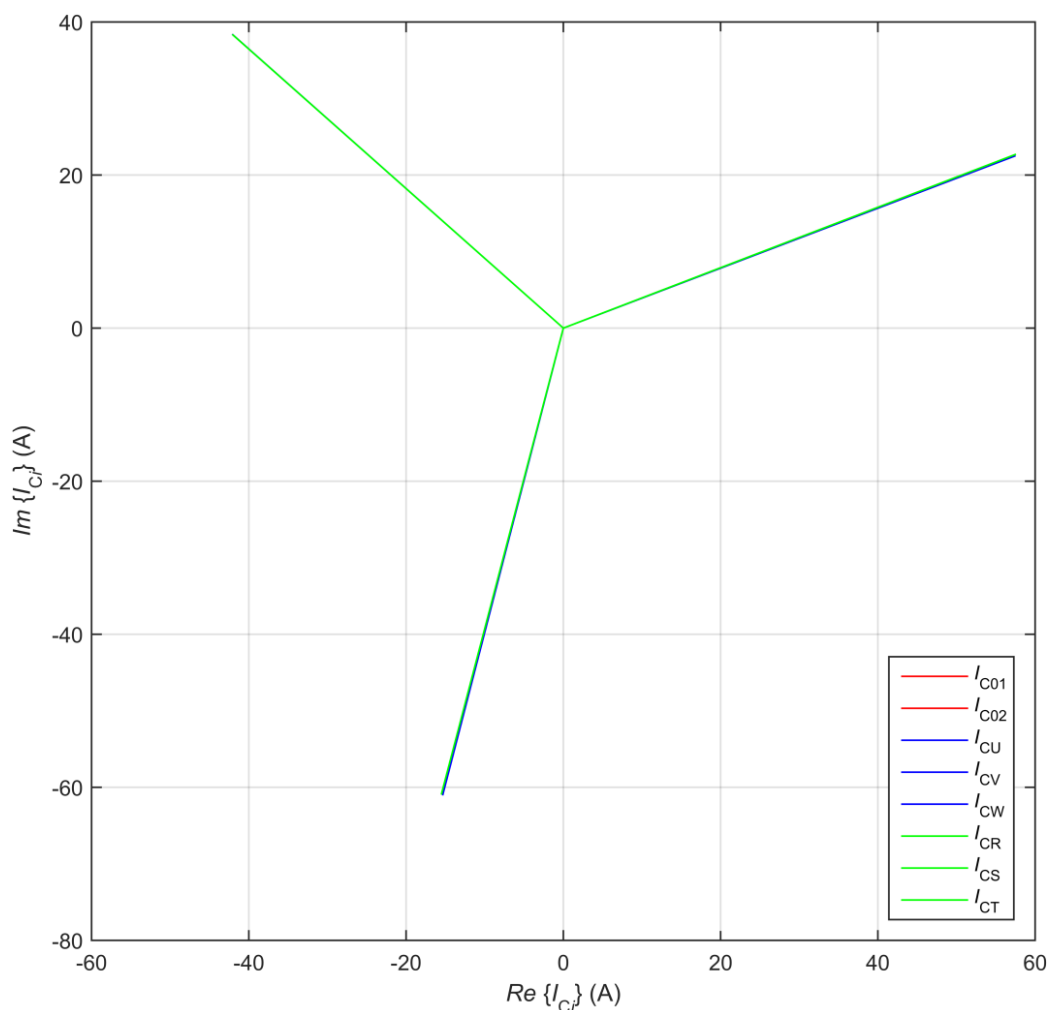
### 9.2.3.2 Ideálně transponované vedení

**Tab. 54:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	62,85	56,89	61,67	62,80	56,86	61,78	0,02	0,02
$i_{Ci}$ (%)	2,51	2,27	2,46	2,51	2,27	2,47	0,0009	0,0009
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-104,1	137,6	21,4	-104,3	137,7	21,5	112,3	-70,4

**Tab. 55:** Analýza  $I_{Ci}$  FV ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	60,42	2,41		-101,7
	2. (R, S, T)	60,42	2,41		-101,7
Zpětná	1. (U, V, W)	3,56	0,14	5,89	-150,6
	2. (R, S, T)	3,66	0,15	6,06	-151,9
Netočivá	1. (U, V, W)	0,05	0,002	0,08	-68,8
	2. (R, S, T)	0,05	0,002	0,08	110,8



**Obr. 70:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL ITV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014



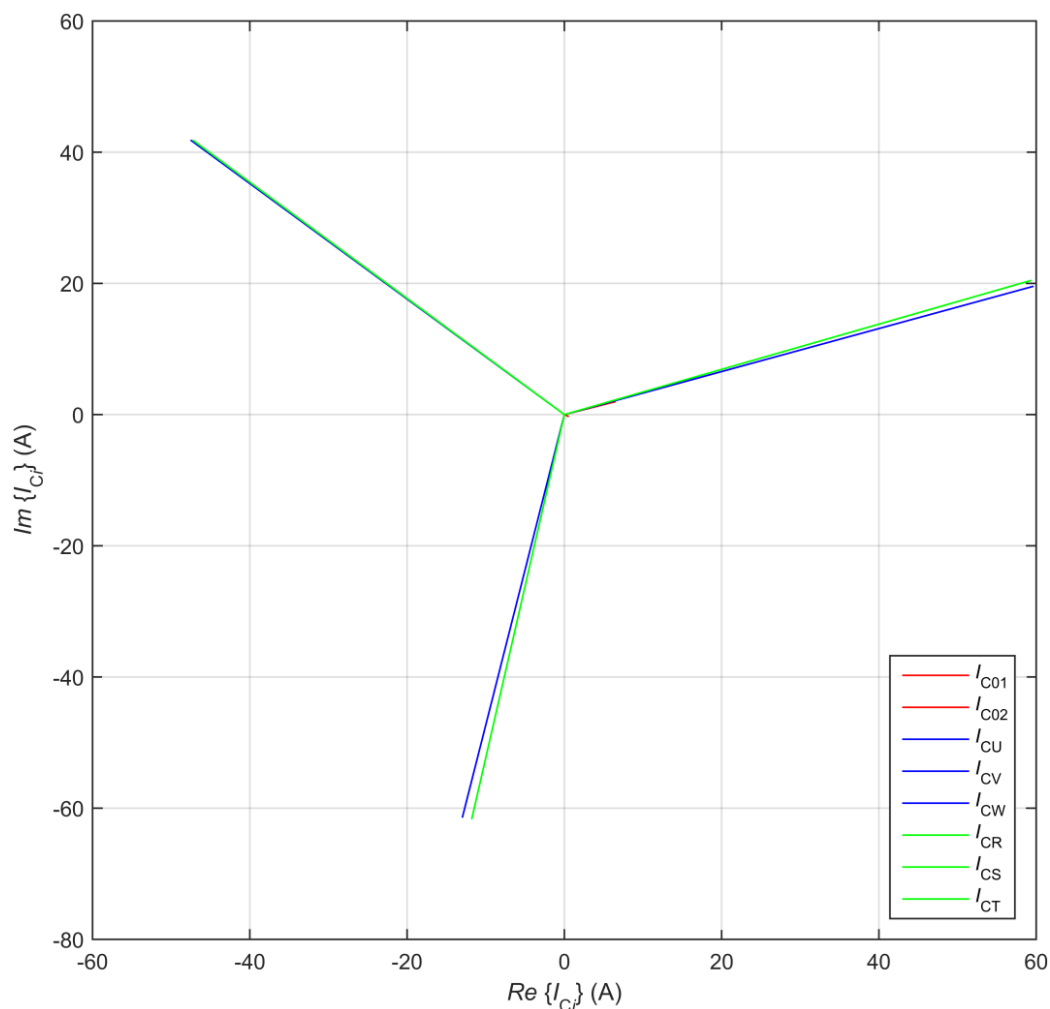
### 9.2.3.3 Reálně transponované vedení

**Tab. 56:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	62,68	63,21	62,69	62,68	63,01	62,71	6,73	0,53
$i_{Ci}$ (%)	2,51	2,54	2,51	2,51	2,53	2,52	0,27	0,02
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-101,9	138,6	18,2	-100,8	138,5	19,0	16,9	-29,2

**Tab. 57:** Analýza  $I_{Ci}$  FV RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	62,87	2,52		-101,7
	2. (R, S, T)	62,80	2,52		-101,1
Zpětná	1. (U, V, W)	0,25	0,01	0,39	70,44
	2. (R, S, T)	0,27	0,01	0,43	-35,5
Netočivá	1. (U, V, W)	0,28	0,01	0,44	-177,9
	2. (R, S, T)	0,24	0,01	0,38	61,3



**Obr. 71:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

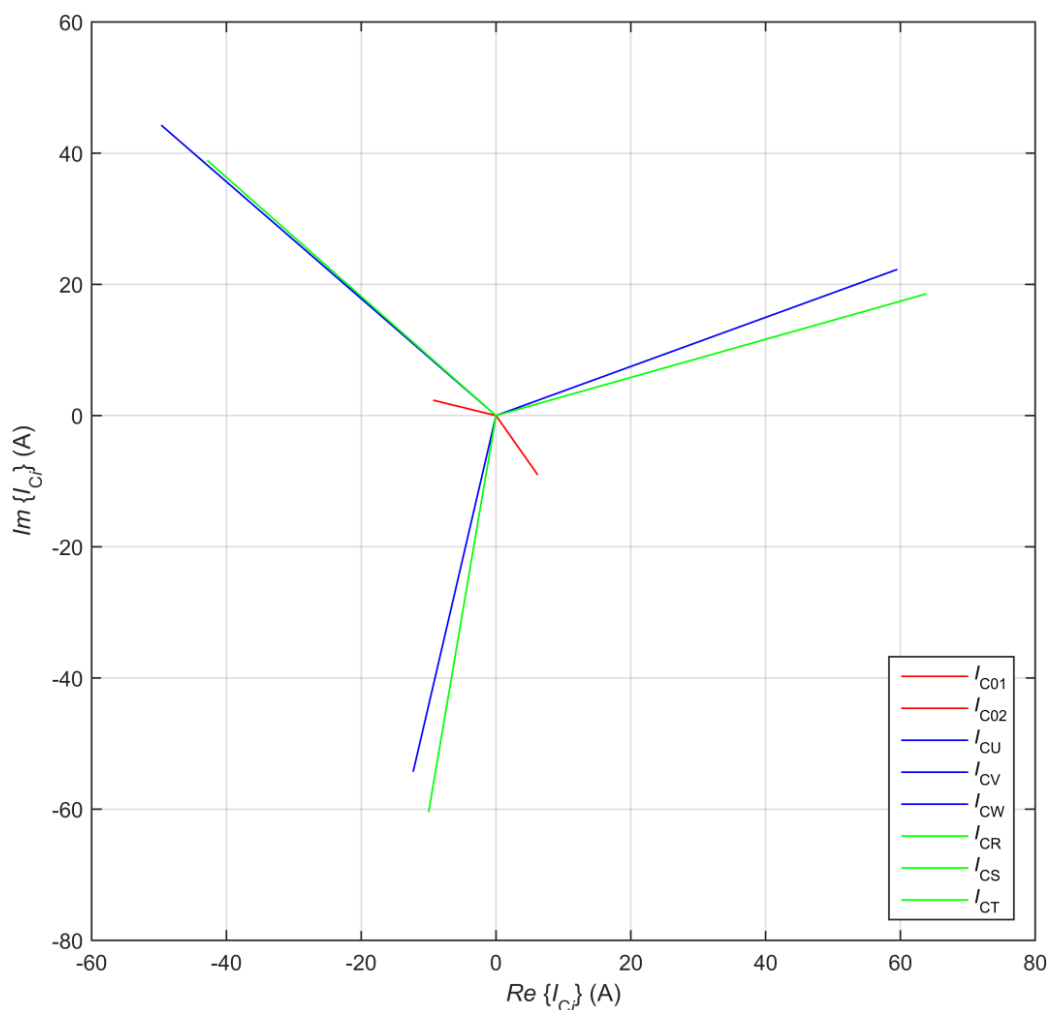
### 9.2.3.4 Reálně transponované vedení s částečnými zákruty

**Tab. 58:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Fáz. vodič / zem. lano	U	V	W	R	S	T	01	02
$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	55,55	66,42	63,45	61,14	57,75	66,36	10,85	9,48
$i_{Ci}$ (%)	2,23	2,67	2,55	2,45	2,32	2,66	0,44	0,38
$\arg \bar{I}_{Ci}$ (°)	-102,8	138,3	20,5	-99,4	137,8	16,2	-55,6	165,9

**Tab. 59:** Analýza  $I_{Ci}$  FV RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Složková soustava	Potah (fáze)	$ \bar{I}_{Cj}^{(i)} $ (A)	$i_{Cj}^{(i)}$ (%)	$p_{i1j}$ (%)	$\arg \bar{I}_{Cj}^{(i)}$ (°)
Sousledná	1. (U, V, W)	61,79	2,48		-101,3
	2. (R, S, T)	61,72	2,48		-101,9
Zpětná	1. (U, V, W)	2,42	0,10	3,91	75,4
	2. (R, S, T)	1,44	0,06	2,33	131,8
Netočivá	1. (U, V, W)	4,16	0,17	6,74	101,2
	2. (R, S, T)	3,79	0,15	6,15	-151,9



**Obr. 72:** Fázory  $I_{Ci}$  FV a ZL RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

### 9.2.3.5 Vzájemné porovnání řešených typů vedení

Při porovnání obdržných výsledků indukovaných proudů uvedených v Tab. 60 a napětí zátěže v Tab. 41 lze prohlásit, že závěry formulované v subkapitole 9.2.1 jsou platné i pro indukované proudy do fázových vodičů a to beze změny jak v případě možnosti modelovat RTV jako ITV, tak i co se týče průměrných odchylek od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů, průměrné velikosti sousledné, zpětné i netočivé složky a činitelů nesymetrie. Je zde však několik odlišností. Průměrný rozdíl mezi max a min hodnotou v rámci jednotlivých potahů mezi NTV a RTV s ČZ je přibližně stejný. Největší rozdíl mezi max a min hodnotou je u NTV. Naopak průměrný fázový posun mezi fázory totožných fází je největší u RTV s ČZ. Přínos modelované transpozice s částečnými zákruty je zde rovněž větší, jelikož nesymetrie mezi NTV a RTV s ČZ a mezi RTV s ČZ a RTV je omezena u netočivé složky přibližně stejně a velmi výrazně u zpětné složky.

**Tab. 60:** Fázory  $I_{Ci}$  FV řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Typ vedení		NTV		ITV		RTV		RTV s ČZ	
Potah		1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Průměrný rozdíl mezi max a min	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	21,43	19,63	5,96	5,94	0,53	0,33	10,87	8,61
	$i_{Ci}$ (%)	0,86	0,79	0,24	0,24	0,02	0,01	0,44	0,35
Rozdíl mezi max a min	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	21,43		5,99		0,53		10,87	
	$i_{Ci}$ (%)	0,86		0,24		0,02		0,44	
Průměrná odchylka od sym. vzáj. fáz. natočení fázorů (°)		6,7	7,6	3,7	3,9	0,4	0,5	2,2	2,9
Průměrný fáz. posun mezi fázory totožných fází (°)		1,1		0,11		0,7		2,7	
Průměr sousledné složky	$ I_C^{(1)} $ (A)	63,16		60,42		62,83		61,75	
	$i_C^{(1)}$ (%)	2,54		2,41		2,52		2,48	
Průměr zpětné složky	$ \bar{I}_C^{(2)} $ (A)	7,01		3,61		0,26		1,93	
	$i_C^{(2)}$ (%)	0,28		0,14		0,01		0,08	
Průměr netočivé složky	$ \bar{I}_C^{(0)} $ (A)	6,64		0,05		0,26		3,98	
	$i_C^{(0)}$ (%)	0,27		0,002		0,01		0,16	
Průměr činitelů nesymetrie	$p_{21}$ (%)	11,10		5,98		0,41		3,12	
	$p_{01}$ (%)	10,51		0,08		0,41		6,44	

I přes tyto odlišnosti lze konstatovat, že se i v tomto případě projevila analogie mezi nesymetrií napětí zátěže a nesymetrií indukovaných proudů.

Na výsledcích uvedených v Tab. 60 a Tab. 61 se výjimečně oproti předchozím případům neprokázala souvislost mezi průměrnou velikostí netočivé složky indukovaných proudů do fázových vodičů, respektive činitele nesymetrie  $p_{01}$  a velikostí indukovaných proudů do zemnicích lan. Je totiž viditelný pouze vliv transpozice na omezení průměrné velikosti indukovaných proudů do zemnicích lan mezi NTV a RTV, respektive mezi RTV s ČZ a RTV. Naopak u RTV s ČZ je průměrná hodnota indukovaných proudů do zemnicích lan větší nežli u NTV, což je dáno značnou diferencí mezi jejich velikostí. Z tohoto hlediska se modelovaná transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.2) projevuje negativně.

**Tab. 61:** Fázory  $I_{Ci}$  ZL řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Soudek 2014

Typ vedení		NTV	ITV	RTV	RTV s ČZ
Průměrná hodnota	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	9,47	0,02	3,63	10,17
	$i_{Ci}$ (%)	0,38	0,0009	0,15	0,41
Průměrný rozdíl mezi ZL	$ \bar{I}_{Ci} $ (A)	17,39	0,000006	6,20	1,37
	$i_{Ci}$ (%)	0,70	0,000002	0,25	0,06

### 9.3 Vzájemné porovnání řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 a Soudek 2014

Z porovnání výsledků napětí zátěže všech řešených typů vedení (viz 6.4) v případě stožárových konstrukcí Dunaj 2012 a Soudek 2014 (viz Tab. 12 a Tab. 41) lze učinit následující závěry. U NTV, RTV s ČZ a RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 má napětí zátěže průměrně větší hodnotu. Vykazuje však i větší rozdíl mezi max a min hodnotou i průměrný rozdíl mezi max a min hodnotou v rámci jednotlivých potahů, a to zejména u NTV a RTV. Obdobně tomu je i u průměrného fázového posunu mezi fázory totožných fází. U průměrných odchylek od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů činí v tomto trendu výjimku RTV s ČZ, u kterého je menší. Toto se opakuje i u velikosti zpětné a netočivé složky, což v konečném důsledku znamená, že v případě modelované transpozice s částečnými zákruty (viz 6.4.2) je hodnota činitele nesymetrie  $p_{01}$  menší i přes větší nesymetrii NTV.

Výše učiněné závěry pro napětí zátěže jsou platné i pro indukovaná napětí do fázových vodičů a to beze změny pro průměrné velikosti, průměrné rozdíly mezi max a min hodnotami v rámci jednotlivých potahů a rozdíly mezi max a min hodnotami. Je zde však několik následujících odlišností. Průměrný fázový posun mezi fázory totožných fází obou potahů je menší u RTV s ČZ a RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012. Dále průměrná odchylka od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů a velikost zpětné a netočivé složky je větší i u RTV s ČZ se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012. Co se týče indukovaných napětí do zemnicích lan, tak jsou v případě RTV s ČZ a RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 větší. Naopak je tomu v případě NTV.

V případě indukovaných proudů jsou výše učiněné závěry pro napětí zátěže platné beze změny pro průměrné velikosti, průměrný fázový posun mezi fázory totožných fází, průměrnou odchylku od symetrického vzájemného fázového natočení fázorů a velikost netočivé složky u RTV s ČZ. Je zde však několik následujících odlišností. Větší průměrný rozdíl mezi max a min hodnotou v rámci jednotlivých potahů a rozdíl mezi max a min hodnotou vykazuje vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 pouze u RTV. Dále pak NTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 vykazuje větší zpětnou složku. Co se týče indukovaných proudů do zemnicích lan, tak jsou v případě RTV s ČZ a RTV se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 menší. Naopak je tomu v případě NTV.

## Závěr

V první části diplomové práce (kapitola 2 a 3) jsem se věnoval proudové a napěťové nesymetrii, jejím dopadům, původu vzniku z pohledu venkovních vedení a jejímu omezení transpozicí fázových vodičů. V další části (kapitola 4) jsem se zabýval způsobem výpočtu pasivních parametrů vícenásobných vedení a vzájemných induktivních a kapacitních vazeb mezi vodiči.

Pro analýzu proudové a napěťové nesymetrie u dvojitých přenosových vedení jsem vytvořil obvodový model sestávající se z kaskádního zapojení  $\Gamma$  článků zohledňujících indukovaná napětí a proudy díky vzájemným induktivním a kapacitním vazbám. U transponovaného vedení jsem každý úsek mezi dvěma zákruty modeloval jako dílčí netransponované vedení. Tento obecný přístup mi umožnil modelovat vedení s libovolným provedením transpozice včetně částečných zákrutů a také jejich nerovnoměrným umístěním podél trasy vedení. Samotný efekt transpozice jsem respektoval pomocí změny vzájemných induktivních a kapacitních vazeb, jejichž velikost na daném úseku odpovídala geometrickému uspořádání vodičů na stožárové konstrukci. Pro možnost posouzení přímého vlivu konfigurace fázových vodičů na proudovou a napěťovou nesymetrii jsem předpokládal symetrické napájení i symetrickou zátěž. Přímou aplikací K. z. jsem následně formuloval matematický model, jež jsem řešil numericky pomocí vytvořeného programu v MATLABu. Učinil jsem řadu variantních výpočtů pro ideálně transponované, reálně transponované s úplnými nebo částečnými zákruty a netransponované vedení provozované na hladině 400 kV v případě stožárových konstrukcí Dunaj 2012 a Soudek 2014 (viz kapitola 6).

V prvé řadě jsem v kapitole 5 prováděl rozbor velikostí a nesymetrie vypočtených hodnot pasivních parametrů a vzájemných induktivních a kapacitních vazeb vztažených na 1 km délky pro případ netransponovaného a ideálně transponovaného vedení. Dospěl jsem k závěru, že při totožném zatížení netransponovaných vedení bude vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 vykazovat menší proudovou a napěťovou nesymetrii. Shodný závěr jsem učinil i v případě ideálně transponovaného vedení vykazujícího o poznání menší proudovou a napěťovou nesymetrii.

Za nejvýznamnější výsledek mé práce považuji získané závislosti mezního přenášeného výkonu všech čtyř řešených typů vedení na jejich délce v rozsahu od 1 do 100 km v kapitole 8. Výpočty jsem prováděl v souladu s požadavky normy

PNE 33 3300, respektive interní technické normy společnosti ČEPS, a.s na základě stanovení činitelů nesymetrie určených pomocí metody souměrných složek. Z provedených výpočtů jsem formuloval následující doporučení. Při projektování vedení do délky 36,5 km je vhodnější zvolit stožárové konstrukce Soudek 2014 a v tomto případě není potřeba vedení transponovat ani při přenosu maximálního dovoleného přenášeného výkonu odpovídajícího maximální proudové zatížitelnosti vedení 2500 A. Při větší délce je z hlediska technického i ekonomického smysluplnější přistoupit k použití stožárových konstrukcí Dunaj 2012 a pro konkrétní kombinaci velikosti maximálního možného přenášeného výkonu a délky vedení se zabývat nejprve možností realizace transpozice ve formě částečných zákrutů či jejich kombinací s úplnými zákruty a až následně přistoupit k úplným zákrutům. Při realizaci v této práci modelované transpozice s částečnými zákruty by bylo totiž možné přenášet maximální dovolený přenášený výkon až do délky 88 km. V tomto případě by zvýšené investiční náklady činily přibližně pouze 580 tis. Kč oproti 1,140 mil. Kč vynaložených u varianty s úplnými zákruty, k čemuž jsem dospěl na základě zjednodušeného posouzení ekonomické náročnosti transpozice fázových vodičů v kapitole 7.

V poslední 9. kapitole jsem se zabýval různými přístupy k hodnocení proudové a napěťové nesymetrie vedení. V případě všech čtyř řešených typů vedení o délce 100 km při přenosu maximálního dovoleného přenášeného výkonu jsem vyšetřoval nejen napětí zátěže, ale i indukovaná napětí a proudy do jednotlivých vodičů podél celé trasy vedení. Zjistil jsem, že v podstatě u všech řešených typů vedení se stožárovými konstrukcemi Dunaj 2012 se projevila větší proudová a napěťová nesymetrie. Dále se rovněž prokázala analogie mezi nesymetrií napětí zátěže a nesymetrií indukovaných napětí a proudů. Z tohoto a provedených testovacích výpočtů vyplývá, že lze k prvotnímu hodnocení proudové a napěťové nesymetrie vedení využít jednoduchý postup založený pouze na vyhodnocování indukovaných napětí, který je použitelný pro libovolně transponované vedení.

## Použitá literatura

- [1] *Technická dokumentace společnosti ČEPS, a.s.*
- [2] *Fotodokumentace společnosti ČEPS, a.s.*
- [3] *PNE 33 3300 2. vydání: Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV. ČSRES [online]. 1. 1. 2019 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: [https://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203300%20ed\\_2.pdf](https://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203300%20ed_2.pdf)*
- [4] Nazarčík, T.: *Výpočet činných ztrát a nesymetrií fázových proudů na přenosovém vedení 400 kV*, Západočeská univerzita v Plzni, 2015, studie pro ČEPS, a.s.
- [5] Brůna, M.: *Použití svazkových vodičů pro přenos elektrické energie na vedení vvn.* Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] Doležel, I.: *Elektrické obvody s rozprostřenými parametry: Určování vybraných parametrů elektrických vedení.* 2012.
- [7] Benešová, Z., Mayer, D.: *Algorithm for computation of inductances of three-phase overhead lines*, AMTEE'03 Plzeň: ZČU v Plzni 2003.
- [8] Benešová, Z., Šroubová, L.: *Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina 2004.
- [9] Brůna, M.: *Numerická studie geometrie svazkového vodiče.* Plzeň, 2017. Semestrální práce z předmětu KTE/MEL. Západočeská univerzita v Plzni.
- [10] Brůna, M.: *Analýza problematiky koróny na přenosových vedeních.* Plzeň, 2018. Semestrální práce z předmětu KEE/EPR2. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] Nazarčík, T.: *Analýza provozu kombinovaných vedení*, Západočeská univerzita v Plzni, 2016, studie pro ČEPS, a.s.
- [12] Kozubek, T., Brzobohatý, T., Jarošová, M., Hapla, V., Markopoulos, M.: *Lineární algebra s MATLABEM [online]. 2012 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: [http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/linearni\\_algebra\\_s\\_matlabem.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/linearni_algebra_s_matlabem.pdf)*
- [13] Benešová, Z., Šroubová, L.: *Omezení vlivu geometrické nesymetrie u paralelních venkovních vedení.* In EE 2003 Elektroenergetika . Košice : Technical University of Košice, 2003. s. 124-125. ISBN 80-8906180-X.
- [14] Transposition and Corrona in Transmission Line. In: *Dokument tips [online]. 6.6.2018 [cit. 2018-09-14]. Dostupné z: <https://dokumen.tips/documents/transposition-and-corrone-in-transmission-line.html>*
- [15] LADWP Transposition. In: *Ipernity [online]. 14.6. 2015 [cit. 2018-09-17]. Dostupné z: <http://www.ipernity.com/doc/290751/38609174>*
- [16] Torre de 230 kv com transposição de fases em Candido Mota - SP. Tower with phase transposition. In: *Flickr [online]. 8.11.2013 [cit. 2018-09-11]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/92036053@N06/10759003656/player/913797f485>*



# Přílohy

## Příloha A

Jsou zde uvedeny ilustrativní příklady zákrutových stožárů typu Dunaj, Portál, Delta a Třídřík používaných na území České republiky pro přenosová vedení o napěťové hladině 400 kV a ukázka již neexistující transpozice v rozpětí mezi stožáry.

Dále je zde uveden zákrutový stožár typu Soudek, se kterým se lze setkat na území České republiky na napěťových hladinách 110 kV a 220 kV a zahraniční zákrutové stožáry velice se podobající stožárové konstrukci Kočka. Tyto provedení by byly teoreticky možné i v případě stožárů těchto typů používaných v české přenosové soustavě u napěťové hladiny 400 kV.

### I. Zákrutové stožáry typu Dunaj



**Obr. A.1:** Zákrutový stožár typu Dunaj 1 [2]



**Obr. A.2:** Zákrutový stožár typu Dunaj 2 [2]



**Obr. A.3:** Zákrutový stožár typu Dunaj 3 [2]



**Obr. A.4:** Zákrutový stožár typu Dunaj 4 [2]



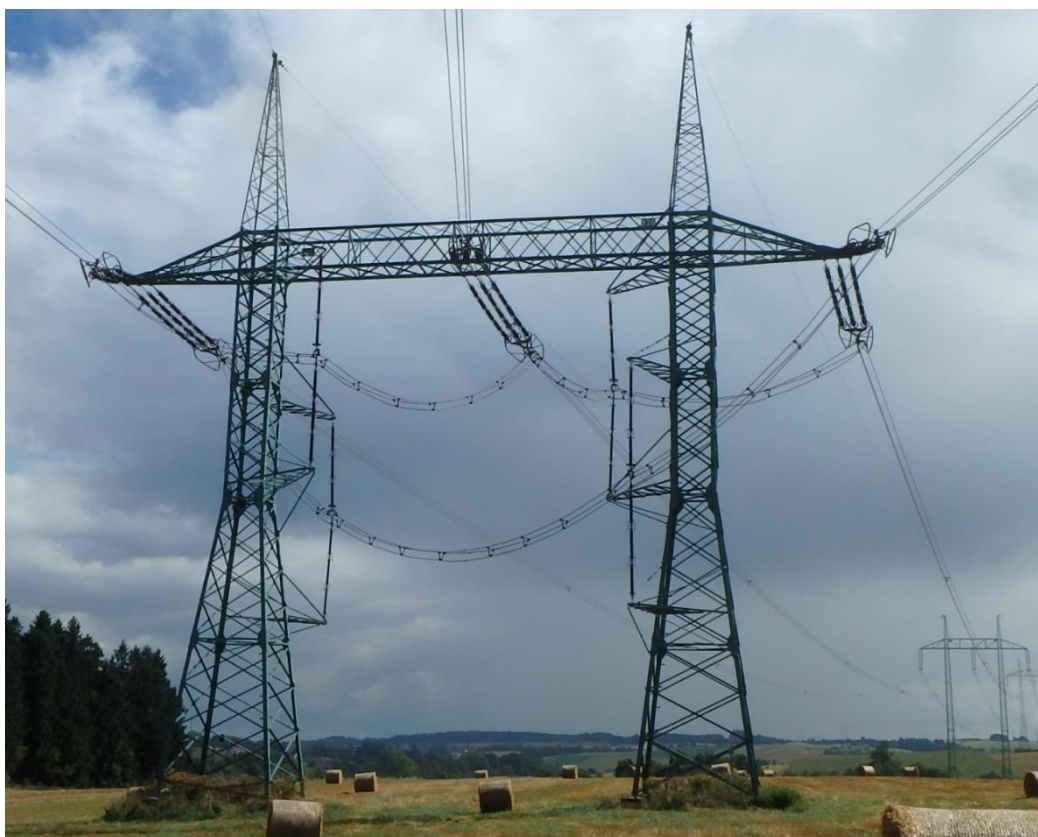
**Obr. A.5:** Zákrutový stožár typu Dunaj 5 [2]



## II. Zákřutové stožáry typu Portál



Obr. A.6: Zákřutový stožár typu Portál 1 [2]



Obr. A.7: Zákřutový stožár typu Portál 2 [2]



**Obr. A.8:** Zákrutový stožár typu Portál 3 [2]



**Obr. A.9:** Zákrutový stožár typu Portál 4 [2]

### III. Zákrutové stožáry typu Delta



Obr. A.10: Zákrutový stožár typu Delta 1 [2]



Obr. A.11: Zákrutový stožár typu Delta 2 [2]



## IV. Zákrutové stožáry typu Třídřík



Obr. A.12: Zákrutový stožár typu Třídřík 1 [2]



Obr. A.13: Zákrutový stožár typu Třídřík 2 [2]

## V. Transpozice v rozpětí mezi stožáry



**Obr. A.14:** Transpozice v rozpětí mezi stožáry 1 [2]



**Obr. A.15:** Transpozice v rozpětí mezi stožáry 2 [2]



## VI. Zákrtový stožár typu Soudek



Obr. A.16: Zákrtový stožár typu Soudek [2]

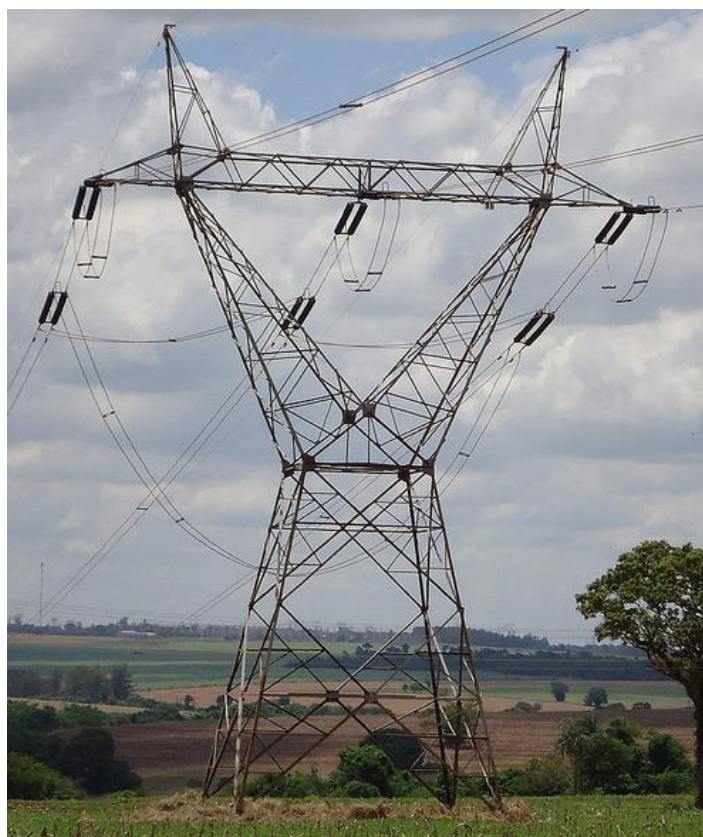
## VII. Zákrtové stožáry typu Kočka



Obr. A.17: Zákrtový stožár typu Kočka 1 [14]



**Obr. A.18:** Zákrutový stožár typu Kočka 2 [15]



**Obr. A.19:** Zákrutový stožár typu Kočka 3 [16]

## Příloha B

V této kapitole byl posuzován vliv indukovaného proudu díky vzájemným kapacitním vazbám (dále jen indukovaný proud) a indukovaného napětí vlivem vzájemných induktivních vazeb (dále jen indukované napětí) na přesnost obdržených výsledků fázových napětí zátěže (dále jen  $U_{Zi}$ ).

Výpočty byly provedeny na modelu dvojitého netransponovaného vedení se dvěma zemnicemi lany se stožárovou konstrukcí typu Dunaj 2012 o délce 100 km. Hodnota přenášeného výkonu vedením byla na samé horní dovolené hranici odpovídající maximální proudové zatížitelnosti vedení 2500 A. Každý vodič byl modelován pomocí jednoho  $\Gamma$  článku. Byly zkoumány všechny čtyři možné následující případy:

- S uvažováním vlivu indukovaných napětí a indukovaných proudů (viz I.).
- S uvažováním vlivu indukovaných napětí (bez vlivu indukovaných proudů) (viz II.).
- S uvažováním vlivu indukovaných proudů (bez uvažování vlivu indukovaných napětí) (viz III.).
- Bez uvažování vlivu indukovaných napětí a indukovaných proudů (viz IV.).

Pro interpretaci obdržených efektivních hodnot je využit dále popsáný jednotný styl spočívající ve využití tabulky a grafu.

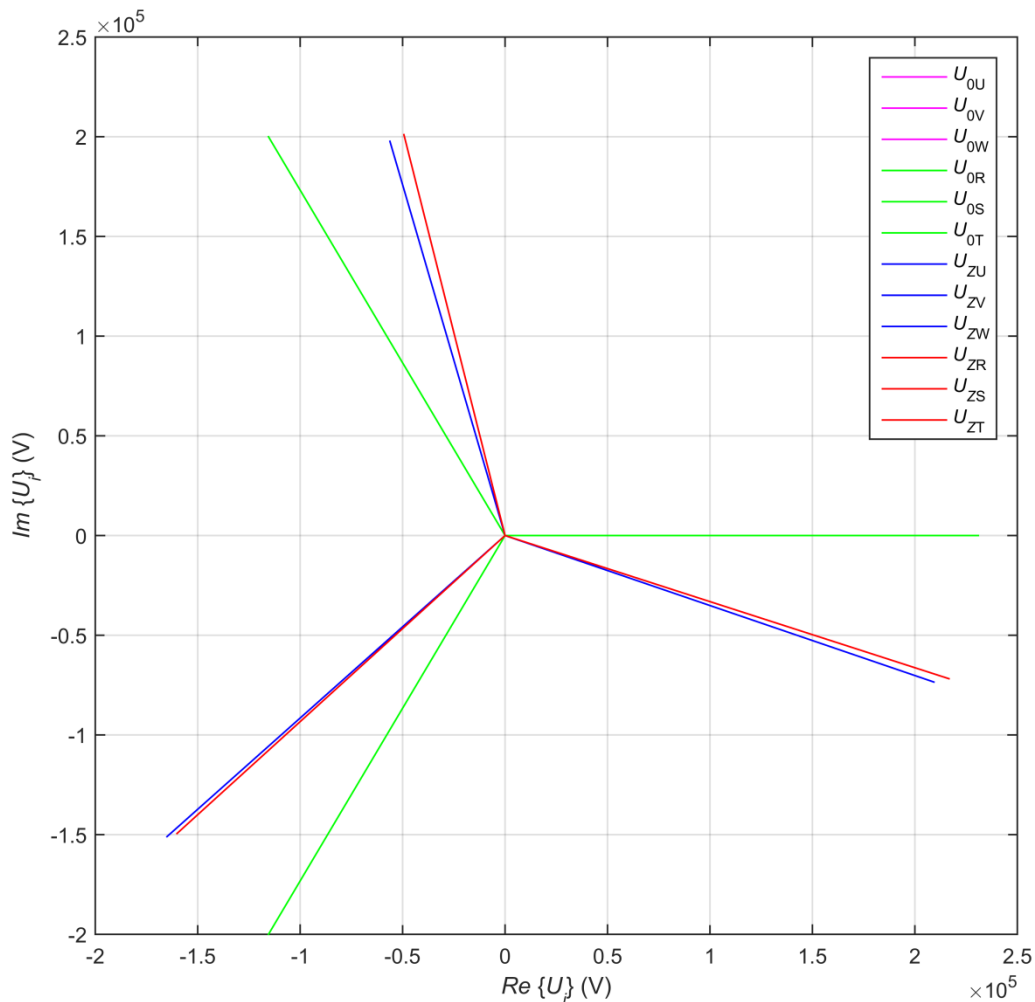
Tabulka obsahuje velikost fázorů, jejich procentní hodnotou vztaženou k napětí zdroje a velikost argumentu.

Graf zobrazuje fázory v komplexní rovině. Tohoto grafu je využito z důvodu vizualizace uváděných hodnot jednak za účelem získání rychlého povědomí a jednak z důvodu, že může být snadno využito k prvotnímu hodnocení přesnosti obdržených výsledků fázových napětí zátěže.

## I. S uvažováním indukovaných napětí a proudů

**Tab. B.1:** Fázory  $U_{Zi}$  s uvažováním indukovaných napětí a proudů

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	221,80	223,66	205,51	228,23	219,03	206,99
$u_{Zi}$ (%)	96,04	96,85	89,00	98,83	94,84	89,63
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-19,4	-137,5	105,9	-18,3	-137,0	103,8

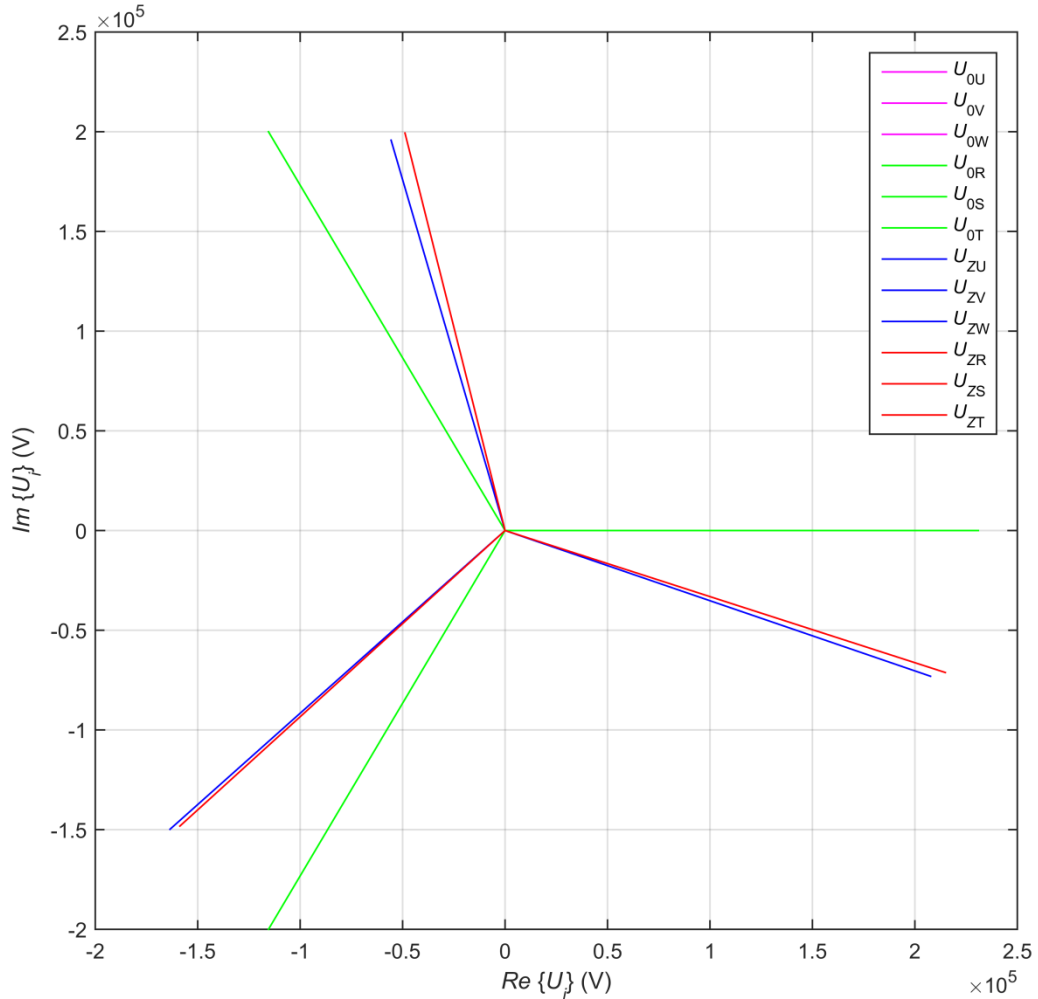


**Obr. B.1:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  s uvažováním indukovaných napětí a proudů

## II. S uvažováním indukovaných napětí

**Tab. B.2:** Fázory  $U_{Zi}$  s uvažováním indukovaných napětí

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	220,14	221,79	203,50	226,36	217,14	205,23
$u_{Zi}$ (%)	95,33	96,04	88,12	98,02	94,03	88,87
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-19,4	-137,5	105,9	-18,3	-137,0	103,8

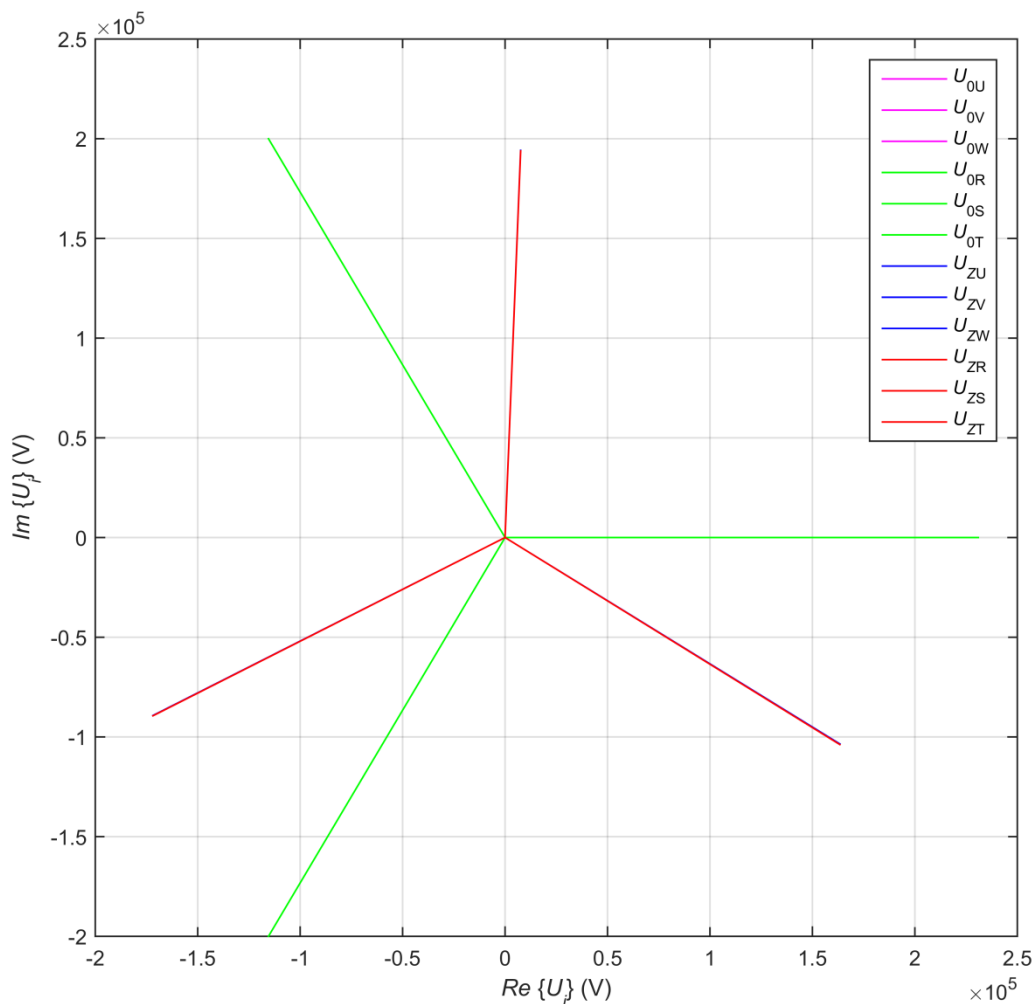


**Obr. B.2:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  s uvažováním indukovaných napětí

### III. S uvažováním indukovaných proudů

**Tab. B.3:** Fázory  $U_{Zi}$  s uvažováním indukovaných proudů

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	193,49	193,63	194,30	193,59	193,73	193,99
$u_{Zi}$ (%)	83,79	83,84	84,13	83,83	83,89	84,00
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-32,4	-152,6	87,8	-32,4	-152,5	87,8

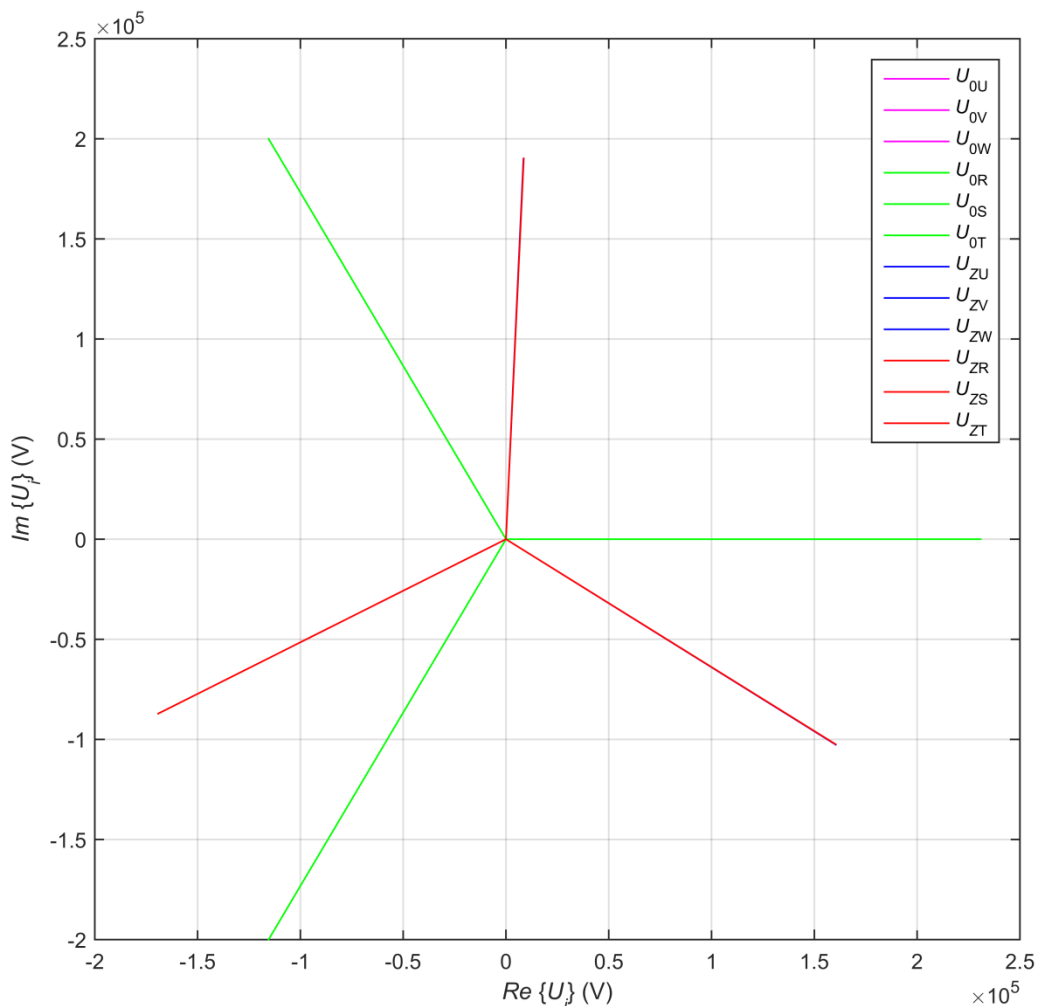


**Obr. B.3:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  s uvažováním indukovaných proudů

## IV. Bez uvažování indukovaných napětí a proudů

**Tab. B.4:** Fázory  $U_{Zi}$  bez uvažování indukovaných napětí a proudů

Fáze	U	V	W	R	S	T
$ \bar{U}_{Zi} $ (kV)	190,45	190,29	190,25	190,29	190,29	190,41
$u_{Zi}$ (%)	82,47	82,40	82,38	82,40	82,40	82,45
$\arg \bar{U}_{Zi}$ (°)	-32,6	-152,8	87,4	-32,6	-152,8	87,4



**Obr. B.4:** Fázory  $U_{0i}$  a  $U_{Zi}$  bez uvažování indukovaných napětí a proudů

Z obdržných výsledků vyplývá, že je zcela nezbytné respektovat indukovaná napětí, jelikož při jejich zanedbání vzniká poměrně značná chyba, jež je téměř shodná jako v případě, kdy není spolu s indukovanými napětími respektován ani vliv indukovaných proudů. Při opomenutí indukovaných proudů rovněž vzniká určitá chyba, ale její velikost je mnohonásobně menší. Pro dosažení co nejvěrohodnějších výsledků je tedy třeba respektovat jak indukovaná napětí, tak i indukované proudy.