

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TECHNOLOGY ENGINEERING

BIO-ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

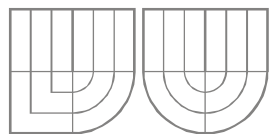
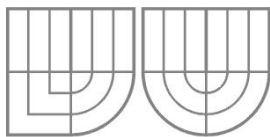
BIO-ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN MATULÍK

BRNO 2014

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ****(ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY)****ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

(DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS)

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY**BIO-ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA**

BIO-ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

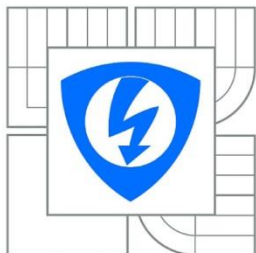
AUTHOR

MARTIN MATULÍK**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

ING. RADOMÍR MATULÍK

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Martin Matulík
Ročník: 3

ID: 146057
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Bio-elektromagnetická kompatibilita

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou účinků elektromagnetického záření na lidský organismus. Osvojte si principy jejich působení i metody, podle nichž jsou určovány bezpečnostní standardy mezních hodnot neionizujícího záření. Prostudujte způsoby detekce elektromagnetických vln. Zjistěte, jaké principy působení elektromagnetického záření jsou využívány ve zdravotnictví. Projděte vědecké studie zabývající se touto problematikou.

Na základě získaných znalostí zpracujte podrobnou literární rešerši a proveďte praktická měření elektromagnetického záření, navrhnete způsoby ochrany vůči jeho nepříznivým vlivům, ověřte a vyhodnotte účinnost navrhovaných opatření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Radomír Matulík

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

Anotace

Následující práce rozebírá problematiku účinků elektromagnetického záření na živé organismy. Zabývá se interakcemi elektromagnetického záření s okolním prostředím, důsledky jeho působení na živé organismy, probírá fyzikální veličiny biologických tkání, klasifikuje různé druhy elektromagnetického záření i možnosti ochrany před jejich možnými nepříznivými účinky. Vysvětluje způsoby určování hygienických limitů, rozdíly v právní úpravě České republiky a jiných zemí, možné zdravotnické využití elektromagnetických záření i principy vybraných diagnostických a terapeutických metod. Prakticky prověřuje stínící účinky materiálů běžně používaných k ochraně vůči ionizujícímu záření. Součástí je i řada radiofrekvenčních měření realizovaná precizními spektrálními analyzátory, které mají za úkol názorně nastínit problematiku frekvenčních pásem používaných v současné době.

Abstract

Following work deals with problems of effects of electromagnetic radiation on living organisms. It goes into interactions of electromagnetic radiation with environment, effects on living organisms, physical units of biological tissues and sorting types of electromagnetic radiation to determine means of protection against adverse health reactions. It enlighten means of establishing sanitary restrictions, differences in legal aspects at Czech republic and worldwide, possible medical utilization, even principles of selected diagnostic and therapeutic techniques. It looks into shielding effects of common materials, ordinarily used for protection against ionizing radiation via findings of practical measurements. Series of radiofrequency measurements has been done with precise spectrum analyzers, which should reveal some basic problems of frequency bands, ordinarily used in current period.

Klíčová slova

Elektromagnetické záření, radioaktivita, neionizující záření, mechanismy interakce, působení na živé organismy, tepelné účinky, ochrana před nepříznivými účinky, měrný absorbovaný výkon, dozimetrie, hygienické limity, právní úprava, legislativa, zdravotnické využití, diagnostické metody, magnetická rezonance (MRI), počítačová tomografie (CT), termoterapie, radiofrekvenční měření, pásmo GSM, intenzita elektrického pole, polarizace antény

Keywords

Electromagnetic radiation, radioactivity, non-ionizing radiation, mechanisms of interaction, effects on living organisms, thermal effects, protection against adverse health effects, specific absorption rate, dosimetry, sanitary restrictions, legal aspects, legislation, medical utilization, diagnostic methods, magnetic resonance imaging (MRI), computational tomography (CT), thermo-therapy, radiofrequency measurement, GSM zone, field strength, polarization of antenna

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „**Bio-elektromagnetická kompatibilita**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne **5. června 2014**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce **Ing. Radomíru Matulíkovi** za účinnou odbornou pomoc z oblasti elektronických měření a další cenné rady při zpracování projektu. Děkuji taktéž **Ing. Tomáši Palai-Danymu, Ph.D.** za pomoc s realizací měření v oblasti ionizujícího záření, **Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D.** za zapůjčení vybavení pro radiofrekvenční měření a obětavou pomoc při jejich realizaci. Zvláštní poděkování věnuji **Ing. Liboru Havlíčkovi**, který zapůjčil vysoce jakostní spektrální analyzátor, díky kterému jsem mohl uskutečnit měření na odpovídající úrovni.

V Brně dne **5. června 2014**

.....
podpis autora

Obsah

ÚVOD	11
1. ZÁŘENÍ	12
1.1 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	12
1.1.1 FYZIKÁLNÍ JEDNOTKY.....	13
1.1.2 MECHANISMY INTERAKCE.....	14
1.1.3 INTERAKCE S ŽIVÝMI ORGANISMY.....	15
1.1.4 ZPŮSOBY OZÁŘENÍ.....	15
1.1.5 OCHRANA VŮČI RADIOAKTIVITĚ.....	16
1.1.6 EXTERNÍ DOZIMETRIE.....	16
1.1.7 INTERNÍ DOZIMETRIE.....	17
1.1.8 LÉČBA OZÁŘENÍ.....	17
1.1.9 SHRNUÍ.....	18
1.2 NEIONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	18
1.2.1 FREKVENČNÍ PÁSMA.....	19
1.2.2 INTERAKCE S PROSTŘEDÍM.....	20
1.2.3 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI BIOLOGICKÝCH TKÁNÍ.....	21
1.2.4 MECHANISMY INTERAKCE.....	23
1.2.5 NETEPELNÉ ÚČINKY.....	24
1.2.6 TEPELNÉ ÚČINKY.....	24
1.2.7 TEPELNÁ REGULACE.....	25
1.2.8 SPECIFICKÁ MÍRA ABSORPCE.....	25
1.2.9 OCHRANA VŮČI NEIONIZUJÍCÍMU ZÁŘENÍ.....	25
2 LEGISLATIVA	26
2.1 PRÁVNÍ ÚPRAVA ČESKÉ REPUBLIKY	26
2.1.1 PŘÍPUSTNÉ HODNOTY ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.....	26
2.2 REFERENČNÍ ÚROVEŇ	27
2.3 PRÁVNÍ ÚPRAVA VE SVĚTĚ	28
3 ZDRAVOTNICKÉ VYUŽITÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ	30
3.1 MAGNETICKÁ REZONANCE	30
3.1.1 REZONANCE LIDSKÉHO TĚLA.....	30
3.1.2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA ZOBRAZOVÁNÍ MAGNETICKOU REZONANCÍ.....	31
3.1.3 AKUSTICKÉ TRAUMA.....	32
3.1.4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	32
3.1.5 KONTRASTNÍ LÁTKY.....	33
3.1.6 METODA „K-SPACE“.....	33
3.1.7 SUPRAVODIVOST.....	34
3.1.8 SUPRAVODIVÝ MAGNET.....	34
3.1.9 KONTRAINDIKACE.....	35
3.1.10 VÝHODY A NEVÝHODY.....	36
3.2 POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIE (CT)	37
3.2.1 KONSTRUKCE TOMOGRAFU.....	37
3.2.2 VYUŽITÍ TOMOGRAFU.....	37
3.2.3 PŘEDNOSTI A ÚSKALÍ POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE.....	38
3.3 SROVNÁNÍ MAGNETICKÉ REZONANCE S POČÍTAČOVOU TOMOGRAFIÍ	39

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

3.4 TERMOTERAPIE.....	39
3.4.1 REHABILITAČNÍ TERMOTERAPIE.....	40
3.4.2 TEPELNÁ ELIMINACE NÁDORŮ.....	40
3.4.3 REGENERACE INFRAČERVENÝM SVĚTLEM	40
3.4.4 ÚČINKY TERMOTERAPIE	41
3.4.5 KRYOTERAPIE	41
4 PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
4.1 STÍNĚNÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	43
4.1.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ	43
4.1.2 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	44
4.1.3 STÍNĚNÍ OLOVEM	45
4.1.4 VYHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ STÍNĚNÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	46
4.2 MĚŘENÍ RADIOFREKVENČNÍHO SPEKTRA.....	47
4.2.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ	47
4.2.2 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	48
4.2.3 NASTAVENÍ SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU	48
4.2.4 INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE	49
4.2.5 „DOWNLINK“ VERSUS „UPLINK“	50
4.2.6 MĚŘENÍ Vlivu POLARIZACE ANTÉNY	52
4.2.7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ RADIOFREKVENČNÍHO SPEKTRA	54
ZÁVĚR.....	55
LITERATURA	56

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Srovnání fyzikálních jednotek intenzity záření.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 2: Vztahy mezi jednotkami.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 3: Energie frekvenčních pásem</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 4: Analogie mezi elektrickým a magnetickým polem</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 5: Limitní hodnoty SAR pro ČR.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 6: Referenční úrovně intenzity elektrického pole</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 7: Srovnání SAR mezi Evropou a USA.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 8: Intenzita magnetického pole zařízení pro různé použití</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 9: Srovnání absorbovaných dávek ionizujícího záření</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 10: Závislost intenzity ionizujícího záření na druhu stínícího materiálu.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 11: Závislost počtu impulzů na tloušťce olověné destičky</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 12: Přesnější měření počtu impulzů při vybraných tloušťkách olověné destičky.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 13: Zvolené hodnoty vybraných parametrů spektrálního analyzátoru.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 11: Frekvenční pásmo standardu GSM 1800.....</i>	<i>50</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

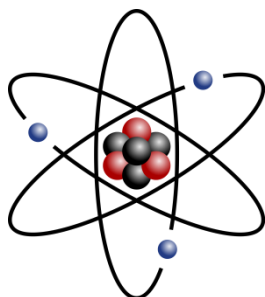
BTS	Base Transceiver Station	Základnová převodní stanice
CT	Computational tomography	Počítačová tomografie
DNA	Deoxyribonucleic acid	Deoxyrybonukleová kyselina
ELF	Extremely low frequency	Extrémně nízká frekvence
EM	Electro-magnetic	Elektro-magnetický
FCC	The Federal Communications Commission	
GSM	Groupe Spécial Mobile	Globální systém mobilní komunikace
HRCT	High resolution tomography	Tomografie s vysokým rozlišením
HSP	Heat shock protein	Bílkovina tepelného šoku
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
IR	Infra-red	Infra-červený
LED	Light emitting diode	Světlo emitující dioda
MRI	Magnetic resonance imaging	Magnetická rezonance
OSL	Optically stimulated luminescence	Opticky stimulovaná luminescence
RF	Radio-Frequency	Radiofrekvenční
RMS	Root mean square	Efektivní hodnota
SAR	Specific absorption rate	Měrný absorbovaný výkon
TLD	Thermo luminescent dosimetry	Tepelně stimulovaná dosimetrie
UV	Ultra-violet	Ultra-fialový
VHF	Very high frequency	Velmi vysoká frekvence
WHO	World health organization	

Úvod

Cílem následujícího projektu je shromáždit a přehledně utřídit informace ohledně působení různých typů elektromagnetického záření na živé organismy. S neustále rostoucí mírou využití elektronických zařízení, zaplňování volných radiofrekvenčních pásem, intenzivnímu technickému i technologickému výzkumu, vzrůstá množství i energie elektromagnetických vln v našem prostředí. Jsou neviditelné, prostupují hmotným látkovým prostředím. Protože určité typy mohou narušovat správnou funkci jiných zařízení, nabízí se otázka, jakým způsobem interagují s živými organismy, případně jaké následky mají dané interakce, pro zajištění „správné funkce“ biologických systémů, přicházejících do styku s elektromagnetickými vlnami. Je třeba pečlivě volit optimální metody, které budou posuzovat vlivy různorodých záření na živé organismy, stejně jako biologické dopady. Na jejich základě budeme usuzovat, zda dané záření může mít nežádoucí účinky na biologické systémy, i sledovat nejvyšší přípustné hodnoty, které zajistí dostatečný odstup od hodnot, způsobujících znatelné zdravotní riziko. Pokud není z nějakého důvodu možné snížit množství interagujícího záření, tak zkusíme najít dostatečná ochranná protopatření, která co nejvíce omezí dopady nepříznivých účinků elektromagnetického záření.

Pokud tedy mohou být záření v určitých případech nebezpečná, jakým způsobem se můžeme ochránit vůči jejich nepříznivým účinkům? A lze je využít i v náš prospěch? Nebo dokonce využít stejné mechanismy, jež nám způsobují komplikace, k řešení některých problémů, případně léčbě různých neduhů, či poranění? Na čem jsou založeny? Mají nějaká úskalí? Mohou být různé principy použity k dosažení stejných výsledků? Bývají některé vhodné jen pro určité situace, zatímco jiné mohou být zcela nepoužitelné? Jak je od sebe rozlišíme a zvolíme vhodné řešení v konkrétní situaci? Na co bychom si měli dát pozor? Jaký pohled má na celou záležitost legislativa? A existují rozdíly mezi příslušnými právními rámci naší země vůči dalším státům? Z čeho příslušná ustanovení vycházejí? Na všechny tyto otázky se nyní pokusíme najít odpověď.

1. Záření



Jakoukoliv hmotu můžeme rozdělit na dílčí součásti. Tvoří ji molekuly, složené z atomů, ty obsahují obal a jádro. V jádře nalezneme protony (kladně nabitě částice) a neutrony (částice bez náboje). Ty jsou složeny z kvarků, nejmenších známých částic [2]. Obal obsahuje elektrony (záporně nabitě částice), i když převážnou část vyplňuje volný prostor. Elementární částice jsou tvořeny strunami – vlněním, jinými slovy zářením elektromagnetické povahy.

Záření může být přírodní - vznikající přirozenými procesy v přírodě, nebo umělé - způsobené činností člověka (konstrukcí předmětů vydávajících záření elektromagnetické povahy). Podle způsobů interakce s okolním prostředím jej lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- Částice **ionizujícího záření mají** dostatečnou energii pro odtržení elektronu z obalu atomu [17].
- Naopak částice **ne-ionizujícího záření** nejsou za žádných okolností schopné elektron odtrhnout.

1.1 Ionizující záření



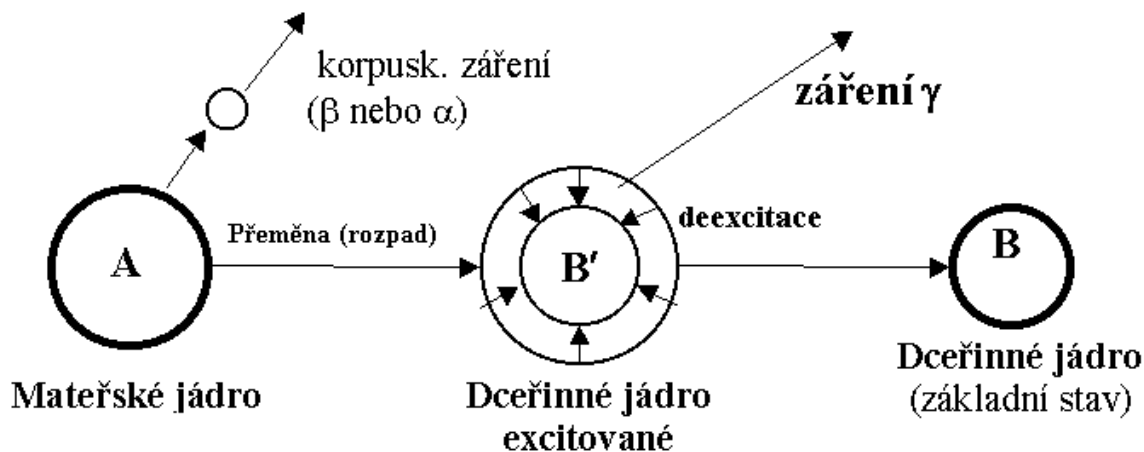
Procesem **ionizace** rozumíme přeměnu elektricky neutrálního atomu na atom s kladným, nebo záporným elektrickým nábojem – **iont**. Kladně nabitý iont (kationt) může reakcí s okolním prostředím přijít o přebytečný nosič záporného náboje (elektron) a stát se neutrálním. Tento jev nazýváme **rekombinací**.

Přímo ionizující vlastnosti mají nabitě částice - protony, elektrony, pozitrony.

Nepřímo ionizující vlastnosti mají částice bez náboje - neutrony, fotony. Ty své okolní prostředí samy neionizují, ale při interakci s ním uvolňují přímo ionizující částice. Ionizace prostředí je zde způsobena až těmito sekundárními částicemi. [26]

1.1.1 Fyzikální jednotky

Radioaktivní látka (mateřské jádro) při rozpadu vydává korpuskulární záření (alfa, beta) a zároveň dochází k její přeměně na excitované (dceřinné) jádro. Při deexcitaci (návratu nosičů náboje na své původní hladiny) z něj vychází tvrdé, vysokoenergetické **gamma záření**.



Obrázek 1: Schéma radioaktivní přeměny [60]

Počet jaderných přeměn za jednotku času (rozpadů za sekundu) určuje **aktivitu** radioaktivní látky. 1 Becquerel (Bq) = 1 rozpad za 1 sekundu. Tato hodnota bývá obvykle nízká, proto užíváme jejich násobků (kBq , MBq , GBq). Doba, za kterou dojde k rozpadu poloviny jader radionuklidu, je **poločas rozpadu**. Po dalším stejně dlouhém časovém úseku dojde k rozpadu poloviny zbývajících množství jader. [60]

Množství energie ionizujícího záření absorbovaného materiálem určuje v Evropě **Gray**, který odpovídá energii záření jednoho joulu absorbovaného jedním kilogramem látky ($1 Gy = 1 J/kg$). Amerika využívá jednotky **rad**, přičemž $1 rad = 0,01 J/kg = 10 mGy$. $\Rightarrow 1 Gy = 100 rad$. Jeden Gray vydá za 100 rad. [54]

Naproti tomu biologickému účinku absorbované dávky energie (dávkový ekvivalent) jednoho Graye odpovídá jeden **Sievert**. V případně amerických jednotek rad odpovídá biologickým účinkům absorbované energie jednotka **Rem**.

Biologický účinek jednoho Sievertu nastává přijetím energie jednoho Graye ($1 Sv \sim 1 Gy$). Nečekaně biologický účinek jednoho remu odpovídá jednomu radu ($1 rem \sim 1 rad$). [53]

Pro úplnost: 1 Curie = 37 miliard Becquerel. ($1 Ci \sim 37 GBq$).

To je posloupnost 37 miliard rozpadů za jedinou sekundu!

Odpovídá to přibližně aktivitě 1 gramu izotopu radia ^{226}Ra . [6]

Tabulka 2: Srovnání fyzikálních jednotek intenzity záření

Rozpadů za sekundu:	
Becquerel [Bq]	Curie [Ci]
1	$370 \cdot 10^9$

Tabulka 3: Vztahy mezi jednotkami

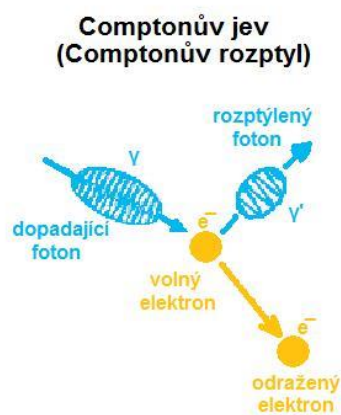
Absorbovaná dávka:		
Základní	Evropa	Amerika
J/kg	Gray	Rad
1	1	100
Odpovídající biologický účinek:		
J/kg	Sievert	Rem
1	1	100

1.1.2 Mechanismy interakce

Foton gamma záření může interagovat s elektronem atomu okolního prostředí a předat mu veškerou svou energii, díky čemuž elektron opustí látku. Jeho kinetická energie je dána energií záření, sníženou o množství nutné k uvolnění elektronu. Tento **fotoelektrický jev** je dominantní zejména u záření s nízkou energií (pod 50 keV).

Středně energetické záření (100 keV až 10 MeV) vzniká například při jaderném výbuchu. Záření předá elektronu látky část své energie, čímž jej "uvolní" z atomu a zbylá část záření (ochuzená o energii upotřebenou k uvolnění atomu, který stál v cestě) pokračuje dále. Právě jsme popsali **Comptonův jev** (rozptyl).

Při průletu fotonu v blízkosti jádra může vzniknout **elektron-pozitronový pár**. K tomu je zapotřebí energie alespoň $1,02 \text{ MeV}$, přebytečná energie dodá nově vzniklému páru počáteční kinetickou energii. [69]

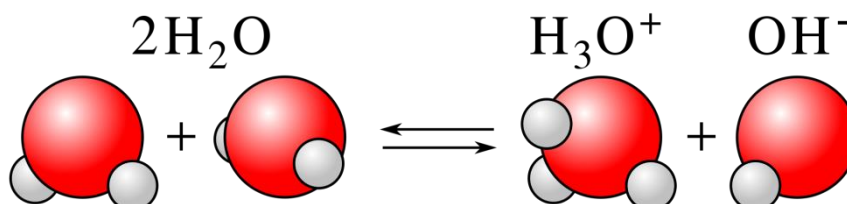


Obrázek 2: Comptonův jev [70]

1.1.3 Interakce s živými organismy

Ionizující záření, při průchodu okolním prostředím, má schopnost ionizovat neutrální částice („udělit“ jim kladný, nebo záporný náboj). To může v živých organismech **způsobit narušení chemických vazeb**, následované rozpadem molekul a změnami ve struktuře bílkovin.

Navíc dochází k tvorbě **volných radikálů** při interakci s vodou uvnitř organismu. Ta je rozštěpena na kationt vodíku (H^+) a vysoce reaktivní hydroxylový iont (OH^-). Volné radikály následně poškozují buňky ve svém okolí a mohou též nepříznivě ovlivnit DNA.



Obrázek 3: Vznik volných radikálů [5]

Poškozené buňky nemusí automaticky odumřít, zejména pokud dojde k poškození mechanismů apoptózy (programované buněčné smrti).

Buňka se může začít rozmnožovat (dělit), čímž vytvoří mnoho dalších dysfunkčních buněk, což se projeví **zhoubným bujením** (rakovinou), případně změnou DNA – **mutací**.

K výše uvedeným **stochastickým (nepředvídatelným) účinkům** dochází při jakkoliv slabém ozáření. Vzrůstající intenzita zvyšuje četnost poškozených buněk a tím pravděpodobnost vzniku zhoubného bujení. Při vysokých dávkách dochází naopak k poškození tkáně přímo úměrně obdržené dávce – účinky dokážeme poměrně dobře odhadnout a **určit** míru poškození. Jde tedy o **účinky deterministické**. [60]

1.1.4 Způsoby ozáření

Nejvýznamnější běžný způsob ozáření bývá **vdechnutí** radioaktivních částic, vzhledem k jejich ukládání v různých částech dýchací soustavy, kterou opouštějí jen velice neochotně. Vdechnout je můžeme při pobytu v zamořené oblasti, kde jsou rozptýleny v oblasti vzduchu. Navíc dochází k ozáření **absorpcí** – přímým průnikem ionizujícího záření naším organismem a interakcí s jeho jednotlivými částmi. **Pozření** stravy obohacené radionuklidy nám pravděpodobně také moc neprospěje. V určitých případech (lékařská diagnostika) může být radioaktivní látka vpravena do organismu intravenózně (**injekcí**). [60]

Kritičtější, než **vnější kontaminace** (absorpcí) je **vnitřní kontaminace** (vdechnutím, pozřením, přímým stykem pokožky s radioaktivní látkou). Radionuklid se usadí uvnitř organismu, může být nahromaděn v určitých částech těla a ozařovat organismus **dlouhodobě zevnitř**.

1.1.5 Ochrana vůči radioaktivitě

Základní **ochrana časem** spočívá v co nejkratší době expozice. Dostatečná **vzdálenost** od zdroje ionizujícího záření je běžně používaným způsobem, protože radioaktivita klesá exponenciálně s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje – vyhořelé jaderné palivo nezahrabeme do pískoviště uprostřed sídliště, ale bude vhodnější jej vyvézt do neobydlené oblasti. Tam jej navíc utlumíme **stíněním**, obvykle olovem, nebo betonem s příměsí barytu. Stíněním záření zcela neodstraníme – můžeme ovšem radikálně snížit množství procházejících vln (většina bude absorbována stínícím materiálem). U stínění udáváme „**polotloušťku**“ **materiálu** – tloušťku materiálu, která propustí polovinu procházejícího záření. [69]

1.1.6 Externí dozimetrie

Určením množství ionizujícího záření v okolním prostředí, případně množství záření absorbovaného organismem, se zabývá **dozimetrie** (určení „dávky“). Lidé pracující v rizikovém prostředí s sebou nosí **osobní dozimetry**. Dříve šlo o pásek fotografického filmu, který působením záření černal. Po vyvolání byla podle intenzity zčernání stanovena absorbovaná dávka. Tyto dozimetry byly pochopitelně určeny pro jednorázové použití. Novější typy využívaly jevů termoluminiscence (TLD). Základ nejčastěji tvořil fluorid vápenatý, nebo fluorid lithný. Ionizující záření vybudí elektrony těchto materiálů do excitovaného stavu – přecházejí na vyšší energetickou hladinu, kde zůstávají. Při **zahřátí** krystalu elektron sestoupí na svou původní hladinu, přičemž dochází k uvolnění energie (získané ionizací) ve formě světla.



K uvolnění energie může dojít i po delším časovém úseku (dochází k **blednutí**). To ztěžuje zjištění množství absorbované dávky, proto má každý TLD štítek s dobou, po kterou lze považovat odečtený údaj za relevantní. Typická doba je řádově několik týdnů, až do dvou let, v závislosti na použitém termoluminiscenčním materiálu. [58]



Dozimetry stimulované optickou luminiscencí (OSL) využívají namísto tepla (pro sestoupení elektronu na základní energetickou hladinu), **světlo**. Dochází k uvolnění energie předané ionizací ve formě světla. Vhodný detektor (fotonásobič) interpretuje množství fotonů pomocí elektrického signálu, z něhož může být vypočtena absorbovaná dávka záření. [43]

Následovalo vytvoření osobních **elektronických dozimetrů**, které mohou zobrazit aktuální absorbovanou dávku, prozatímní celkovou absorbovanou dávku i výstražnou signalizaci (alarm) při překročení nastavených hodnot. [7]

1.1.7 Interní dozimetrie

Co dělat v případě, kdy při pobytu v radioaktivním prostředí nemáme ponětí o intenzitě záření? Nepřímo lze určit množství absorbovaného záření z biologických vzorků ozářené osoby. Obvykle rozborem moči, případně fekálií. Tento způsob je vhodný zejména pro určení množství absorbovaných alfa a beta částic, které jsou jinými metodami obtížněji zjistitelné. [24]

Přímou metodu, vhodnou zejména pro určení množství absorbovaných gamma částic a rentgenových paprsků, nám poskytuje **celotělový čítač**, který zachycuje radioaktivní záření vydávané exponovaným člověkem.

1.1.8 Léčba ozáření

Základ tvoří určení **absorbované dávky záření** vyhodnocením dostupných dozimetrických údajů, ideálně z osobního dozimetru, statické měřicí dozimetrické stanice (zhruba ukazuje radioaktivní zatížení oblasti), nebo jednou z metod uvedených v předchozí kapitole.

V případě jaderné katastrofy/havárie postiženého svlečeme a následně provedeme zevní **dekontaminaci** omytím proudem vody, běžnými rozpouštědly (šampon, jar, roztok kyseliny citrónové). Následuje **jodová profylaxe**, tj. podání jodidu draselného, který zabraňuje hromadění ozářeného jódu ve štítné žláze (centru imunitního systému). Podání 250 mg ve formě tablet poskytne ochranu po dobu 5ti hodin. Opatření je účinné buď, **preexpozičně** (podání tablet před vystavením zdroji ionizujícího záření), případně co nejdříve po ozáření (řádově jednotky hodin). Účinnost uvedeného opatření klesá s prodlevou mezi ozářením a podáním.

Jodid draselný je schopen ochránit **výhradně** jód ve štítné žláze. K odvodu jiných druhů radionuklidů je třeba vhodné antidotum (protilátka). Z těch netradičních nám do určité míry může pomoci alkohol (odvod stroncia). Známý je případ rybářů v blízkosti Černobyli, kterým údajně větší množství alkoholu pomohlo vyrovnat se s následky ozáření.

V rané fázi je dále možné **vyvolat zvracení** při vdechnutí (odstranění spolknutých hlenů, slin), či požití radioaktivního materiálu. Propláchnout oči **borovou vodou**, ústa čistou vodou (případně roztokem manganistanu draselného). Dále je potřeba **podávat tekutiny**, případně vhodné **adsorbens** (aluminium fosfát, černé uhlí) a nějaké **laxativum** (prostředek urychlující látkovou výměnu), jako síran hořečnatý (2 lžíce), nebo ricinový olej.

Následuje **podpurná léčba** k prevenci a eliminaci dalších komplikací. V důsledku ozáření může mít lidský organismus značně poškozenou obranyschopnost (imunitu). Podávání **antibiotik** potlačí bakteriální infekce. Strava i tekutiny by měly být, pokud možno, **sterilní**. Jsou též vhodné prostředky pro **podporu imunitního systému**. Ozáření doprovází **chudokrevnost**, proto je vhodné podávat látky podporující **krvetrobu**, které jsou schopny stimulovat zbylé kmenové buňky krvetroby.

Na specializovaných pracovištích pokračuje léčba **transplantací kmenových buněk krvetroby**. Zejména jejich včasné podání umožní znovuosídlení krvetvorných prostor, což vede k jejich repopulaci krvinkami a záchraně života ozářeného. [31]

1.1.9 Shrnutí

Cílem této kapitoly bylo zevrubně projít a sumarizovat problematiku účinků ionizujícího záření na živé organismy.

Byly probrány druhy radioaktivního záření, způsoby interakce s okolním prostředím (v závislosti na množství energie přenášené zářením), principy působení na živé organismy.

Stručně byly utříděny různé druhy jednotek charakterizujících radioaktivní záření, které často působí zmatečně, dokonce i v odborných kruzích, nastíněny jejich vzájemné vztahy a přehledně utříděny pro názornější pochopení.

Byly rozepsány možné způsoby i závažnost jednotlivých druhů ozáření, spolu s odůvodněním, proč jsou některé druhy nebezpečnější než jiné. Dále jsou uvedeny možnosti ochrany a způsoby zjišťování okolního záření i možnosti určení množství záření absorbované živými bytostmi.

1.2 Neionizující záření

Veškeré elektromagnetické záření, jehož částice (případně kvanta) nemají energii dostatečnou k ionizaci atomů či molekul (odtržení elektronu z obalu atomu) [33], avšak jsou schopny vybudit elektrony do excitovaného stavu, tj. přemístit na vyšší energetickou hladinu, například z valenčního pásu do vodivostního. Tyto vybuzené elektrony pak při sestupu na svou původní hladinu mohou přebytečnou energii (dodanou zářením) uvolnit v jiné formě (světlo, teplo). Tento princip je hojně využíván například při návrhu polovodičových součástek (LED dioda).

Interakce s prostředím nastává vždy. Energie jednotlivých částic (nebo kvant) určuje **způsob interakce**. Celková intenzita záření (počet částic) ovlivňuje **sílu účinku**. Dostatečně intenzivní záření tedy může statisticky významně interagovat s okolním prostředím.

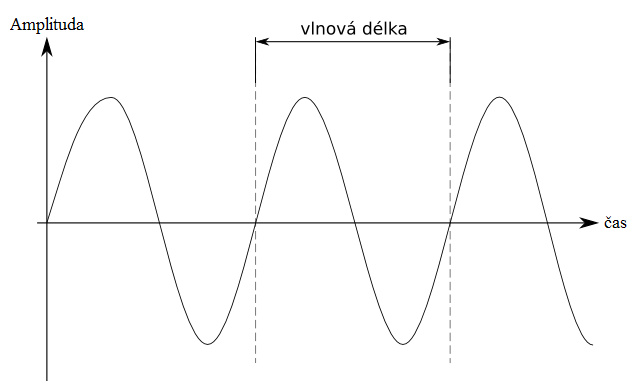
Základní složky elektromagnetického záření jsou elektrické a magnetické pole. **Elektrické pole** vzniká při **rozdílu potenciálů**, což je množství práce nutné k přenesení jednotkového elektrického náboje ze vztažného bodu s nulovým potenciálem do daného místa. Místo s potenciálem 1V vůči zemi vytváří elektrické pole s napětím 1 V. Vzniká ve všech zařízeních připojených ke zdroji napájení, i když samotným zařízením neprotéká elektrický proud. **Magnetické pole** je vytvářeno **elektrickým proudem** (pohybem nabitých částic), tedy až ve chvíli, kdy je zařízení plně v provozu.

Kromě pohybu částic může být magnetické pole vytvářeno pomocí **momentu elektronů** u feromagnetických látek. Takové zdroje označujeme jako **permanентní magnety** (jsou zdrojem magnetického pole, aniž by jimi procházel elektrický proud). Feromagnetické látky jsou v podstatě **paramagnetické** (slabě zesilující magnetické pole). Vhodným vnitřním uspořádáním částic lze působením synergického efektu docílit zesílení účinků (například magnetizací). Naproti tomu **diamagnetické látky** (slabě zeslabující magnetické pole) by vhodným vnitřním uspořádáním mohly účinně zeslabovat magnetické pole.

1.2.1 Frekvenční pásma

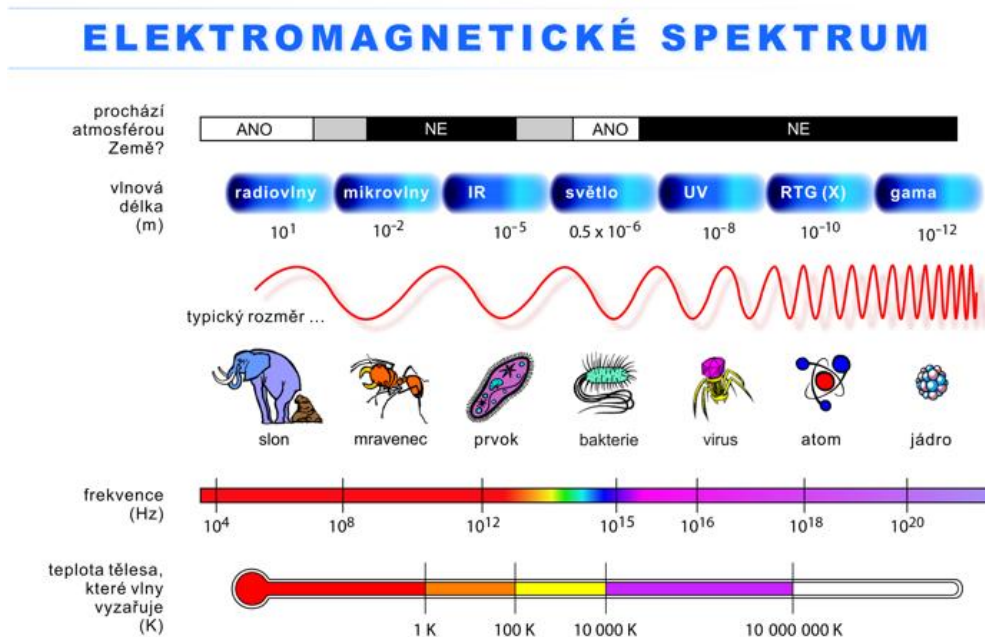
Frekvence je fyzikální veličina, která udává počet opakování periodického děje za daný časový úsek [18]. Vyjadřuje se v jednotkách Hertz [Hz], přičemž jeden Hz = jeden cyklus za jednu sekundu. Naše částice (fotonové kvantum) kmitá z jedné krajní polohy do druhé (osciluje). Mění svou polohu (pohybuje se) v závislosti na čase – vytváří **vlnění**. Vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body vlny, které jsou ve stejné fázi rozdílného cyklu, označujeme jako **vlnovou délku**. [62]

Frekvence a vlnová délka jsou spolu vzájemně spjaty: $f = \frac{v}{\lambda}$, přičemž v udává **rychlost** šíření vlny v látkovém prostředí. Ve vakuu je rychlost šíření rovna rychlosti světla, proto bývá často udáván vzorec ve tvaru $f = \frac{c}{\lambda}$, kde c udává **rychlost světla**. [15]



Obrázek 4: Znárodnění vlnové délky [42]

Podle frekvence můžeme rozdělit **elektromagnetické spektrum** (záření všech známých vlnových délek) do několika pásem.



Obrázek 5: Elektromagnetické spektrum [11]

Tabulka 4: Energie frekvenčních pásem [3]

Druh záření	Energie fotonu	Vlnová délka
Ionizující záření	>1 keV	<1 nm
Ultrafialové záření	0,3 eV – 1 keV	1 nm – 400 nm
Viditelné záření	0,15 eV – 0,3 eV	400 nm – 780 nm
Infračervené záření	40 meV – 0,3 eV	780 nm – 3 mm
Mikrovlnné a rádiové vlny	< 40 meV	> 3 mm

1.2.2 Interakce s prostředím

Na rozhraní dvou prostředí je část vlny **odražena** zpět do prostoru. Zbytek **prochází** materiálem, přičemž část je jím **absorbována** a přeměněna na jiné formy energie (nejčastěji teplo).

Každý materiál má určité **charakteristické vlastnosti**, které určují, jakým způsobem a do jaké míry s nimi mohou interagovat okolní záření. Některé z nich lze popsat **fyzikálními veličinami**, díky nimž můžeme lépe porozumět mnoha interakčním mechanismům.

Permeabilita μ vyjadřuje vliv materiálu nebo prostředí na výsledné účinky působícího magnetického pole. [44] V biologických tkáních, které vykazují paramagnetické, nebo diamagnetické vlastnosti, má permeabilita druhořadý vliv. [23] Částečně ovlivňuje, do jaké hloubky tkáň může vnější záření proniknout.

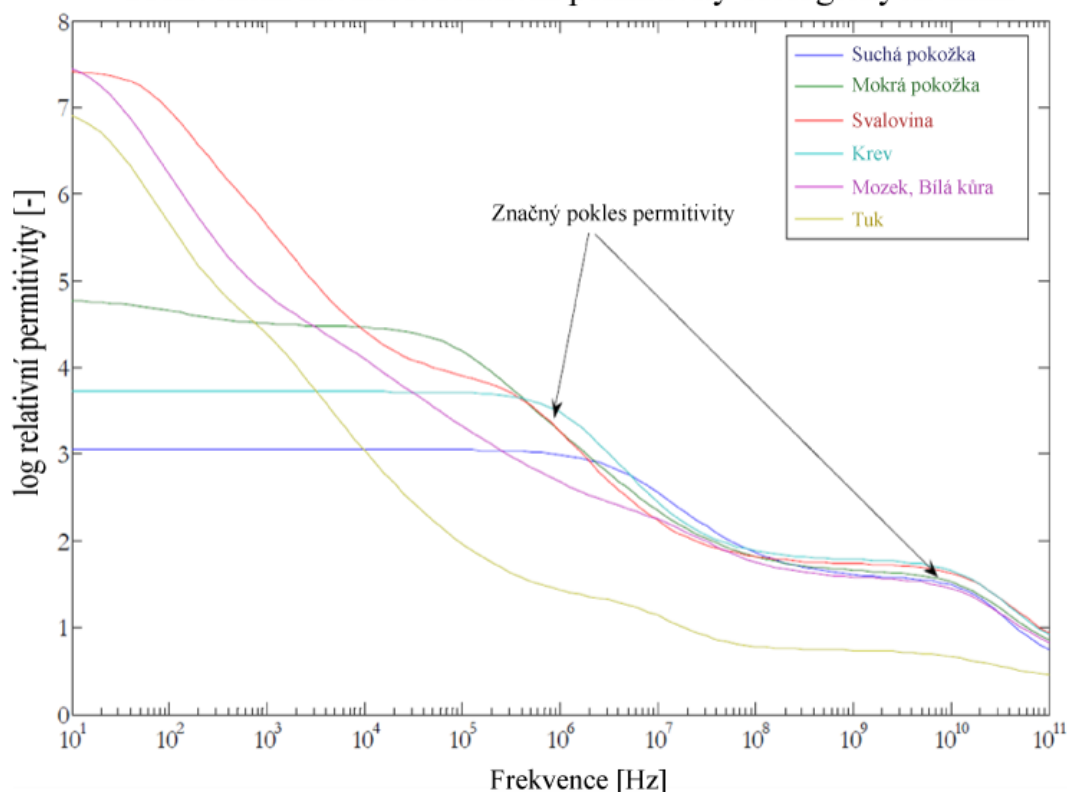
Permitivita ϵ udává míru polarizovatelnosti materiálu, zatímco **konduktivita** σ množství elektronů, které mohou být uvedeny do uspořádaného pohybu.

Tabulka 4: Analogie mezi elektrickým a magnetickým polem

Druh pole	Vztah	Veličina	Materiálová konstanta
Magnetické	$\vec{B} = \mu * \vec{H}$	Magnetická indukce	Permeabilita
Elektrické	$\vec{P} = (\epsilon - \epsilon_0) * \vec{E}$	Polarizace dielektrika	Permitivita
Elektromagnetické	$\vec{J} = \sigma * \vec{E}$	Proudová hustota	Konduktivita

1.2.3 Fyzikální vlastnosti biologických tkání

Frekvenční závislost relativní permitivity biologických tkání



Obrázek 6: Frekvenční závislost relativní permitivity biologických tkání [23]

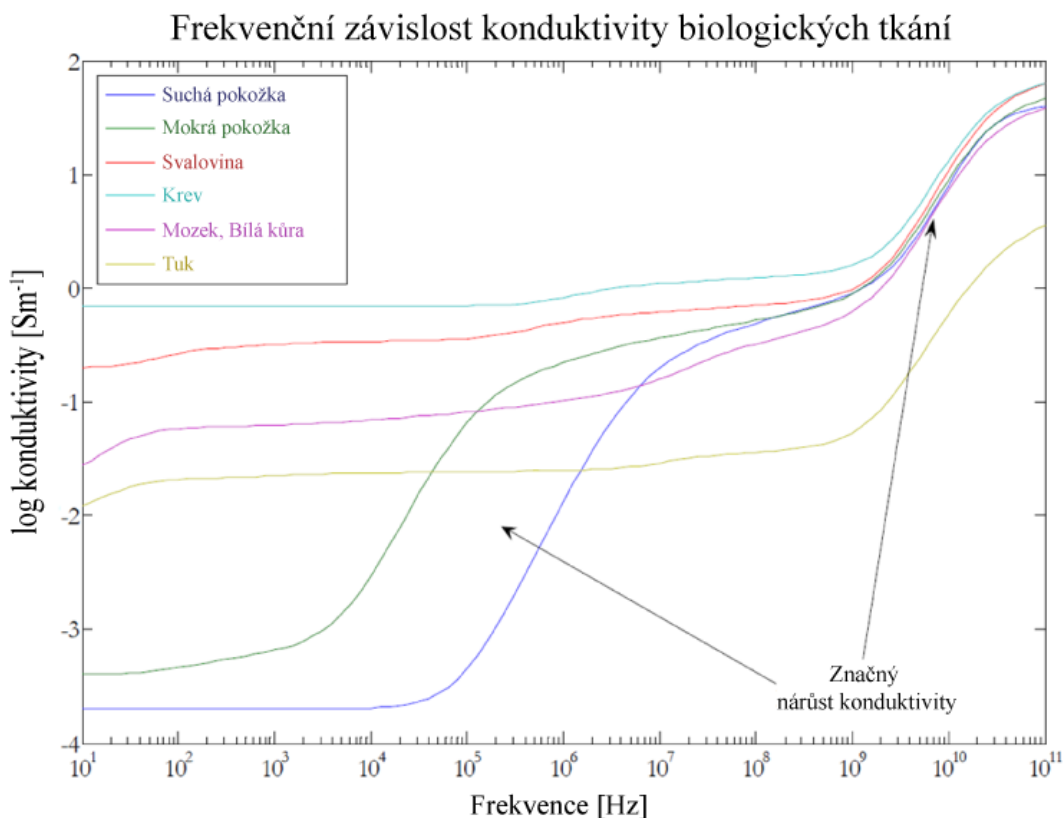
Graf ukazuje závislosti relativní permitivity šesti biologických tkání na frekvenci elektromagnetického záření, jehož působení jsou vystaveny. Frekvence je uvedena na vodorovné ose, zatímco velikost relativní permitivity v logaritmickém měřítku na svislé ose. Modrá křivka označuje suchou kůži, zelená mokrou kůži, červená svaly, světle modrá krev, růžová mozek a bílou kůru mozkovou, žlutá tuk.

Z grafu vyplývá, že s narůstající frekvencí záření klesá jeho schopnost polarizovat molekuly biologických tkání. Prahová hodnota je řádově 1 MHz, za níž buňky všech tkání shodně přestávají být citlivé vůči polarizujícím účinkům vnějších polí. Při vysokých frekvencích nestíhají sledovat změny vnějšího střídavého pole, tudíž jejich části s magnetickými dipóly zůstávají víceméně v jedné pozici.

Velký význam má permitivita při určování biologických účinků polí s **extrémně nízkou frekvencí** (ELF). Magnetické dipóly tkání stíhají bez problému sledovat změny procházejících záření, tudíž jejich výsledné natočení může být dáno vnějším polem. Otázkou zůstává, jakým způsobem tato polarizace ovlivňuje biologické pochody zasažených oblastí.

Svaly i mozková tkáň jsou obzvláště citlivé, čehož lze využít např. pro svalovou regeneraci po úrazech, případně v neurologii. Naopak krev i mokrá kůže obsahující roztoky solí, případně dalších vodivých látek (železo), vykazují značnou konduktivitu, tudíž na ně má vnější pole, z hlediska polarizovatelnosti, menší vliv.

Zvláštností je tuková tkáň, která jako jediná citlivě reaguje na nízkofrekvenční pole, zatímco se vzrůstající frekvencí tahle citlivost prudce klesá a zůstává velmi nízká i v porovnání s relativně „necitlivými“ tkáněmi. Navíc má relativně dobré izolační vlastnosti.



Obrázek 7: Frekvenční závislost konduktivity biologických tkání [23]

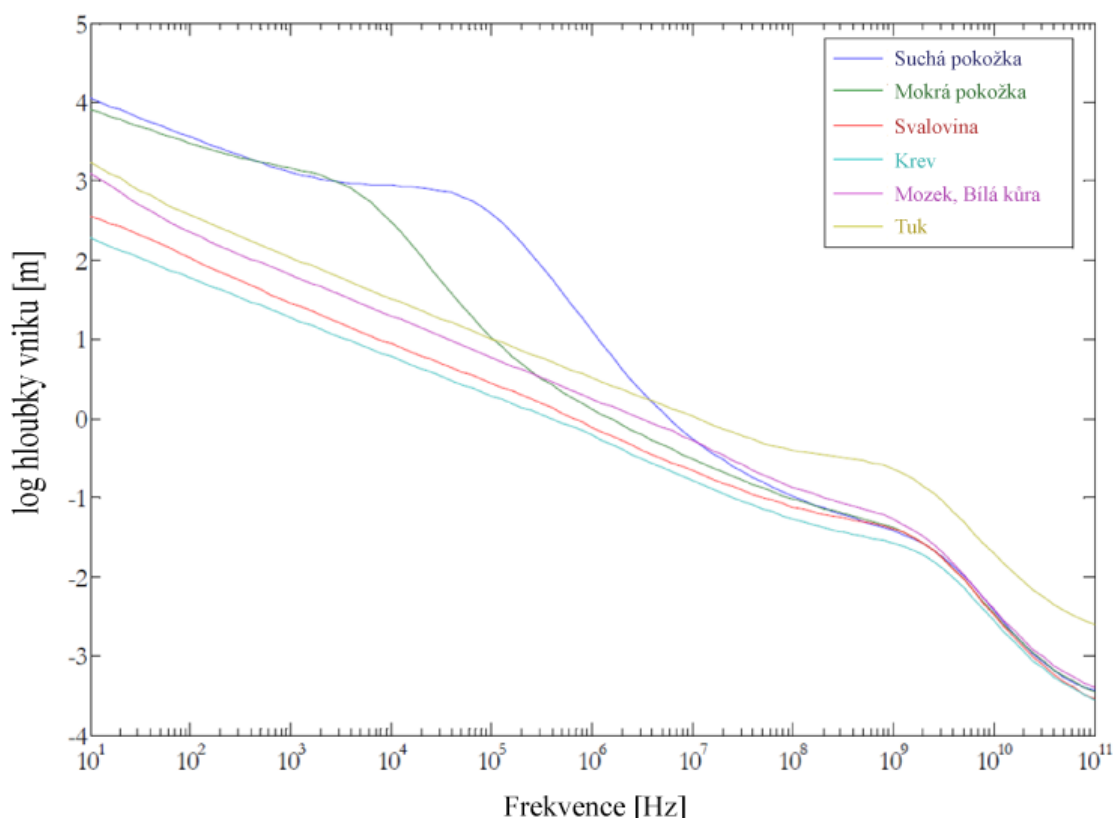
Graf ukazuje závislost velikosti konduktivity šesti biologických tkání na frekvenci elektromagnetického záření, jehož působení jsou vystaveny. Frekvence (v Hertzích) je uvedena na vodorovné ose, zatímco velikost konduktivity v logaritmické míře platí pro svislou osu. Modrá křivka označuje suchou kůži, zelená mokrou kůži, červená svaly, světle modrá krev, růžová mozek a bílou kůru mozkovou, žlutá tuk.

Se vzrůstající frekvencí výrazně roste vodivost biologických tkání. Strmý nárůst vodivosti začíná v oblasti kolem 2 GHz. Krev je relativně dobře vodivá tekutina (v porovnání s jinými tkáněmi), proto má ze všech tkání nevyšší hodnotu konduktivity.

Zvláštní případ tvoří pokožka, která je zpočátku relativně dobrým izolantem, ovšem s narůstající frekvencí, v oblasti desítek (vlhká) až stovek (suchá) kilohertzů dochází ke znatelnému nárůstu konduktivity, až na úroveň srovnatelnou s ostatními tkáněmi.

Od této zvláštnosti pochází výraz „*skin effect*“, protože s narůstající frekvencí začíná elektrický proud téct zejména povrchem materiálu - proudová hustota na povrchu znatelně převyšuje hustotu proudových siločar uvnitř materiálu.

Frekvenční závislost hloubky vniku biologických tkání



Obrázek 8: Frekvenční závislost hloubky vniku biologických tkání [23]

Graf ukazuje závislost hloubky vniku elektromagnetického záření, pro šest biologických tkání, na frekvenci elektromagnetického záření, jehož působení jsou vystaveny. Frekvence je uvedena na vodorovné ose, zatímco hloubka vniku v logaritmickém měřítku na svislé ose. Modrá křivka označuje suchou kůži, zelená mokrou kůži, červená svaly, světle modrá krev, růžová mozek a bílou kůru mozkovou, žlutá tuk.

Hloubka vniku záření označuje vzdálenost, na které se v daném materiálu amplituda veličin elektromagnetického pole utlumí e -krát, kde e je Eulerovo číslo. [12] Jinými slovy určuje, jak hluboko mohou proniknout elektromagnetické vlny absorbované biologickými tkáněmi. Se vzrůstající frekvencí dochází k poklesu hloubky průniku. Do frekvence řádově jednotek MHz mohou vnější záření bez problémů pronikat skrz kůži hlouběji do biologických tkání.

1.2.4 Mechanismy interakce

Základní rozdělení biologického působení je na **tepelné** a **netepelné**. **Tepelné účinky** jsou zprostředkované – energie ve formě elektromagnetického záření je přeměněna na teplo, které následně ohřívá tkáň a nárůst teploty může způsobit biologické změny. **Netepelné účinky** zahrnují přímou interakci s dílčími součástmi biologických systémů (buňkami, jádry buněk, proteiny).

1.2.5 Netepelné účinky

Zatímco tepelné biologické účinky elektromagnetického záření jsou dobře zdokumentovány a vykazují silnou závislost na frekvenci, u vyhodnocování netepelných účinků nastává několik problémů. Úroveň pochopení netepelných mechanismů působení klesá v závislosti na tom, jak se blížíme z oblasti celých buněk, do jejich vnitřního prostoru, až na úroveň DNA. [23]

Preexpoze. Provádění studií je velmi komplikované, protože lidé podléhající studiím jsou již před jejich započítím preexponováni různými druhy polí. Takže biologická změna, kterou by vyvolalo testované záření, může být vyvolána v důsledku vystavení subjektu záření se stejnými biologickými účinky, ještě před započítím samotné studie (změny není možno pozorovat).

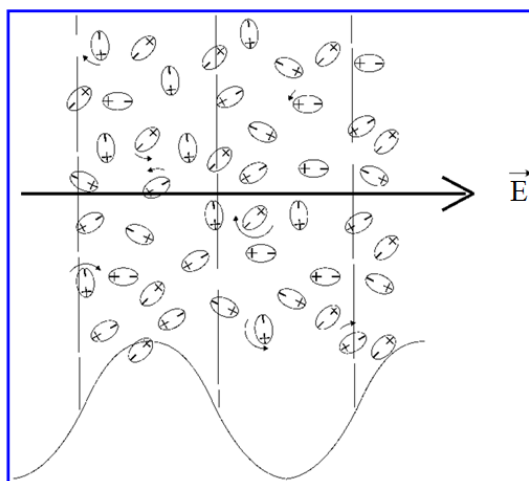
Nízká reprodukovatelnost. Malá změna v konfiguraci experimentu může mít za následek zcela opačné výsledky. Dokonce i použití buněk stejného typu (in-vitro studie), může dávat rozdílné výsledky ve studiích stejného typu.

Jedním z hlavních mechanismů je působení na plasmatickou membránu. To může být způsobeno polarizací dipólů, například tekutiny vyplňující mezibuněčný prostor. Následuje řetězec změn přes buněčnou membránu, dovnitř (enzymy, bílkoviny, geny), až na úroveň buněčného jádra, případně DNA. [23]

1.2.6 Tepelné účinky

Jelikož vnější elektromagnetické pole může způsobit polarizaci dipólových molekul, dochází k nárůstu jejich kinetické energie a následně přeměně v teplo: molekula má snahu natáčet se proti účinkům působícího záření.

Dipóly budou natáčeny do různé míry, v závislosti na vlastnostech vnějšího pole i vzájemné orientaci ostatních dipólů. Proto každá molekula obdrží (i ve stejnorodém poli) rozdílné množství kinetické energie.



Obrázek 9: Polarizace dipólů [67]

S narůstající frekvencí přestávají dipóly stíhat sledovat změny vnějšího pole. Předaná energie není využita pro mechanické natočení, ale je zužitkována jiným způsobem – přeměnou na **teplo**, které zvyšuje teplotu dipólových molekul i jejich okolí.

1.2.7 Tepelná regulace

Když dojde kdekoliv uvnitř lidského těla k nárůstu teploty, termoregulační mechanismy organismu začnou přebytečné teplo odvádět pryč. **Pasivní** termoregulační **mechanismy** spočívají v odvodu tepla vyzařováním, odpařováním, prouděním, případně vedením. **Aktivní** využívají proudění tekutin (krve), které přebytečné teplo odvádějí do vzdálenějších částí organismu, případně směrem k povrchu, až do pokožky, odkud může být odvedeno (vyzářeno) do okolního prostředí.

Pokud ovšem teplota vzrůstá nezávisle na regulačních snahách organismu, může dojít ke zhroucení regulačních mechanismů a teplota začne nekontrolovaně růst, což může způsobit rozsáhlá poškození. Indikátorem ukazujícím na působení škodlivých vlivů je zvýšená aktivita **bílkoviny tepelného šoku** (HSP).

Nejvíce ohroženými částmi lidského těla jsou oči, žlučník a genitálie vzhledem k jejich menší schopnosti efektivně odvádět přebytečné teplo pomocí aktivních termoregulačních mechanismů (průtokem krve). [23]

1.2.8 Specifická míra absorpce

Specifická míra absorpce (SAR), jinými slovy **měrný absorbovaný výkon**, je fyzikální veličina nejčastěji používaná k popisu absorpce výkonu živou tkání exponovanou v elektromagnetickému poli. Je definován jako výkon absorbovaný v tkáni o jednotkové hmotnosti a má jednotku W/kg. [50] Obvykle bývá vztahována k objemu jednoho gramu, případně deseti gramů. Uváděné hodnoty jsou nejvyššími naměřenými hodnotami v celém objemu.

Měrný absorbovaný výkon do značné míry závisí na tvaru jednotlivých exponovaných částí, jejich složení i tvaru a pozici zdroje záření. Pro objektivní posouzení je třeba zařízení umístit do pozice, v jaké by se nacházelo při běžném použití: proměřovaný mobilní telefon bude umístěn u ucha osoby, případně modelu. SAR potom měříme v místě, kde dochází k nejvyšší míře absorpce (obvykle nejbliže jeho anténě).

1.2.9 Ochrana vůči neionizujícímu záření

V závislosti na typu neionizujícího záření, jeho frekvenci, intenzitě a době expozice používáme různé způsoby ochrany vůči nežádoucím účinkům neionizujícího záření. Základní způsoby ochrany vykazují určitou podobnost s ochranou vůči ionizujícímu záření:

- **Vyloučení expozice**, případně co nejkratší doba vystavení zdroji neionizujícího záření, způsobujícího zdravotní problémy.
- **Zvětšení vzdálenosti** zdrojů, u nichž intenzita záření výrazně klesá s narůstající vzdáleností.
- **Zakrytí/Stínění** problematických zařízení, jejichž funkce nespočívá v emisi neionizujícího záření.
- **Signalizace** (optická, zvuková) chodu zařízení, pokud je nelze kontrolovat zrakem.
- **Použití ochranných prostředků** a ochranných pracovních pomůcek, pokud není možné omezení expozice technickými prostředky. Celo-obličejový štít pro svařování, brýle nepropouštějící UV záření, brýle pro práci s laserem, ochranný oděv apod.
- **Zdravotní prohlídky** zaměstnanců vykonávajících rizikové práce. [3]

2 Legislativa

Hygienické limity pro ochranu zdraví obyvatelstva, vůči účinkům ionizujícího i neionizujícího záření jsou odlišné v různých částech světa. Každý stát, či jiné politické uskupení, má svou vlastní úpravu, která obvykle vychází z doporučení vybraných organizací.

Jednou z nejdůležitějších organizací, na základě jejichž doporučení bývají stanovovány normy, je **mezinárodní komise pro ochranu vůči neionizujícímu záření (ICNIRP)**. Jde o sdružení nezávislých špičkových vědeckých pracovníků, složené z hlavní čtrnácti členné komise, vědecké expertní skupiny a jednotlivých projektových skupin, zabývajících se dílčími problémy. Jejich hlavní oblastí působnosti je šíření informací a doporučení ohledně možných zdravotních rizik, způsobených vystavením zdrojům neionizujícího záření – optických (ultrafialové, viditelné, infračervené záření), statických i časově proměnných elektrických a magnetických polí, radiofrekvenčních vln, mikrovlnných polí, či ultrazvuku. [65]

Její „mateřskou“ organizací je **mezinárodní asociace pro ochranu vůči radioaktivnímu záření (IRPA)**, která od roku 1965 na celém světě zajišťuje výměnu informací mezi lidmi, zabývajících se ochranou vůči účinkům ionizujícího záření. [25]

Společně s **IEEE** (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a **WHO** (World Health Organization) utváří odborný základ pro pracovníky, zabývajících se tvorbou legislativních opatření a hygienickým limitů.

2.1 Právní úprava české republiky

Po rozpadu bývalého Československa u nás platila vyhláška Ministerstva zdravotnictví České Republiky č. 408/1990 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky elektromagnetického záření. Podle této vyhlášky byla maximální povolená intenzita elektrického pole 4,3 V/m.

Od 1. ledna 2001 byla tato vyhláška nahrazena nařízením vlády č. 480/2000 Sb, přičemž došlo k více než desetinásobnému snížení limitů. Později byla novelizována (v souvislosti se vstupem do Evropské unie a harmonizací s mezinárodními kritérii pro stanovení limitů) **vládním nařízením č. 1/2008 Sb.** o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, vycházejícím z doporučení ICNIRP.

2.1.1 Přípustné hodnoty elektromagnetického záření

Tabulka 5: Limitní hodnoty SAR pro ČR [39]

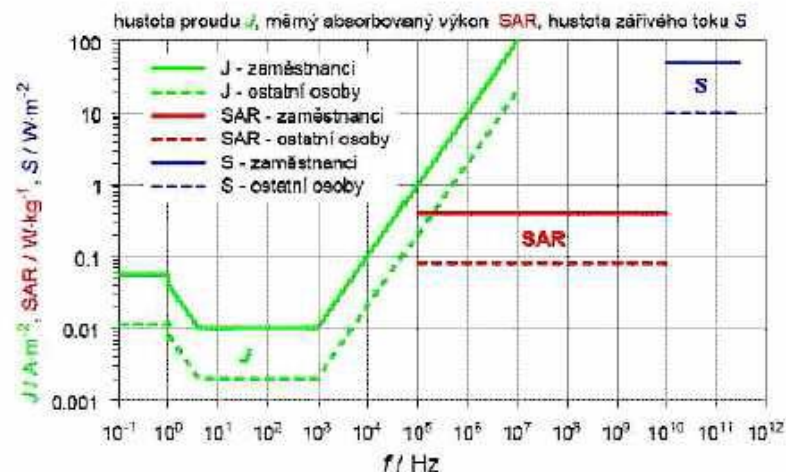
Měrný absorbovaný výkon (SAR) ^{b)} - nejvyšší přípustné hodnoty			
Platí pro frekvence od 10 ⁵ Hz do 10 ¹⁰ Hz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a celé tělo	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoliv 10 g ^{a)} tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoliv 10 g ^{a)} 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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Při absorpci **elektromagnetického záření** živou tkání, může být značná část přeměněna v teplo (převážně ve vysokofrekvenčních polích nad 100 kHz).

U polí s **extrémně nízkou frekvencí** (ELF) převažují dráždivé účinky indukce elektrických proudů uvnitř tkáně, přičemž dráždivý účinek do 100 Hz úměrně narůstá se vzrůstající frekvencí. V oblasti ($100 \div 3\,000$) Hz dochází k jeho poklesu, přičemž kolem $10\,000\text{ Hz}$ přestává být znatelný. [36]

Záření s **velmi vysokou frekvencí** (VHF) bývá absorbováno v tenké vrstvě při povrchu těla (skin effect). Mluvíme zde o **hustotě zářivého toku** pohlceného tkání.

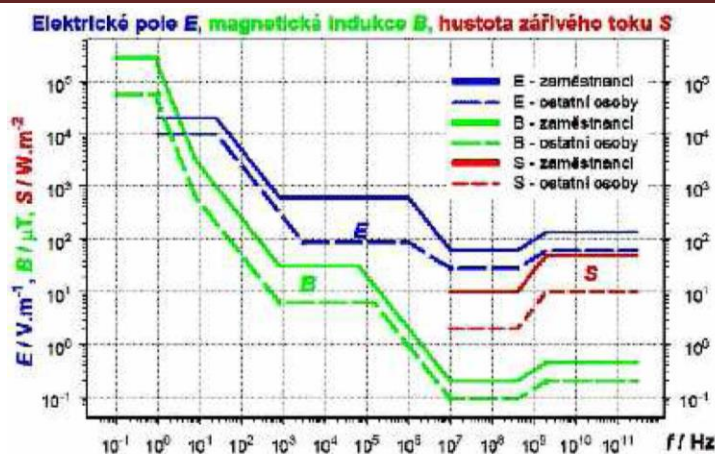


Obrázek 10: Nejvyšší přípustné hodnoty neionizujícího záření [3]

Mezi běžnou populací jsou zastoupeny děti, starci, těhotné ženy, nemocní a neduživí lidé. Naopak zaměstnancům (zvláště v elektroprůmyslu) je umožněn pobyt i v silnějších polích, jinak by některé profese nemohly být běžně vykonávány lidmi a případná ochranná opatření by byla vysoce nákladná. Uvedené hodnoty jsou platné pro časově neomezenou expozici.

2.2 Referenční úroveň

Abychom mohli přímo stanovit limity bez přímého zjišťování účinků absorbovaného záření konkrétního typu (které bývá nákladnou záležitostí), jsou stanoveny **referenční úroveň neionizujícího záření**. Jde o konkrétní hodnoty fyzikálních veličin popisujících elektromagnetická pole, při jejichž dodržení by neměly být za žádných okolností překročeny nejvyšší přípustné hodnoty. Díky tomu lze poměrně rychle posoudit i komplikované situace, případně účinky polí s velmi složitým časovým průběhem.



Obrázek 11: Referenční úrovně neionizujícího záření [3]

Tabulka 6: Referenční úrovně intenzity elektrického pole [39]

Referenční úrovně intenzity elektrického pole E – nepřetržitá expozice			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
f [Hz]	E [$V \cdot m^{-1}$]	f [Hz]	E [$V \cdot m^{-1}$]
< 1	– ^{a)}	< 1	– ^{a)}
1 – 8	20000	1 – 8	10000
8 – 25	20000	8 – 25	10000
25 – 820	$5 \cdot 10^5 / f$	25 – 800	$2,5 \cdot 10^5 / f$
50	10000	50	5000
820 – $3 \cdot 10^3$	610	800 – $3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^5 / f$
$3 \cdot 10^3$ – $65 \cdot 10^3$	610	$3 \cdot 10^3$ – $150 \cdot 10^3$	87
$65 \cdot 10^3$ – 10^6	610	$150 \cdot 10^3$ – 10^6	87
10^6 – 10^7	$610 \cdot 10^6 / f$	10^6 – 10^7	$87 \cdot 10^3 \cdot f^{0,5}$
10^7 – $4 \cdot 10^8$	61	10^7 – $4 \cdot 10^8$	28
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$1,375 \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	137	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	61

2.3 Právní úprava ve světě

Dříve byly hlavní rozdíly mezi normami Sovětského svazu a Západní Evropou (USA). Hygienické limity zemí bývalého východního bloku, Číny, Ruska a několika dalších států, v důsledku odlišné kultury i politického pozadí, vycházejí ze zcela odlišných předpokladů, než v USA, Evropské unii, případně Austrálii, které používají zejména doporučení mezinárodních organizací (WHO, ICNIRP, IEEE), jejichž členská základna je tvořena vědeckými pracovníky těchto zemí.

Neschopnost dohodnout kritéria, na jejichž základě jsou hodnoceny výsledky jednotlivých studií, brání možnosti **harmonizace** norem v různých částech světa.

U zemí používajících doporučení stanovené dle podobných kritérií, mohou být rozdílné hraniční hodnoty určitých druhů polí, zatímco jiné jsou v podstatě identické – příkladem může být **měrný absorbovaný výkon** průměrovaný na rozdílné množství tkáně:

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

ICNIRP doporučuje $2,0 \text{ W/kg}$ vztahovaný k 10 g tkáně. Tuto hodnotu převzala za svou většina států Evropské unie, zatímco v USA jsou mezní hodnoty stanoveny na doporučení **federální komunikační komise (FCC)**, která udává $1,6 \text{ W/kg}$, vztahovaných na 1 g biologické tkáně. Uvedené hodnoty platí pro frekvence v rozsahu 10 MHz až 10 GHz .

Tento rozdíl se může zdát nepatrný, ovšem vztahování k odlišnému objemu tkáně může vytvářet významný rozdíl – 2 W/kg vztahované na 10 g tkáně zhruba odpovídají měrnému absorbovanému výkonu ($4 \div 6$) W/kg vztahovaných na 1 g .

V rámci **harmonizace** přešla v roce 2 000 IEEE právě z $1,6 \text{ W/kg}$ (1 g) na hranici ICNIRPu 2 W/kg (10 g), ovšem FCC si až do dnešních dnů udržela svých $1,6 \text{ W/kg}$ (1 g), což může být částečně dáno tím, že na rozdíl od Evropy, USA nemá přesně stanovený standard pro expozici radiofrekvenčním zářením.

Tabulka 7: Srovnání SAR mezi Evropou a USA

	SAR [W/kg]	
	na 10 gramů	na 1 gram
ICNIRP	2,0	4 ÷ 6
FCC	-	1,6

3 Zdravotnické využití elektromagnetického záření

Veškeré záření elektromagnetické povahy interaguje s okolním prostředím, případně biologickými systémy, pomocí různých mechanismů. V závislosti na vlastnostech svých i okolního prostředí se jednotlivé interakční mechanismy uplatňují v různé míře.

To může v některých případech způsobovat potíže, ať už technického rázu (vzájemné rušení komunikačních zařízení, selhání vyhodnocovací elektroniky v blízkosti silnoproudých zařízení), nebo nežádoucím působením na funkci biologických organismů (spálení tkáně mikrovlnným zářením, poškození zraku v důsledku přímého působení ultrafialového záření na oční sítnici, dráždění nervové soustavy v silných polích s extrémně nízkou frekvencí). Na těchto principech mohou být založeny některé typy zbraňových systémů (paralyzér, rušička).

Na druhou stranu lze, využitím stejných principů, použít množství rozličných druhů záření ke zvýšení našeho pohodlí (centrální zamykání aut), urychlení technického rozvoje (bezdrátový datový přenos), případně diagnostice vážných onemocnění (magnetická rezonance), poranění pohybového aparátu (rentgen, počítačová tomografie), tišení bolesti (TENS), nebo léčbě, či zmírnění projevů různých neduhů (termoterapie, elektroléčba).

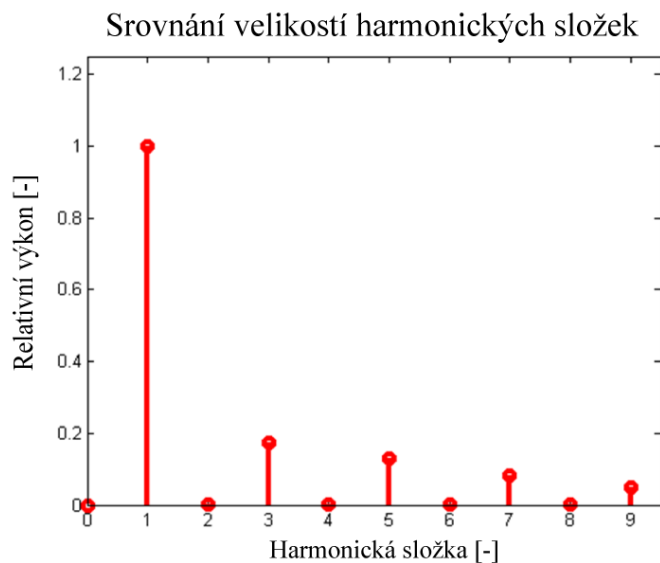
3.1 Magnetická rezonance

Magnetická rezonance (MRI) je zobrazovací technika používaná především ve zdravotnictví k zobrazení vnitřních orgánů lidského těla, případně využívaná v technické praxi. Pomocí ní je možné získat řezy určité oblasti zobrazovaného objektu, ty dále zpracovávat a spojovat až k výslednému 3D obrazu požadovaného orgánu, případně částí technických objektů. Magnetická rezonance využívá silné magnetické pole a elektromagnetické vlnění s vysokou frekvencí. [35]

3.1.1 Rezonance lidského těla

Z pohledu kvantové fyziky je hmota složena z vlnění. Každý atom kmitá kolem své základní polohy – osciluje s určitou rychlostí. Tu lze vyjádřit jako počet opakování za jednotku času. V této podobě ji nazýváme **frekvencí**, která bývá pro každou látku unikátní, proto **rezonanční**. Lidské tělo nejvíce absorbuje vlny blízké své **rezonanční frekvenci**. Ta je pro uzemněného člověka 70 MHz , pro neuzemněného 35 MHz . [23]

Jakýkoliv střídavý elektromagnetický signál obsahuje vyšší harmonické složky. Jeho základní (nosná) frekvence, kterou záměrně vytváříme, může být například 250 Hz . Navíc ale budou vytvářeny určité další frekvence. Jejich energie, s narůstající frekvencí vůči základní, velmi rychle klesá.



Obrázek 12: Harmonické složky signálu [17]

Obrázek zobrazuje harmonické složky elektrického signálu. Vodorovná osa ukazuje jednotlivé harmonické složky (0 - 9), zatímco svislá velikost jejich výkonu.

- 0: stejnosměrná složka (výkonová úroveň signálu)
- 1: základní (nosná) frekvence
- 3: první harmonická složka
- 5: druhá harmonická složka
- 7: třetí harmonická složka

V běžných technických aplikacích složky následující za třetí harmonickou obvykle zanedbáváme, protože jejich energie bývá poměrně nízká.

Radiofrekvenční vlny (MHz) jsou rezonanční frekvenci lidského těla mnohem blíže, než třeba záření rozvodné sítě (Hz). Vyšší harmonická složka radiofrekvenčních vln, odpovídající ($35 \div 70$) MHz bude mít řádově mnohem vyšší množství energie, než stejná vyšší harmonická záření rozvodné sítě.

Toho se využívá například při termoterapii, zobrazování pomocí magnetické rezonance, případně eliminaci zhoubných nádorů.

3.1.2 Fyzikální podstata zobrazování magnetickou rezonancí

Lidské tělo je složeno převážně z molekul vody. V silném magnetickém poli dochází k natočení magnetických momentů jader jednotlivých molekul vody do směru působení vnějšího pole.

Pokud navíc přidáme krátké působení radiofrekvenčního záření, dojde k další změně směru magnetických momentů protonů. Ovšem po odeznění radiofrekvenčního záření se protony vrátí zpět do původní polohy (tj., jak byly natočeny ve stále působícím magnetickém poli). Tato dočasná změna natočení protonů vyvolá proměnný magnetický tok, ten v cívice přijímače indukuje napětí, které je následně převedeno na elektrický signál a dále zpracováno vyhodnocovací elektronikou.

Vlastní **rezonanční frekvence** jader atomů je závislá na intenzitě působícího vnějšího pole (v oblasti kvantové fyziky bychom řekli, že pozorovatel ovlivňuje výsledek experimentu).

Přidáním dalšího (tentokrát přechodového) magnetického pole, které postupně v prostoru mění svoji intenzitu, lze přesně definovat vlastní rezonanční frekvenci protonů v určité oblasti, a tím **zvolit určité úseky**, které budou snímány. Intenzitu magnetického pole, vytvářeného těmito přechodovými (transverzálními) cívkami, měníme jejich rychlým a opakovaným spínáním (tím měníme i velikost proudu procházejícího cívkami). [34]

3.1.3 Akustické trauma

V důsledku **Lorentzovy síly** (síly působící na náboj, resp. vodič v elektromagnetickém poli) dochází ke změně směru náboje procházejících částic (elektronů) cívkami, aniž by se měnila rychlost jejich pohybu (velikost proudu). [45]

Díky tomu cívky vykazují snahu změnit svou pozici, což vytváří elektromagnetické vlnění ve slyšitelné oblasti (klepavé zvuky o dosti vysoké intenzitě, jež mohou vést k ohrožení vyšetřované osoby, případně obsluhujícího personálu). Běžně jde o zvukové vlny s intenzitou ($90 \div 115$) *dB* pro běžně používaná zařízení s intenzitou magnetického záření do dvou Tesla [1]. To odpovídá hluku vydávanému jedoucím vlakem, sbíječky, případně živé rockové hudby. [19]

Běžně používaná zařízení, pracující se silnějším magnetickým polem (3 T), mohou vytvářet hluk o intenzitě až 130 *dB*, což odpovídá prahu bolesti, případně hluku startujícího proudového letadla, to může způsobit **akustické trauma**, doprovázené akutním poškozením ucha (nedoslýchavostí, hluchotou, pískáním v uších, závratí), respektive ztrátou sluchu s maximem kolem 4 *kHz*. [47]

Této hodnotě by se akustická vlnění, vydávaná zařízeními pracujícími v blízkosti osob bez náležitých ochranných pracovních pomůcek (sluchátka), neměla ani přiblížit!

3.1.4 Vyhodnocení naměřených hodnot

Jednotlivé druhy onemocnění můžeme charakterizovat jako určité odchylky tkáně od jejího přirozeného stavu. Návratem protonů, vybuzených radiofrekvenčním polem, do původních rovnovážných pozic, po uplynutí jiného časového úseku, než by odpovídalo normálu, jsme schopni vyhodnotit patologické stavy tkání a odhadnout jejich současný stav.

Změnou rezonanční frekvence protonů vody určité části organismu pomocí magnetického pole, vytvářeného přechodovými cívkami, můžeme ovlivnit dobu potřebnou pro návrat elektronu do rovnovážné polohy. Vyhodnocením této doby lze určit, kterou část organismu v danou chvíli skenujeme.

Základní zobrazovací metody využívají dvojrozměrnou Fourierovu transformaci (2DFT), případně její trojrozměrnou variantu (3DFT).

Vyhodnocením intenzity signálu zachyceného přijímací cívkou jsme schopni vytvořit obraz s rozdílně kontrastními (jasnými) částmi. Intenzita signálu, a tím i kontrast jednotlivých částí jsou dány určitými parametry (hustota excitovaných protonů, rozdílné relaxační doby). Pečlivým návrhem pulsů zobrazovací frekvence (posloupnost spínání gradientních cívek, vyslání radiofrekvenčního signálu, okamžik příjmu signálu excitovaných protonů) nám umožňuje vybrat jeden z faktorů, určujících kontrast výsledného obrazu a zajistit, že jeho vliv bude dominantní. Vliv ostatních faktorů co nejvíce snížíme. [34]

Zvolení kontrastního faktoru otevírá spoustu možností. Lze vytvořit odlišný kontrast v rozdílných druzích tkáně, například bílá kůra mozková bude zobrazena bíle, šedá kůra mozková šedě, zatímco mozkomíšní mok (průhledná tělní tekutina vyplňující mozek a páteř) je černý.

Další možnost spočívá ve velmi nízkém kontrastu zdravých tkání, zatímco narušené/nemocné části vykazují silné rozdíly (pokud jako kontrastní faktor využijeme hustotu množství protonů na jednotku plochy zobrazované tkáně). [49]

3.1.5 Kontrastní látky

V některých případech může být obtížné vytvořit dostatečně kontrastní obraz, aby bylo možno určit druh zobrazované tkáně, případně vyhodnotit jejich stav jako patologický. Pokud to nelze provést změnami zobrazovacích parametrů, případně kontrastních faktorů, může se využít **kontrastní látky**, která je vhodným způsobem podána vyšetřované osobě.

Kontrastní látkou může být ústně podaná voda, pro detailnější zobrazení žaludku, případně tenkého střeva. Většinou ovšem volíme kontrastní látky vzhledem k jejich specifickým magnetickým vlastnostem. Nejčastěji bývá využíván paramagnetický materiál (sloučeniny gadolinia ${}_{64}\text{Gd}$). Tkáně a tělní tekutiny, do kterých pronikne, vykazují ve výsledném obraze extrémní jas. To poskytuje značnou citlivost zobrazovacích metod při zjišťování nádorů, případně cévních trhlin, nebo poškození mozkové tkáně (například u mrtvice).

Kontrastní látky založené na sloučeninách gadolinia ovšem vykazují značnou toxicitu a jsou zcela nevhodné pro osoby s nedostatečnou funkcí ledvin. V takových případech je nutné použít odlišnou látku.

Je možné využít roztoků oxidů železa (rzi) ve formě nanočástic, které jsou zobrazeny jako velmi tmavé. To bývá užitečné, pokud potřebujeme zobrazit stav jater. Zdravá tkáň zachytí nanočástice, zatímco poškozenou (trhlinami, nádorem) pouze projdou. Mohou být též podány ústně ke zlepšení kontrastních vlastností trávicí soustavy, případně zobrazení slinivky, čemuž běžně brání molekuly vody uvnitř trávicí soustavy. [34]

3.1.6 Metoda „k-space“

Signál zachycený přijímacími cívkami je diskretizován, převeden na číslo v komplexním tvaru (jež udává velikost a fázi naměřeného signálu), přepočítán Fourierovou transformací (2DFT, nebo 3DFT) a uložen do paměti pro další zpracování.

Kromě výše popsaného procesu, termínem „k-space“ („k“ prostor) označujeme také paměťovou matici, která dočasně ukládá měřená data v digitální formě. Po jejím zaplnění (naměření všech hodnot), data postupují k dalšímu zpracování – rekonstrukci obrazu snímané biologické tkáně. Obraz vytvořený pomocí magnetické rezonance je „mapa“ komplexních čísel, popisujících prostorové rozdělení transverzální magnetizace (vytvořené pomocí gradientních cívek) uvnitř vzorku v přesně stanoveném okamžiku po excitaci (radiofrekvenčním zářením).

Použitím Fourierovy analýzy by uprostřed rekonstruovaného obrazu měly převažovat oblasti s nízkými hodnotami **prostorové frekvence** (četnost opakování stejné struktury na určité vzdálenosti), které obvykle poskytují informace o obrazu jako celku (tvar, prostorová orientace, vzájemné proporce mezi jednotlivými částmi). Oblasti s nízkou hodnotou prostorové frekvence nám poskytují informace o **odstupu signálu od šumu** a **kontrastu** jednotlivých částí, zatímco oblasti s vysokými hodnotami prostorové frekvence určují maximální **rozlišení rekonstruovaného** obrazu. [30]

3.1.7 Supravodivost

V současné době je využíváno jevu **supravodivosti**. Vybrané materiály při velmi nízké teplotě, blíží se absolutní nule, vykazují neměřitelnou, téměř **nulovou rezistivitu**, tj. přivedená energie materiálem prochází donekonečna (dokud není supravodivost rozrušena), zatímco při běžné teplotě dochází k přeměně značného množství energie v teplo (které je nutno odvádět), takže danému zařízení musí být neustále dodávána energie zdrojem. Materiál ze svého objemu vypuzuje magnetické siločáry, což účinným způsobem odstiňuje vnější magnetická pole a (při průchodu elektrického proudu) kolem sebe vytváří silné magnetické pole.

Supravodivost je umožněna vznikem tzv. Cooperových párů: V supravodivém stavu vytvoří elektron při pohybu krystalovou mřížkou kladně nabitou oblast, kam je přitahován druhý elektron (tato dvojice elektronů tvoří Cooperův pár), zatímco v normálním stavu elektrony narážejí do kmitajících příměsí krystalové mřížky vodiče, čímž mu předávají část své energie, do značné míry přeměňované v teplo. Tyto srážky jsou na první pohled vzájemně nezávislé, ovšem Cooperovy páry mezi sebou vykazují značnou závislost.

První objevené supravodiče ztrácí své vlastnosti v silných magnetických polích a vyžadují pro svou korektní funkci skutečně velmi nízkou teplotu (do 30 K, běžná pokojová teplota je přitom 293,15 K, což odpovídá 20 °C). Chlazení je možné **kapalným heliem**, které je velmi nákladnou substancí. Tyto **supravodiče prvního typu** jsou většinou čisté kovy.

Převratem byl objev **supravodičů druhého typu**, kovových slitin a kompozitních (nevodivých) materiálů, které vykazují supravodivé vlastnosti i při teplotách kolem 100 K, což umožnilo chlazení **kapalným dusíkem**, jehož bod varu (teplota, při níž látka přechází z kapalného do plynného skupenství) je 77 K. To vyvolalo rozsáhlý výzkum možného komerčního využití supravodivých jevů, protože kapalný dusík je, v porovnání s kapalným heliem, levný a snadno dostupný (lze jej získávat ze vzduchu). [55]

3.1.8 Supravodivý magnet

Základ zařízení pro magnetickou rezonanci tvoří velký elektromagnet s indukcí obvykle 1,5 T. Ten může být tvořen **permanentním magnetem**, který by byl nenáročný na údržbu, ale není schopen vytvářet opravdu silná magnetická pole (max. 0,4 T), má nízkou přesnost a není příliš stabilní, co se parametrů týče. Navíc jeho magnetické pole nemůže být v případě nutnosti „vypnuto“, což s sebou nese značná bezpečnostní rizika v případě poruchy.

Dříve proto bylo využíváno **klasických elektromagnetů** z měděného drátu, stočeného do solenoidu, který byl sice poměrně levný, ale vzhledem k určité rezistivitě mědi a obrovským elektrickým proudům byl jeho provoz nákladný. [34]

Supravodivé elektromagnety tvořené kovovými slitinami (titan - niob, niob - cín), vykazují své supravodivé vlastnosti při teplotě kolem 4 K, tudíž musí být chlazeny kapalným heliem. Vytváří extrémně silné magnetické pole, při velmi rozumných rozměrech, navíc bývají velice stabilní. Jejich konstrukce i provoz (s ohledem na cenu chladicího media) bývají velmi nákladné, ovšem díky dalším vlastnostem (přesnost, rozměry, stabilita) jsou v běžné klinické praxi nejrozšířenějším typem.

Kapalné helium proudí nádrží (kryostatem). Vlivem nenulové teploty okolí dochází k jeho pomalému odpařování, takže je nutné jeho množství neustále doplňovat. Některé typy bývají uloženy v sekundární chladicí nádrží naplněné kapalným dusíkem, kvůli omezení množství vypařovaného helia (snížení provozní nákladů zvýšením pořizovacích nákladů).

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Běžným tvarem supravodivých elektromagnetů je toroid (na rozdíl od klasických elektromagnetů s tvarem do písmene „C“), i když existují i supravodivé elektromagnety ve tvaru písmene „C“. [45]

Intenzita magnetického pole určuje **odstup signálu od šumu**. Její nárůst umožňuje použití vyššího rozlišení, případně zkrácení doby vyšetření. Jejich konstrukce i provoz ovšem bývají nákladnější. Pro běžné použití jsou používány elektromagnety s intenzitou vytvářeného magnetického pole (1,0 ÷ 1,5) T, vzhledem na, v současné době nejlepší poměr cena/výkon. Pro speciální použití a náročnější aplikace (podrobné zobrazení mozkové tkáně) bývá používáno zařízení s intenzitami magnetického pole kolem tří Tesla, přičemž komerčně dostupné systémy pracují s intenzitami do sedmi Tesla a výzkumné elektromagnety v současné době dosahují až dvaceti Tesla. [34]

Tabulka 8: Intenzita magnetického pole zařízení pro různé použití [34]

Druh použití	Typická intenzita magnetického pole [T]
Běžná klinická praxe	0,2 – 1,5
Specializovaná vyšetření	3
Komerční systémy	7
Výzkumné zařízení	20

3.1.9 Kontraindikace

Vzhledem k velmi silným magnetickým polím dochází k nežádoucím interakcím s různými druhy **kovových implantátů**. Bez dostatečných opatření může MRI způsobit smrt, zejména u lidí s kardiostimulátory (především zařízení vyrobená před rokem 2 000). Při využití dostatečných preventivních opatření mohou lidé s určitými druhy implantátů vyšetření podstoupit. Kromě kardiostimulátoru bývají velké problémy s různými naslouchátky. Samozřejmě je eliminace veškerých kovových předmětů (prstýnky, řetízky) a neukotveného kovového vybavení z blízkosti magnetu. Jediným problémem jsou kovová tělesa z feromagnetických materiálů na nevhodných místech (mozek), případně rozsáhlé tetované plochy.

Rychlé spínání gradientních cívek vytváří silné **zvukové vlny**, které mohou být příčinou vzniku akustického traumatu, proto musí mít vyšetřovaná osoba i personál sluchátka, případně musí být zavedena další ochranná opatření, která zabrání poškození zdraví. [47]

Radiofrekvenční vlny, sloužící k vybuzení vodíkových jader, mohou být absorbovány biologickou tkání a přetvářeny na teplo. To **zahřívá okolní tkáň**, a pokud tělo není schopno dostatečně rychle ochlazovat postižené oblasti, může dojít k poškození tkáně. Proto množství energie vysílaného záření nesmí překročit určitou hranici (SAR), aby byla zajištěna bezpečnost.

V případě havárie a nutnosti vypnutí magnetu (quenching), dochází k **vyvření kapalného hélia**. Pokud nemůže být z nějakého důvodu (zacpání ventilace) odvedeno pryč, může zaplnit vyšetřovací místnost, vytlačit z ní kyslík. Tím vzniká riziko udušení vyšetřované osoby i přítomného zdravotnického personálu. Proto bývají vyšetřovací místnosti vybaveny zařízením, které monitoruje hladinu kyslíku uvnitř místnosti. Navíc při přechodu kapalného helia na plynné může dojít k rozsáhlé explozi, proto je vhodné rozmístit přetlakové ventily, zajišťující na odpovídajících místech stálý tlak (i v krizových situacích).

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

K vypuštění hélia dochází velmi vzácně (jde o nebezpečnou proceduru). Může při ní dojít k **poškození magnetu**, jehož oprava bývá nákladná. Naplnění chladicích nádob i zprovoznění celého zařízení je značně finančně náročné. Nouzové vypuštění hélia (quenching) bývá častěji spuštěno poruchami zařízení, než záměrným sepnutím.

Těhotné ženy (zvláště v prvním trimestru) mohou vyšetření podstoupit jen v nezbytných případech, protože plod bývá na nežádoucí účinky vyšetření mnohem citlivější. Může dojít k jeho poškození a nepříznivému vývoji. Výjimečně bývá vyšetření magnetickou rezonancí využíváno k monitorování vrozených vad plodu, protože poskytuje přesnější data, než ultrazvukové vyšetření.

Velkou nepohodlnost způsobuje pacientům trpícím **klaustrofobií** (trauma z uzavřených prostor), proto některá zařízení mají lehce odlišnou konstrukci a kratší vyšetřovací časy. V extrémních případech je vhodné použít **otevřené MRI zařízení**, které ovšem bývá nákladnější na pořízení. Další možností je podání **sedativ** a dočasné uspaní vyšetřovaných osob. [34]

3.1.10 Výhody a nevýhody

Zobrazování biologických tkání využitím magnetické rezonance znamenalo novou úroveň neinvazivních vyšetření a umožnilo získání velmi podrobných podkladů pro určení diagnózy. Odpadá nutnost velkého množství biochemických vyšetření, jejichž vyhodnocení trvá značnou dobu, což v určitých akutních případech může mít za následek úmrtí pacienta. Navíc vyšetření mohou využít i osoby, pro které jiné druhy vyšetřovacích metod nepřipadají v úvahu (např. kvůli povaze zranění/onemocnění).

Největší přednosti magnetické rezonance jsou zejména:

- Vysoká přesnost zobrazení (biologických tkání).
- Vysoké rozlišení.
- Nevyužívá ionizujícího záření.
- Neinvazivní vyšetření.
- Zobrazení stavu orgánů v reálném čase (MRI-Fluoroskopie).

Magnetická rezonance má ovšem i určité vlastnosti, pro které její využití není možné ve všech případech a může být za určitých podmínek nebezpečná:

- Kovové materiály uvnitř těla.
- Kardiostimulátory.
- Špatné zobrazení rychle se pohybujících částí. [34, 35]
- Značné pořizovací náklady.
- Nákladný provoz.
- Drahý servis.

3.2 Počítačová tomografie (CT)

Počítačová tomografie (CT), (z angličtiny nesprávně přeložená „computed tomography“, tj. výpočetní tomografie), označuje neinvazivní zobrazení biologických tkání živého organismu pomocí ionizujícího záření. V tom tkví základní rozdíl mezi MRI a CT.

Vyšetřovaná osoba je umístěna v „tunelu“ vizuálně podobném tunelu magnetické rezonance. Namísto obrovského magnetu, CT využívá sestavy rentgenky (zdroje rentgenových paprsků) a množství detektorů. Záření prochází skrz vyšetřovaný objekt až k detektoru, přičemž část energie záření je pohlcena vyšetřovaným objektem.

Z množství energie záření zachycené detektorem určíme množství energie pohlcené objektem. Rozdílné biologické tkáně pohlcují odlišné množství energie. Největší část absorbují kosti, méně měkké tkáně (játra, ledviny) a nejméně plíce, společně s tukovou tkání.

Vyšetřovanou osobu prozáříme z mnoha různých úhlů a tak získáme značný počet projekcí. Vhodnými počítačovými algoritmy vyhodnotíme data jednotlivých projekcí. Každou z nich rozložíme na množství bodů (objemových elementů - voxelů). Každému z nich přiřadíme skutečnou hodnotu množství absorbované energie. Zpracováním všech projekcí vytvoříme celkový obraz vyšetřované oblasti. [46]

3.2.1 Konstrukce tomografu

Starší počítačové tomografy byly konstruovány jako **kruhové**, kde docházelo k otáčení rentgenky, zatímco detektory byly pevně rozmístěné po celém obvodu zařízení. Mohlo by docházet k dopadu a vyhodnocení odražených (nežádoucích) paprsků, což by snížilo kvalitu obrazu. **Vějířová** konstrukce, tvořená otáčenou rentgenkou obsahuje detektorovou soustavu, která se taktéž otáčí. Tím lze radikálně omezit vliv odražených paprsků, zvýšit kvalitu obrazu a umožnit přesnější vyhodnocení zdravotního stavu pacienta.

Dříve tomograf provedl jedno otočení soustavy, posunul lehátko s pacientem, provedl další otočení soustavy, což trvalo, dokud nebyla získána data, potřebná pro vyhodnocení vyšetřované oblasti (**rotační** metoda). Nevýhodou byla značná doba vyšetření. Navíc vyšetřovaná osoba neustále dýchá, což způsobilo rozmazání výsledného obrazu. Proto se přechází na metodu **helikální** („spirálovitou“), kdy se lůžko s pacientem pohybuje současně s pohybem rentgenky tak, aby byl co nejvíce minimalizován vliv pohybů pacienta. [46]

Na konci devadesátých let minulého století došlo k rozdělení zařízení na **pevné** počítačové tomografy, které jsou rozměrné, vyžadují specializované externí napájení, vlastní rozvodnou skříň, systém HVAC (solistikovaný klimatizační systém), zvláštní pracoviště i rozsáhlou místnost s tlustými olověnými stěnami, což znamenalo vysoké pořizovací náklady a novější **pojízdné** tomografy. Jsou lehké, malé a mají připevněn podvozek s kolečky, takže mohou být dle potřeby přemisťovány. Mají vestavěné olověné stínění (čímž odpadá nutnost odstínit celou místnost). Napájeny mohou být přímo z běžné rozvodné sítě, případně z vestavěných akumulátorů. [68]

3.2.2 Využití tomografu

Počítačová tomografie umožnila kvalitní diagnostiku značného množství onemocnění i určení míry poškození různých tkání při poranění. Existuje možnost zobrazení celého těla, vyhodnocení obrazů a předání naměřených dat i veškerých souvisejících informací vyšetřované osobě.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Vhodná je pro vyšetřování patologických změn **plicní** tkáně, s rozšířenou možností opakovaného snímání, které umožňuje vytvořit detailní obraz (HRCT) s velmi vysokým rozlišením. Použití vysokorychlostních tomografů, v kombinaci s přesně časovanou injekcí kontrastní látky, je prvořadou metodou při diagnóze plicní embolie.

Skenování **srdce** vyžaduje relativně vysokou dávku ionizujícího záření (kolem 12 *mSv*), proto je nutné dobře zvážit důvody, pro které bychom počítačovou tomografií preferovali místo využití magnetické rezonance. Vysoká citlivost daného vyšetření je vhodná pro vyloučení srdečních chorob, při hrudních potížích s neznámou příčinou. Konkrétní onemocnění pak bývá určeno jinými druhy vyšetření.

Značné využití nachází při sledování průběhu rakoviny trávicího traktu v **břišní dutině**, přičemž často dochází k podání kontrastních látek pro optimalizaci zobrazení jednotlivých orgánů. Může jít o plyny (vzduch, oxid uhličitý), tekutiny (vodu), případně různé suspenze (síranu barnatého), koncentrované preparáty (síranu barya), nebo jodizované kontrastní látky.

Velký význam má při studiu **osteoporózy**, ovšem vzhledem ke značným finančním nákladům na vyšetření, i relativně vysoké dávce ozáření, je často využíváno jiných metod. Nenahraditelná bývá u diagnostiky složitých poranění pohybového aparátu - dokáže zobrazit složité fraktury končetin, zejména v oblasti kloubů, kde můžeme vidět poranění v různých rovinách, stejně jako zlomeniny i poškození vazů. [46]

3.2.3 Přednosti a úskali počítačové tomografie

Naproti klasickým radiologickým vyšetřením (RTG) umožňuje CT velmi detailní zobrazení zkoumaných oblastí a současně může být využito i tam, kde z nějakého důvodu není možné využít zobrazování pomocí magnetické rezonance.

Její přednosti jsou:

- Vysoká přesnost zobrazení biologických tkání.
- Více rovin pohledu na obraz tkáně (podélný, věččný, šípový).
- Vhodné i pro osoby s implantáty (kardiostimulátor), případně kovy uvnitř těla.
- Krátká doba vyšetření (diagnostika poranění).
- Neinvazivní vyšetření.

Navzdory svým přednostem má i některé vlastnosti, kvůli nimž je v mnoha případech (zejména při opakovaných vyšetřeních) potřeba volit jinou metodu (MRI):

- Zvýšené riziko výskytu rakoviny, podpora jejího vývoje (ionizující záření).
- Toxicita kontrastních látek.

Tabulka 9: Srovnání absorbovaných dávek ionizujícího záření [46]

Vyšetření	Běžná efektivní dávka [mSv]
Rentgen hrudi	0,02
Mamografie	0,4
CT hlavy	1,5
Přirození pozadí (roční dávka)	2,4
CT hrudníku	5-7
CT břicha	5-8
CT hrudníku, břicha a pánve	9,9
CT srdce	7-13
Baryový klystýr	15
CT břicha novorozeněte	20

3.3 Srovnání magnetické rezonance s počítačovou tomografií

Obě diagnostické metody mají své výhody a nevýhody, spíše se doplňují. Magnetická rezonance nevyužívá ionizujícího záření, proto bývá volena v případech, kdy obě vyšetření poskytují srovnatelné informace. Je ovšem nákladnější z hlediska stálého provozu, proto nemusí být vždy dostupná.

CT umožňuje ostře zobrazit kosti i pohybuující části organismu. Navíc lidé s určitými druhy starších kardiostimulátorů nemohou využít MRI, zatímco CT může mnohdy poskytnout dostatečné podklady pro určení zdravotního stavu vyšetřované osoby. Krátká doba vyšetření je výhodná zejména při určení rozsahu akutních poranění, protože MRI trvá obvykle 10 – 45 minut, v závislosti na požadované přesnosti i rozsahu vyšetření. [34]

Pro každý případ je potřeba zvolit vyšetření individuálně. Jedno vyšetření nemusí být pouze vhodnější, druhé může být v konkrétní situaci nebezpečné, nebo nepoužitelné. Lékař by proto měl být obeznámen s výhodami i úskalími obou metod, aby byl schopen kompetentně zvolit nejvhodnější způsob vyšetření v konkrétní situaci, vzhledem k nákladům na vyšetření, jejich vhodnosti a bezpečnosti, i druhu dat, která bude potřebovat pro komplexní posouzení celé situace.

3.4 Termoterapie

Zatímco přeměna energie vysokofrekvenčních elektromagnetických vln (radiofrekvenčních a mikrovlnných záření) na teplo bývá většinou nežádoucí, můžeme stejných účinků s výhodou využít pro specifické způsoby léčby různých onemocnění.

Ohřátí biologické tkáně vede k jejímu většímu prokrvení, což urychlí metabolismus (látkovou výměnu) a tím i intenzitu probíhajících reakcí imunitního systému. To by mělo uspořádat průběh zánětlivých procesů, zmírnit bolesti, případně uvolňovat křeče.

Prohříván může být celý organismus (sauna, koupele), nebo určitá část (obklady). Při **bezkontaktním** ohřevu nedochází k přímému kontaktu s tělem pacienta (elektrody) a můžeme záměrně ohřívát i hlubší biologické struktury (svaly, šlachy, tkáně). [56]

3.4.1 Rehabilitační termoterapie

Při ohřevu v **kondenzátorovém poli** využíváme dielektrických vlastností biologických tkání (permitivita). Aplikátor tvoří dvě kondenzátorové desky, na které je přiváděno střídavé napětí. Díky tomu se mezi deskami objeví časově proměnné elektrické pole. V elektrickém poli se dielektrika polarizují a tím se část energie pole mění na energii tepelnou. Protože je pole střídavé, polarizace dielektrika neustává a následuje vnější pole. Tím je zajištěn trvalý ohřev. Dielektrikem „kondenzátoru“ je v tomto případě prohřívána oblast daného organismu. Metoda je vhodná pro rehabilitaci svalů.

Dále můžeme využít **indukční ohřev**, založený na vodivosti (konduktivitě) tkání. Umístěním postižené oblasti do časově proměnného magnetického pole dojde k indukci vířivých proudů uvnitř oblasti. Začne jí procházet elektrický proud, který vytváří teplo úměrné rezistivitě tkáně a druhé mocnině procházejícího proudu. Stejně jako využití kondenzátorového pole, indukční ohřev nachází značné uplatnění při (zejména sportovní) rehabilitaci. [57]

3.4.2 Tepelná eliminace nádorů

Teplo lze využít i k eliminaci zhoubných nádorů. Cílem je najít množství energie přeměňované v teplo, které zdravá biologická tkáň dokáže regulovat, aniž by došlo k jejímu poškození, zatímco nádorová není schopna teplo účinně odvádět – teplota neustále zvolna narůstá, až dojde k prolomení termoregulačních mechanismů a zvýšení teploty tkáně na hodnotu, při níž odumírá. U zdravé tkáně k tomu dochází při teplotě nad 45 °C, proto její ohřev na teplotu v rozmezí (41 – 45) °C dokáže organismus dostatečně vykompenzovat, zatímco v nádorové tkáni teplota nekontrolovaně narůstá. Rychlost nárůstu teploty se zvyšuje s rozsahem nádoru – vysoce poškozená tkáň (v posledním stadiu rakoviny) bude na nárůst teploty reagovat mnohem aktivněji, než v jejím počátečním stadiu. Značnou účinnost vykazuje při léčbě velkých nádorů zabírajících rozlehlé oblasti. [37], [38]

Na rozdíl od radioterapie (ozařování), **mikrovlnná termoterapie** nepůsobí jen na povrchu jednotlivých nádorů, ale nejsilněji působí v jejich centru. Je obzvláště vhodná pro léčbu nádorů větších než 2 cm. [38]

3.4.3 Regenerace infračerveným světlem

Léčba **infračerveným (IR) světlem**, někdy též nazývaná **fotonová terapie**, využívá jedinečných vlastností elektromagnetického záření ve frekvenčním rozsahu 300 GHz ÷ 400 THz. Lidský organismus je z velké části složen z vody. Ta absorbuje nejvíce energie právě ze záření v infračervené oblasti. Absorbovanou energii přemění v teplo, čímž dochází k prohřátí exponované oblasti.

Infračervené záření typu A (IR-A), s vlnovými délkami (760 ÷ 1400) nm (krátkovlnné záření), je do značné míry pohlceno kůží. To vnímáme pocity tepla. **Dlouhovlnného záření** (IR-C), s délkou vlny (3 000 ÷ 10 000) nm, má schopnost proniknout až do buněk podkoží (až 4 cm od povrchu těla), kde je silně absorbováno. Naše tělo začne být prohříváno, aniž bychom vnímali pocity tepla. Proto je nutná určitá opatrnost, jelikož se zde neuplatňuje jeden z důležitých mechanismů, signalizující zvýšení teploty na nebezpečnou hodnotu. [27]

Fotonová terapie, případně infračervená sauna, je využívána zejména pro regenerační účely, podpoření hojivých procesů uvnitř tkání, případně rehabilitaci unavených svalů.

3.4.4 Účinky termoterapie

Používáme teploty až k hranici tepelné tolerance (nejvyšší teplota, kterou je náš organismus schopen unést). Pro vodu maximálně 42 °C, vzduch až 130 °C (sauna při nulové vlhkosti vzduchu).

Rozličné principy prohřívání biologických tkání mají odlišné účinky na lidský organismus, proto jsou různé metody vhodné na odlišné účely v závislosti na konkrétní situaci. Obecně však kontrolovaný nárůst teploty, uvnitř biologické tkáně, vykazuje některé shodné projevy, proto většina druhů termoterapie sdílí určité příznivé účinky. Mezi takové patří zejména:

- zvýšení průtoku krve (urychlení látkové výměny)
- urychlení post-akutní fáze hojení
- redukce zápalů/otoků

- blokáce receptorů bolesti
- stimulace produkce endorfinů (hormonů „štěstí“)

- eliminace některých patogenních organismů
- urychlené hojení popálenin
- přitažení vápníku do buněčných membrán (hojivé procesy)

- uvolnění svalů u povrchu těla, zvýšení pružnosti (elasticity)
- snížení hladiny kyseliny mléčné ve svalech (hromadění při námaze)
- uvolnění ztuhlosti kloubů [57], [27]

3.4.5 Kryoterapie

Kromě prohřívání částí organismu (pozitivní termoterapie), může být teplo z organismu záměrně odvedeno (negativní termoterapie).

K mírnění bolesti a zklidnění zánětlivých procesů bývají používány **obklady** (otoky).

Při drobných úrazech lze využít chladících účinků některých **těkavých látek** (alkoholů), obvykle ve formě spreje, s možným přidáním mentolu pro zvýšení pocitu ochlazení.

Rychlým podchlazením tkáně na teplotu hluboko pod bod mrazu (**kryoablace**) dojde k nekrotizaci (odumření) zmražené tkáně, která odpadne, nebo začne být jizvena. Značnou popularitu získala při **léčbě bradavic**, kdy zdravotnický pracovník na postižené místo přiloží vatovou tyčinku, nasáklou kapalným dusíkem. Metoda je téměř bezbolestná. [57]

Vystavení organismu extrémně nízké teplotě (až -150 °C), s následnou mírnou pohybovou aktivitou (cvičení, jízda na rotopedu), dochází k intenzivnímu prokrvení povrchových částí těla (kůže, podkožní vazivo, šlacho - svalový aparát) vlivem intenzivního působení na receptory chladu. To způsobí eliminaci velkého množství toxických látek - jedů, volných radikálů i kyseliny mléčné, jež způsobují stárnutí, případně poškození buněk.

Začnou být produkovány hormony tišící bolest, tlumící záněty, případně podporující nárůst svalové hmoty. Extrémní chlad aktivuje obranné schopnosti organismu, čímž stimuluje imunitní systém. Proto bývá používán při léčbě autoimunitních onemocnění.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

K vystavení extrémně nízkým teplotám dochází v **kryokomoře**. Komplex předkomory s teplotou ($-40 \div -60$) °C a hlavní komory, kde je teplota upravována od -110 °C až do -160 °C. Komoru může využít několik osob najednou. Nutností jsou ovšem rukavice, uzavřené boty a ústní rouška pro zamezení nežádoucích dopadů přímým vystavením nevhodných částí těla. V rukách i chodidlech je poměrně nízký průtok krve – nestíhají být dostatečně prohřívány prouděním tělních tekutin, takže by mohlo dojít k omrzlinám.

Značnou oblibu získala mezi rehabilitačními a regeneračními technikami, zejména u sportovců, kteří si mohou tento druh terapie finančně dovolit. Dochází k omezení rychlosti vedení nervového vzruchu a léčená osoba proto pociťuje jistou úlevu od bolesti poraněného aparátu. Pomáhá také při léčbě revmatu, kožních nemocí (lupénka, psoriáza) a poúrazových, případně pooperačních stavů. [29]

4 Praktická část

4.1 Stínění ionizujícího záření

Vzhledem ke stále narůstajícímu počtu jaderných elektráren dochází ke zvyšování důležitosti ochrany vůči ionizujícímu záření, ať už v souvislosti se zpracováním vyhořelého jaderného paliva, nebo rozvoje stínících materiálů používaných v těchto zařízeních k ochraně zdraví jednotlivých pracovníků a celého obyvatelstva.

Proto se zaměříme na problematiku stínících materiálů, prověření účinnosti některých běžně užívaných druhů a srovnání jejich možných uplatnění v každodenní praxi.

4.1.1 Použité vybavení

Jako zdroj ionizujícího záření byl vybrán zářič obsahující radioaktivní **izotop kobaltu „Co-60“** výrobce **ISOTRAK**. Primárně jde o zdroj beta částic s poločasem rozpadu pět let. Námí použitý zářič už měl jeden poločas rozpadu za sebou.

Detektorem potom byl **Geiger-Müllerův čítač** výrobce **PHYWE**. Přiložená sonda zachycuje radioaktivní záření, které čítač vyhodnocuje ve formě impulzů. Z jejich počtu za určitý časový úsek můžeme vyhodnotit intenzitu ionizujícího záření vydávanou určitým objektem, případně radioaktivní zatížení okolního prostředí. Přístroj nebyl kalibrován, protože je používán pro demonstrační a experimentální účely, tudíž má měření spíše orientační charakter.



Obrázek 13: Geiger-Müllerův čítač PHYWE [16]

Jako vzorky sloužily destičky různých materiálů s přesně definovanou tloušťkou. Pro zajištění konzistentnosti měření a výpovědní hodnoty změřených údajů byla s ohledem na praktické využití zvolena **tloušťka všech materiálů $d = 3 \text{ cm}$** . Chemické složení jednotlivých destiček odpovídá hliníku (Al), oceli (Fe-Fe₃-C), slitině mosazi (Cu-Zn) a olovu (Pb).

4.1.2 Praktické měření

Zdroj ionizujícího záření byl umístěn ve vzdálenosti **8,5 cm** od nejcitlivějšího místa detekční sondy Geiger-Müllerova (GM) čítače. Pro co nejpřesnější měření byl volen **interval 100 sekund** jako doba, po kterou GM čítač vyhodnocoval přicházející radioaktivní záření. Pro snížení vlivu náhodných chyb bylo měření třikrát opakováno. Vyšší počet opakovaných měření nebyl realizovatelný z časových důvodů. Zjištěné hodnoty byly použity ke stanovení **aritmetického průměru**.

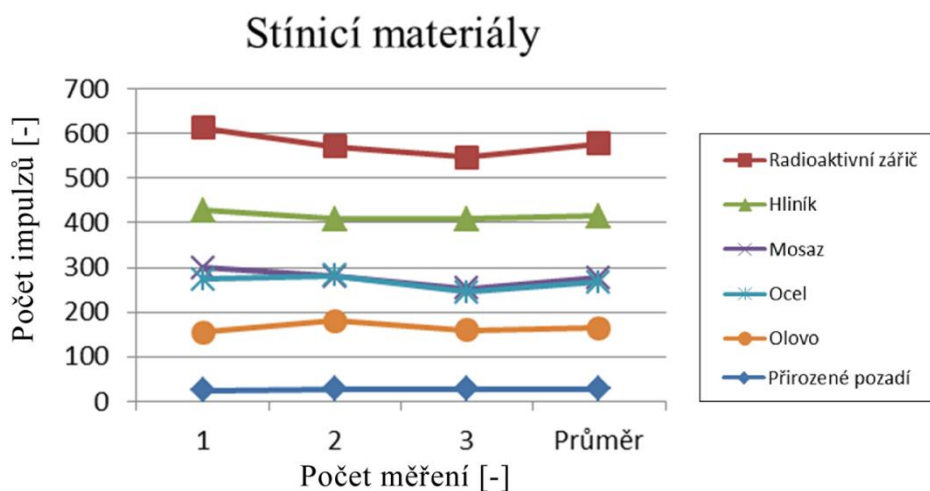
Tabulka 10: Závislost intenzity ionizujícího záření na druhu stínícího materiálu

Prostředí	Počet impulzů			
	1. měření	2. měření	3. měření	Průměr
Přírozené pozadí	25	28	27	27
Radioaktivní zářič	613	571	547	577
Hliník	427	409	408	415
Mosaz	299	280	253	277
Ocel	274	282	245	267
Olovo	154	180	159	164

Nejprve byla určena úroveň radioaktivity daného prostředí bez vnějšího zdroje ionizujícího záření. Naměřené hodnoty tak odpovídají zatížení vlivem geologického podloží, kosmického záření, případně dalších zdrojů z okolního prostředí. Poté byla změřena referenční úroveň samotného radioaktivního zářiče. Při následném vložení stínícího materiálu mezi zdroj ionizujícího záření a detektor by tato hodnota měla být vždy nižší.

Zcela podle očekávání hliník ze všech prověřovaných materiálů vykazoval nejslabší stínící účinek. Překvapivě ocel byla naprosto srovnatelná se slitinou mosazi. Oproti hliníku byl zaznamenán znatelný pokles detekovaného záření. Nejlépe dopadlo olovo, což potvrzuje původní úvahu o volbě nejvhodnějšího stínícího materiálu. Pro stejný stínící účinek by v praxi bylo nutné použít silnější ocelovou stěnu, což může vycházet levněji, ovšem nároky na větší množství prostoru by mohly být pro určité aplikace silně nežádoucí.

Mosaz je ze všech materiálů nejméně vhodná - stínění srovnatelné s ocelí, ovšem za mnohem vyšší cenu.



Obrázek 14: Grafická závislost počtu impulzů na druhu stínícího materiálu

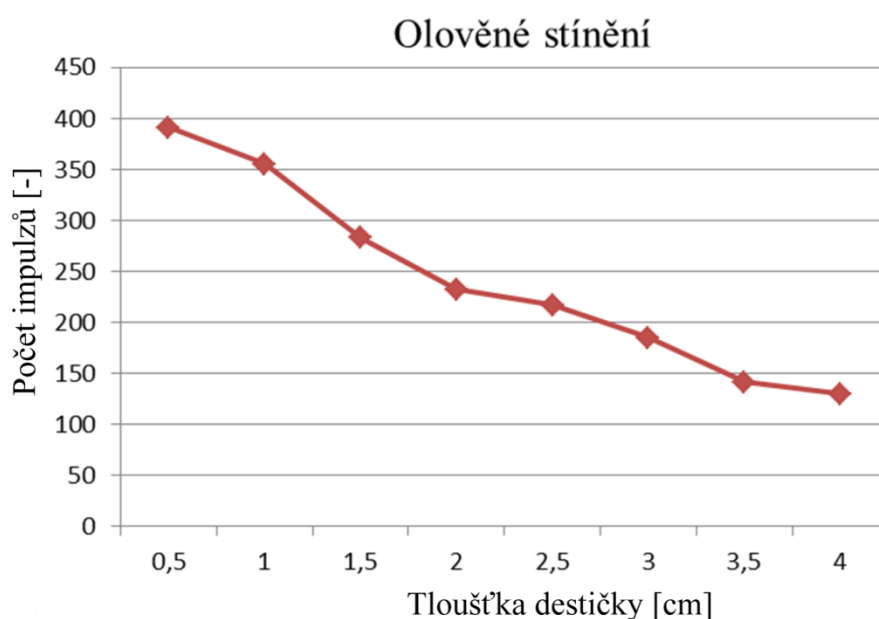
4.1.3 Stínění olovem

Vzhledem k nejlepším stínícím vlastnostem bylo olovo proměřeno detailněji. Zaměřili jsme se na to, jak tloušťka stínění ovlivňuje jeho účinnost.

Tabulka 11: Závislost počtu impulzů na tloušťce olovené destičky

Tloušťka [cm]	Počet impulzů
0,5	391
1	355
1,5	283
2	232
2,5	217
3	185
3,5	141
4	130

Nejvyšší strmota poklesu detekovaného záření byla zaznamenána při tloušťce $d = 1,5 \text{ cm}$.



Obrázek 15: Grafická závislost počtu impulzů na tloušťce olovené destičky

Olovené stínění tloušťky 1,5 cm vykazovalo účinek srovnatelný s ocelovou stěnou dvojnásobné tloušťky. Dle aktuálních cen (25. 3. 2014) olova a oceli vycházejí levněji stínění zhotovené z oceli.

Tato významná tloušťka byla proto proměřena detailněji, pro zjištění přesnějších hodnot a relevantnějšímu srovnání vyhodnocených údajů.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Tabulka 12: Přesnější měření počtu impulzů při vybraných tloušťkách olověné destičky

Tloušťka [cm]	Počet impulzů			
	1. měření	2. měření	3. měření	Průměr
1,5	265	289	295	283
2,5	207	239	205	217

4.1.4 Vyhodnocení možnosti stínění ionizujícího záření

Proč tedy využíváme v praxi hlavně olověné stínění, když je ocel levnější? Jedním z hlavních důvodů jsou nároky na prostor. Nemocnice v centru velkoměsta si jen těžko bude moci dovolit zvětšovat svou rozlohu kvůli potřebě odstínění radiologických pracovišť. Ovšem mohou být jiné aplikace, kde prostor nehraje významnou roli. Dostáváme se k hlavnímu důvodu a tím jsou opět finanční náklady. Představte si velkou jadernou elektrárnu. Dvojnásobná tloušťka stínění znamená nutnost dimenzovat nosníky zdi na mnohem vyšší hmotnost a i když má olovo vyšší hustotu než ocel, v tomto konkrétním případě ocel stále představuje výrazně vyšší hmotnostní zatížení. Takže strop pod reaktorem bude mít znatelně větší rozlohu a musí být dimenzován na vyšší zátěž. A právě tyto sekundární, skryté náklady, představují velice dobrý důvod, proč dát přednost dražšímu olověnému stínění. Paradoxně nastává situace, kdy zdánlivě dražší řešení vychází v konečném důsledku mnohem levněji, nemluvě o snížení bezpečnostních a dalších komplikací.

Pozn. Při samotném měření nastala jedna zajímavá situace. Při vložení jedné stínicí destičky vyskočila detekovaná radioaktivita na dvojnásobnou hodnotu, při její výměně bylo vše opět v naprostém pořádku. Z toho lze usoudit, že daná olověná destička vykazovala chování statisticky významného zdroje radioaktivního záření.

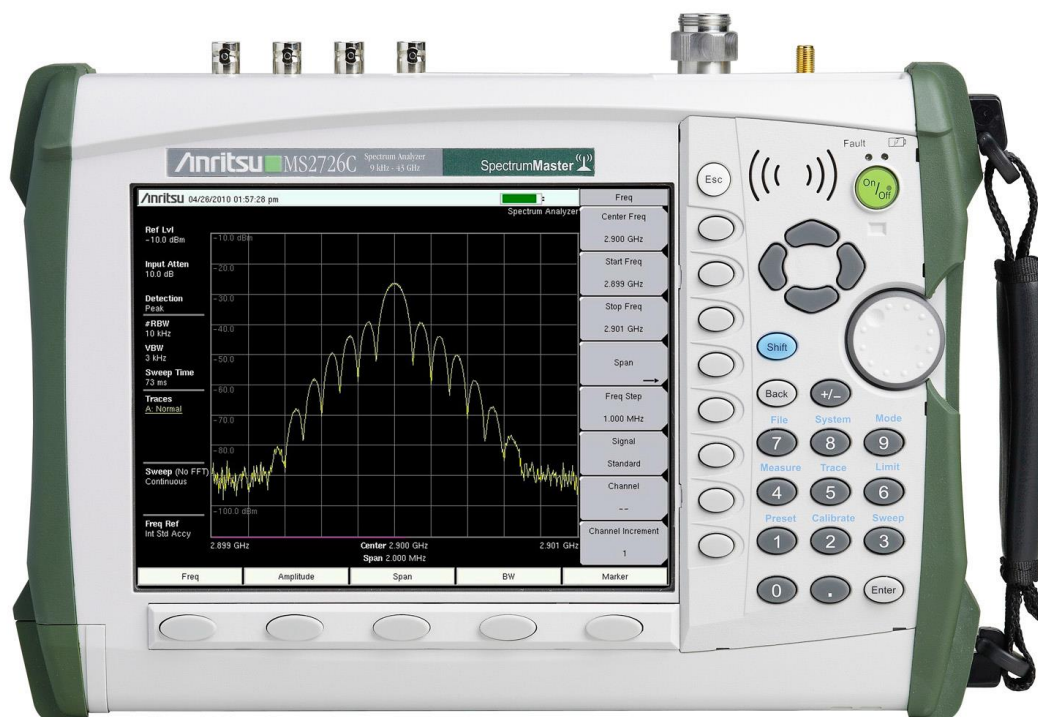
4.2 Měření radiofrekvenčního spektra

V posledních desetiletích dochází k intenzivnímu rozmachu bezdrátových technologií. S narůstající technickou úrovní různých druhů přenosných elektronických zařízení (mobily, tablety) se otvírají nové možnosti jejich využití. Video-hovory, mobilní internet. A proč by se uživatel měl v dnešní rychlé době spokojit s pomalým internetem ve svém mobilním telefonu? Dřívější standardy GSM (Globální Systém pro Mobilní komunikaci) byly dostatečné pro telefonní hovory na velké vzdálenosti i posílání textových zpráv. Abychom mohli využívat pohodlí internetu u mobilních telefonů třetí generace (3G), bylo nutné navýšit množství přeposílaných dat, takže pomyslnou korunu převzal standard UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Pro skutečně rychlé připojení, srovnatelné s možnostmi kabelového spojení, začíná být v současné době prosazována LTE technologie (Long Term Evolution), běžněji známá jako čtvrtá generace (4G) mobilních zařízení.

Všechny uvedené technologie musí fungovat současně, takže v hustě obydlených oblastech existují místa s extrémně vysokou hustotou mikrovlnného záření. To přináší problémy čistě technického rázu, kdy nevhodně konstruované a špatně nastavené vysílače mohou rušit komunikaci využívající ostatní technologie, případně ji zcela znemožňovat. Navíc velké množství přenášených dat jde ruku v ruce se zvýšeným výkonem, nutným k jejich přenesení. Proto je potřeba kontrolovat množství radiofrekvenčního záření ve volném prostoru a dodržování doporučených hygienických limitů, nejen pro jednotlivé signály, ale i celkovou intenzitu všech druhů záření, která se nacházejí v daném místě.

4.2.1 Použité vybavení

Pro zaručení vysoké přesnosti provedených měření byl použit spektrální analyzátor „Spectrum Master MS2726C“ výrobce ANRITSU v ručním provedení, které zajišťuje vysokou mobilitu, zejména při hledání interferujících signálů.



Obrázek 16: Spektrální analyzátor „Spectrum Master“ [52]

K důkladnému proměření radiofrekvenčního spektra byla použita anténa firmy **AARONIA**, „**HyperLOG 7025**“ s frekvenčním rozsahem 700 MHz až 2,5 GHz s vysokým ziskem. [33]



Obrázek 17: Anténa „HyperLOG 7025“ [33]

Výsledná podoba grafů byla vytvořena na PC pomocí programové sady nástrojů „**Master Software Tools**“ (MST) umožňující pohodlný přenos dat ze spektrálního analyzátoru, jejich následné úpravy a export v protokolární podobě.

4.2.2 Praktické měření

Pro kontrolní měření byla zvolena restaurace v okrajové části Brna s bezdrátovým připojením k internetu, dobře pokrytá mobilním signálem.

Nejprve bylo nutné specifikovat anténní faktor pro vybrané frekvence celého frekvenčního pásma antény. Anténní faktor, ve formě numerických hodnot, poskytl výrobce. Poté byl vytvořen textový soubor v podobě čitelné spektrálním analyzátořem. Ten bylo nutné do přístroje nahrát pomocí USB rozhraní. Následovalo připojení antény a zvolení souboru s anténním faktorem, nutným pro přesné měření intenzity elektrického pole.

Poté bylo možné provést jednotlivá měření a vyhodnotit získaná data.

4.2.3 Nastavení spektrálního analyzátoru

Jako počáteční frekvence byla zadána hodnota 700 MHz, konečná frekvence potom 2500 MHz, abychom důkladně proměřili intenzitu elektrického pole v celém rozsahu použité antény.

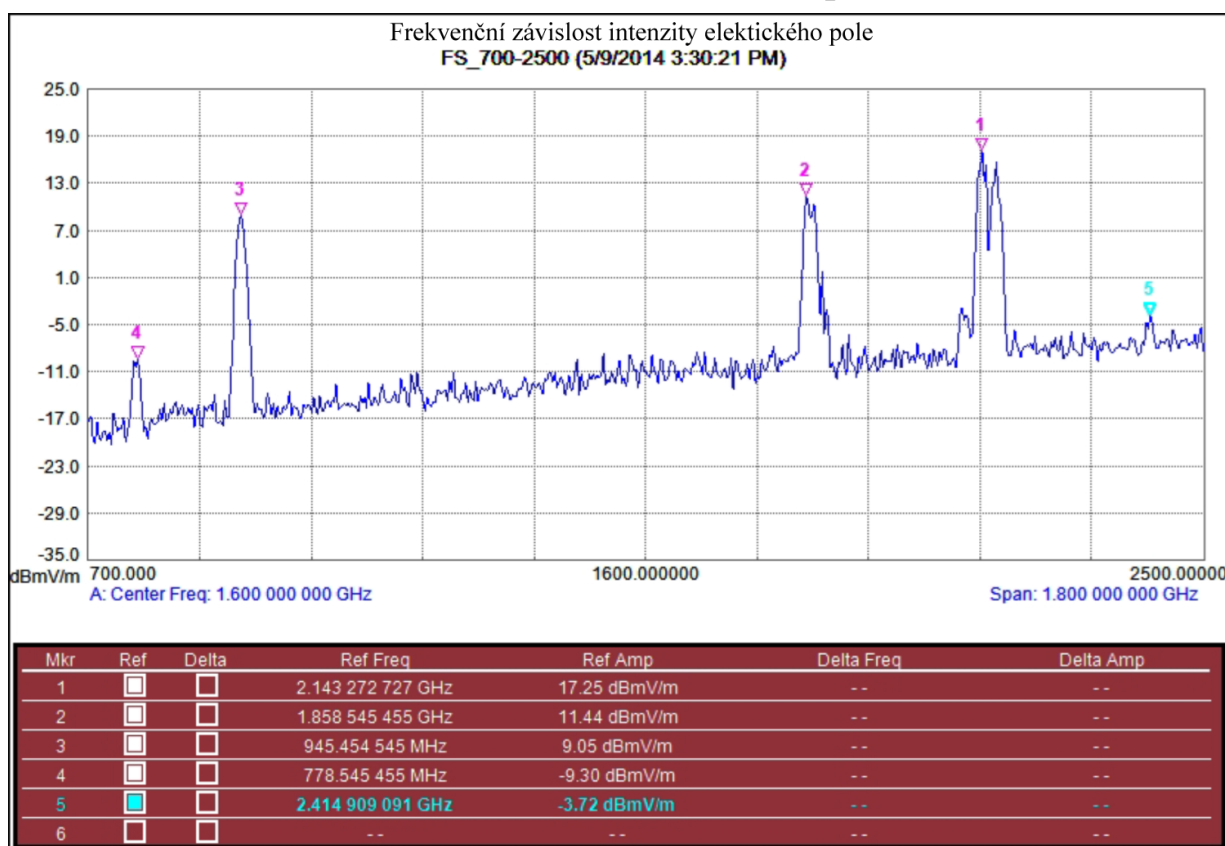
Aby měla získaná data reálnou vypovídací hodnotu, bylo nutné vhodně zvolit některé parametry, jež se výrazným způsobem podílejí na způsobu vyhodnocení naměřených signálů. Například způsob, jakým spektrální analyzátoř zjišťuje velikost měřených signálů, byl volen pomocí efektivní hodnoty, protože střídavý signál této velikosti má **stejně tepelné účinky**, jako by měl stejnosměrný. [10] Proto pro nás mají tímto způsobem definovaná data, ve vztahu k biologickým účinkům elektromagnetického záření, relevantní vypovídací hodnotu. **Trasovací metoda** nastavená na „**Max Hold**“ zaručí, že se bude na zobrazené křivce pro každou frekvenci nacházet maximální hodnota měřené veličiny, tj. nejvyšší hodnota za celou dobu měření. [51]

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Tabulka 13: Zvolené hodnoty vybraných parametrů spektrálního analyzátoru

Vybraný parametr:	Nastavená hodnota
Detekční metoda:	RMS
Referenční úroveň:	-30 dBm
Trasování:	Max Hold
Předzesilovač:	„ON“
RBW:	10 (MHz)

4.2.4 Intenzita elektrického pole



Obrázek 18: Intenzita elektrického pole (700 - 2500 MHz)

V prověřovaném frekvenčním pásmu se objevilo několik signálů s intenzitami výrazně nad úrovní šumu. Nejvyšší zjištěná velikost 17,25 dBmV/m (1) ukazuje na frekvenci 2,143 GHz. Společně s pátým signálem (5) o frekvenci 2,414 GHz jde pravděpodobně o Wi-Fi komunikaci, probíhající obvykle v pásmu 2,4 – 2,5 GHz.

Signál na frekvenci 945 MHz (3) je klasickým představitelem mobilní komunikace. Pásmo 890 – 960 MHz je vyhrazeno pro standard GSM 900, přičemž od 935 MHz jsou frekvence využívány k „downlinku“, tj. vysílání základnové stanice (BTS) směrem k jednotlivým mobilním telefonům. [61] Tento signál musí být přítomen, i když by byly, v dosahu vysílače, vypnuty všechny mobilní telefony, operující v příslušném pásmu. Základnové stanice emitují signál nepřetržitě, minimálně pro „registraci“ každého zapnutého mobilního telefonu k základnové stanici. Pokud by v tomto pásmu **nebyl** přítomen jakýkoliv signál, šlo by zřejmě o nevhodně zvolené, případně špatně nastavené měřicí zařízení.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Zkusíme zjistit, zda intenzita nejsilnějšího zjištěného signálu odpovídá současným normám. Na frekvenci 2,143 GHz je intenzita 17,25 dBmV/m.

Referenční úroveň intenzity elektrického pole určená normou (tj. hodnota, jež nesmí být překročena) pro frekvenční oblast 400 MHz až 2 GHz je určena vztahem (viz. Tabulka č. 6):

$$E = 3 * 10^{-3} * f^{0,5} = 3 * 10^{-3} * (2,143 * 10^9)^{0,5} = \mathbf{139 \text{ [V/m]}} \quad [39] \quad (1)$$

Pomocí MST jsme zjistili, že intenzita signálu 17,25 dBmV/m odpovídá intenzitě 77,25 dBμV/m. Za takového předpokladu můžeme využít následující vzorec pro převod logaritmických hodnot intenzity elektrického pole do absolutních:

$$E_{V/m} = 10^{(E_{dB\mu V/m} - 120)/20} = 10^{(77,25 - 120)/20} = \mathbf{0,0073 \text{ [V/m]}} \quad [13] \quad (2)$$

Porovnáním obou hodnot je na první pohled jasné, že prověřovaný signál splňuje současné normy s opravdu velkou rezervou. Z toho lze usoudit, že intenzita elektrického pole žádného signálu, v proměřované radiofrekvenční oblasti, nepřekročila hygienické limity České republiky.

4.2.5 „Downlink“ versus „Uplink“

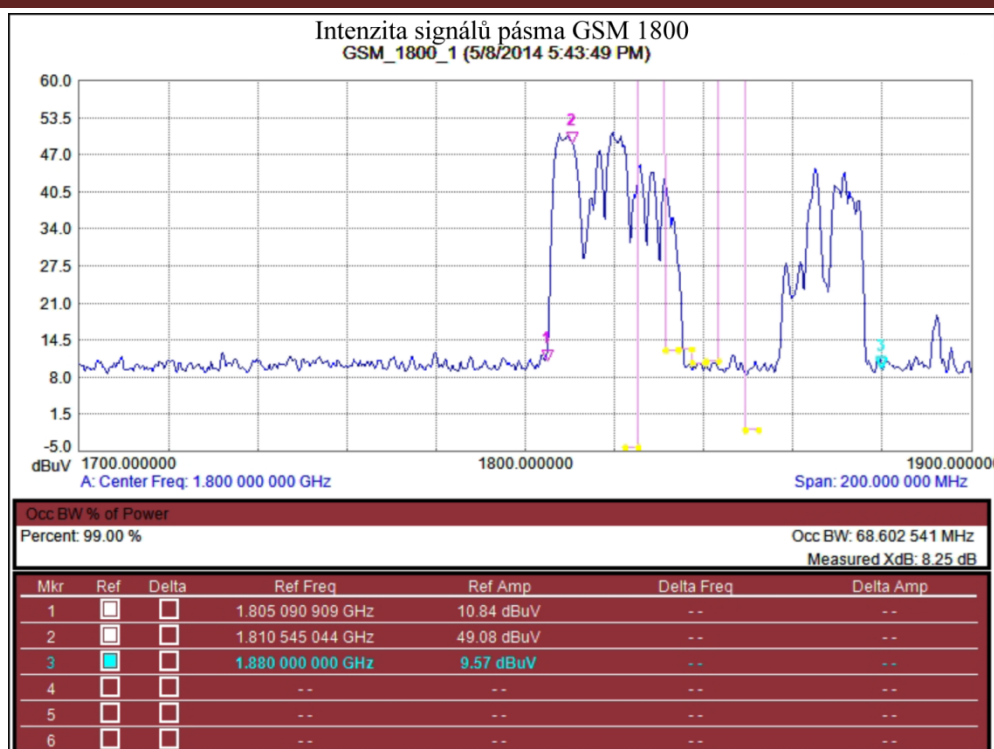
Každé frekvenční pásmo, vyhrazené pro vybraný standard mobilní komunikace, je tvořeno dvěma částmi. „Downlink“ je komunikací základnových stanic s jednotlivými mobilními zařízeními, zatímco „Uplink“ jsou veškerá data emitovaná mobilním telefonem směrem k základnové stanici. [4]

Tabulka 15: Frekvenční pásmo standardu GSM 1800

GSM 1800	
Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
1710 – 1785	1805 - 1880

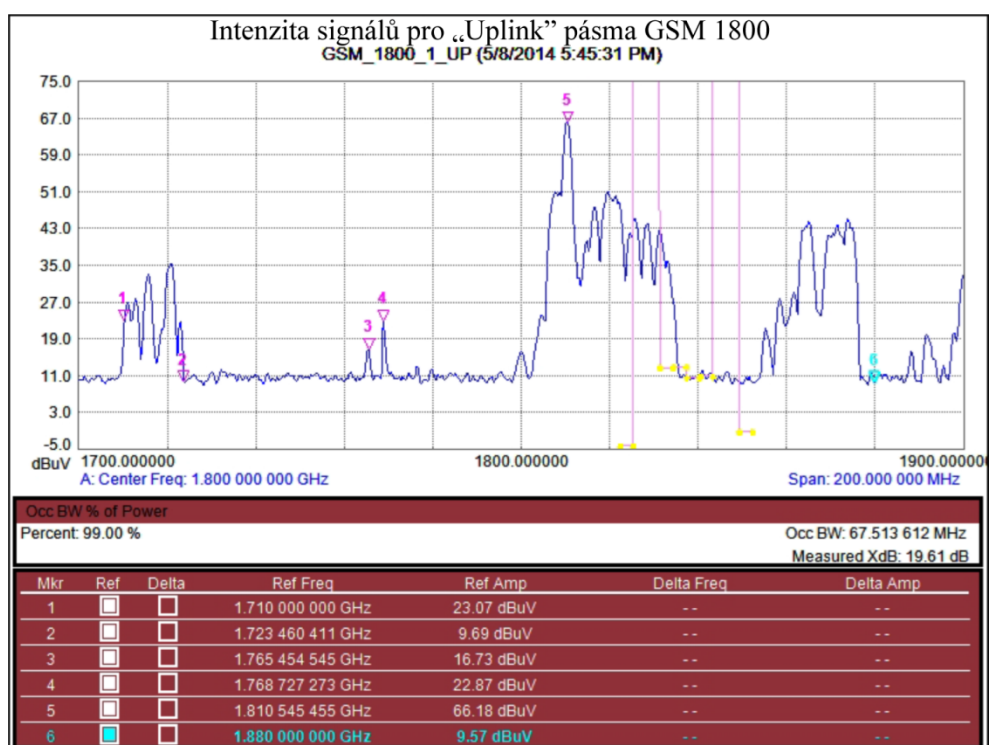
Pro měření byl volen frekvenční rozsah (1700 ÷ 1900) MHz, referenční úroveň -50 dBm, rozlišení (RBW) = 1 MHz, trasování „Max Hold“, detekční metoda „RMS“.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně



Obrázek 19: Měření frekvenčního pásma GSM 1800

První signály, výrazně nad úroveň šumu, začínají od frekvence 1 805 MHz (1). To ukazuje, že veškerá mobilní komunikace v danou chvíli probíhala pouze od základnových stanic směrem k mobilním zařízením. Vzhledem k tomu, že pásmo vyhrazené „Uplink“ je prázdné, pravděpodobně žádná osoba v prověřované oblasti netelefonovala. Nad frekvencí 1 880 MHz (3) se sice nacházejí signály s nezanedbatelnou intenzitou, ovšem jsou mimo námi proměřované pásmo GSM 1 800, tudíž nejde o mobilní komunikaci v rámci uvedeného standardu.



Obrázek 20: „Uplink“ frekvenčního pásma GSM 1800

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Zajímavější situace nastala o pár minut později. V pásmu 1 710 – 1 724 MHz (1 - 2) v průběhu několika sekund „vyskočily“ poměrně výrazné signály. Vzhledem k jejich množství a intenzitě pravděpodobně někdo „čile“ telefonoval. Další špičky kolem 1 767 MHz jsou stále v oblasti „Uplinku“, ovšem jsou ojedinělé a mají poměrně nízkou intenzitu, což ukazuje na „registraci“ nově zapnutých zařízení k nejbližší základnové stanici.

V oblasti „Downlinku“ nám vyskočil signál na frekvenci 1 810 MHz. Jde nejspíše o příjem telefonního hovoru z nejbližší základnové stanice, směrem k mobilu telefonující osoby.

4.2.6 Měření vlivu polarizace antény



Obrázek 21: Spektrální analyzátor „R&S ESU-26“ [67]

Pro následující měření jsme použili „velký“ spektrální analyzátor „**ROHDE & SCHWARZ ESU-26**“, který poskytuje vysokou přesnost a značný frekvenční rozsah (20 Hz – 26 GHz). [48]

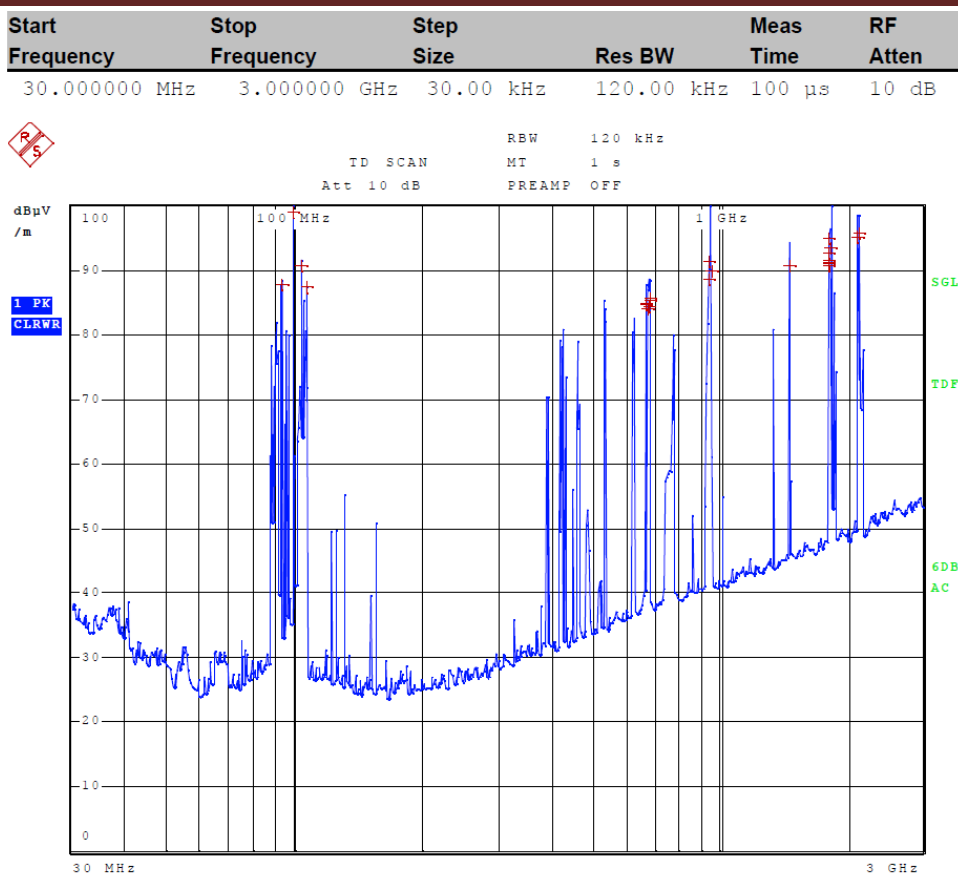
Frekvenční spektrum zachycovala hybridní anténa typu BiLOG, „**Tesq Schaffner UPA 6192**“, běžně používaná pro měření v EMC komorách k ověřování elektromagnetické kompatibility elektronických zařízení. [40]



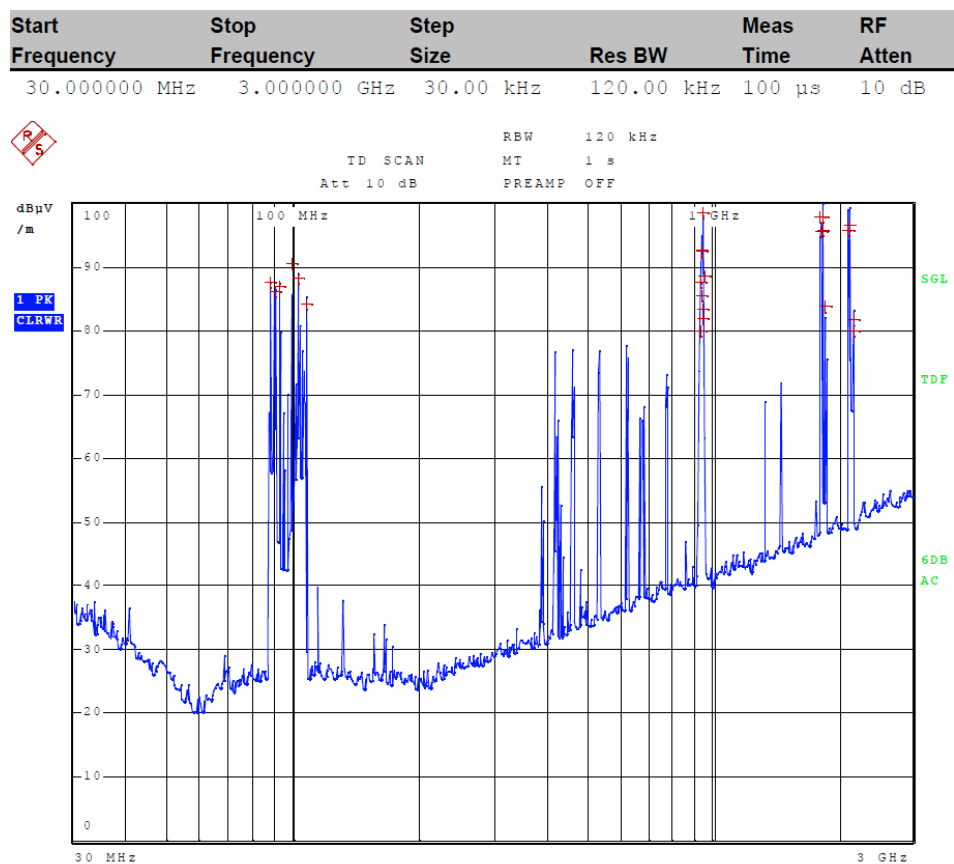
Obrázek 22: Anténa "Tesq Schaffner UPA-6192" [68]

Intenzitu měřených signálů jsme určovali **kvazi-špičkovým detektorem**, který simuluje vnímání akustických efektů lidským sluchem, například při impulzním rušení rozhlasového přijímače. [59] Jde tedy o měření vhodné pro zjištění jakosti přijímaného signálu, případně biologických účinků elektromagnetického záření na smyslové orgány, zejména sluchové ústrojí.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně



Obrázek 23: Měření vertikálně polarizované antény



Obrázek 24: Měření horizontálně polarizované antény

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně

Vizuálním porovnáním obou grafů zjistíme, že některé signály vykazují při horizontálně polarizované anténě mnohem nižší intenzitu, ovšem v několika jiných případech je tomu přesně naopak. Proč?

Vysílací antény různých radiofrekvenčních služeb (rádio, televizní příjem, mobilní komunikace) mohou být polarizovány vertikálně, nebo horizontálně. Pokud chceme přijímat určitý signál a zvolíme správnou polarizaci antény, budeme odměněni silným, jakostním signálem. Jestli ovšem naše přijímací anténa bude polarizována nevhodně, zachytíme mnohem menší část signálu – bude mít nižší intenzitu, což se odrazí na jeho jakosti. [9]

Navíc vidíme, že poměrně silné signály se nacházejí i pásmu pod 700 MHz (v našem případě výrazně kolem 100 MHz), **proto je nutné prověřovat celé frekvenční spektrum od 0 Hz až do nejvyšších frekvencí v současnosti používaných technickými zařízeními včetně magnetické složky** (obzvláště v oblasti nízkých frekvencí), abychom mohli skutečně kompetentně určit skutečnou úroveň zatížení prostředí elektromagnetickým zářením a určit nejvhodnější opatření k zajištění bezpečnosti obyvatel České republiky i pracovníků v oblasti telekomunikací.

4.2.7 Vyhodnocení měření radiofrekvenčního spektra

Byla provedena řada nejběžnějších radiofrekvenčních měření, modifikovaných pro získání dat použitelných k vyhodnocení bezpečnosti intenzity elektromagnetického záření v určitém místě. K přesnému měření s dobrou vypovídací hodnotou byly vybrány velmi přesné spektrální analyzátoři a jakostní antény pečlivě zvolené pro odlišné druhy měření.

K uskutečnění uvedených měření je nutné zvolit vhodný spektrální analyzátor a naučit se s ním správně zacházet, stejně jako pochopit podstatu různých přístupů ke zjišťování potřebných údajů, aby získaná data měla skutečně relevantní hodnotu.

Základem experimentu bylo proměření radiofrekvenčního spektra, určení pravděpodobných zdrojů různých signálů, vyhodnocení jejich intenzit a ověření, zda jejich úrovně nepřekračují současně platné hygienické limity.

Dále byla nastíněna problematika různých frekvenčních pásem pro odlišné standardy využívané v mobilní komunikaci. Byl zvolen standard GSM 1800, na němž bylo názorně ukázáno, jak v praxi probíhá komunikace mezi základnovou stanicí a jednotlivými mobilními zařízeními z pohledu telekomunikačního pracovníka.

Poté bylo upozorněno na jeden z nejběžnějších telekomunikačních problémů (polarizace), který má zásadní vliv na jakost přijatého signálu, stejně jako kvalitu měření a následné vyhodnocení intenzity elektromagnetického záření k zajištění úrovní zajišťujících bezpečnost obyvatel a splnění platných hygienických limitů.

Nakonec byla, na základě výsledků provedených měření, zdůrazněna nutnost vyhodnocovat elektromagnetické spektrum jako celek, protože jednotlivé druhy současně působícího elektromagnetického záření se mohou vzájemně ovlivňovat a vykazovat synergické účinky. Proto nelze stanovit bezpečnost úrovní elektromagnetických vln v určitém místě pouze na základě intenzity nejsilnějšího signálu ve zvoleném frekvenčním spektru, ale je nutné brát v úvahu všechny složky přítomných elektromagnetických signálů v celém frekvenčním spektru, abychom mohli kompetentně určit skutečnou úroveň zatížení prostředí elektromagnetickým zářením a určit nejvhodnější opatření k zajištění bezpečnosti obyvatel České republiky i pracovníků v oblasti telekomunikací.

Závěr

Cílem práce bylo shrnout možné vlivy elektromagnetických záření na biologické systémy, provést klasifikaci druhů elektromagnetického záření dle jejich interakcí s okolním prostředím, popsat jeho rozličné formy (gamma záření, mikrovlnné záření, infračervené světlo) s jejich specifickými vlastnostmi, problémy i možným využitím. Dále byla sledována interakce ionizujícího i neionizujícího záření s látkovým prostředím (biologická tkáň), přeměna absorbované elektromagnetické energie v teplo i její množství, které jsou živé organismy schopny, za běžných podmínek, zvládnout bez okamžitých nepříznivých reakcí. Byly objasněny způsoby, jakými živé organismy regulují vnitřní teplotu i možné lékařské využití účinků zvýšené teploty. Nakonec jsou nastíněny způsoby ochrany vůči elektromagnetickému záření, je provedeno praktické měření a ověřena účinnost navrhovaných opatření.

Byly probrány vybrané mechanismy interakce různých druhů elektromagnetického záření s biologickými systémy, metody běžně využívané pro stanovení množství absorbovaného záření. Dále je shrnuta současná právní úprava, včetně příslušných hygienických limitů používaných v České republice i dílčích částech (celého) světa. Samozřejmostí je uvedení příslušných organizací, na základě jejichž doporučení bývají stanovovány limity v jednotlivých zemích, jakož i způsobů, podle nichž se určují nejvyšší přípustné hodnoty elektromagnetických záření u příslušných předpisů. Bylo proměřeno radiofrekvenční spektrum, určeny zdroje různých signálů, vyhodnocena jejich intenzita a ověřeno, že jejich úrovně nepřekračují současně platné hygienické limity.

Byly shrnuty způsoby ochrany vůči jednotlivým druhům záření i jejich využití ve zdravotnictví, se zaměřením na moderní léčebné metody. Byly popsány principy jejich funkce, zpracování dat, možné přínosy i úskalí v souvislosti s různými situacemi, kontraindikace, jakož i konstrukce samotných zařízení, případně fyzikální podstata jejich funkce. Bylo provedeno srovnání probíraných metod, jejich vhodnost v rozličných situacích i vodítka pro určení nejvhodnější metody zdravotnickým pracovníkem v konkrétním případě.

Byla prověřena správnost doporučení volby olova jako nejvhodnějšího běžně dostupného stínícího materiálu vůči ionizujícímu záření a podrobně rozebrány důvody, proč jsou ostatní materiály pro běžnou praxi méně vhodné a zřídka používané.

Vzhledem k rozmanitosti vlastností elektromagnetického záření je třeba zkoumat různé druhy zvláště i všechna záření (jako celek) současně. Pro pochopení způsobů, jakými ovlivňují živé organismy, je vhodné znát způsoby interakce daných záření s okolním prostředím, mechanismy těchto interakcí, i výsledné účinky na biologické systémy, vystavené jejich přímému působení. Legislativa a příslušné předpisy by pak měly, na základě možných nepříznivých účinků, zabezpečit dostatečnou ochranu zdraví obyvatelstva i technických pracovníků, přicházejících do styku s rizikovými materiály, obzvláště vydávající-li extrémně nebezpečné druhy záření. Mnohá záření elektromagnetické povahy mohou být, díky svým vlastnostem, využívána pro diagnostiku zdravotních dysfunkcí, kompletní zobrazení současného stavu příslušného organismu, i léčbu různých neduhů, podporu ozdravných procesů, případně mírnění bolestí. Některé ovšem zároveň mohou nepříznivě ovlivňovat příslušnou osobu, proto je třeba komplexně posoudit možné přínosy i rizika zvolených přístupů a následně vybrat nejvhodnější variantu, z hlediska požadovaných výstupů, možných zdravotních komplikací, časové náročnosti vyšetření, dostupnosti v konkrétní geografické oblasti, případně finanční nákladnosti jednotlivých metod.

Literatura

- [1] Acoustic Noise and MRI Procedures. In: *MRIsafety* [online]. 2012 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.mrisafety.com/safety_article.asp?subject=180
- [2] Atom. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Atom>
- [3] BAUMRUK, Jaroslav a Bohuslav MÁLEK. OCHRANA PŘED NEIONIZUJÍCÍM ZÁŘENÍM. In: *BOZPinfo* [online]. Státní zdravotní ústav, 2002 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: www.bozpinfo.cz/priloha/neioniz.pdf
- [4] BÍLÝ, Vladimír. Frekvenční příděl na pásmech GSM, DCS, UMTS a LTE v České republice. In: *GSMweb* [online]. 2005 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>
- [5] CDANG. Autoprotolyse. In: *Wikimedia Commons* [online]. 2009 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Autoprotolyse_eau.svg
- [6] Curie. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Curie>
- [7] Dosimeter. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Dosimeter>
- [8] Dosimetry. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Dosimetry>
- [9] DŘÍNOVSKÝ, Jiří. Měření rušivých signálů. In: *BEMC Elektromagnetická kompatibilita* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?V%26yacute%3Buka:Elektromagnetick%26aacute%3B_kompatibilita:BEMC_Elektromagnetick%26aacute%3B_kompatibilita
- [10] Efektivní hodnota. In: *Wikipedie* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Efektivní_hodnota
- [11] Elektromagnetické spektrum. In: *Aldebaran* [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/tabulky/images/spektrum.png>
- [12] Elektromagnetické vlny. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické_vlny#Hloubka_vniku

- [13] EMC Related Formulae. In: RICHARDS, Robert. *EMC toprrudder* [online]. 2003 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://emc.toprrudder.com/formulas2.pdf>
- [14] Frekvence. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Frekvence>
- [15] Frequency. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Frequency>
- [16] Geiger-Müller-Counter. In: *Phywe* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.phywe.com/461/pid/4682/Geiger-Mueller-Counter.htm>
- [17] GOTTWALD, Martin. *Ionizující a neionizující záření ze zdravotního hlediska*. Brno, 2010/2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40258
Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
- [18] Gray. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Gray>
- [19] Hluk. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hluk>
- [20] How the MRI works ?. In: HART, Howard. *YouTube* [online]. 2011 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.youtube.com/watch?v=kygoBvZo_U4
- [21] CHANDLER, David L. Explained: rad, rem, sieverts, becquerels. In: *MITnews* [online]. 2011 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/newsoffice/2011/explained-radioactivity-0328.html>
- [22] Important differences between The ICNIRP and IEEE standards and the FCC standard for cell phones. In: SLESIN, Louis. *EMFacts* [online]. 2012 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.emfacts.com/2012/08/important-differences-between-the-icnirp-and-ieee-standards-and-the-fcc-standard-for-cell-phones>
- [23] INAN, Omer T. Interactions of Electromagnetic Waves with Biological Tissue. In: *BIOE* [online]. 2005 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fpersonal.stevens.edu%2F~bmcnair%2FBME322-S10%2FClass%252012.pdf&ei=pwmeUqP8LsHHtQamlIHICA&usg=AFQjCNH5mOczm2wur2EJIAzzIW5I5aZJ_g&sig2=wpWnfRXAPHt-NHni_AG0FA&bvm=bv.57155469,d.Yms&cad=rja

- [24] Internal dosimetry. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Internal_dosimetry
- [25] International Radiation Protection Association. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/International_Radiation_Protection_Association
- [26] Ionizující záření. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ionizující_záření
- [27] Jak funguje terapie infračerveným zářením. In: *Sauna centrum Marimex* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.sauna-centrum.cz/poradna/nazor-lekare/jak-funguje-terapie-infracervenym-zarenim/>
- [28] KOCMAN, Rostislav. Které frekvence používají čeští mobilní operátoři?. In: *Idnes* [online]. 2001 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://mobil.idnes.cz/ktere-frekvence-pouzivaji-cesti-mobilni-operatori-f83-/mob_tech.aspx?c=A011115_0044254_mob_tech
- [29] Kryoterapie. In: *WikiSkripta* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Kryoterapie>
- [30] K-space (MRI). In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/K-space_\(MRI\)](http://en.wikipedia.org/wiki/K-space_(MRI))
- [31] KUNA, Pavel. LÉČBA RADIČNÍHO SYNDROMU. In: *EAMOS* [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch04.htm
- [32] Lorentzova síla. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Lorentzova_síla
- [33] LPDA HyperLOG 7025. In: *Aaronia* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.aaronia.com/products/antennas/HyperLog-7025-LPDA-Antenna/>
- [34] Magnetic resonance imaging. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_resonance_imaging
- [35] Magnetická rezonance. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetická_rezonance
- [36] MATĚJKOVÁ, Martina. Elektroterapie. In: *Biofyzikální web* [online]. 2004 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://ftplf2.agarek.com/fyzio/prvak/biofyzika/semin/marmat_elter.php

- [37] ČERVENKA, Michal. *Aplikátor pro lokální termoterapii*. Praha, 2006. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CEEQFjAC&url=https%3A%2F%2Fdipl.felk.cvut.cz%2Fbrowse%2Fpdfcache%2Fcerve_m2_2006dipl.pdf&ei=ziacUs2NCuuv7AbTnIGYCYQ&usg=AFQjCNGA87_IEkd6Y_IScfz_ASSbXfUS6vQ&sig2=JnipJjIUBParn5pJheqOOw&bvm=bv.57155469,d.ZGU.
Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Vrba, Csc.
- [38] Mikrovlnná termoterapie. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Mikrovlnná_termoterapie
- [39] Nařízení č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. In: *TZB-info* [online]. 2008 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-c-1-2008-sb-o-ochrane-zdravi-pred-neionizujicim-zarenim>
- [40] New Teseq Schaffner UPA 6192 BiLog Antenna. In: *Test equipment connection* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.testequipmentconnection.com/52487/Teseq_Schaffner_UPA_6192_BiLog_Antenna.php
- [41] Non-ionizing radiation. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Non-ionizing_radiation
- [42] NOVÁK, Petr. Vlnova delka. In: *Wikimedia Commons* [online]. 2005 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vlnova_delka.png
- [43] Optically stimulated luminescence. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Optically_stimulated_luminescence
- [44] Permeabilita. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Permeabilita>
- [45] Physics of magnetic resonance imaging. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Physics_of_magnetic_resonance_imaging
- [46] Počítačová tomografie. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Počítačová_tomografie
- [47] Poranění ucha. In: *WikiSkripta* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Poranění_ucha
- [48] R&S®ESU EMI Test Receiver. In: *Rohde-schwarz* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.rohde-schwarz.com/en/product/esu-productstartpage_63493-

[8641.html](#)

- [49] Spatial frequency. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_frequency
- [50] Specifická míra absorpce. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Specifická_míra_absorpce
- [51] Spectrum Analyzer for Anritsu RF and Microwave Handheld Instruments Measurement Guide. In: *Anritsu* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.anritsu.com/en-US/Downloads/Manuals/Measurement-Guide/DWL8487.aspx>
- [52] Spectrum Master MS2726C. In: *Anritsu* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.anritsu.com/en-US/Products-Solutions/Products/MS2726C.aspx>
- [53] Spectrum Master MS272xC User Guide. In: *Anritsu* [online]. 2012 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.anritsu.com/en-US/Downloads/Manuals/User-Guide/DWL8486.aspx>
- [54] SUGARMAN, Steve. What are the differences between rad/gray and rem/sievert in measuring radiation?. In: *ORISE* [video]. 2011 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://orise.orau.gov/reacts/resources/video/differences-rad-gray.aspx?keepThis=true&TB_iframe=true&height=470&width=645
- [55] Supravodivost. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Supravodivost>
- [56] Termoterapie. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoterapie>
- [57] Termoterapie. In: *WikiSkripta* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Termoterapie>
- [58] Thermoluminescent dosimeter. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoluminescent_dosimetry
- [59] TILAKARATNA, Prasanna. Magnetic Resonance Imaging : Basic principles of how it works. In: *How equipment works* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.howequipmentworks.com/physics/medical_imaging/mri/magnetic_resonance_imaging.html

- [60] ULLMANN, RNDr. Vojtěch, Zdenka PUCHÁLKOVÁ a Ludmila ULLMANNOVÁ. RADIČNÍ OCHRANA PŘI PRÁCI SE ZDROJI IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ V NUKLEÁRNÍ MEDICINĚ: sylabus otázek a odpovědí ze seminářů o radiační ochraně na Klinice nukleární medicíny FNŠP v Ostravě. [online]. s. 1 [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/RadOchrana.htm>
- [61] ULLMANN, RNDr. Vojtěch. Radioaktivní rozpad. In: Astronuklfyzika [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/RadioaktRozpad.gif>
- [62] Vlnová délka. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnová_délka
- [63] WELTIN-WU, Colin. Harmonics. In: *Engineering is the Best* [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://commonmode.blogspot.cz/2007/01/what-really-matters.html>
- [64] What are uplink and downlink?. In: *Qualitative Reasoning Group, Northwestern University* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/communications/1-what-are-uplink-and-downlink.html>
- [65] What is ICNIRP?. In: *ICNIRP* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <https://www.icnirp.org/what.htm>
- [66] Whole body counting. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Whole_body_counting
- [67] WILLIAMS, John Michael. Sketch of the effect of a plane EMR wave propagating in a bulk fluid of polar elements, with a net result of increasing the temperature. In: *Biological Effects of Microwaves: Thermal and Nonthermal Mechanisms* [online]. 2009 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: www.arxiv.org/pdf/physics/0102007.pdf
- [68] X-ray computed tomography. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_computed_tomography
- [69] Záření gamma. In: *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.cs.wikipedia.org/wiki/Záření_gama
- [70] ZITNAJA. Comptonův rozptyl. In: *WikiSkripta* [online]. 2013, 2013-01-04 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Compt._jev.jpg