

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv silového kabelu na souběžné sdělovací kabelové
vedení**

vedoucí práce: Ing. Václav Kotlan, Ph.D.

2012

autor: Martin Sláma

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vliv dvou souběžných vedení. Jedním z nich je kabelové vedení a druhé sdělovací vedení.

Úkolem práce bylo zjistit, jak se mění napětí a proud podél vedení. Jak se mění vliv vzájemné kapacity a indukčnosti při uložení kabelů do určité hloubky.

Kapacitu vedení jsem vypočítal metodou zrcadlení. K výpočtu napětí a proudu jsem použil numerickou metodu s rozprostřenými parametry. K vykreslení napětí a proudu na sdělovacím a kabelovém vedení jsem využil vlastní algoritmus v programovém rozhraní Matlab.

Klíčová slova: vliv, kabel, vodivost, kapacita, indukce, rezistivita, svod

Abstract:

This bachelor thesis deals with influence of two parallel line. One of them is cable line and second is communication cable.

Task of thesis was found, how change voltage and current along a line. How I can change influence of mutual capacitance and inductance, when cables are pasted into different deepness.

Parameters of capacitance I counted by method of flip and I used numerical method with spread parameters. My own algorithm counted value of current and voltage on cable line and communication line in Matlab program.

Key words: influence, cable, conduct, capacity, inductance, resistance, download

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 6.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Kotlanovi, Ph.D. za cenné rady, informace, jeho velkou trpělivost a pomoc, kterými mě nasměroval k sepsání této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomáši Kavalírovi za poskytnutí hodnot parametrů sdělovacího vedení k vytvoření programu.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ	8
1 ÚVOD.....	9
2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA.....	10
2.1 SILOVÉ KABELY	10
2.1.1 Nucené chlazení:.....	13
2.1.2 Značení kabelů.....	13
2.2 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	14
2.2.1 Návrh trasy vedení z ekologického hlediska.....	15
2.2.2 Stožáry	15
3 NÁHRADNÍ MODEL VEDENÍ.....	17
3.1 PARAMETRY NÁHRADNÍHO MODELU	17
3.1.1 Kapacita vedení	17
3.1.2 Indukčnost vedení	19
3.1.3 Odpor vedení	20
3.1.4 Svod vedení	21
4 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ	22
4.1 MATEMATICKÝ MODEL PROBLÉMU	22
4.1.1 Metoda řešení:	24
4.2 VÝPOČET POUŽITÝCH PARAMETRŮ.....	28
4.2.1 Metoda zrcadlení	28
5 ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY.....	30
6 ZÁVĚR	47
7 POUŽITÁ LITERATURA.....	48
7.1 KNIŽNÍ ZDROJE.....	48
7.2 ONLINE ZDROJE.....	48
8 PŘÍLOHY	1
8.1 ZDROJOVÝ KOD	1

Seznam symbolů

L [H/m]	<i>indukčnost</i>
R [Ω /m]	<i>odpor</i>
C [F/m]	<i>kapacita</i>
G [S/m]	<i>svod</i>
ΔU [V]	<i>úbytek napětí</i>
L_i [H]	<i>vnitřní indukčnost</i>
L_e [H]	<i>vnější indukčnost</i>
$\frac{\partial}{\partial t}$	<i>parciální derivace dle času</i>
Δt	<i>časový diskretizační krok</i>
$\frac{\partial}{\partial x}$	<i>parciální derivace dle délky vedení</i>
Δx	<i>prostorový diskretizační krok</i>
μ [H/m]	<i>permeabilita</i>
μ_0 [H/m]	<i>permeabilita vakua</i>
ε [F/m]	<i>permitivita</i>
ε_0 [F/m]	<i>permitivita vakua</i>
C_{12} [F/m]	<i>vzájemná kapacita</i>
L_{12} [H/m]	<i>vzájemná indukčnost</i>
u [V]	<i>okamžitá hodnota napětí</i>
i [A]	<i>okamžitá hodnota proudu</i>
w_m [$J \cdot m^{-3}$]	<i>hustota energie</i>
U [V]	<i>napětí</i>
I [A]	<i>proud</i>
N	<i>počet elementů</i>
j	<i>index časové hladiny</i>
k	<i>index prostorové hladiny</i>
l	<i>délka vedení</i>

1 Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na souběžné vedení a jeho numerického řešení.

V úvodu práce se zabývám distribuční soustavou a jejími hlavními částmi. Jejich vlastnostmi, značením kabelů a dalšími důležitými parametry.

V druhé části bakalářské práce popisuji náhradní model vedení, jeho parametry. Jako například kapacitu vedení, indukčnost vedení a další.

V třetí části se zabývám řešením matematického modelu přenosové soustavy. Využívám k tomu model s rozprostřenými parametry. Tento model popisují soustavou parciálních diferenciálních rovnic hyperbolického typu, které následně řeším numericky s využitím metody konečných diferencí a implicitní Wendroffovy diferenční formule. Závěrem této kapitoly se věnuji výpočtu kapacity vedení metodou zrcadlení. Tyto parametry jsem použil při vytvoření skriptu.

V programu jsem dále vytvořil skript, který modeluje vlivy těchto vedení při určité vzdálenosti a v určité hloubce do země. Dále jsem uvažoval, ve své práci, možnost nepřímého úderu blesku a tedy vytvoření rázové vlny a její vliv na vedení. Skript dále řeší více případů najednou, harmonický zdroj s rázovou vlnou.

2 Distribuční soustava

Tento pojem je velmi důležitý pro celé lidstvo. Dnes by bez této složky nebyly možné věci, o kterých si myslíme, že jsou normální a běžné pro náš život.

Skládá se z mnoha bloků. Dělí se na zdroje (například elektrárny), spotřebiče (například domácnosti a firmy). Abychom dostali od zdroje potřebnou energii pro spotřebiče, je nutné zajistit mezi těmito složkami vlastní přenosovou síť tedy různé formy vedení.

Tato vedení dělíme na venkovní a kabelová. Venkovní vedení se dělí dle napěťových hladin na nízké napětí, vysoké napětí a velmi vysoké napětí. Hladiny venkovního vedení velmi vysokého napětí se využívají v České Republice 400 kV, 220 kV a 110 kV. Každá z těchto hladin má různé vlastnosti a různé využití v praxi.

Kabelové vedení pro velmi vysoké napětí se používá v průmyslu. Klade nárok na přenos elektrické energie od centra spotřeby, při co největším napětí. V současné době již není postačující rozvod vysokého napětí 22 kV. Je nutné přecházet na napětí velmi vysoké.

Přenosová soustava je nejchoulostivější z hlediska poruch a také je nejvíce exponovaná a je nejnáročnější částí vystavenou okolním vlivům.

2.1 Silové kabely

Kabelové vedení je vedení, kde vzniká méně poruch, ale převážně se jedná o poruchy trvalého rázu. Velkou výhodou je nižší indukčnost a mnohonásobně větší kapacita asi přibližně 30 krát. Tím dochází k menším úbytkům napětí a k menším jalovým ztrátám. Naopak se jedná o velmi drahé vedení a hůře dostupné při jakékoli poruše. Z toho důvodu je zde kladen velký důraz na predikci poruch a jejich diagnostiku.

Vztah pro úbytek napětí:

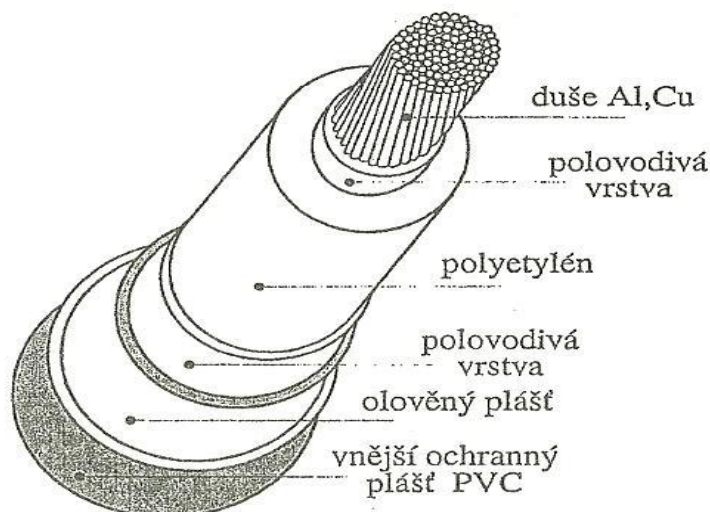
$$\Delta U = |\vec{U}_1| - |\vec{U}_2| = R_k \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi \mp X_k \cdot l \cdot I \cdot \sin \varphi = R \cdot I \cdot \cos \varphi \mp X \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (1.1)$$

kde \vec{U}_1 je napětí na vstupních svorkách zařízení a \vec{U}_2 je výstupní napětí zařízení. R – celkový odpor přepočítaný na určitou vzdálenost vedení a X – celková reaktance přepočítaná na určitou vzdálenost. \mp určuje, jestli se jedná o kapacitní nebo induktivní zátěž, + induktivní, - kapacitní. I – proud procházející vodičem.

Kabely je možné dělit podle počtu žil na jednožilové, třížilové a čtyřžilové. Jednožilové se používají v sítích vysokého napětí a velmi vysokého napětí. Třížilové v sítích vysokého

napětí, na hladině nízkého napětí (L, N, PE) a čtyřžilové v sítích nízkého napětí (L1, L2, L3, PEN). Další dělení je podle tvaru žil na kruhové a sektorové a provedení žil na dráty a lana. Do průměru 16 mm² používáme jednodrátové žíly. Další rozdělení je dle chlazení. Přirozené chlazení neobsahuje žádné chladicí medium. Používá se s chlazením, kdy se sníží oteplení izolace a zvýší se zatížitelnost. Kapalínou, kterou používáme pro chlazení je olej nebo voda. Chladicí kapalina protéká trubkou, která je položena paralelně s kabelem. Dalším řešením je umístění kabelu v trubce například s vodou a za třetí se používá trubka uvnitř vodiče nebo v izolaci kabelu. Poslední forma členění je dle izolace. Máme čtyři druhy. Prvním jsou holé vodiče, které jsou buď z hliníku, nebo z mědi, mají různé profily. Nejčastěji obdélníkový, které se využívají například u přípojníc z rozvodných zařízení a vedení k velkým spotřebičům. Dalšími jsou izolované vodiče, chráněné vodiče a kabely (viz Obr. 1).[2]

Základem silového kabelu je jádro a plášť. Materiál určený pro jádro musí mít dobré vodivé vlastnosti. Nejvíce se používá měď a hliník. Hliník má sice menší vodivost, tedy se použije větší průměr vodiče pro stejné proudy, ale stále je lehčí než měď. Měď má naopak dobrou vodivost a dobré tepelné vlastnosti a je dražší než hliněné jádro. Plášť je většinou složen z měkčeného PVC, ale jako další materiál můžeme použít gumu a papír. Podle použití pro vysoké napětí a velmi vysoké napětí se mění jejich struktura.[2][8]



Obr. 1: Vrstvy kabelového vedení[2]

Zvyšování spotřeby elektrické energie ve velkých městech i v průmyslu klade nárok na přenos elektrické energie až do centra spotřeby při co největším napětí. V současné době není postačující rozvod vysokého napětí, je nutno přecházet na hladinu velmi vysokého

napětí. Rozvodnou síť nelze řešit v městských průmyslových oblastech venkovními vedeními, je proto nutné použít kabely. Při vývoji kabelů je nutno vedle zvyšování přenosových napětí věnovat pozornost i požadavku na zvyšování přenášeného proudu. Řešíme tedy snížení elektrických a ohmických ztrát, zvýšením průřezu kabelu. Nové izolační materiály nám slouží ke zvýšení tepelné vodivosti a ke snížení tepelných ztrát.

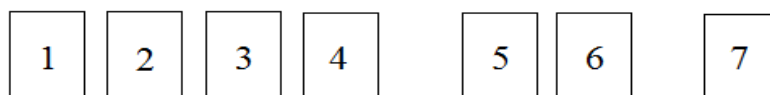
Kabely velmi vysokého napětí používáme do napětí 550 kV. Z obrázku je vidět, že se skládá z měděného nebo hliněného vodiče, který je stíněn. Stíněný kabel je složen z jednoho nebo více izolovaných vodičů. Zamezuje vzniku elektrického šumu, který způsobuje rušení a zlepšuje kvalitu přenášeného signálu. Mohou nastat tři druhy šumu. Kapacitní spojení, galvanické spojení a magnetické spojení. Vodič vyzařuje elektromagnetické záření, které je právě díky stínění omezováno. Následuje izolace a její stínění. Oddělovací vrstva nám odděluje stínění izolace od měděného jádra. Pro další vrstvy se používá nadouvaný materiál a laminovaná hliníková páska a nakonec vnější plášť z polyetyleny. Při zatěžování kabelu velmi vysokého napětí dochází k teplotním změnám. Izolace se roztahuje a smršťuje a vznikají mezery a dutiny v papírové izolaci a díky těmto vlivům dochází k ionizaci a k částečným výbojům v dutině, tím dojde k destrukci izolace a jejímu průrazu. Z Polyetyleny je také vytvořeno pouzdro, aby se zabránilo nejmenší přítomnosti vzduchu mezi izolačním obalem a vnějším vodivým pouzdrem, je nutné zabezpečit dokonalou přilnavost mezi těmito materiály. Izolační obal polyetyleny je tedy uložen mezi dvěma vodivými pouzdry. Na vnějším vodivém pouzdru je kovový kryt, který tvoří měděná vlákna nebo pásy, popřípadě olovené pouzdro. Vnější ochranu kabelu zabezpečuje pouzdro z polyvinylchloridu, který vzdoruje stárnutí. Dielektrické kvality polyetylenové izolace jsou velmi dobré. Ztrátový úhel $\tan \delta$ je asi 5x menší než u kabelu s izolačním papírem. Dielektrická konstanta má hodnotu 2,3 proti 3,6 u kabelu s papírovou izolací. Z těchto příčin vyplývají dvě vlastnosti. Dielektrické ztráty jsou úměrné ztrátovému úhlu a dielektrické konstantě a tedy jsou u tohoto kabelu 5x menší, než u klasických kabelů s papírovou izolací nebo u kabelů s tekutým olejem. Kapacitní proudy jsou také úměrní dielektrické konstantě, jsou tedy menší než u klasických kabelů.

Mechanické kvality polyetyleny jsou velmi dobré z hlediska tepelného rozsahu. Jeho malý tepelný měrný odpor kromě toho snižuje teploty mezi pláštěm a vodičem, z čehož vyplývá pro přenášení téže energie použití slabšího průřezu, než u kabelů s papírovou izolací. Polyetylen je dokonale nepropustný, a proto umožňuje odstranění nepropustného ocelového pláště a je nahrazen prostým měděným stíněním. Toto řešení je mnohem jednodušší a vede ke zjednodušení problémů při kladení kabelů.

2.1.1 Nucené chlazení:

- Nepřímé – chladící voda se nachází v trubkách
- Přímé – olej cirkuluje uvnitř trubkového vodiče
- Vnitřní – kabely chlazeny olejem nebo vodou

2.1.2 Značení kabelů



Obr. 2: Značení kabelů

Na místo čísla 1 udáváme materiál jádra, většinou se jedná o měděné nebo hliníkové jádro, tedy C nebo A. Druhá kolonka označuje materiál izolace jádra, většinou se používá Y-měkčené PVC, G-guma, N-napuštění papír s impregnační látkou, E-polyetylen a XE-zesílený polyetylen. Na třetí číslo píšeme písmeno K, které udává, že se jedná o kabelové vedení. Čtvrté číslo označuje materiál stínění pláště. Užíváme O-olovo, P-pancír (pásky), D-pancír (drátky) a číslo pět označuje obal nad pláštěm. Číslem šest vyznačujeme barvu žil podle normy ČSN 340165 (u více žil). Například 6ANKAY. Jedná se o silový kabel s papírovou izolací, s hliníkovým pláštěm a PVC obalem jehož jmenovité napětí je 6kV.

Sdělovací kabel přenáší signál mezi sdělovacími zařízeními například telefonní ústředny. Sdělovací kabely rozdělujeme na vnitřní, zemní, závěsné a armované kabely. Vnitřní kabely užíváme pro pevné rozvody. Jsou to nízkofrekvenční úložné kabely, které se užívají pro signalizaci. Jmenovité napětí tohoto sdělovacího kabelu je 100V. Při provozu vydrží teploty od -30°C do $+70^{\circ}\text{C}$. Základem tohoto sdělovacího kabelu je měděné jádro. Izolace je většinou z PVC, žíly jsou stočené do párů a jednotlivé páry jsou ovinuté laminovanou hliníkovou folií a stočeny do duše kabelu. Duše kabelu stíní výrobci laminovanou hliníkovou folií s měděným drátem. Plášť se používá z polyvinylchloridu, který je odolný proti UV záření. Mezi sdělovací kabely řadíme i koaxiální kabel, který se skládá z vnějšího, vnitřního vodiče a dielektrika. Vnitřní vodič je tvořen z mědi, u velkých vodičů bývá dutý. Vnější vodič je tvořen z měděné nebo hliníkové folie. Dielektrikum odděluje vnější od

vnitřního vodiče. Jedná se o izolační vrstvu, velkou měrou ovlivňuje frekvenční vlastnosti koaxiálního kabelu. Většinou se používá polyetylen a vzduch. Nejčastější funkcí koaxiálního kabelu je přenos elektromagnetického vlnění o vysoké frekvenci.[9]

2.2 Venkovní vedení

Venkovní vedení se navrhuje jednak po stránce mechanické, jednak po stránce elektrické. Při návrhu hledáme ekonomické optimální podmínky jak pro elektrické vlastnosti, tak pro vlastní vedení. Tento důvod nám dává nutnost se zabývat mechanickými vlastnostmi venkovního vedení. Základním požadavkem při navrhování vedení je volba správného materiálu jak pro stožáry, tak pro vlastní vedení. Bere se ohled na hlediska pevnostní, ekonomická a ekologická.

Existují různé materiály, které se používají pro vodiče i stožáry. Tyto materiály mají různou životnost a mají odlišné mechanické vlastnosti a tím se odlišují i cenové náklady materiálu.

Při návrhu vedení se uvažuje současný stav, ale musí se počítat s potřebou do budoucna. Snižování nákladů na výstavbu nesmí nikdy zhoršit mechanické vlastnosti vedení. Vedení se dimenzuje, tak aby zůstalo nepřerušeno i v kritických situacích, ale aby se neplýtvalo cennými surovinami. Při projektu venkovního vedení se určuje jeho namáhání. Je několik aspektů, které se musí respektovat ke správné funkci celého vedení. První aspekt předepisuje stát minimální bezpečnou výšku vodičů nad půdou, nad cestami, nad kolejnicemi, nad jiným vedením za nejrůznějších povětrnostních podmínek. Stanovují se také namáhání, která musí vydržet v mrazech. Druhý aspekt je z hlediska provozu, aby vedení bylo odolné při všech povětrnostních podmínkách a nezpůsobovalo poruchu v dodávce. Poslední podmínka se zabývá hospodárností. Vhodnou volbou namáhání a tedy průhybu se zmenšuje cena i váha stožárů a základů.[2][3]

Pokud se špatně navrhne vedení, dochází k vytvoření dvou možných nesprávných hodnot namáhání. Při velkém tahu dochází k vibracím ve vedení a tím vzniká větší namáhání vodičů a jejich únava a často následuje přetržení vodiče. Malý tah má za následek větší průhyb vodičů, tedy není dodržena předepsaná bezpečnostní vzdálenost od země a může dojít k poruše. Při silném nárazovém větru může dojít k dotyku mezi fázemi a tedy ke zkratu. Vodiče se napínají dle předepsaných tabulek, kde se uvádí napínací tahy pro určité montážní teploty. Tah musí být volen tak, aby jeho namáhání bylo menší než jeho mechanická pevnost. V žádném případě nesmí namáhání překročit určité procento pevnosti daného materiálu.

Například ocelový vodič AlFe 85 %, hliněný vodič a jeho slitiny 80 % a u měděných vodičů a jejich slitin nesmí přesáhnout 90 %. [2][3]

Venkovní vedení velmi vysokého napětí se dělí v České republice na několik druhů. Nejvíce se používá vedení 110 kV, které zabírá největší vzdálenosti v naší republice. Asi 8000 km co se týče distribuční soustavy. Vodiče jsou tvořeny jednoduchými lany AlFe s průřezy 185 mm^2 , 240 mm^2 a 680 mm^2 , nebo jako dvojsvazkové $2 \times 670 \text{ mm}^2$ a $2 \times 350 \text{ mm}^2$. [9]

2.2.1 Návrh trasy vedení z ekologického hlediska

Při návrhu je nutné respektovat vliv na životní prostředí. Při vytváření vedení se zabýváme otázkami omezení hluku způsobeného korunou a větrem. Je nutné si nechat vypracovat podrobný průzkum o rezervacích, výskytu chráněných živočichů a rostlin. Další nutností je zachovat kulturní dědictví, archeologická naleziště, význačné stavby, pomníky, historické památky a soulad s krajinou.

Vedení vysokého napětí se staví jako venkovní v nezastavěných územích. Jednoduchá vedení se řeší betonovými stožáry. Na dřevěné stožáry lze umístit pouze provizorní vedení. Stožáry vysokého napětí se musí budovat v souladu s požadavky na sdělovací techniku a kabely, nebo fázová lana se světlovodnými vodiči. Venkovní vedení vysokého napětí označujeme jako hlavní, nebo jako přípojky. O hlavní vedení se jedná, pokud se nachází mezi spínacími stanicemi nebo propojuje-li hlavní vedení příčně. Přípojky slouží k připojení k jedné nebo k několika distribučním transformačním stanicím.

Průřezy venkovních vedení se používají $70/11 \text{ mm}^2$ a $110/22 \text{ mm}^2$ typu AlFe v blízkosti napájecích transformoven. U méně významných vedení a přípojek postačuje $42/7 \text{ mm}^2$ AlFe.

Vedení nízkého napětí se v současnosti využívá velmi málo, zřídka v málo zastavěných oblastech. Ve venkovních sítích jsou často venkovní vedení nahrazovány vedením se samonosnými kabely.

2.2.2 Stožáry

Stožáry se vyskytují v několika provedeních. Hlavní funkcí stožárů je, že udržují vodiče v určitých vzdálenostech od sebe, od vlastní konstrukce, od země a jiných objektů. Tvar a konstrukční řešení se určuje podle stavebních podmínek, jejich funkčnosti, stavební

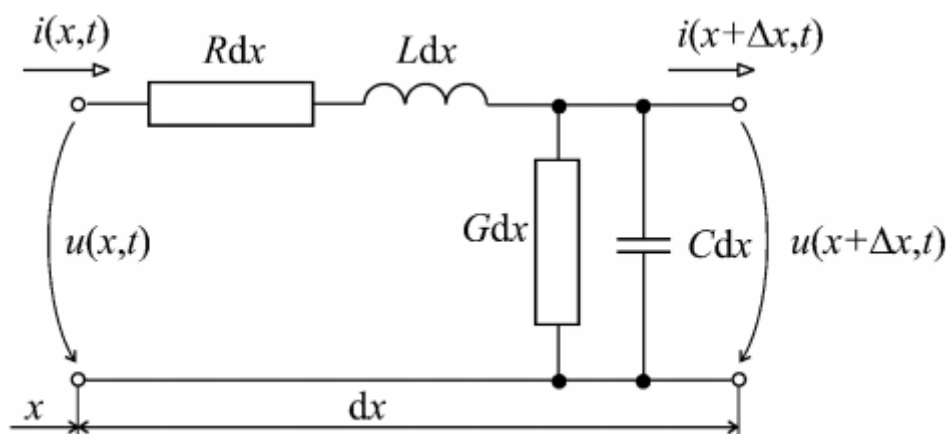
technikou, podmínkami staveniště, výrobou, montáží a údržbou. Na stožárech mohou být umístěna další zařízení nutná k provozu elektrické sítě. Například vypínače, pojistky, bleskojistky, rozvaděče. Nejpoužívanější stožáry v ČR jsou portálové, donau, soudek a kočka (více se vyskytuje na Slovensku). Existuje spousta rozdělení. Například nosné, rohové, výstužné odbočné a další. Nosné stožáry se značí velkým písmenem N. Všechny stožáry jsou charakterizovány určitým zatížením vnějšími vlivy. Nosné stožáry jsou namáhány větrem kolmo na vedení na neomrzlé vodiče a zemnicí lana, kotevní lana a stožár s výzbrojí. Nebo větrem ve směru vedení na stožár s výstrojí a kotevní lana. Rohové stožáry se značí velkým písmenem R. Zatížení těchto stožárů je dáno výslednicí tahů omrzlých vodičů, zemnicích lan a tíhou námrazy, nebo výslednicí tahů neomrzlých vodičů, zemnicích lan a zatížení větru na poloviny přilehlých polí. Výstužné stožáry se značí písmenem V, které tvoří pevné body na trase. Vodiče jsou ke stožáru připojeny pomocí kotevních izolátorových závěsů, namáhaných plným tahem vodičů. Vodič přechází přes izolátory přeponkou bez mechanického namáhání. Výstužné jsou důležité i pro napínání vodičů, proto je jejich počet a polohy závislé na postupu montáže vedení. Při dimenzování se zpravidla uvažuje jednostranné zatížení, které odpovídá 2/3 maximálních tahů vodičů a zemnicího lana.

Konstrukce portálového stožáru se skládá z dlouhého příčnicku, který se podepírá dvěma svislými dřívky čtyřbodové konstrukce s příčným řezem buď konstantním, plynule proměnným, nebo nad základem rozšířeným. Příčnick se tvaruje v podélném směru a také v příčném řezu. Portálové konstrukce se používají především pro nosné stožáry, výstužné stožáry mohou být nižší, protože odpadá přídavek na výšku izolátorových řetězců, a proto mohou být i jinak řešeny, to platí i o rohových stožárech.

3 Náhradní model vedení

Každé vedení ať jde o sdělovací nebo kabelové lze nahradit modelem se soustřednými, nebo rozprostřenými parametry. Rozhodnutí, zda budeme určitou soustavu modelovat obvodem se soustřednými či rozprostřenými parametry, závisí na jejich geometrických rozměrech, na rychlosti změn elektromagnetického pole (jestliže se mění harmonicky, tak na jeho kmitočtu) a na rychlosti, jíž se šíří vlny obvodem. Při harmonicky proměnném elektromagnetickém poli je délka postupné vlny $\lambda = v/f$. Obvodem se soustřednými parametry lze modelovat jen takové soustavy, jejichž geometrické rozměry jsou zanedbatelné v porovnání s délkou vlny.[1]

Níže uvedené náhradní schéma jednoho elementu vedení je popsáno parametry R , L , G a C , jejichž hodnoty jsou přepočítané na vzdálenost. Respektujeme charakter vstupního napájecího a výstupního zatěžovacího obvodu.



Obr. 3: Náhradní schéma jednoho elementu vedení[6]

3.1 Parametry náhradního modelu

3.1.1 Kapacita vedení

Nejobtížnějším krokem výpočtu kapacity vedení je získání rozložení elektrického pole. Pro pole jednodimenzionální (1D) je jeho analytické řešení velmi jednoduché. U složitějších tvarů pole (2D) dáváme přednost numerickému řešení. Velmi rychlé a pohodlné je řešení pomocí různých programů pro analýzu elektrostatických polí.

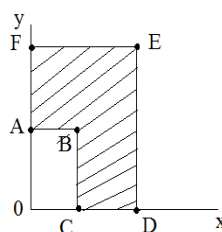
Máme vodič o určitém průřezu. Známe jeho permitivitu izolace mezi vnitřním a vnějším vodičem.

Pro 2D pole, pro vyznačenou oblast Ω platí Laplaceova rovnice:

$$\frac{\partial \varphi^2}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi^2}{\partial y^2} = 0 \quad (3.1)$$

Pro okrajové podmínky na obrázku 4:

$$A - B - C: \varphi = U, \quad C - D: \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad D - E - F: \varphi = 0, \quad F - A: \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$$



Obr. 4: Definiční oblast

Vypočteme okrajovou úlohu, tedy určíme $\varphi = \varphi(x, y)$ a určíme intenzitu elektrického pole:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} \quad (3.2)$$

Kde \vec{i} a \vec{j} jsou bázové vektory. Po vypočtení \vec{E} můžeme dopočítat náboje na elektrodách

$$Q_i = \varepsilon \int_{S_i} \vec{E} \cdot d\vec{S}, \quad i = 1, 2 \quad (3.3)$$

kde S_1, S_2 jsou povrchy vnitřní a vnější elektrody. Náboje Q_1, Q_2 mají stejnou velikost, ale opačná znaménka. Z jejich velikostí vezmeme střední hodnotu $Q_S = (|Q_1| + |Q_2|)/2$. Pak kapacita kabelu je [1]:

$$C = \frac{Q_S}{U} \quad (3.4)$$

Dalším postupem přes energie elektrického pole lze dojít také ke kapacitě kabelu:

$$W_e = \frac{\varepsilon}{2} \int_V E^2 dV \quad (3.5)$$

Kde integrujeme přes objem V dielektrika. Pak platí pro kapacitu tento vztah:

$$C = \frac{2W_e}{U^2} \quad (3.6)$$

Kapacita kabelu se mění podle typu vedení. Takže například pro koaxiální kabel nám vychází:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.7)$$

Kde $l \gg r_2$, l je délka kabelu

Nebo pro koaxiální kabel s vrstveným dielektrikem, kde se jedná o složitější výpočet:

$$C = \frac{2\pi}{\ln \left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{1/\varepsilon_1} \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{1/\varepsilon_2} \left(\frac{r_4}{r_3} \right)^{1/\varepsilon_3} \right]} \quad (3.8)$$

Kde $l \gg r_4$, l je délka kabelu.[1]

3.1.2 Indukčnost vedení

Indukčnost jednofázového vedení se vypočte z energie magnetického pole. Známe-li proudovou hustotu \vec{J} a vektorový magnetický potenciál \vec{A} je energie magnetického pole tenkého vodiče:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_{\Delta} \int_l \vec{A} \vec{J} d\Delta dl = \frac{1}{2} I \int_l \vec{A} d\vec{l} = \frac{1}{2} I \Phi = \frac{1}{2} LI^2 \quad (3.9)$$

Určení energie pole z vektorů \vec{B}, \vec{H} . V oblasti V známe magnetické pole, to znamená, že jsme určili vektory \vec{B}, \vec{H} . Pak energie magnetického pole je:

$$W_m = \int_V w_m dV = \int_0^B H \cdot dB \quad (3.10)$$

kde w_m je hustota energie magnetického pole.

Speciálně pro $\mu = \text{konstantní}$ se vztah pro hustotu zjednoduší:

$$w_m = \int_0^B H \cdot dB = \frac{1}{2}BH = \frac{\mu}{2}H^2 = \frac{1}{2\mu}B^2 \quad (3.11)$$

Energie magnetického pole W_m se rozděluje na energii vnitřního vodiče W_{mi} a na energii vně vodiče W_{me} . Platí:

$$W_m = W_{mi} + W_{me}. \quad (3.12)$$

Z toho vychází energetická definice indukčnosti[1]:

$$L_e = \frac{2W_m}{I^2} \quad (3.13)$$

3.1.3 Odpor vedení

Při stejnosměrném proudu je proudová hustota v průřezu vodiče konstantní. Mluvíme o stejnosměrném odporu R_0 vodiče:

$$R_0 = \frac{l}{\gamma \cdot S} \quad (3.14)$$

kde l je jeho délka, S průřez a γ konduktivita. Materiál vodiče, jako je například měď, má při teplotě 20°C hodnotu $\gamma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ S/m}$.

Podobně se projevuje, při stejnosměrném proudu, stejnosměrná vnitřní indukčnost L_0 . Při střídavém proudu vzniká povrchový jev, tím se odpor vodiče zvýší a jeho vnitřní indukčnost se sníží. Z toho plyne, že $R > R_0$ a u efektivní indukčnosti platí $L_i < L_0$. Při přechodovém jevu, proud se mění ve vodiči neharmonicky, se mění jeho odpor a vnitřní indukčnost a tato změna je tím výraznější, čím je časový průběh proudu rychlejší. Výraznou změnou je například strmé čelo proudové vlny, procházející vodičem. Díky tomuto vlivu je potom velmi obtížné určit parametry R a L_i .

V praxi pro vypočtení parametrů vodiče kruhového průřezu se používají přibližné formule, které vycházejí z definičních řad Besselovy funkce a omezení některých členů. Pro nízké kmitočty a pro $a < \delta$, kde a je poloměr vodiče, platí:

$$R \approx R_0, L_i \approx \frac{\mu}{4\pi} \quad (3.15)$$

kde μ je permeabilita vodiče.

Pro $a < 2\delta$ platí vztahy:

$$R \approx R_0 \left(1 + \frac{1}{3}x^4\right), L_i = \frac{\mu}{4\pi} \left(1 - \frac{1}{96}x^4\right) \quad (3.16)$$

Pro vyšší kmitočty, pro $a < 2\delta$ platí:

$$R \approx R_0 \left(x + \frac{1}{4} + \frac{3}{64x} \right), L_i = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \frac{1}{x} \left(1 - \frac{3}{64} \frac{1}{x^2} + \frac{3}{128} \frac{1}{x^3} \right) \quad (3.17)$$

Pro velmi vysoké kmitočty, pro $a < 20\delta$, vodič nahrazujeme trubkou o tloušťce stěny δ :

$$R \approx R_0 \cdot x = \frac{1}{2\pi\gamma a\delta}, L_i = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \frac{1}{x} = \frac{\mu\delta}{2\pi a} \quad (3.18)$$

Pro stejnosměrný odpor R_0 , hloubku vniku δ a x platí tyto vztahy:

$$R_0 = \frac{1}{\pi\gamma a^2} \quad (3.19)$$

$$x = \frac{a}{2\delta} \quad (3.20)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (3.21)$$

Kde ω je úhlový kmitočet, γ je konduktivita vodiče.[1]

3.1.4 Svod vedení

Svod vzniká jednak nedokonalou izolací a jednak korunou. Při konstrukci vedení i jeho údržbě se dbá na snižování svodu v co největší míře. Při výpočtech, v ideálním případě, se tento parametr zanedbává.

Existuje několik vlivů, které ovlivňují velikost svodu. Svod nedokonalou izolací je ovlivněn tvarem izolátoru, materiálem izolátoru, vlhkostí vzduchu a dalšími.

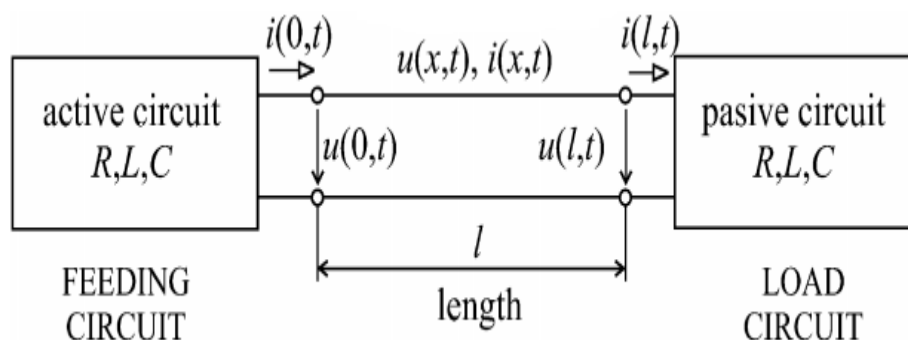
Svod korunou ovlivňují atmosférické podmínky a maximální gradient elektrického pole. Do této podmínky patří velikost provozního napětí, vzdálenost mezi vodiči, poloměr vodiče a nerovnosti povrchu vodiče.

Škodlivé vlivy korony způsobují činné ztráty, jsou zdrojem vyšších harmonických a ruší slaboproudá zařízení.[4]

4 Numerické řešení

4.1 Matematický model problému

Diferenciální rovnice hyperbolického typu tvoří obsáhlou třídu parciálních diferenciálních rovnic a existuje řada velmi různorodých fyzikálních úloh, které lze popsat rovnicemi tohoto typu. Například se používají pro výpočet kmitání struny, šíření zvuku. Rovnice přenosu a rovnice elektromagnetického pole jsou tvořeny hyperbolickými soustavami rovnic první řádu. Velmi důležitým aspektem tohoto numerického řešení je korektnost. Tato vlastnost je nutným předpokladem pro to, aby kterákoliv úloha měla vůbec rozumný fyzikální smysl.[5]



Obr. 5: Schéma přenosového vedení[6]

Obrázek číslo 5 respektuje charakter vstupního (feeding circuit) a výstupního (load circuit) vedení. Toto schéma může být popsáno parciálními diferenciálními rovnicemi hyperbolického typu. Popisují vztah napětí a proudu mezi vstupem a výstupem obvodu. Podle obrázku číslo 3 můžeme každý element vedení popsat telegrafními rovnicemi:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.2)$$

Tento popis je platný v definičním oboru definovaným podmínkami

$$t > 0, x \in \langle 0, l \rangle \quad (4.3)$$

kde l je délka vedení.[6]

Takovýto systém rovnic pro N elementů je nutné před vlastním řešením doplnit pomocí okrajových podmínek

$$x = 0 \quad F_1 = (u(0, t); i(0, t), t) = 0 \quad (4.4)$$

$$x = l \quad F_2 = (u(l, t); i(l, t), t) = 0 \quad (4.5)$$

Tento systém okrajových podmínek se doplňuje počáteční podmínkou:

Počáteční podmínka: $t = 0$

$$x \in \langle 0, l \rangle \quad (4.6)$$

$$u(x, 0) = 0 \quad (4.7)$$

$$i(x, 0) = 0 \quad (4.8)$$

Okrajové podmínky jsou pro konkrétní případy nahrazeny obyčejnou diferenciální rovnicí nebo rovnicí algebraickou dle daného typu zakončení. Například pokud na výstupní obvod připojíme odpor R s indukčností L s indexy 2 a dostaneme rovnici:

$$L_2 \frac{di(l, t)}{dt} + R_2 i(l, t) = u(l, t) \quad (4.9)$$

Podobným způsobem je možné doplnit vstupní stranu pomocí rovnic popisujících připojený napěťový zdroj

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = u_0(t) \quad (4.10)$$

respektive proudový zdroj:

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + Gi(x, t) + C \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = i_0(t) \quad (4.11)$$

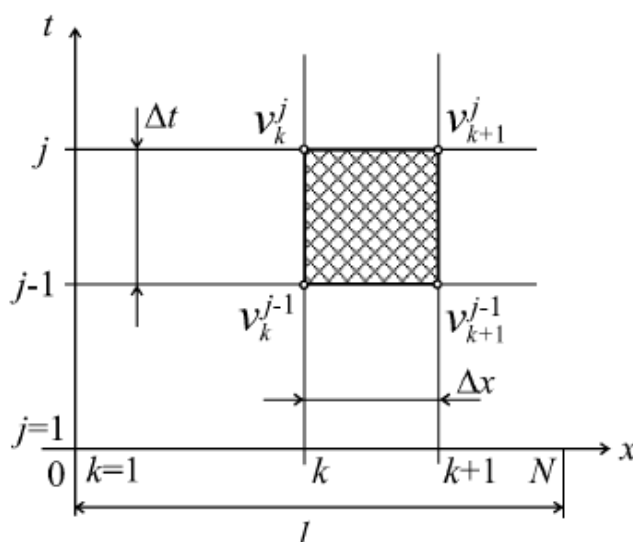
kde $u_0(t)$, $i_0(t)$ jsou časové funkce, které vyjadřují proměnné napěťové a proudové zdroje.[6]

4.1.1 Metoda řešení:

K numerickému řešení soustavy diferenciálních rovnic hyperbolického typu byla použita metoda konečných diferencí s využitím implicitní Wendroffovy diferenční formule.

Výše uvedené rovnice (4.1, 4.2) popisují model vedení. Metoda konečných diferencí v časové oblasti je založena na tom, že původně spojitá hledaná funkce je nahrazena sadou diskretních funkčních hodnot. Tedy nehledáme průběh funkce, ale hodnotu uzlových bodů diskretizační sítě.[7]

V mém případě jsem použil implicitní Wendroffovu metodu. Celé vedení diskretizujeme v čase i v prostoru dle schématu na obr. 6 a dostaneme tak diskretizační síť, kde index j značí časové hladiny a index k prostorové (1D problém - pouze ve směru souřadnice x).



Obr. 6: Schéma diferenční formule[6]

Každý element můžeme popsat pomocí zmiňovaných telegrafních rovnic (4.1, 4.2) na které aplikujeme dle obr. 6: Wendroffovu diferenční rovnici:

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{k-1}^j - v_k^j}{\Delta x} + \frac{v_{k+1}^{j-1} - v_k^{j-1}}{\Delta x} \right) \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_k^j - v_k^{j-1}}{\Delta t} + \frac{v_{k+1}^j - v_{k+1}^{j-1}}{\Delta t} \right) \quad (4.13)$$

kde v je označení obecné veličiny.[6]

Je tedy patrné, že parciální derivace (časové i prostorové) jsou nahrazeny diferencemi a dle implicitního schématu je použita navíc střední hodnota ze dvou sousedních hladin a to jak v čase, tak v prostoru.

Úpravou původních diferenciálních telegrafních rovnic získáme rovnice algebraické:

$$u_{0k}^j \left(\frac{1}{2} \left(\frac{u_{k+1}^j - u_k^j}{\Delta x} + \frac{u_{k+1}^j - u_k^{j-1}}{\Delta x} \right) + \frac{R}{4} (i_{k+1}^j + i_k^j + i_{k+1}^{j-1} + i_k^{j-1}) + \frac{L}{2} \left(\frac{i_k^j - i_k^{j-1}}{\Delta t} + \frac{i_{k+1}^j - i_{k+1}^{j-1}}{\Delta t} \right) \right) = \quad (4.14)$$

$$\left(\frac{1}{2} \left(\frac{i_{k+1}^j - i_k^j}{\Delta x} + \frac{i_{k+1}^j - i_k^{j-1}}{\Delta x} \right) + \frac{G}{4} (u_{k+1}^j + u_k^j + u_{k+1}^{j-1} + u_k^{j-1}) + \frac{C}{2} \left(\frac{u_k^j - u_k^{j-1}}{\Delta t} + \frac{u_{k+1}^j - u_{k+1}^{j-1}}{\Delta t} \right) \right) = i_{0k}^j \quad (4.15)$$

Tyto rovnice jsou k dispozici pro každý z N elementů. Po aplikování okrajových podmínek můžeme vzniklou soustavu algebraických rovnic zapsat v maticové podobě:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{v}^{(j)} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{v}^{(j-1)} + \mathbf{D} \quad (4.16)$$

kde $\mathbf{v}^{(j)} = [\{u_k\}, \{i_k\}]$ je matice neznámých diskrétních hodnot napětí a proudů v každém prostoru pro $k = 1, 2, \dots, N + 1$. \mathbf{A} , \mathbf{B} jsou matice. Matice \mathbf{D} představuje hodnoty zdrojů.

Pro lepší pochopení úlohy jsem si připravil příklad se dvěma elementy, na začátku je vedení napájeno střídavým zdrojem a na konci je zatěžováno impedancí. Tedy vedení je složeno ze dvou dvojbranů $N = 2$ a platí, že máme $N + 1$ neznámých proudů a napětí, z toho plyne, že $2 * (N + 1) = 6$ neznámých proudů a napětí. Diskretizací vedení a využitím schématu dané numerické metody získáme 4 rovnice pro vlastní popis dvojbranů a zbylé 2 rovnice jsou rovnice pro okrajové podmínky, tedy rovnice zdroje a zátěže. [6]

Rovnice použitého zdroje vypadá takto:

$$-u_0 + R_1 i_1 + u_1 = 0 \quad (4.17)$$

úpravou získáme napětí u_0 .

Rovnice použité zátěže:

$$u_3 - i_3 R_3 = 0 \quad (4.18)$$

úpravou získáme napětí u_3

První rovnice pro kabelové vedení

$$\frac{u_2^j}{2\Delta x} - \frac{u_1^j}{2\Delta x} + R_1 \frac{i_2^j}{4} + R_1 \frac{i_1^j}{4} + L_1 \frac{i_2^j}{2\Delta t} + L_1 \frac{i_1^j}{2\Delta t} = \frac{u_1^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{u_2^{j-1}}{2\Delta x} - R_1 \frac{i_2^{j-1}}{4} - R_1 \frac{i_1^{j-1}}{4} + L_1 \frac{i_1^{j-1}}{2\Delta t} + L_1 \frac{i_2^{j-1}}{2\Delta t} \quad (4.19)$$

Druhá rovnice pro kabelové vedení

$$\frac{i_2^j}{2\Delta x} - \frac{i_1^j}{2\Delta x} + G_1 \frac{u_2^j}{4} + G_1 \frac{u_1^j}{4} + C_1 \frac{u_1^j}{2\Delta t} + C_1 \frac{u_2^j}{2\Delta t} = \frac{i_1^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{i_2^{j-1}}{2\Delta x} - G_1 \frac{u_2^{j-1}}{4} - G_1 \frac{u_1^{j-1}}{4} + C_1 \frac{u_1^{j-1}}{2\Delta t} + C_1 \frac{u_2^{j-1}}{2\Delta t} \quad (4.20)$$

Tyto rovnice lze napsat v maticové formě dle vztahu:

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2\Delta x} & \frac{1}{2\Delta x} & 0 & \frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} & \frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2\Delta x} & \frac{1}{2\Delta x} & 0 & \frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} & \frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} \\ 1 & 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 \\ \frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & \frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & 0 & -\frac{1}{2\Delta x} & \frac{1}{2\Delta x} & 0 \\ 0 & \frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & \frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & 0 & -\frac{1}{2\Delta x} & \frac{1}{2\Delta x} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -R_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1^j \\ u_2^j \\ u_3^j \\ i_1^j \\ i_2^j \\ i_3^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\Delta x} & -\frac{1}{2\Delta x} & 0 & -\frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} & -\frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2\Delta x} & -\frac{1}{2\Delta x} & 0 & -\frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} & -\frac{R_1}{4} + \frac{L_1}{2\Delta t} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & -\frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & 0 & \frac{1}{2\Delta x} & -\frac{1}{2\Delta x} & 0 \\ 0 & -\frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & -\frac{G_2}{4} + \frac{C_2}{2\Delta t} & 0 & \frac{1}{2\Delta x} & -\frac{1}{2\Delta x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1^{j-1} \\ u_2^{j-1} \\ u_3^{j-1} \\ i_1^{j-1} \\ i_2^{j-1} \\ i_3^{j-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

První rovnice sdělovacího vedení

$$\begin{aligned} \frac{u_3^j}{2\Delta x} - \frac{u_4^j}{2\Delta x} + R_2 \frac{i_3^j}{4} + R_2 \frac{i_4^j}{4} + L_2 \frac{i_3^j}{2\Delta t} + L_2 \frac{i_4^j}{2\Delta t} \\ = \frac{u_3^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{u_4^{j-1}}{2\Delta x} - R_2 \frac{i_3^{j-1}}{4} - R_2 \frac{i_4^{j-1}}{4} + L_2 \frac{i_3^{j-1}}{2\Delta t} + L_2 \frac{i_4^{j-1}}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Druhá rovnice sdělovacího vedení

$$\begin{aligned} \frac{i_3^j}{2\Delta x} - \frac{i_4^j}{2\Delta x} + G_2 \frac{u_3^j}{4} + G_2 \frac{u_4^j}{4} + C_2 \frac{u_4^j}{2\Delta t} + C_2 \frac{u_3^j}{2\Delta t} = \frac{i_4^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{i_3^{j-1}}{2\Delta x} - G_2 \frac{u_3^{j-1}}{4} - G_2 \frac{u_4^{j-1}}{4} + \\ C_2 \frac{u_4^{j-1}}{2\Delta t} + C_2 \frac{u_3^{j-1}}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Můj model se skládá ze dvou souběžných vedení (kabelové a sdělovací) a proto mi vznikne dvojnásobný počet rovnic, které jsou odlišeny různými pojmy (kabelové a sdělovací) a indexy. Pro kabelové vedení jsem použil indexy 1,2 a pro sdělovací indexy 3,4.

V praxi na oba kabely působí vzájemná kapacita a indukčnost. Tím se změní tvar diferenciálních rovnic takto:

První rovnice pro kabelové vedení

$$\begin{aligned} \frac{u_2^j}{2\Delta x} - \frac{u_1^j}{2\Delta x} + R_1 \frac{i_2^j}{4} + R_1 \frac{i_1^j}{4} + L_1 \frac{i_2^j}{2\Delta t} + L_1 \frac{i_1^j}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_{x1}^j}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_{x2}^j}{2\Delta t} = \frac{u_1^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{u_2^{j-1}}{2\Delta x} - \\ R_1 \frac{i_2^{j-1}}{4} - R_1 \frac{i_1^{j-1}}{4} + L_1 \frac{i_2^{j-1}}{2\Delta t} + L_1 \frac{i_1^{j-1}}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_{x1}^{j-1}}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_{x2}^{j-1}}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (4.24)$$

První rovnice pro sdělovací vedení

$$\begin{aligned} \frac{u_{x2}^j}{2\Delta x} - \frac{u_{x1}^j}{2\Delta x} + R_2 \frac{i_{x2}^j}{4} + R_2 \frac{i_{x1}^j}{4} + L_2 \frac{i_{x2}^j}{2\Delta t} + L_2 \frac{i_{x1}^j}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_2^j}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_1^j}{2\Delta t} = \frac{u_{x2}^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{u_{x1}^{j-1}}{2\Delta x} - \\ R_2 \frac{i_{x2}^{j-1}}{4} - R_2 \frac{i_{x1}^{j-1}}{4} + L_2 \frac{i_{x2}^{j-1}}{2\Delta t} + L_2 \frac{i_{x1}^{j-1}}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_2^{j-1}}{2\Delta t} + L_{12} \frac{i_1^{j-1}}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Druhá rovnice pro kabelové vedení

$$\begin{aligned} \frac{i_2^j}{2\Delta x} - \frac{i_1^j}{2\Delta x} + G_1 \frac{u_2^j}{4} + G_1 \frac{u_1^j}{4} + C_1 \frac{u_1^j}{2\Delta t} + C_1 \frac{u_2^j}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_{x1}^j}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_{x2}^j}{2\Delta t} = \frac{i_1^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{i_2^{j-1}}{2\Delta x} - \\ G_1 \frac{u_2^{j-1}}{4} - G_1 \frac{u_1^{j-1}}{4} + C_1 \frac{u_1^{j-1}}{2\Delta t} + C_1 \frac{u_2^{j-1}}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_{x1}^{j-1}}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_{x2}^{j-1}}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Druhá rovnice pro sdělovací vedení

$$\begin{aligned} \frac{i_{x2}^j}{2\Delta x} - \frac{i_{x1}^j}{2\Delta x} + G_2 \frac{u_{x2}^j}{4} + G_2 \frac{u_{x1}^j}{4} + C_2 \frac{u_{x1}^j}{2\Delta t} + C_2 \frac{u_{x2}^j}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_2^j}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_1^j}{2\Delta t} = \frac{i_{x2}^{j-1}}{2\Delta x} - \frac{i_{x1}^{j-1}}{2\Delta x} - \\ G_2 \frac{u_{x2}^{j-1}}{4} - G_2 \frac{u_{x1}^{j-1}}{4} + C_2 \frac{u_{x2}^{j-1}}{2\Delta t} + C_2 \frac{u_{x1}^{j-1}}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_2^{j-1}}{2\Delta t} + C_{12} \frac{u_1^{j-1}}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (4.27)$$

4.2 Výpočet použitých parametrů

4.2.1 Metoda zrcadlení

Pro získání vzájemných parametrů kapacity se využívá metoda zrcadlení. Tyto parametry jsem použil pro výpočet a modelování grafů ve svém programu.

Potřebné potenciálové koeficienty lze spočítat dle vztahů:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2\cdot h_1}{R} \quad (4.28)$$

$$\alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2\cdot h_2}{R} \quad (4.29)$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{s'}{s} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \sqrt{1 + \frac{4\cdot h_1 \cdot h_2}{s^2}} \quad (4.30)$$

$$\alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2\cdot h_2}{R} = \alpha_{12} = \alpha_{21} \quad (4.31)$$

$$\alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{s'}{s} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \sqrt{1 + \frac{4\cdot h_1 \cdot h_2}{s^2}} \quad (4.32)$$

Kde h_1, h_2 jsou hloubky uložení kabelů, kde s je vzdálenost od sebe. Dosazením potenciálových koeficientů získáme hodnoty parciálních kapacit:

$$C_{10} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{\ln \frac{2\cdot h_2}{R} - \ln \sqrt{1 + \frac{4\cdot h_1 \cdot h_2}{s^2}}}{A} \quad (4.33)$$

$$C_{20} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{\ln \frac{2\cdot h_1}{R} - \ln \sqrt{1 + \frac{4\cdot h_1 \cdot h_2}{s^2}}}{A} \quad (4.34)$$

$$C_{12} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{\ln \sqrt{1 + \frac{4\cdot h_1 \cdot h_2}{s^2}}}{A} \quad (4.35)$$

Kde A je:

$$A = \ln \frac{2\cdot h_1}{R} \cdot \ln \frac{2\cdot h_2}{R} \cdot \ln^2 \sqrt{1 + \frac{4\cdot h_1 \cdot h_2}{s^2}} \quad (4.36)$$

R je poloměr vodiče, h jsou výšky jednotlivých vodičů a s je vzdálenost mezi vodiči.

Uvažujeme dva rovnoběžné vodiče s proudy i_1 a i_2 . Vlastní indukčností vodiče budeme rozumět veličinu

$$L_{11} = L_i + L_e \quad (4.37)$$

Kde L_i je vnitřní indukčnost vodiče 1,

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad [H/m] \quad (4.38)$$

μ_0 je permeabilita vodiče. L_e je vnější indukčnost vodiče 1

$$L_e = \frac{\phi_{e1}}{i_1} \quad [H/m] \quad (4.39)$$

kde ϕ_{e1} je magnetický indukční tok spřažený se smyčkou. Dosazením získáme rovnici pro vlastní indukčnost

$$L_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{r_0}{R} \right) \quad [H/m] \quad (4.40)$$

Vzájemnou indukčností L_{12} mezi vodiči 1 a 2 budeme rozumět veličinu

$$L_{12} = \frac{\phi_{12}}{i_1} \quad [H/m] \quad (4.41)$$

kde ϕ_{12} je magnetický indukční tok vybuzený proudem i_1 a spřažený se smyčkou.

$$\phi_{12} = A_1(s_{12}) = \frac{\mu_0 \cdot i_1}{2\pi} \ln \frac{r_0}{s_{12}} \quad (4.42)$$

dosazením vyjde konečný vztah pro L_{12}

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{s_{12}} \quad [H/m] \quad (4.43)$$

5 Ilustrativní příklady

Porovnával jsem dva kabely (silový a sdělovací), které jsem vložil do určité vzdálenosti od sebe a do určité hloubky pod povrch země. V prvním případě se jednalo o harmonicky napájené kabelové vedení, které bylo na výstupní straně ve stavu naprázdno (lze ale pochopitelně modelovat i jakýkoli jiný stav zakončení). Výsledky vzájemných kapacit, vzájemných indukčností, napětí a proudů na těchto vedení ukazuje následující tabulka.

Modelované vedení 22 kV je náhodně vybrané. Vybral jsem si tři hodnoty, u kterých jsem znázornil, pomocí svého algoritmu v programu Matlab, grafy proudu na sdělovacím a kabelovém vedení. Dále jsem u těchto hodnot sledoval vliv vzájemné kapacity a indukce.

Vzdáleností s kabelů od sebe se snižuje vzájemná indukčnost a zároveň se snižuje vzájemná kapacita. A zmenšuje se proud na vedení (sdělovacím, kabelovém). Čím jsou kabely více u sebe, proud na sdělovacím vedení je vyšší a přiblížením ke vzdálenosti 0,25 m se o více než polovinu sníží.

Bylo by lepší tedy používat vedení dále od sebe. Hodnota se liší pouze o třetinu, a proto je lepší z hlediska ekonomického použít zvýrazněnou hodnotu v tabulce 1.

s [m]	h [m]	Isabs [A]	Ikabs [A]	Ukabs [V]	Usabs [V]	C12k [F]	L12K [H]
0,05	1	8,0000E-03	2,5290E+01	2,2000E+04	2,5732E+02	1,7701E-11	1,1408E-06
0,1	1	5,5000E-03	1,7387E+01	2,2000E+04	2,5732E+02	1,2137E-11	1,0021E-06
0,15	1	4,4000E-03	1,4008E+01	2,2000E+04	2,5732E+02	9,7586E-12	9,2103E-07
0,2	1	3,8000E-03	1,1963E+01	2,2000E+04	2,5732E+02	8,3195E-12	8,6350E-07
0,25	1	3,3000E-03	1,0532E+01	2,2000E+04	2,5732E+02	7,3125E-12	8,1887E-07
0,3	1	3,0000E-03	9,4474E+00	2,2000E+04	2,5732E+02	6,5491E-12	7,8240E-07
0,35	1	2,7000E-03	8,5823E+00	2,2000E+04	2,5732E+02	5,9402E-12	7,5157E-07
0,4	1	2,5000E-03	7,8684E+00	2,2000E+04	2,5732E+02	5,4375E-12	7,2487E-07
0,45	1	2,3000E-03	7,2648E+00	2,2000E+04	2,5732E+02	5,0120E-12	7,0131E-07
0,5	1	2,1000E-03	6,7446E+00	2,2000E+04	2,5732E+02	4,6449E-12	6,8024E-07
0,55	1	2,0000E-03	6,2896E+00	2,2000E+04	2,5732E+02	4,3237E-12	6,6118E-07

Tab. 1: Změna vzdálenosti s

s [m]	h1 [m]	h2 [m]	Isabs [A]	Ikabs [A]	Ukabs [V]	Usabs [V]	C12k [F]	L12K [H]
0,25	1	0,5	0,0017	5,2949E+00	2,20E+04	257,3182	3,61E-12	6,58E-07
0,25	1	0,6	0,002	6,3600E+00	2,20E+04	257,3182	4,36E-12	6,92E-07
0,25	1	0,7	0,0023	7,5373E+00	2,20E+04	257,3182	5,20E-12	7,30E-07
0,25	1	0,8	0,0028	8,8001E+00	2,20E+04	257,3182	6,09E-12	7,69E-07
0,25	1	0,9	0,0031	9,9557E+00	2,20E+04	257,3182	6,91E-12	8,04E-07
0,25	1	1	0,0033	1,0532E+01	2,20E+04	257,3182	7,31E-12	8,19E-07
0,25	1	1,1	0,0032	1,0195E+01	2,20E+04	257,3182	7,08E-12	8,04E-07
0,25	1	1,2	0,0029	9,2988E+00	2,20E+04	257,3182	6,45E-12	7,69E-07
0,25	1	1,3	0,0026	8,3210E+00	2,20E+04	257,3182	5,76E-12	7,30E-07
0,25	1	1,4	0,0024	7,4549E+00	2,20E+04	257,3182	5,15E-12	6,92E-07
0,25	1	1,5	0,0021	6,7294E+00	2,20E+04	257,3182	4,64E-12	6,58E-07

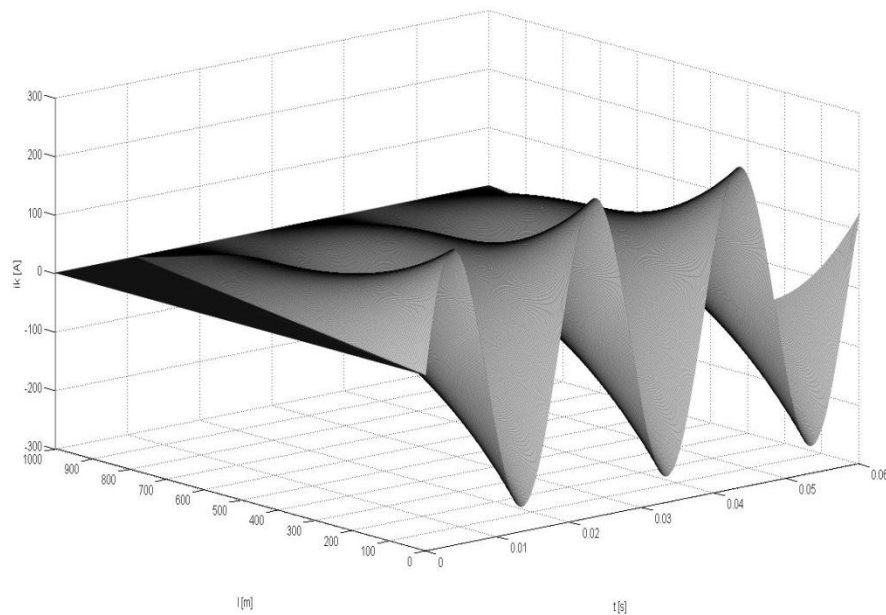
Tab. 2.: Změna hloubky h_2 kabelu

s [m]	h1 [m]	h2 [m]	Isabs [A]	Ikabs [A]	Ukabs [V]	Usabs [V]	C12k [F]	L12K [H]
0,05	1	0,5	9,74E-04	1,1336	2,20E+04	257,3182	3,97E-12	5,41E-07
0,1	1	0,6	9,73E-04	1,132	2,20E+04	257,3182	4,85E-12	5,41E-07
0,15	1	0,7	9,70E-04	1,1294	2,20E+04	257,3182	5,79E-12	5,39E-07
0,2	1	0,8	9,67E-04	1,1259	2,20E+04	257,3182	6,60E-12	5,38E-07
0,25	1	0,9	9,63E-04	1,1214	2,20E+04	257,3182	6,91E-12	5,36E-07
0,3	1	1	0,003	9,4474E+00	2,20E+04	257,3182	6,55E-12	7,82E-07
0,35	1	1,1	0,0027	8,4877E+00	2,20E+04	257,3182	5,87E-12	7,44E-07
0,4	1	1,2	0,0024	7,5268E+00	2,20E+04	257,3182	5,20E-12	7,03E-07
0,45	1	1,3	0,0021	6,7042E+00	2,20E+04	257,3182	4,62E-12	6,65E-07
0,5	1	1,4	0,0019	6,0248E+00	2,20E+04	257,3182	4,14E-12	6,31E-07
0,55	1	1,5	0,0017	5,4640E+00	2,20E+04	257,3182	3,75E-12	6,01E-07

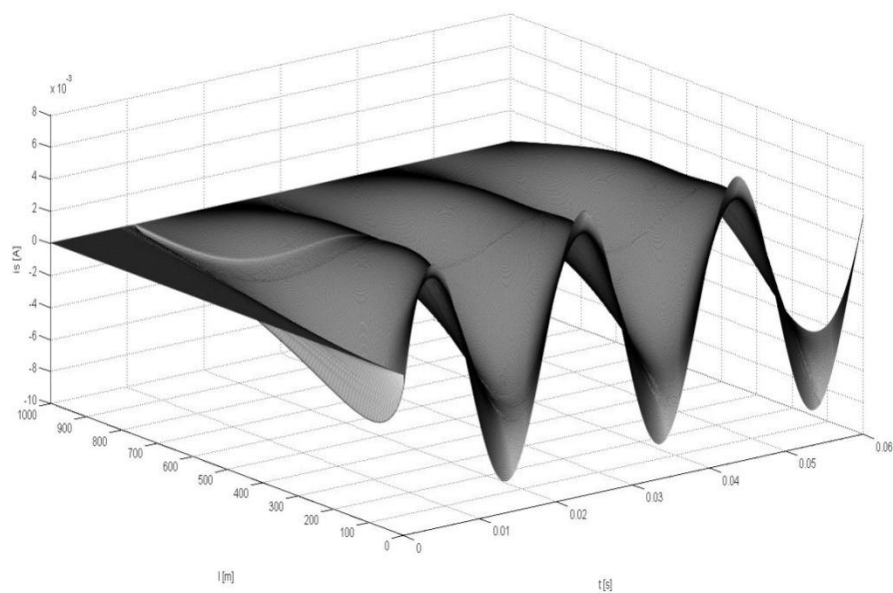
Tab. 3: Změna vzdálenosti s a změna hloubky kabelu h_2

Z těchto tabulek je patrné, že program je použitelný pro nekonečně možných vzdáleností a hloubek uložení kabelů. Jejichž hodnoty se mohou libovolně nastavit.

Následující grafy (obr. 7, obr. 8) popisují vedení ve vzdálenost 0,05 m od sebe a v hloubce 1m. Na výstupu je stav naprázdno, tedy proud se rovná nule a vstupní vnitřní odpor napěťového zdroje je velmi malý. V ideálním případě roven nule.

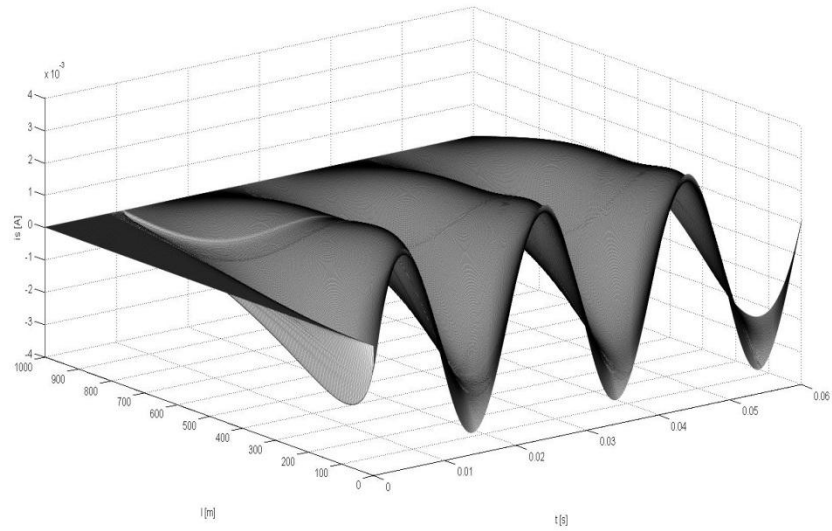


Obr. 7: Proud na kabelovém vedení

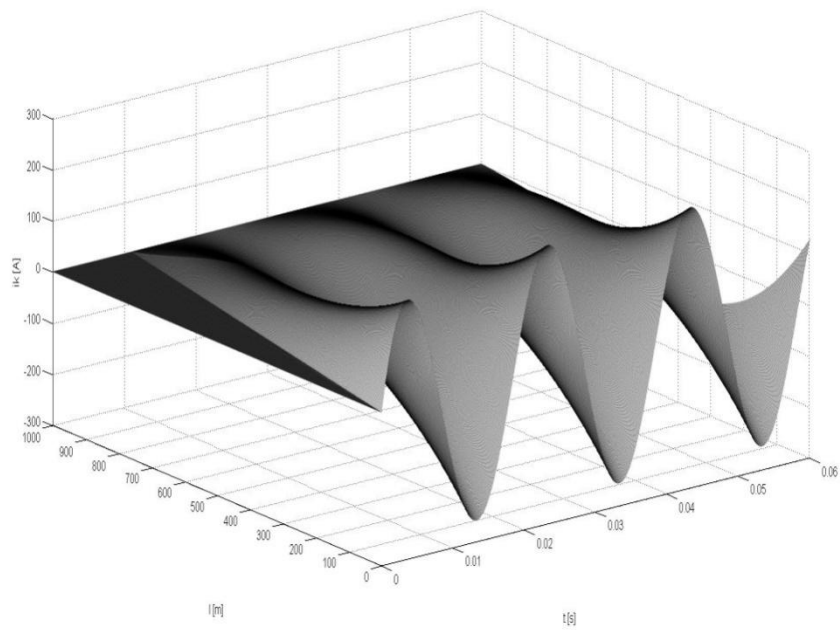


Obr. 8: Proud na sdělovacím vedení

Grafy (obr. 9, obr. 10) popisují vzdálenost 0,25 m od sebe. Toto se používá jako minimální vzdálenost od sebe podle norem a v hloubce 1 m. Na obrázku je vidět harmonický průběh na výstupu vedení.

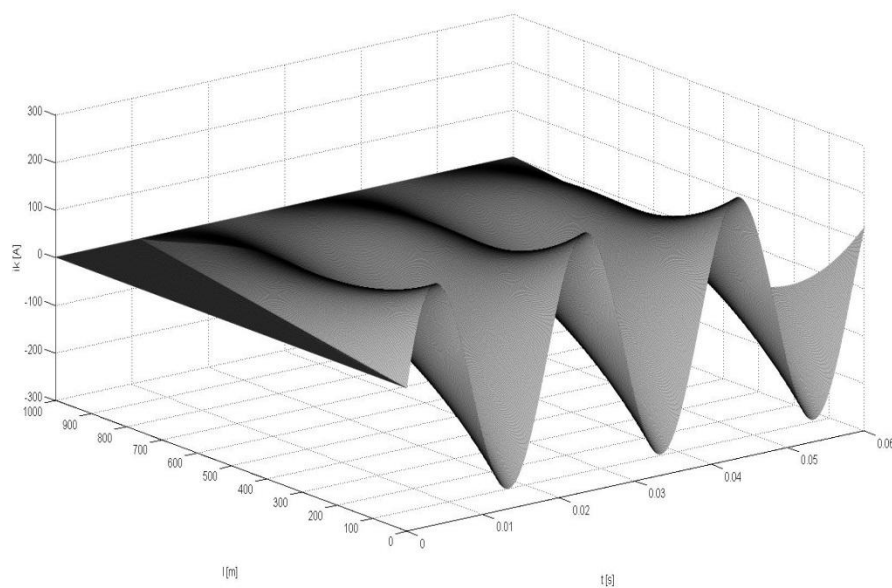


Obr. 9: Proud na sdělovacím vedení

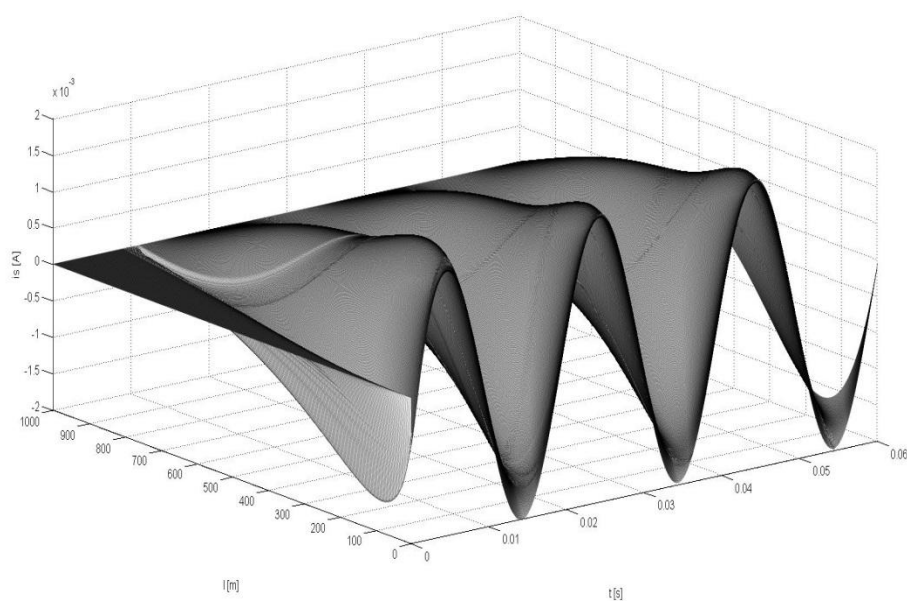


Obr. 10: Proud na kabelovém vedení

Grafy (Obr. 11, Obr. 12) popisují vzdálenost 0,55 m od sebe a v hloubce také 1m. V této vzdálenosti se zmenšují proudy na obou vedení, a proto se používá více případ výše.



Obr. 11: Proud na kabelovém vedení

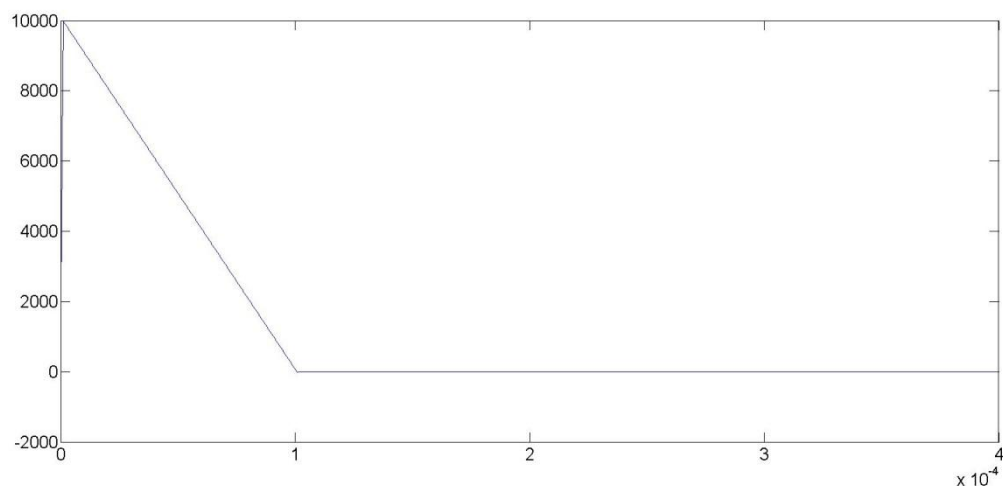


Obr. 12: Proud na sdělovacím vedení

Do stejného vedení jsem pustil rázovou vlnu, která se může objevit při atmosférickém výboji (nepřímý úder blesku). Při tomto nestacionárním jevu dochází k přepětí, která jsou nebezpečné pro izolační systém rozvodné soustavy. Tento jev se také může objevit při spínacích procesech a také u vnitřních poruch (např. připojení nebo odpojení

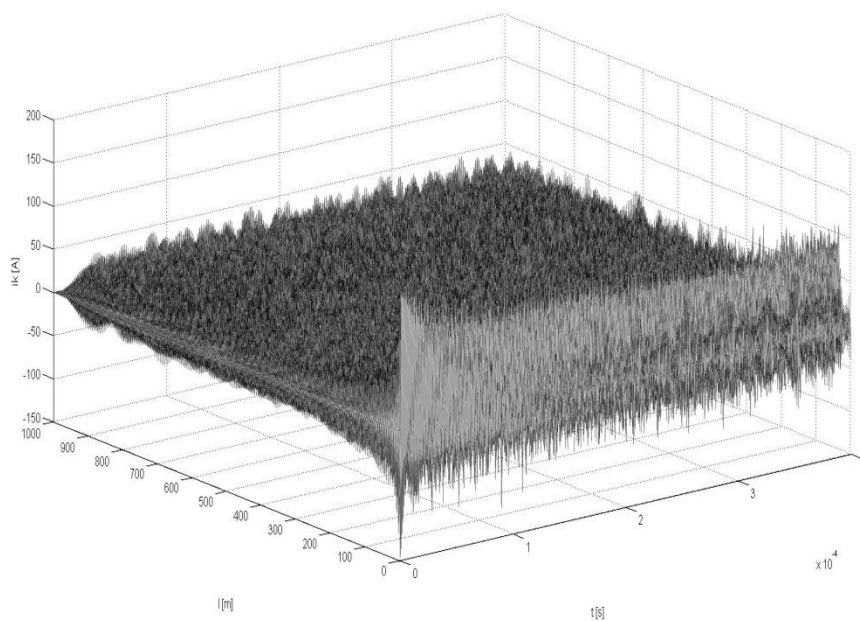
zdrojů, zkratů nebo přerušení vodičů).

Na obrázku níže (Obr. 13) můžeme vidět její tvar. Vrcholová hodnota rázové vlny (maximální proud) je zvolena 10 kV. Doba jejího čela je $1,2 \mu\text{s}$ a doba půl týlu $50 \mu\text{s}$.

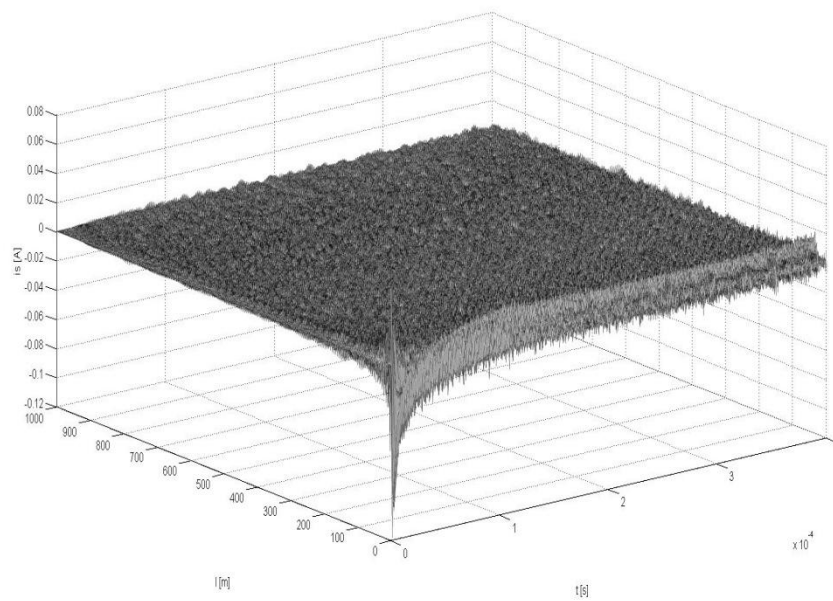


Obr. 13: Rázová vlna

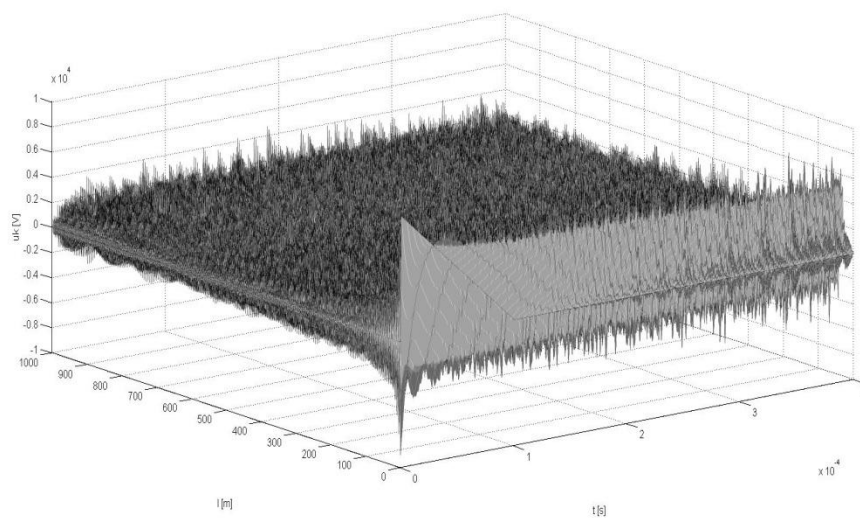
Grafy (Obr. 14, Obr. 15, Obr. 16, Obr. 17) popisují vzdálenost $s = 0,05\text{m}$ od sebe v hloubce 1m . Na kabelovém vedení je vidět velký vliv rázové vlny. Její rychlý a strmý nárůst. A naopak na sdělovacím vedení pokles hodnot napětí a proudů.



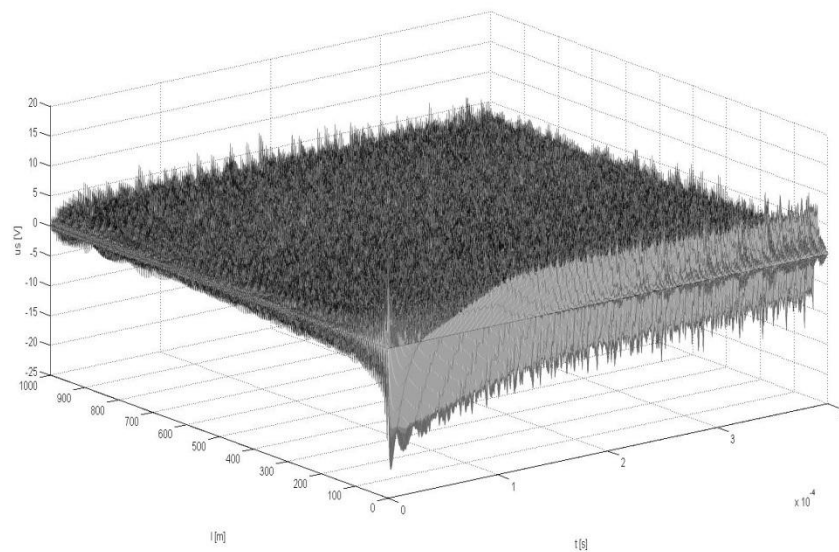
Obr. 14: Proud v kabelovém vedení



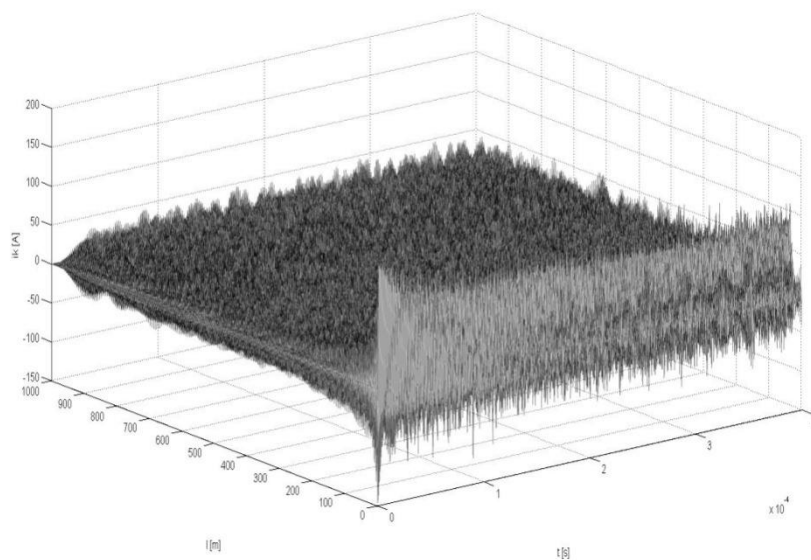
Obr. 15: Proud ve sdělovacím vedení

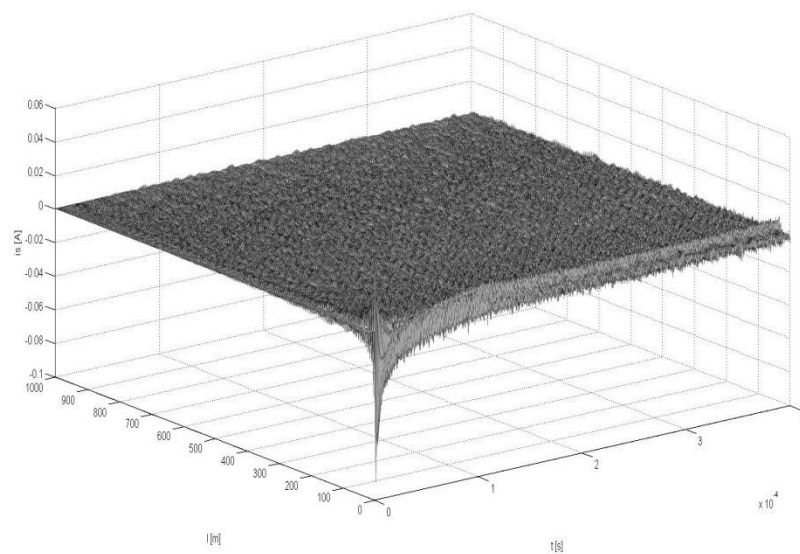


Obr. 16: Napětí kabelové vedení

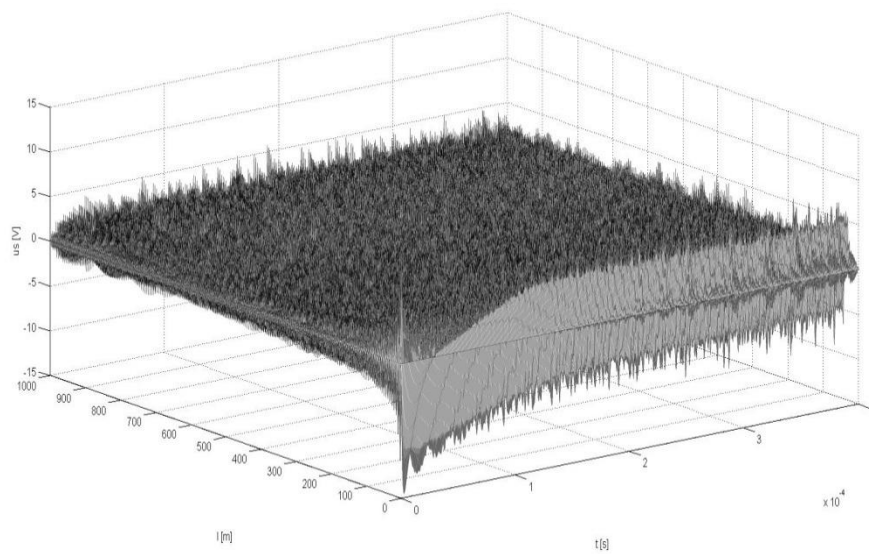
**Obr. 17: Napětí na sdělovacím vedení**

Grafy (Obr. 18, Obr. 19, Obr. 20, Obr. 21) popisují vzdálenost $s = 0,25\text{m}$ od sebe. Na těchto obrázcích je vidět značný a zároveň špatný vliv rázové vlny na vedení, kdy se jedná znovu o strmý a rychlý nárůst vlny na kabelovém vedení.

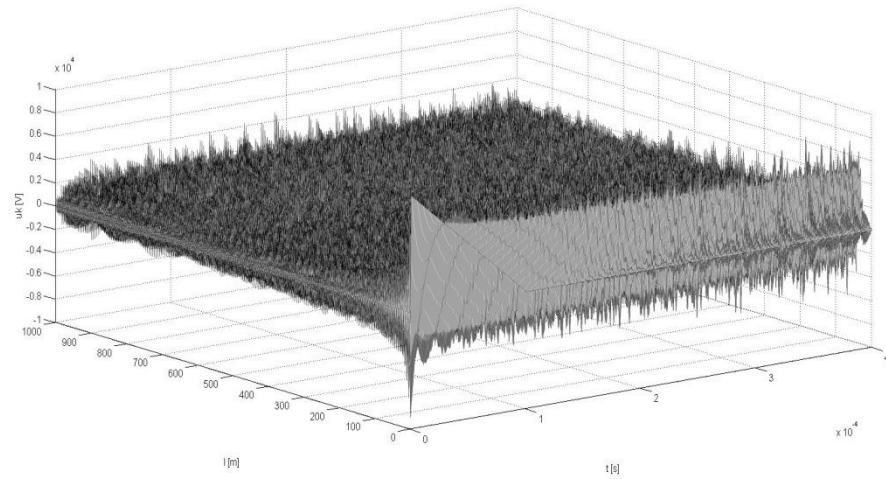
**Obr. 18: Proud na kabelovém vedení**



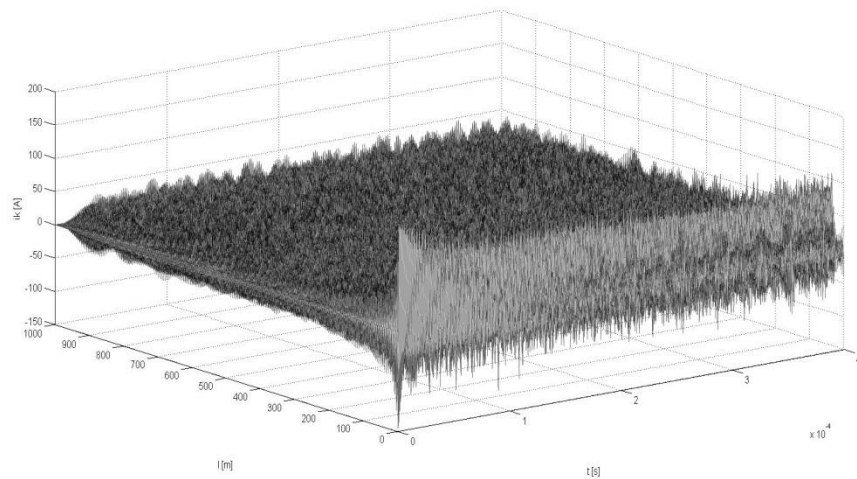
Obr. 19: Proud na sdělovacím vedení

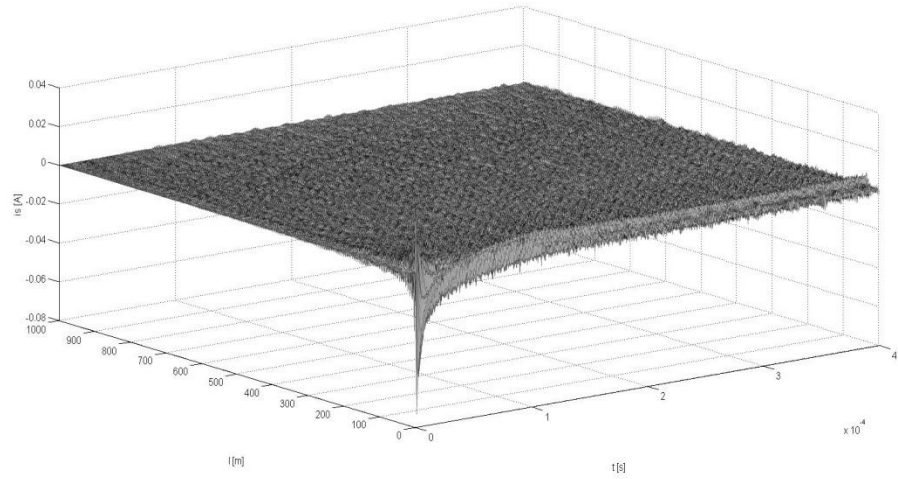


Obr. 20: Napětí na sdělovacím vedení

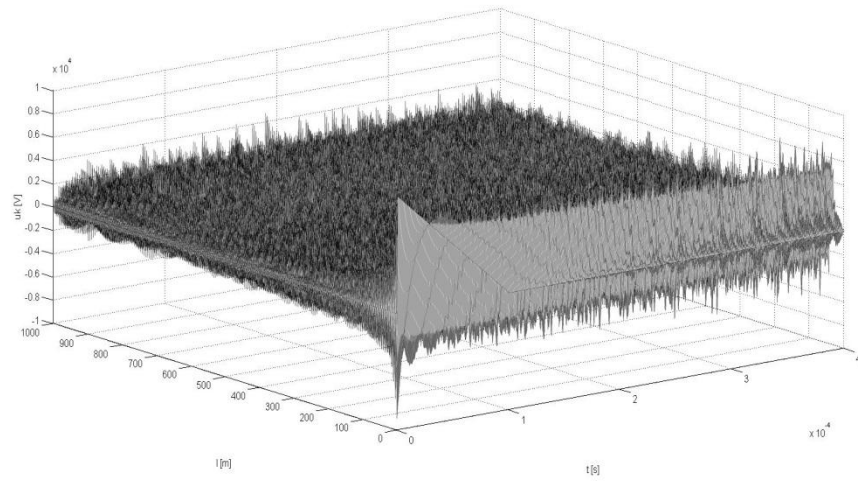
**Obr. 21: Napětí na kabelovém vedení**

Grafy (Obr. 22, Obr. 23, Obr. 24, Obr. 25) popisují vzdálenost $s=0,55\text{m}$ od sebe. V porovnání s předchozími případy je i zde patrný pokles indukovaných hodnot se vzdáleností díky snižujícím se vzájemným vazbám.

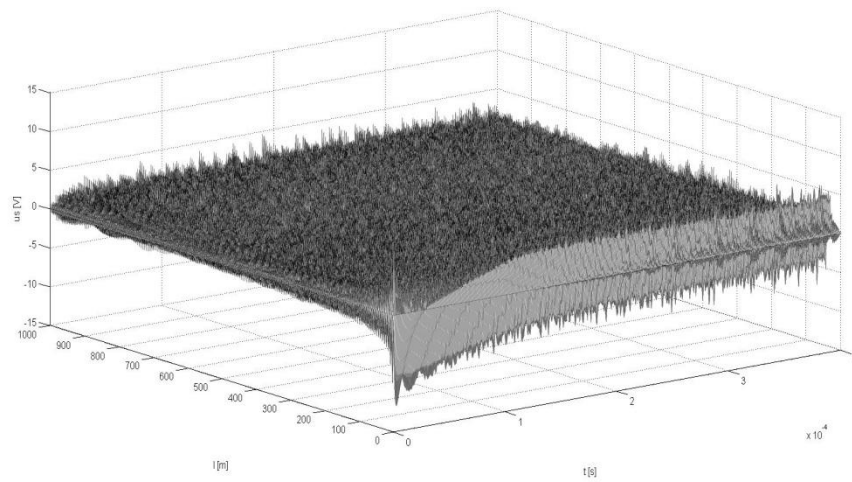
**Obr. 22: Proud na kabelovém vedení**



Obr. 23: Proud na sdělovacím vedení



Obr. 24: Napětí na kabelovém vedení

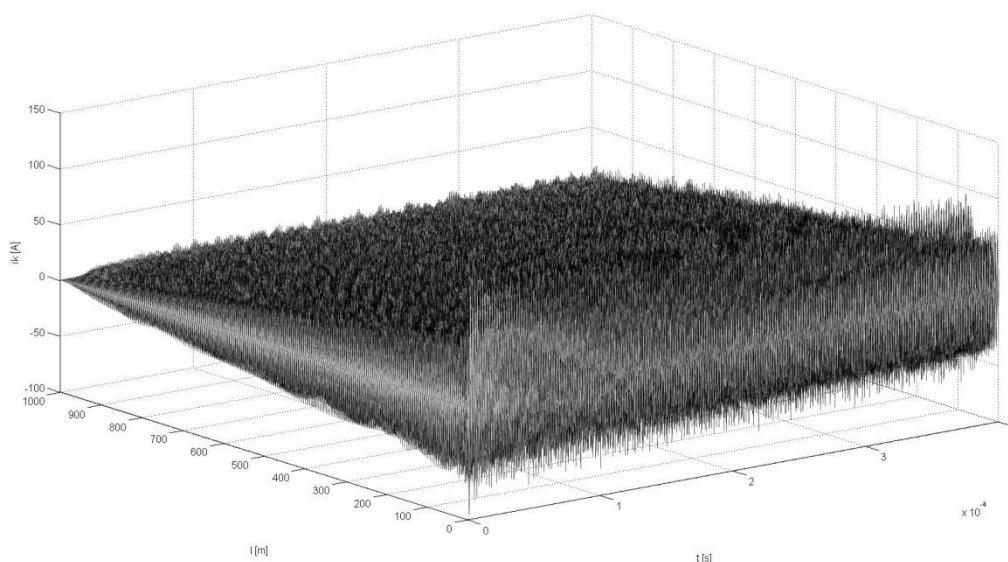


Obr. 25: Napětí na sdělovacím vedení

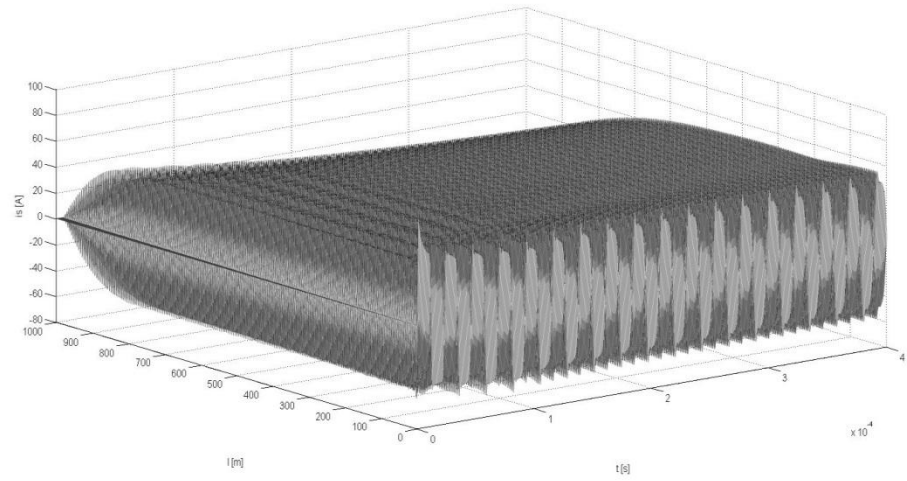
Působením těchto vlivů dochází při postupu vln vedením ke zkreslení jejich tvaru. Čelo se zplošťuje, tyl se posouvá a jejich hodnoty se tlumí. Přestává platit geometrická podobnost mezi postupnými vlnami napětí a proudu. Vzájemné kapacity a vzájemné indukčnosti se působením rázové vlny nezměnily. Na grafech je vidět strmý a velmi rychlý nárůst rázové vlny, který má velký vliv na vedení. Tyto vlivy jsou nebezpečné pro izolační systém rozvodné soustavy.[1]

Posledním případem ukazují, že program umí respektovat i více zdrojů naráz. Jak harmonické vedení, tak zároveň atmosférickou vlnu na vedení.

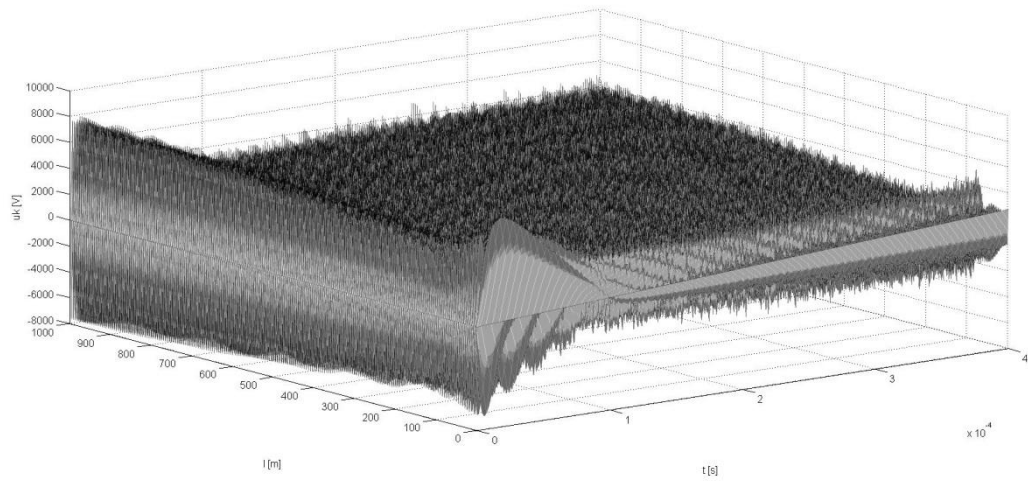
Grafy (Obr. 26, Obr. 27, Obr. 28, Obr. 29) popisují vzdálenosti $s=0,05$ od sebe v hloubce 1m.



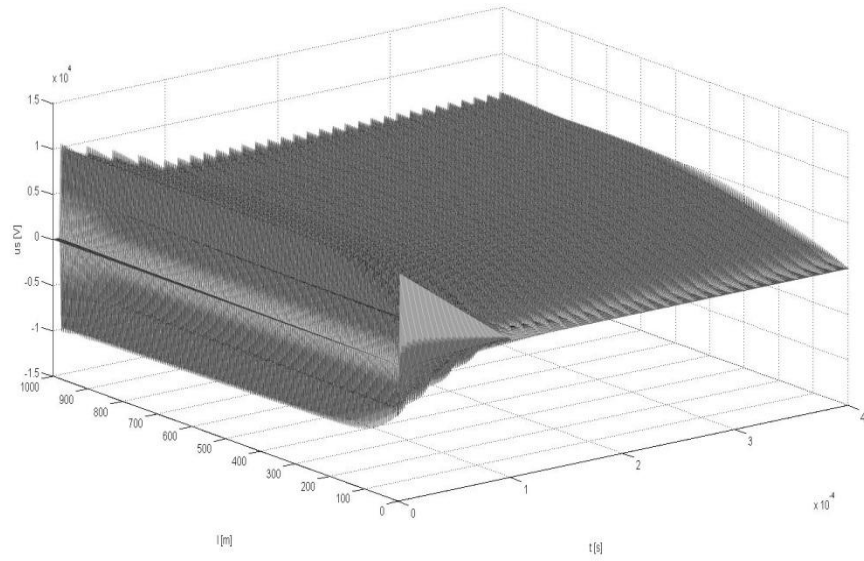
Obr. 26: Proud na kabelovém vedení



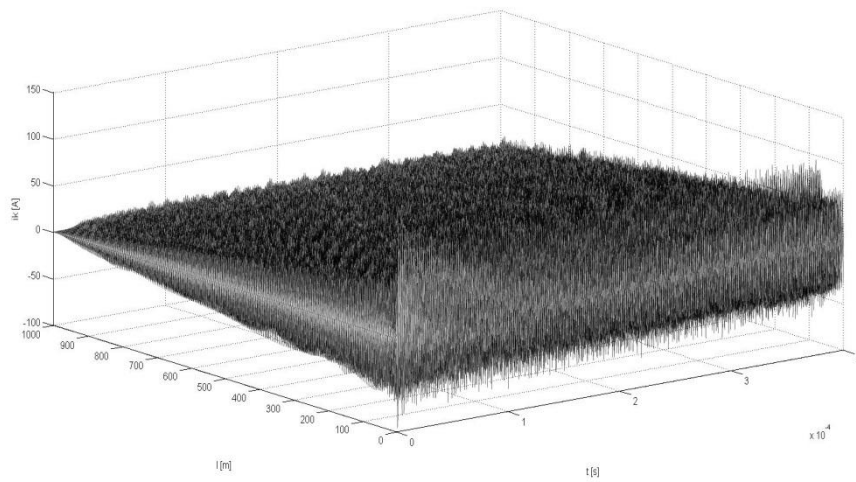
Obr. 27: Proud na sdělovacím vedení

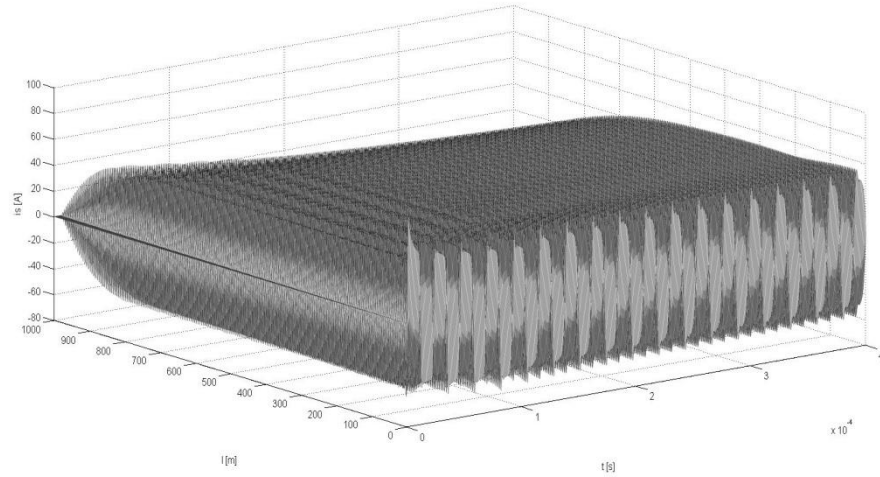


Obr. 28: Napětí na kabelovém vedení

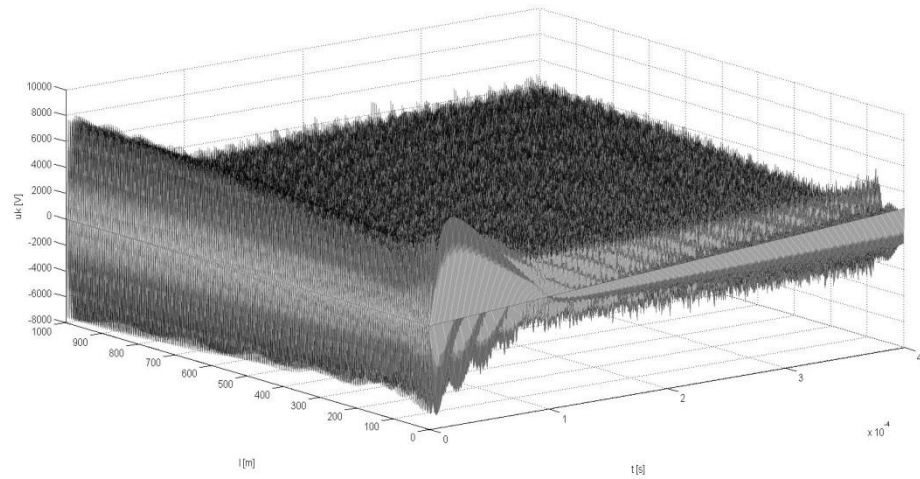
**Obr. 29: Napětí na sdělovacím vedení**

Grafy (Obr. 30, Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33) popisují vzdálenost $s=0,25\text{m}$ od sebe a ve stejné hloubce 1m.

**Obr. 30: Proud na kabelovém vedení**

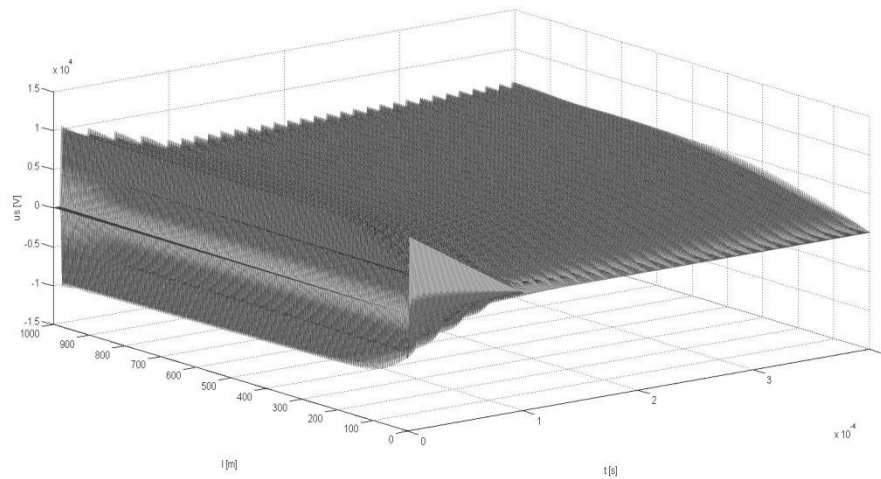


Obr. 31: Proud na sdělovacím vedení



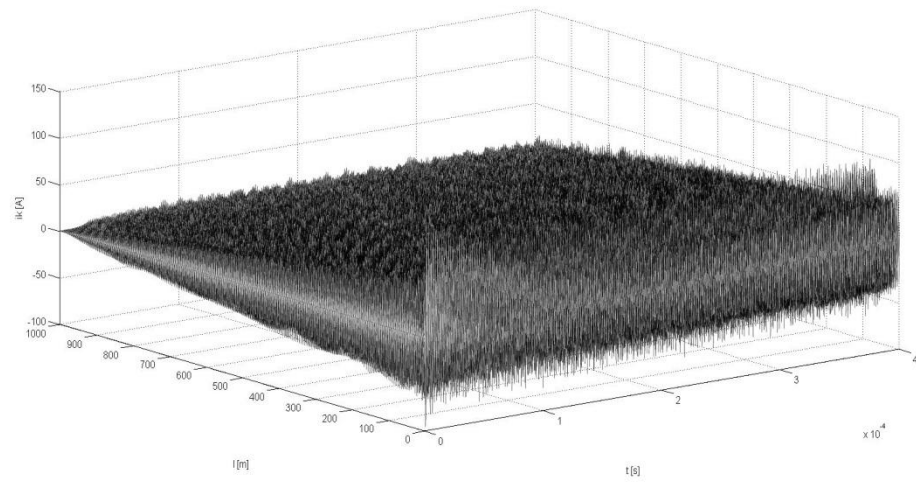
Obr. 32: Napětí na kabelovém vedení

Na Obr. 32 působí rázová vlna a je již vidět nárůst harmonické vlny.

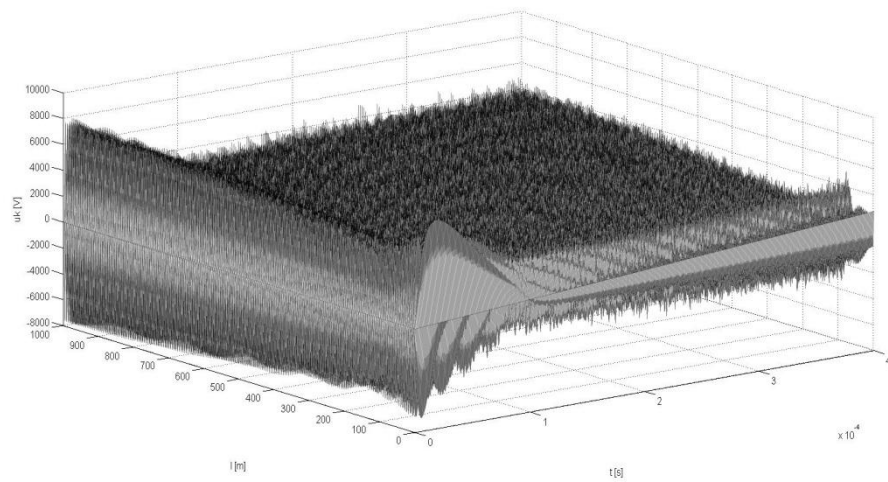


Obr. 33: Napětí na sdělovacím vedení

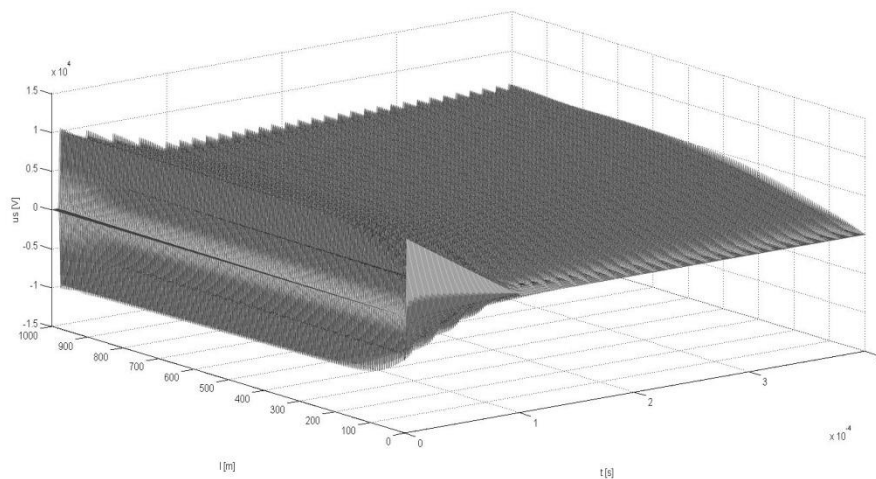
Grafy (Obr. 34, Obr. 35, Obr. 36, Obr. 37) popisují vzdálenost $s=0,55\text{m}$ od sebe a 1m ve stejné hloubce 1m .



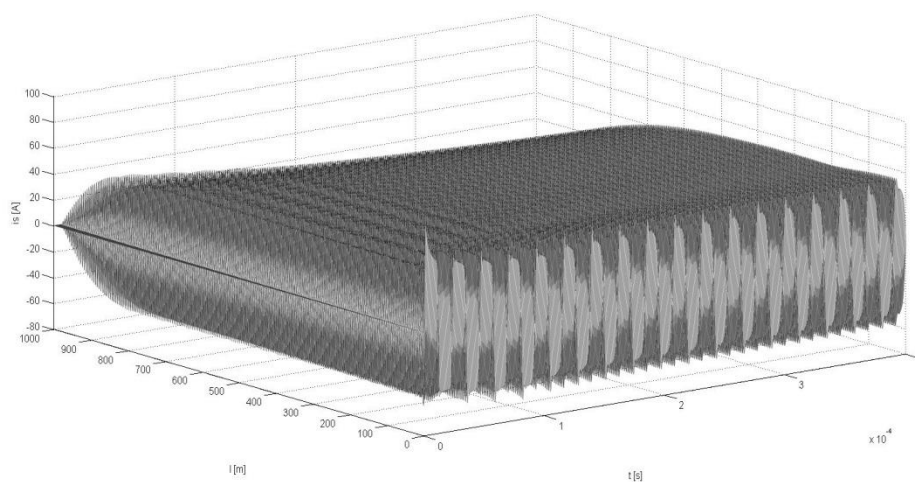
Obr. 34: Proud na kabelovém vedení



Obr. 35: Napětí na kabelovém vedení

**Obr. 36: Napětí na sdělovacím vedení**

Na obrázku výše (obr. 36) je vidět působení rázové vlny na sdělovacím vedení napětí, jelikož je časová osa zkrácená na $400 \mu\text{s}$ není vidět nárůst harmonické vlny.

**Obr. 37: Proud na sdělovacím vedení**

6 Závěr

Hlavní cílem této bakalářské práce bylo popsat eventuální rizika ovlivňování vedení, naznačit analytický výpočet a řešit numericky problém pro různé konfigurace.

V úvodu práce jsem se zabýval distribuční soustavou. Více jsem se zaměřil na kabelové a venkovní vedení. Popisoval jsem druhy chlazení a značení kabelů. U venkovního vedení jsem zabýval jeho značením, složením a ekologickým hlediskem. Dále jsem se zabýval stožáry a jejich vlastnostmi.

V další části práce jsem popisoval parametry náhradního vedení. Sepsal jsem rovnice s jejich výpočty a jaký mají vliv na vedení.

Dále jsem se zabýval numerickými problémy. Naznačil jsem matematickou metodu modelu přenosové soustavy. Metodu řešení jsem použil metodu konečných diferencí s využitím Wendroffovy diferenční formule. Dále jsem sepsal rovnice použitého zdroje a použité zátěže. Můj model se skládá ze dvou souběžných vedení, a proto mi vzniknul dvojnásobný počet rovnic, které jsem sepsal do maticové podoby.

Na závěr jsem uvedl ilustrativní případy namodelovaného harmonického vedení. Dále jsem se zabýval poruchami vedení, které mohou způsobovat atmosférické a spínací vlivy. Hodnoty napětí a proudů jsem zaznamenal do tabulek a vykreslil v programu Matlab.

Jistě by bylo mnohem zajímavější řešit tohle téma pro třífázové vedení, ale také složitější, což přesahuje rámec této bakalářské práce.

7 Použitá literatura

7.1 Knižní zdroje

[1] MAYER, Daniel. Elektrodynamika v energetice. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-164-0.

[2] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. Elektrické stanice a vedení. 1. vyd. Plzeň: ZČU v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.

[3] MERTLOVÁ, Jiřina a Martin KOČMICH. Elektrické stanice a vedení. Plzeň: ZČU v Plzni, 1997. ISBN 80-7082-356.

[4] MERTLOVÁ, Jiřina, Pavla HEJTMÁNKOVÁ a Tomáš TAJTL. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Plzeň: ZČU v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-307-8.

[5] VITÁSEK, Emil. Numerické metody. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987.

[6] KOTLAN, Václav a Zdeňka BENEŠOVÁ. Propagation of Surge Waves Induced by Lightning Stroke on Interconnected Transmission Lines: Acta Technica CSAV, Praha, 2006, roč. 51, sv.4, str. 301-316, ISSN: 0001-7043.

7.2 Online zdroje

[7] [Http://www.vutbr.cz:http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18972](http://www.vutbr.cz/http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18972) [online]. Brno, 2012 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: www.vutbr.cz

[8] [Http://cs.wikipedia.org: http://cs.wikipedia.org/wiki/Kabel](http://cs.wikipedia.org/http://cs.wikipedia.org/wiki/Kabel) [online]. 2005-05-16 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kabel>

[9] www.prakab.cz.Http://www.prakab.cz/fileadmin/content/prakab/Vyrobky/Sdelovaci_kabely_a_vodice/BYFY-M.pdf [online]. Praha, 2008 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: www.prakab.cz

8 Přílohy

8.1 Zdrojový kód

```
clear;
% stanovena delta x a delta t
endt=400e-6; dt=2.5e-7; l=endt/dt;
L=1000; k=400; dx=L/k;
pomer=1/dx;
disp(pomer);
S=50e-6;%prurez kabelu
R=sqrt(S/pi);% vypocet polomeru kabelu
h1=1;%hloubka ulozeni kabelu
h2=1;%hloubka ulozeni kabelu
r0=15;%fiktivni rozmer
mi0=4*pi*1e-7;
s=0.55;%vzdalenost kabelu od sebe
s12=sqrt((s*s)+((h1-h2).^2));% pro vypocetet kapacity, uhloprička v zrcadleni
er=2.16;%relativni permitivita
e0=8.854e-12;%permitivita ve vakuu
eps=er*e0;%permitivita
b=(2*h1)/R;
c=h1/(s/2);
A=log((2*h1)/R)*log((2*h2)/R)-((log(sqrt(1+(4*h1*h2)/(s12*s12))))).^2);

L12k=(mi0/(2*pi))*log(r0/s12)

C12k=abs(2*pi*eps*(log(sqrt(1+(4*h1*h2)/(s12*s12))))/(A))

Rk = 0.387;
Rs = 39.41;
Lk = 0.00068;
Ls = 0.0000883;
Gk = 0;
Gs = 0;
Ck = 0.00000018;
Cs = 0.000000087;
C12s=C12k;
L12s=L12k;
f0=50;
U0=22000;

Rk_vstup=1e-9;
Rk_vystup=1e+9;
```

```

Rs_vstup=Rk_vstup;
Rs_vystup=Rk_vystup;
        kt=1; %urcuje ktera casova hladina se bere do vyslednych grafu -
kt=5 znamena kazda pata

A = zeros(4*(k+1),4*(k+1));
B = A;
U= A(:,1);
V=A(:,1);

%for i = 0:12:(k-1)*12
for e = 1:k %i se pouziva v matlabu pro komplexni cisla
% -----A-----
    r=e; %index radku
    s=e; %index sloupce
    %plnim prvni subblok radku a prvni subblok sloupce
    A(r,s) = -1/(2*dx);
    A(r,s+1) = 1/(2*dx);
    %sem to same pro matici B (at se rovnou definuje ve stejnem cyklu, jen
    %ma jine koeficienty, ale stejne obsazene pozice
    B(r,s) = 1/(2*dx);
    B(r,s+1) = -1/(2*dx);

    r=e;
    s=1*(k+1)+e;
    %v tomto subbloku nic neni
        r=e;
    s=2*(k+1)+e;
    %plnim prvni subblok radku a treti subblok sloupce
    A(r,s) = Rk/4 + Lk/(2*dt);
    A(r,s+1) = Rk/4 + Lk/(2*dt);
    %zase stejnym zpusobem matice B
    B(r,s) = -Rk/4 + Lk/(2*dt);
    B(r,s+1) = -Rk/4 + Lk/(2*dt);
    r=e;
    s=3*(k+1)+e;
    %plnim prvni subblok radku a ctvrty subblok sloupce
    A(r,s) = L12k/(2*dt);
    A(r,s+1) = L12k/(2*dt);
    B(r,s) = L12k/(2*dt);
    B(r,s+1) = L12k/(2*dt);
        %zmena radku - prechazim na napetovou rovnici druheho vedeni
    r=1*(k+1)+e;
    s=e;
    %subblok 2 radek, 1 sloupec
    r=1*(k+1)+e;

```

```

s=1*(k+1)+e;
%subblok 2 radek, 2 sloupec
A(r,s) = -1/(2*dx);
A(r,s+1) = 1/(2*dx);
B(r,s) = 1/(2*dx);
B(r,s+1) = -1/(2*dx);
r=1*(k+1)+e;
s=2*(k+1)+e;
%subblok 2 radek, 3 sloupec
A(r,s) = L12s/(2*dt);
A(r,s+1) = L12s/(2*dt);
B(r,s) = L12s/(2*dt);
B(r,s+1) = L12s/(2*dt);

r=1*(k+1)+e;
s=3*(k+1)+e;
%subblok 2 radek, 4 sloupec
A(r,s) = Rs/4 + Ls/(2*dt);
A(r,s+1) = Rs/4 + Ls/(2*dt);
B(r,s) = -Rs/4 + Ls/(2*dt);
B(r,s+1) = -Rs/4 + Ls/(2*dt);
r=2*(k+1)+e;
s=e;
    A(r,s) = Gk/4 + Ck/(2*dt);
A(r,s+1) = Gk/4 + Ck/(2*dt);
B(r,s) = -Gk/4 + Ck/(2*dt);
B(r,s+1) = -Gk/4 + Ck/(2*dt);

r=2*(k+1)+e;
s=1*(k+1)+e;
%subblok 3 radek, 2 sloupec

A(r,s) = C12k/(2*dt);
A(r,s+1) = C12k/(2*dt);
B(r,s) = C12k/(2*dt);
B(r,s+1) = C12k/(2*dt);

r=2*(k+1)+e;
s=2*(k+1)+e;
%subblok 3 radek, 3 sloupec

A(r,s) = -1/(2*dx);
A(r,s+1) = 1/(2*dx);
B(r,s) = 1/(2*dx);
B(r,s+1) = -1/(2*dx);

```

```

r=2*(k+1)+e;
s=3*(k+1)+e;
%subblok 3 radek, 4 sloupec
%zmena radku
r=3*(k+1)+e;
s=e;

A(r,s) = C12s/(2*dt);
A(r,s+1) = C12s/(2*dt);
B(r,s) = C12s/(2*dt);
B(r,s+1) = C12s/(2*dt);

r=3*(k+1)+e;
s=1*(k+1)+e;
%subblok 4 radek, 2 sloupec
A(r,s) = Gs/4 + Cs/(2*dt);
A(r,s+1) = Gs/4 + Cs/(2*dt);
B(r,s) = -Gs/4 + Cs/(2*dt);
B(r,s+1) = -Gs/4 + Cs/(2*dt);

r=3*(k+1)+e;
s=2*(k+1)+e;
%subblok 4 radek, 3 sloupec
%nic

r=3*(k+1)+e;
s=3*(k+1)+e;
%subblok 4 radek, 4 sloupec
A(r,s) = -1/(2*dx);
A(r,s+1) = 1/(2*dx);
B(r,s) = 1/(2*dx); %tady možná, ě, ěžná??Ě, Ě obr??Ě, Ě cen??Ě, Ě- znamenko
B(r,s+1) = -1/(2*dx); %zde taky možná, ě, ěžna
end

%okrajove podminky
A((k+1), (1))=1;
A((k+1), 2*(k+1)+1)=Rk_vstup;
A(2*(k+1), (k+1)+1)=1;
A(2*(k+1), 3*(k+1)+1)=Rs_vstup;
A(3*(k+1), (k+1))=1;
A(3*(k+1), 3*(k+1))=-Rk_vystup;
A(4*(k+1), 2*(k+1))=1;
A(4*(k+1), 4*(k+1))=-Rs_vystup;

```

```

AINV=inv(A);
B1=AINV*B;
in=1;
  for q=1:l %cyklus pres casove hladiny
    cas=q*dt; cast(q)=cas; %skutečný cas
    if cas<1.2e-6
      u0=8.33e9*cas;
    elseif cas>=1.2e-6
      if cas>101.2e-6
        u0=0;
      else
        u0=-1.0024590164e8*cas+10102.46;
      end
    end
    zdroj(q)=u0;
    uh=U0*sin(2*pi*f0*(cas));
    V=(B1*V)+(AINV(:,k+1)*(u0));
    %plneni U
    U(k+1,1)=uh;
    U(2*(k+1),1)=u0;
    V=(B1*V)+(AINV*U)
    if round(q/kt)==q/kt
      in=in+1;
      D(:,in)=V; %vysledna matice kam se zapisuji jednotlivé casove hladiny
      (vektory V)
    end
  end
  %%grafy za cyklem
  x=0:kt*dt:(in-1)*kt*dt; y=0:dx:L;
  figure;
  plot(cast,zdroj);

  figure; axes('FontSize',12); V=D(1:k+1,:);
  h=mesh(x,y,V); set(h,'edgecolor','black'); xlabel('t [s]'); ylabel('l [m]');
  zlabel('uk [V]');

  NAP_kab=D(1:k+1,:);
  max_Uk=max(max(NAP_kab))

  NAP_kab=D(1:k+1,:);
  min_Uk=min(min(NAP_kab))

  figure; axes('FontSize',12); V=D((k+2):2*(k+1),:);

```

```
h=mesh(x,y,V); set(h,'edgecolor','black'); xlabel('t [s]'); ylabel('l [m]');
xlabel('us [V]');

PROUD_kab=D((k+2):2*(k+1),:);
max_Ik=max(max(PROUD_kab))

PROUD_kab=D((k+2):2*(k+1),:);
min_Ik=min(min(PROUD_kab))

figure; axes('FontSize',12); V=D(2*(k+1)+1:3*(k+1),:);
h=mesh(x,y,V); set(h,'edgecolor','black'); xlabel('t [s]'); ylabel('l [m]');
xlabel('ik [A]');

NAP_sdel=D(2*(k+1)+1:3*(k+1),:);
max_Us=max(max(NAP_sdel))

NAP_sdel=D(2*(k+1)+1:3*(k+1),:);
min_Us=min(min(NAP_sdel))

figure; axes('FontSize',12); V=D(3*(k+1)+1:4*(k+1),:);
h=mesh(x,y,V); set(h,'edgecolor','black'); xlabel('t [s]'); ylabel('l [m]');
xlabel('is [A]');

PROUD_sdel=D(3*(k+1)+1:4*(k+1),:);
max_Is=max(max(PROUD_sdel))

PROUD_sdel=D(3*(k+1)+1:4*(k+1),:);
min_Is=min(min(PROUD_sdel))
```