

Vývoj softwarového zařízení pro výpočet a návrh přijímacích a vysílacích antén

Jan Prachař

Diplomová práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta Technologická

ABSTRAKT

Elektromagnetická kompatibilita se jako vědní disciplína zabývá otázkami nežádoucího ovlivňování funkce technických a biologických systémů působením elektrotechnického pole.

Pro měření intenzity elektrického pole se v příslušenství měřiče rušení používají některé druhy antén. Práce popisuje teoretický postup pro návrh Yagiho antény a zhotovení programu pro její optimalizaci, obsluhu tohoto programu a jeho praktické využití.

Electromagnetic compatibility (EMC) like of science discipline deal with questions undesirable interaction of function of technical and biological systems by the instrumentality of electrotechnic field.

For metering of intensity of electric field E in measurers accessories of disturbance man uses some sorts of aerals. This work describes a theoretical progress for proposal of Yagi antennae and fabrication programme for her optimalization, an operation of the programme and his practical usage .

Poděkování patří Ing. Jánovi Ivankovi, panu Ing. Marku Čandíkovi Ph.D., panu Stanislavu Nováčkovi za předané přínosné poznatky z oblasti elektromagnetické kompatibility a elektromagnetického pole. V neposlední řadě pak mým rodičům za morální a finanční podporu při studiu, Bc. Ondřeji Trochtovi za trpělivé školení v Matlabu, Davidu Padrůnkovi za pomoc s úpravou textů a některých obrázků v práci.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 14. 06. 2005

.....

jméno diplomanta

ÚVOD.....	5
I. TEORETICKÁ ČÁST	7
1 NÁVRH SOWTWAROVÉHO ZAŘÍZENÍ PRO NÁVRH PŘIJÍMACÍCH A VYSÍLACÍCH ANTÉN.....	8
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)	8
1.1.2 Základní dělení elektromagnetické kompatibility.....	8
1.1.3 Vznik elektromagnetického rušení z hlediska EMC	8
1.1.4 Dělení problematiky EMC	9
1.1.5 Klasifikace rušivých signálů	9
1.1.6 Normy pro EMC a jejich dělení	12
1.2 TEORIE VZNIKU A ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN	19
1.2.1 Vznik elektromagnetických vln	19
1.2.2 Polarizace elektromagnetické vln.....	20
1.2.3 Šíření elektromagnetických vln.....	20
1.3 ÚČEL A ROZDĚLENÍ ANTÉN	22
1.3.1 Dělení podle účelu použití.....	22
1.3.2 Jiná důležitá dělení antén	23
1.4 PARAMETRY ANTÉN	23
1.5 YAGIHO ANTÉNA	25
1.5.1 Konstrukční hledisko Yagiho antén	25
1.6 VOLBA METODY PRO OPTIMALIZACI YAGIHO ANTÉN.....	27
1.6.1 Momentová metoda.....	27
1.7 APLIKACE MOMENTOVÉ METODY PRO YAGIHO ANTÉNU	31
1.7.1 Drátový dipól.....	31
II. PRAKTICKÁ ČÁST	38
2. VYTVOŘENÍ PROGRAMU A JEHO OBSLUHA.....	39
2.1 PRAKTICKÉ PŘEDPOKLADY PRO PROVOZ YAGIHO ANTÉNY	39
2.2 POPIS PROGRAMU A JEHO OBSLUHY	46
2.2.1 Uživatelský formulář a jeho grafické zpracování.....	47
2.3 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ FUNKCE PROGRAMU	52
2.3.1 Zadání parametrů.....	52
2.3.2 Zobrazení charakteristik	53
8. SCHÉMA S OKÓTOVANÝMI ROZMĚRY	57
2.4 GRAFICKÁ ÚPRAVA ZOBRAZENÝCH CHARAKTERISTIK	57
2.4.1 Ikony grafického okna.....	58
2.4.2 Menu grafického okna.....	60
ZÁVĚR.....	64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
SEZNAM OBRÁZKŮ	68

ÚVOD

Rozvojem radiokomunikace vzniká problém s frekvenčním rozdělením pásem, ve kterých se vysílá a přijímá signál. Za pomoci vysílacích antén jsou vysílány vlny, ve kterých je kódována informace o určité frekvenci, a ty jsou přijímány přijímací anténou. Je tedy nutností antény navrhnout a sestavit tak, aby signál měl požadovanou kvalitu pro přenos a pro příjem.

Konstrukčně se přijímací a vysílací anténa liší z důvodu odlišných požadovaných vlastností. Na rozdíl od přijímacích antén, kde žádáme značnou směrovost v rovině svislé i v rovině vodorovné a nežádáme naprosto dokonalé impedanční přizpůsobení, u antén vysílacích nemusí diagram záření vykazovat výraznou směrovost v rovině vodorovné, ale často se objevuje požadavek na všesměrovost a požaduje se též dokonalé impedanční přizpůsobení. Ve svislé rovině však požadujeme většinou soustředění svazku.

Z hlediska principu jsou vysílací a přijímací antény totožná zařízení a lze je tedy využít pro vysílání.

Předmětem práce je zhotovení softwaru pro optimalizaci přijímacích a vysílacích antén a to konkrétně pro Yagiho antény. Tato anténa je ve většině případů koncipována jako přijímací a je nejrozšířenější anténou pro příjem metrových a decimetrových vln.

V době kdy ještě nebylo možno použít k návrhu a optimalizaci počítačů, byl návrh této antény velmi složitý. Výpočet parametrů jen nejjednodušších typů Yagiho antény trval i několik dnů a většinou se k získání požadovaných parametrů antény došlo experimentální cestou. Dnes je možno za pomoci vhodných numerických metod a počítačů sestavit algoritmus, který nám umožňuje nejen přesně vypočítat sledované parametry, ale též vykreslit jejich průběhy do grafů.

Zvolenou numerickou metodou pro výpočet parametrů je momentová metoda. Za její pomoci lze spočítat rozložení proudu na anténním vodiči, z něhož pak můžeme spočítat i ostatní důležité parametry.

Práce popisuje postup ke zhotovení algoritmu a jeho přepsání do programovacího jazyka. Následně pak obsluhu programu a možnosti pro grafickou úpravu grafů vypočtených charakteristik. Zabývá se také elektromagnetickou kompatibilitou, důležitou částí problematiky optimalizace antén, jakožto schopností vykazovat správnou činnost systému i v prostředí v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů a svou vlastní činností neovlivňovat své okolí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NÁVRH SOWTWAROVÉHO ZAŘÍZENÍ PRO NÁVRH PŘIJÍMACÍCH A VYSÍLACÍCH ANTÉN

Pro správnou funkčnost navržené antény je důležité, aby signál antény nebyl rušen činností jiných elektrotechnických zařízení, a sama svou činností neovlivňovala jiná elektrotechnická zařízení. Touto problematikou se zabývá vědní disciplína zvaná *elektromagnetická kompatibilita*.

1.1 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Je to samostatná vědecká disciplína která vznikla v šedesátých letech 20. století v USA. Jedná se o schopnost systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů a svou vlastní činností neovlivňuje své okolí. V češtině se používal název elektromagnetická slučitelnost.[15]

1.1.2 Základní dělení elektromagnetické kompatibility

a) *EMC biologických systémů*

Zabývá se vlivy rušivých a užitečných elektromagnetických signálů na živé organismy a celkovým elektromagnetickým pozadím našeho životního prostředí. Biologické účinky jsou závislé na charakteru elektromagnetického pole a na vlastnostech organismu.

b) *EMC technických systémů a zařízení*

Zabývá se vzájemným působením a koexistencí technických prostředků.

1.1.3 Vznik elektromagnetického rušení z hlediska EMC

a) *Přírodní* - slunce, kosmos, elektrické procesy v atmosféře

b) *Umělé* - zdroje, které vznikly lidskou činností tj. motory, spínače atd....

Ve skutečnosti se nikdy nejedná o působení rušení jednoho zdroje na jeden přijímač, ale jedná se o složitější vztahy několika navzájem se ovlivňujících systémů. Součet všech rušivých působení se nám potom projevuje různými způsoby, počínaje zhoršením kvality systémových parametrů přes částečné či úplné omezení systémové funkce až po havarijní, bezpečnostní či technologické stavy.[9]

1.1.4 Dělení problematiky EMC

- a) Elektromagnetická interference (EMI)* - zabývá se identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací přenosových cest.
- b) Elektrotechnická susceptibilita či imunita (EMS)* - vyjadřuje schopnost systému pracovat bez poruch a nebo s přípustným vlivem na prostředí, který je však přesně definovaný, v němž se objevuje rušení.

EMC se zabývá odstraňováním důsledků rušení, bez odstraňování příčin. Odstraňováním důsledků rušení je řešeno technickými opatřeními, které zvyšují elektromagnetickou imunitu zařízení.

1.1.5 Klasifikace rušivých signálů

Každý elektrotechnický systém můžeme považovat jako přijímač i zdroj elektromagnetického rušení.

Interferenční zdroje nebo-li zdroje elektromagnetického rušení - jsou to systémy u nichž převažuje proces generování rušivých signálů nad nežádoucím příjmem rušivých signálů. Klasifikace rušivých signálů může být provedena z několika hledisek.

Přírodní zdroje - vznikají bez vlivu člověka, většinou jim nelze zabránit, ale jen předcházet jejich následkům.

Umělé zdroje - vznikají lidskou technikou.

Funkční zdroje - jsou takové interferenční zdroje, které jsou základem funkce jednoho systému přitom mohou zasahovat do funkce jiného systému a být vůči němu rušivé.

Parazitní či nefunkční pole - ostatní zařízení produkující parazitní pole.

Dělení interferenčních zdrojů podle časového průběhu rušivého signálu:

Impulsní rušení - má charakter posloupnosti impulsů v čase.

Spojité rušení - je opakem impulsního. Je spojitý v čase a působí kontinuálně.

Kvazi-impulsní rušení - jedná se o kombinaci dvou předešlých rušení.

Posuzování zda je rušivý signál spojitý či impulsní může být někdy velmi problematické a bývá upraveno mezinárodní normou. U nás je to norma ČSN-EN 55014.

Úzkopásmové rušení - je produkováno užitečnými signály rozhlasových a televizních vysílačů.

Širokopásmové rušení - může být průběhu spojitého, impulsního, kvazi-impulsního a je součástí většiny tzv. průmyslových rušivých signálů. Ve své podstatě můžeme všechna přírodní rušení klasifikovat jako rušení širokopásmové.

Dělení z hlediska obsazení kmitočtového spektra a fyzikálního působení :

A) Nízkofrekvenční rušení - projevuje se dvojitým způsobem

a) Energetické úzkopásmové rušení

b) Akustické úzkopásmové rušení

a) Energetické úzkopásmové rušení

Nejvíce ovlivňuje funkci zařízení, která jsou závislá na tvaru napájecího napětí, protože způsobuje zkreslení napájecího napětí a odebíraného proudu energetických sítí. Působí na energetickou soustavu v pásmu kmitočtů od nuly do 2kHz.

Zdroj - každá nelineární zátěž napájecí sítě, která způsobí deformaci odebíraného proudu.

b) Akustické úzkopásmové rušení

Má negativní dopad na funkci přenosových systémů jako jsou telefony, rozhlas, komunikační a informační sestavy. Působí v pásmu do 10 kHz.

***Zdroj** - generují jej v podstatě všechny energetické zdroje, radary atd.*

B) Vysokofrekvenční neboli rádiové rušení - z každého interferenčního zdroje se šíří signál prostorem a zároveň i po napájecích či sdělovacích vedeních. Z hlediska zda převažuje jeden či druhý případ šíření rušení, dělíme interferenční zdroje:

a) Zdroje rušení šířených vedením

b) Zdroje rušení šířených vyzařováním.

C) Průmyslové zdroje rušení - rušivá napětí mají v napájecí energetické síti řadu podob a jejich projevem jsou různé deformace harmonického napětí 50 Hz.

D) Zdroje napěťového přepětí - dělíme je z hlediska původu na :

a) **Přírodní zdroje přepětí** - většinou bleskový výboj způsobí vznik elektromagnetického impulsu, který má rušivé někdy i destrukční účinky.

b) **Umělé zdroje přepětí** - jsou jimi prakticky všechna spínací zařízení.

Vzniklé přepětí je závislé na kvalitě součástek a na velikosti spínaného napětí a proudu. Všechna zařízení, kde dochází ke vzniku elektrického oblouku jsou nebezpečné zdroje přepětí.

E) Zdroje kontinuálního rušení - v praxi se většinou setkáváme a více obáváme průmyslového a přepěťového rušení, která nám ohrožují chod elektronického systému. Ohrozit správnou činnost mohou však také rušivé signály spojitého charakteru, které působí obvykle nepřetržitě nebo delší dobu.

Zdroj - televizní vysílače, radary atd....

F) Zvláštní zdroje rušení - zdroje rušení která se vyskytují vzácně.

Mezi hlavní zvláštní zdroje patří tzv. **nukleární elektromagnetický impuls**, jehož vznik je doprovodným jevem při jaderném výbuchu a jeho účinek je většinou destrukční pro všechna slaboproudá a silnoproudá zařízení, která se nachází v okolí. Dosah rušivého signálu je závislý na velikosti nálože a výšce exploze nad zemí.

Mezi další zdroje zvláštního záření řadíme tzv. **rušení mimozemského původu**. Vznik tohoto druhu rušení je spojen především s činností Slunce. To k nám na zem posílá vlivem erupcí ve fotosféře, protuberancí ve chromosféře a koronových výbojů tzv. sluneční vítr nukleárních částic, které se srážejí s ionty a molekulami zemské atmosféry a tím vytváří geomagnetické bouře. Ty způsobí silná elektromagnetická rušení v širokém pásmu kmitočtů.

Kosmické záření - tvoří rušivé pozadí a to zejména u velmi slabých signálů oblasti velmi vysokých kmitočtů.[1]

1.1.6 Normy pro EMC a jejich dělení

V rámci základního dělení celé problematiky EMC na oblast EMI a oblast EMS, lze normy rozdělit na tři skupiny :

1. *Normy zabývající se obecnou problematikou EMC; tzv. EMC Standards*
2. *Normy elektromagnetického rušení; tzv. Emission Standards*
3. *Normy odolnosti proti rušení; tzv. Immunity Standards*

Uvedené členění je jenom rámcové. Přesné dělení je komplikováno tím, že některé normy se týkají současně jak požadavku na rušení, tak i na odolnost vůči němu a patří tak do první i druhé skupiny. V současné době přitom vzniká a je každoročně schvalováno mnoho nových norem, a to ze všech tří výše uvedených tématických skupin.[9]

1. Všeobecné normy EMC (EMC Standards)

Řadíme zde **ČSN EN 50081** a **ČSN EN 50082**. Jedná se především o obecné normy. Jde o kmenové normy (*Generic Standards*) a stanovující všeobecné požadavky EMC, které mají splňovat jakékoli přístroje či elektrické spotřebiče určené k provozu v určitém prostředí.

V obou normách rozlišujeme:

- a) *prostředí obytná, obchodní a prostředí lehkého průmyslu*
- b) *prostředí průmyslová, příp. speciální.*

ČSN EN 50081 - Elektromagnetická kompatibilita – všeobecná norma týkající se vyzařování

Část 1 : Týká se prostorů obytných, obchodních a lehkého průmyslu. Jedná se tedy o místa která jsou charakterizována zejména tím, že jsou napájena přímo z veřejné napájecí sítě nízkého napětí. Účelem normy je stanovení mezních hodnot elektromagnetického vyzařování v kmitočtovém rozsahu 0 až 300 GHz a příslušných zkušebních metod. Příslušné meze vyzařování byly stanoveny tak, aby bylo zajištěno, že běžně generovaná rušení v prostorách specifikovaných normou nepřekročí úroveň, která by narušila činnost jiných běžných elektrických a elektronických přístrojů. Jednotlivé mezní hodnoty a požadavky na zkoušení jsou normou specifikovány pro každý vstup zařízení. Tato všeobecná norma EMC se používá jen v těch případech, kdy pro dané zařízení neexistuje výrobová norma EMC či norma EMC pro skupinu výrobků. Norma se přitom netýká přístrojů a zařízení určených pro vysílání elektromagnetických vln pro radiokomunikační účely.

Část 2 : Specifikuje požadavky na rušivé emise elektrických či elektronických zařízení, které jsou provozovány v tzv. průmyslovém prostředí. Toto prostředí je normou definováno jako prostory, které se vyznačují alespoň jednou z následujících charakteristik:

- a) *přítomnost průmyslových, vědeckých či lékařských přístrojů (PVL)*
- b) *časté spínání velkých indukčních nebo kapacitních zátěží*

c) přítomnost velkých proudů a s nimi spojených magnetických polí velké intenzity

Metodika zkoušek a použitelnost normy jsou shodné jako v předchozí Části 1. Normu lze použít opět jen v případě, že pro dané zařízení nejsou k dispozici kmenové normy, normy výrobku či normy skupiny výrobků. V případě, že zařízení nevyhovuje mezním hodnotám rušivých veličin definovaným normou ČSN EN 50081-2, musí být opatřeno sdělením, že v žádném případě nesmí být použito v prostorech obytných, obchodních a prostorech lehkého průmyslu.

ČSN EN 50082 - Elektromagnetická kompatibilita - všeobecná norma týkající se odolnosti

Část 1: Stanovují se zde požadavky na elektromagnetickou odolnost zařízení pracujících v obytných či obchodních prostorech, příp. prostorech lehkého průmyslu. Tuto všeobecnou normu lze však použít jen tehdy, když pro dané zařízení neexistují jednoúčelové normy výrobku, nebo skupiny výrobků.

Části 2: Norma **ČSN EN 50082**, tedy **ČSN EN 50082-2** navazuje na Část 1 a definuje požadavky na elektromagnetickou odolnost zařízení určených pro průmyslové prostředí a to jak vnitřní, tak i vnější. Přístroje, které nejsou ošetřeny touto částí normy, nejsou určeny pro přímé připojení do veřejné napájecí sítě. V normě je též uvedeno, že dominantní zdroje rušení je možno některými opatřeními omezit v průmyslových prostorech tak, že se vytvoří elektromagnetické prostředí, pro něž lze použít normu ČSN EN 50082-1 stejně jako pro prostory obytné, obchodní a prostory lehkého průmyslu.

2. Normy pro vysokofrekvenční elektromagnetické rušení (RFI Standards)

Tato oblast EMC je zakotvena v mezinárodních normách **CISPR 11** až **23**, které jsou postupně přebírány do evropských harmonizovaných norem rady **EN 55000**. Normy **CISPR** z této oblasti patří k vůbec nejstarším existujícím normám EMC. Vznik těchto norem je datován do padesátých let a byly původně koncipovány výhradně pro ochranu rádiového příjmu před rušením. Dnes však české normy zahrnují veškerou problematiku vysokofrekvenčního rušení.

ČSN EN 55011 - Meze a metody měření charakteristik elektromagnetického rušení od průmyslových, vědeckých a lékařských (PVL) vysokofrekvenčních zařízení

Odpovídá původní normě CISPR 11. Platí pro zařízení určená ke generování či využívání vysokofrekvenční energie pro průmyslová, elektrojiskrová zařízení a vědecké a lékařské účely.

Norma rozděluje elektrická zařízení PVL do dvou tříd:

Zařízení třídy A

Jedná se o elektrická zařízení vhodná k používání ve všech objektech kromě obytných prostorů (domácností), případně zařízení, která nejsou přímo připojena na rozvodnou síť nízkého napětí obytných budov. Mezní hodnoty rušení zařízení třídy A jsou tzv. **meze třídy A**. Pro zařízení, které sice nesplňuje meze třídy A, avšak nezpůsobuje nepřijatelné zhoršení veřejných radiokomunikačních služeb, může být jeho fungování povoleno příslušným kompetentním státním orgánem a výjimečně při provedení potřebných opatření může tento orgán rovněž povolit instalaci a provoz zařízení třídy A i v domácnostech nebo v provozu přímo připojeném na napájecí síť obytných budov.

Zařízení třídy B

Jedná se o zařízení vhodná k použití v objektech přímo připojených k rozvodné síti nízkého napětí napájející obytné budovy a v obytných objektech. Zařízení třídy B musí z hlediska elektromagnetického rušení vyhovovat tzv. **mezím třídy B**.

ČSN EN 55013 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného rozhlasovými a televizními přijímači a přidruženými zařízeními.

Odpovídá normě **CISPR 13**. Specifikuje mezní hodnoty rušivého napětí a rušivého elektromagnetického pole v pásmu 9 kHz až 18 GHz, vyzařovaného televizními i rozhlasovými přijímači a přidruženými zařízeními. Přidružená zařízení jsou přitom zařízení, která jsou určena buď k přímému připojení k televiznímu či rozhlasovému přijímači nebo k vytváření či reprodukci akustického či obrazového signálu. Norma se netýká zařízení informační techniky a to i v případě, že jsou připojena např. k televiznímu přijímači.

ČSN EN 55014 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného zařízením s elektrickým pohonem, tepelným zařízením pro domácnost a podobné účely, elektrickým nářadím a podobnými elektrickými přístroji.

Odpovídá mezinárodní normě **CISPR 14** a deklaruje svou obecnou platnost pro kmitočtový rozsah 9 kHz až 300 GHz. Příslušné mezní hodnoty rušivých napětí a vyzařovaných elektromagnetických polí jsou však specifikována jen v pásmu 150 kHz až 300 MHz, a to pro následující skupiny výrobků:

- zařízení pro domácnost poháněná elektrickým motorem (bílá elektronika apod.);
- elektrické nářadí napájené přímo ze sítě nebo přes transformátor (přenosné ruční vrtačky, elektrické pily, nože, nůžky a řezačky, apod.);
- lékařská zařízení poháněná elektrickým motorem (zubní vrtačky, pily, nože, apod.);
- zemědělské elektrické stroje a přístroje (dojicí zařízení, sekačky trávy apod.);
- elektrická vyhřívací zařízení (elektrické sporáky, varné pánve, desky a konvice, stolní grily, ohřívače jídla, kávovary, sterilizátory, žehlicí stroje, apod.);
- hrací, prodejní a zábavní automaty (hrací skříně, hrací stroje, video automaty apod.);
- motorové elektrické hračky (vláčky, auta, roboty apod.);
- různé přístroje a elektrická zařízení, např. časové spínače, elektrické zapalovače plynu, elektrostatické čističe vzduchu, nabíječe, usměrňovače, měniče apod.

ČSN EN 55015 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného elektrickými svítidly a podobným zařízením.

Odpovídá normě **CISPR 15**. Je platná pro rušivá napětí a rušivá pole v kmitočtovém rozsahu 9 kHz až 400 GHz způsobená následujícími druhy zařízení:

- svítidla připojená na rozvodnou síť nízkého napětí nebo na baterii včetně pomocných zařízení

- vnitřní dopravní osvětlení (v automobilech, autobusech, vlacích apod.) a venkovní pouliční osvětlení
- zdroje ultrafialového či infračerveného záření

ČSN EN 55022 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení zařízením informační techniky

Odpovídá normě **CISPR 22**. Zabývá se postupy měření elektromagnetického rušení generovaného zařízením informační techniky v kmitočtovém pásmu 9 kHz až 300 GHz, přičemž specifikuje meze tohoto rušení v pásmu 0,15 MHz až 1000 MHz. Podle této normy je za zařízení informační techniky (**ITE – Information Technology Equipment**) považováno libovolné zařízení:

- a) jehož prvotní funkcí je vstup, ukládání, zobrazování, vyhledávání, zpracování, propojování nebo řízení datových a telekomunikačních zpráv nebo jejich kombinací a může být vybaveno jedním nebo více koncovými porty typickými pro přenos informací***
- b) Se stanoveným vstupním napětím nepřesahujícím 600 V***

Toto vymezení zahrnuje např. veškerá zařízení pro zpracování dat, kancelářské stroje, obchodní elektronická zařízení a telekomunikační zařízení. Norma se nevztahuje na žádné zařízení nebo část zařízení ITE, jehož prvotní funkcí je rádiové vysílání nebo příjem dle Radiokomunikačního řádu ITU.

3. Normy pro elektromagnetickou odolnost (Immunity Standards)

Do této skupiny patří především harmonizované české normy řady **ČSN EN 61000-4**, které jsou ekvivalentní výchozím mezinárodním normám rady **IEC 1000-4**. Uvedená řada norem specifikuje požadavky na odolnost vůči elektromagnetickému rušení a jednotlivé normy mají charakter základních norem (Basic Standards). Rada **ČSN EN 61000-4** pod společným názvem „**Elektromagnetická kompatibilita – zkušební a měřicí technika**” obsahuje řadu oddílů, tj. norem podrobně popisujících jednotlivé typy zkoušek odolnosti.

ČSN EN 61000-4-1 Přehled zkoušek odolnosti

Poskytuje celkový přehled existujících zkoušek odolnosti včetně jejich stručného popisu. Norma uvádí všeobecný návod a doporučení pro volbu vhodné zkoušky odolnosti a jejího použití s ohledem na zkoušené zařízení a podmínky jeho použití (místo použití, předpokládaná úroveň rušení v tomto místě, požadovaný stupeň odolnosti a další).

ČSN EN 61000-4-2 Elektrostatický výboj – zkouška odolnosti

Obsahuje metodiku testu a vyhodnocování chování elektronických zařízení a systému při působení elektrostatických výbojů (ESD). Úroveň elektromagnetické odolnosti ESD se dle této normy volí podle pracovního prostředí a provozních podmínek zkoušeného zařízení. Preferovanou metodou zkoušky ESD je zkouška kontaktním výbojem. Zkouška vzduchovým výbojem se provádí tam, kde nelze realizovat kontaktní výboj.

ČSN EN 61000-4-3 Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – zkouška odolnosti

Určuje metody zkoušek elektromagnetické odolnosti elektronických zařízení vůči spojitým elektromagnetickým polím vyzařovaným v kmitočtovém pásmu 80 - 1000 MHz. Jde tedy o zkoušky odolnosti vůči vyzařování např. ručních (přenosných) vysílačů, ale i stabilních vysílacích stanic, rozhlasových, televizních a vozidlových vysílačů, mobilních radiotelefonů i různých průmyslových zdrojů vysokofrekvenčních signálů.

ČSN EN 61000-4-6 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Definuje metodiku testování elektromagnetické odolnosti, parametry testovací aparatury a stupně přísnosti pro zařízení, která jsou rušena signály šířícími se po napájecích a signálových vedeních a zemnicích spojení. Cílem těchto zkoušek je stanovit anténní efekty kabelů připojených ke zkoušenému objektu. Zdrojem těchto rušivých signálů jsou úmyslné vysokofrekvenční vysílače v kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 80 MHz. Norma se netýká zařízení, která nemají alespoň jeden vodivý kabel (síťový přívod, signální či zemnicí vedení), který může způsobit vazbu zařízení na vf. rušivá pole. Při vlastní zkoušce odolnosti je zkušební signál amplitudově modulován sinusovou vlnou 1 kHz do hloubky 80 %. Zdrojem tohoto zkušebního signálu je vysokofrekvenční signální generátor s parametry definovanými normou. Generátor se

připojuje ke zkoušenému zařízení jedním z 11 typů vazebních obvodů specifikovaných rovněž v této normě.

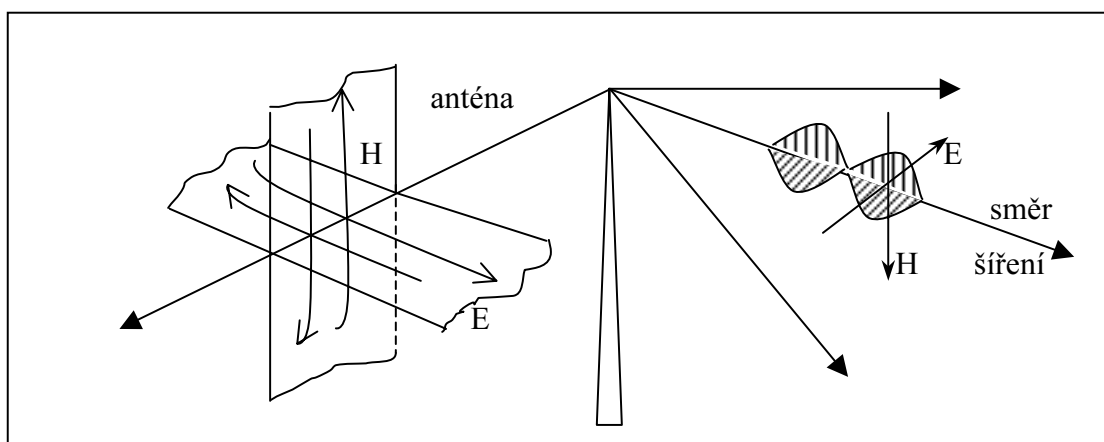
ČSN EN 61000-4-11 *Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí – zkoušky odolnosti*

Specifikuje metodiku a provedení zkoušek odolnosti zařízení, která mohou být citlivá na krátkodobé poklesy a krátká přerušení napájecího síťového napětí. Norma obsahuje rovněž návod pro optimální výběr zkušebních úrovní podle průměrné doby trvání poruch a četnosti jejich výskytu v místě instalace zkoušeného zařízení.[16]

1.2 Teorie vzniku a šíření elektromagnetických vln

1.2.1 Vznik elektromagnetických vln

Prochází-li anténou střídavý proud, vzniká v prostoru kolem antény střídavé elektromagnetické pole mající elektrickou složku E a magnetickou složku H , které jsou navzájem kolmé a obě jsou kolmé ke směru šíření (obr.1.)



Obr.1. Elektromagnetické pole vysílací antény ve vzdálenosti přesahující několikánásobek délky vlny, polarizace je vodorovná

Elektromagnetická energie z antény se šíří atmosférou jako postupné elektromagnetické vlnění rychlosti světla do různých směrů a to v závislosti na konstrukci antény. Pro televizní kmitočty v oblasti od 50Mhz se nezajímáme o tzv. **blízké pole**.

Blízké pole - Nachází se ve vzdálenosti několika vlnových délek od vysílací antény. V tomto poli (indukčním) nejsou složky E a H ve fázi a jejich velikost je nepřímo úměrná vyšším mocninám vzdálenosti od antény.

Zářivé pole - Nachází se ve větší vzdálenosti tam, kde jsou složky E a H za předpokladu dokonalého dielektrika vzájemně ve fázi, jsou spolu vázány, tak že jedna složka podmiňuje druhou. Jejich velikost je nepřímo úměrná vzdálenosti od antény.

Ve větší vzdálenosti od vysílací antény můžeme kulové vlnoplochy, které mají stejnou fázi složek vlnění, považovat v prostoru za **rovinné vlny**.

Vzdálenost mezi dvěma sousedními místy se stejnou okamžitou hodnotou intenzity pole se nazývá **délka vlny** a je určena rovnicí.

$$\lambda = 300 / f \quad [\text{m}; \text{MHz}] \quad (1)$$

1.2.2 Polarizace elektromagnetické vlny

Intenzitu elektromagnetického vlnění hodnotíme v určitém místě od vysílací antény intenzitou elektrické složky E [mV/m], a to její efektivní hodnotou.

Intenzita elektrického pole - je potencionální rozdíl ve směru největšího gradientu napětí.

Polarizace vlnění - určuje polohu vysílacího a přijímacího dipólu, přesto že se může při šíření vln polarizační rovina stáčet.

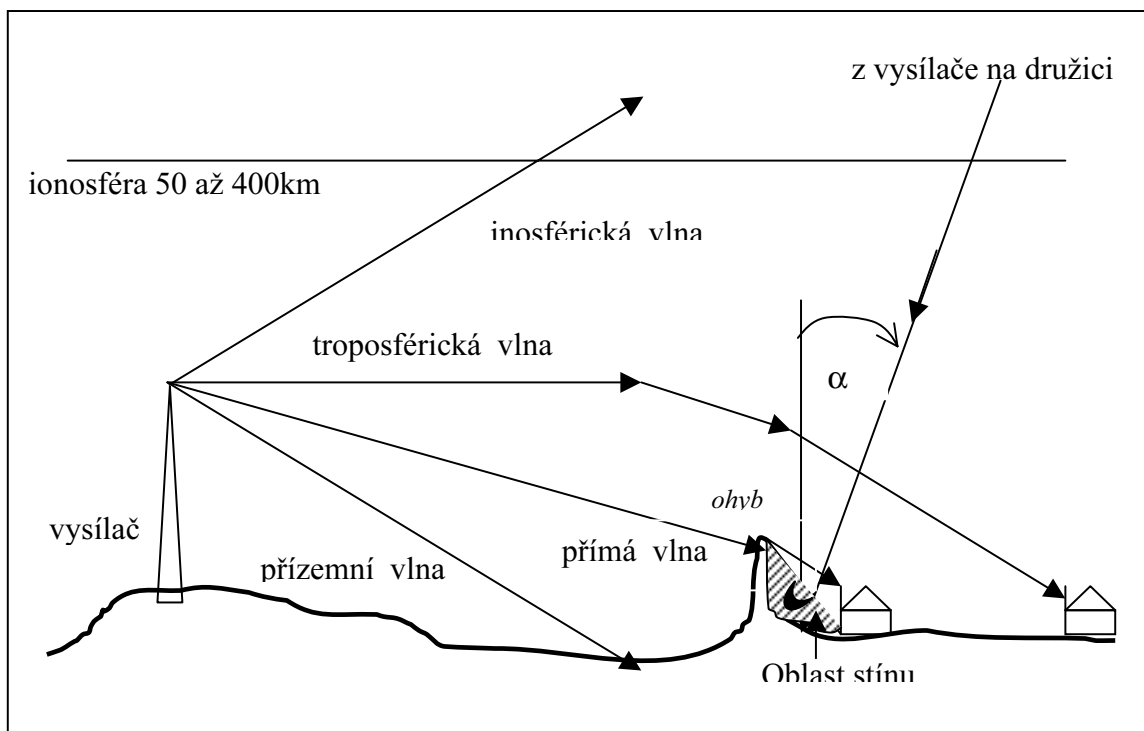
Silové čáry elektrického pole leží v rovině proložené dipólem. Při vodorovně umístěném dipólu jsou elektrické silové čáry rovnoběžné s dipólem. Tomuto jevu se říká, že **elektromagnetické vlnění je polarizováno vodorovně**.

Při svisle umístěném dipólu mluvíme o **svislé polarizaci**.

1.2.3 Šíření elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlny televizní se od rozhlasových vln liší tím, že televizní vlny pronikají **ionosférou** (vodivé vrstvy atmosféry ionizované ultrafialovým slunečním zářením) a jen ve vyjimečných případech se televizní vlna šíří po odrazu od ionizovaných vrstev, které se vlivem slunečního záření vytvoří v nízkých vrstvách atmosféry. Za normálních podmínek je však ionosférická vlna, která se šíří nahoru do prostoru pro

televizní příjem ztracena (obr.2.). Z tohoto důvodu musí vysílače vyzařovat el.mag. energii jen ve vhodných vertikálních diagramech. Čím větší kmitočet vlnění má, tím lépe proniká ionosférou.



Obr.2. Různé druhy šíření elektromagnetických vln z vysílací antény na přijímací anténu

Přízemní vlna se šíří vlivem rozdílné permitivity terénu vzhledem k permitivitě vzduchu podél povrchu (povrchová vlna) má v televizních kmitočtech krátký dosah. Velmi rychle zaniká a to tím na kratší vzdálenosti, čím má vyšší kmitočet.

Přímá vlna se nejvíce uplatní při televizním příjmu a její dosah lze zvětšit dvěma způsoby:

a) *Postupným lomem ve vrstvách troposféry a různými indexy lomu*

b) *ohybem na ostré překážce*

Za překážkami vznikají díky ohybu vln místa, oblasti stínů, kde nelze signál přijmout pozemskými vysílači. Lom a ohyb jsou závislé na kmitočtu a jsou tím menší čím

vyšší je kmitočet. Televizní vlny vyzářené vysílací anténou nedopadají na přijímací anténu jen jako přímé, ale i odražené od země. Je to způsobeno vlivem terénu, který považujeme pro jednodušší počítání za hladký, nerozptylující a s dokonalým odrazem. Současným působením vlny přímé a odražené od země vzniká v jistém úseku od vysílací antény oscilační pole (*intenzita zde kolísá mezi minimy a maximy*).

Odražená vlna se odráží od překážek mající rozměry porovnatelné s délkou vlny. Tyto překážky většinou tvoří lesy, hory, domy atd. Při větším rozdílu v. dráze přímé a odražené vlny se na televizním přijímači projeví jako zdvojení obrazu (tzv. duchy). Odraz nám však může zaručovat kvalitní příjem tam, kde je přímá vlna podstatně slabší než vlna odražená, která přichází z jiného směru. Rušivý obraz se na stínítku televizního přijímače projeví jako pozitivní nebo negativní obraz toho zda přímá a odražená vlna se setkávají ve fázi stejné či opačné.[2]

1.3 Účel a rozdělení antén

1.3.1 Dělení podle účelu použití

Základním dělení antén je podle účelu použití :

a) Vysílací

b) Přijímací

a) Vysílací antény

Antény přijímací a vysílací jsou principiálně shodné. U vysílacích hraje významnější roli přenášený – vysílaný výkon, což se projevuje především na robustnosti provedení a snahou o co nejlepší výkonové přizpůsobení. Podle antény zapojené pro vysílací účely posuzujeme také veličiny na přijímací anténě, neboť veličiny jsou pro příjem i vysílání totožné. Tato zaměnitelnost však neplatí pro aktivní přijímací antény, neboť ty mají ve svém vybavení ještě zesilující prvek.

b) Přijímací antény

Přijímací anténa převádí elektromagnetické vlnění na elektrickou energii v podobě elektrického proudu a napětí, které lze odebírat z anténních svorek vysokofrekvenčním vedením. Toto vedení (nazývané též anténní svod) má vžitý název **napáječ**.

1.3.2 Jiná důležitá dělení antén

Hlavní rozdělení u antén spočívá v tom, zda-li přijímané vlny vytvoří v anténě **postupnou nebo stojatou vlnu napětí a proudu**.

1) V anténách s **postupnou vlnou** se objevuje postupně v každém jejich místě střídavý proud o velikosti od nuly do maximální hodnoty. Délka těchto antén není přesně určena délkou přijímací vlny.

2) U antén se **stojatou vlnou** (tedy u převážné části antén) je rozložení střídavého proudu a napětí takové, že jednotlivá místa mají podél antény různou rozdílnou ale tutéž amplitudu. Tato hodnota se mění podle místa od nuly (uzlu) až do maximální hodnoty (kmitny). Délka antény je závislá na délce přijímací vlny.

Antény se stojatou vlnou dělíme podle konstrukce na **půlvlnné** a **celovlnné** dipóly.

Z pravidla je sdružujeme do soustav které jsou **podélné** nebo **příčné** popř. **kombinované**.

Rozeznáváme též antény **individuální** či **společné** (pro větší množství účastníků) z hlediska připojení televizního přijímače.[3]

1.4 Parametry antén

Funkční vlastnosti antén lze charakterizovat několika veličinami.

Nejdůležitější jsou:

- a) **směrnost**
- b) **činitel zpětného příjmu**
- c) **zisk**
- d) **impedance**

a) Směrnost

Anténa, která přijímá signál z jednoho směru lépe než z jiných směrů, se nazývá směrová anténa. Použitím takové antény je možné vliv nežádoucího signálu podstatně omezit, nebo ho úplně odstranit. Směrové vlastnosti antény se nejčastěji znázorňují diagramem poměrné směrnosti. V něm je graficky znázorněna velikost napětí na svorkách antény v závislosti na úhlu, pod kterým dopadá na anténu rovinná vlna s konstantní intenzitou.

V rovině kolmé na dipól přijímá dipól všesměrově - směrový diagram je kružnice. V rovině dipólu záleží na úhlu, pod nímž vlna na dipól dopadá. Nejvyšší napětí na svorkách dipólu je, dopadá-li vlna kolmo na dipól.

Přidáním dalších prvků k dipólu je možné směrový diagram výrazně ovlivnit a zlepšit směrnost antény. Směrový diagram se přitom rozpadne na hlavní lalok a na laloky postranní.

b) Činitel zpětného příjmu

Činitel zpětného příjmu je poměr napětí na svorkách antény při příjmu ve směru hlavního maxima k napětí při příjmu ve směru maxima největšího postranního laloku v zadní části směrového diagramu. Při konstrukci antén nejvíce ovlivňuje velikost činitele zpětného příjmu počet správně nastavených reflektorů nebo odrazová stěna. Při spojení dvou nebo více antén do anténní soustavy se činitel zpětného příjmu anténní soustavy v porovnání s osamocenou anténou téměř nezmění.

c) Zisk

Zisk antény udává, kolikrát větší napětí dodá na své svorky anténa přijímající ve směru svého hlavního maxima v porovnání s referenční anténou. Obvyklou referenční anténou v pásmu decimetrových vln je normalizovaný půlvlnný dipól. Někdy se používá také izotropní (všesměrový) zářič nebo elementární dipól.

d) Impedance

Poměr napětí k proudu na svorkách antény se nazývá vstupní impedance antény. Velikost impedance je významná, neboť má vliv na přizpůsobení antény k napájecí, tzn. že pro max. přenos vysokofrekvenční energie z antény do přijímače je třeba zajistit, aby vlnová impedance antény byla stejná jako vlnová impedance přijímače. Impedance antény je obecně komplexní, skládá se z reálné části (činný odpor) a z imaginární části (jalových složek). Je-li např. dipól v rezonanci, má impedanci čistě reálnou. Je-li dipól poněkud delší než $l/2$, má jalová složka indukční charakter. Je-li dipól kratší než $l/2$, má jalová složka charakter kapacitní. Z požadavku přizpůsobení vyplývá, že je žádoucí, aby výsledná impedance antény byla čistě reálná. Ideální tenký půlvlnný dipól umístěný ve volném prostoru má impedanci $73,13 \text{ } \Omega$. Volbou počtu vodičů, jejich vzdálenosti a poměrem jejich tloušťek lze měnit vstupní impedanci dipólu v širokých mezích.[3]

1.5 Yagiho anténa

V praktické části se zabýváme výpočty pro získání parametrů Yagiho antény, která pro svoji konstrukční jednoduchost a robustnost je nejpoužívanější anténou pro VKV, FM a všechna televizní pásma.

Anténa nese jméno po svém objeviteli profesoru Yagim, který v roce 1926 zveřejnil část výpočtu dvouprvkové antény. Výpočet však nedokončil. Počty prvků, rozteče a délky se stanovují většinou experimentálně podle empirických vzorců a speciálních přístrojů. Jenom návrh tříprvkové antény trval v dřívějších dobách dvěma zkušeným technikům nejméně 400 hodin. Dnes díky výpočetní technice a numerickým metodám je možné modelovat a optimalizovat Yagiho anténu na PC.[3]

1.5.1 Konstrukční hledisko Yagiho antén

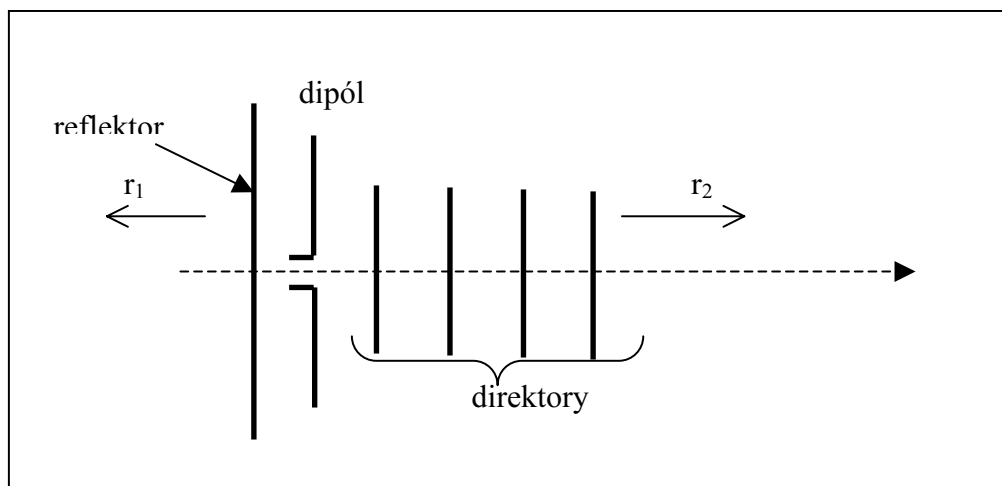
Yagiho anténa se stala jednou z nejrozšířenějších antén v pásmu metrových a decimetrových vln.

Z hlediska praktické konstrukce a dobrým parametrům je hojně používána.

Je to soustava dipólů v řadě za sebou s podélným vyzařováním.

Má jeden aktivní prvek, který je galvanicky napájený (dipól), který většinou pracuje ve čtvrtvlnné rezonanci. Zbylé pasivní prvky jsou napájeny vyzařovaným vlněním,

to se v nich indukuje z aktivního prvku a to zpětně ovlivňuje celou vyzařovací charakteristiku antény. Jeden pasivní prvek má délku větší než je délka aktivního prvku. Je umístěn vzadu a nazývá se **reflektor**. Ostatní pasivní prvky jsou kratší než aktivní prvek a jsou umístěny před ním. Tyto prvky se nazývají **direktory** (obr. 3.)



Obr.3. Yagiho anténa

Zisk antény bývá dle počtu direktorů v rozmezí od 10 do 15 dB.

Je-li anténa správně vyladěna, reflektor zeslabuje tok energie ve směru r_1 a první direktor zesiluje tok energie ve směru r_2 a vytváří se příznivé podmínky pro vybuzení druhého direktoru. Ten pak vytváří příznivé podmínky pro vybuzení třetího direktoru atd.

Takhle je direktory vytvořen jakýsi vlnovodný kanál, ve kterém rozložená energie postupuje od aktivního prvku k nejvzdálenějšímu direktoru, kde se částečně odráží.

Celkové výsledné pole ve vlnovodném kanálu je dáno superpozicí postupné a odražené vlny.

Jsou-li direktory správně seřizeny je amplituda odražené vlny na posledním direktoru velmi malá. Yagiho anténa vykazuje potom podobné vlastnosti jako anténa s postupnou vlnou s přizpůsobenou zátěží na konci. Rozdíl od obyčejných antén s postupnou vlnou je v tom, že rozložení proudu u Yagiho antén nemusí být dáno superpozicí jedné postupné a jedné odražené vlny, ale obecně může být popsáno součtem několika postupných a několika odražených vln. Jednotlivé postupné a jednotlivé odražené vlny mají rozdílné konstanty šíření. [4]

1.6 Volba metody pro optimalizaci Yagiho antén

Konstrukční parametry antény pro určitou frekvenci nebo pásmo se většinou získávají experimentálně podle empirických vzorců a speciálních přístrojů. Lze však použít numerické metody, pomocí níž je možné modelovat a optimalizovat Yagiho anténu na PC. Základním principem pro získání parametrů antény je použití Maxvelových rovnic. Jejich použití je však značně komplikované.

Program pro optimalizaci antén je řešen z hlediska matematického *momentovou metodou*. Výsledkem této metody je zjištění rozložení proudu na dipólu, refraktoru a direktorech. Známe-li rozložení proudu na anténním vodiči, lze poměrně snadno vypočíst všechny důležité technické parametry antén.

1.6.1 Momentová metoda

Při určování proudového rozložení, je třeba řešit integrální rovnice a za pomoci této metody si zjednodušíme tyto rovnice na rovnice lineární. Momentová metoda je numerická metoda pro řešení integrálních rovnic. Podstata metody spočívá v diskretizaci struktury, ve formální aproximaci hledané funkce pomocí známých báзовých funkcí a neznámých aproximačních koeficientů, v dosazení aproximace do výchozího vztahu, v minimalizaci chyby aproximace a v řešení výsledné maticové rovnice. Výsledkem řešení dostaneme aproximační koeficienty a tedy i aproximaci řešení a hledané funkce v integrandu integrální rovnice.

Momentová metoda

Máme obecnou integrální rovnici ve tvaru

$$\int_a^b f(z, \xi) d\xi = g(z) \quad (2)$$

kde.... f je neznámá funkce (v našem případě rozložení proudu na anténě)

.... $< a, b >$ je analyzovaná oblast

.... g je známá funkce, popisující působení zdrojů

Při momentové metodě se řešení rovnice děje v následných krocích:

A) Neznámou funkci f aproximujeme pomocí lineární kombinace známých **bázových** funkcí f_n a neznámých koeficientů c_n

$$f \approx \tilde{f} = \sum_{n=1}^N c_n f_n \quad (3)$$

Bázové funkce mohou být dvojí povahy - **globální**

- **lokální**

Globální bázové funkce jsou definovány přes celou analyzovanou oblast $\langle a, b \rangle$

Například soustava funkcí

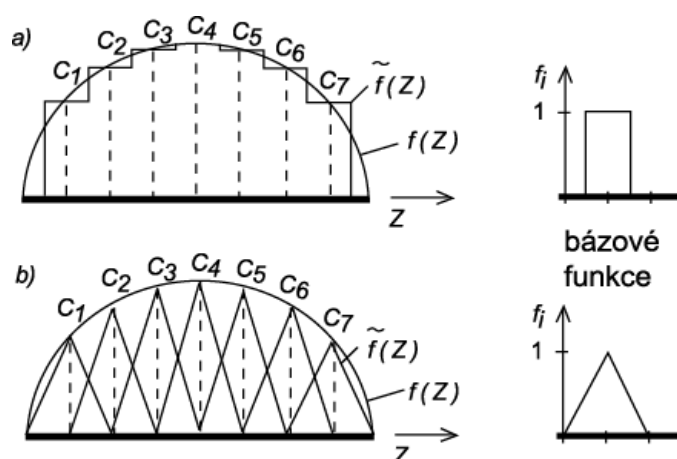
$$f_n(z) = \cos(\pi n z / h) \quad (4)$$

je lineárně nezávislá na $\langle a, b \rangle$ a koeficienty c_n zde mají význam Fourierových koeficientů.

$$f \approx \tilde{f} = \sum_{n=1}^N c_n f_n = \sum_{n=1}^N c_n \cos(\pi n z / h) \quad (5)$$

Jednobázová aproximace je taková aproximace, která je založená na globálních bázových funkcích.

Lokální bázové funkce jsou též definovány přes celou analyzovanou oblast, ale jen v určité oblasti nabývají nenulové funkční hodnoty (obr. 4). Pokud se jejich funkční hodnota mění od nuly do jedničky mluvíme o tom, že jsou bázové funkce normovány a koeficienty c_n pak mají význam uzlových hodnot (vzorků) hledané funkce f (obr.4).[5]



Obr.4. Vícebázová aproximace: a) po částech konstantní

b) po částech lineární

Vícebázová aproximace je aproximace založená na lokálních báзовých funkcích.

B) Aproximaci hledané funkce $f \sim$ dosadíme zpět do řešené rovnice. Neznáme však koeficienty c_n , proto se jedná pouze o formální aproximaci. Vztah je jednou rovnicí pro N neznámých koeficientů c_n .

$$\sum_{n=1}^N c_n \int_a^b f_n(z, \xi) d\xi = g(z) + Rz \quad (6)$$

kde.... $R(z)$ je tzv. reziduum

Reziduum vyjadřuje že aproximace není přesným řešením této rovnice.

Reziduum minimalizujeme metodou vážených reziduí. Je-li R minimální, získáme nejpřesnější aproximaci řešení.

Součin vhodné **váhové funkce** w a **rezidua** R , integrovaný přes analyzovanou oblast $\langle a, b \rangle$ musí být nulový.

Použijeme-li postupně N různých váhových funkcí při váhování, získáme soustavu N lineárních rovnic pro N_{cn}

$$\int_a^b w_m(z) R(z) dz = 0 \quad m = 0, 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N c_n \int_a^b w_m(z) \int_a^b f_n(z, \xi) d\xi dz = \int_a^b w_m(z) g(z) dz \quad (8)$$

Důležitou podmínkou je lineární **nezávislost váhové a báze funkce na intervalu** $\langle a, b \rangle$

Váhové funkce

Mezi nejčastěji používané přístupy k minimalizaci rezidua patří : - kolokační metoda
- metoda Galerkinova

Kolokační metoda využívá k váhování Diracovy impulsy, umístěné do bodů, v nich počítáme hodnoty neznámého proudového rozložení.

$$w_m(z) = \delta(z - z_m) \quad (9)$$

Díky filtrační vlastnosti Diracových impulsů je jedna integrace eliminována.

$$\sum_{n=1}^N c_n \int_a^b f_n(z, \xi) d\xi = g(z) \quad (10)$$

Minimalizace rezidua je však vztažena pouze k bodům z_m . To jsou ty body do nichž jsou umístěny váhovací impulsy.

Galerkinova metoda využívá k váhování funkce, které jsou identické s funkcemi báze.

$$w_m(z) = f_m(z) \quad (11)$$

Tato metoda vykazuje vyšší výpočetní nároky v porovnání s metodou kolokační.

Rozdíl je, že v případě Galerkinovy metody k eliminaci jednoho integrování nedochází. [8]

1.7 Aplikace momentové metody pro Yagiho anténu

Yagiho anténa je složená ze třech prvků. Aktivní dipól, reflektor, direktor. V teoretické části je popsáno použití momentové metody pro aktivní dipól, který už sám o sobě je jednoduchou anténou. V praktické části se pak budeme zabývat výpočtem parametrů na celé Yagiho anténě.

1.7.1 Drátový dipól

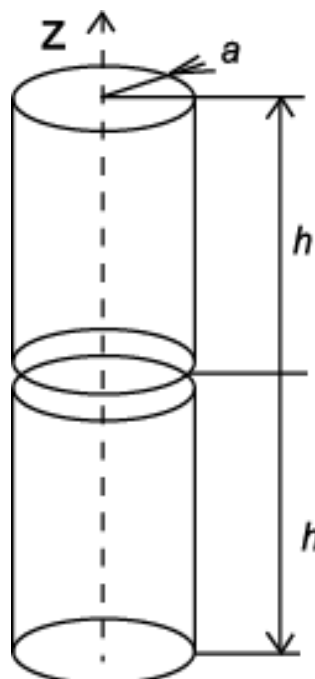
Zavádím předpoklady pro výpočet drátového dipólu:

Anténa je tvořena kruhovým válcem o poloměru a

Anténa je dlouhá $2h$. Osa anténního vodiče je umístěna do osy z válcového souřadného systému (r, r, z).

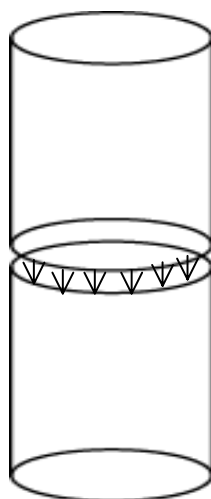
Anténa se nachází ve vakuu ($\mu = \mu_0, \epsilon = \epsilon_0, \sigma = 0$)

Všechny možné ztráty jsou nulové.



Obr.5. Drátový dipól rozměry

Uprostřed anténního vodiče ($z = 0$) budeme uvažovat krátkou štěrbinu, která je připojena k hypotetickému harmonickému zdroji, který vytváří rotačně souměrné budící pole (obr. 5).

*Obr.6. Budící elektrické pole ve vstupní štěrbině*

Napětí ve štěrbině lze pak popsat vztahem

$$V = - \int_{gap} E_z dz \quad (12)$$

...kde... E_z , ve vztahu značí z-ovou složku intenzity budícího elektrického pole ve štěrbině, a tedy i na (válcovém) povrchu této krátké části antény.

Zavádí se předpoklad, že toto napětí je rovno jednomu voltu.

Mimo štěrbinu se E_z rovná nule.

Jedná se však jen o ten případ, kdy je předpoklad dokonalé elektrické vodivosti vodiče antény.

Elektromagnetické pole lze popsat pomocí skalárního potenciálu J a vektorového potenciálu A (popisuje působení proudů na anténě). [7]

$$\frac{\partial^2 A_z(z)}{\partial z^2} + k^2 A_z(z) = -\mu_0 J_z(z) \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi(z)}{\partial z^2} + k^2 \varphi(z) = -\frac{\rho(z)}{\epsilon_0} \quad (14)$$

Kde J_z z-ová složka proudové hustoty [$A \cdot m^{-2}$] vnucená anténě zdrojem

.... ρ objemová hustota náboje [$C \cdot m^{-3}$] na anténním vodiči

.... A_z z-ová složka vektorového potenciálu

.... φ skalární potenciál

$k=2\pi/l$ značí vlnové číslo a l vlnovou délku

Elektrony na anténě se chovají podle periody napájecího napětí.

V první periodě přitékají elektrony do antény (proud) a hromadí se na anténním vodiči jako náboj. V druhé polovině periody náboje odtékají zpět do zdroje z konců anténního vodiče. Podmínka kontinuity – zajistí provázání náboje a proudu na anténě.

$$\partial J_z(z) / \partial z + j\omega \rho(z) = 0 \quad (15)$$

Platí-li podmínka, že $a \ll l$, kde a poloměr anténního vodiče mnohem

... l vlnová délka

potom je předpoklad, že proudy a náboje jsou soustředěny na ose vodiče.

Řešením soustavy (13,14), dostáváme

$$A_z(z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{\Omega_h} I_z(\xi) \frac{e^{[-jkR(z,\xi)]}}{R(z,\xi)} d\xi \quad (16)$$

$$\varphi(z) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{\Omega_h} \sigma(\xi) \frac{e^{[-jkR(z,\xi)]}}{R(z,\xi)} d\xi \quad (17)$$

kde $I_z(x)$ proud [A] tekoucí v ose anténního vodiče

.... $s(x)$ délková hustota náboje [C.m⁻¹] na ose anténního vodiče

.... $R(z,x)$... vzdálenost mezi pozicí x zdroje pole $I_z(x)$ a $s(x)$

.... z místo, v něm počítáme potenciály $A(z)$ a $j(z)$.

[7]

Známe-li potenciály $A(z)$ a $j(z)$, můžeme vypočítat intenzitu vyzařovaného elektrického pole.

$$E_z^s(z) = -j\omega A_z(z) - \partial\varphi(z)/\partial z \quad (18)$$

Rozložení proudu na anténě určíme řešením soustavy (16,17)

Elektrická intenzita musí splňovat okrajovou podmínku na povrchu vodiče

Okrajová podmínka je vyjádřena vztahem

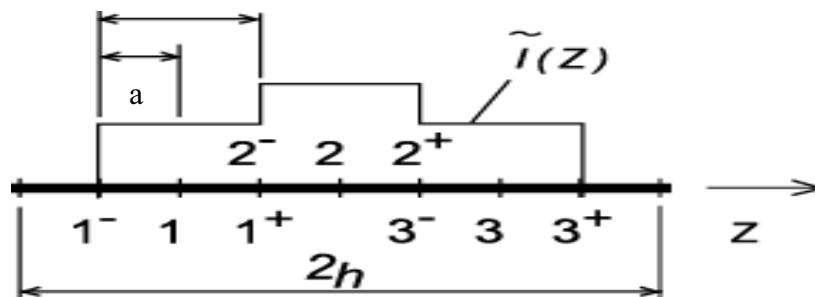
$$E_z^i + E_z^s = 0 \quad (18b)$$

...kde E_z^i ... z-ovou složka vektoru elektrické intenzity dopadající vlny.[5]

Vzdálenost mezi zdroji pole (na ose) a místy pozorování (na povrchu vodiče) můžeme vyjádřit vztahem 13.[11]

$$R(z,\xi) = \sqrt{a^2 + (z-\xi)^2} \quad (19)$$

Řešení soustavy (13,14) hledáme za pomoci po částech konstantní báze funkce a Diracovy funkce váhové. Nejdříve je nutno analyzovanou anténu diskretizovat (obr.7)



Obr.7. Po částech konstantní aproximace

dolní hranice segmentů je označena indexem - ,

horní hranice indexem + .

Dolní hranice prvního segmentu a horní hranice posledního segmentu jsou posunuty o polovinu segmentu za konec anténního vodiče, aby bylo možno modelovat uzel proudu

$I(-h) = I(h) = 0$ na koncích antény.

Délka všech segmentů je stejná $D = 2a$.[8]

Dosadíme po částech konstantní aproximaci do vztahu(16) a (17) a dostáváme

$$A_z(z) \approx \frac{\mu}{4\pi} \sum_{n=1}^N I_n \int_{-h+(n-0,5)\Delta}^{-h+(n+0,5)\Delta} \frac{e^{[-jkR(z,\xi)]}}{R(z,\xi)} d\xi \quad (20)$$

$$\varphi(z) \approx \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{n=1}^N \sigma_n \int_{-h+(n-0,5)\Delta}^{-h+(n+0,5)\Delta} \frac{e^{[-jkR(z,\xi)]}}{R(z,\xi)} d\xi \quad (21)$$

kde... I_n a σ_n uzlové hodnoty proudu a nábojové hustoty.[5]

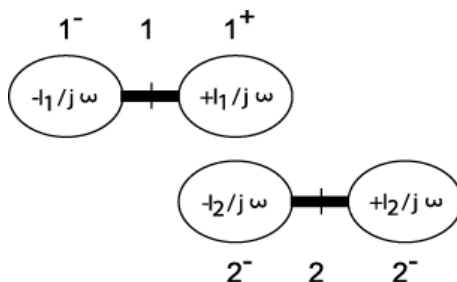
Derivace v (15) a (18) jsou nahrazeny konečnými diferencemi, protože první derivace po částech konstantní aproximace je nulová na konstantní části funkce a neexistuje na hranicích. Uvážíme-li $I_n = I_z(-h + n\Delta)$, přepíšeme rovnici kontinuity do tvaru.

$$\frac{I_z(-h + (n+1)\Delta) - I_z(-h + n\Delta)}{\Delta} + j\omega\sigma(-h + (n+0,5)\Delta) \approx 0 \quad (22a)$$

lze ji přepsat také na

$$\sigma_{n+} \approx \frac{-1}{j\omega} \left[\frac{I_{n+1} - I_n}{\Delta} \right] \quad (22b)$$

Vztah (22b) vyjadřuje skutečnost, že jednotlivé segmenty antény mohou být nahrazeny elementárními elektrickými dipóly. [8]



Obr.8. Anténa jako soubor elektrických dipólů

Vztah

vztah pro intenzitu elektrického pole je

$$E_z^s(-h + n\Delta) \approx +j\omega A_z(-h + n\Delta) - \frac{\varphi[-h + (n+0,5)\Delta] - \varphi[-h + (n-0,5)\Delta]}{\Delta} \quad (23)$$

Numerickou aproximací pak dojdeme ke vztahu

$$E_z^i(m) \approx -j\omega A_z(m) - \frac{\varphi[m^+] - \varphi[m^-]}{\Delta} \quad (24)$$

Z rovnice kontinuity získáme příspěvek n -tého segmentu elementárního dipólu k hodnotě skalárního potenciálu na pravé hranici m -tého segmentu díky

$$\varphi(m+) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left[I_n \int_{\Delta_0+} \frac{e^{[-jkR]}}{4\pi R} d\xi - I_n \int_{\Delta_0-} \frac{e^{[-jkR]}}{4\pi R} d\xi \right] \frac{1}{\Delta} \quad (25)$$

Intenzitu pole lze psát ve tvaru [5]

$$E_z^i \Delta = ZI \quad (26)$$

Pro prvky Z_{mn} impedanční matice Z platí:

$$Z_{mn} = j\omega\mu\Delta \left[I_n \int_{\Delta n+} \frac{e^{[-jkR(m,\xi)]}}{4\pi R(m,\xi)} d\xi + \frac{1}{j\omega\epsilon} \left[\int_{\Delta n+} \frac{e^{[-jkR(m^+, \xi)]}}{4\pi R(m,\xi)} d\xi - \int_{\Delta n-} \frac{e^{[-jkR(m^+, \xi)]}}{4\pi R(m,\xi)} d\xi \right] \frac{1}{\Delta} - \right. \\ \left. - \frac{1}{j\omega\epsilon} \left[\int_{\Delta n+} \frac{e^{[-jkR(m^-, \xi)]}}{4\pi R(m^-, \xi)} d\xi - \int_{\Delta n-} \frac{e^{[-jkR(m^-, \xi)]}}{4\pi R(m^-, \xi)} d\xi \right] \frac{1}{\Delta} \right] \quad (27)$$

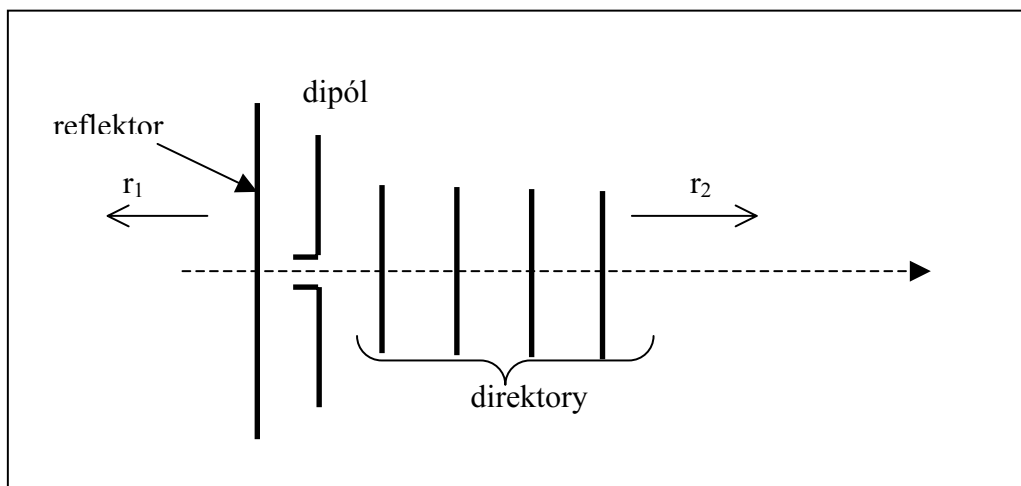
....kde.... Z_{mn} popisuje příspěvek proudu a náboje na segmentu n k napětí indukovanému na segmentu. [8]

Jelikož složka elektrické intenzity, tečná k anténnímu vodiči, je nulová na všech segmentech vyjma napájecí štěrby, prvky sloupcového vektoru napětí (levá strana rovnice vzt.18) jsou nulové vyjma případu napájecí štěrby (na štěrbině jsme předpokládali napětí 1 V). Z rovnice (26) tedy můžeme vyjádřit sloupcový vektor uzlových hodnot rozložení proudu na anténě I . Poměr vstupního napětí a vstupního proudu je potom roven vstupní impedanci antény.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2. VYTVOŘENÍ PROGRAMU A JEHO OBSLUHA

2.1 Praktické předpoklady pro provoz Yagiho antény



Obr.9. Yagiho anténa

Anténu je tedy nutno vyladit tak, aby odpovídala následujícím podmínkám:

1. Aby byl tok energie ve směru r_2 zeslabovaný, musí být reflektor Yagiho antény navržen tak, aby se v něm indukovaný proud fázově předbíhal vzhledem k proudu v aktivním dipólu.
2. Aby tok energie ve směru r_1 byl zesilován, musí mít intenzity polí od aktivního dipólu a od reflektoru takový příznivý poměr fází ve směru r_1 , aby proud indukovaný v prvním direktoru byl fázově opožděn za proudem v aktivním dipólu.
3. Proud indukovaný ve druhém direktoru musí být fázově opožděn za proudem v prvním direktoru, proud ve třetím direktoru fázově opožděn za proudem ve druhém direktoru atd.

Elementární analýza, založená na metodě indukovaných elektromotorických napětí ukazuje, že k dosažení výše popsanych fázových poměrů je třeba, aby celková impedance záření reflektoru (vztažená ke kmitně proudu) měla kladnou (můžeme ovlivnit změnou délky prvků) induktivní reaktanci, a aby celková impedance záření každého direktoru (opět vztažená ke kmitně proudu) měla zápornou, kapacitní reaktanci (můžeme ovlivnit změnou délky prvků).

- A) Zvětšením délky prvku oproti jeho rezonanční délce (čtvrtvlnná) dosáhneme kladné reaktance.
- B) Zkrácením délky prvku oproti jeho rezonanční délce (čtvrtvlnná) dosáhneme zápornou reaktanci.

Impedance záření dipólu závisí na jeho poloměru, a proto velikost prodloužení či zkrácení jednotlivých prvků antény je na tomto poloměru závislá. Výsledné hodnoty reaktancí reflektoru a direktorů jsou také závislé na vzdálenostech mezi prvky antény a na počtu direktorů.

Zjednodušující předpoklady k numerické analýze Yagiho antény:

1. Anténa je umístěna v bezeztrátovém prostředí.
2. Prvky antény jsou vyrobeny z dokonale vodivého materiálu.
3. Proud a náboje jsou vždy soustředěny v osách anténních vodičů.
4. Každý prvek antény (reflektor, dipól, direktory) je rozdělen na segmenty stejné délky.
5. Rozložení proudu na prvcích budeme aproximovat po částech konstantní funkcí (vícebázová aproximace).

Jelikož jsou antény vyrobeny z dokonale vodivého materiálu, musí být na každém segmentu tečná složka intenzity elektrického pole antény nulová (vyjma napájecí šterbiny dipólu).

Pole na povrchu každého segmentu je ovlivněno:

- a) Proud a náboje na tomtéž segmentu
- b) Proud na sousedních segmentech téhož anténního prvku.
- c) Proud a náboje na segmentech ostatních prvků antény. [7]

Zkladní kroky k sestavení impedanční matice Yagiho antény jsou analogické ke krokům na drátových anténách.

Pro výpočet impedanční matice osamoceného anténního prvku můžeme přímo použít vztahy (impedanční matici), které byly popsány v kapitole o drátových anténách. Postup při výpočtu matice vzájemných impedancí dvou různých anténních prvků je podobný jako v případě samotného prvku, ale do vzdálenosti zdrojového segmentu a segmentu cílového musíme včlenit vzájemnou prostorovou vzdálenost anténních prvků.

S využitím matic vzájemných impedancí a na základě druhého Kirchhoffova zákona můžeme pro Yagiho anténu psát následující lineární soustavu maticových rovnic:

pro reflektor:

$$[0] = [Z_{rr}][I_r] + [Z_{rd}][I_d] + [Z_{r1}][I_1] + [Z_{r2}][I_2] + \dots + [Z_{rn}][I_n] \quad (28)$$

pro aktivní dipól:

$$[U_0] = [Z_{dr}][I_r] + [Z_{dd}][I_d] + [Z_{d1}][I_1] + [Z_{d2}][I_2] + \dots + [Z_{dn}][I_n] \quad (39)$$

pro první direktor:

$$[0] = [Z_{1r}][I_r] + [Z_{1d}][I_d] + [Z_{11}][I_1] + [Z_{12}][I_2] + \dots + [Z_{1n}][I_n] \quad (30)$$

pro n-tý direktor:

$$[0] = [Z_{nr}][I_r] + [Z_{nd}][I_d] + [Z_{n1}][I_1] + [Z_{n2}][I_2] + \dots + [Z_{nn}][I_n] \quad (31)$$

....kde $[I_r]$ a $[I_d]$ jsou vektory proudů v reflektoru a aktivním dipólu,

..... $[I_1]$, $[I_2]$, až $[I_n]$ jsou vektory proudů v prvním, ve druhém a v n-tém direktoru, ... $[Z_{rr}]$, $[Z_{dd}]$, $[Z_{11}]$, $[Z_{22}]$, až $[Z_{nn}]$ jsou impedanční matice vzájemných impedancí segmentů na daném prvku (reflektoru, aktivním prvku, prvním direktoru, druhém direktoru a n-tém direktoru),

..... $[Z_{rd}]$ je impedanční matice vzájemných impedancí segmentů reflektoru a aktivního prvku,

..... $[Z_{dr}]$, až $[Z_{dn}]$ jsou impedanční matice vzájemných impedancí segmentů aktivního prvku a prvního a n-tého direktoru,

.... $[Z_{r1}]$, až $[Z_{rn}]$ jsou impedanční matice vzájemných impedancí segmentů reflektoru a prvního a n-tého direktoru,

.... $[Z_{ik}]$ je impedanční matice vzájemných impedancí i-tého a k-tého direktoru,

.... $[0]$ je nulový vektor,

....vektor $[U_0]$ má všechny prvky nulové vyjma prvku, který odpovídá segmentu v místě napájení aktivního dipólu.

V důsledku reciprocity platí následující vztahy:

$$[Z_{rd}] = [Z_{dr}]^T, [Z_{dn}] = [Z_{nd}]^T, [Z_{rn}] = [Z_{nr}]^T, [Z_{ik}] = [Z_{ki}]^T, [Z_{rr}] = [Z_{rr}]^T,$$

$$[Z_{dd}] = [Z_{dd}]^T, [Z_{11}] = [Z_{11}]^T, [Z_{nn}] = [Z_{nn}]^T,$$

....kde..... T označuje matici transponovanou.

Na jednotlivých anténních prvcích $[I_r]$, $[I_d]$, $[I_1]$, až $[I_n]$ je rozměr vektorů proudového rozložení roven počtu segmentů, na které je daný anténní prvek rozdělen. Matice vlastních impedancí jednotlivých anténních prvků $[Z_{rr}]$, $[Z_{dd}]$, $[Z_{11}]$, až $[Z_{nn}]$ jsou vždy čtvercové a jejich rozměr opět odpovídá počtu segmentů, na který je daný prvek rozdělen.

Matice $[Z_{rd}]$, $[Z_{dn}]$, $[Z_{rn}]$ a $[Z_{ik}]$ mohou být v obecném případě obdélníkové (jednotlivé prvky antény se liší v počtu segmentů, na které jsou rozděleny) a mají rozměr $R \times D$, $D \times N$ a $R \times N$.

... kde... R je počet segmentů reflektoru,

... D je počet segmentů aktivního dipólu a

.... N je počet segmentů n-tého direktoru. [14]

Soustavu rovnic (24 až 27) je lze přepsat na

$$[Z][I] = [U] \quad (32)$$

kde

$$[Z] = \begin{bmatrix} [Z_{rr}] & [Z_{rd}] & [Z_{r1}] & \dots & [Z_{rn}] \\ [Z_{dr}] & & & & \\ [Z_{1r}] & & & & \\ & & & & \\ [Z_{nr}] & [Z_{nd}] & [Z_{n1}] & \dots & [Z_{nn}] \end{bmatrix}, \quad [I] = \begin{bmatrix} [I_r] \\ [I_d] \\ [I_1] \\ & \\ [I_n] \end{bmatrix}, \quad [U] = \begin{bmatrix} [0] \\ [U_0] \\ [0] \\ & \\ [0] \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Matice $[Z]$ je maticí symetrickou, tj. $[Z] = [Z]^T$.

Proudové rozložení na každém prvku antény:

$$[I] = [U][Z]^{-1} \quad (34)$$

kde... $[Z]^{-1}$ značí inverzní matici k matici $[Z]$.

Vstupní impedanci antény vypočítáme:

$$Z_{vst} = \frac{1}{[Z]^{-1}_{feedfeed}} = \frac{1}{[Y]_{feedfeed}} \quad (35)$$

kde..... **feed** je index prvku inverzní (admitanční) matice, který odpovídá tomu segmentu aktivního prvku, na něj je přivedeno napájecí napětí U_0 [10]

Pokud již známe proudové rozložení na jednotlivých prvcích antény, potom vypočteme její *směrové charakteristiky*. Zaměříme pouze na rovinu E (rovina, v níž leží anténa na obr. Obr2.1; rovina H je kolmá k obrázku a k anténním prvkům).

Předpokládáme že každý segment, na něž jsou jednotlivé prvky antény rozděleny, můžeme pokládat za elementární dipól. Pro intenzitu pole v okolí antény, jakož to soustavy elementárních dipólů, lze psát:

$$E_s = 60 j(k/2) \sin \theta \frac{\exp(-jkr)}{r} \sum_{n=1}^M I_n e^{(-jk\Delta r_n)} \quad (36)$$

kde θ je úhel braný od osy dipólu,

..... M je celkový počet segmentů celé antény,

..... j je imaginární jednotka,

..... k je vlnové číslo

..... Δr_n značí dráhové rozdíly vyzařovaných vln od jednotlivých elementárních dipólů (segmentů).

Pro směrovou charakteristiku antény píšeme na základě [5]

$$F\theta = j(k/2) \sin \theta \sum_{n=1}^M I_n e^{(-jk\Delta r_n)} \quad (37)$$

Nyní ji zbývá vypočítat dráhové rozdíly Δr_n vln vyzařovaných jednotlivými segmenty. Jako referenční segment vezmeme první segment reflektoru, potom můžeme pro dráhové rozdíly psát: [14]

pro první segment: $\Delta r_1 = 0$ (38)

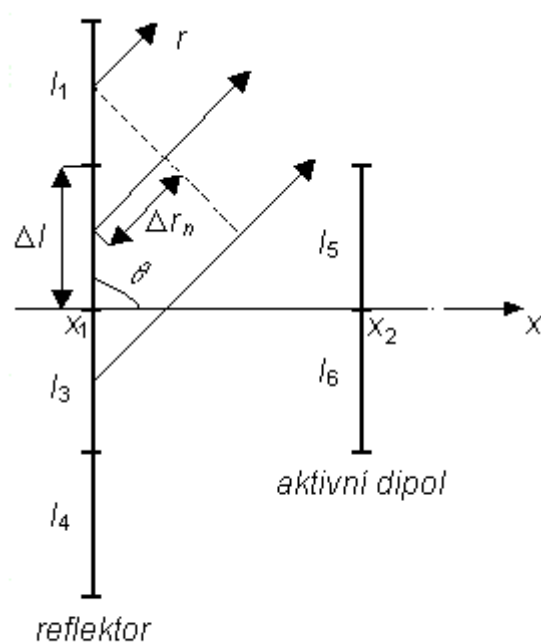
pro druhý segment: $\Delta r_2 = \Delta l \cos \theta$ (39)

pro třetí segment: $\Delta r_3 = 2\Delta l \cos \theta$ (40)

pro čtvrtý segment: $\Delta r_4 = 3\Delta l \cos \theta$ (41)

pro pátý segment: $\Delta r_5 = (x_1 + x_2) \sin \theta + \Delta l \cos \theta$ (42)

pro šestý segment: $\Delta r_6 = (x_1 + x_2) \sin \theta + 2\Delta l \cos \theta$ (43)



Obr.10. Fázové rozdíly

2.2 Popis programu a jeho obsluhy

Program je tvořen a koncipován pro **Matlab v.6.5** a je tvořen souborem **Yagiantena.m**, po jehož spuštění, se otevře dialogové okno pro uživatele.

Spuštění programu provedeme zadáním **Yagiantena** do příkazového řádku v Matlabu.

Poté se zobrazí uživatelské okno, které je ve formě formuláře.

Formulář slouží pro komunikaci mezi uživatelem a programem.

Obsahuje pole na zadávání parametrů, na zobrazení vypočítaných parametrů a tlačítka.

Tlačítka slouží pro spuštění výpočtu parametrů, ty se nám zobrazí v prázdných polích ukončení programu a pro zobrazení charakteristik programem vypočtených. Zobrazené charakteristiky postupně objevují a znázorňují rozložení proudu na prvcích a směrové charakteristiky.

Program je zapsán příkazy pro **Matlab v.6.5**, jehož předností je snadná práce s vektory a maticemi a z tohoto důvodu je pro vývoj programu optimální. Jako další výhodou Matlabu je dobrá práce s grafy. Verze 6.5 nám umožňuje grafy nejenom zobrazit, ale také různě upravovat.

Program lze do budoucnosti rozšiřovat o výpočty dalších parametrů Yagiho antén a nebo rozšířit o počítání konstrukčních parametrů jiných druhů přijímacích a vysílacích antén nebo doplnit stávající program o počítání soustav pro Yagiho antény.

Program počítá parametry antény pro libovolný počet prvků, libovolnou frekvenci, vzdálenosti prvků od sebe, poloměr vodiče. Pole pro editaci parametrů antény jsou ošetřena proti zápisu nesmyslných údajů a uživatel je upozorněn informačním oknem, že zapsaný údaj není správný.

2.2.1 Uživatelský formulář a jeho grafické zpracování

Je zobrazen po spuštění programu. Jak již bylo výše uvedeno slouží pro komunikaci mezi uživatelem. Je to šedé okno, kde se nachází pole pro zadávání parametrů, pole pro vypočtené parametry antény, tlačítka pro obsluhu výpočtu a zobrazování charakteristik. Ve vrchní části je jednoduché informační schéma Yagiho antény.

Yagi Antenna

Diagram labels: λ , r_2 , reflektor, dipol, λ , λ , λ , λ , r_1 , celkový počet direktorů

Input Fields:

- $Z =$
- délka dipolu [m]
- délka direktoru [m]
- délka reflektoru [m]: 0.5
- vzdálenost ref - dip [m]: 0.1
- vzdálenost dir - dir [m]: 0.04
- vzdálenost dip - dir [m]: 0.1
- počet prvků: 5
- poloměr [m]: 0.001
- frekvence [Hz]: 700
- vlnová délka [m]: 0.011
- počet segmentu reflektoru: 5
- počet sektoru dipolu: 1
- počet sektoru direktoru: 3

Buttons:

- zobrazení průběhů
- počítání parametrů
- konec programu

Obr.11. Uživatelský formulář

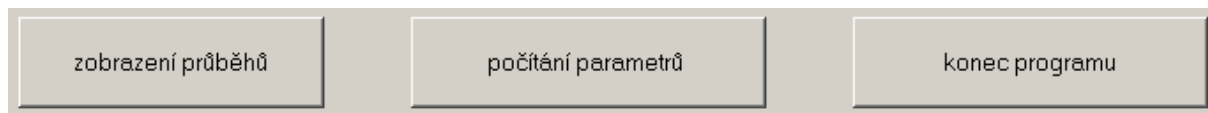
Uživatelský formulář obsahuje tyto obslužné prvky :

- a) tři tlačítka pro ovládání*
- b) jedenáct editovatelných polí*
- c) čtyři needitovatelná pole*
- d) schéma s okótovanými rozměry*

Funkce jednotlivých obslužných prvků je popsána níže.

a) tlačítka pro ovládání

Tlačítka pro ovládání jsou míněny obdélníkové prvky na spodní straně formuláře.



Obr.12. Tlačítka pro ovládání

1) Zobrazení průběhů - po stisku tohoto tlačítka se zobrazí grafy rozložení proudu. První graf zobrazí rozložení proudu na dipólu, druhý na reflektoru. Další potom rozložení proudu na direktorech a směrové charakteristiky v kartézských a polárních souřadnicích . Průběhy jsou zobrazovány po sobě vždy po zmáčknutí libovolné klávesy.

Průběhy lze graficky upravovat, kopírovat a vkládat do jiných uživatelských programů jako je třeba Word.

2) Počítání parametrů - po stisku tohoto tlačítka se objeví hodnoty skutečných délek aktivního dipólu a direktorů. Vypočítané hodnoty se objeví v hlavním formuláři v needitovatelných polích. V okně obsahující schéma se objeví ve žlutých polích též vypočtené délky dipólu a direktorů přepočtené na násobky vlnové délky.

3) Konec programu - Po stisku tohoto tlačítka se ukončí program.

b) editovatelná pole

Editovatelnými poli jsou míněny bílé obdélníčky s černými popiskami.

Všechna editovatelná pole jsou pro větší přehlednost ohraničena tenkým černým rámečkem.

Do polí se zapisují uživatelem parametry antény před zahájením výpočtu.

frekvence [Hz]	700
vlnová délka [m]	1

počet prvků	5
poloměr	0.001
délka reflektoru [m]	0.5
vzdálenost ref -dip [m]	0.2
vzdálenost dip -dir [m]	0.1
vzdálenost dir - dir[m]	0.04

počet segmentů reflektoru	5
počet segmentů dipolu	1
počet segmentů direktoru	2

Obr.13. Editovatelná pole

Uživatel zapisuje pomocí numerické části klávesnice požadované parametry. Desetinné čárky se zapisují tečkou. Je-li do okna vepsán jiný znak než číslice, editace se neprovede.

Jednotlivé parametry mají následující význam:

Vlnová délka - vlnové délka napájecího napětí v metrech

Frekvence - kmitočet napájecího napětí v Hz

Při zadávání si můžeme vybrat, zda vyplníme pole pro vlnovou délku či frekvenci., Druhé pole se nám automaticky přepočítá.

Počet prvků	- celkový počet prvků antény. (dipól + reflektor + direktory)
Poloměr	- poloměr anténního vodiče prvků antény v metrech
Délka reflektoru	- délka celého reflektoru v metrech
Vzdálenost dip-dir	- vzdálenost aktivního dipólu od nejbližšího direktoru v metrech
Vzdálenost dir-dir	- vzdálenost mezi dvěma sousedními direktory v metrech
Vzdálenost ref-dip	- vzdálenost reflektoru od aktivního dipólu
Počet segmentů ref	- počet segmentů, na které má být rozdělen reflektor Pro výpočet musíme zaručit, že číslo bude liché.
Počet segmentů dip	- počet segmentů, na které má být rozdělen dipól
Počet segmentů dir	- počet segmentů, na které má být rozdělen direktor

c) needitovatelná pole

Needitovatelnými poli jsou míněny bílé obdélníkové plochy s červenými popiskami a dva modré pruhy. V těchto polích se nám zobrazují programem vypočtené parametry.

délka dipolu [m]	
délka direktoru [m]	

Obr.14. Needitovatelná tlačítka

Jednotlivé parametry mají následující význam:

Délka dipólu - délka aktivního dipólu (needitovatelné informační pole).

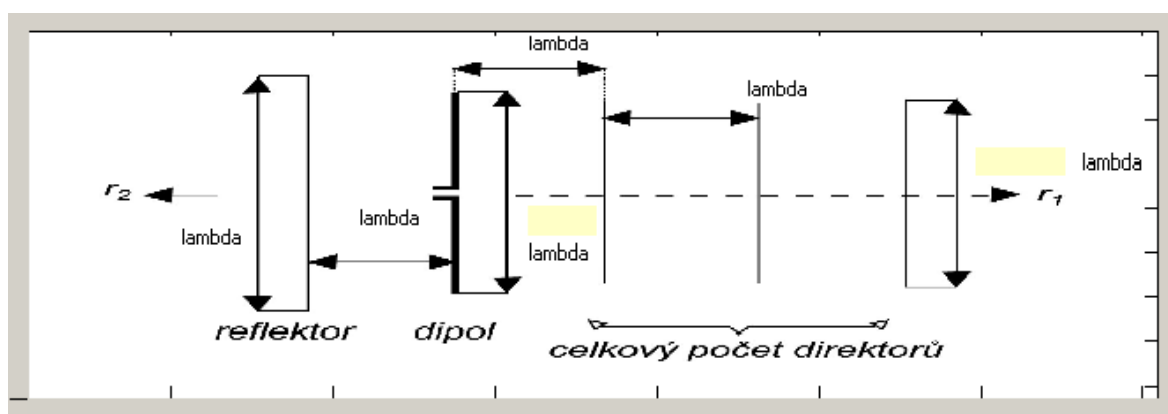
Délka direktoru - jednotná délka všech direktorů (needitovatelné informační pole).

V modrém horním pruhu se zobrazí vstupní impedance v komplexním tvaru. V modrém spodním pruhu se za písmenem **Z** zobrazí hodnota impedance, která se spočte podle vztahu:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (44)$$

Vstupní impedance se nám na rozdíl od výše uvedených needitovatelných polí nespočítá hned zmačknutím tlačítka **Počítání parametrů**, ale až po vykreslení grafů.

d) *schéma s okótovanými rozměry*



Obr.15. Tlačítka pro ovládání

Schéma slouží pro představu o konstrukčním uspořádání vypočtených parametrů na Yagiho anténě. Rozměry příslušných vzdáleností (parametrů) jsou okótovány, jako násobky vlnové délky (např. $0.35 \cdot \lambda$). Ve žlutých polích se zobrazí aktuální hodnoty až po zmačknutí tlačítka **Počítání parametrů**. V ostatních bílých polích (nejsou vidět) se zobrazují hodnoty násobku vlnové délky, hned po zadání parametrů antény do editovatelných polí.

2.3 Praktické ověření funkce programu

Vytvořený program je schopen analyzovat Yagiho anténu na základě uvedeného popisu.

2.3.1 Zadání parametrů

Anténa má pět prvků (dipól + reflektor + tři direktory).

Vlnová délka:	0.7 m
Délka reflektoru:	0.4 m
Vzdálenost reflektor- dipól:	0.15 m
Vzdálenost dipól - direktor:	0.2 m
Vzdálenost direktor - direktor:	0.04 m
Reflektor:	15 stejných segmentů
Dipól :	13 stejných segmentů
Direktor:	11 stejných segmentů
Poloměr vodičů:	0.002 m
Počet prvků:	5

Po zadání vlnové délky se nám automaticky zobrazí příslušná frekvence, která je přepočtena dle následujícího vztahu. V našem případě je frekvence $210000000\text{Hz} = 0,21\text{GHz}$

$$\lambda = 300 / f \text{ [m;MHz]} \quad (45)$$

Jsou-li výše uvedené parametry zapsány do formuláře, výpočet zbývajících parametrů (needitovatelná pole) je spuštěn tlačítkem **Počítání parametrů** na ovládacím panelu.

V prázdných polích (needitovatelná pole) se zobrazí následující vypočtené parametry.

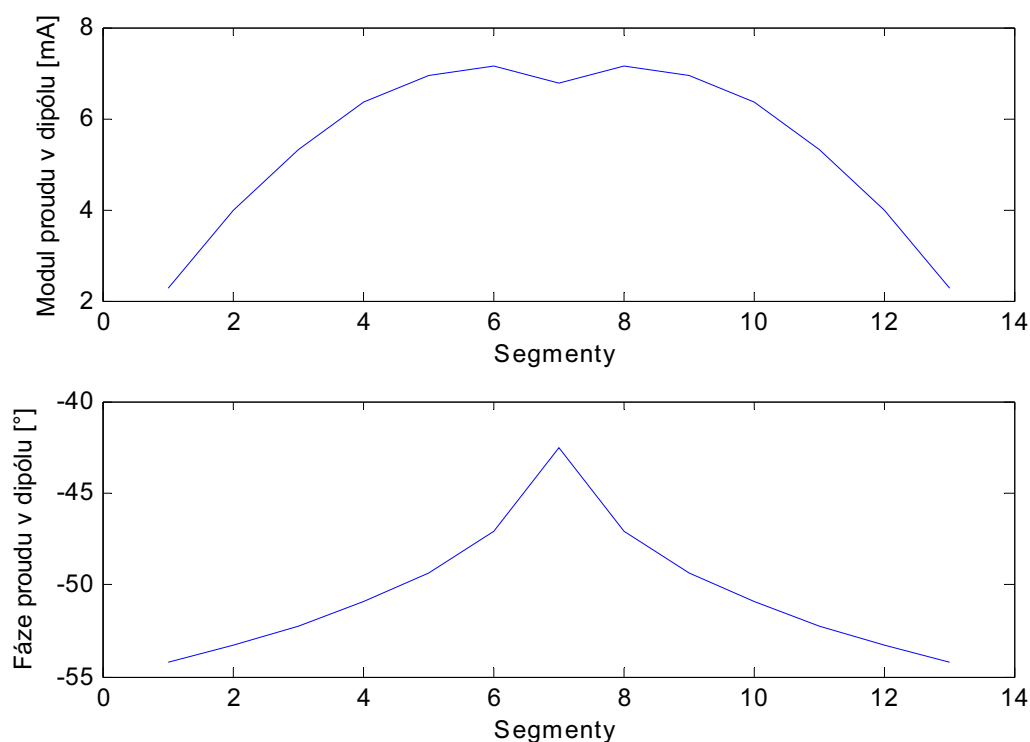
Délka dipólu: 0.35 m

Délka direktoru: 0.30 m

Nyní necháme vykreslit charakteristiky rozložení proudu na dipólu reflektoru a třech direktorech a směrových charakteristik zmáčknutím tlačítka **Zobrazení průběhů**. Pro zobrazení v pořadí dalších charakteristik zmáčkneme libovolnou klávesu.

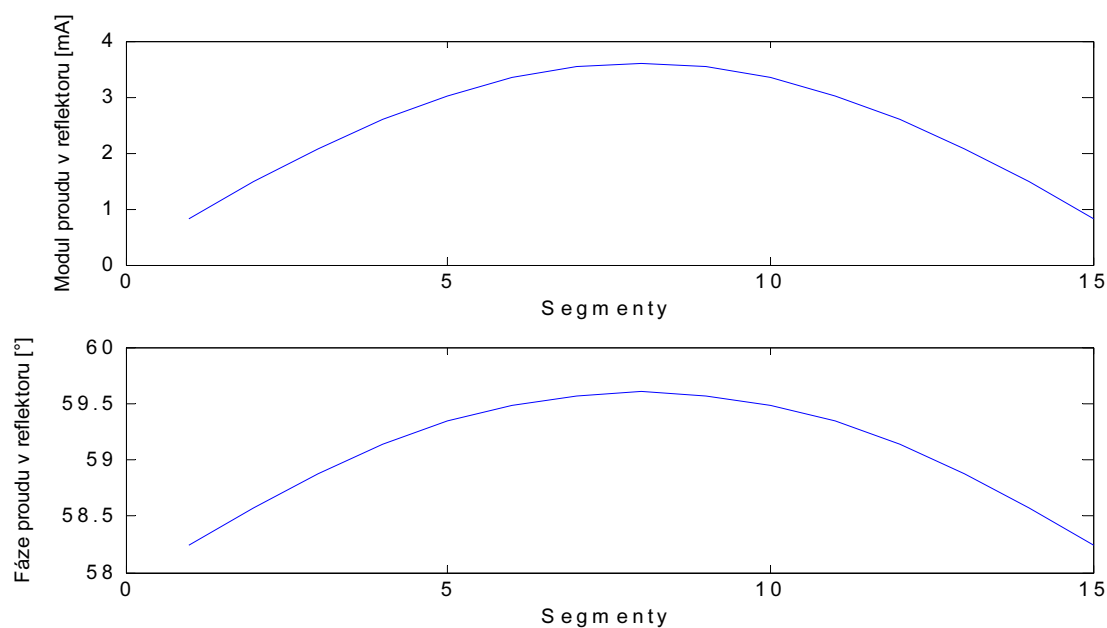
2.3.2 Zobrazení charakteristik

1. zobrazí se charakteristika popisující rozložení proudu na dipólu.

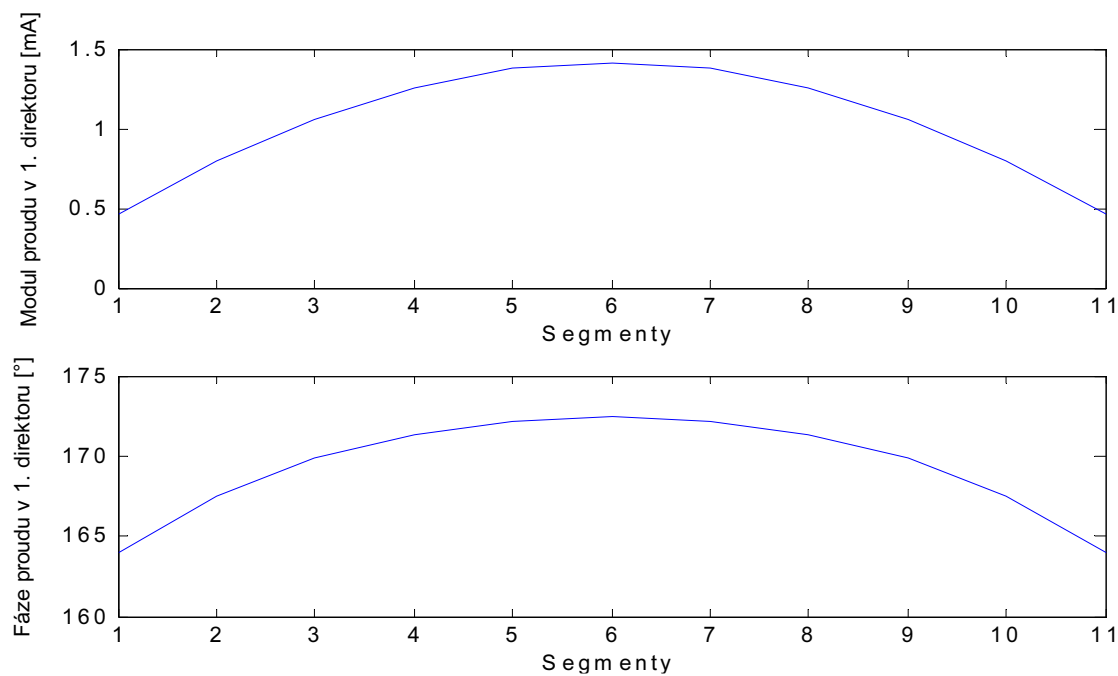


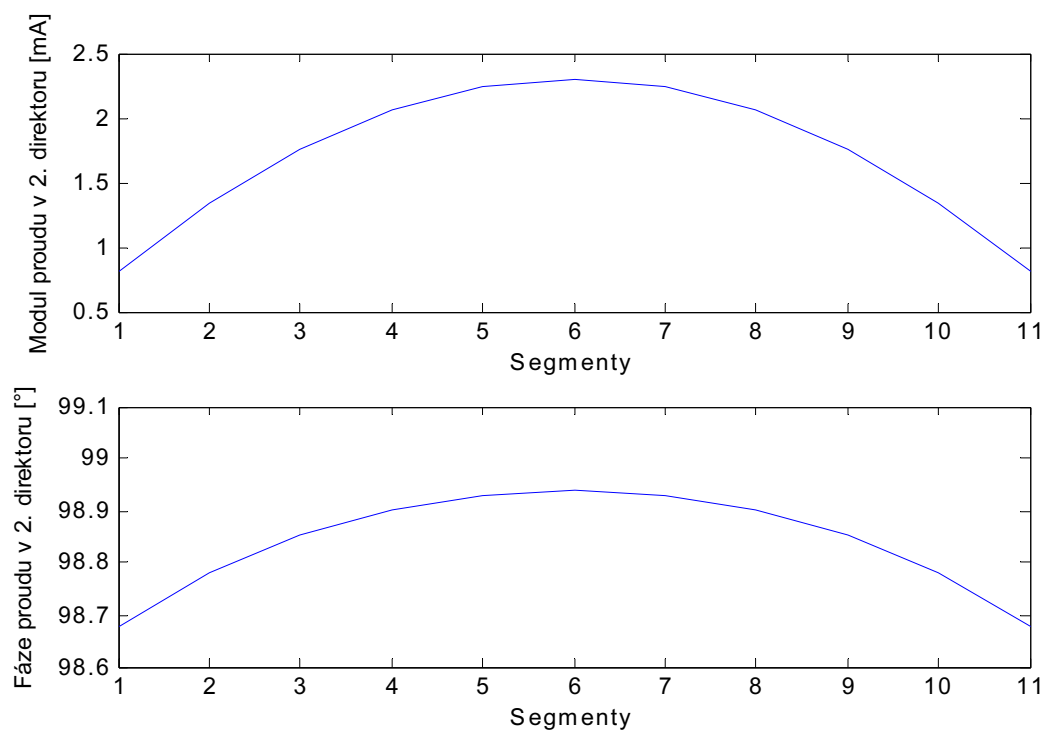
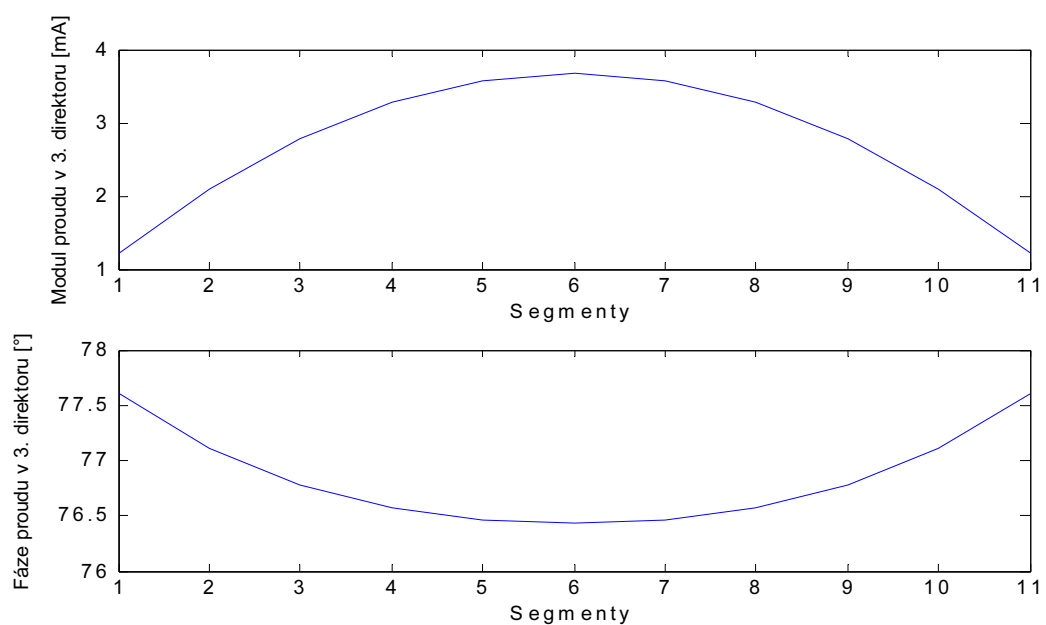
Obr.16. Rozložení proudu na dipólu

2. zobrazí se charakteristika popisující rozložení proudu na reflektoru

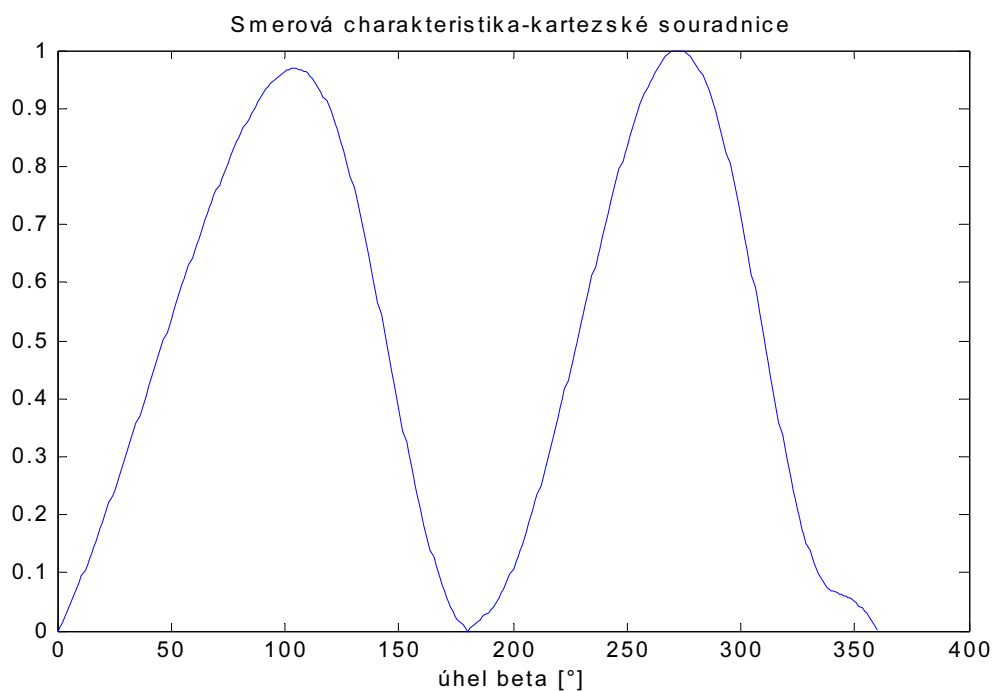
*Obr.17.Rozložení proudu na reflektoru*

3. zobrazí se charakteristika popisující rozložení na 1. direktoru

*Obr.18.Rozložení proudu na 1. direktoru*

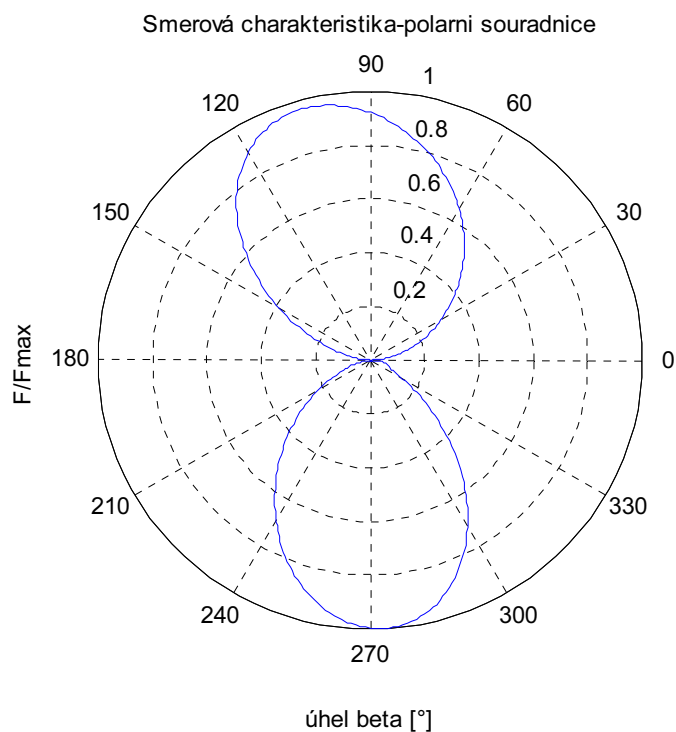
4. zobrazí se charakteristika popisující rozložení na 2. direktoru*Obr.19. Rozložení proudu na 2. direktoru*5. zobrazí se charakteristika popisující rozložení na 3. direktoru*Obr.20. Rozložení proudu na 3. direktoru*

6. zobrazí se směrová charakteristika v kartézských souřadnicích



Obr.21. Směrová charakteristika – kartézské souřadnice

7. zobrazí se směrová charakteristika v polárních souřadnicích



Obr.22. Směrová charakteristika – polární souřadnice

Toto je lišta s ikonami a pracovním menu, která se nachází ve vrchní části okna se zobrazovanými průběhy

Nejdříve probereme možnosti úpravy grafu pomocí **ikon**

Vybrané operace budu demonstrovat na směrové charakteristice v polárních souřadnicích.

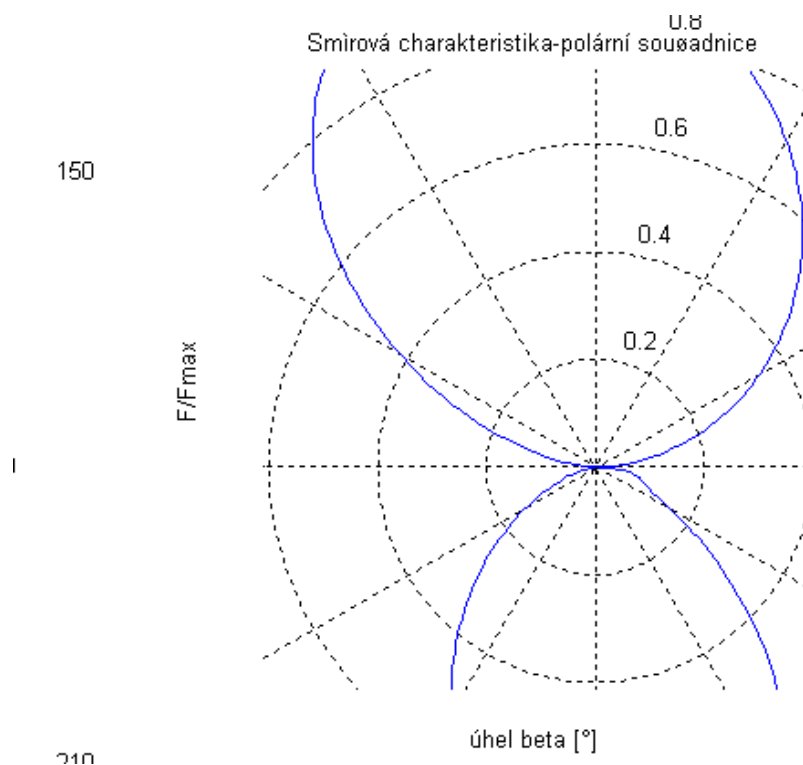
2.4.1 Ikony grafického okna



Tato ikona umožňuje libovolně otáčet charakteristikou za pomoci myši.



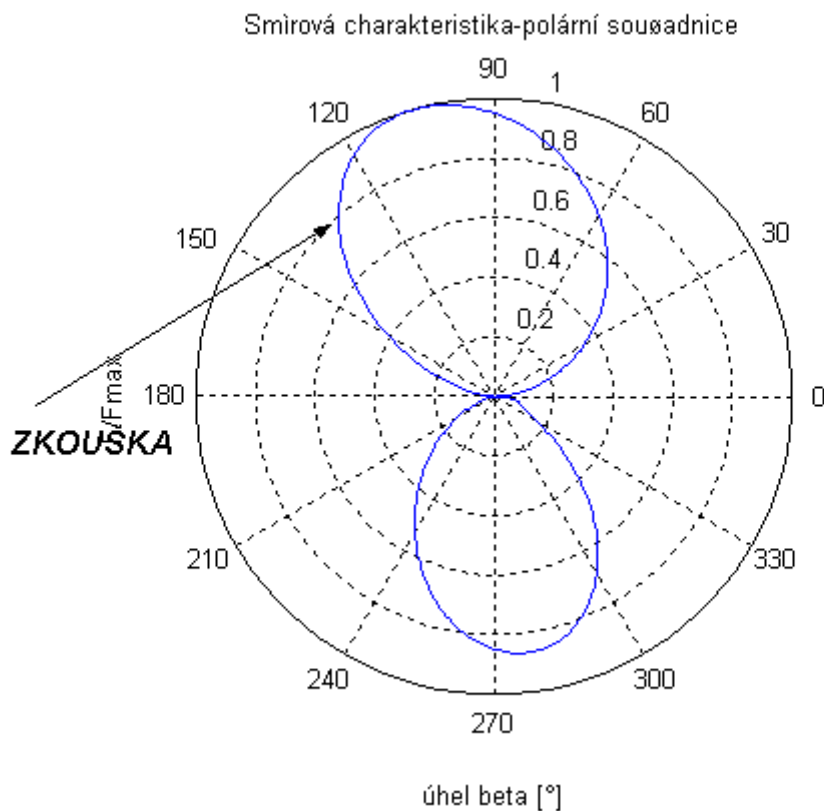
Tyto ikony umožňují přibližovat a nebo vzdalovat charakteristiku, a tím lépe posoudit její detail.



Obr.26. Zvětšení grafu



Tyto ikony umožňují do grafu zapisovat text, malovat šipky a čáry, které mohou například upozorňovat na konkrétní místa v charakteristice.



Obr.27. Popisování grafu



Tyto ikony umožňují zakládat nové pracovní plochy pro umístění grafu, otvírat již uložené grafy, ukládat nové charakteristiky a tisknout.

Všechny nejnutnější operace pro práci s grafy, které jsou v ikonách najdeme také v nabídkách menu.

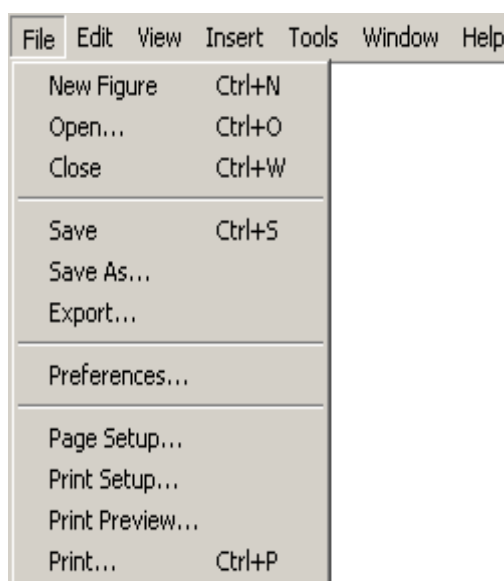
2.4.2 Menu grafického okna

Nyní si probereme stručně také některé možnosti, ukryté v nabídkách menu.

V nabídce menu se nacházejí tyto položky:

1) *File*

V této nabídce najdeme následující položky:



Obr.28. Možnosti menu- File

New Figure - pro vytváření nových oken

Open - pro otvírání již uložených oken

Close - pro ukončení oken

Save (As) - pro ukládání oken

Export - pro ukládání grafu pro jiné uživatelské programy

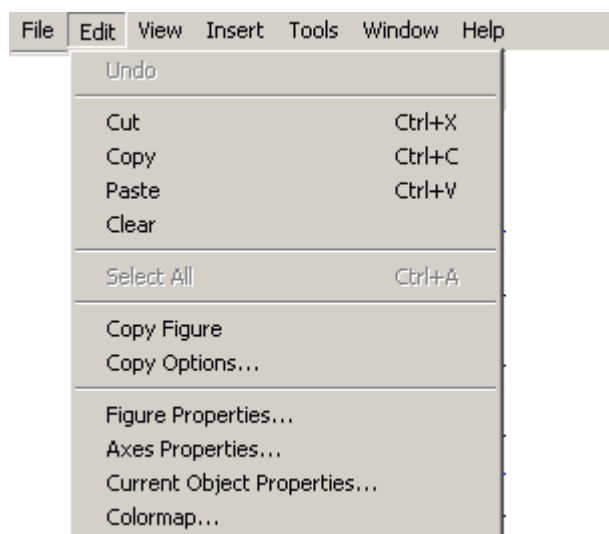
Page Setup - pro úpravu formátu papíru, určování pozic objektu na něm apd.

Page Print - pro natavení tisku na tiskárně

Print Preview - náhled pro tisk

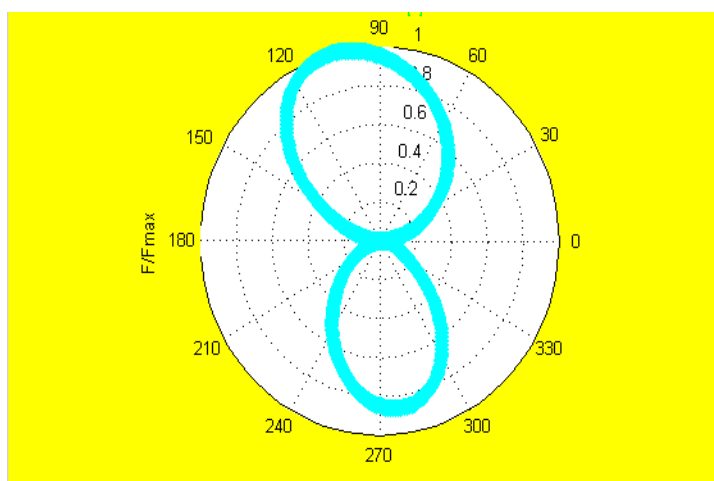
Print - pro tisk

2) *Edit*



Obr.29. Možnosti menu- Edit

V této nabídce najdeme funkce pro kopírování, vkládání a mazání objektů v okně a pro editaci grafů (změna jména okna, popisků, barev, tloušťky a typu čar a souřadnicového systému apd.).



Obr.30. Změna parametru čar

3) View

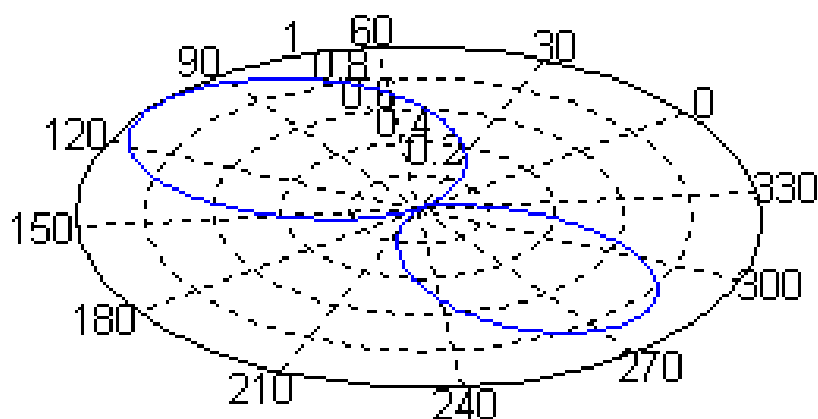


Obr.31. Možnosti menu- View

Tyto dvě nabídky nám umožňují dát v menu skryté položky do ikon.

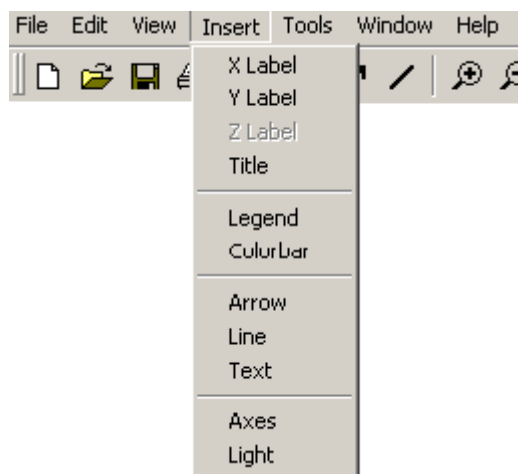
Figure Toolbar – zobrazení ikon pro základní operace popsané výše

Camera Toolbar – zobrazení ikon pro natáčení grafu z různých pohledů apod.



Obr.32. Natočení grafu

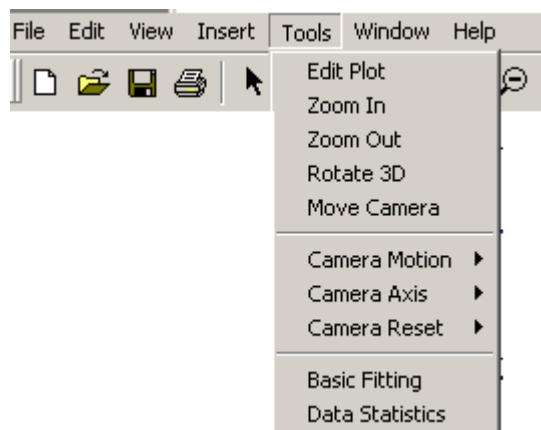
4) *Insert*



Obr.33. Možnosti menu- Insert

Pro vkládání popisků os souřadnic, legend, jmen charakteristik, barevných škál apod.

5) *Tools*



Obr.34. Možnosti menu- Tools

Umožňuje přibližování, vzdalování, natáčení, rotace apod.

6) nabídka **Windows** slouží pro přepínání mezi spuštěnými okny.

7) nabídka **Help** poskytuje informace o práci s grafem a operacích s ním

ZÁVĚR

Moderní výpočetní technika nám umožňuje optimalizovat Yagiho anténu za pomoci sestaveného algoritmu v mnohem kratším čase než tomu bylo v dřívějších letech.

Yagiho anténa je nejpoužívanější anténou pro decimetrové a metrové vlny.

Yagiho anténa je směrová anténa, která se skládá ze třech prvků a to dipólu, reflektoru a direktorů.

Pokud zjistíme rozložení proudu na prvcích je možno za pomoci matematických metod spočítat ostatní parametry antény.

Vyhovující matematickou metodou pro návrh antény a následné sestavení počítačového je metoda **momentová**.

Momentová metoda je numerická metoda pro řešení integrálních rovnic, jejíž podstata metody spočívá v diskretizaci struktury, ve formální aproximaci hledané funkce pomocí známých báзовých funkcí a neznámých aproximačních koeficientů, v dosazení aproximace do výchozího vztahu, v minimalizaci chyby aproximace a v řešení výsledné maticové rovnice. Výsledkem řešení dostaneme aproximační koeficienty a tedy i aproximaci řešení a hledané funkce v integrandu integrální rovnice.

Algoritmus byl sestaven pro Matlab v 6.5 a je tvořen souborem **Yagii_antena**.

Matlab je pro sestavení algoritmu velmi vyhovující z důvodu, že nám umožňuje kvalitně pracovat s maticemi a velmi dobře zobrazovat grafy získané z vypočtených parametrů.

Ke komunikaci mezi uživatelem a programem slouží po spuštění aplikace uživatelský formulář. Za pomoci tohoto formuláře můžeme zadat parametry Yagiho antény.

Jsou jimi počet prvků antény, vlnová délka, délka reflektoru, vzdálenost reflektoru od dipólu, vzdálenost dipólu od direktoru, vzdálenost direktoru od dalšího direktoru, poloměr vodičů, počet segmentů na které má být rozdělen reflektor a počet segmentů o které má být kratší aktivní dipól a direktory než reflektor. Výsledkem je po spuštění programu výpočet parametrů délky dipólu, délky direktorů a vstupní impedance .

Výše uvedené parametry antény je možné počítat pro libovolnou vlnovou délku napájecího napětí, pro libovolnou délku reflektoru, pro libovolné vzdálenosti reflektor-aktivní dipól, aktivní dipól-direktor a direktor-direktor, pro libovolný poloměr prvků

antény, pro libovolný počet prvků antény. Poloměr prvků antény je třeba volit s ohledem na omezující podmínky, se kterými byl tento numerický model vytvořen.

Pro měření rušení se používá tzv. měřičů rušení a přesně definovaných typů antén. Yagiho anténa je vhodnou anténou pro měření vysokofrekvenčního rušení. Vysokofrekvenční rušení spadá do oblasti měření elektrické interference, která je rozsáhlou vědní subdisciplínou elektromagnetické kompatibility. Vypočtené parametry Yagiho antény budou sloužit k její konstrukci a případnému měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SVAČINA, Vladimír. *Elektromagnetická kompatibilita, základní pojmy a principy*. Brno: FEI, 1998
- [2] VÍT, Vladimír. *Televizní technika*. Praha: SNTL, 1979
- [3] ČESKÝ, Tomáš. *Antény*. Praha: SNTL, 1985
- [4] NEČÁSEK, Sláva. *Radiotechnika do kapsy*. Praha: SNTL, 1981
- [5] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Elektronické vydání skript, VUT Brno
- [6] ČERNOHORSKÝ, Dušan., NOVÁČEK, Zdeněk. *Antény a šíření elektromagnetických vln*. Brno: Ediční středisko VUT, 1992
- [7] MAZÁNEK, Miloš., PECHAČ, Pavel. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004
- [8] *Dipol*: dostupný ze stránek [on line]. WWW:
http://wes.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia_en/chapter-4/4_1A.html
- [9] VACULÍKOVÁ, Polina., VACULÍK Emil. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. Praha: Grada Publishing, 1998
- [10] VAVRA, Štefan., TURÁN Ján. *Antény a šírenie elektromagnetických vln* 1. vyd. -- Bratislava : Alfa, 1989
- [11] *Method of Moments for Antenna calculations*: Dostupný ze stránek [on line]. WWW: <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/D.Jefferies/mmmethod.htm>
- [12] *Method of Moments*: Dostupný ze stránek [on line]. WWW:
<http://www.maasdesign.co.uk/maas/mom>.
- [13] *Yagi Uta Antenna* : Dostupný ze stránek [on line]. WWW:
<http://www.ices.utexas.edu/~cynthia/paper/slide>.
- [14] *Yagi* dostupný ze stránek [on line]. WWW:
http://wes.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia_en/chapter-4/4_3A.html
- [15] SVOBODA, Jaroslav. *Základy elektromagnetické kompatibility*. Praha: vydavatelství ČVUT, 1994

- [16] *Normy ČSN* : Dostupný ze stránek [on line]. WWW:
wes.feec.vutbr.cz/UREL/EncyklopedieEMC/index.php?soubor=8.2.3.htm

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1. Elektromagnetické pole vysílací antény ve vzdálenosti přesahující několiknásobek délky vlny, polarizace je vodorovná	19
Obr.2. Různé druhy šíření elektromagnetických vln z vysílací antény na přijímací anténu.....	21
Obr.3. Yagiho anténa	26
Obr.4. Vícebázová aproximace	29
Obr.5. Drátový dipól rozměry	32
Obr.6. Budící elektrické pole ve vstupní šterbině.....	32
Obr.7. Po částech konstantní aproximace	35
Obr.8. Anténa jako soubor elektrických dipólů	36
Obr.9. Yagiho anténa	39
Obr.10. Fázové rozdíly	45
Obr.11. Uživatelský formulář	47
Obr.12. Tlačítka pro ovládání	48
Obr.13. Editovatelná pole	49
Obr.14. Needitovatelná tlačítka	50
Obr.15. Tlačítka pro ovládání	51
Obr.16. Rozložení proudu na dipólu.....	53
Obr.17. Rozložení proudu na reflektoru	54
Obr.18. Rozložení proudu na 1. direktoru	54
Obr.19. Rozložení proudu na 2. direktoru	55
Obr.20. Rozložení proudu na 3. direktoru	55
Obr.21. Směrová charakteristika – kartézské souřadnice	56
Obr.22. Směrová charakteristika – polární souřadnice.....	56
Obr.23. Vstupní impedance	57
Obr.24. Schéma.....	57
Obr.25. Nabídková lišta	57
Obr.26. Zvětšení grafu	58
Obr.27. Popisování grafu	59
Obr.28. Možnosti menu- File.....	60
Obr.29. Možnosti menu- Edit	61
Obr.30. Změna parametru čar	61

Obr.31. Možnosti menu- View	62
Obr.32. Natočení grafu	62
Obr.33. Možnosti menu- Insert.....	63
Obr.34. Možnosti menu- Tools.....	63

