

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

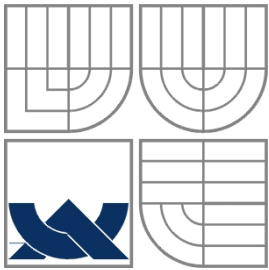
MODELOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE VE TKÁNI

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

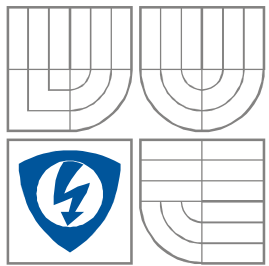
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN PORT

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

MODELOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE VE TKÁNI

MODELLING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN TISSUE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Martin Port

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské inženýrství a bioinformatika

Student: Bc. Martin Port
Ročník: 2

ID: 119740
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Modelování elektromagnetického pole ve tkáni

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Seznamte se s teorií šíření elektromagnetických polí v oblasti vkv. 2) Prostudujte vlastnosti biologických tkání a jejich interakce s elektromagnetickými poli v rozsahu vkv. Zaměřte se na hygienické limity v této oblasti. 3) Seznamte se s programovým prostředím Comsol a možnostmi modelových studií. 4) Vypracujte modelovou studii tepelných změn v mozkové tkáni při šíření signálů mobilního telefonu. 5) Stanovte rozsah tepelných změn v lebeční kosti a mozku. 6) Zhodnoťte dosažené výsledky s ohledem na hygienické limity a výsledky vhodně prezentujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] NOVAČEK, Z. Elektromagnetické vlny, antény a vedení. VUT FEKT, Brno, 2006, ISBN 80-214-3301-9.
[2] Comsol Multiphysics v 3.4a - user manual.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Modelování elektromagnetického pole ve tkáni jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této s diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 12. května 2013

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce **doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc.** Za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 12. května 2013

.....
(podpis autora)

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou modelování elektromagnetického pole ve tkáni a je zaměřena na poznatky z teorie elektromagnetického pole. Maxwellovými rovnicemi a jejich řešení je popsáno šíření rovinné vlny ve volném prostředí. Dále se věnuje nejvyšším přípustným hodnotám měrného absorbovaného výkonu a hygienickým limitům vycházející z norem platných v České republice o ochraně zdraví před neionizujícím zářením podle nařízení vlády č. 106/2010 Sb. Také se zabývá programovým prostředím COMSOL Multiphysics v 4.2 pro řešení fyzikálního modelování a simulaci. Nachází se zde také radiofrekvenční modul, který je využíván pro modelování. Práce se zmiňuje podrobně o menu tohoto programu a nejdůležitější části - Modelu Builder.

KLÍČOVÁ SLOVA

Maxwellovy rovnice, elektromagnetické pole, rovinné vlny, vlnová rovnice, TEM vlna, SAR, fyziologické účinky, COMSOL Multiphysics, Model Bilder

ABSTRACT

This thesis is an introduction to the modeling of electromagnetic fields in the tissue and is focused on the knowledge of electromagnetic field theory. Maxwell's equations and their solutions are described the spread of plane waves in the environment. It also discusses the exposure limit values of specific absorbed power and hygienic limits based on the standards in force in the Czech Republic on health protection against non-ionizing radiation in accordance with Government Regulation No. 106/2010 Coll. It also deals with the software interface in COMSOL Multiphysics 4.2 for solving physical modeling and simulation. There is mention of the RF module, which is used for modeling. Work mentions in detail about the menu of the program and the most important part - the Model Builder.

KEYWORDS

Maxwell's equation, electromagnetic field, plane wave, wave equation, TEM wave, SAR, physiological effects, COMSOL Multiphysics, Model Builder

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690:

PORT, M. *Modelování elektromagnetického pole ve tkáni*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2013. 54 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

OBSAH

1	Úvod do problematiky	1
2	Poznatky z teorie elektromagnetického pole	2
2.1	Maxwellovy rovnice	2
2.2	Řešení Maxwellových rovnic	5
2.3	Šíření rovinné vlny	7
2.4	Vlnová rovnice	8
2.5	Šíření TEM vlny	11
3	Hygienické limity	13
3.1	Nejvyšší přípustné hodnoty SAR	14
3.2	Fyziologické účinky elektromagnetického pole	17
4	COMSOL MULTIPHYSICS	20
4.1	Programové prostředí	21
4.2	Menu programu	22
4.2.1	Položka File	22
4.2.2	Položka Edit	23
4.2.3	Položka Options	24
4.2.4	Položka Help	24
4.3	Model Builder	25
4.3.1	Výběr fyzikálního prostředí	25
4.3.2	Zadání modelu	27
4.3.3	Geometrie modelu	27
4.3.4	Zadání modelu	28
4.3.5	Generování sítě	28
4.3.6	Výsledky a jejich zpracování	29
5	Antény mobilních telefonů	30
5.1	Typy antén systému GSM a jejich vyzařovací diagramy	30
5.2	Planární antény	32
5.3	Parametry GSM antén mobilních telefonů	37
6	Modelové řešení	39
6.1	Návrh modelu lidské tkáně	40
6.2	Nastavení parametrů modelu	41

6.3	Výpočet hodnoty SAR v lidské hlavě.....	42
6.4	Grafické řešení SAR	42
6.5	Grafické řešení teplotní změny tkáně	44
6.6	Dosažené výsledky	44
7	Závěr	46
	Literatura	47
	Seznam obrázků	50
	Seznam tabulek	51
	Seznam zkratk	52
	Seznam veličin	53

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Telekomunikační technika patří mezi nejvýznamnější a nejrychleji se rozvíjející technologické obory 21. století. Hlavním úkolem moderních komunikačních systémů vysokofrekvenční a mikrovlnné techniky je přenést digitální či analogová data, co největší rychlostí na potřebnou vzdálenost, v co nejkratším čase a pokud možno bez ztráty přenášené informace. S rozvojem šíření elektromagnetických vln ve volném bezdrátovém prostředí se začíná mluvit o "bezdrátové revoluci", která ulehčuje život všem jejím každodenním uživatelům. Přenos probíhá tak, že na jedné straně je vysílač, kterým je elektromagnetická vlna vyzářena do volného prostředí a která se dále šíří k přijímači rychlostí světla. Přijímačem je pak určitá část vyzářeného výkonu zachycena anténou ve formě vlny. Takto probíhá přenos dat pro mobilní komunikaci při použití dvou antén.

Pro objasnění základních pojmů a vztahů zde bude probрана problematika elektromagnetického stacionárního a nestacionárního pole v oblasti velmi krátkých vln. Následující kapitoly se budou zabývat hygienickou normou vztahující se k ochraně před neionizujícím zářením a jejich účinky na lidský organismus. Dále bude součástí semestrální práce seznámit se s programovým prostředím COMSOL Multiphysics a s možnostmi jeho modelových studií.

Také bude zapotřebí prostudovat problematiku vyzařování mikropáskových antén, vyzařování jejich diagramů a to především ve frekvenčním rozsahu mobilních telefonů, jejichž frekvence se pohybuje v rozmezí 835 - 1900 MHz. Všechny tyto informace budou využity pro modelovou studii tepelných změn při aplikaci mobilního telefonu na biologickou tkáň. Důležité bude zjistit, jaký dopad bude mít elektromagnetické vlnění na lidskou tkáň.

2 POZNATKY Z TEORIE ELKTROMAGNETICKÉHO POLE

Tato kapitola bude pojednávat o teorii elektromagnetického pole založené na platnosti Maxwellových parciálních diferenciálních rovnic a jejich analytickém řešení. Dále bude následovat popis šíření rovinné vlny v dielektriku a jejich vlnové rovnice pro ztrátové a bezztrátové prostředí. Nakonec se tato kapitola bude zabývat problematikou šířené TEM vlny ve volném prostředí.

2.1 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy 1. až 4. rovnice mohou být vyjádřeny dvěma způsoby, v diferenciálním a integrálním tvaru, [20], [21]:

A) Integrální tvar pro plochy a objemy:

1. Maxwellova rovnice vyjadřuje Faradayův indukční zákon. Cirkulace vektoru E po orientované křivce l je rovna záporně vzaté časové změně magnetického toku procházející plochou ohraničenou křivkou l :

$$\int_l \bar{E} d\bar{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

2. Maxwellova rovnice vyjadřuje Ampérův zákon celkového proudu. Cirkulace vektoru H po orientované křivce l je rovna celkovému vodivému proudu I a posuvnému proudu $d\psi/dt$, který prochází v kladném směru plochy, ohraničené křivkou l :

$$\oint_l \bar{H} d\bar{l} = \sum I + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.2)$$

3. Maxwellova rovnice vyjadřuje zákon kontinuity siločar magnetické indukce, kde výtok vektoru magnetické indukce B je z uzavřené plochy vždy roven nule:

$$\int_s \bar{B} d\bar{S} = 0 \quad (2.3)$$

4. Maxwelllova rovnice vyjadřuje Gaussovu větu elektrostatiky pro tok elektrické indukce, kde výtok vektoru indukce D je roven celkovému náboji v objemu V , který je uzavřený plochou S :

$$\oint_S \bar{D} d\bar{S} = \sum Q \quad (2.4)$$

kde: ψ [C] - tok intenzity elektrického pole,

Φ [Wb] - magnetický tok,

I [A] - indukční proud volných nábojů procházejících křivkou C ,

Q [C] - volný náboj obsažený v objemu obaleném plochou S , [2], [7], [9].

B) Diferenciální tvar pro jednotlivé body prostoru:

Rovnice z integrálního tvaru jsou převedeny na rovnice tvaru diferenciálního tak, že křivkový integrál na levé straně je převeden na plošný integrál rotace stejného vektoru. Veličiny na pravé straně jsou vyjádřeny plošnými integrály, [20], [21].

Pro pole stacionární, časově neproměnné, platí: že rychlost náboje v tomto poli je konstantní. Jedná se o pole stejnosměrných proudů. V Maxwellových rovnicích jsou sice vynechány derivace podle času, ale proudy jsou ponechány. Stacionární pole je popsáno následujícími rovnicemi, [16], [20], [21]:

1. Maxwelllova rovnice vyjadřuje, že v homogenním vodiči protékaném stacionárním proudem je:

$$\text{rot} \bar{E} = 0 \quad (2.5)$$

2. Maxwelllova rovnice vyjadřuje vlastnosti magnetického pole stacionárních proudů:

$$\text{rot} \bar{H} = J_0 \quad (2.6)$$

3. Maxwelllova rovnice říká, že neexistují magnetické náboje. Toto pole je nezářivé:

$$\text{div} \bar{B} = 0 \quad (2.7)$$

4. Maxwelllova rovnice: elektrické pole homogenního vodiče protékaného

stacionárním proudem. Toto pole je nezřídlové a nevírové:

$$\operatorname{div}\bar{D} = \rho_0 \quad (2.8)$$

Pro pole nestacionární, časově proměnné, platí: že při výpočtu časově proměnného pole ve vodičích lze zanedbat posuvné proudy, ale je zapotřebí respektovat proudy vodivé, které jsou spojené s indukčním zákonem. Tato pole ve vodičích jsou popsána následujícími rovnicemi, [9], [16], [20], [22]:

1. Maxwelllova rovnice říká, že při časové změně proměnného magnetického pole je elektrické pole vírové a podél vírů je možno měřit napětí:

$$\operatorname{rot}\bar{E} + \frac{\partial\bar{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

2. Maxwelllova rovnice říká, že magnetické pole je vyvoláno měnicím se elektrickým polem:

$$\operatorname{rot}\bar{H} - \frac{\partial\bar{D}}{\partial t} = J_0 \quad (2.10)$$

3. Maxwelllova rovnice říká, že siločáry magnetického pole jsou uzavřené křivky. Neexistují magnetické náboje a magnetické pole je vždy vírové a nezřídlové:

$$\operatorname{div}\bar{B} = 0 \quad (2.11)$$

4. Maxwelllova rovnice: siločáry elektrického pole začínají i končí v tom prostoru, kde je soustředěn elektrický náboj. Zdrojem takového to elektrického (zřídlového) pole je náboj (zřídlo):

$$\operatorname{div}\bar{D} = \rho_0 \quad (2.12)$$

kde: \bar{E} [V/m] - intenzita elektrického pole,

\bar{H} [A/m] - intenzita magnetického pole,

\bar{B} [T] - magnetická indukce,

\bar{D} [C/m²] - elektrická indukce,

ρ_0 [A/m³] - hustota elektrického náboje,

J_0 [A/m²] - hustota vodivého proudu, [1], [9], [12],[16].

2.2 Řešení Maxwellových rovnic

Při řešení Maxwellových rovnic je zapotřebí vycházet z poznatku, že se jedná o diferenciální parciální rovnice 2. řádu a jejich analytické řešení. Proto bude výsledkem matematicky nekonečně mnoho řešení. Tohoto předpokladu je užíváno pro zobecnění vlnových rovnic i k zobecnění rovnic, které jsou nehomogenní, [9].

Pro řešení, kdy Maxwellovy rovnice budou obsahovat pouze vektory E a B tedy, [9]:

$$\operatorname{rot}\bar{B} = \mu\gamma + \mu\varepsilon \frac{\partial\bar{E}}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\operatorname{rot}\bar{E} = -\frac{\partial\bar{B}}{\partial t} \quad (2.14)$$

Není použit cizí zdroj a jím vnutený proud J_{vn} , ale proud indukovaný ve vodivém prostředí samotným polem $J=\gamma E$. Dalším předpokladem je i elektrická neutralita prostředí a její nenarušený trvalý přívádění náboje ρ_0 , což je náboj, který mizí ve vodičích po krátké relaxační době a je určen rovnicí, [9]:

$$\rho_0 = \operatorname{div}\frac{\bar{D}}{\varepsilon} = \operatorname{div}\bar{E} = 0 \quad (2.14)$$

Dále je z rovnice vyloučena magnetická indukce \bar{B} a ta je aplikována na druhou rovnici operace rot, [9]:

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\bar{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\operatorname{rot}\bar{B} \quad (2.15)$$

Dosazením za rot \bar{B} z první rovnice se získá, [9]:

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\bar{E} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2\bar{E}}{\partial t^2} + \mu\gamma \frac{\partial\bar{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

Výraz $\operatorname{rot}\operatorname{rot}\bar{E}$ se v obecné souřadné soustavě vyjadřuje jako, [9]:

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\bar{E} = \operatorname{grad}\operatorname{div}\bar{E} - \nabla^2\bar{E} = -\nabla^2\bar{E} \quad (2.17)$$

Následně jsou získány 2 zobecněné vlnové rovnice, [9]:

1. Zobecněná vlnová rovnice, pro pravoúhlou soustavu, platí:

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.18)$$

2. Zobecněná vlnová rovnice, kdy je vyloučena intenzita elektrického pole \bar{E} :

$$\nabla^2 \bar{B} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.19)$$

V oblasti uvažovaného prostoru existuje proud J_{vn} vnucený cizím zdrojem. Příkladem může být proud ve vysílací anténě neovlivněný zpětným účinkem samotného pole. Hustotu náboje lze uměle udržovat na nenulové hodnotě. V tomto případě je nutné do první rovnice doplnit napravo μJ_{vn} . Poté jsou zapsány ve tvaru nehomogenní zobecněné vlnové rovnice, [9]:

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \mu \frac{\partial J_{vn}}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \text{grad} \rho_{vn} \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 \bar{B} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = -\mu \text{rot} J_{vn} \quad (2.21)$$

kde: ϵ [F/m] - permitivita,

μ [H/m] - permeabilita,

γ [S/m] - konduktivita,

J_{vn} - proud vnucený cizím zdrojem, [9].

Analytické řešení soustavy rovnic:

1. *Volba souřadné soustavy:* podle očekávaného tvaru řešení je zvolen kartézský, polární, válcový nebo kulový souřadný systém.
2. *Formulace předpokladů:* podle možností jsou zavedeny předpoklady o vlastnostech pole - některé složky intenzity pole mohou být nulové nebo se v určitém směru nemění, a proto jejich derivace je v tomto směru nulová.
3. *Rozepsání vztahů do složkového tvaru:* dosazením do těchto výše zmíněným předpokladů se může jejich počet zredukovat a usnadnit tak jejich řešení.
4. *Sestavení rovnic pro jednotlivé neznámé:* matematickou úpravou je potřeba

sestavit z rovnic z bodu 3 diferenciální rovnice pro jednotlivé neznámé a ty se řeší vhodným postupem.

5. *Řešení jednotlivých rovnic:* pokud tyto rovnice obsahují jen jednu nezávisle proměnnou, řeší se přímo. V opačném případě je využívána metoda separace proměnných.
6. *Určení integračních a separačních konstant:* z okrajových podmínek jsou určeny hodnoty integračních a separačních konstant, [6], [18], [19].

2.3 Šíření rovinné vlny

Pro objasnění elektromagnetického pole je řešením nalezení rovnice v homogenním prostředí, kterým je rovinná vlna. Pro zjednodušení rovnice je předpokladem, že všechny složky intenzity elektrického pole \bar{E} jsou závislé pouze na jedné souřadnici osy z . Přepsáním zobecněné vlnové rovnice (2.18), lze přímo získat rovnici ve fázovém tvaru, [9], [20], [24], [28]:

$$\frac{d^2 \bar{E}}{dz^2} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (2.22)$$

kde k , je konstanta šíření, [18], [19], [28]:

$$k = \alpha - j\beta = \sqrt{-j\omega\mu(\gamma + j\omega\epsilon)} \quad (2.23)$$

Obecné řešení rovnice (2.22) je zapsáno pomocí exponenciální funkce, [18], [19], [28]:

$$\bar{E} = Ae^{-jkz} + Be^{jkz} \quad (2.24)$$

Dosazením konstanty šíření k do prvního členu rovnice (2.24), který popisuje šíření vlny ve tvaru, [18], [19], [28]:

$$\bar{E} = Ae^{-j(\alpha - \beta z)} = Ae^{-\beta z} e^{-j\alpha z} \quad (2.25)$$

Pro rovinné vlny v dielektriku je určeno zjednodušení v případě, že se do výsledků dosadí za $\gamma=0$. Tím je získána konstanta šíření k , která je reálná kladná. Intenzita elektrického pole \bar{E} je měněna v čase. Řešením rovnice (2.22) je harmonická vlna, která prochází prostředím v kladném směru osy z , [9], [19], [28]:

$$Ee^{j\alpha z} = Ae^{-jkz}e^{j\alpha z} = Ae^{-\beta z}e^{j(\alpha z - \beta z)} \quad (2.26)$$

kde $\beta [m^{-1}]$ - měrný útlum,
 $\alpha [rad \cdot m^{-1}]$ - měrná fáze,
 $\omega [rad \cdot s^{-1}]$ - úhlový kmitočet,
 A, B - integrační konstanty, [9], [19], [28].

Výše zmíněná rovnice (2.26) obsahuje člen e^{-jkz} , který určuje změnu fáze vlny ve směru šíření dráhy z , a složka vlnového čísla α je měrná fáze, která udává zpoždění fáze vlny. Dále obsahuje složku vlnového čísla β , což měrný útlum. Proto lze říci, že se jedná o vlnu tlumenou. Složka α určuje spolu s ω fázová rychlost $v_f [m \cdot s^{-1}]$. Vektory E a H jsou v prostoru na sebe kolmé a jsou kolmé i na směr šíření, [9], [19], [28].

Charakteristická impedance prostředí Z:

Nezávisí na kmitočtu a je reálná. Je popsána poměrem fázorů E/H v rovnici v následujícím tvaru, [9], [19], [20], [25]:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{(\gamma + j\omega\epsilon)}} \quad (2.27)$$

2.4 Vlnová rovnice

A. Homogenní vlnové rovnice pro bezztrátové prostředí:

Elektrické pole vznikající v určitém místě nezaplňuje celý prostor, ale šíří se konečnou rychlostí, která závisí na vlastnostech prostředí. Obecný tvar vlnové rovnice v bezztrátovém prostředí bez zdrojů je dán vztahem [20]:

$$\Delta U - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (2.28)$$

Vlnové rovnice v homogenním prostředí bez volných nábojů jsou popsány pro vektor E ve tvaru, [20]:

$$\text{rot}\bar{E} = -j\omega\mu\bar{H} \quad (2.29)$$

$$\text{div}\bar{E} = 0 \quad (2.30)$$

$$\text{rot}\bar{H} = (\gamma + j\omega\epsilon)\bar{E} \quad (2.31)$$

$$\operatorname{div}\bar{H} = 0 \quad (2.32)$$

Z rovnice (2.29) je vyloučen vektor H tak, že je na obě strany aplikován operátor rot , [20]:

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\bar{E} = -j\omega\mu\operatorname{rot}\bar{H} \quad (2.33)$$

Na pravou stranu je dosazena rovnice (2.31) a tím je získána ze dvou diferenciálních rovnic 1. řádu rovnice 2. řádu, [20]:

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\bar{E} = -j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon)\bar{E} \quad (2.34)$$

Dále je zavedena konstanta šíření k , která je dána vztahem, [20] :

$$k^2 = -j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon) \quad (2.35)$$

Operátor $\operatorname{rot}\operatorname{rot} = \operatorname{grad}\operatorname{div} - \nabla^2$ je rozepsán na, [20]:

$$\operatorname{grad}\operatorname{div}\bar{E} - \nabla^2\bar{E} = k^2\bar{E} \quad (2.36)$$

Tím je získán konečný výraz homogenní vlnové rovnice s použitím rovnice (2.30) pro komplexní vektor E ve tvaru, [20]:

$$\nabla^2\bar{E} + k^2\bar{E} = 0 \quad (2.35)$$

Časový tvar vlnové rovnice pro bezztrátové prostředí vektoru E je pak, [20]:

$$\nabla^2\bar{E} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.36)$$

Obdobné odvození vlnové rovnice pro vektor H a její časový tvar. Operátor rot je aplikován na rovnici (2.31) a s použitím rovnice (2.32) je dána tvarem, [20]:

$$\nabla^2\bar{H} + k^2\bar{H} = 0 \quad (2.37)$$

$$\nabla^2\bar{H} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\bar{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.38)$$

B. Homogenní vlnová rovnice pro ztrátové prostředí:

Bude se vycházet ze základních rovnic pro ztrátové prostředí, popsanych těmito dvěma rovnicemi, [20]:

$$\bar{E} = E_y u_y = E_0 e^{-jkx} u_y \quad (2.39)$$

$$\bar{H} = H_z u_z = \frac{E_0}{Z} e^{-jkx} u_z = H_0 e^{-jkx} u_z \quad (2.40)$$

kde: E_0 - integrační konstanta, udávající intenzitu v rovině $x=0$,
 $u_{y,z}$ - vektory směru šíření vlny v ose y a z .

Dosažením impedance prostředí Z a konstanty šíření k do rovnic (2.39) a (2.40), jsou získány rovnice ve tvaru, [20]:

$$\bar{E} = E_0 e^{-j\alpha x} e^{-\beta x} u_y \quad (2.41)$$

$$\bar{H} = \frac{E_0}{Z} e^{-j(\alpha x + \varphi_v)} e^{-\beta x} u_z \quad (2.42)$$

kde: φ_v - úhel vlnové impedance.

C. Nehomogenní vlnové rovnice

Zdrojem elektromagnetických vln je vysokofrekvenční proud, který teče v prostoru na vysílací anténě. Jedná se o zjištění intenzity polí, které vytváří proud. Řešením jsou nehomogenní soustavy Maxwellových rovnic dány ve tvaru, [19]:

$$\text{rot} \bar{H} = J + j\omega \epsilon \bar{E} \quad (2.43)$$

$$\text{rot} \bar{E} = -j\omega \mu \bar{H} \quad (2.44)$$

Protože divergence rotace je rovna nule, je vektorový potenciál definován vztahem, [19]:

$$\bar{B} = \text{rot} A \quad (2.45)$$

Dosažením rovnice (2.45) do pravé strany Maxwellovy rovnice (2.29) lze dostat rovnici ve tvaru, [19]:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -j\omega \operatorname{rot} A \quad (2.46)$$

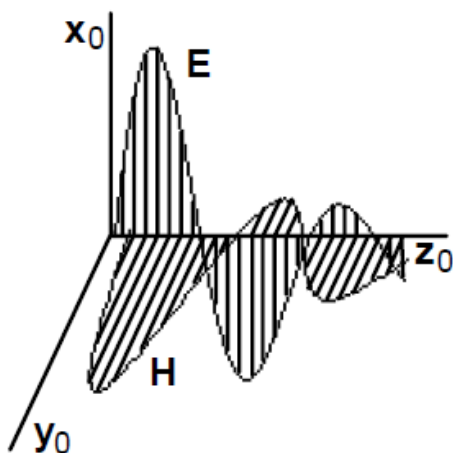
Řešení této soustavy je možné pomocí Kirchhoffovy metody. V prvním kroku se přejde od intenzit elektrických \bar{E} a magnetických \bar{H} polí na vektorový potenciál A substitucemi rovnic (2.45) a (2.46). Výsledné rovnice jsou získány ve tvaru nehomogenní vlnové rovnice, [19]:

$$\nabla^2 A + k^2 A = -\mu J \quad (2.47)$$

2.5 Šíření TEM vlny

Rovinná vlna se ve volném prostoru vyznačuje tím, že je příčně transversálně elektromagnetická (TEM). Vektory elektrické a magnetické intenzity nemají podélné složky, protože jsou rovnoběžné se směrem šíření a jsou nulové. Dále existují vlny transversálně elektrické (TE), které mají elektrickou intenzitu příčnou na směr šíření. Transverzálně magnetická vlna (TM) s nenulovou složkou elektrické intenzity E ve směru šíření vlny, [19], [20], [28], [29], [30].

Velikost vektorů E a H je znázorněna na obrázku č. 1 v časovém okamžiku t_0 na ose z . Vzhledem k charakteru této vlny, platí obrázek pro libovolnou rovnoběžku s osou z . Obrázek je nakreslen pro ztrátové prostředí. Elektrická a magnetická intenzita jsou navzájem fázově posunuty a proto jejich amplituda ve směru šíření klesá [28].



Obrázek č. 1: Rovinné vlny ve volném prostředí (převzato z [28]).

Při analýze poměrů na vedení se užívají dva základní přístupy, [19], [28]:

- a) *elektromagnetický přístup* - je hledáno rozložení vektorů E a H na strukturu realizující požadované okrajové podmínky. Z výsledků se určí rozložení napětí

U a proudu I v jednotlivých místech vedení. Tímto postupem jsou získány obecné a úplné výsledky, zahrnující i různé vidy, které se mohou na vedení šířit. Příkladem je analýza rozložení pole v koaxiálním vedení,

- b) *klasická teorie vedení* - odvozuje rozložení napětí U a proudu I na vedení přímo z obvodového modelu vedení. Platnost výsledků je omezena na elementární situace, které postihuje použitý obvodový model vedení. I přes omezení dává klasická teorie jednoduché a technicky velmi důležité výsledky.

3 HYGIENICKÉ LIMITY

V současné době je platným legislativním opatřením, podle kterého se Česká republika řídí v oblasti ochrany veřejného zdraví před neionizujícím zářením a s ním spojenými nejvyššími přípustnými hodnotami SAR (měrný absorbovaný výkon) nařízení vlády č. 106/2010 Sb., které novelizuje nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Cílem této kapitoly je také stanovit hodnotu SAR, popsat fyziologické účinky elektromagnetických polí a jejich interakce v biologické tkáni.

Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením

Toto vládní nařízení uvádí nejvyšší přípustnou hodnotu expozice neionizujícímu záření ve vztahu k zaměstnancům. Jedná se o hygienický limit neionizujícího záření podle zákona o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci. Toto nařízení zpracovává příslušný předpis a upravuje, [10]:

- a) hygienické limity neionizujícího záření, metody a způsob jejich zjišťování a hodnocení a minimální rozsah opatření k ochraně zdraví při práci,
- b) nejvyšší přípustné hodnoty expozice fyzických osob v komunálním prostředí (dále jen „ostatní osoby“) neionizujícímu záření, způsob jejího zjišťování a hodnocení,
- c) hodnocení rizika neionizujícího záření ve frekvenční oblasti od 0 Hz do $3 \cdot 10^{11}$ Hz ,
- d) případy označení míst, ve kterých expozice může překročit nejvyšší přípustné hodnoty, výstrahou,
- e) minimální rozsah informací pro zaměstnance o ochraně zdraví při práci spojené s expozicí neionizujícímu záření.

Nejvyšší přípustné hodnoty expozice neionizujícímu záření

- a) neionizujícím zářením statická magnetická a časově proměnná elektrická, magnetická a elektromagnetická pole a záření s frekvencemi od 0 Hz do $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz ,

- b) nejvyššími přípustnými hodnotami mezní hodnoty expozice, které vycházejí přímo z prokázaných účinků na zdraví a z údajů o jejich biologickém působení a jejichž dodržování zaručuje, že osoby, které jsou vystaveny neionizujícímu záření, jsou chráněny proti všem známým zdraví škodlivým účinkům,
- c) referenčními hodnotami velikosti přímo měřitelných parametrů, kterými jsou intenzita elektrického pole, intenzita magnetického pole a magnetická indukce, [10].

Hodnocení rizika neionizujícího záření

Při hodnocení rizika neionizujícího záření ve frekvenční oblasti od 0 Hz do $3 \cdot 10^{11}$ Hz zaměstnavatel přihlíží zejména, [10]:

- a) k intenzitě, frekvenčnímu spektru, trvání a typu expozice,
- b) k nejvyšším přípustným hodnotám a referenčním úrovním,
- c) ke všem účinkům na zdraví a bezpečnost obzvláště ohrožených zaměstnanců, zejména mladistvých zaměstnanců a těhotných zaměstnankyň,
- d) ke všem nepřímým účinkům, jakými jsou:
 1. rušení elektronických a zdravotnických přístrojů a zařízení včetně kardiostimulátorů a jiných implantovaných lékařských elektronických zařízení,
 2. rizika spojená s vymrštěním feromagnetických předmětů působením statického magnetického pole s magnetickou indukcí vyšší než 3 mT ,
 3. nebezpečí zážehu elektricky ovládaných detonátorů,
 4. požáry a exploze v důsledku zapálení hořlavých materiálů jiskrami způsobenými indukovanými nebo kontaktními proudy nebo jiskrovými výboji,
- e) k existenci záložního zařízení určeného ke snížení expozice elektromagnetickým polím,
- f) k odpovídajícím informacím získaným ze zdravotního dohledu prováděného zařízením závodní preventivní péče včetně zveřejněných informací,
- g) k expozici z několika zdrojů,
- h) k současné expozici polím s různými kmitočty.

3.1 Nejvyšší přípustné hodnoty SAR

Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu (**SAR**) jsou stanoveny v tabulce č. 1. Tyto nejvyšší přípustné hodnoty se vztahují na celkovou absorpci všech

přítomných složek elektromagnetického pole v lidských tkáních v intervalu frekvencí od hodnoty 100 kHz do hodnoty 10 GHz, [10].

Tabulka č. 1: Nejvyšší přípustné hodnoty SAR (převzato z [10]).

Měrný absorbovaný výkon (SAR) ** - nejvyšší přípustné hodnoty			
Platí pro frekvence Od 10^5 Hz do 10^{10} Hz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - středovaný pro kterýkoliv šestiminutový interval a celé tělo	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g ^{*)} tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g ^{*)} tkáně rukou, zápěstí, chodidel a kotníků
Zaměstnanci	0,4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg
Ostatní osoby	0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg

^{*)} 10 g tkáně je třeba volit ve tvaru krychle, nikoli jako plochý útvar na povrchu těla.

^{**)} Pro expozici osob pulsům kratším než 30 μ s při frekvenci 300 MHz až 10 GHz se doporučuje zavést dodatečné omezení 10 mJ/kg průměrných pro 10 g tkáně pro měrnou absorbovanou energii.

Doba středování pro měrný absorbovaný výkon je přibližně šest minut. Při krátkodobé expozici (kratší než šest minut) není tedy nejvyšší přípustná hodnota měrného absorbovaného výkonu překročena, je-li pro zaměstnance splněna nerovnost, [10]:

$$\sum_i (SAR_i \cdot t_i) \leq 2,4W \cdot \text{min} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.1)$$

a pro ostatní osoby nerovnost, [10]:

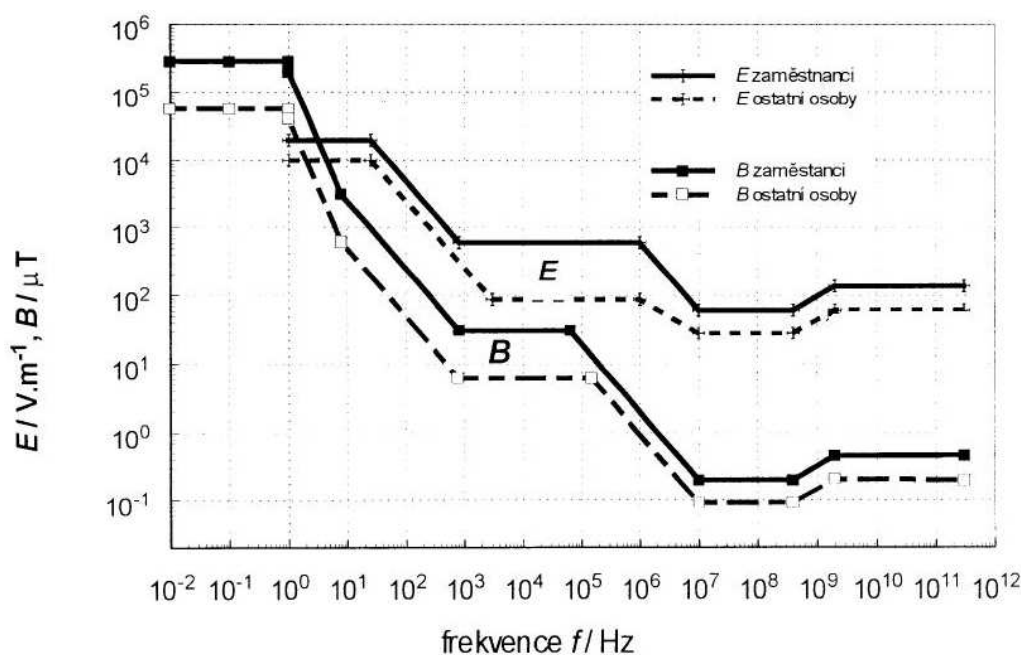
$$\sum_i (SAR_i \cdot t_i) \leq 0,48W \cdot \text{min} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.2)$$

SAR_i je měrný absorbovaný výkon při i-té expozici ve $W \cdot \text{kg}^{-1}$ a t_i je doba trvání i-té expozice v minutách, [10].

K určení tepelného působení zdrojů s různými frekvencemi, které se uplatňuje při frekvencích vyšších než 100 kHz, je nutné vypočítat celkový měrný absorbovaný výkon sečtením příspěvků SAR_i od zdrojů s frekvencemi z intervalu od 100 kHz do 10 GHz a celkovou hustotu zářivého toku sečtením příspěvků S_j od zdrojů s frekvencemi z intervalu od $f > 10$ GHz do 300 GHz. Nejvyšší přípustná hodnota není překročena, je-li

součet poměru celkového měrného absorbovaného výkonu k jeho nejvyšší přípustné hodnotě SAR_L a poměru celkové hustoty zářivého toku k její nejvyšší přípustné hodnotě S_L menší než jedna nebo roven jedné, [4],[10]:

$$\sum_{100kHz}^{10GHz} (SAR_i / SAR_L + \sum_{f>10GHz}^{300GHz} S_j / S_L \leq 1 \quad (3.3)$$



Obrázek č. 2: Referenční úrovně elektrického pole E a magnetické indukce B (převzato z [26]).

Měrný absorbovaný výkon (SAR)

Je definován jako časová derivace podílu diferenciálního množství energie dW a diferenciálního množství látky dm obsaženého v objemovém elementu dV s hustotou látky ρ , [4],[10]:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dW}{dm} \right) \quad (3.4)$$

kde SAR [W/kg] - měrný absorbovaný výkon.

Měrný absorbovaný výkon (**SAR**) je možné vyčíslit podle těchto rovnocenných vzorců [10]:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E_i^2}{\rho} \quad (3.5)$$

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt} \quad (3.6)$$

$$SAR = \frac{J^2}{\rho \cdot \sigma} \quad (3.7)$$

kde E_i [J/kg] - intenzita elektrického pole uvnitř tělesné tkáně,

σ [S/m] - elektrická vodivost tkáně těla,

c_i [J/kg·°C] - měrná tepelná kapacita tělesné tkáně,

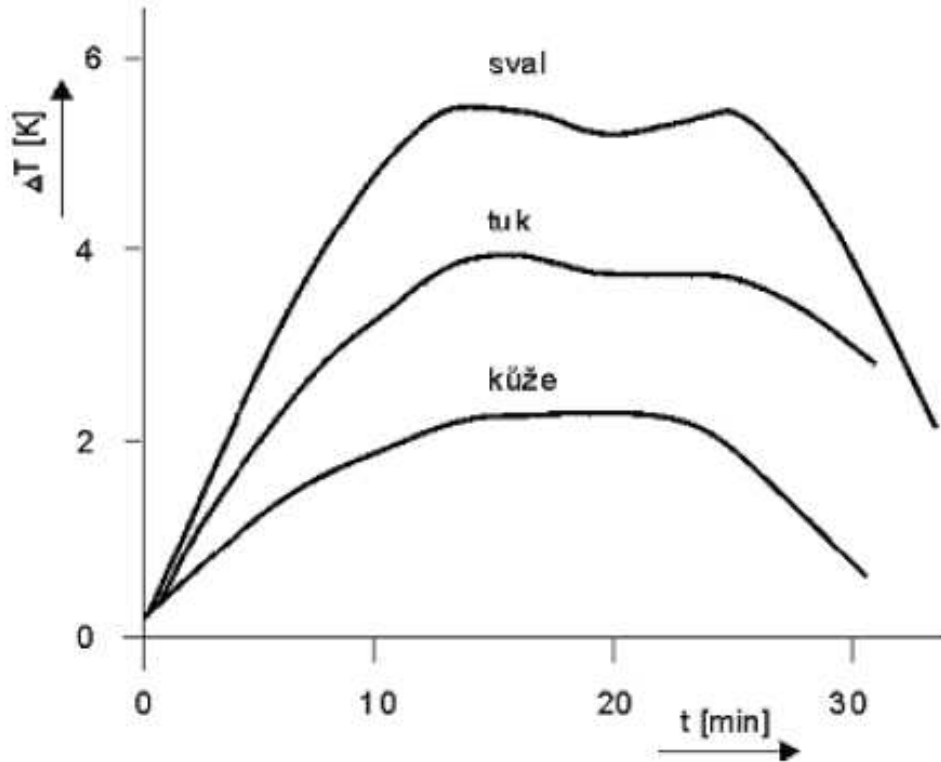
J [A/m²] - indukovaná proudová hustota v tělesné tkáni, [10].

3.2 Fyziologické účinky elektromagnetických polí

Fyziologické účinky nejsou doposud zcela objasněny i přes velké množství experimentálních dat a prací o vlivu vysokých frekvencí na živé organismy. Biologický účinek elektromagnetických vln závisí na fyzikálních jevech absorpce a indukce, které se projevují jako tepelné či netepelné účinky. Mezi těmito skupinami neexistuje žádná ostrá hranice. Hodnota střední výkonové hustoty se pohybuje v rozmezí 0,1- 1 W/m², kdy se pod touto hranicí vyskytují netepelné účinky a nad ní účinky tepelné [3], [5], [8], [11].

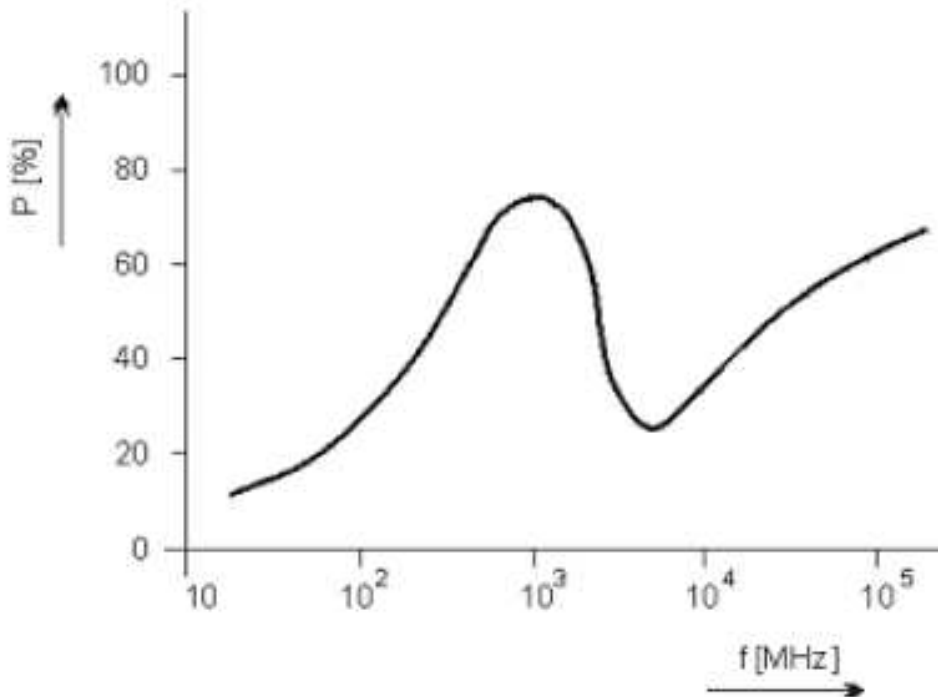
A. Tepelné účinky

Tepelné účinky elektromagnetických polí, které se projevují objektivně indikovatelným zvýšením teploty ozařovaných tkání, jsou závislé na množství pohlcené energie a na hloubce, ve které se záření absorbuje. Vlny v milimetrovém pásmu jsou pohlcovány v kůži. Naproti tomu decimetrové vlny pronikají více do hloubky. Čím vyšší je užitá pracovní frekvence, tím menší je hloubka vniku vlnění do tkání organismu. Výsledný tepelný efekt je závislý na rozměrech a tvaru biologických struktur, na možnostech jejich ochlazení protékající krví či odvodu tepla z povrchu těla (evaporací). Nejvíce jsou zahřívány hluboko uložené tkáně v břišní dutině (žaludek a střeva) a méně prokrvené orgány (játra a ledviny). Zásadní význam zde proto má termoregulační mechanismus organismu. Průběh změn teploty typických tkání při ozáření elektromagnetickým polem dokumentující adaptační schopnost organismu je uveden na obrázku č. 3, [3], [5], [8].



Obrázek č. 3: Oteplení tkáně v závislosti na době expozice (převzato z [5]).

Při celotělových modelových studiích respektujících konstituční parametry jedinců byla zjištěna závislost absorbovaného výkonu na frekvenci. Tato závislost je uvedena na obrázku č. 4, [3], [5], [8].



Obrázek č. 4: Frekvence závislosti absorbovaného výkonu (převzato z [8]).

Z fyziologického hlediska jsou rozlišovány dva konstituční typy, [3]:

- a) *Tepelně sytý*: jedná se o organismus, který rychle reaguje na teplo, avšak špatně ho snáší,
- b) *Tepelně hladový*: má těžší reakci a lepší tepelnou toleranci.

B. Netepelné účinky

Netepelné účinky elektromagnetických polí se vysvětlují pomocí elektromagnetické indukce, kvůli které vznikají v ozařovaných tkáních iontové proudy. Vlivem proudů se mění biologické vlastnosti buněčných membrán jako je např. permeabilita, klidový a akční potenciál - dráždivost. Význam indukčních jevů pro vodivé části roste při ozařování impulsními poli. Tento účinek se promítá do organismu centrálního a autonomního nervového systému, kardiovaskulárního systému, sekretorického (vyměšujícího) aparátu zažívacího traktu a v neposlední řadě do endokrinní soustavy, [3], [5], [8].

Při dlouhodobém ozařování elektromagnetickým polem o malých výkonových hustotách se to projeví na stavu centrální nervové soustavy. Změny mají povahu subjektivních stesků astenického typu (tělesné slabosti) jako je např. vyčerpanost, únava, pokles koncentrace, poruch spánku, bolesti hlavy a další. Objektivně se zjišťuje zvýšená potivost, lámání nehtů a padání vlasů, [3], [5], [8].

Biologické účinky elektromagnetických polí i podprahových hustot absorbovaného výkonu jsou kumulativní. Důkazem je poškození očí při přímém ozáření. Snížení plodnosti však nebylo prokázáno. Dále jsou to poruchy krevního oběhu se zvýšeným průtokem, snížením tlaku krve a změnou tepové frekvence, [3], [5], [8].

4 COMSOL MULTIPHYSICS

Programové prostředí COMSOL Multiphysics[®] 4.2 poskytuje softwarové řešení pro fyzikální modelování a simulaci. Jedná se o firmu založenou v roce 1986, ve Švédsku. COMSOL Multiphysics umožňuje modelování a simulaci fyzikálních procesů popsaných parciálními diferenciálními rovnicemi metodou konečných prvků. Program má k dispozici specializované moduly s definovanými parciálními diferenciálními rovnicemi a uživatelskými dialogy pro zadávání vlastností materiálů i okrajových podmínek. Také si zachovává komunikaci se systémem MATLAB, který je jeho jediným programovacím prostředím. Ve verzi 4.2 je k tomuto účelu třeba speciální modul **CFD**. Pomocí **CFD** Modulu lze simulovat různé úlohy zaměřené na chlazení elektroniky, tepelné výměníky, reaktory a další, [13], [14], [15].

4.1 Programové prostředí

Pro modelování elektromagnetického pole v biologické tkáni bylo zvoleno programové prostředí COMSOL Multiphysics, které umožňuje řešit fyzikální úlohy popsané parciálními diferenciálními rovnicemi prvního a druhého řádu s následným řešením metodou konečných prvků. Program dokáže modelovat multifyzikální děje v inženýrské praxi a v mnoha technických i vědeckých oborů, [15], [23].

Do řešení je možné zahrnout několik fyzikálních vlivů najednou, a proto tak lze provádět komplexnější analýzu modelu. COMSOL Multiphysics je úzce spojen s univerzálním nástrojem MATLAB. Funkce MATLABu je možné využívat pro kreslení geometrických tvarů, generování výpočetních sítí, numerickém řešení nebo při konečném zpracování výsledků řešené úlohy, [14], [23].

Postup modelování úlohy v programu COMSOL Multiphysics je pro biologickou tkáň nebo buňku generující pole zobrazen v grafickém editoru. Pokud se jedná o rozložení vysokofrekvenčního elektromagnetického pole v biologické tkáni, je zapotřebí zvolit proměnné z teorie elektromagnetického pole radiofrekvenčního modulu **RF** (RadioFrequency) modul, např. Maxwellovy rovnice, nebo vlnovou rovnici v specifickém tvaru, [23].

Pro modelování elektromagnetického pole v tkáni bude v diplomové práci využit popis radiofrekvenčního **RF** modulu, který umožňuje modelovat různá zařízení a usnadňuje tím návrh systémů pracujících s elektromagnetickým vlněním ve vysokých frekvencích. Tohoto se využívá při vytváření prototypů zařízení, které přenášejí, přijímají nebo zpracovávají elektromagnetické vlny ve frekvenčním rozsahu od

radiových do optických vln. Oblast použití je např. pro: model ukazující výpočet specifického absorbovaného výkonu v lidské hlavě při expozici mikropáskovou anténou a změnu teploty způsobenou absorpcí výkonu elektromagnetického záření, [23].

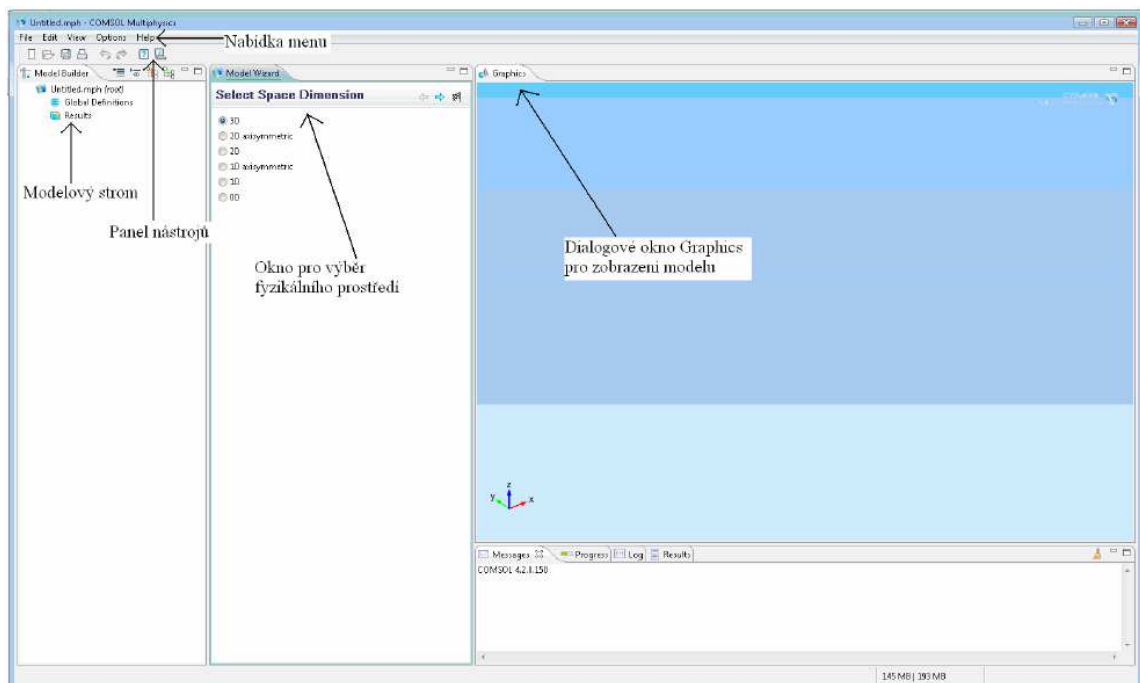
COMSOL Multiphysics obsahuje knihovny parciálních diferenciálních rovnic, definující různé aplikační režimy. Výběrem režimu se v grafickém editoru zobrazují příslušná dialogová okna pro zadávání vlastností a okrajových podmínek. COMSOL Multiphysics je systém, který uživateli umožňuje vytvářet si vlastní aplikační úlohy využitím obecného tvaru proměnných a slabých formulací pro různé části modelu. Vytváření těchto aplikací však vyžaduje výbornou znalost řešené úlohy i jejího matematického popisu, [23].

Pracovní postup při modelování úlohy v COMSOL Multiphysics lze popsat v následujících krocích, [14], [23]:

- a) *Geometrie* zkoumaného modelu je vytvořena **CAD** nástroji v grafickém editoru COMSOL Multiphysics nebo funkcemi z příkazové řádky programu MATLAB. Podkladem pro řešení úlohy mohou být také geometrické modely vytvořené v jiných **CAD** systémech.
- b) *Zadání okrajových podmínek a vlastností oblastí* v modelu je hlavní podmínkou při řešení úlohy. Různým částem geometrie, jako jsou oblasti, plochy ve 3D, hrany nebo body. Vytvářený model může obsahovat materiálové knihovny, do nichž je možné přidávat další materiály.
- c) *Geometrický model* s nastavenými okrajovými podmínkami je připraven pro generování výpočetní sítě, v jejíchž uzlových bodech budou vypočtena potřebná data. Výpočetní síť může být generována automaticky nebo lze vlastnosti sítě ovlivňovat nastavováním různých parametrů ve zvolených částech modelu.
- d) *Pro řešení modelu* obsahuje COMSOL Multiphysics několik typů řešičů, které řeší lineární i nelineární úlohy. Tyto úlohy jsou řešeny ve frekvenční a časové oblasti nebo to jsou úlohy se zvoleným parametrem. Pro řešení soustavy lineárních rovnic, se nabízí přímé nebo iterační řešiče.
- e) *Konečné zpracování výsledků* je provedeno mnoha způsoby. Multifyzikální úlohy obsahují různé typy vypočtených proměnných, proto je lze ve zvolených jednotkách zobrazovat současně. Toto zobrazení probíhá pomocí barevných map, izočar, izoploch, proudnic, šipek, částic nebo řezů.

4.2 Menu programu

V programu COMSOL Multiphysics ve verzi 4.2 se po spuštění zobrazí hlavní nabídka s názvem **Model Builder**. V **Model Builderu** se nachází všechny parametry vytvářeného modelu. Hlavní nabídka je organizována stromovou strukturou v okně **Model Builder**. Po spuštění programu se v horní části okna objeví nabídka čtyř položek: **File**, **Edit**, **Options** a **Help**. V grafickém okně se vedle **Modelu Builder** nachází ještě záložka **Model Wizard**, ve které lze navolit fyzikální prostředí při řešení dané problematiky viz obrázek č. 5. V pravé části našeho pracovního prostoru se nachází oblast, kde se budou zobrazovat výsledky řešeného modelu. Nyní se podívejme podrobněji na jednotlivé položky menu, [15], [27].



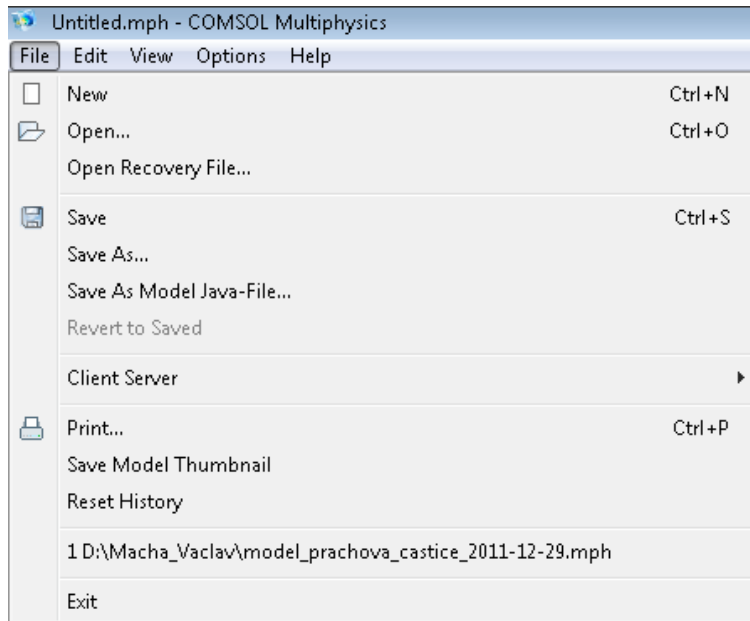
Obrázek č. 5: Grafické okno s výběrem fyzikálního prostředí (převzato z [27]).

4.2.1 Položka File

Nabídka **File** obsahující položky pro otevření nebo ukládání souborů. Dále jsou zde nalezeny položky pro práci se soubory, jako jsou, [15], [27]:

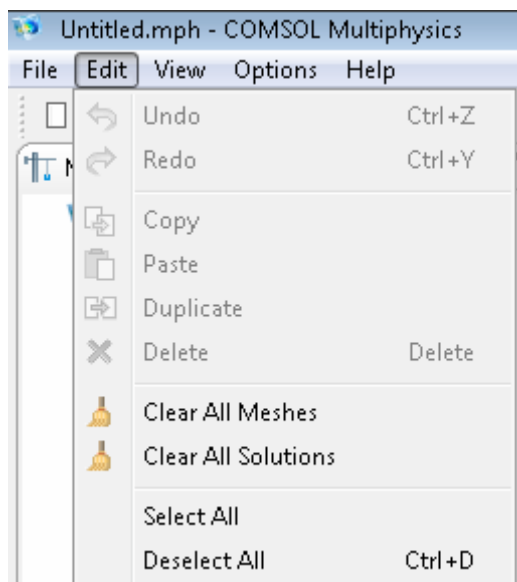
- **New** - umožní vytvořit nový prázdný soubor,
- **Open** - pro otevření libovolného souboru z **PC**,
- **Save, Save As, Save As Model Java-File** - těmito položkami jsou uloženy soubor do jakékoliv složky v **PC** nebo do přenosných zařízení jakou jsou např. **FlashDisky**. Vytvořené modely je možné ihned importovat nebo exportovat

pomocí položky **Client Server**. Položkou **Print** je vytvořený soubor vytisknut. V dolní části **Menu File**, jsou zobrazeny naposledy otevřené soubory, jejichž seznam můžeme vymazat položkou **Reset History**.



Obrázek č. 6: Grafické okno položky File (převzato z [27]).

4.2.2 Položka Edit



Obrázek č. 7: Grafické okno položky Edit (převzato z [27]).

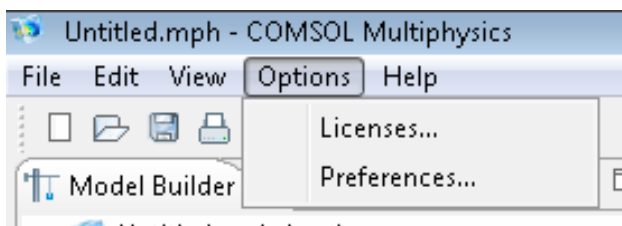
Nabídka **Edit** nabízí položky pro jednoduché funkce při práci s modelem jako je o vyjmutí, kopírování, vložení nebo vymazání. Stručný popis položek menu **Edit**, [27]:

- **Undo** - vrátí předchozí krok,
- **Redo** - zopakování naposledy provedeného kroku,
- **Copy** - kopírování potřebných modulů nebo obrázků,
- **Paste** - vkládání obrázků/modulů,
- **Duplicate** - vytvoření duplikátu, kopie obrázku, modulu,
- **Delete** - smazání všech označených objektů,
- **Clear All Meshes** - odstranění všech vytvořených sítí,
- **Clear All Solutions** - odstranění všech řešení,
- **Select All** - označení všech objektů na pracovní ploše,
- **Deselect All** - opačná funkce k **Select All**.

4.2.3 Položka Options

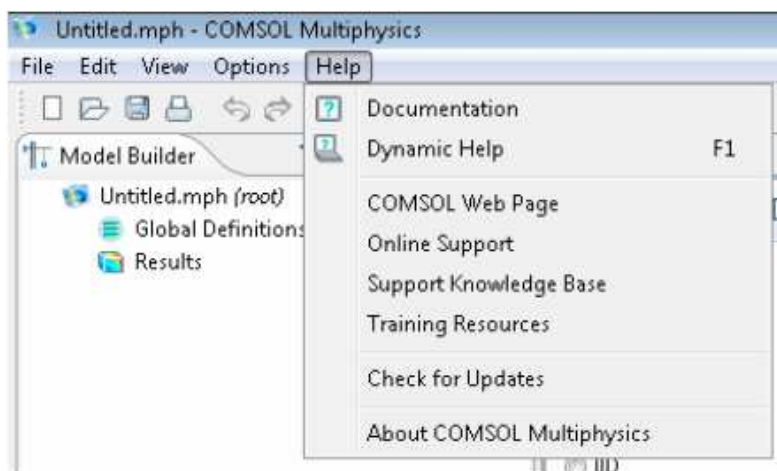
Menu **Options** nabízí tyto dvě položky, [15], [27]:

- **Licenses** - zobrazení přehledu modulů, které obsahuje licence programu,
- **Preferences** - nalezeny tabulky, ve kterých lze měnit nastavení programu (např.: jazyk, přesnost, velikost oken, místo uložení souboru, a další).



Obrázek č. 8: Grafické okno položky Options (převzato z [27]).

4.2.4 Položka Help



Obrázek č. 9: Grafické okno položky Help (převzato z [27]).

V této položce jsou uchovány informace o programu COMSOL Multiphysics a informace ohledně funkcí programu, a jeho podrobné dokumentace. Informace o modelech jsou k dispozici v položce **Documentation** a o funkcích programu v položce **Dynamic Help**. Další položky odkazují například na stránky COMSOLu nebo umožňují získat informace ohledně programu, [15],[27].

4.3 Model Builder

Okno **Model Builder** usnadňuje orientaci v komplikovaném modelu a ulehčuje práci v programovém prostředí COMSOL Multiphysics. Při vytváření modelu a zadávání fyzikálních vlastností jsou procházeny jednotlivé struktury. Do textových polí se zadávají jednotlivé parametry. Při zadávání parametrů se lze dostat do nastavení geometrického útvaru, sítě nebo konečného řešení fyzikálního popisu modelu, [27].

Okno **Graphics** zobrazuje grafický obraz modelu, který je vytvářen. Pro vyobrazení se používá geometrie, nagenерованá sítě nebo konečného řešení. Tento nástroj je využíván pro zlepšení náhledu na model nebo zvětšení či zmenšení objektu. Nejvíce jsou používány ikony, [15], [27]:

- **Zoom In** - zvětšení objektu,
- **Zoom out** - zmenšení objektu,
- **Go to View** - nahledy na objekt v různých kombinacích os.
- **Select Domains, Select Boundaries, Select Point** - zobrazení domén, hranic nebo bodů.
- **Image Snapshot** - vytvoření obrázku přímo z okna **Graphics**.

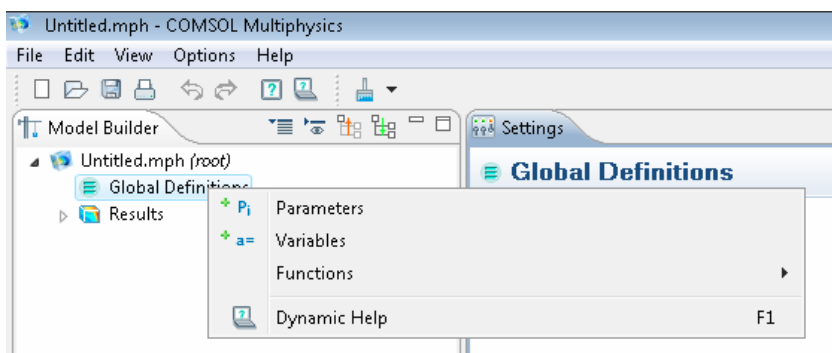
Vytvořené obrázky lze exportovat ve formátech: BMP, JPEG nebo PNG.

4.3.1 Výběr fyzikálního prostředí

Při vytváření modelu je zapotřebí vybrat fyzikální prostředí v okně **Model Builder**. V dialogovém okně **Model Builder** jsou zadávány hodnoty pro vytvoření nového modelu. **Model Builder** obsahuje ve svém modelovém stromě pouze název souboru. Na začátku zadávání modelu, obsahuje strom pouze dvě položky, [27]:

- **Global Definitions** - možnost zadání parametrů (**Parameters**), proměnných (**Variables**) a možnost přidání libovolné funkce (**Functions**). Při využívání předdefinovaných vlastností daného módu je nutné zadat požadované parametry.

U parametrů zapisujeme vždy název, výraz a hodnotu. Po přidání položky **Variables** se zobrazí editační okno, ve kterém jdou nastavit proměnné,

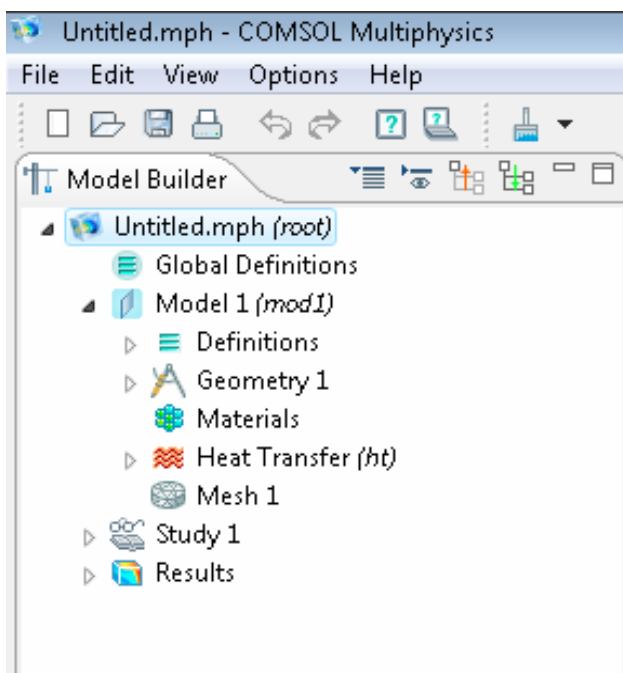


Obrázek č. 10: Nabídka položky Global Definitions (převzato z [27]).

- **Results** - pro zobrazení výsledků při vytváření modulů.

Vedle okna **Model Builder** se nachází záložka průvodce modelem (**Model Wizard**). Při realizaci modelu se vybere v záložce **Model Wizard** rozměr prostoru, ve kterém pracuje. Po zvolení se v záložce **Model Wizard** zobrazí dialogové okno pod názvem **Add Physics**, které slouží k vybrání i více aplikačních módů najednou, [27].

V posledním kroku nastavení fyzikálního prostředí lze vybrat z přednastavených nebo vlastních studií. Po výběru je modelový strom v záložce **Model Builder** rozšířen o položky: **Definitions**, **Geometry**, **Materials**, **Mesh** a **Study**. Pro tyto položky jsou nastavovány jednotlivé parametry, [27].



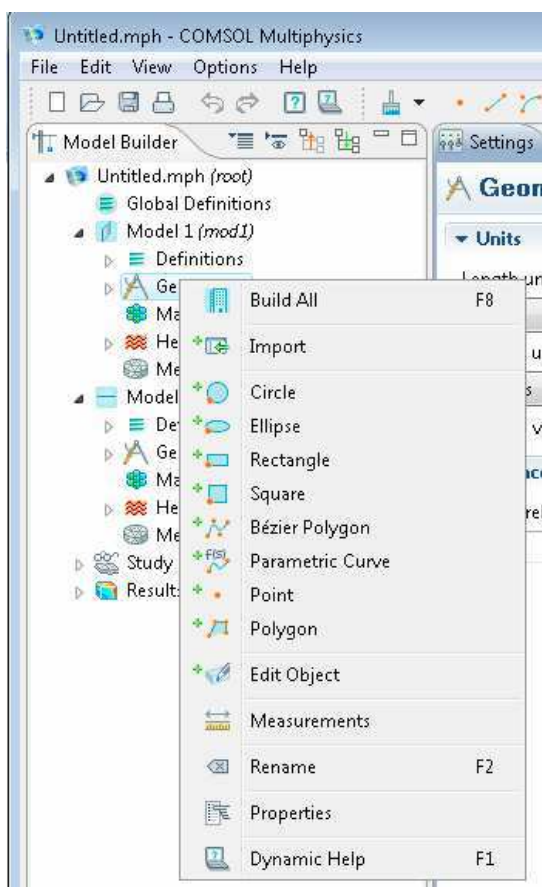
Obrázek č. 11: Modelový strom pro nastavení fyzikálního prostředí (převzato z [27]).

4.3.2 Zadání modelu

Při vytváření modelu se postupuje podle modelového stromu v položce **Definitions**. Zobrazené oblasti pomáhají při zadávání počátečních či okrajových podmínek, ve kterých lze pro každou oblast modelu zadávat jiné podmínky. Různé možnosti programu při zadávání náhledu na objekt. Položka **Definitions** obsahuje podsložky hranice systému (**Boundary System**) a náhled (**View**). Vlastnosti modelu jsou měněny v dialogovém okně **Settings**, [27].

4.3.3 Geometrie modelu

Pomocí položky **Geometry** v modelovém stromě je vytvářena geometrie. Nástroje této položky vytvoří objekt, který bude představovat fyzikální problém. Geometrii je tvořena dvěma způsoby. Prvním způsobem je vybrání příslušné funkce nebo nástroje ze zobrazené nabídky. Druhým způsobem je vytvoření geometrického obrazce pomocí ikon v panelu nástrojů. Panel nástrojů je tvořen tlačítkem **Toolbar**, které obsahuje výběr položek **Geometry**, **Mesh** a **Study**. Výběrem možnosti **Geometry** je zobrazen ve stejné nástrojové liště panel nástrojů pro vytvoření geometrického obrazce, [27].



Obrázek č. 12: Nabídka nástrojů v položce Geometry (převzato z [27]).

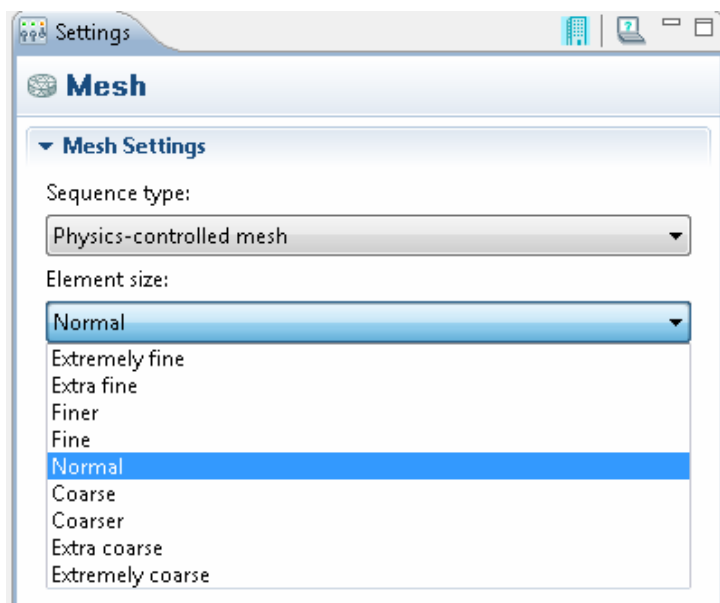
4.3.4 Knihovna materiálů

Při vytváření modelu je využívána volba materiálu v položce **Materials**. Knihovna materiálů umožňuje využívat předdefinovaných fyzikálních vlastností. Položky **Materials** jsou zobrazeny v záložce **Settings** a jsou tu uvedeny informace o materiálu. V položce **Materials** je zobrazena nabídka, která obsahuje položky **Material** a **Open Material Browser**. V prvním případě je přidána nová položku do modelového stromu pod názvem **Material**, ve které jsou uvedeny fyzikální vlastnosti materiálu. **Open Material** je využíván pro prohlížení materiálů, [27].

4.3.5 Generování sítě

Při řešení modelu je využíváno generování sítě. Parametry jsou nastaveny v položce **Mesh**. Generování sítě je součástí řešení fyzikálního jevu, protože je zobrazeno jeho rozložení částic v řešeném modelu. Základní nastavení sítě je tvořeno dvěma nabídkami, [27]:

- **Sequence type** (typ sekvence), která nabízí možnosti pro výběr řízené sítě nebo fyzikou řízené sítě, která byla nastavená v dialogovém okně **Add Physics** při nastavení fyzikálního prostředí.
- **Element Size** (velikost prvku), ve které je vybrána velikost prvku a tedy i typ sítě. Sítě jsou řazeny sestupně podle jemnosti. Síť **Extremely coarse** je z nabídky nejhrubší a nejjemnější je **Extremely fine**. Pokud bude vytvářen nějaký složitější obrazec nebo těleso, síť v rozích bude jemnější než na rovných místech. Nová síť je vygenerovaná stiskem tlačítka **Build All**.



Obrázek č. 13: Nabídka záložky Mesh Settings s přehledem sítí (převzato z [27]).

4.3.6 Výsledky a jejich zpracování

Zpracování výsledků a jejich možnosti zobrazení řešení je nalezeno v položce **Results**, která obsahuje tyto složky, [27]:

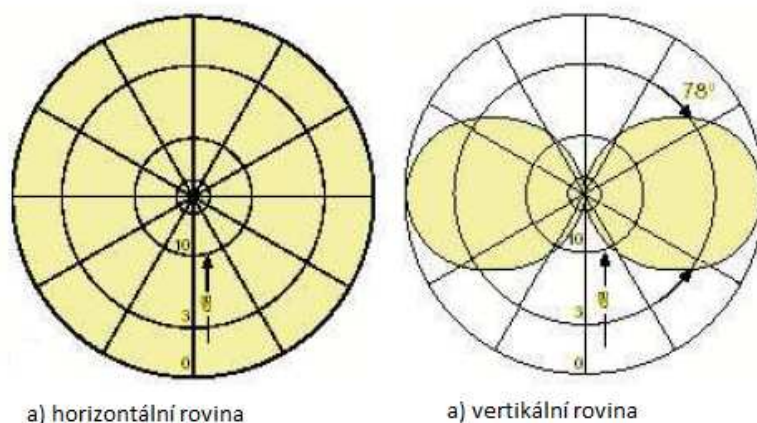
- **Data Sets** (soubory dat), které umožňují zpracovat řezy nebo obrysy. Tyto nástroje jsou k nalezení v nabídce položky **Data Sets**.
- **Derived Values** (odvozené hodnoty), které umožňují vyhodnotit řešení do číselné podoby. Příkladem může být model **Heat Transfer**, který je využíván pro zjištění teploty v nějaké části objektu nebo bodu.
- **Tables** (tabulky), které umožňují importovat tabulku.
- **Export** (export), kterým je exportováno řešení jako obrázek v různých dimenzích, animaci, video nebo síť.
- **Reports** (zprávy) pomocí kterých jsou odesílány výsledné zprávy.

5 ANTÉNY MOBILNÍCH TELEFONŮ

Tato kapitola se bude zabývat základními parametry a vlastnostmi antén systému GSM ve frekvenčním pásmu 900-1900 MHz. Tyto informace budou později využity v modelové studii a dále zde budou uvedeny vyzařovací diagramy různých typů mikropáskových antén. Digitální systém GSM lze označit za nejvýraznější a nejpoužívanější radiotelekomunikační systém. Mobilní systém GSM (Global System for Mobile Communication) je používán pro frekvenční pásmo 890 MHz - 960 MHz. Tato varianta systému je označována jako PGSM (Primary GSM). Dalším vývojem nových technologií vznikla díky stále se zvyšujícím nárokům na počet mobilních účastníků jiná varianta systému, a sice EGSM (Extended GSM), která je využívána pro komunikaci mezi mobilními a základnovými stanicemi stejného frekvenčního pásma, které se liší vyšším počtem uživatelských kanálů. Oba tyto systémy patří do skupiny GSM 900. Další frekvenční pásmo, které je využíváno systémem GSM 1800, pracuje v rozmezí frekvencí 1710 MHz až 1880 MHz, [31], [32], [33].

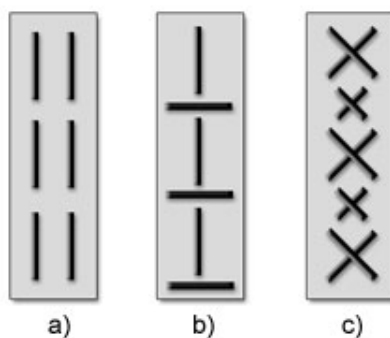
5.1 Typy antén systému GSM a jejich vyzařovací diagramy

Při rozdělení jednotlivých typů antén GSM hraje nejdůležitější roli vyzařovací diagramy - směrové charakteristiky. Dle tvaru jejich charakteristiky v horizontálním řezu se antény mohou rozdělit do tří základních skupin, a to na antény: všesměrové, směrové a speciální. Všesměrové antény mají v horizontální rovině vyzařovací diagramy ve tvaru kružnice a září v ideálním případě ve všech směrech stejně, [33].



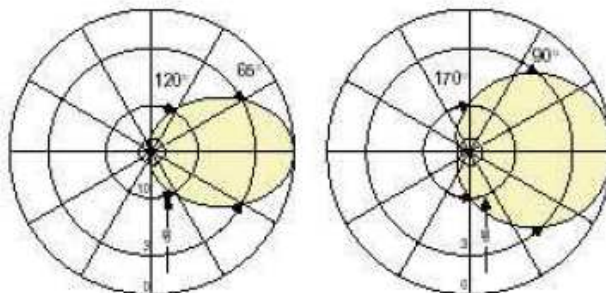
Obrázek č. 14: Vyzařovací diagramy všesměrové antény (převzato z [33]).

- a) *Všesměrové antény systému GSM*: podoba rukávového dipólu, tzn. rameno např. půlvlnného dipólu. Jedním ramenem dipólu je prodloužený střední vodič koaxiálního vedení a přes plášť napáječe je převlečena trubka (rukáv) o délce čtvrtiny vlnové délky. Vnější povrch rukávu je tvořen druhým ramenem dipólu. Antény s všesměrovou horizontální vyzařovací charakteristikou nacházející se na obrázku č. 14, se mohou lišit tvarem vertikální vyzařovací charakteristiky a vyzařovaným výkonem. Tvar vertikální vyzařovací charakteristiky je závislý na délce antény, [31], [33].



Obrázek č. 15: Typy konstrukce antén (převzato z [31]).

- b) *Směrové antény systému GSM*: při spojení dipólů do soustav je dosaženo větší nebo menší směrovosti a nenulového zisku antén. Nejpoužívanější směrovou anténou tohoto typu je „panelová anténa“. Jedná se o starší konstrukce antén, které jsou používány pro soustavu dipólů vertikální polarizaci a zvláštní panelový anténní systém pro pásma GSM 900 a GSM 1800, které jsou uvedeny na obrázku č. 15 a). Náčrt antény s horizontální polarizací se nachází na obrázku č. 15 b). Vývoj antén dospěl až do podoby dnešních anténních soustav, které používají polarizaci X, a jsou konstruovány pro obě pásma GSM viz obrázek č. 15 c). Směrové antény jsou využívány v oblastech s vyšší koncentrací uživatelů a jejich směrová charakteristika je uvedena na obrázku č. 16, [31], [33].



Obrázek č. 16: Směrová charakteristika směrové antény (převzato z [33]).

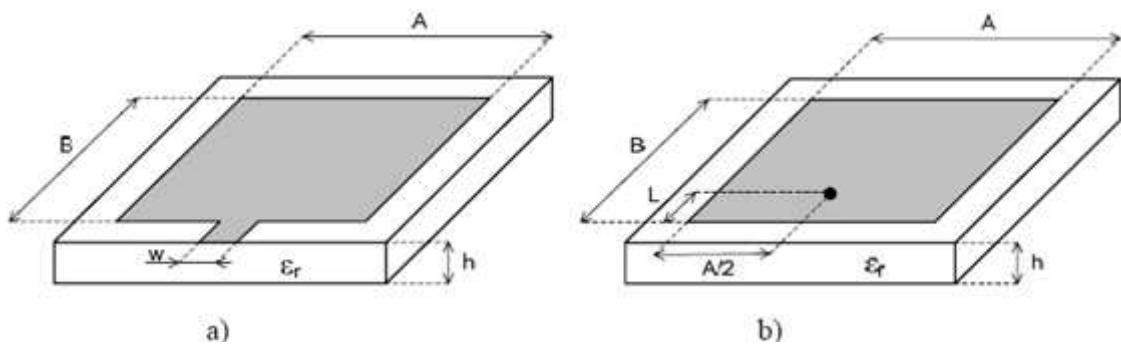
Speciální antény systému GSM: antény, které jsou v pásmech GSM méně běžné. Příkladem je logaritmicko-periodická dipólová soustava. Jedná se o řadu širokopásmových směroých antén různé délky s vertikální polarizací, které pracují v pásmu 806 - 2170 MHz, [31].

5.2 Planární antény

Planární neboli mikropáskové antény jsou velmi rozšířeným druhem lineárních antén díky svým malým rozměrům. Antény jsou vyráběny stejnou technologií jako tištěné spoje, a proto jejich hlavní výhodou je nízká výrobní cena s možností začlenění do mikrovlnných obvodů. Tato technologie není vhodná pro vyrábění antén pro velké výkony. Dalším nedostatkem může být jejich úzkopásmovost, která je dána vysokým činitelem jakosti mikropáskové struktury. K velkému problému může dojít při nežádoucím vyzařování napájecího mikropáskového vedení, které deformuje vyzařovací diagram a snižuje tak účinnost planární antény, [35], [36].

Jako vícepásmové planární antény jsou označovány takové antény, které rezonují na dvou a více kmitočtových pásmech. V následujících kapitolách budou uvedeny další typy konstrukcí vícepásmových antén, [35], [36].

A. Flíčková anténa:

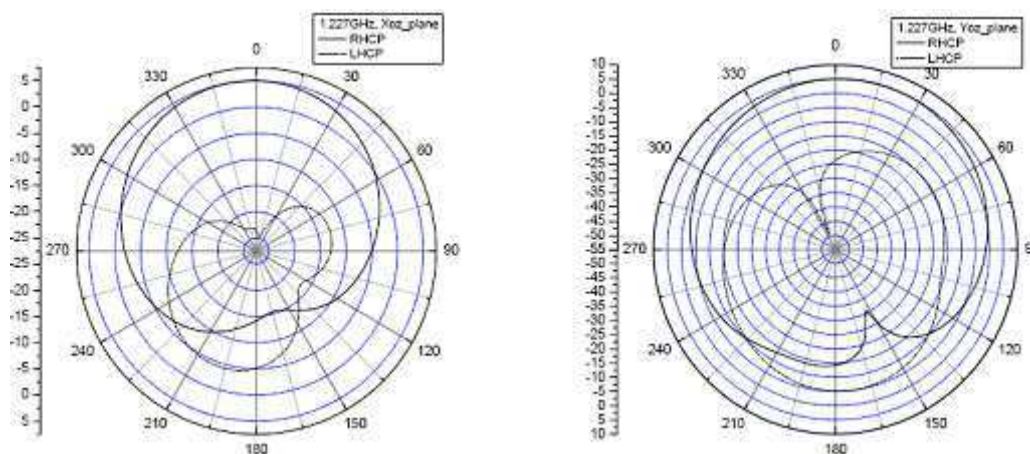


Obrázek č. 17: Planární flíčková anténa napájena: a) mikropáskovým vedením, b) koaxiální sondou (převzato z [36]).

Nejčastějším typem konstrukce, která je používána pro planární antény je tzv. „patch antenna“. Jedná se o flíčkovou anténu, která je znázorněná na obrázku č. 17. Anténa je tvořena vodivým čtvercem, se stranami A a B s rozměry $\lambda/2$, který je nanesený na dielektrickém substrátu tloušťky h o relativní permitivitě ϵ_r , a s co možná nejmenšími ztrátami. Další strana substrátu je zcela pokovena a vytváří tzv. reflektor. Tato strana je charakterizována nulovým potenciálem a je omezeno vyzařování v daném směru. Anténa je napájena mikropáskovým vedením či koaxiální sondou. Velkou

výhodou v druhém případě je, že dochází k výraznému potlačení parazitního vyzařování napájecího vedení, [36].

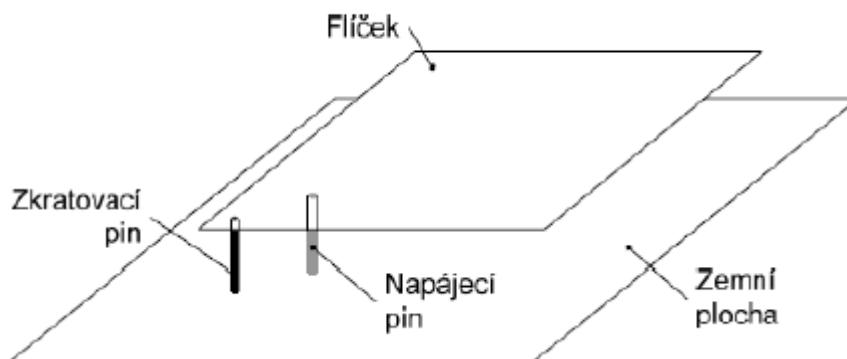
Pro získání potřebných vícepásmových vlastností jsou do plochy flíčku frézovány štěrbininy ve tvaru písmene L nebo U. Tímto postupem je možné získat více pracovních frekvencí planární antény, [36].



Obrázek č. 18: Vyzařovací diagramy antény pro $f = 1,227 \text{ GHz}$ (převzato z [36]).

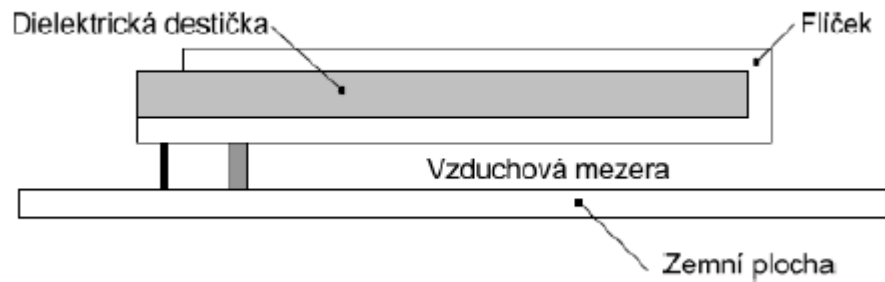
B. Planární anténa typu obrácené F:

Planární anténa známá také pod zkratkou **PIFA** (Planar Inverted - F Antenna) se skládá z těchto částí: flíčku, zkratovací pinu (zkratovací stěny) a napájecího pinu (koaxiální sondy). Flíček je umístěn nad zemní plochou, ve vhodném místě je s ní propojen zkratem a napájen koaxiální sondou. Konstrukce této **PIFA** antény je znázorněna na obrázku č. 19. Boční pohled na planární anténu může připomínat písmeno F, odtud se vzal tento název, [36].

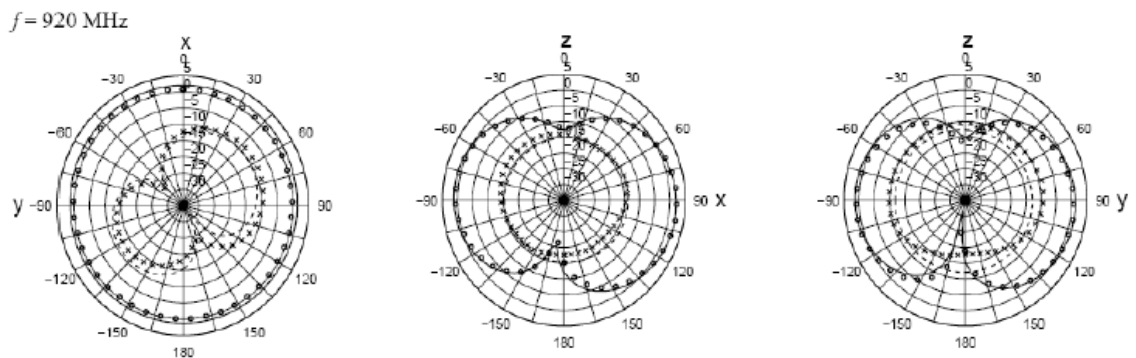


Obrázek č. 19: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA (převzato z [36]).

Flíček antény je nanesen na velmi tenký dielektrický substrát a upevněn nad zemní plochu. Planární anténa je vyráběna jako skládaná, z jediného plátu plechu, který je po ho přeložení tvořen oboustranně pokoveným flíčkem, jež je zobrazen na obrázku č. 20. Pro získání dalších vícepásmových vlastností jsou do plochy flíčku frézovány šterbiny ve tvaru písmene L nebo U. Tímto postupem lze získat více pracovních frekvencí antény, [36].

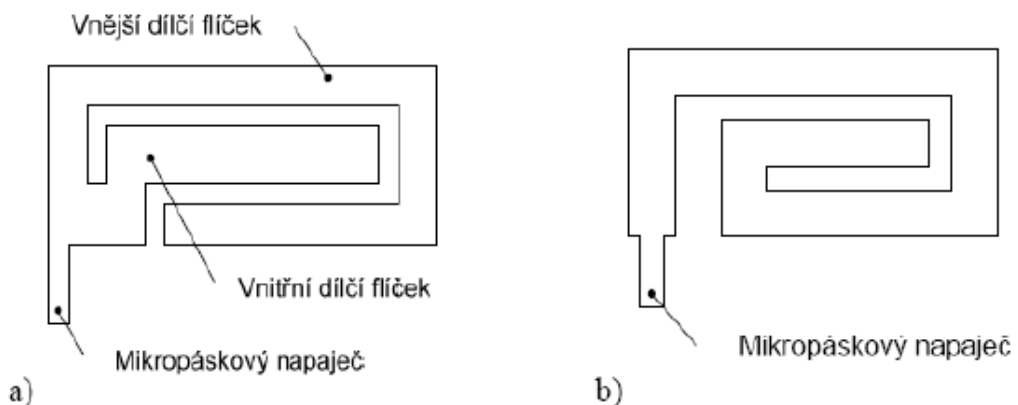


Obrázek č. 20: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA se skládaným flíčkem (převzato z [36]).



Obrázek č. 21: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 920 \text{ MHz}$ (převzato z [36]).

C. Nízkoprofilové monopóly:

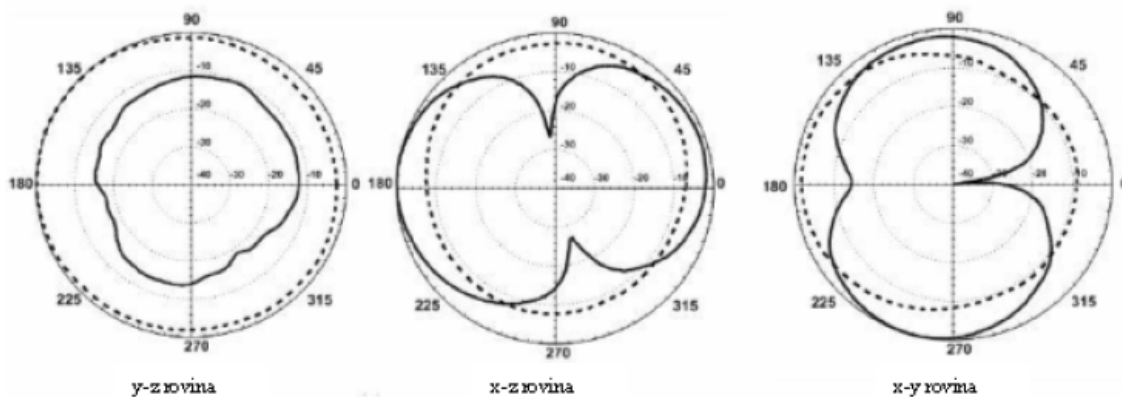


Obrázek č. 22: Dvoupásmové nízkoprofilové planární monopóly: a) se zářezy, b) spirální (převzato z [36]).

Nízkoprofilové monopóly představují klasický monopól realizovaný jako velmi tenký kovový pásek, který je nanesen na dielektrickou podložku. Příklady dvoupásmových konstrukcí jsou zobrazeny na obrázku č. 22, [36].

Všeobecně se vyskytují ve dvou provedeních, [36]:

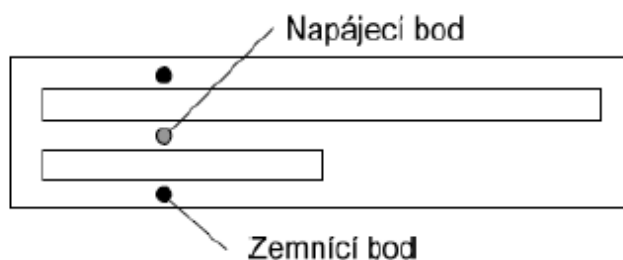
- planární monopóly se zářezy,
- planární spirálovité monopóly.



Obrázek č. 23: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 900 \text{ MHz}$ (převzato z [36]).

D. Štěrbinové antény:

Nejjednodušší a nejčastější anténou tohoto typu je protáhlá štěrbinová, vyříznuta v rozlehlé vodivé desce, která je znázorněna na obrázku č. 24. Štěrbinová a planární dipól stejného tvaru a rozměru jsou tvořeny komplementární dvojicí antén, [35], [36].



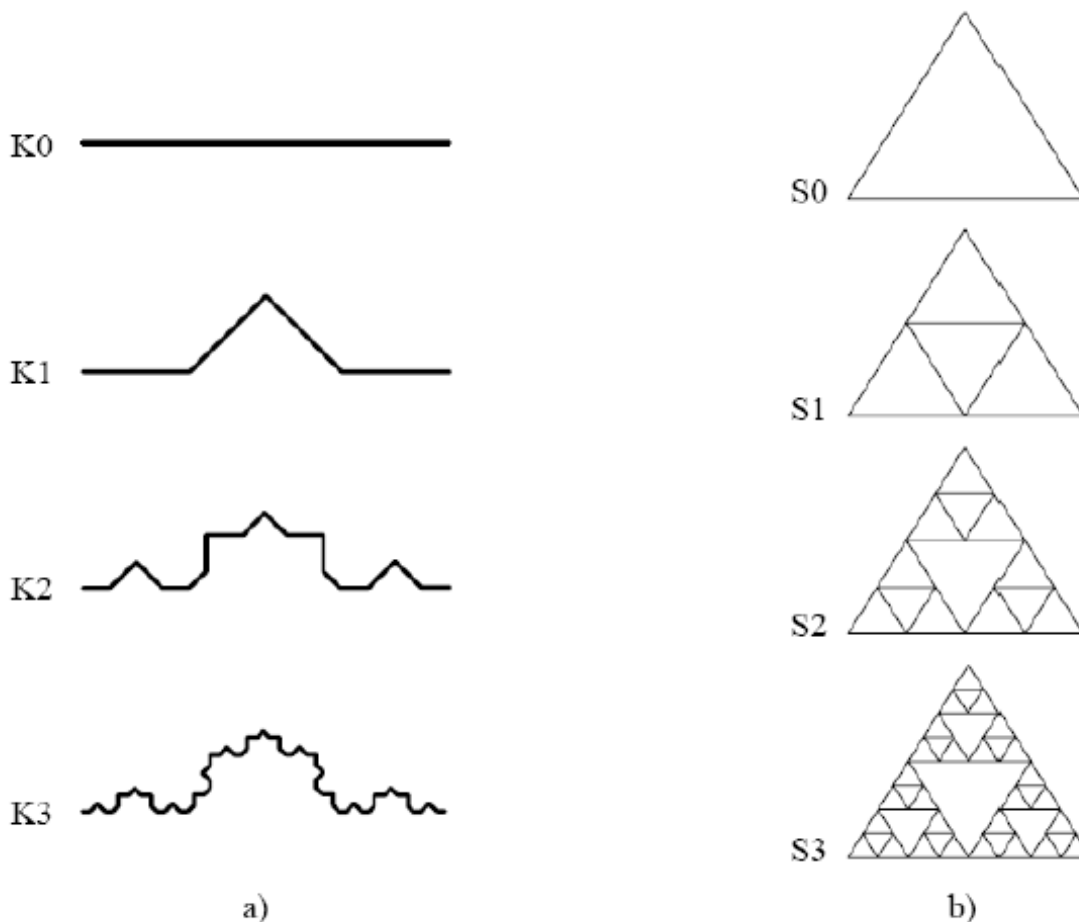
Obrázek č. 24: Dvoupásmová štěrbinová anténa (převzato z [36]).

E. Fraktální antény:

Nové konstrukce antén, jejichž výsledkem je úsilí ve spojení geometrie fraktálů s teorií elektromagnetického pole. Termínem „fraktál“ je označován zlomkový nebo nepravidelný útvar. Poprvé byl použit pro popis útvarů, kde jednotlivé části jejich struktury byly podobné. Takto vzniklé fraktály jsou používány pro modelování

složitých přírodních útvarů jako jsou mraky, horské hřebeny, linie pobřeží, sněhové vločky, kapradí, galaxie a dalších. Tyto jedinečné vlastnosti fraktálů byly použity pro vývoj nových konstrukcí antén, které splňují následující vlastnosti, [36]:

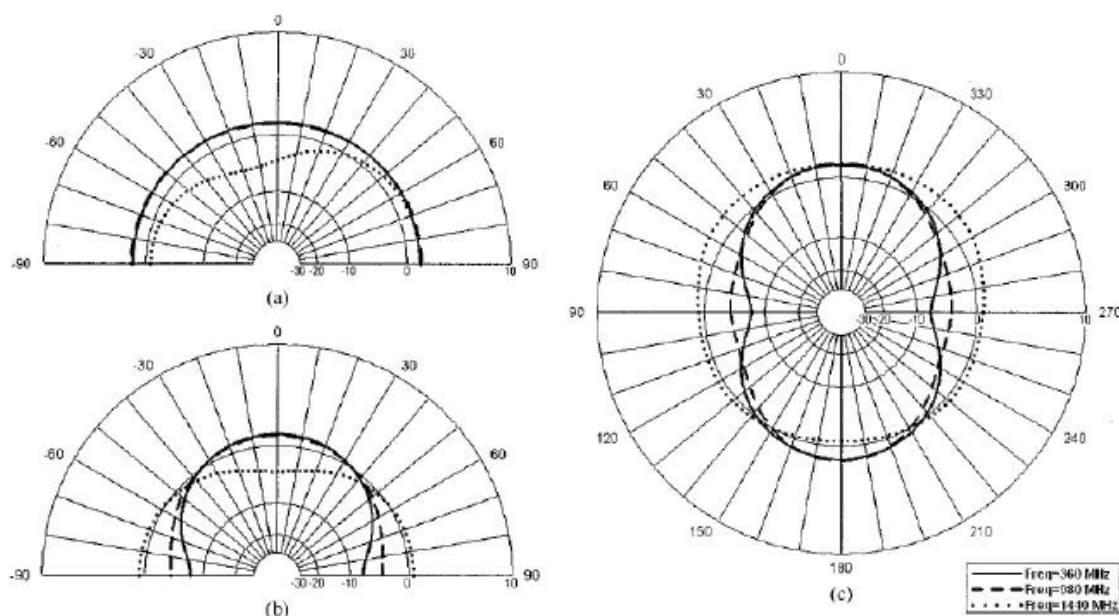
- kompaktní rozměry,
- nízký profil,
- vícepásmovost nebo širokopásmovost.



Obrázek č. 25: Postup tvorby: a) Kochovy křivky, b) Sierpinského monopólu (převzato z [36]).

Za příklad fraktální antény je možné považovat Kochův a Sierpinského monopól. U Kochova monopólu jde o křivku, označovanou jako Kochova křivka. Algoritmus konstrukce Kochovy křivky, který je tvořen anténou a znázorněn na obrázku č. 25a), kde jsou zobrazeny první tři opakování, označené jako K1 až K3 a doplněné o úsečku K0, která je monopólem. Výška h takto určeného monopólu je současně jejím maximálním vnějším rozměrem. Skutečná délka prvku antény l je v tomto případě funkcí počtu opakování n . Sierpinského monopól je znázorněn plošným útvarem. Algoritmus takového Sierpinského fraktálu, je vytvářen plošnou anténou, který je uveden na obrázku č. 25b), kde jsou vyobrazeny první tři opakování. Značené jako S1

až S3, které jsou doplněny o výchozí útvar S0, a které představující rovnostranný trojúhelník. Rozdíl mezi plošnou anténou Sierpinského a Kochovým monopólem je v tom, že u plošné antény je nejnižší rezonanční kmitočet určen výškou a s fraktálovými opakováními není počítáno. Antény ve tvaru fraktálové křivky se s každou iterací (opakováním) prodlouží, ale její výška h je zachována. Kvůli fyzikálnímu prodloužení vzroste i její elektrická délka, a tím se sníží i rezonanční kmitočet. Na základě výše uvedených vlastností je Kochův fraktál používán pro miniaturní antény a Sierpinského fraktál pro vícepásmové antény, [36].



Obrázek č. 26: Vyzařovací diagramy antény pro frekvence $f = 360 \text{ MHz}$, 980 MHz a 1440 MHz (převzato z [36]).

5.3 Parametry GSM antén mobilních telefonů

Přenášený výkon GSM antén se pohybuje v rozmezí od 0.05 do 1-2 W a frekvenční rozsah spadá do oblasti od 900 MHz - 1800 MHz. Mobilní telefony jsou schopny předávat maximální síly o velikosti 2W pro 900 MHz a 1W pro 1800 MHz. Výstupní výkon je určen v závislosti na poloze telefonu uvnitř buňky, [37].

Tabulka č. 2: Přidělená kmitočtová pásma pro komunikační systémy (převzato z [36])

Typy sítě	Kmitočtové pásmo - vysílání	Kmitočtové pásmo – příjem
GSM 900	880 MHz - 915 MHz	925 MHz - 960 MHz
GSM 1800	1710 MHz - 1785 MHz	1805 MHz - 1880 MHz

V Tabulce č. 2 jsou zaznamenány dvě různé šířky kmitočtových pásem komunikačních systémů GSM 900 a GSM 1800. První zmíněné pásmo pracuje na frekvenci přibližně o velikosti 900 MHz a druhé se blíží velikosti frekvence 1900 MHz. Tyto informace lze získat z dat uvedených na Českém telekomunikačním úřadě.

Tabulka č. 3: výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu (převzato z [38])

Výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu E [V/m]						
Vzdálenost od antény mobil. tel. [cm]	Výkon mobilního telefonu P [W]					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
100	2,7	3,9	4,7	5,5	6,7	7,7
75	3,7	5,2	6,3	7,3	8,9	10,3
50	5,5	7,7	9,5	11,0	13,4	15,5
25	11,0	15,5	19,0	21,9	26,8	31,0
10	27,4	38,7	47,4	54,8	67,1	77,5
8	34,2	48,4	59,3	68,5	83,9	96,8
5	54,8	77,5	94,9	109,5	134,2	154,9

Tabulka č. 3 je zpracována pro šest různých vyzařovaných výkonů v rozmezí 0,25 - 2 W, protože výkon mobilních telefonů se mění dle místa, ze kterého volá uživatel. Tyto hodnoty intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu jsou vypočítány pro různé vzdálenosti antén mobilních telefonů v rozmezí 5 - 100 cm.

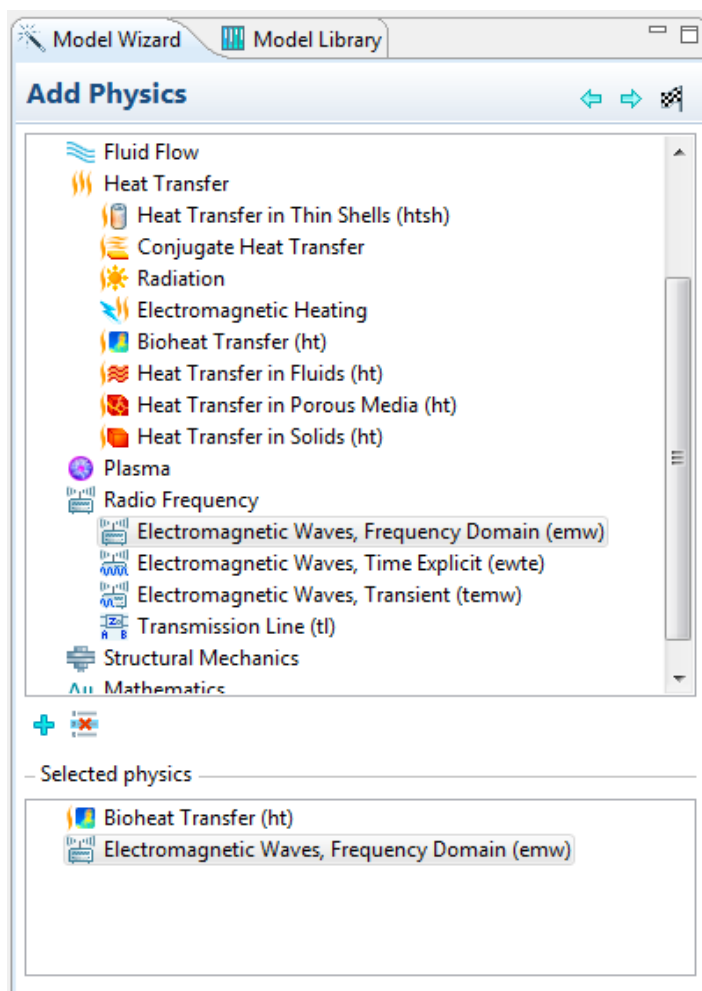
Antény jsou nejčastěji vyrobeny z kovové šroubovice nebo tyče, v řádech několika centimetrů, možné je považovat za dipóly. Konfigurace dipólu je nejběžnějším a konvenčním typem pro blízké pole při expozici člověka v souvislosti s bezdrátovým komunikačním systémem v pásmu GSM 900 - 1900 MHz. Uživatel je vystaven tomuto poli na vzdálenost 0,5 - 3 cm, od antény, [37].

Pro modelové řešení proto bude nutné v programovém prostředí COMSOL Multiphysics nebo v programu AutoCAD vytvořit konstrukci planární antény typu PIFA, která je nejčastěji používanou anténou v komunikačních technologiích. Využívat se zde bude vícepásmového přijímače signálu antény pro mobilní telefony.

6 MODELOVÉ ŘEŠENÍ

Tato kapitola se bude zabývat modelovým řešením elektromagnetického pole v biologických tkáních při aplikaci mobilního telefonu a nastavením všech parametrů, které budou potřebné pro další zpracování. Dále bude nutné vypočítat rovnice pro hodnoty SAR v různých tkáních. Toho bude později využito při stanovení grafického řešení rozložení SAR v prostoru a ke stanovení průměrných hodnot SAR v mozkové tkáni objemu krychle o váze 1 nebo 10 g, podle hygienických limit nařízení vlády č. 106/2010 Sb. V posledním kroku bude zapotřebí stanovit rozsah teplotních změn v lebeční kosti a mozku.

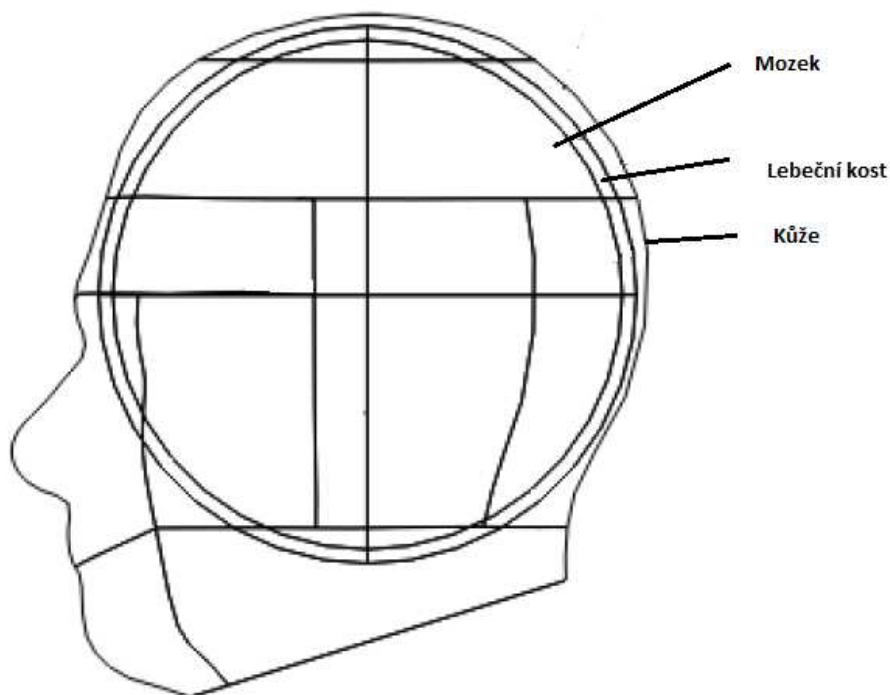
V modelovém okně Model Wizard bude zvoleno 3D prostředí a dále nastaven dříve zmíněný RF Modul - Electromagnetic Waves, Frequency Domain, který je pro toto řešení nejvíce vhodný. Spolu s RF Modulem bude nutné přidat ještě Heat Transfer Module - Bioheat Transfer, který umožňuje simulovat přenos tepla v biologických tkáních během modelování.



Obrázek č. 27: Výběr RF Modulu a Bioheat Transfer Modulu.

6.1 Návrh modelu lidské tkáně

Nové technologie umožňují simulovat lidskou hlavu a zdroj elektromagnetického pole. V praxi je možné vytvářet zjednodušené 3D modely lidské hlavy, [37]. Lidská hlava bude v tomto modelu tří-vrstevnaté nehomogenní dielektrikum. Složená směrem od povrchu směrem dovnitř z kůže, lebeční kosti a mozku. Do navrhovaného modelu lidských tkání bude nutné vytvořit konstrukci 3D modelu hlavy pomocí tří vrstev 3D elipsoidů, čímž po odečtení s 3D modelem hlavy, bude získán výsledný tvar hlavy. Po konzultaci se specialistou z lékařského pracoviště, který tento návrh 3D modelu hlavy schválil, byly stanoveny hodnoty jednotlivých vrstev takto: tloušťka (síla) lidské kůže se pohybuje v rozmezí 0,5 - 4,0 mm a pro navrhovaný model bude nastavena tato hodnota na 1,0 mm. Síla lebeční kosti je 4,5 - 6,5 mm. A pro tento model bude počítána tloušťka 5,0 mm.



Obrázek č. 28: 3D model lidské hlavy.

Dále bude zapotřebí vytvořit v Comsol Mutiphysics mobilní telefon pro 2 různé frekvence. Tento model bude nastaven na pásmo 835 MHz a druhé kmitočtové pásmo na 1900 MHz. V modelovém prostředí se bude mobilní telefon nacházet ve vzdálenosti 10 mm od povrchu 3D modelu lidské hlavy.

Vytvořené objekty se budou nacházet v prostředí o permitivitě vzduchu. Podmínky vstupu jsou nastaveny tak, aby na vodivých hranách byly elektrické i magnetické intenzity nulové. Pro výpočet musíme uvažovat s bezodrazovým zakončením tzv.

dokonale přizbůsobené vrstvy (**PML**). PML jsou pro absorpční vrstvu modelu k dispozici pro elektromagnetické vlny a jejich vlnové rovnice. Ztráty jsou způsobeny dielektrickým i magnetickým ohřevem. S využitím získaných poznatků, představuje PML nový posun, založený na symetrické metodě konečných prvků (**MKP**). PML si lze představit jako umělé materiály, které tlumí tyto vlny. Významné jsou pro svůj velmi malý nebo žádný odraz, pro široký rozsah frekvencí a úhel dopadu, [43], [44].

6.2 Nastavení parametrů modelu

Výpočet elektrických (relativní permitivita a vodivost) a tepelných (tepelná vodivost, hustota a specifické oteplení) parametrů u tří-vrstevnaté struktury biologické tkáně jsou zobrazena v tabulce č. 4. Nastavení elektrických vlastností tkání je velmi obtížné kvůli velkému kolísání jejich hodnot, [37].

Tabulka č. 4: Elektrické a tepelné parametry biologických tkání (převzato z [40], [41])

	Frekvence [MHz]	Mozek	Lebeční kost	Kůže
Relativní permitivita ϵ_r [-]	835	45,26	17,40	35,40
	1900	43,22	16,40	37,21
Vodivost σ [S/m]	835	0,92	0,25	0,63
	1900	1,29	0,45	1,25
Tepelná vodivost k [W/(m·K)]	Obě	0,53	0,53	0,53
Hustota ρ [kg/m ³]	Obě	1030	1810	1010
Specifické oteplení C_p [J/(kg·K)]	Obě	3710	1256	3662

Tabulka č. 5: Parametry mobilního telefonu (převzato z [39])

Typ	Vodivost σ [S/m]		Relativní permitivita ϵ_r [-]		Další parametry	
	Plast	Substrát	Plast	Substrát	Vstupní napětí V_{in} [V]	Impedance externího kabelu Z_0 [Ω]
Frekvence [MHz]						
835	0		2,4	5,23	54,5	75
1900	0		2,4	5,23	54,5	50

6.3 Výpočet hodnoty SAR v lidské hlavě

Vědci používají SAR k určení množství radiace, kterou lidská tkáň je schopna absorbovat. Tato měření jsou důležitá pro mobilní telefony vyzařující blízko mozku. Modelové studie vyjadřují, jak lidská hlava absorbuje vyzařované vlny z antény, jež způsobují její zvýšení teploty. S rostoucím využíváním bezdrátových zařízení se zvýšilo i množství radiční energie na lidská těla, která jsou jimi vystavena. Velmi důležité je proto zabránit záření přicházejícím do mozku. Společnou vlastností, kterou lze měřit absorbovanou energií je hodnota SAR, které se vypočítá jako, [15], [37]:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E_i^2}{\rho} \quad (6.1)$$

Výsledná hodnota SAR je závislá na veličinách hustoty a konduktivity tkáně lidského mozku. Po skončení výpočtu v programovém prostředí Comsol Multiphysics je získáno vykreslení jednotlivých rozložení velikosti všech biologických tkání (lebeční kosti a mozku).

6.4 Grafické řešení SAR

Modelování v Comsol Multiphysics umožňuje výpočet řešené problematiky metodou konečných prvků. Problémem elektromagnetického vlnění se zabývají následující dvě vlnové rovnice pro vyjádření hodnot intenzit elektrického a magnetického pole.

Rozložení intenzity elektrického pole, [15]:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E_z) - \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) k_0^2 E_z = 0 \quad (6.2)$$

Rozložení intenzity magnetického pole, [37], [42]:

$$\nabla \times \left(\left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)^{-1} \nabla H_z \right) - \mu_r k_0^2 H_z = 0 \quad (6.3)$$

kde: k_0 - vektor ve volném prostoru, vlnové číslo [m^{-1}],

∇ - vektorový operátor rotace Curl.

ϵ_r - relativní permitivita,

μ_r - relativní permeabilita,

Výpočet hodnoty SAR podle nařízení vlády č. 106/2010 Sb.:

Výpočet hodnota SAR bude stanoven dle nařízení vlády č. 106/2010 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Tato hodnota SAR pro lidskou hlavu bude určena jako středovaná pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g tkáně, ve tvaru krychle, s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků. A podle hygienických limit nařízení vlády č. 106/2010 Sb., nesmí přesáhnout hodnotu 2 W/kg, pokud se nejedná o zaměstnance, [10].

Bude nutné nejdříve spočítat objem krychle, podle následujícího tvaru:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (6.4)$$

Objem krychle je roven délce hrany krychle o velikosti a^3 , s hmotností 10 g:

$$a^3 = \frac{m}{\rho} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{\rho} \Rightarrow a = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{\rho}} \quad (6.5)$$

A do výše uvedeného vztahu se dosadí hodnoty velikostí hustot biologických tkání, které jsou uvedeny v Tabulce č. 4, pro výpočet velikosti strany krychle:

$$a_{\text{Mozek}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{1030}} = 0,02134 = \underline{\underline{21,34\text{mm}}}$$

$$a_{\text{Lebecni kost}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{1810}} = 0,01768 = \underline{\underline{17,68\text{mm}}}$$

$$a_{Kuze} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{1010}} = 0,02147 = \underline{\underline{21,47mm}}$$

Největší vypočítaná hodnota byla vybrána hrana krychle, které odpovídá hraně kůže o velikosti $a_{Kuze}=21,47 \text{ mm}$. Dále je nutné vytvořenou krychli umístit do vytvořeného modelového prostředí v následujících krocích. Nejdříve je nutné určit souřadnice bodu, ve kterém se nachází maximální hodnota měrného absorbovaného výkonu SAR. Tyto souřadnice bodu byly určeny jako střed krychle o hraně kůže $a_{Kuze}=21,74 \text{ mm}$. Tato krychle bude postupně procházet směrem k vnitřní straně hlavy až do doby, kdy bude vnější hrana krychle shodná se stěnou hlavy.

6.5 Grafické řešení teplotní změny tkání

Pro grafické řešení výpočtu teplotních změn ve tkáních jsou v programovém prostředí Comsol Multiphysics použity metody konečných prvků. Pro toto řešení se aplikuje modul Heat Transfer Module. Rovnice pro výpočet rozložení tepla, je, [37], [42]:

$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q \quad (6.5)$$

kde: C_p - specifické oteplení [$J/(kg \cdot K)$],

k - tepelná vodivost [$W/(m \cdot K)$],

ρ - hustota [kg/m^3],

Q - zdroj tepla [J],

T - teplota [K].

6.6 Dosažené výsledky

V modelovém prostředí Comsol Multiphysics v4.3a byl vytvořen mobilní telefon, který konverguje k frekvencím 835 a 1900 MHz. Dále se podařilo vytvořit třívrstvý 3D model hlavy s nastavenými parametry jednotlivých vlastností tkání jako je konduktivita, permeabilita a permitivita. Mobilní telefon byl umístěn ve vzdálenosti 1 cm od hlavy, což simuluje vzdálenosti při běžném telefonním hovoru.

Zadání diplomové práce, přesto že jej odevzdávám, nebylo splněno v plném rozsahu, protože chybí vypracování modelové studie tepelných změn při šíření vkv

v biologické tkáni při aplikaci mobilního telefonu a stanovení rozsahu tepelných změn v lebeční kosti a mozku. Proto nemohly být zhodnoceny ani dosažené výsledky a porovnány s ohledem na hygienické limity.

Všechny výpočty byly zpracovány v programovém prostředí Comsol Multiphysics v4.3a a prováděny na notebooku ACER ASPIRE 7720G s těmito parametry:

- Procesor: Intel Core 2 DUO T5750 - 2.0 GHz,
- Operační systém: Windows 7 Professional (x64),
- Operační paměť: 4 GB DDR2.

7 ZÁVĚR

V diplomové práci byly v úvodní části zpracovány poznatky z teorie elektromagnetického pole. Na základě Maxwellových parciálních diferenciálních rovnic a jejich řešení bylo popsáno šíření rovinné v homogenním prostředí a transverzální elektromagnetické vlny ve volném prostředí. A také se tato práce zabývala vlnovými rovnicemi pro ztrátové a bezztrátové prostředí.

Tato práce se dále věnovala nejvyšším přípustným hodnotám měrného absorbovaného výkonu (SAR) a hygienickými limity v pracovním prostředí. Popsaná metodika vycházela z technických norem platných v České republice o ochraně zdraví před neionizujícím zářením podle nařízení vlády č. 106/2010 Sb, které novelizovalo nařízení vlády č. 1/2008 Sb., a v níž se nacházejí nejvyšší přípustné hodnoty SAR. Tyto hodnoty budou později použity v diplomové práci pro modelování elektromagnetického pole v biologické tkáni, kde budou vypočteny konkrétní hodnoty SAR a jejich účinky neionizujícího záření na lidský organismus.

V další části textu bylo popsáno programové prostředí COMSOL Multiphysics v 4.2 pro řešení fyzikálního modelování a simulaci s hlavní nabídkou Model Builder. V této části se nachází také popis radiofrekvenčního modulu, který bude využíván pro modelování. Menu programu je zastoupené položkami File, Edit, Options a Help. Model Builder je tvořen výběrem fyzikálního prostředí, zadáním a geometrii modelu. V neposlední řadě jsou zde zmíněny knihovny materiálů, generování sítě a výsledky a jejich zpracování.

Také bylo nutné prostudovat problematiku vyzařování mikropáskových antén, vyzařování jejich diagramů a to především ve frekvenčním rozsahu mobilních telefonů, jejichž frekvence se pohybuje v rozmezí 835 - 1900 MHz. Všechny tyto informace měly být využity pro modelovou studii tepelných změn při aplikaci mobilního telefonu na biologickou tkáň, stanoveny rozsahy tepelných změn lidské hlavy a zhodnoceny dosažené výsledky s ohledem na hygienické limity. Zadání této diplomové práce nebylo splněno v plném rozsahu.

LITERATURA

- [1] ZÁVĚRKOVÁ, V. a kolektiv. *Akustika. Příklady z teorie elektromagnetického pole*. Brno: Vysoké učení technické v Čs. Redakci VN MON, 1989. 66 s. ISBN 80-214-1065-9.
- [2] VRÁNA, V. *Modelování biologických objektů a dějů*. Brno: Vysoké učení technické v Čs. Redakci VN MON, 1989. 168 s. ISBN 80-214-1045-0.
- [3] ROZMAN, J. *Terapeutická technika*. Brno: Vysoké učení technické, 2000. 126 s. ISBN 80-214-1488-X.
- [4] Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením 480/2000 Sb. [cit. 2012-10-12] <<http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2008/sb001-08.pdf>>.
- [5] ROZMAN, J., POSPÍCHAL, Z. *Ekologické inženýrství*. Brno: Vysoké učení technické, 1996. 135 s. ISBN 80-7078-373-7.
- [6] RAIDA, Z., ČERNOHORSKÝ, D., GALA, D. *Multimediální učebnice - Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika*. [cit. 2012-10-4]. <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>>.
- [7] RUSNÁK, K. *Elektromagnetické vlnění a fyzikální optika*. [cit. 2012-10-4] <http://www.kfy.zcu.cz/Rusnak/sylabus.fya2.Rus_09.htm>.
- [8] ROZMAN, J. a kolektiv. *Elektronické přístroje v lékařství*. Praha: Academia, 2006. 406 s. ISBN 80-200-1308-3.
- [9] HAŇKA, L. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: SNTL, 1975. 580 s.
- [10] Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením 106/2010 Sb. [cit. 2012-10-18] <<http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2008/sb001-08.pdf>>.
- [11] ROZMAN, J., CHMELAŘ, M. JEHLIČKA, K. *Terapeutická a protetická technika*. Brno: Skripta VUT, 2004. 115 s.
- [12] REICHEL, J., VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky - Elektromagnetické kmitání a vlnění*. [cit. 2012-10-13] <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/352-elektromagneticke-kmitani-a-vlneni>>.
- [13] Scienceworld. [cit. 2012-10-18] <<http://scienceworld.cz>>.
- [14] Zástupce firmy COMSOL pro Českou republiku a Slovensko. [cit. 2012-10-18] <<http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/>>.
- [15] Comsol Multiphysics v4.2 - user manual. <<http://www.comsol.com/>>.
- [16] ČECHOVÁ, M., VYŠÍN, I. *Teorie elektromagnetického pole*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 1998. 181 s. ISBN 80-7067-805-4
- [17] STRATTON, J. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: SNTL, 1961. 588 s.
- [18] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z. *Elektromagnetické vlny a*

- vedení. Brno: VUTIUM. 1999. 136 s. ISBN 80-214-1261-5.
- [19] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení - přednášky*. Brno: VUT, 2006. 133 s. ISBN 80-214-3301-9.
- [20] DĚDEK, L., DĚDKOVÁ, J. *Elektromagnetismus*. Brno: VUTIUM, 2000. 232 s. ISBN 80-214-1548-7.
- [21] DĚDEK, L. *Teorie elektromagnetického pole*. Brno: VUT, 1990. 218 s. ISBN 80-214-0219-9.
- [22] REICHEL, J., VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky - Maxwellovy rovnice*. [cit. 2012-10-26] <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/368-maxwellovy-rovnice>>.
- [23] CIFRA, M., Togni, P. *Úvod do používání COMSOL Multiphysics v modelování elektromagnetického pole v biologických systémech*. Praha: ČVUT, 2008. [cit. 2012-10-27] <http://old.elmag.org/lib/exe/fetch.php/wiki:user:cifra:uvod_do_cm.pdf>.
- [24] VÍT, M. *Vzdálené pole*. Praha, 2001. 8 s. [cit. 2012-10-27]: <http://www.szu.cz/cekz/dokumenty/autorizace/metodicky_navod.pdf>.
- [25] ČERNOHORSKÝ, D., SVAČINA, J., NOVÁČEK, Z. *Teorie elektromagnetického pole II*. Praha: SNTL, 1985. 124 s.
- [26] KÖKÖRČENÝ, M. *Referenční úrovně elektrického pole E a magnetické indukce*. [cit. 2012-10-28] <http://www.pravnipredpisy.cz/predpisy/ZAKONY/2000/480000/Sb_480000_-----_.php#NAŘÍZENÍ_VLÁDY/////PŘÍLOHA_Č._5>.
- [27] MÁCHA, V. *Diplomová práce: Počítačové modelování v programu COMSOL Multiphysics*. KAFT JU, České Budějovice, 2012. [cit. 2012-10-28]. <http://theses.cz/id/91ra5c/DP_Mcha_Final.pdf>.
- [28] RAIDA, Z. *Elektromagnetické vlny, vedení a antény - skripta*. [cit. 2012-11-09] <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/>>.
- [29] VRBA, J. *Úvod do mikrovlnné techniky*. Praha: ČVUT, 2007. 170 s. ISBN 978-80-01-03670-9.
- [30] HOFFMANN, K., HUDEC, P. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření*. Praha: ČVUT, 2006. 111 s. ISBN 80-01-03442-9.
- [31] SNÁŠEL, J. *Antény systému GSM*. [cit. 2013-02-12] <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/04031/index.html#4>>.
- [32] BLÁHA, M. *Mobilní systémy čtvrté generace 4G – Bakalářská práce*. [cit. 2013-02-12] <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16140>.
- [33] BLÁHA, P. *Antény v systému GSM*. [cit. 2013-02-12] <http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK06_semestralky/AntenyVGSM_Blahap.pdf>.
- [34] Radiation Patterns. [cit. 2013-02-12] <<http://www.kyes.com/antenna/navy/rpatterns/radiapat.htm>>.

- [35] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. *Antény a šíření elektromagnetických vln*. Brno: VUT, 1992. 146s. ISBN 80-214-0379-9.
- [36] POKORNÝ, M. *Víceplanární antény*. VUT FEKT, Brno, 2006.
- [37] DLOUHÝ, J. *The thermal distribution and the SAR calculation of RF signal inside the human head*. [cit. 2013-03-01] <<http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2008/sbornik/03-Doktorske%20projekty/01-Elektronika%20a%20komunikace/02-xdlouh04.pdf>>.
- [38] NOVÁK, J. *Elektromagnetické pole a zdravotní rizika - článek*. [cit. 2013-03-16] <<http://www.tzb-info.cz/2590-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-iii>>.
- [39] BEREZANIN, M. *Electromagnetic field mapping in biological tissue*. [cit. 2013-03-16] <http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2010/sbornik/02-Magisterske_projekty/01-Elektronika_a_komunikace/02-xberez01.pdf>.
- [40] PŠENÁKOVÁ, Z., PŠENÁK, V. *Electromagnetic Heating of Human Tissue*. [cit. 2013-03-16] <<http://caca.xicht.net/down.php?id=2914>>.
- [41] GANDHI, P. LAZZI, G. *Electromagnetic Absorption in the Human Head and Neck for Mobile Telephones at 835 and 1900 MHz*. [cit. 2013-03-20] <<http://www.ece.ncsu.edu/erl/html2/papers/lazzi/1996/NCSU-ERL-LAZZI-96-03.pdf>>.
- [42] BEREZANIN, M. *Model of microwave hyperthermia treatment*. [cit. 2013-03-21] <<http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2011/sbornik/03-Doktorske%20projekty/07-Biomedicinske%20inzenyrstvi%20a%20bioinformatika/01-xberez01.pdf>>.
- [43] BASU, U., CHOPRA, A. K. *Perfectly matched layers for time-harmonic elastodynamics of unbounded domains theory and finite-element implementation*. [cit. 2013-04-01]. <<http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/ubasu/website/papers/basu-fdpml.pdf>>.
- [44] HASEGAWA, K., SHIMADA T. *Perfectly matched layer for finite element analysis of elastic waves in solids*. [cit. 2013-04-01]. <http://cdn.intechopen.com/pdfs/39746/InTech-Perfectly_matched_layer_for_finite_element_analysis_of_elastic_waves_in_solids.pdf>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Rovinné vlny ve volném prostředí (převzato z [28])	11
Obrázek č. 2: Referenční úrovně el. pole E a magnetické indukce B (převzato z [26])	16
Obrázek č. 3: Oteplení tkáně v závislosti na době expozice (převzato z [5]).....	18
Obrázek č. 4: Frekvenční závislost absorbovaného výkonu (převzato z [8]).....	18
Obrázek č. 5: Grafické okno s výběrem fyzikálního prostředí (převzato z [27]).....	22
Obrázek č. 6: Grafické okno položky File (převzato z [27])	23
Obrázek č. 7: Grafické okno položky Edit (převzato z [27]).....	23
Obrázek č. 8: Grafické okno položky Options (převzato z [27])	24
Obrázek č. 9: Grafické okno položky Help (převzato z [27]).....	24
Obrázek č. 10: Nabídka položky Global Definitions (převzato z [27]).....	26
Obrázek č. 11: Modelový strom pro nastavení fyzikálního prostředí (převzato z [27])	26
Obrázek č. 12: Nabídka nástrojů v položce Geometry (převzato z [27]).....	27
Obrázek č. 13: Nabídka záložky Mesh Settings s přehledem sítí (převzato z [27]).....	28
Obrázek č. 14: Vyzařovací diagramy všesměrové antény (převzato z [33]).....	30
Obrázek č. 15: Typy konstrukce antén (převzato z [31]).....	31
Obrázek č. 16: Směrová charakteristika směrové antény (převzato z [33]).....	31
Obrázek č. 17: Planární flíčková anténa napájena: a) mikropáskovým vedením, b) koaxiální sondou (převzato z [36]).....	32
Obrázek č. 18: Vyzařovací diagramy antény pro $f = 1,227 \text{ GHz}$ (převzato z [36]).....	33
Obrázek č. 19: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA (převzato z [36]).....	33
Obrázek č. 20: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA se skládaným flíčkem.....	34
Obrázek č. 21: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 920 \text{ MHz}$ (převzato z [36]).....	34
Obrázek č. 22: Dvoupásmové nízkoprofilové planární monopóly: a) se zářezy, b) spirální (převzato z [36]).....	34
Obrázek č. 23: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 900 \text{ MHz}$ (převzato z [36]).....	35
Obrázek č. 24: Dvoupásmová štěrbinová anténa (převzato z [36]).....	35
Obrázek č. 25: Postup tvorby: a) Kochovy křivky, b) Sierpinskeho monopólu.....	36
Obrázek č. 26: Vyzařovací diagramy antény pro frekvence $f = 360 \text{ MHz}$, 980 MHz a 1440 MHz (převzato z [36]).....	37
Obrázek č. 27: Výběr RF Modulu a Bioheat Transfer Modulu.....	39
Obrázek č. 28: 3D model lidské hlavy.....	40

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Nejvyšší přípustné hodnoty SAR (převzato z [10]).....	15
Tabulka č. 2: Přidělená kmitočtová pásma pro komunikační systémy (převzato z [36]).....	37
Tabulka č. 3: výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu	38
Tabulka č. 4: Elektrické a teplotní parametry biologických tkání (převzato z [40], [41]).....	41
Tabulka č. 5: Parametry mobilního telefonu (převzato z [39]).....	42

Seznam zkratk

CFD	Computational Fluid Dynamics (výpočetní dynamika tekutin)
RF	Radio Frequency (radiofrekvenční)
PC	Personal Computer (osobní počítač)
CAD	Computer-Aided design (počítačem podporované projektování)
SAR	Specific Absorption Rate (měrný absorbovaný výkon)
SA	Měrná absorbovaná energie
VKV	Velmi krátké vlny
TEM	Transverzálně elektromagnetická
TE	Transverzálně elektrická
TM	Transverzálně magnetická
PML	Perfectly Matched Layer (dokonale přizpůsobená vrstva)
MKP	Metoda konečných prvků

SEZNAM VELIČIN

- ψ - tok intenzity elektrického pole,
- Φ - magnetický tok,
- I - kondukční proud volných nábojů procházejících křivkou C,
- Q - volný náboj obsažený v objemu obaleném plochou S,
- \bar{E} - intenzita elektrického pole,
- \bar{H} - intenzita magnetického pole,
- \bar{B} - magnetická indukce,
- \bar{D} - elektrická indukce,
- ρ_0 - hustota elektrického náboje,
- J_0 - hustota vodivého proudu,
- ε - permitivita,
- μ - permeabilita,
- γ - konduktivita,
- J_{vn} - proud vnucený cizím zdrojem,
- β - měrný útlum,
- α - měrná fáze,
- ω - úhlový kmitočet,
- A, B - integrační konstanty,
- E_0 - integrační konstanta, udávající intenzitu v rovině $x=0$,
- $u_{y,z}$ - vektory směru šíření vlny v ose y a z,
- φ_v - úhel vlnové impedance,
- E_i - intenzita elektrického pole uvnitř tělesné tkáně,
- σ - elektrická vodivost tkáně těla,
- c_i - měrná tepelná kapacita tělesné tkáně,
- J - indukovaná proudová hustota v tělesné tkáni,
- U - elektrické napětí,
- I - elektrický proud.
- k_0 - vektor ve volném prostoru, vlnové číslo,
- ∇ - vektorový operátor rotace Curl,
- ε_r - relativní permitivita,
- μ_r - relativní permeabilita,
- C_p - specifické oteplení,
- k - tepelná vodivost,

ρ - hustota,
 T - teplota,
 Q - zdroj tepla,