



Zdravotně  
sociální fakulta  
Faculty of Health  
and Social Sciences

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Zdravotně sociální fakulta  
Ústav radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva

Bakalářská práce

# Magnetická rezonance a její elektromagnetická podstata

Vypracovala: Markéta Moláková  
Vedoucí práce: doc. RNDr. Přemysl Zášková, CSc.

České Budějovice 2016

# Magnetická rezonance a její elektromagnetická podstata

## Abstrakt

V současné době není k dispozici jednoduchý edukační text na téma „Elektromagnetická podstata magnetické rezonance“, který by byl úměrný potřebám a možnostem studentů studijního programu „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných programů. Cíle, vytyčené na základě tohoto poznatku, které by měla práce splňovat, spočívaly ve využití teorie kurikulárního procesu a již zpracované kvantové dimenze magnetické rezonance k vymezení elektromagnetické podstaty magnetické rezonance v podobě, která bude přiměřená studentům programu „Radiologický asistent“ a příbuzných programů.

Pro bakalářskou práci byly na základě vytyčených cílů a použitého aplikovaného kvantitativního výzkumu formulovány následující hypotézy:

- 1) Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných oborů.
- 2) Rozdělení znalostí respondentů bude mít teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu.

Nejprve bylo nutné analyzovat současný stav zkoumané problematiky „Elektromagnetická podstata magnetické rezonance pro radiologické asistenty“ na základě teorie kurikulárního procesu. V předložené práci je zkoumána teorie elektromagnetického pole, především popis a odvození Maxwellových rovnic pro 4 stavy elektromagnetického pole. Jsou definovány matematické operátory potřebné pro popis Maxwellových rovnic, popsány zdroje změn elektrického a magnetického pole (zřídla a víry), ale je zde také matematicky dokázáno, že se elektromagnetické pole šíří ve vzduchu jako vlna.

V druhém kroku bylo zapotřebí přizpůsobit tyto fyzikální poznatky pro studenty oboru „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných programů. To vyústilo k vytvoření jednoduchého edukačního textu (viz Příloha 1), jehož přiměřenost adresátům edukace byla statistickým šetřením ověřena. Tím byla potvrzena první hypotéza: „*Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných oborů*“.

Experimentální výukou byla ověřena funkčnost edukačního textu. Tato výuka probíhala u studentů oboru Radiologický asistent na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích a byla provázena PowerPointovou prezentací. Studentům, kteří se výuky nezúčastnili, byl edukační text (i test) zaslán elektronickou formou.

Pro ověření nabytých znalostí studentů z experimentální výuky a edukačního textu byla zpracovaná elektromagnetická podstata (edukační text) promítnuta do testu o třinácti otázkách se čtyřmi alternativními možnostmi, přičemž byla vždy jen jedna správná odpověď. Test byl položen respondentům a výsledky testu byly statisticky vyhodnoceny.

Výzkum prováděný v rámci bakalářské práce má charakter aplikovaného kvantitativního výzkumu. Ověření hypotéz vycházelo z užití vhodných metod deskriptivní a matematické statistiky, ale také z užití neparametrického testování tzv. Pearsonovým  $\chi^2$  - testem dobré shody.

Zpracováno bylo celkem 35 testů. Empirickému rozdělení četností získaných bodovým ohodnocením testů bylo přiřazeno tzv. Gaussovo rozdělení. Díky provedenému neparametrickému testování bylo možno potvrdit druhou hypotézu: „*Rozdělení znalostí respondentů bude mít teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu*“.

Statistické šetření tedy potvrdilo, že edukační text je přiměřený potřebám a možnostem respondentů a jejich rozdělení znalostí se blíží rozdělení normálnímu. Z dosažených výsledků vyplývá, že znalosti oslovených studentů byly v souladu s očekávaným předpokladem normálního rozdělení.

Za přínosy předložené bakalářské práce lze považovat z teoretického hlediska aplikaci kurikulárního procesu na vzdělávání studentů oboru „Radiologický asistent“ v oblasti základů elektromagnetické podstaty magnetické rezonance a aplikaci postupů matematické a deskriptivní statistiky v rámci navrhované metodiky. Z hlediska praktického lze považovat jako přínosné nejen využití edukačního textu jako výukového materiálu pro studenty programu „Radiologický asistent“ a případných dalších příbuzných oborů, ale také dle analýzy výsledků jednotlivých otázek z edukačního testu doporučení oblastí pro zkvalitnění výuky fyzikálních základů elektromagnetické dimenze magnetické rezonance radiologických asistentů.

**Klíčová slova**

Maxwellovy rovnice; elektromagnetické pole; magnetická rezonance; teorie  
kurikulárního procesu; radiologický asistent

# Magnetic Resonance and its Electromagnetic Essence

## Abstract

There is no simple educational text addressing the topic of “Magnetic Resonance and its Electromagnetic Essence” which would be currently available and suitable for the needs and possibilities of students of “Radiology assistant” and other related study programs. This fact is reflected in the aims of the thesis, which lie in using the Curricular Process Theory and the already researched quantum dimension of magnetic resonance for defining the electromagnetic foundation of magnetic resonance in such a form that would be suitable for students of “Radiology assistant” and other related programs.

Considering the set aims and the use of applied quantitative research, the thesis presents the following hypotheses:

- 1) It is possible to create an educational text for students of “Radiology assistant” and related study programs by applying the Curricular Process Theory.
- 2) The distribution of respondents’ knowledge will have a theoretical distribution similar to the normal distribution.

First, it was necessary to analyse the current state of research on the subject of “Electromagnetic foundation of magnetic resonance for radiology assistants” based on the Curricular Process Theory. The present study examines the Electromagnetic Field Theory, especially the description and deduction of Maxwell’s four equations for electromagnetic field, defines mathematical operators needed for describing Maxwell’s equations, describes the causes of changes in electric and magnetic fields (wells and vortices), and also mathematically proves that the electromagnetic field spreads in the air as a wave.

Then, it was needed to adjust the form of these physical facts to students of “Radiology assistant” and other related study programs. It resulted in creating a simple educational text (see Appendix 1), whose suitability for the educational target group was verified by a statistical evaluation. Consequently, the first hypothesis that *it is possible to create an educational text for students of “Radiology assistant” and related study programs by applying the Curricular Process Theory* was confirmed.

The functionality of the educational text was verified by an experimental seminar. The seminar was organised for the students of “Radiology assistant” study program at The Faculty of Health and Social Sciences at the University of South Bohemia in České Budějovice and it was accompanied by a PowerPoint presentation. The students who did not participate in the seminar were sent the educational text (and test) in the electronic form.

In order to verify the knowledge gained during the experimental seminar and from the educational text, the defined electromagnetic foundation (educational text) was reflected in a test with 13 questions with four alternative options for each – there was only one correct option for each question. The test was taken by respondents and the results were statistically evaluated.

The type of research used in the thesis is applied quantitative research. The verification of the hypotheses was based on the use of appropriate methods of descriptive and mathematical statistics as well as the use of non-parametric testing, the so called Pearson Chi-Square test (Goodness of Fit).

On the whole, 35 tests were processed. Empirical frequency distributions obtained by scoring the tests were matched with the so called Gaussian distribution. Thanks to the use of non-parametric testing, it was possible to confirm the second hypothesis that *the distribution of respondents' knowledge will have a theoretical distribution similar to the normal distribution.*

Therefore, the statistical evaluation confirmed that the educational text is suitable for the needs and possibilities of the respondents and their knowledge distribution is close to the normal distribution. The acquired results show that the knowledge of the respondents was in agreement with the expected assumption of the normal distribution.

From the theoretical perspective, the thesis makes two contributions: the application of the Curricular Process Theory on education of students of “Radiology assistant” study program in the area of the rudiments of electromagnetic foundation of magnetic resonance and the application of mathematical and descriptive statistics procedures in the context of the suggested method. From the practical point of view, the thesis offers a beneficial idea of using the educational text as study material

for students of “Radiology assistant” and other possible related study programs, and, based on the analysis of the scores of particular questions in the educational test, recommends areas of improvement in the context of teaching physical rudiments of the electromagnetic dimension of magnetic resonance for radiology assistants.

**Key words**

Maxwell’s equations; electromagnetic field; magnetic resonance; Curricular Process Theory; radiology assistant

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem „Magnetická rezonance a její elektromagnetická podstata“ jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby bakalářské práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé bakalářské práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 2. 5. 2016

.....

Markéta Moláková



## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu práce doc. RNDr. Přemyslu Záškodnému, CSc. za jeho velmi cenné rady, trpělivost, obětavou pomoc při řešení dané problematiky, a také za jeho čas, který mi věnoval při konzultacích mé bakalářské práce.

# Obsah

Úvod.....	11
1 Teoretická část .....	12
1.1 Teorie kurikulárního procesu .....	12
1.2 Teorie elektromagnetického pole.....	13
1.3 Teorie magnetické rezonance.....	22
1.3.1 Historie.....	22
1.3.2 Princip a konstrukce magnetické rezonance .....	25
1.4 Použité statistické metody.....	30
2 Hypotézy a metodika výzkumu.....	32
2.1 Hypotézy a cíle.....	32
2.2 Metodika výzkumu .....	32
2.2.1 Popis metod deskriptivní statistiky .....	36
2.2.2 Popis metod matematické statistiky.....	40
3 Výsledky .....	45
3.1 Konceptuální kurikulum .....	45
3.2 Zamýšlené kurikulum .....	45
3.3 Projektové kurikulum.....	45
3.4 Implementované kurikulum – 1 .....	46
3.5 Implementované kurikulum – 2 .....	46
4 Diskuze.....	54
4.1 Diskuze ověřování hypotéz.....	54
4.2 Diskuze dosažených výsledků .....	55
5 Závěr .....	60
6 Seznam informačních zdrojů.....	62
7 Přílohy.....	66
7.1 Edukační text.....	66
7.2 Edukační test.....	74
8 Seznam použitých zkratk.....	77

## Úvod

Na základě analýzy současného stavu zkoumané problematiky se autorka bakalářské práce přesvědčila, že v současné době není k dispozici jednoduchý edukační text na téma „Elektromagnetická podstata magnetické rezonance“, který by byl úměrný potřebám a možnostem studentů studijního programu „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných programů.

Cíle, které se autorka při zpracování bakalářské práce snažila naplnit, spočívaly ve využití teorie kurikulárního procesu a již zpracované kvantové dimenze magnetické rezonance k vymezení elektromagnetické podstaty magnetické rezonance v podobě, která bude přiměřená studentům programu „Radiologický asistent“ a příbuzných programů.

Pro bakalářskou práci byly na základě vytyčených cílů a použitého aplikovaného kvantitativního výzkumu formulovány následující hypotézy:

- 1) Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných oborů.
- 2) Rozdělení znalostí respondentů bude mít teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu.

Zpracovaná elektromagnetická podstata byla promítnuta do testu s alternativními možnostmi, test byl položen respondentům a výsledky testu byly statisticky vyhodnoceny. Výzkum prováděný v rámci bakalářské práce má charakter aplikovaného kvantitativního výzkumu. Ověření hypotéz vycházelo z užití vhodných metod deskriptivní a matematické statistiky.

Využitelnost práce spočívá v předpokladech, že by mohla dále sloužit jako studie o aplikabilitě kurikulárního procesu a jako výukový materiál pro studenty programu „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných oborů.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Teorie kurikulárního procesu

V bakalářské práci bylo zapotřebí využít teorie kurikulárního procesu k vytvoření přehledného a srozumitelného edukačního textu pro studenty oboru radiologický asistent a studenty oborů příbuzných.

Kurikulární proces lze definovat jako: „*posloupnost transformačně na sebe navazujících variantních forem kurikula.*“ (Záškodný, 2009, s. 25)

Variantní formy kurikula na sebe navazují takto:

vědecký systém fyziky → konceptuální kurikulum → zamýšlené kurikulum → projektové kurikulum a implementované kurikulum - 1 → implementované kurikulum - 2 → dosažené kurikulum. (Záškodný, 2009)

Tento proces se zabývá vhodnou volbou přenosu informací z vědy ke studentům (veřejnosti) a je tvořen soustavou transformací poznatků, během které prochází různými oblastmi myšlení, zkoumání, ale také vyjadřování. Jednotlivé transformace popsal v odborné literatuře Záškodný (2009, s. 21) takto:

- **Transformace  $T^1$**  (vstup → výstup) – **Komunikační transformace**  
Vstup  $T^1$ : Vědecký systém fyziky → Výstup  $T^1$ : Sdělitelný vědecký systém fyziky jako **konceptuální kurikulum**.
- **Transformace  $T^2$**  (vstup → výstup) – **Obsahová transformace**  
Vstup  $T^2$ : Sdělitelný vědecký systém fyziky jako konceptuální kurikulum → Výstup  $T^2$ : Didaktický systém fyziky a jeho učivo jako **zamýšlené kurikulum**.
- **Transformace  $T^3$**  (vstup → výstup) – **Kurikulární transformace**  
Vstup  $T^3$ : Didaktický systém fyziky a jeho učivo jako zamýšlené kurikulum → Výstup  $T^3$ : Výukový projekt fyziky a jeho učebnice a připravenost učitele na výuku jako **projektové kurikulum a implementované kurikulum – 1**.
- **Transformace  $T^4$**  (vstup → výstup) – **Edukační transformace**  
Vstup  $T^4$ : Výukový projekt fyziky a jeho učebnice a připravenost učitele na výuku jako projektové kurikulum a implementované kurikulum – 1 → Výstup  $T^4$ : Výsledky výuky fyziky jako **implementované kurikulum – 2**.

- **Transformace  $T^5$  (vstup  $\rightarrow$  výstup) – Aplikální transformace**  
 Vstup  $T^5$ : *Výsledky výuky fyziky jako implementované kurikulum – 2*  
 $\rightarrow$  Výstup  $T^5$ : *Aplikovatelné výsledky výuky fyziky jako dosažené kurikulum.*

## 1.2 Teorie elektromagnetického pole

### Larmorova precese

Kvantová dimenze magnetické rezonance vychází z principu neurčitosti např. z - ovou a x - ovou složku orbitálního momentu elektronu v obalu atomu (ale také protonu v jádře, pro jádro atomu vodíku) nelze současně změřit (komutátor odpovídajících operátorů je různý od nuly). Při dané hodnotě z - ové složky momentu hybnosti jsou zbývající složky tohoto vektoru spojeny s neodstranitelnou vnitřní neurčitostí. Vektor momentu hybnosti nemůže být trvale v jednom směru. (Záškodný, 2005)

Při existenci vnějšího magnetického pole popsaného vektorem magnetické indukce  $\vec{B}$ , z - ové složky momentu hybnosti leží ve směru magnetického pole a současně jsou vždy menší než velikost orbitálního momentu hybnosti. Vektor orbitálního momentu hybnosti proto nikdy nemůže být paralelní nebo antiparalelní s vektorem magnetické indukce  $\vec{B}$ . (Záškodný, 2005)

Vzhledem k uvedeným dvěma kvantovým vlastnostem orbitálního momentu hybnosti musí vektor orbitálního momentu hybnosti sledovat v prostoru povrch kužele. Tomuto periodickému precesnímu pohybu (Larmorově precesi) lze přiřadit úhlovou frekvenci  $\omega = \gamma \cdot B$ , kde  $B$  je velikost vektoru magnetické indukce  $\vec{B}$  a  $\gamma$  je tzv. gyromagnetický poměr pro elektron, v případě zkoumání protonu (jádra atomu vodíku) pro proton. Frekvence tohoto precesního pohybu závisí na magnetické indukci  $B$  a na druhu atomového jádra – to je v Larmorově rovnici charakterizováno hodnotou gyromagnetického poměru. (Záškodný, 2005)

Přesný popis vlastností atomového jádra je možný pomocí aparátu kvantové mechaniky, která v podstatě hledá souvislosti mezi operátory fyzikálních veličin. Samostatně mají operátory jen význam matematických instrukcí, jejich střední hodnoty aplikace

vykonané nad dostatečně velkým souborem zkoumaných elementárních částic, umožňuje nalézt střední hodnoty s fyzikálním významem. Základním rysem kvantové dimenze magnetické rezonance je vymezení Larmorovy rovnice a z ní vyplývající hodnoty úhlové frekvence  $\omega$  precesního pohybu. (Záškodný, 2005)

Kvantová dimenze magnetické rezonance byla zpracována pro potřeby studia vlastností ionizujícího záření např. v bakalářské práci Bc. L. Fila. Magnetická rezonance má však také klasickou elektromagnetickou dimenzi – její zkoumání bude prováděno v rámci kvantitativního výzkumu v předkládané bakalářské práci. Zkoumání této klasické elektromagnetické dimenze magnetické rezonance vychází zejména z Maxwellových rovnic elektromagnetického pole.

### **Maxwellovy rovnice v prostředí s permitivitou $\varepsilon$ a permeabilitou $\mu$**

Jedním z hlavních mezníků 19. století v klasické fyzikální dimenzi teorie elektromagnetického pole se stal rok 1873, kdy James Clerk Maxwell vyslovil předpoklad, že měnící se elektrické pole vytváří pole magnetické – oscilující, elektrický náboj vytváří magnetické pole. Touto cestou se ukázalo, že elektřina a magnetismus nejsou pouze ději příbuznými, ale především jsou propojeny samostatnou teorií. Teoreticky tak bylo předpovězeno elektromagnetické pole, které James Clerk Maxwell zobecněním známých poznatků o elektřině a magnetismu popsal čtyřmi rovnicemi (rovnícemi Maxwellovými). (Tabárek, 2004; McPhee, 2012)

$$(1) \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$(2) \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$(3) \operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$(4) \operatorname{rot} \vec{B} = \mu \vec{i} + \varepsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$\vec{B}$  – vektor magnetické indukce

$\vec{E}$  – vektor intenzity elektrického pole

$t$  – čas

$\vec{i}$  – plošná hustota elektrického proudu

V době, kdy Maxwell tuto teorii zpracoval matematicky, nebyly pro jeho tvrzení k dispozici přímé důkazy. K experimentálnímu ověření Maxwellových vědeckých dedukcí došlo až 10 let po jeho smrti. Výrazně k tomu přispěl německý fyzik Heinrich Hertz, který objevil elektromagnetické vlnění – přenos elektromagnetického pole na určitou vzdálenost. Toto vlnění se mu podařilo objevit za pomoci pokusů s elektromagnetickými vlnami buzenými jiskrovým výbojem – tímto způsobem ověřil většinu Maxwellových závěrů. (Reichl, 2006; Dolník, 2013)

Pro popis Maxwellových rovnic je potřebné definovat následující matematické operátory:

**Div (divergence)** – skalární součin symbolického vektoru nabla  $\nabla$  a např. vektoru  $\vec{E}$ .

$$\nabla \cdot \vec{E} = \text{div} \vec{E}$$

$$\nabla \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$\vec{E} (E_x, E_y, E_z)$$

**Rot (rotace)** – vektorový součin symbolického vektoru nabla  $\nabla$  a např. vektoru  $\vec{E}$ .

$$\nabla \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E}$$

$$\vec{u} \times \vec{v} = \vec{w} (u_2 v_3 - u_3 v_2, u_3 v_1 - u_1 v_3, u_1 v_2 - u_2 v_1)$$

Vektor nabla je v uvedené definici vektorového součinu spojen s prvním vektorem, vektor intenzity elektrického pole s vektorem druhým.

**Laplaceův operátor** – skalární součin  $= \nabla \cdot \nabla$

$$\Delta = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Symbolická instrukce (Szántó, 2012)

## **Zdroje změn elektrického a magnetického pole**

Z matematického hlediska lze zřídla a víry popsat pomocí operátorů  $\text{div}$  a  $\text{rot}$ . Divergence intenzity elektrického pole jako skalární součin symbolického vektoru  $\nabla$  a vektoru  $\vec{E}$  umí vyhledat zřídla elektrického pole (obdobně pro pole magnetické s vektorem magnetické indukce). Vektorový součin symbolického vektoru  $\nabla$  a vektoru  $\vec{E}$  jako rotace intenzity elektrického pole umí nalézt víry elektrického pole (obdobně pro pole magnetické s vektorem magnetické indukce). Aplikací těchto operátorů je v rámci elektromagnetického pole hledání míst, která jsou zdrojem změn stavu pole. Zjednodušeně lze zřídlo popsat jako bod, z kterého vycházejí nebo do kterého vcházejí siločáry příslušného pole. Vír je naopak bodem, kolem kterého siločáry „krouží“. (Záškodný, 2005)

## **Obecný popis zřidel a vírů v rámci Maxwellových rovnic (1), (2), (3), (4)**

První rovnice – z této rovnice vyplývá, že zdrojem elektrického pole s neuzavřenými elektrickými siločárami je elektrický náboj, zřídlem elektrického pole je elektrický náboj. (Tabárek et Červinková, 2004; Reichl, 2006)

Druhá rovnice – magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené (nemají začátek ani konec v nějakém magnetickém náboji). Lze opatrně říci, že magnetický náboj neexistuje. To lze prokázat i faktem, že od sebe nelze oddělit severní a jižní pól magnetu a vytvořit tak magnetický monopol. Magnetické pole je nezřídlové. (Tabárek et Červinková, 2004)

Třetí rovnice – tato rovnice je zákonem elektromagnetické indukce, zdrojem a vírem elektrického pole je měnící se magnetické pole. (Záškodný, 2005) Jde v podstatě o souvislost mezi dráhovým integrálem magnetické indukce a proudy ve vodičích. (Szántó, 2012)

Čtvrtá rovnice – tato Maxwellova rovnice ukazuje, že magnetické pole vzniká jako důsledek elektrického proudu, a také jako důsledek změny elektrického pole. Z tohoto důvodu jsou zdroji, a tím i víry magnetického pole proud vodivý a Maxwellův posuvný proud ( $2 \text{ víry} = 2 \text{ sčítance}$ ). (Záškodný, 2005)



## Maxwellovy rovnice pro 4 stavy elektromagnetického pole (pro vakuum a vzduch)

### **a) Statická teorie elektromagnetického pole**

Náboj  $Q$  je vůči pozorovateli v klidu. Toto pole je nevírové. Siločáry začínají na kladných nábojích a končí na nábojích záporných, siločáry nevytvářejí uzavřené křivky. (Dolník, 2013)

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = 0$$

### **b) Stacionární teorie elektromagnetického pole**

Náboj  $Q$  se pohybuje jedním směrem a s konstantní rychlostí, jde o stejnosměrný elektrický proud. Stacionární teorie může být nazývána také jako proudová a má obrovský význam pro radiologii – pohyb proudu v plynech, polovodičích a pevných látkách je spojen s detekcí a dozimetrií ionizujícího záření v řadě oblastí radiologie. (Dolník, 2013)

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{i}$$

### c) Kvizistacionární teorie elektromagnetického pole

U kvazistacionární teorie elektromagnetického pole lze uvažovat o nízkofrekvenčním střídavém proudu. Tato teorie se stala základní aplikací pro oblast elektrotechniky. Druhý sčítanec ve čtvrté Maxwellově rovnici lze zanedbat.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$$

### d) Nestacionární teorie elektromagnetického pole

Pro tuto teorii je charakteristický vysokofrekvenční střídavý proud a je v rámci radiologie základním kamenem pro pochopení klasické dimenze magnetické rezonance a popisu elektromagnetických vln. Tato teorie bude v rámci bakalářské práce nadále rozvíjena. Maxwellovy rovnice platí v podobě (1), (2), (3), (4). Např. ve vakuu je lze přepsat ve tvarech:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

V rámci předkládané bakalářské práce bude zkoumána především aplikace nestacionární teorie elektromagnetického pole – tato teorie je jedním z fyzikálních základů magnetické rezonance, kterou lze popsat čtyřmi výše zmíněnými Maxwellovými rovnicemi pro zřídla a víry elektrického a magnetického pole.

## Elektromagnetické vlnění a vlna

Z uvedených Maxwellových rovnic lze vyvodit, že elektrické a magnetické pole může existovat ve vakuu a v látkovém prostředí i za předpokladu, že není tvořeno elektrickými náboji. Obě dvě pole jsou navzájem neoddělitelná a tvoří dvě na sobě navzájem závislé složky elektromagnetického pole, které není statické, ale šíří se jako elektromagnetické vlnění. (Tabárek et Červinková, 2004)

Vlněním rozumíme jev, s nímž se lze setkat v různých oblastech fyziky jako například v akustice při chvění strun, v hydromechanice při vlnění vodní hladiny, ale také v elektrickém a magnetickém poli. Ve všech zmíněných oblastech je stav daného prostředí popisován určitou veličinou, která je závislá na místě a čase. V našem případě je to vektor intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  nebo indukce magnetického pole  $\vec{B}$ . Vlnění lze popsat obecnou vlnovou rovnicí:  $\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} = c^2 \Delta \mathbf{x}$ , která bude aplikována v rámci dalších úvah. Rovnice bude odvozována pro vakuum z Maxwellových rovnic pro každou složku elektromagnetického pole zvlášť. Je zapotřebí si uvědomit, že pro vakuum platí  $\rho = 0$  a  $\vec{i} = \vec{0}$ . (Tabárek et Červinková, 2004) Maxwellovy rovnice tak nabývají následujících tvarů:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{i} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Derivací poslední Maxwellovy rovnice podle času lze obdržet následující vztah pro elektrickou složku:

$$\operatorname{rot} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Po jednoduché úpravě lze získat vztah:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \operatorname{rot} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Po dosazení z třetí Maxwellovy rovnice lze obdržet následující vztah:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E}$$

Jelikož ve vakuu platí  $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = -\Delta \vec{E}$  ( $\operatorname{rot} \operatorname{rot} = \operatorname{grad} \operatorname{div} - \Delta$ ), lze již získat zmiňovanou vlnovou rovnici pro elektrickou složku elektromagnetického pole.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \Delta \vec{E}$$

Jelikož jsou magnetická i elektrická složka kompatibilní, lze obdobnou vlnovou rovnici odvodit i pro složku magnetickou.

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \Delta \vec{B}$$

Vlnové rovnice se staly důkazem toho, že v elektromagnetickém poli vznikají vlny. Dnes je tento poznatek samozřejmostí, ve své době to byl epochální objev. Experimentálně prokázat tento objev se podařilo až v roce 1887 Heinrichu Hertzovi. (Szántó, 2012)

Díky Maxwellově teorii lze kvantifikovat i další vlastnosti pole, včetně rychlosti šíření elektromagnetických vln. V uvedené době se ukázalo, že rychlost šíření elektromagnetických vln je rovna rychlosti světla, která činí  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . (Lank et Vondra, 1996)

Tento poznatek lze dokázat následujícím vzorcem a jednoduchým výpočtem:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Do vzorce lze dosadit za absolutní permitivitu číselnou hodnotu  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  a za absolutní permeabilitu číselnou hodnotu  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ :

$$c = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}}$$

$$\underline{c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Odtud lze vidět, že rychlost šíření elektromagnetické vlny je dána rychlostí světla.

Elektromagnetická vlna má dvě na sobě závislé složky. První složkou je složka elektrická, odpovídající vektoru  $\vec{E}$ , druhou složkou je složka magnetická, která je popsána vektorem  $\vec{B}$ . Vektor intenzity  $\vec{E}$  i vektor magnetické indukce  $\vec{B}$  jsou na sebe navzájem kolmé a současně jsou kolmé na směr šíření vlny. (Halliday, 2000)

### **Elektromagnetické pole se ve vzduchu šíří jako elektromagnetické vlnění**

Důkaz, že se elektromagnetické pole šíří ve vzduchu jako elektromagnetické vlnění lze provést následujícím způsobem.

Nejdříve byl proveden důkaz o tom, že elektrické pole se šíří jako elektrická vlna popsaná vlnovou rovnicí:

$$\Delta \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

Dále bude využito poznatku, že elektromagnetické vlnění se šíří rychlostí světla. Součin  $\epsilon_0 \mu_0$  bude nahrazen vztahem  $\frac{1}{c^2}$  vyplývajícím ze vzorce  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \rightarrow c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \rightarrow \epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1 \rightarrow \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ . Odtud již lze převést vlnovou rovnici na tvar:

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

K této vlnové rovnici se lze také propracovat např. zobecněním vlnové rovnice pro šíření vlnění v řadě bodové (identické s osou x) na vlnovou rovnici pro obecný směr šíření:

$$v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \nabla \cdot \nabla = \Delta \text{ (Laplaceův operátor)}$$

Dosažením za Laplaceův operátor lze získat rovnici:

$$\Delta \Psi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

Elektrické pole se skutečně šíří ve vakuu (ve vzduchu, v dielektriku) jako elektrická vlna.

**Také touto cestou je potvrzeno, že elektrické pole se vzduchem šíří jako elektrická vlna.**

Obdobným postupem lze také dokázat, že magnetické pole se šíří ve vakuu (ve vzduchu, v dielektriku) jako magnetická vlna.

**Elektromagnetické pole se šíří vzduchem jako elektromagnetická vlna tvořená propojenou vlnou elektrickou a magnetickou.**

### *1.3 Teorie magnetické rezonance*

#### *1.3.1 Historie*

Ačkoliv je magnetická rezonance (MR/MRI) poměrně novodobá neinvazivní vyšetřovací metoda a její začátky se datují od konce 70. let 20. století, kdy se začala uplatňovat v medicínské praxi, jejímu použití předcházely desítky let objevů a výzkumu. (Válet et Žižka, 1996)

Za úplný začátek lze považovat vůbec první objevení magnetu, v podstatě přírodního magnetitu, který se objevil již v antice. Největší znalost o tom, co je to magnet, měli Číňané, kteří znali jeho přitažlivou i odpudivou sílu a schopnost ukazovat směr - toho využili ke zkonstruování kompasů na určování zeměpisné polohy. (Teresi, 2012) První kompasy byly vyrobeny přímo z magnetitu a měli tvar lžičky, která se mohla volně otáčet na velmi hladké měděné či bronzové podložce a držadlem ukazovala zeměpisnou polohu. (Krupička, 2007)

V 20. letech 20. století poprvé objevil sílu magnetického pole a jeho radiofrekvenci Joseph Larmor a tento jev nazval Larmorova frekvence. To poukazovalo na fakt, že takzvaná úhlová frekvence spinu jader je závislá na intenzitě magnetického pole. Tento fenomenální objev byl nazván nukleární magnetickou rezonancí – NMR. Název nukleární magnetické rezonance byl odvozen takto: **N**ucleous – jádra určitých atomů ovlivňované polem, **M**agnetic – magnetické pole, **R**esonance – protože směr frekvence závisí na magnetickém a radiofrekvenčním poli. Tento objev se stal zrozením NMR spektrometrie a popsaná metoda se v tuto dobu využívala hlavně jako důležitá analytická metoda pro výzkum skladby chemických složek. (Rusnák, 2010)

Na vývoji nukleární magnetické rezonance se nejvíce podíleli roku 1946 dva fyzici, Felix Bloch a Edward Purcell, kteří prováděli první úspěšné pokusy u vzorků pevných látek a kapalin. Touto cestou zjistili, že jádra atomů umístěná v silném magnetickém poli mohou absorbovat energii určitých vlnových délek, postupně se opět vracet do klidové fáze a uvolňovat energii zpět do svého okolí. Tento objev učinili nezávisle na sobě a získali za něj roku 1952 Nobelovu cenu za fyziku. Již o rok později byl vynalezen první přístroj využívající magnetické rezonance, ovšem nebyl pro lékařské využití. Do konce 70. let se nukleární magnetická rezonance využívala pouze pro chemickou a fyzikální analýzu. (Rusnák, 2010)

Až od 70. let se objevují první aplikace nukleární magnetické rezonance v medicíně, kdy Raymond Damadian poprvé navrhuje využití nukleární magnetické rezonance jako tomografickou zobrazovací metodu. Tento vědec si poprvé při měření in vitro vzorků povšimnul, že normální a nádorové buňky mají rozdílné relaxační časy T1. U nádorových tkání byl relaxační čas T1 vyšší než u zdravých tkání. Ovšem kritici se domnívali, že rozdílnost relaxačních časů u zdravých a nádorových buněk není

dostačujícím faktorem k uvedení nukleární magnetické rezonance do medicíny. (Rusnák, 2010)

Magnetická rezonance byla vyvíjena od roku 1973, kdy byl uveřejněn článek s názvem Tvorba obrazu vzájemným vnitřním působením částic s využitím magnetické rezonance, jejímž autorem byl Paul C. Lauterbur, profesor chemie Státní Univerzity v New Yorku. V tomto článku Lauterbur popsal novou zobrazovací techniku označenou jako zeugmatografie (zeugma - spojení). Technika byla založena na spojení vysokého gradientního magnetického pole spolu se silným hlavním magnetickým polem, které poskytovalo prostorovou lokalizaci dvou testovaných trubic naplněných vodou, tedy MR řez dvou trubic. Zde k vytvoření obrazu využíval metodu zpětného zobrazení dvou testovaných trubic. Tento pokus se stal základem magnetické rezonance (MRI – Magnetic Resonance Imaging). A rok poté, tedy roku 1974, vytvořil se svým kolegou J. M. S. Hutchinsonem první MR řez živého organismu, kterým byla laboratorní myš. Lauterbur vnuknul mnoha společnostem myšlenku vytvořit magnet s dostatečně velkým otvorem a intenzitou magnetického pole, aby mohl přístroj zobrazit celé lidské tělo pacienta. V roce 1975 zeugmatografii vylepšuje R. Ernst zavedením fázového a frekvenčního kódování a Fourierovy transformace. (Rusnák, 2010)

Roku 1976 P. Mansfield a A. A. Maudsley publikují transverzální obraz článku prstu u člověka. (Válek, 1996) Jen rok poté Raymond Damadian konstruuje první celotělové zařízení magnetické rezonance nazvané *Indomitable* a provádí první celotělový sken, který trval 4 hodiny a 45 minut. Od tohoto roku výrazně vzrostlo využití magnetické rezonance v medicíně. (Woodward et Freimarck, 1995)

Damadian zakládá roku 1978 první komerční společnost Fonar, která se zabývá výrobou přístrojů pro magnetickou rezonanci a roku 1980 uvede na trh první komerční celotělový 1,5 T MR tomograf. (Sedlář, 2011)

V roce 1983 byl v Evropě, společností Picker Ltd., nainstalován první MRI přístroj na oddělení diagnostické radiologie na Lékařské fakultě Univerzity v Manchesteru. (E. Carver et B. Carver, 2012)

Roku 1987 akceleroval vývoj MR angiografie a objevuje se již první zobrazení srdečního cyklu v reálném čase, včetně zobrazení toku krve. (Sedlář, 2011)



Paul C. Lauterbur a P. Mansfield získali v roce 2004 Nobelovu cenu za zobrazování magnetickou rezonancí. (Tůma, b. r.)

### ***1.3.2 Princip a konstrukce magnetické rezonance***

Jak již bylo zmíněno, magnetická rezonance, je neinvazivní metoda vyšetření, u které se nevyužívá RTG (rentgenové) záření ani jiných druhů ionizujícího záření. Poskytuje informace hlavně o vnitřní stavbě lidského těla, ale také o fyziologii a funkci jednotlivých orgánů. Díky ní se na základě počítačového zpracování magnetického pole zobrazuje vyšetřovaná oblast těla v průřezech. (Kollátorová, 2011) Tato metoda je založena na fyzikálním jevu nukleární magnetické rezonance v živých systémech a sleduje odezvy atomových jader umístěných v silném magnetickém poli při interakci s vysokofrekvenčním elektromagnetickým zářením. Výsledkem tohoto procesu je elektromagnetický MR signál v oblasti spektra rádiových vln (MHz). K zobrazování v medicíně jsou nejvhodnější jádra vodíku hlavně proto, že je hojně zastoupen v molekulách vody, která tvoří 68% hmotnosti lidského těla. Mohou se zobrazit ovšem také jádra  $^{13}\text{C}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}$  nebo  $^{31}\text{P}$ . (Sedlář, 2011) Tkáň se začne v magnetickém poli chovat magneticky, z toho důvodu, že tkáně lidského těla mají různou hustotu a různý obsah vody, a tím pádem se projeví i různým magnetismem. (Kollátorová, 2011)

Snímky, které byly získány pomocí magnetické rezonance, poskytují nejlepší rozlišení měkkých tkání ze všech zobrazovacích metod, které jsou k dispozici, zejména při vyšetření mozku, míchy, srdce, cév, kloubů i svalů. (Kollátorová, 2011)

Magnetická rezonance je bezpečnou vyšetřovací metodou, tudíž je vhodná jak pro děti, tak i pro těhotné ženy. V dnešní době trvá vyšetření několik desítek minut a čas se odvíjí od velikosti vyšetřované oblasti. (Kollátorová, 2011)

Dalšími zobrazovacími modalitami na základě magnetické rezonance jsou MR angiografie (MRA), funkční magnetická rezonance (fMRI) nebo difuzní magnetická rezonance (DT MRI, DTI). (Sedlář, 2011)

Přístroj, kterým je prováděno vyšetření magnetickou rezonancí, se nazývá MR tomograf a velmi se podobá počítačovému tomografu k CT vyšetření.

Skládá se z těchto hlavních částí:

- Hlavní magnet, který generuje homogenní a polarizované magnetické pole  $B_0$ .
- Korekční magnetický systém, který napomáhá k zlepšení prostorové homogenity magnetického pole  $B_0$ .
- Gradientní magnetický systém, který generuje gradientní magnetická pole ve třech rovinách a to ve směru x, y, z.
- Radiofrekvenční systém (vysílač, přijímač), který vytváří radiofrekvenční pulsy pro překlopení spinu jader a zaznamenává signály při relaxaci spinu.
- Vysokofrekvenční a magnetické stínění, které je součástí MR tomografu a stíní místnosti s MR proti vnějšímu radiofrekvenčnímu a magnetickému rušení.
- Počítačový systém, zde se provádí výpočty, zobrazení, ovládání a nastavování parametrů.
- Lůžko s plynulou regulací polohy s pacientem a přístrojové doplňky na monitoraci dýchání pacienta, EKG (elektrokardiografie), které jsou pro určité druhy vyšetření potřebné. (Vomáčka et al., 2012)

### **Hlavní magnet**

- a) Permanentní magnety využívají intenzity magnetického pole maximálně do 0,3 T, to způsobuje nižší výsledný signál a tudíž i nižší rozlišovací schopnost. (Válek et Žižka, 1996) Jsou zkonstruovány ze slitin kovů vzácných feromagnetických zemin, u kterých je základní složkou železo, kobalt nebo nikl. (Weis et Bořuta, 1998) Pro jeho otevřenou konstrukci je tento magnet velkou výhodou pro pacienty trpící klaustrofobií. (Blink, 2004) U použití těchto magnetů jsou nízké provozní náklady z toho důvodu, že pro generaci magnetického pole  $B_0$  není potřeba elektrický proud. (Válek et Žižka, 1996) Ovšem je nutná dokonalá klimatizace k dosažení tepelné stability. (Weis et Bořuta, 1998) Největším nedostatkem tohoto magnetu je jeho velká hmotnost, kdy magnet váží až několik desítek tun a to, že magnet nemůžeme vypnout. (Blink, 2004)

- b) Rezistivní magnety (odporové elektromagnety) vytvářejí magnetické pole, které je generováno průchodem elektrického proudu vodičem. Tyto magnety pracují s intenzitou magnetického pole maximálně do 0,3 T. (Blink, 2004) Pokud bude uvedena konstrukce těchto magnetů, jedná se o duté měděné vodiče, jejichž vnitřním prostorem cirkuluje voda sloužící jako ochlazovací prvek - to je nezbytná součást pro správnou funkci magnetu. (Nekula et Chmelová, 2009) Jelikož je magnetické pole vytvářeno průchodem proudu vodičem, mají velkou spotřebu elektrické energie, to zvyšuje provozní náklady, a proto se rezistivní magnety využívají ze všech tří typů magnetů nejméně. (Tůma, b. r.) Jako výhody lze uvést možnost vypnutí magnetu, relativně nízkou hmotnost, pořizovací náklady a otevřený U portál magnetu - tím se stává výhodným k vyšetření pacientů, kteří trpí klaustrofobií. (Blink, 2004) Také se hodí k vyšetřování dětí a k navigaci pro intervenční výkony z důvodu snadného přístupu k vyšetřovanému pacientovi. (Nekula et Chmelová, 2009)
- c) Supravodivý magnet je nyní nejčastěji používaným typem. Pracuje s intenzitou magnetického pole od 0,5 – 3 T (někdy i více), to umožňuje vysokou rozlišovací schopnost, má poměrně nízkou spotřebu energie a také velmi vysokou homogenitu. (Tůma, b. r.; Blink, 2004) Magnetické pole se zde vytváří průchodem elektrického proudu supravodičem, který má nulový elektrický odpor. Při použití supravodivých magnetů je nutné mít chladicí zařízení (He), které udržuje magnet v supravodivém stavu. (Tůma, b. r.) U prvních supravodivých magnetů bylo zapotřebí dvojího chlazení - kapalným dusíkem a kapalným héliem se spotřebou 1 až 2 litry kapalného dusíku za hodinu a 0,5 litrů za hodinu kapalného hélia. To bylo velmi nežádoucí z hlediska nákladnosti na provoz. Pokrokem se stalo zavedení kryogenního čerpadla a zavedení uzavřeného héliového okruhu, kdy se odpařené hélium využívá na chlazení vnějšího pláště héliového krystalu a vzápětí se zkapalňuje. Tím se odstranila potřeba chlazení dusíkem a výrazně se přispělo ke snížení spotřeby kapalného hélia na hodnotu cca 0,1 litrů za hodinu, přičemž hélium stačí doplňovat cca jednou až dvakrát za rok. (Weis et Bořuta, 1998)

### **Korekční magnetický systém**

Korekční magnetický systém generuje magnetické pole, které potlačuje nehomogenity, a tím zlepšuje homogenitu statického magnetického pole  $B_0$ . Tohoto systému je

zapotřebí, jelikož celotělový magnet bohužel v pracovním objemu neposkytuje dostatečně homogenní magnetické pole. Nehomogenita by mohla způsobovat geometrické a intenzitní zkreslení MR obrazu. Soustava korekčních cívek je nejčastěji vyrobena buď z měděných vodičů, nebo také ze supravodičů ponořených do kapalného hélia spolu s cívkou hlavního magnetu. (Weis et Bořuta, 1998) Homogenita magnetického pole je naprosto nezbytná pro zobrazení kvalitního MR obrazu vyšetřovaných struktur. (Válek et Žižka, 1996)

### **Gradientní magnetický systém**

Tento gradientní systém se skládá se ze tří gradientních cívek a jejich proudových zdrojů, které vyrovnávají narušenou homogenitu magnetického pole přítomností pacienta. Tyto cívky ovšem nelze vidět, jelikož se nacházejí v prostoru stacionárního magnetu. (Nekula et Chmelová, 2009) Díky vytváření přídavných magnetických polí tzv. gradientů, lze získat poziční kódování neboli prostorovou informaci o rozložení a vlastnostech protonů uvnitř vyšetřovaných tkáních. (Válek et Žižka, 1996) Rovněž jsou schopny určit tloušťku jednotlivých vrstev, přičemž je důležitá strmota nástupu používaného gradientu – čím strmější, tím tenčí vrstva je. (Nekula et Chmelová, 2009) Gradient magnetického pole narůstá na síle v určitém směru a změnu magnetického pole umožňuje v předem na sebe kolmých směrech x, y, z. (Seidl, 2012)

Vysvětlením pro silný akustický hluk, který doprovází každé MR vyšetření, jsou prudce se pohybující gradientní cívky vůči svým ukotvením vlivem vznikajících magnetických sil. (Válek et Žižka, 1996) Prudce se pohybující gradientní cívky mohou být také zdrojem artefaktů a zvýšené spotřeby hélia. (Nekula et Chmelová, 2009)

### **Radiofrekvenční systém (vysílač, přijímač)**

Jde v podstatě o antény předávající a přijímající rádiové vlny, u kterých je snahou umístit je do co nejbližší vzdálenosti ke snímanému poli. (Tůma, b. r.) Většina MR systémů má dva hlavní typy zobrazovacích cívek, kterými jsou cívky přijímací a vysílací a cívky pouze přijímací. (Woodward et Freimarck, 1995)

- a) **Přijímací a vysílací cívky** jsou celotělové permanentní zabudované cívky, které nelze přímo vidět. Slouží zároveň jako přijímač signálu, tak i vysílač. Jelikož se vyskytují relativně daleko od povrchu těla, snižuje se poměr signál/šum a kvalita obrazu. (Vomáčka et al., 2012)

**b) Příjímací cívky** mohou být různých tvarů, velikostí a konfigurací. Zpočátku byly cívky navrženy tak, aby byly umístěny kolem nebo přímo na specifické oblasti a byly nazývány povrchové cívky. Postupem času a rozvojem magnetické rezonance byly některé cívky zkonstruovány i tak, aby mohly být uloženy uvnitř těla, jako jsou endorektální cívky používané pro zobrazení prostaty, popřípadě rekta a dělohy. Tyto cívky se standardně používají pro zobrazení určité oblasti těla, kterou potřebujeme vyšetřit. Povrchové cívky jsou přijímací antény, které mají za úkol přijímat signály vycházející z vyšetřované oblasti a mohou být umístěny v přímé blízkosti zdroje signálu. Jelikož se nacházejí v bezprostřední blízkosti, napomáhají zlepšit poměr signál/šum, což je výhodou oproti celotělovým cívkám. (Woodward et Freimarck, 1995) Kdyby nebyla cívka v blízkosti vyšetřované oblasti, nemusela by zachytit slabší signály z hloubky a došlo by k zhoršení kvality MR obrazu. (Nekula et Chmelová, 2009) Názvy povrchových cívek jsou většinou odvozeny podle jimi vyšetřovaných částí těla. Jsou jimi např. cívka hlavová k vyšetření mozku a hlavy, krční páteřní cívka, páteřní cívka pro vyšetření hrudní a bederní páteře, ramenní, kolenní, zápěstní apod., cívky pro vyšetření břicha a trupu. Zvláštní skupinou cívek jsou tzv. Phasedarraycoils, které obsahují několik samostatných cívek seřazených za sebou tak, že čím více cívek je zapojeno, tím větší oblast lze při nezmenšené rozlišovací schopnosti vyšetřovat. Signály, které cívky přijímají, jsou vedeny a zpracovány pro každou cívku zvlášť a až teprve výsledný obraz je složen ze všech segmentů cívek, které se na tvorbě obrazu podílely. (Válek et Žižka, 1996)

### **Stínění elektromagnetického pole**

Aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování okolních elektronických přístrojů (počítače, TV, elektromotory) a samotného MR přístroje, musí být pracoviště MR kvalitně stíněno. K rušení dochází vysílacími frekvencemi rádiových vln a magnetické pole se šíří jak horizontálně, tak i vertikálně do jiných podlaží. Stínění zde musí být zejména z toho důvodu, že magnetický signál z vyšetřovaného objektu je velmi slabý a mohl by být těmito elektronickými přístroji narušen. Naopak i elektronické přístroje mohou být závažně narušeny z impulsů a stacionárního magnetického pole. (Nekula et Chmelová, 2009) Stacionární magnetické pole má tvar silokřivek a jeho intenzita klesá s třetí mocninou vzdálenosti. Podstatným požadavkem je mít ochranu proti silnému magnetickému poli, které vytváří hlavní magnet,

u něhož je velmi důležité si uvědomit, že supravodivý stacionární magnet je zdrojem magnetického pole i mimo pracovní dobu, tedy neustále. Stínění se dělí na pasivní a aktivní. (Vomáčka et al., 2012)

U **pasivního stínění** jsou stěny vyšetřovací místnosti izolovány silnými pláty pletiva z nemagnetických ocelových bloků a měděného plechu - jde o Faradayovu klec. (Vomáčka et al., 2012; Rosina, 2013) Pojmem Faradayova klec rozumíme drátěnou síť, která obklopuje stíněný prostor. Uzavřený vodivý obal napomáhá odstínit vnější elektrické pole. Vodivý elektrický náboj je umístěn pouze na povrchu vodiče. Na vnitřním povrchu tohoto vodiče žádný volný náboj není. (Rosina, 2013)

**Aktivní stínění** funguje tak, že se do okolí gantry umístí cívky obklopující hlavní elektromagnet, které vyrábějí magnetické pole v opačném směru a tím pádem výrazně tlumí magnetické pole hlavního magnetu. (Nekula et Chmelová, 2009) Jde tedy o snahu redukovat magnetickou indukci ve vnějším okolí elektromagnetu a odstínit hlavní magnetické pole  $B_0$  od nepříhodných vlivů okolí. (Weis et Bořuta, 1998)

#### ***1.4 Použité statistické metody***

Pro bakalářskou práci bylo využito k vyjádření výsledků metod deskriptivní a matematické statistiky.

##### **a) Deskriptivní statistika**

Nejprve se autorka bakalářské práce zabývala **formulací statistického šetření**, které se řadí na první příčku algoritmu jednotlivých kroků a zároveň je první základní metodou deskriptivní statistiky. Do této formulace se řadí tyto základní statistické pojmy: hromadný náhodný jev, statistická jednotka, statistický znak, hodnota statistického znaku, základní statistický soubor a jeho rozsah, náhodný výběr a výběrový statistický soubor. (Záškodný et al., 2011)

V druhé části došlo k tzv. **škálování**, které pomohlo rozčlenit velké množství hodnot statistického znaku do přiměřeného počtu škál. K tomuto rozdělení došlo za pomoci tzv. Sturgesova pravidla. (Záškodný et al., 2011)

Třetí příčku algoritmu jednotlivých kroků statistického šetření reprezentuje **měření v deskriptivní statistice**, ke kterému bylo nutno přistoupit po vhodném rozškálování

statistických znaků do jednotlivých prvků škály. Jakmile byl k dispozici vhodný počet prvků škály, byly rozděleny statistické jednotky výběrového statistického souboru do jednotlivých prvků škály a touto cestou byl získán počet statistických jednotek v jednotlivých prvcích škál (absolutní četnosti). Z tohoto měření lze také, mimo absolutních četností, vypočítat pomocí deskriptivní statistiky relativní četnosti a kumulativní četnosti. (Záškodný et al., 2011)

Tyto naměřené četnosti bylo nutné dále zpracovat tzv. **elementárním statistickým zpracováním**, které tvoří čtvrtou příčku algoritmu jednotlivých kroků a zároveň poslední základní metodou deskriptivní statistiky. V rámci elementárního statistického zpracování byla vytvořena tabulka a vykresleny grafy empirického rozdělení absolutních (obr. 1), relativních (obr. 2) a kumulativních relativních četností (obr. 3). Dále byly vypočítány vhodné empirické parametry (například pro tuto bakalářskou práci parametr polohy, variability, šikmosti a špičatosti). (Záškodný et al., 2011)

#### **b) Matematická statistika**

Po absolvování všech výše uvedených kroků z deskriptivní statistiky přišla na řadu neparametrická matematická statistika, která je pátou příčkou algoritmu jednotlivých kroků statistického šetření a zároveň první základní metodou matematické statistiky. K testování hypotéz lze užít vedle **parametrického testování** zmíněné **neparametrické testování**, kterým se autorka bakalářské práce podrobněji zabývala. K neparametrickému testování hypotéz bylo užito Pearsonova  $\chi^2$  - testu dobré shody, který umožňuje zjistit, zda je možné nahradit empirické rozdělení rozdělením teoretickým. (Záškodný et al., 2011)

## 2 Hypotézy a metodika výzkumu

### 2.1 Hypotézy a cíle

Bakalářská práce vznikla za předpokladu ověření dvou níže uvedených hypotéz. První hypotézou je předpoklad aplikability kurikulárního procesu na zkoumaný problém. Druhá hypotéza předpokládá normalitu rozdělení ve znalostech respondentů po předložení edukačního textu spojeného se znalostmi z výuky předmětu „Radiologická fyzika 1 a 2“, který respondenti absolvují v prvním ročníku studia oboru „Radiologický asistent.“

Na základě teorie kurikulárního procesu a s využitím již zpracované kvantové dimenze magnetické rezonance se autorka bakalářské práce pokusila naplnit daný cíl, kterým bylo zpracování elektromagnetické podstaty magnetické rezonance v podobě, která bude přiměřená studentům programu „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných programů.

### 2.2 Metodika výzkumu

Metodiku ke zpracování bakalářské práce lze rozdělit do pěti následujících kroků, které odrážejí postup jednotlivých kroků kurikulárního procesu popsaného v kapitole 1.1.

- I. Analyzování soudobého vědeckého systému - konceptuální kurikulum.
- II. Transformování zkoumaného vědeckého systému na sdělitelný vědecký systém - zamýšlené kurikulum.
- III. Zpracování vlastního edukačního textu na podkladě analýzy vědeckého systému - projektové kurikulum.
- IV. Ověřování edukační funkce zpracovaného edukačního textu experimentální výukou studentů studijního oboru „Radiologický asistent“ a popřípadě dalších příbuzných studijních oborů - implementované kurikulum – 1.
- V. Vytvoření edukačního testu pro ověření získaných vědomostí studentů a následující statistické zhodnocení těchto testů tzv. implementované kurikulum – 2.



### **Ad I. – konceptuální kurikulum, II. – zamýšlené kurikulum, III. – projektové kurikulum**

Jelikož po důkladné analýze vědeckého systému (konceptuálního kurikula) bylo zjištěno, že v současné době není volně k dispozici jednoduchý edukační text na téma elektromagnetické podstaty magnetické rezonance, který by byl úměrný znalostem studentů studijního programu „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných programů (pokud pomineme některé texty v anglickém jazyce), bylo proto nutno vytvořit zjednodušený edukační text v českém jazyce (projektové kurikulum), který bude přiměřený právě těmto studentům. Tento vlastní edukační text obsahuje úplné základy elektromagnetické podstaty magnetické rezonance a volně navazuje na již zpracovanou kvantovou podstatu magnetické rezonance v bakalářské práci Bc. Lukáše Fila.

### **Ad IV. Implementované kurikulum – 1**

Tato část kurikulárního procesu souvisí s přípravou na výuku. Několik dní před experimentální výukou byl studentům poskytnut edukační text elektronickou formou pro nastudování probíraného tématu. Autorka bakalářské práce si pro zúčastněné připravila PowerPointovou prezentaci.

Osloveni byli studenti studující obor „Radiologický asistent“ na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích jak prezenční, tak i kombinované formy studia, a to ve všech třech ročnících. Byly předem domluveny termíny, kdy bude experimentální výuka probíhat. Během přednášky, o délce přibližně 30 minut, provázené PowerPointovou prezentací byly probrány všechny důležité poznatky o elektromagnetické podstatě magnetické rezonance, které by měl student radiologického asistenta ovládat. Experimentální výuky se nakonec zúčastnilo celkem 20 studentů, a to převážně prezenční formy studia. Ti získali znalosti o elektromagnetické podstatě magnetické rezonance nejen z edukačního textu, ale byli obohaceni i právě o již zmíněnou přednášku. To prospělo k prohloubení jejich znalostí. Zbylí studenti, tedy studenti prvního, druhého a třetího ročníku převážně kombinované formy studia, kteří souhlasili s účastí na výzkumu znalostí, se z valné většiny nemohli dostavit pro nevyhovující datum a čas probíhající přednášky. Těmto studentům byl poskytnut pouze edukační text v elektronické podobě, který si mohli nastudovat. Výhodou u studentů, kteří se zúčastnili přednášky, bylo také to, že mohlo být

odpovězeno na jejich dotazy ohledně nejasností v rámci probíraného tématu a urovnání nabytých znalostí.

#### **Ad V. Implementované kurikulum – 2**

Pro zjištění znalostí studentů bylo využito testu na základě edukačního textu vytvořeného autorkou bakalářské práce. Tento test obsahoval 13 otázek včetně dvou informativních otázek, které se týkaly formy a ročníku studia (jinak byl test zcela anonymní) a byl položen studentům oboru „Radiologický asistent“ studujících na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích. Všechny 13 otázek testu obsahovalo čtyři alternativní možnosti, u každé otázky byla pouze jedna správná odpověď. Před započítáním testu byly studentům sděleny všechny podmínky k vypracování testu. Byl vymezený přesný časový limit, po který studenti mohli test vyplňovat. Tento časový limit činil 15 minut. Za každou otázku, na kterou student odpověděl správně, mu byl přičten jeden bod, přičemž za špatně zodpovězenou otázku se bod neodečítal. Studenti byli rozesazeni do lavic po jednom, aby testování znalostí bylo objektivní.

Test byl všem zúčastněným respondentům radiologického asistenta Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích položen v tištěné formě s výjimkou studentů, kteří se nezúčastnili experimentální výuky. Tito studenti vyplňovali test vytvořený na jednom z internetových portálů. U těchto studentů se pracovalo s předpokladem jejich znalostí dané problematiky z předmětu „Radiologická fyzika 1 a 2“ vyučovaného v prvním ročníku a s předpokladem nastudování poskytnutého edukačního textu. Jejich znalosti by měli být úměrné položenému testu, jak se můžeme přesvědčit z níže uvedeného studijního plánu pro obor „Radiologický asistent“ na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.

Předmět „Radiologická fyzika 1“ se zabývá těmito okruhy:

- *základní pojmy o ionizaci, složky profilu radiologického asistenta*
- *potřebné základy diferenciálního počtu ve vazbě na přeměnový a absorpční zákon*
- *potřebné základy integrálního počtu ve vazbě na přeměnový a absorpční zákon*
- *klasická, kvantová a relativistická dimenze a dozimetrie záření - úvodní přehled*
- *polohový vektor, pohybový zákon, pohybová rovnice, kinematika, dynamika*

- *zákony zachování, harmonický pohyb kmitavý*
- *základní pojmy o vlnění, vlnová funkce, vlnová rovnice*
- *potřebné pojmy vektorového počtu a jejich aplikace ve fyzice a radiologické fyzice*
- *přechod od pohybového zákona k pohybové rovnici a přechod opačný*
- *fermiony, bosony, silná a slabá interakce, elektromagnetická a gravitační interakce*
- *vlnově korpuskulární dualismus fotonů, vlnově korpuskulární dualismus elektronů*
- *klasická fyzika, speciální teorie relativity, obecná teorie relativity a jejich místo v radiologické fyzice (IS/STAG portál. Předmět - Radiologická fyzika 1)*

Předmět „Radiologická fyzika 2“, tedy druhý semestr, se vyučuje v tomto rozsahu:

- *kmitání a vlnění v radiologické fyzice*
- *elektromagnetické pole v radiologické fyzice*
- *kvantová optika v radiologické fyzice*
- *kvantová mechanika elektronu v radiologické fyzice*
- *jaderná fyzika v radiologické fyzice*
- *zdroje ionizujícího a neionizujícího záření*
- *interakce záření s prostředím fyzikálním, chemickým a biologickým*
- *detekce a dozimetrie záření a jejich význam pro radiologickou fyziku*
- *fyzikální základy zobrazovacích metod*
- *fyzikální základy radiodiagnostiky a radioterapie – souhrn*  
(IS/STAG portál. Předmět - Radiologická fyzika 2)

Vyhodnocení edukačního testu statistickými metodami by mělo kvantifikovat úroveň znalostí respondentů dosaženou experimentální výukou. Všechny statistické metody a vzorce jsou převzaty ze zdrojů. (Anděl, 1998; Kozlovská et al., 2005; Záškodný et al., 2011; Stuchlý, 2012)

### 2.2.1 *Popis metod deskriptivní statistiky*

#### a) **Formulace statistického šetření**

Pro formulaci statistického šetření je nutno vymežit následující pojmy, které budou dále podrobněji popsány:

- |   |     |
|---|-----|
| - hromadný náhodný jev                      | HNJ |
| - statistická jednotka                      | SJ  |
| - statistický znak                          | SZ  |
| - hodnota statistického znaku               | HSZ |
| - základní statistický soubor a jeho rozsah | ZSS |
| - náhodný výběr                             | NV  |
| - výběrový statistický soubor a jeho rozsah | VSS |

**Hromadný náhodný jev** lze interpretovat jako realizaci činností nebo procesů, jejichž výsledek nelze s jistotou předpovědět. Tyto jevy se odehrávají v rozsáhlé množině prvků. Zmíněné prvky mají jednu skupinu vlastností stejných a druhou skupinu vlastností odlišných.

**Statistická jednotka** vyjadřuje jednotlivé prvky statistického souboru se stejnými vlastnostmi.

**Statistický znak** je charakterizován nějakou z odlišných vlastností prvků statistického souboru.

**Hodnota statistického znaku** kvantifikuje zkoumaný statistický znak.

**Základní statistický soubor a jeho rozsah** je určitá množina všech zkoumaných statistických jednotek vymezených jak věcně, prostorově, tak i časově. U těchto množin se zjišťují hodnoty sledovaných statistických znaků. Rozsah je dán počtem všech statistických jednotek. Z důvodu složitosti při zkoumání statistického znaku u všech statistických jednotek a práci s populačními charakteristikami je příhodné přikročit k omezení počtu statistických jednotek.

**Náhodný výběr** vymezuje počet zkoumaných statistických jednotek tak, aby bylo uskutečnitelné přenášení získaných výsledků na celý statistický soubor. Způsoby náhodného výběru jsou velice rozmanité. Lze se setkat s losováním, generováním, tabulkou náhodných čísel nebo například stratifikovaným výběrem.

**Výběrový statistický soubor a jeho rozsah** je spojován s výběrovými charakteristikami a je dán vybranými statistickými jednotkami ze základního souboru náhodným výběrem. Počet vybraných statistických jednotek se rovná rozsahu výběrového statistického souboru. Výběrový statistický soubor lze rozdělit na jednorozměrný, kdy je zkoumaný pouze jeden statistický znak a vícerozměrný, jestliže se zkoumají 2 nebo i více statistických znaků.

## b) Škálování

Škálováním rozumíme vhodné rozřazení statistických znaků prostřednictvím prvků škály, kdy se souhrn všech prvků škály nazývá škála. K vhodnému určení počtu prvků škály bylo v bakalářské práci využito Sturgesova pravidla:  $k = 1 + 3,3 \log n$ , kde  $k$  představuje počet prvků škály a  $n$  je rozsah výběrového statistického souboru. Rozlišujeme 4 typy škál, které se dělí podle povahy statistického znaku:

- **Nominální škála** – klasifikuje statistické jednotky do kategorií, kdy prvky škály představují jednotlivé kategorie. Lze rozhodnout, zda jsou statistické jednotky z hlediska zkoumaného statistického znaku totožné, nebo rozdílné.
- **Ordinální škála** – umožňuje zjistit nejen totožnost statistických jednotek, ale i jejich pořadí. Co ovšem neumožňuje je stanovení vzdálenosti mezi dvěma sousedními statistickými jednotkami uspořádanými dle této škály. Prvky škály jsou zde jednotlivá pořadí.
- **Kvantitativní metrická škála** – umožňuje již stanovit vzdálenost mezi dvěma sousedními statistickými jednotkami, ovšem je nutné stanovit jednotku a počátek škály. Počátek škály lze zvolit libovolně, není nutno mít počátek jako nulovou hodnotu. Tato kvantitativní metrická škála byla použita pro bakalářskou práci.
- **Absolutní metrická škála** – je definována jako kvantitativní metrická škála, kde lze navíc věcně interpretovat počátek škály, kdy nula škály odpovídá skutečné nulové hodnotě zkoumaného statistického znaku.

### c) Měření v deskriptivní statistice

Měření lze považovat za proces, kdy je každé z  $n$  statistických jednotek výběrového statistického souboru přiřazen jeden z  $k$  prvků škály ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ). Tímto procesem se dojde k zjištění, že prvek škály  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) byl naměřen  $n_i$  krát. Tento proces umožňuje zjistit absolutní četnosti, které vyjadřují součet všech hodnot  $n_i$ , kdy tento součet musí být roven rozsahu  $n$  výběrového statistického souboru.

Po získání absolutních četností lze vypočítat také relativní četnosti, které jsou charakterizovány jako pravděpodobnost, kdy daná situace nastane. Relativní četnosti tedy vypočteme vydělením absolutních četností  $n_i$  ku  $n$  počtu měření, který odpovídá rozsahu výběrového statistického souboru. Po součtu všech relativních četností musíme získat hodnotu 1.

Jako poslední výsledek měření lze uvést také kumulativní četnosti, které udávají pravděpodobnost, že bude naměřen výsledek měření menší nebo roven výsledku  $x_i$ . Tyto četnosti lze ovšem použít pouze u kvantitativně metrických nebo absolutních metrických škál. Kumulativní četnosti jsou definovány jako  $\sum \frac{n_i}{n}$ .

### d) Elementární statistické zpracování

Všechny výsledky měření je zapotřebí uspořádat do vhodně zvolené tabulky a vyjádřit jak graficky, tak i parametrizovat vhodnými empirickými parametry, k čemuž lze využít právě elementární statistické zpracování. Uskutečněním všech jednotlivých kroků získáme empirický obraz zkoumaného výběrového statistického souboru.

**Tabulka** disponuje osmi sloupci, kdy první čtyři z nich jsou potřebné jednak pro zpřehlednění výsledků měření, čímž splníme první úkol, kterým je uspořádání, a jednak pro znázornění empirických rozdělení, kterým splníme druhý úkol grafického vyjádření. Další čtyři sloupce jsou pomocné a slouží k snadnému a rychlému vypočtení empirických parametrů, přičemž splníme úkol parametrizace. Posledním řádkem je tabulka uzavřena součty dat v jednotlivých sloupcích, kdy v prvních čtyřech sloupcích jsou součty pouze kontrolního charakteru a v následujících čtyřech sloupcích součty slouží pro potřebné výpočty empirických parametrů.

Sloupce tabulky obsahují:

1. sloupec označený  $x_i$  – prvky škály
2. sloupec označený  $n_i$  – absolutní četnosti prvků škály
3. sloupec označený  $n_i/n$  – relativní četnosti prvků škály
4. sloupec označený  $\Sigma n_i/n$  – kumulativní četnosti prvků škály
5. sloupec se součiny  $x_i n_i$
6. sloupec se součiny  $x_i^2 n_i$
7. sloupec se součiny  $x_i^3 n_i$
8. sloupec se součiny  $x_i^4 n_i$

**Grafické zpracování** rozdělení četností je členěno na dva základní druhy. První z nich přiřazuje prvkům škály  $x_i$  odpovídající absolutní četnosti  $n_i$  nebo relativní četnosti  $n_i/n$ . Druhý pak přiřazuje prvkům škály  $x_i$  odpovídající kumulativní četnosti  $\sum \frac{n_i}{n}$ . Pro zobrazení empirického rozdělení četností je využíváno souřadnicového systému, kdy na vodorovnou osu jsou vždy vynášeny prvky škály  $x_i$  a na svislou osu odpovídající četnosti (ať již absolutní, relativní nebo kumulativní). Funkční závislost grafického vyjádření je dána množinou bodů, jejichž souřadnicemi jsou příslušný prvek škály na ose  $x$  a odpovídající četnost na ose  $y$ . Spojením všech vynesných bodů vznikne křivka, kterou nazýváme „polygon“. Polygonu je přisuzován přívlastek podle toho jaké četnosti představuje – „polygon absolutních četností“, „polygon relativních četností“ a „polygon kumulativních četností“.

**Empirické parametry** vyjadřují charakter zkoumaného statistického souboru. Jelikož jsou empirické parametry často spojovány s výběrovým statistickým souborem, jsou pojmenovávány i jako „výběrové parametry“. Empirické parametry se dělí na parametr polohy, parametr variability, parametr šikmosti a parametr špičatosti dle toho, jaký rys zkoumaného statistického souboru vyjadřují. Všechny tyto parametry byly využity i pro potřeby této bakalářské práce.

- **Parametr polohy** (aritmetický průměr, obecný moment prvního řádu  $O_1$ ).

$$O_1(x) = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum n_i x_i$$

- **Parametr variability** (empirický rozptyl, centrální moment druhého řádu  $C_2$ ) – z empirického rozptylu pak lze vypočítat směrodatnou odchylku jako její druhou odmocninu.

$$C_2(x) = \frac{1}{n} \sum n_i(x_i - x)^2 = O_2(x) - [O_1(x)]^2$$

**Směrodatná odchylka**  $S_x = \sqrt{C_2(x)}$

- **Parametr šikmosti** (koeficient šikmosti, normovaný moment třetího řádu  $N_3$ ) – pokud je koeficient šikmosti kladný, budou mít prvky škály ležící vlevo od aritmetického průměru vyšší četnosti a naopak.

$$N_3 = \frac{C_3(x)}{C_2(x)\sqrt{C_2(x)}}$$

$C_3$  vyjadřuje centrální moment třetího řádu a je vyjádřen vzorcem:

$$C_3(x) = \frac{1}{n} \sum n_i(x_i - x)^3 = O_3(x) - 3 \cdot O_2(x) \cdot O_1(x) + 2 \cdot [O_1(x)]^3$$

- **Parametr špičatosti** (koeficient špičatosti, normovaný moment čtvrtého řádu  $N_4$ ) – vyšší hodnota koeficientu špičatosti odpovídá špičatějšímu rozdělení četností při daném rozptylu, ploššímu rozdělení pak odpovídá hodnota nižší. Rovněž se používána veličina zvaná „exces“, kterou lze definovat vztahem  $N_4 - 3$ . Tato veličina srovnává špičatost empirického rozdělení se špičatostí známého, normovaného normálního rozdělení. Pokud vyjde exces jako kladná hodnota, je empirické rozdělení špičatější než toto rozdělení a naopak.

$$N_4 = \frac{C_4(x)}{[C_2(x)]^2}$$

$C_4$  vyjadřuje centrální moment čtvrtého řádu:  $C_4(x) = \frac{1}{n} \sum n_i(x_i - x)^4 = O_4(x) - 4 \cdot O_3(x) \cdot O_1(x) + 6 \cdot O_2(x) \cdot [O_1(x)]^2 - 3 \cdot [O_1(x)]^4$ .

### 2.2.2 Popis metod matematické statistiky

**Neparametrické testování neboli testování neparametrických hypotéz (aplikováno v předložené práci)** je charakterizováno jako přiřazení teoretického rozdělení empirickému rozdělení. Významem tohoto testování je pak především to, že po přiřazení teoretického rozdělení empirickému rozdělení lze získat relativně jednoduchým matematickým aparátem jinak nedostupné informace. Za základ testování neparametrických hypotéz je považováno použití nulových hypotéz  $H_0$  a alternativních



hypotéz  $H_1$ , kdy nulová hypotéza vzniká za předpokladu, že empirické rozdělení lze nahradit zamýšleným teoretickým rozdělením. U alternativní hypotézy je to právě naopak, alternativní hypotéza předpokládá, že empirické rozdělení nelze nahradit zamýšleným teoretickým rozdělením. Tyto hypotézy jsou dány na předem zvolené hladině významnosti  $\alpha$ , nejčastěji  $\alpha = 0,01$  nebo  $\alpha = 0,05$  (v bakalářské práci bylo využito hladiny významnosti  $\alpha = 0,05$ ). Pro neparametrické, ale i parametrické testování hypotéz byla vytvořena speciální skupina teoretických rozdělení, která slouží jako testová kritéria. Nejpoužívanější testová kritéria jsou: normované normální rozdělení (u - test), Studentovo rozdělení (t - test), Pearsonovo  $\chi^2$  rozdělení ( $\chi^2$  – test dobré shody) a Fisherovo – Snedecorovo rozdělení (F - test). Pro všechna tato testová kritéria jsou zpracovány podrobné statistické tabulky. V bakalářské práci bylo využito Pearsonovo  $\chi^2$  rozdělení ( $\chi^2$  – test dobré shody).

**Pearsonovo  $\chi^2$  rozdělení ( $\chi^2$  – test dobré shody)** klade za podmínku při intervalovém rozdělení četností (také při bodovém rozdělení četností), aby většina dílčích intervalů měl absolutní četnost rovnu alespoň 5. Pokud tato podmínka nebude splněna, musí dojít ke sloučení dílčích intervalů, aby byla dosažena alespoň tato hodnota. Dalším důležitým krokem je určení experimentální hodnoty daného kritéria  $\chi_{exp}^2$  a kritické teoretické hodnoty  $\chi_{teor}^2$ . Dále za pomoci kritické teoretické hodnoty bude zapsán kritický obor  $W$  pro příslušné testové kritérium. Jako poslední krok je považováno zamítnutí/přijetí nulové nebo alternativní hypotézy. Jestliže bude experimentální hodnota vybraného testového kritéria náležet prvku kritického oboru  $W$ , je nezbytností přijmout alternativní hypotézu  $H_1$ . Pak dojdeme k výsledku, že empirické rozdělení nelze nahradit zamýšleným teoretickým rozdělením. Výsledku, že empirické rozdělení lze nahradit zamýšleným teoretickým rozdělením, dosáhneme, pokud experimentální hodnota vybraného kritéria nebude ležet v kritickém oboru  $W$ .

Výpočet pro **experimentální hodnotu  $\chi^2$  – testu**:

$$\chi_{exp}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

Zde  $n_i$  představuje absolutní četnosti prvků,  $n$  rozsah výběrového statistického souboru a  $p_i$  pravděpodobnost hledaných ploch pod křivkou a je spojena s rozdílem hodnot distribuční funkce  $F(x)$  normálního rozdělení.

Základem pro zjištění ploch jsou plochy pod Gaussovou křivkou hledaného normálního rozdělení. Jako pomůcku lze použít plochy pod Gaussovou křivkou odpovídající normovanému normálnímu rozdělení (možno nalézt s použitím statistických tabulek). Plochy úzce souvisejí s distribuční funkcí normálního rozdělení a s distribuční funkcí normovaného normálního rozdělení tzv. Laplaceovou funkcí.

Distribuční funkce normálního rozdělení odpovídá vztahu

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \rho(x) dx.$$

Distribuční funkce normovaného normálního rozdělení (Laplaceova funkce  $F$ ) je závislá na normované náhodné veličině s hodnotami  $u_i$ , které odpovídají horní mezi  $x_i$  příslušného intervalu intervalového rozdělení četností. Je určena vztahem:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \rho(u) du \rightarrow u_i = \frac{x_i - O_1}{S_x}$$

$O_1$  = obecný moment prvního řádu,  $S_x$  = směrodatná odchylka

K výsledným hodnotám je nutné pro každé  $u_i$  vyhledat příslušnou hodnotu vycházející ze statistických tabulek. Jestliže je hodnota  $u_i$  záporná, určíme tuto hodnotu tak, že ji odečteme od čísla 1.

Dalším krokem je výpočet pravděpodobnostní funkce, který provedeme pomocí vzorce  $p_i = F(u_i) - F(u_{i-1})$ .

Posledním podstatným krokem pro výpočet experimentální hodnoty normálního rozdělení je výpočet teoretického absolutního rozdělení četností  $np_i$ .

Všechny výše uvedené dílčí kroky nám umožní získat experimentální hodnotu  $\chi^2$  – testu s použitím výše uvedeného vztahu.

Vztah pro **teoretickou hodnotu**:  $\chi_{\text{teor}}^2 = \chi_{k-r-1}^2 = \chi_v^2$ , kde výraz  $v = k - r - 1$  udává počet stupňů volnosti a společně s určenou hladinou významnosti  $\alpha$  umožňují určit pomocí statistických tabulek kritickou teoretickou hodnotu.

Prostřednictvím kritické teoretické hodnoty lze již zapsat **kritický obor W**, který bude mít pro danou hladinu významnosti  $\alpha = 0,05$  následující podobu:  $W = (\chi_v^2(0,05); \infty)$ .

**Parametrické testování (nebude v práci aplikováno)** je založeno na předpokladu o charakteru rozdělení statistického znaku a zabývá se výhradně hodnotami jednoho či několika parametrů určitého rozdělení, kterým může být například střední hodnota či rozptyly. Vychází, stejně jako testování neparametrické, z aparátu nulové a alternativní hypotézy ( $H_0$  a  $H_1$ ) doplněné obvyklým aparátem kritického oboru W. Předpokladem pro toto testování je, že nejvhodnější bude empirickému rozdělení přiřadit teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu. Parametrické testování lze rozdělit na dvě základní složky – jednovýběrové a dvouvýběrové parametrické testování.

**Teorie odhadů (nebude v práci aplikováno)** navazuje na neparametrické testování, kdy teoretické rozdělení, které je přiřazeno empirickému rozdělení četností, obsahuje dosud neznámé hodnoty teoretických parametrů. Nejdříve je důležité potřebné teoretické parametry odhadnout a až poté je možné přistoupit k zpracování dosažených výsledků neparametrickým testováním za použití diferenciálního a integrálního počtu. Odhadnout teoretické parametry jde dvěma způsoby – bodovými odhady nebo intervalovými odhady.

**Měření statistických závislostí (nebude v práci aplikováno)** se od předešlých zmíněných metod liší počtem zkoumaných statistických znaků. Zabývá se vícerozměrným výběrovým souborem, kdy u statistických jednotek bude souběžně zkoumáno více statistických znaků. Je zkoumána např. jednoduchá lineární a kvadratická regresní analýza, případně jednoduchá lineární a kvadratická korelační analýza.

## **Charakteristika zkoumaného statistického souboru**

Pro statistické šetření byli osloveni studenti oboru „Radiologický asistent“ studujících na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích. Počet studentů studujících tento obor v akademickém roce 2015/2016 plně postačoval pro dosažení dostatečného počtu statistických jednotek, které byly nutné k uskutečnění statistického šetření.

Studentům, kteří se zúčastnili přednášky vedené autorkou bakalářské práce, byl navíc k přednášce poskytnut edukační text v elektronické formě o dané problematice. Ostatním studentům, kteří se přednášky nezúčastnili, byl také poskytnut edukační text v elektronické formě, ale více se braly v úvahu jejich již získané znalosti z vyučovaného předmětu „Radiologická fyzika 1 a 2“.

Do statistického souboru se řadí 8 studentů prvního ročníku, 15 studentů druhého ročníku a 12 studentů třetího ročníku. Z těchto studentů studuje 20 studentů prezenční formu studia a 15 studentů kombinovanou formu studia. Celkem se tedy zúčastnilo 35 respondentů.

## **3 Výsledky**

### **3.1 Konceptuální kurikulum**

Klasická elektromagnetická dimenze magnetické rezonance vychází zejména z Maxwellových rovnic elektromagnetického pole. Pro správný popis Maxwellových rovnic bylo zapotřebí definovat následující matematické operátory: divergenci, rotaci a Laplaceův operátor. Jako sdělitelný vědecký systém v oblasti fyzikálních základů klasické elektromagnetické podstaty magnetické rezonance je možné uvést vymezení vhodného odvození, že se elektromagnetické pole šíří ve vakuu jako elektromagnetická vlna. Pro odvození byla použita především obecná vlnová rovnice, která byla odvozována pro vakuum z Maxwellových rovnic pro každou složku elektromagnetického pole zvlášť. Ze získaných rovnic a prostřednictvím poznatku, že se elektromagnetické vlnění šíří rychlostí světla, lze použitím již zavedených matematických operátorů doložit tvrzení - elektromagnetické pole se šíří jako elektromagnetická vlna.

### **3.2 Zamýšlené kurikulum**

Zamýšlené kurikulum jako transformace konceptuálního kurikula na potřeby a možnosti adresátů vymezuje přiměřením fyzikálních základů elektromagnetické podstaty magnetické rezonance vhodnou sdělitelnou formou potřebám a možnostem radiologických asistentů.

### **3.3 Projektové kurikulum**

Vzhledem k transformaci zamýšleného kurikula (tj. fyzikálních základů elektromagnetické podstaty magnetické rezonance přiměřeným potřebám a možnostem adresátů edukace) bylo umožněno vytvoření zjednodušeného edukačního textu, který odpovídá potřebám a možnostem studentů oboru „Radiologický asistent“ a studentům příbuzných studijních programů jako studijní materiál k výuce. Tento text je uveden v Příloze 1.

### 3.4 *Implementované kurikulum – 1*

Implementované kurikulum – 1 (příprava autorky na experimentální výuku) byla uskutečněna především přípravou edukačního testu a PowerPointové prezentace, která studentům zjednodušeně nastínila základy probírané látky a umožnila těmto studentům lepší pochopení dané problematiky. Edukační test je uveden v Příloze 2.

### 3.5 *Implementované kurikulum – 2*

Implementované kurikulum – 2 je spjato se znalostmi radiologických asistentů po absolvování experimentální výuky a nabyté znalosti se odráží ve výsledcích edukačních testů, které je nutné dále statistickým šetřením zpracovat. Všechny potřebné metody pro zpracování statistického šetření byly již uvedeny v kapitole „Metodika výzkumu“, tudíž se jimi autorka dále nebude podrobně zabývat a bude se již věnovat výhradně dosaženým výsledkům.

#### a) **Formulace statistického šetření**

- **Hromadný náhodný jev:** měření znalostí studentů oboru Radiologický asistent, studujících Jihočeskou univerzitu v Českých Budějovicích.
- **Statistická jednotka:** student.
- **Statistický znak:** rozsah znalostí.
- **Hodnota statistického znaku:** rozsah znalostí studenta vyjádřený počtem získaných bodů v testu.
- **Základní statistický soubor:** 35 studentů.
- **Výběrový statistický soubor:** 35 studentů.

#### b) **Škálování**

Bylo provedeno 35 měření, z nichž dosažené počty bodů odpovídají intervalu  $\langle 1;11 \rangle$ . Pro toto statistické šetření byla zvolena kvantitativní metrická škála a Sturgesovým pravidlem byla měření rozdělena na 6 dílčích škál:  $\langle -\infty;1 \rangle$ ,  $\langle 2;3 \rangle$ ,  $\langle 4;5 \rangle$ ,  $\langle 6;7 \rangle$ ,  $\langle 8;9 \rangle$ ,  $\langle 10;\infty \rangle$ .

Sturgesovo pravidlo:

$$k = 1 + 3,3 \log n$$

$$k = 1 + 3,3 \log 35 = 1 + 3,3 \cdot 1,544$$

$$k = 6,0954 \doteq 6$$

c) **Elementární statistické zpracování**

**Tabulka 1. Tabulka elementárního statistického zpracování**

$x_i$	interval	stř. int.	$n_i$	$\Sigma n_i$	$n_i/n$	$\Sigma n_i/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
1	$(-\infty; 1>$	1	3	3	0,086	0,086	3	3	3	3
2	$< 2; 3>$	2,5	5	8	0,143	0,229	12,5	31,25	78,125	195,313
3	$< 4; 5>$	4,5	10	18	0,286	0,514	45	202,5	911,25	4100,625
4	$< 6; 7>$	6,5	10	28	0,286	0,8	65	422,5	2746,25	17850,625
5	$< 8; 9>$	8,5	6	34	0,171	0,971	51	433,5	3684,75	31320,375
6	$< 10; \infty)$	11	1	35	0,029	1	11	121	1331	14641
<b><math>\Sigma</math></b>			<b>35</b>		<b>1</b>		<b>187,5</b>	<b>1213,75</b>	<b>8754,38</b>	<b>68110,938</b>

Zdroj: vlastní zpracování



**Obrázek 1: Empirické rozdělení absolutních četností**

Zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 2: Empirické rozdělení relativních četností

Zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 3: Empirické rozdělení kumulativních relativních četností

Zdroj: vlastní zpracování

## Empirické parametry

### 1) Parametr polohy

$$O_1 = \frac{1}{n} \sum n_i x_i = \frac{187,5}{35} = 5,357$$

### 2) Parametry variability

$$O_2 = \frac{1}{n} \sum n_i x_i^2 = \frac{1213,75}{35} = 34,679$$

$$C_2(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - O_1)^2 = O_2(x) - [O_1(x)]^2 = 34,679 - 28,699 = 5,98$$

$$S_x = \sqrt{C_2(x)} = 2,445$$



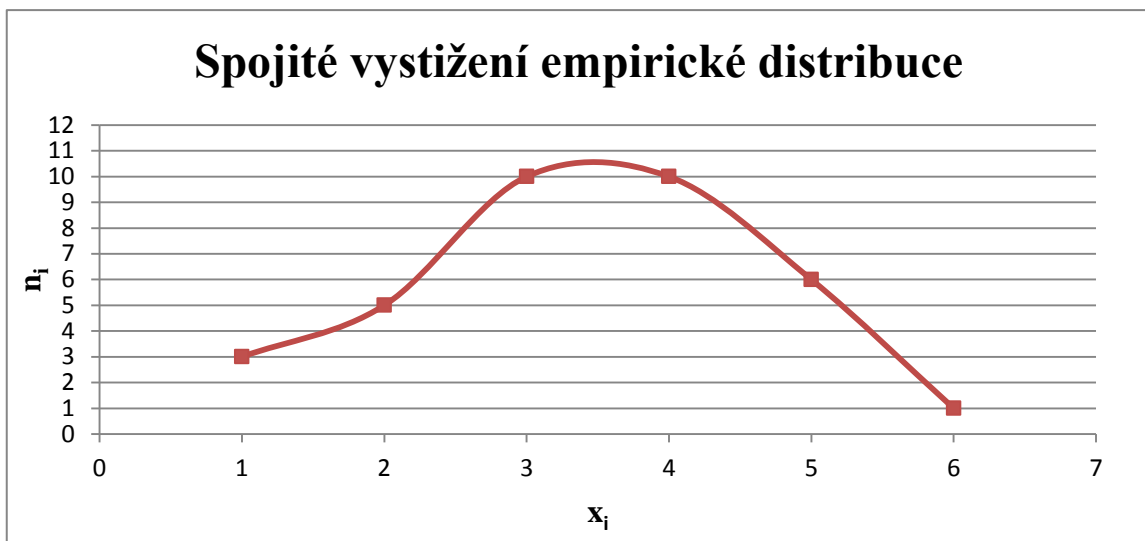
### 3) Parametry šikmosti

$$O_3 = \frac{1}{n} \sum n_i x_i^3 = \frac{8754,38}{35} = 250,125$$
$$C_3(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - O_1)^3 = O_3(x) - 3 \cdot O_2(x) \cdot O_1(x) + 2 \cdot [O_1(x)]^3 =$$
$$= 250,125 - 557,334 + 307,489 = 0,28$$
$$N_3(x) = \frac{C_3(x)}{C_2(x) \sqrt{C_2(x)}} = \frac{0,28}{14,622} = 0,019$$

### 4) Parametry špičatosti

$$O_4 = \frac{1}{n} \sum n_i x_i^4 = \frac{68110,938}{35} = 1946,027$$
$$C_4(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - O_1)^4 = O_4(x) - 4 \cdot O_3(x) \cdot O_1(x) + 6 \cdot O_2(x) \cdot [O_1(x)]^2$$
$$- 3 \cdot [O_1(x)]^4 = 1946,027 - 5359,821 + 5971,438 - 2470,894$$
$$= 86,749$$
$$N_4(x) = \frac{C_4(x)}{[C_2(x)]^2} = \frac{86,749}{35,756} = 2,426$$

$$\text{Exces} = N_4 - 3 = 2,426 - 3 = -0,574$$



Obrázek 4: Spojité vystižení empirické distribuce

Zdroj: vlastní zpracování

### d) Neparametrické testování – Pearsonův $\chi^2$ – test dobré shody

Vzorec pro experimentální hodnotu Pearsonova  $\chi^2$  - testu:

$$\chi_{exp}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

Z již uvedené tabulky (tab. 1) bylo zapotřebí pro přehlednější zpracování vyloučit nepotřebné hodnoty, čímž vznikla následující tabulka (tab. 2).

**Tabulka 2. Tabulka potřebných hodnot pro neparametrické testování**

$x_i$	interval	střední interval	$n_i$
1	$(-\infty; 1>$	0	3
2	$< 2; 3>$	2,5	5
3	$< 4; 5>$	4,5	10
4	$< 6; 7>$	6,5	10
5	$< 8; 9>$	8,5	6
6	$< 10; \infty)$	11	1
$\Sigma$			35

*Zdroj: vlastní zpracování*

### 5) Stanovení nulové a alternativní hypotézy $H_0$ a $H_1$

$H_0$ : Empirické rozdělení četností lze nahradit Gaussovým normálním rozdělením.

$H_1$ : Empirické rozdělení četností nelze nahradit Gaussovým normálním rozdělením.

### 6) Výpočet normovaných hodnot $u_i$ dle vzorce

$$u_i = \frac{x_i - O_1}{S_x}$$

$$u_1 = \frac{1 - 5,357}{2,445} = -1,782$$

$$u_2 = \frac{3 - 5,357}{2,445} = -0,964$$

$$u_3 = \frac{5 - 5,357}{2,445} = -0,146$$

$$u_4 = \frac{7 - 5,357}{2,445} = 0,672$$

$$u_5 = \frac{9 - 5,357}{2,445} = 1,49$$

$$u_6 = \frac{\infty - 5,357}{2,445} = \infty$$

**7) Vyhledané hodnoty pro určité  $u_i$  ze statistických tabulek**

$$u_1 = 1 - 0,96246 = 0,038$$

$$u_2 = 1 - 0,83147 = 0,169$$

$$u_3 = 1 - 0,55567 = 0,444$$

$$u_4 = 0,749$$

$$u_5 = 0,932$$

$$u_6 = 1$$

**8) Výpočet pravděpodobnostní funkce  $p_i$  dle uvedeného vzorce**

$$p_i = F(u_i) - F(u_{i-1})$$

$$p_1 = F(u_1) = 0,038$$

$$p_2 = F(u_2) - F(u_1) = 0,169 - 0,038 = 0,131$$

$$p_3 = F(u_3) - F(u_2) = 0,444 - 0,169 = 0,276$$

$$p_4 = F(u_4) - F(u_3) = 0,749 - 0,444 = 0,304$$

$$p_5 = F(u_5) - F(u_4) = 0,932 - 0,749 = 0,183$$

$$p_6 = F(u_6) - F(u_5) = 1 - 0,932 = 0,068$$

**9) Výpočet teoretického absolutního rozdělení četností  $np_i$**

$$np_1 = 35 \cdot 0,038 = 1,314$$

$$np_2 = 35 \cdot 0,131 = 4,585$$

$$np_3 = 35 \cdot 0,276 = 9,653$$

$$np_4 = 35 \cdot 0,304 = 10,648$$

$$np_5 = 35 \cdot 0,183 = 6,416$$

$$np_6 = 35 \cdot 0,068 = 2,384$$

**10) Sloučení intervalů s absolutními četnostmi  $n_i < 5$**

$$np_{1+2} = np_1 + np_2 = 1,314 + 4,585 = 5,899$$

$$np_{5+6} = np_5 + np_6 = 6,416 + 2,384 = 8,8$$

## 11) Výpočet experimentální hodnoty Pearsonova $\chi^2$ - testu $\chi_{exp}^2$

Tabulka 3. Přehled výpočtů Pearsonova  $\chi^2$  - testu dobré shody

$x_i$	interval	střední interval	$n_i$	$p_i$	$np_i$
1	$(-\infty; 1>$	0	3	0,038	1,314
2	$<2; 3>$	2,5	5	0,131	4,585
3	$<4; 5>$	4,5	10	0,276	9,653
4	$<6; 7>$	6,5	10	0,304	10,648
5	$<8; 9>$	8,5	6	0,183	6,416
6	$<10; \infty)$	11	1	0,068	2,384

Zdroj: vlastní zpracování

Z výše uvedené tabulky (tab. 3) lze zjistit, že ne v každé škále je absolutní četnost větší nebo rovna 5, což je základem ke splnění podmínky Pearsonova  $\chi^2$  - testu. Proto je zapotřebí sloučit škálu  $x_1$  a  $x_2$  do jedné a obdobně naložit i se škálami  $x_5$  a  $x_6$  (tab. 4). Tímto krokem podmínku ke splnění Pearsonova  $\chi^2$  - testu splníme.

Tabulka 4. Tabulka s výpočty splňující podmínky Pearsonova  $\chi^2$  - testu

$x_i$	interval	$np_i$	$(n_i - np_i)^2$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1+2	$(-\infty; 3>$	5,899	4,416	0,749
3	$<4; 5>$	9,653	0,12	0,012
4	$<6; 7>$	10,648	0,42	0,039
5+6	$<8; \infty)$	8,8	3,24	0,368

Zdroj: vlastní zpracování

$$\chi_{exp}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

$$\chi_{exp}^2 = \frac{(n_{1,2} - np_{1,2})^2}{np_{1,2}} + \frac{(n_3 - np_3)^2}{np_3} + \frac{(n_4 - np_4)^2}{np_4} + \frac{(n_{5,6} - np_{5,6})^2}{np_{5,6}}$$

$$\chi_{exp}^2 = \frac{4,416}{5,899} + \frac{0,12}{9,653} + \frac{0,42}{10,648} + \frac{3,24}{8,8}$$

$$\chi_{exp}^2 = 0,749 + 0,012 + 0,039 + 0,368$$

$$\chi_{exp}^2 = 1,169$$

12) Zjištění teoretické hodnoty Pearsnova  $\chi^2$ -testu  $\chi_{teor}^2$

$$\chi_{teor}^2 = \chi_v^2 = \chi_{k-r-1}^2 = \chi_{4-2-1}^2 = \chi_1^2 \rightarrow \chi_1^2 = 3,84 \text{ pro } \alpha = 0,05$$

13) Sestavení intervalu spolehlivosti na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$

$$W \in \langle \chi_{k-r-1}^2(\alpha); +\infty \rangle \rightarrow W \in \langle 3,84; +\infty \rangle$$

14) Přijetí nulové hypotézy  $H_0$ , zamítnutí alternativní hypotézy  $H_1$

$$\chi_{exp}^2 = 2,156 \notin W \in \langle 3,84; +\infty \rangle \rightarrow H_0 \text{ platí, } H_1 \text{ je zamítnuta.}$$

**Vypočtenou experimentální hodnotu  $\chi_{exp}^2$  nelze zařadit do kritického oboru, tudíž je možné přijmout nulovou hypotézu  $H_0$  a empirické rozdělení četností lze nahradit Gaussovým teoretickým rozdělením.**

## 4 Diskuze

### 4.1 Diskuze ověřování hypotéz

Koncept bakalářské práce se odrážel od dvou následujících hypotéz:

- 1) Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných oborů.
- 2) Rozdělení znalostí respondentů bude mít teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu.

Díky aplikaci teorie kurikulárního procesu byl vytvořen edukační text přiměřený znalostem studentů oboru „Radiologický asistent“, v němž byly shrnuty všechny důležité základní fyzikální poznatky o elektromagnetické podstatě magnetické rezonance. Můžeme tedy konstatovat, že první hypotéza byla naplněna v celém jejím rozsahu.

Z dosažených výsledků lze zhodnotit, že edukační text byl zcela přiměřen znalostem studentů oboru „Radiologický asistent“. To vyplývá z druhé z uvedených hypotéz, ve znění: „*Rozdělení znalostí respondentů bude mít teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu*“, toto tvrzení se zcela slučuje s výsledky statistického šetření. Empiricky naměřené znalosti studentů vykazují rozdělení blízké Gaussovu (normálnímu) teoretickému rozdělení a lze je nahradit Gaussovou křivkou (obr. 4), která vyjadřuje právě normální spojité rozdělení. Za normální rozdělení znalostí lze považovat, jestliže pravděpodobnost průměrných výsledků bude nejvyšší. Nižší a vyšší bodové výsledky než jsou průměrné, budou spojeny s pravděpodobnostmi nižšími.

Domněnku, že jde skutečně o normální rozdělení znalostí studentů, potvrdil výpočet parametru špičatosti  $N_4$  a excesu. Výsledná hodnota parametru špičatosti a excesu byla jen mírně pod hodnotu ideální Gaussovy křivky a vyjadřovala rovnoměrnější špičatost zjištěného empirického rozdělení, tedy křivka byla plošší.

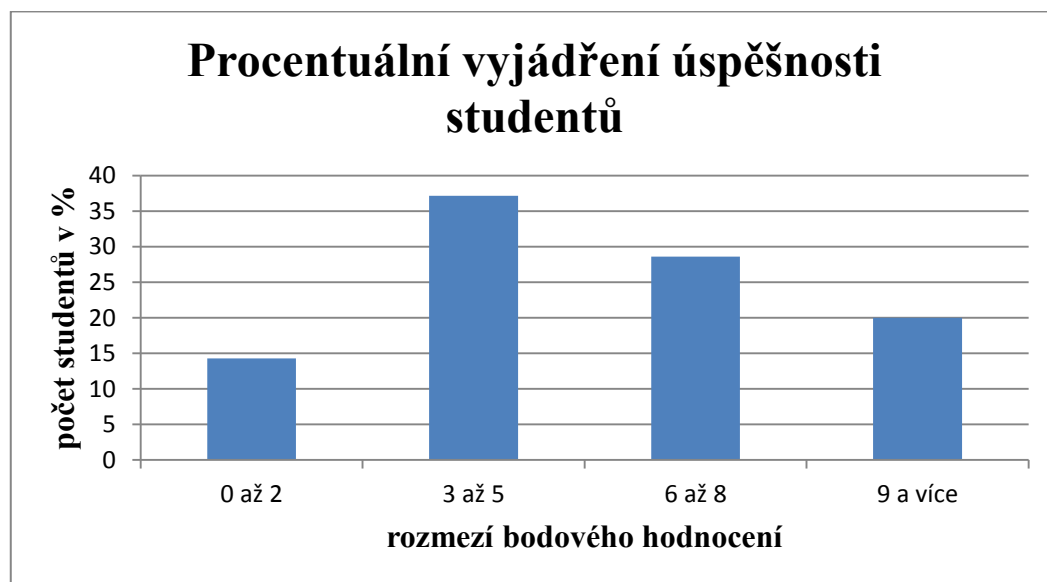
Hypotéza o nahrazení empirického rozdělení četností Gaussovým teoretickým rozdělením byla potvrzena aparátem neparametrického testování. V jeho rámci bylo užito Pearsonova  $\chi^2$  – testu dobré shody na zvolené hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Experimentální hodnota testového kritéria nebyla prvkem kritického oboru, byla přijata

nulová hypotéza  $H_0$  (empirické rozdělení četností lze nahradit Gaussovým teoretickým rozdělením) a zamítnuta alternativní hypotéza  $H_1$ .

#### 4.2 Diskuze dosažených výsledků

Z dosažených výsledků vyplývá, že znalosti oslovených studentů byly průměrné. Bodové rozpětí znalostí studentů bylo vysoké. Z maximálního počtu 13 bodů bylo dosaženo osmi studenty maximálně čtyř bodů, z nichž tři dosáhli bodového přídělu pouze jednoho bodu, což je dost podprůměrný výsledek. Nejlepšího výsledku dosáhl pouze jeden z respondentů, kterému se povedlo získat z edukačního testu 11 bodů. Zbývající respondenti se pohybovali v mezích normality.

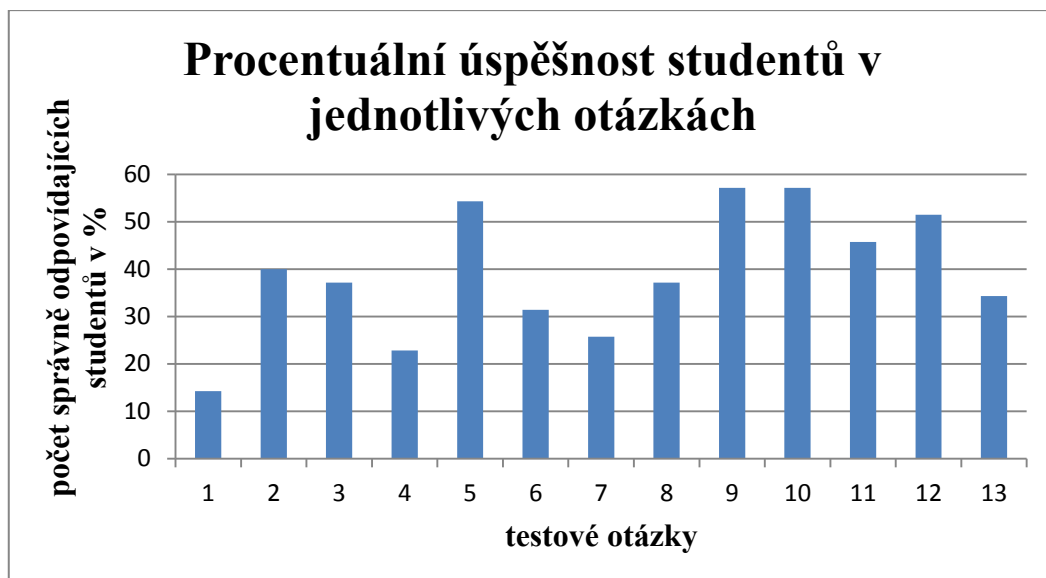
Pouze u 20 % studentů dosáhlo jejich bodové ohodnocení hranice 9 a více bodů, které odpovídá 70% úspěšnosti a vyšší z maximálního možného přídělu 13 bodů (obr. 5). O tomto faktu je možné se přesvědčit u níže uvedeného grafického zpracování. Touto hranicí by také pouze již zmíněných 20 % studentů uspělo u zkoušky na vysoké škole, kde je právě 70% úspěšnost hraniční k úspěšnému složení zkoušky.



Obrázek 5: Procentuální vyjádření úspěšnosti studentů

Zdroj: vlastní zpracování

Pro navržení zkvalitnění výuky bylo provedeno procentuální vyjádření úspěšnosti studentů v jednotlivých otázkách (obr. 6).



**Obrázek 6: Procentuální úspěšnost studentů v jednotlivých otázkách**

*Zdroj: vlastní zpracování*

Výčet otázek s nejnižší procentuální úspěšností v podstatě odpovídá návrhům na oblasti, u kterých by bylo zapotřebí zlepšit přípravu radiologických asistentů jak z hlediska matematického, tak i fyzikálního hlediska.

Nejvyšší procentuální úspěšnosti dosáhli studenti u těchto otázek:

- 5) Elektromagnetická vlna má dvě neoddělitelné složky (viz příslušné alternativy).
- 9) Proton (s protony je spojena frekvence Larmorovy precese během absorpce a emise fotonu) je (viz příslušné alternativy).
- 10) Pro magnetickou rezonanci se využívá následující druh elektromagnetického záření (viz příslušné alternativy).
- 11) Foton (s fotony je spojena rezonanční frekvence elektromagnetických impulsů během magnetické rezonance) je (viz příslušné alternativy).
- 12) Pro klasickou dimenzi magnetické rezonance se využívá (viz příslušné alternativy).

Nejnižší znalosti studenti projevili u otázek:

- 1) Jaká teorie elektromagnetického pole umožňuje popsat klasickou dimenzi magnetické rezonance (viz příslušné alternativy)?
- 4) Zřídlo silového pole je obecně popisováno (viz příslušné alternativy).
- 6) Elektromagnetická vlna se ve vakuu šíří (viz příslušné alternativy).

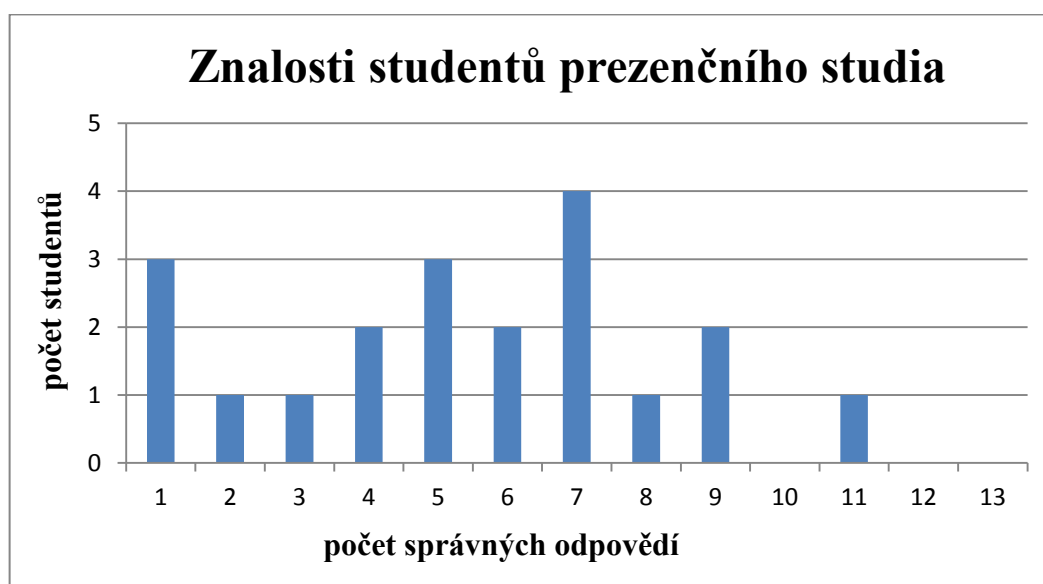


7) Elektromagnetické pole se šíří ve vzduchu jako elektromagnetická vlna (viz příslušné alternativy).

13) K rezonanci dochází, jestliže (viz příslušné alternativy).

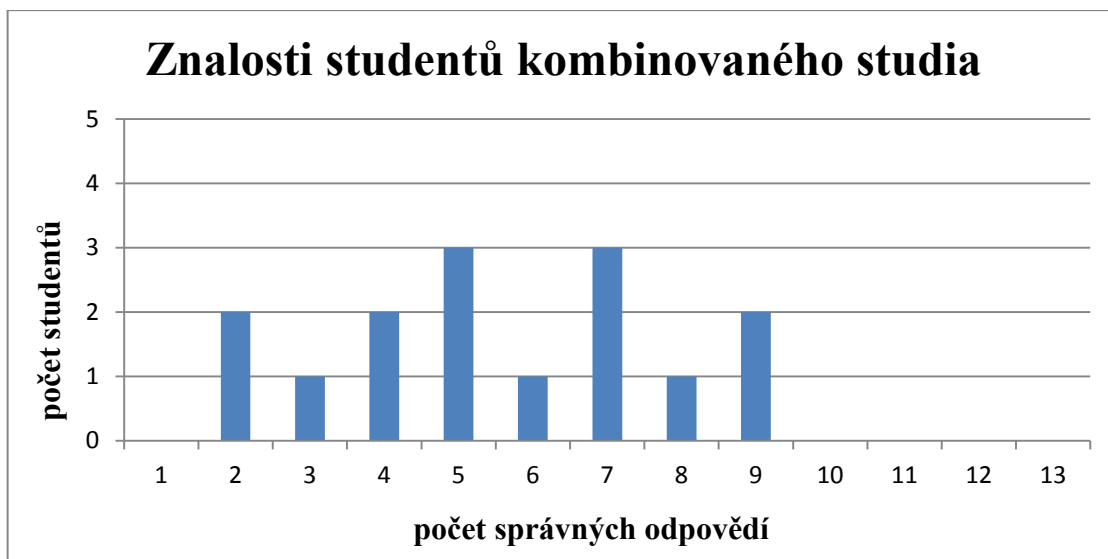
Na problematiku výše zmíněných otázek by bylo dobré klást při výuce větší důraz. Jak je možno vidět na grafickém znázornění, studenti tuto problematiku zcela neovládají. Bylo by dobré zaměřit se na klasickou dimenzi nestatistické fyziky, zejména pak na nestacionární teorii elektromagnetického pole, která je v rámci radiologie základním kamenem pro pochopení klasické dimenze magnetické rezonance a popisu elektromagnetický vln. Je ovšem nutno podotknout že ještě více než 60% studentů bude ve třetím ročníku absolvovat předmět zvaný „Zobrazení magnetickou rezonancí“, ve kterém jim bude znovu podrobněji popsán princip magnetické rezonance.

Pro zajímavost autorka bakalářské práce navíc provedla grafické porovnání studentů kombinovaného a prezenčního studia (obr. 7 a 8). Proto byla zvolena doplňující hypotéza: „Znalosti studentů u prezenční a kombinované formy studia se nijak výrazně neliší.“



Obrázek 7: Znalosti studentů prezenčního studia

Zdroj: vlastní zpracování



**Obrázek 8: Znalosti studentů kombinovaného studia**

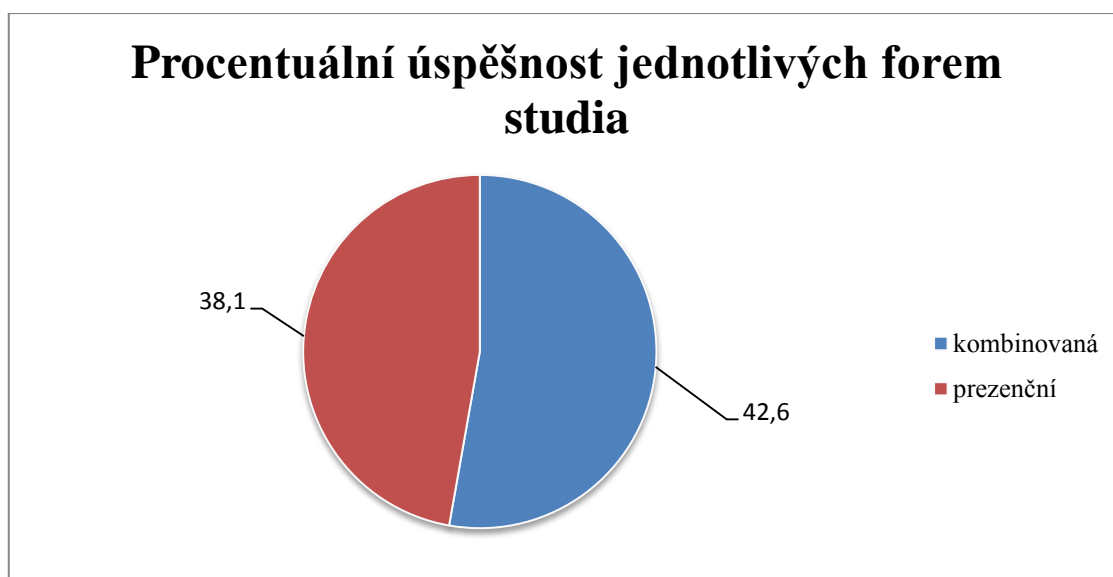
*Zdroj: vlastní zpracování*

**Tabulka 5. Pomocná tabulka k porovnání znalostí obou forem studia**

Studium	Maximální možný počet správných odpovědí	Počet správných odpovědí	%
Kombinované	195	83	42,6
Prezenční	260	99	38,1

*Zdroj: vlastní zpracování*

Za pomoci výše uvedené tabulky (tab. 5) bylo možno graficky znázornit znalosti studentů jednotlivých forem studia (kombinované a prezenční) v procentech (obr. 9).



**Obrázek 9: Procentuální úspěšnost jednotlivých forem studia**

*Zdroj: vlastní zpracování*

Při grafickém porovnání znalostí studentů kombinovaného a prezenčního studia autorka bakalářské práce dospěla k závěru, že se znalosti obou forem studia nijak výrazně neliší. Mírně vyšší procentuálně znázorněné znalosti prokázali studenti kombinované formy studia a to přesně o 4,5 %. Přestože kombinované studium dosáhlo o něco lepších výsledků, nejlepšího výsledku však dosáhl student z prezenčního studia, který získal 11 bodů. Nejlepší student kombinovaného studia dosáhl o něco horšího výsledku (9 bodů).

Jak dále můžeme vidět, u studentů kombinované formy studia jsou znalosti vyrovnanější, jelikož se všichni respondenti zařadili do bodového rozmezí 2 - 9 bodů. U studentů prezenční formy studia nejsou znalosti tak rovnoměrně rozděleny jako u kombinovaného studia. Studenti odpovídali v bodovém rozmezí 1 - 11 správných odpovědí, čímž téměř pokryly celou bodovou stupnici možných získaných bodů.

Mírnější náskok znalostí u kombinovaného studia může být zapříčiněn hlavně tím, že většina studentů již pracuje v oboru a mohli si více osvojit získané znalosti v praxi. Ovšem na druhou stranu může být výsledek i překvapivý zejména z hlediska, že respondenti prezenční formy studia absolvují více dotovaných hodin předmětu „Radiologická fyzika 1 a 2“ a může jim být daná problematika podrobněji vysvětlena.

Zvolená doplňující hypotéza („Znalosti studentů u prezenční a kombinované formy studia se nijak výrazně neliší“) byla tedy grafickým procentuálním znázorněním znalostí do jisté míry potvrzena - zasloužila by si ovšem hlubšího šetření.

## 5 Závěr

Bakalářská práce se zabývala problematikou aplikace teorie kurikulárního procesu na radiologickou fyziku, zaměřenou konkrétně na oblast týkající se magnetické rezonance a její elektromagnetické podstaty.

Práce byla koncipována na základě aplikace kurikulárního procesu, jehož složkami jsou konceptuální kurikulum (sdělitelný vědecký systém), zamýšlené kurikulum (edukační systém), projektové kurikulum (edukační text s edukačním testem), implementované kurikulum – 1 (příprava autorky předložené bakalářské práce na výuku) a implementované kurikulum – 2 (statistickým šetřením zpracované dosažené výsledky respondentů z položeného edukačního testu).

Díky uvedeným formám kurikula bakalářská práce vyústila ke zpracování edukačního textu vhodně přiměřeného pro studenty oboru „Radiologický asistent“ a případně i dalších příbuzných oborů a k vytvoření edukačního testu, který vychází z edukačního textu, který byl položen respondentům a statistickým šetřením zpracován.

Za pomoci statistického šetření autorka došla k závěru, že obě z formulovaných hypotéz je možné potvrdit. Jednalo se o tyto dvě hypotézy: „*Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru Radiologický asistent a dalších příbuzných oborů*“ a „*Rozdělení znalostí respondentů bude mít teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu*“. Edukační text vznikl jako výstup kurikulární transformace zamýšleného kurikula. Statistické šetření potvrdilo, že edukační text je přiměřený potřebám a možnostem respondentů a jejich rozdělení znalostí se blíží rozdělení normálnímu. Autorka se zabývala navíc dodatečnou hypotézou: „*Znalosti studentů u prezenční a kombinované formy studia se nijak výrazně neliší*“, která byla zhruba potvrzena (pouze jen grafickým zpracováním).

Cílem předložené bakalářské práce bylo poukázat na to, že na základě teorie kurikulárního procesu a s využitím již zpracované kvantové dimenze magnetické rezonance, lze zpracovat elektromagnetickou podstatu magnetické rezonance v podobě, která bude přiměřená studentům programu „Radiologický asistentů“ a případným příbuzným programům. Na podkladu přijetí hypotéz předložené práce lze vytyčené cíle pokládat za splněné.

Za přínosy předložené bakalářské práce lze tedy považovat z teoretického hlediska aplikaci kurikulárního procesu na vzdělávání studentů oboru „Radiologický asistent“ v oblasti základů elektromagnetické podstaty magnetické rezonance a aplikaci postupů matematické a deskriptivní statistiky v rámci navrhované metodiky. Z hlediska praktického lze považovat jako přínosné nejen využití edukačního textu jako výukového materiálu pro studenty programu „Radiologický asistent“ a případných dalších příbuzných oborů, ale také dle analýzy výsledků jednotlivých otázek z edukačního testu doporučení oblastí pro zkvalitnění výuky fyzikálních základů elektromagnetické dimenze magnetické rezonance radiologických asistentů.

## 6 Seznam informačních zdrojů

ANDĚL, Jiří. *Statistické metody*. 2. přepracované vydání. Praha: MATFYZPRESS, 1998. ISBN 80-85863-27-8.

BLINK, Evert J. *Basic MRI Physics* [online]. 2004 [cit. 2015-10-13]. Dostupné z: <http://www.mri-physics.net/bin/mri-physics-en-rev1.3.pdf>

DOLNÍK, Bystrík. *Elektromagnetická kompatibilita*. 1. vyd. Košice - Slovensko: Elfa s.r.o., 2013, 240 s. ISBN 978-80-8086-221-3.

EDITED BY ELIZABETH CARVER, BarryCarver a FOREWORD BY RICHARD C. PRICE. *Medical imaging: techniques, reflection*. Druhá edice. Edinburgh: Elsevier, 2012, 542 s. ISBN 978-070-2039-331.

HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky - Moderní fyzika - Elektromagnetické vlny, optika, relativita*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.

IS/STAG portál. *Předmět - Radiologická fyzika 1* [online]. [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: [https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?pc\\_pagenavigationalstate=H4sIAAAAAAAAAAGNgYGBkYDMYmJlA1MBdmZADxOIpLEktSvVMrwTwRXUsjI2NjcyMDYzMLUxNzMzNjcwugDAMAYW2idjoAAAA\\*#cpa\\_220507](https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?pc_pagenavigationalstate=H4sIAAAAAAAAAAGNgYGBkYDMYmJlA1MBdmZADxOIpLEktSvVMrwTwRXUsjI2NjcyMDYzMLUxNzMzNjcwugDAMAYW2idjoAAAA*#cpa_220507)

IS/STAG portál. *Předmět - Radiologická fyzika 2* [online]. [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: [https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?pc\\_pagenavigationalstate=H4sIAAAAAAAAAAGNgYGBkYDMYmJlA1MBdmZADxOIpLEktSvVMrwTwRXUsjI2NjcyMDYzMLUxNzMzNjc0OgDAMAEA-yezoAAAA\\*#cpa\\_220507](https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?pc_pagenavigationalstate=H4sIAAAAAAAAAAGNgYGBkYDMYmJlA1MBdmZADxOIpLEktSvVMrwTwRXUsjI2NjcyMDYzMLUxNzMzNjc0OgDAMAEA-yezoAAAA*#cpa_220507)

KOZLOVSKÁ, Dagmar, Zuzana FREITINGER SKALICKÁ a Přemysl ZÁŠKODNÝ. *Úvod do praktika z radiologické fyziky*. 1. vyd. V Českých Budějovicích: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2005. ISBN 80-7040-797-2.

KRUPÍČKA, S. Učená společnost České republiky. *Magnetismus: Historie a současnost* [online]. Praha: 2007 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: [http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka\\_0207.pdf](http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf)

LANK, Vladimír a Miroslav VONDRA. *Fyzika v kostce*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1996, 120 s. ISBN 80-720-0060-8.

MCPHEE, Isaac. *Fyzika bez (m)učení: od elektronu ke kosmické rychlosti: teorie relativity v každodenním životě: fascinující zákony hmoty*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 176 s. ISBN 978-80-247-4124-6.

MGR.KOLLÁTOROVÁ, Helena. *Nukleární magnetická rezonance* [online]. 2011 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: [http://www.szymb.cz/admin/upload/sekce\\_materialy/MRI.pdf](http://www.szymb.cz/admin/upload/sekce_materialy/MRI.pdf)

NEKULA, Josef a Jana CHMELOVÁ. *Základy zobrazování magnetickou rezonancí*. 1. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Zdravotně sociální fakulta, 2007. ISBN 978-80-7368-335-1.

REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Elektromagnetická interakce* [online]. 2006 [cit. 2015-10-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/367-elektromagneticka-interakce>

ROSINA, Jozef. *Biofyzika: Pro zdravotnické a biomedicínské obory*. 1. vyd. Praha: GradaPublishing a.s., 2013, 224 s. ISBN 978-80-247-4237-3.

RUSNÁK, M. *História zobrazovania magnetickou rezonanciou (MRI)* [online]. 2010 [cit. 2015-4-14]. Dostupné z: <http://www.mri-portal.com/historiamr.php>

SEDLÁŘ, Martin. *Magnetická rezonance* [online]. 2011 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: [http://www.med.muni.cz/biofyz/files/nutricnispecialista/MRI\\_2011\\_Sedlar.pdf](http://www.med.muni.cz/biofyz/files/nutricnispecialista/MRI_2011_Sedlar.pdf)

SEIDL, Zdeněk. *Radiologie pro studium i praxi*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4108-6.

STUCHLÝ, Jaroslav. *Statistika: studijní opora pro kombinované studium: bakalářský studijní program* [CD-ROM]. 1. vyd. České Budějovice: Vysoká škola technická a ekonomická, 2012. ISBN 978-80-7468-021-2.

SZÁNTÓ, Ladislav. *Maxwellovy rovnice*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2012, 123 s. ISBN 978-80-7300-450-7.

TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. *Odmaturuj! z fyziky*. 1. vyd. Brno: Didaktis, 2004, 224 s. ISBN 80-862-8539-1.

TERESI, Dick. *Mezníky vědy* [online]. 2012 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: <http://www.inuru.com/index.php/planeta/mezniky-vedy/109-magnetismus-a-inska-navigace-na-moi>

TŮMA, Stanislav. *Úvod do techniky zobrazování pomocí jevu magnetické rezonance*. České Budějovice: Katedra radiologie a toxikologie ZSF JU v Českých Budějovicích, [b. r.], 48 s.

VÁLEK, Vlastimil a Jan ŽIŽKA. *Moderní diagnostické metody*. 1. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1996, 43 s. ISBN 80-701-3225-6.

VOMÁČKA, Jaroslav, Josef NEKULA a Jiří KOZÁK. *Zobrazovací metody pro radiologické asistenty*. 1. vyd. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012, 153 s. ISBN 978-80-244-3126-0.

WEIS, Ján a Petr BOŘUTA. *Úvod do magnetickej rezonancie*. Bratislava: DATEX, 1998. 180 s. ISBN 80-967953-8-4.

WOODWARD, Peggy a Roger FREIMARCK. *MRI for Technologists*. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1995, 335 s. ISBN 0-07-022149-9.

ZÁŠKODNÝ, Přemysl. *Přehled základů teoretické fyziky: (s aplikací na radiologii)*. 1. vyd. Bratislava: Didaktis, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

ZÁŠKODNÝ, Přemysl. *Kurikulární proces fyziky: (s přehledem základů teoretické fyziky)*. Ostrava: Algoritmus, c2009. ISBN 978-80-902491-0-3.

ZÁŠKODNÝ, Přemysl, Renata HAVRÁNKOVÁ, Jiří HAVRÁNEK a Vladimír VURM. *Základy statistiky: (s aplikací na zdravotnictví)*. Přepřacované druhé vydání. Praha: Curriculum, 2011. ISBN 978-80-904948-2-4.



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Empirické rozdělení absolutních četností .....	47
Obrázek 2: Empirické rozdělení relativních četností.....	48
Obrázek 3: Empirické rozdělení kumulativních relativních četností.....	48
Obrázek 4: Spojité vystižení empirické distribuce .....	49
Obrázek 5: Procentuální vyjádření úspěšnosti studentů .....	55
Obrázek 6: Procentuální úspěšnost studentů v jednotlivých otázkách .....	56
Obrázek 7: Znalosti studentů prezenčního studia .....	57
Obrázek 8: Znalosti studentů kombinovaného studia.....	58
Obrázek 9: Procentuální úspěšnost jednotlivých forem studia.....	58
Obrázek 10: Zřídlo – zdroj změn elektrického a magnetického pole .....	69
Obrázek 11: Vír – zdroj změn elektrického a magnetického pole.....	69
Obrázek 12: Kvarkové složení neutronu a protonu .....	72

## Seznam tabulek

Tabulka 1. Tabulka elementárního statistického zpracování .....	47
Tabulka 2. Tabulka potřebných hodnot pro neparametrické testování.....	50
Tabulka 3. Přehled výpočtů Pearsonova $\chi^2$ - testu dobré shody.....	52
Tabulka 4. Tabulka s výpočty splňující podmínky Pearsonova $\chi^2$ - testu.....	52
Tabulka 5. Pomocná tabulka k porovnání znalostí obou forem studia .....	58
Tabulka 6. Základní fyzikální interakce .....	71

## 7 Přílohy

### 7.1 Edukační text

#### Historie elektromagnetického pole

Úvodem je zapotřebí ohlédnout se do historie a přiblížit si objev elektromagnetického pole. Prvním z průkopníků, kteří se o popis magnetického pole zasloužili, byl Michael Faraday (1791 - 1867), který zavedl pojem "elektrické a magnetické pole" a zmapoval tato pole siločarami. Na tento poznatek navázal jeden z nejdůležitějších průkopníků James Clerk Maxwell (1831 - 1879), jenž zpracoval všechny poznatky svých předchůdců matematicky. Zavedl pojem posuvného proudu a začlenil jej do svých rovnic. Hlavním mezníkem v klasické fyzikální dimenzi teorie elektromagnetického pole je rok 1873, kdy právě Maxwell vyslovil předpoklad, že měnící se elektrické pole vytváří pole magnetické. Tím se prokázalo, že elektřina a magnetismus jsou propojeny samostatnou teorií. Touto cestou bylo teoreticky předpovězeno elektromagnetické pole, které James Clerk Maxwell zobecněním známých poznatků o elektřině a magnetismu (od svých předchůdců) popsal ve vakuu a ve vzduchu čtyřmi rovnicemi.

$$(1) \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$(2) \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$(3) \operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$(4) \operatorname{rot} \vec{B} = \mu \vec{i} + \varepsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$\vec{B}$  – vektor magnetické indukce,  $\vec{E}$  – vektor intenzity elektrického pole,  $t$  – čas,  $\vec{i}$  – plošná hustota elektrického proudu,  $\mu_0$  – absolutní permeabilita,  $\varepsilon_0$  – absolutní permitivita vakua,  $\rho$  - prostorová hustota elektrického náboje

K experimentálnímu ověření platnosti této teorie došlo 10 let po Maxwellově smrti, především na základě prací Heinricha Hertze (1857 - 1894), který objevil elektromagnetické vlnění – přenos elektromagnetického pole na určitou vzdálenost. Za pomoci pokusů s elektromagnetickými vlnami buzenými jiskrovým výbojem se mu podařilo ověřit většinu Maxwellových závěrů.

## Fyzikální základy elektromagnetického pole pro magnetickou rezonanci

### Maxwellovy rovnice pro 4 stavy elektromagnetického pole (pro vakuum a vzduch)

#### a) Statistická teorie elektromagnetického pole

Náboj  $Q$  je vůči pozorovateli v klidu. Siločáry začínají na kladných nábojích a končí na nábojích záporných, siločáry nevytvářejí uzavřené křivky.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = 0$$

#### b) Stacionární teorie elektromagnetického pole

Náboj  $Q$  se pohybuje jedním směrem a s konstantní rychlostí, jde o stejnosměrný elektrický proud. Stacionární teorie může být nazývána také jako proudová a má obrovský význam pro radiologii – pohyb proudu v plynech, polovodičích a pevných látkách je spojen s detekcí a dozimetrií ionizujícího záření v řadě oblastí radiologie.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{i}$$

c) **Kvazistacionární teorie elektromagnetického pole**

Jde o nízkofrekvenční střídavý proud - základní aplikace na všechny spotřebiče.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$$

d) **Nestacionární teorie elektromagnetického pole**

Jde o vysokofrekvenční střídavý proud. V rámci radiologie je tato teorie základním kamenem pro pochopení klasické dimenze magnetické rezonance a popisu elektromagnetických vln.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

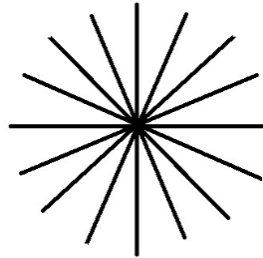
$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

**Fyzikální základ magnetické rezonanci tak poskytuje nestacionární teorie elektromagnetického pole**, kterou lze popsat čtyřmi výše zmíněnými Maxwellovými rovnicemi pro zřídla a víry elektrického a magnetického pole.

**Zřídla a víry – zdroje změn elektrického a magnetického pole**

- a) **Zřídlo** – bod, ze kterého vycházejí nebo do něj vcházejí siločáry (obr. 10). Zřídla elektrického a magnetického pole umí hledat divergence (div). Divergence je matematický operátor (matematická instrukce, sled instrukcí). Pro intenzitu elektrického pole je definován jako skalární součin symbolického vektoru

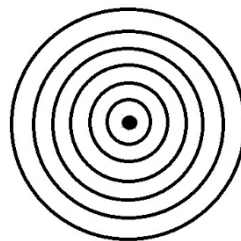
nabla  $\nabla$  a vektoru  $\vec{E}$ . Obdobné je to pro intenzitu pole magnetického, často je místo intenzity magnetického pole používán vektor magnetické indukce  $\vec{B}$ .



**Obrázek 10: Zřídlo – zdroj změn elektrického a magnetického pole**

Zdroj: <https://bogpaper.wordpress.com/2013/08/25/science-sundays-with-john-duffield-forensic-physics-101/>

**b) Vír** – bod, kolem kterého siločáry „krouží“ (obr. 11). Tento bod hledáme pomocí matematického operátoru - **rotace (rot)**, který je **schopen nalézat víry** magnetického a elektrického pole. Vír je pro elektrické pole vyjadřován jako vektorový součin symbolického vektoru nabla  $\nabla$  a vektoru  $\vec{E}$  a pro pole magnetické vektorovým součinem symbolického vektoru nabla  $\nabla$  a vektoru  $\vec{B}$ .



**Obrázek 11: Vír – zdroj změn elektrického a magnetického pole**

Zdroj: <https://bogpaper.wordpress.com/2013/08/25/science-sundays-with-john-duffield-forensic-physics-101/>

### **Obecný popis zřídla a víru**

1. rovnice – zřídlem je elektrické pole – elektrický náboj
2. rovnice – neexistuje magnetický náboj – magnetické pole je nezřídlové
3. rovnice – zdrojem a vírem elektrického pole je proměnné magnetické pole
4. rovnice – zdrojem a vírem magnetického pole jsou vodivý a Maxwellův proud (2 víry = 2 sčítance)

## Operátory pro popis Maxwellových rovnic

**Div (divergence)** – je to skalární součin symbolického vektoru nabra  $\nabla$  a vektoru  $\vec{E}$ .

$$\nabla \cdot \vec{E} = \text{div } \vec{E}$$

$$\nabla \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$\vec{E} (E_x, E_y, E_z)$$

**Rot (rotace)** – vektorový součin symbolického vektoru nabra  $\nabla$  a vektoru  $\vec{E}$ .

$$\nabla \times \vec{E} = \text{rot } \vec{E}$$

$$\vec{u} \times \vec{v} = \vec{w} (u_2 v_3 - u_3 v_2, u_3 v_1 - u_1 v_3, u_1 v_2 - u_2 v_1)$$

**Laplaceův operátor**

$$\Delta = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

## Elektromagnetické vlnění a vlna

Z Maxwellových rovnic lze vyvodit, že elektrické a magnetické pole existuje ve vakuu a v látkovém prostředí i v případě, že není vytvořeno elektrickými náboji. Obě pole jsou na sobě závislá, tedy neoddělitelná, a tvoří dvě na sobě navzájem závislé složky elektromagnetického pole. **Těmito složkami je složka elektrická často popisovaná vektorem  $\vec{E}$  a složka magnetická často popisovaná vektorem  $\vec{B}$ .** Oba dva vektory jsou navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé na směr šíření elektromagnetické vlny. Elektromagnetické pole není statické, ale šíří se jako elektromagnetické vlnění. Vlnění lze popsat obecnou vlnovou rovnicí  $\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 \Delta x$ . **Odvozenými vlnovými rovnicemi pro elektrické a magnetické pole z obecné vlnové rovnice bylo matematicky dokázáno, že se elektromagnetické pole ve vzduchu šíří jako elektromagnetická vlna.** Další vlastností elektromagnetického pole je jeho rychlost šíření elektromagnetických vln, která je shodná s rychlostí světla ( $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

## Základní fyzikální interakce

Tabulka 6. Základní fyzikální interakce

Typ interakce	Relativní síla	Dosah (m)
elektromagnetická	$10^{-2}$	$\infty$
gravitační	$10^{-38}$	$\infty$
slabá	$10^{-18}$	$10^{-18}$
silná	1	$10^{-13}$ (hadrony)
		$\infty$ (kvarky)

Zdroj: [http://artemis.osu.cz/mmfyfz/jm/jm\\_2\\_4\\_5.htm](http://artemis.osu.cz/mmfyfz/jm/jm_2_4_5.htm)

**Elektromagnetická interakce** – mezi částicemi s elektrickým nábojem působí síla. Jako nositele elektromagnetické interakce lze považovat fotony. Fotony představují kvanta elektromagnetického pole. Jejich klidová hmotnost je nulová a spin je roven jedné. Z interakcí s neomezeným dosahem je elektromagnetická interakce interakcí nejsilnější (tab. 6). Vzhledem k neomezenému dosahu se projevuje jak v mikrosvětě, tak i v makrosvětě. Příkladem jejího působení je stabilita atomu a **využívá se pro klasickou dimenzi magnetické rezonance**.

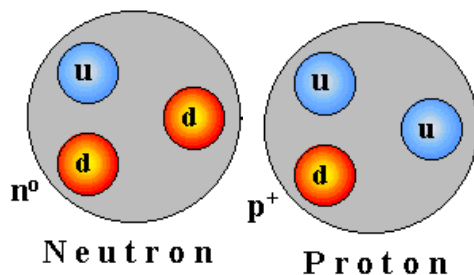
**Gravitační interakce** – touto silou na sebe působí všechny hmotné objekty. Ze všech známých sil je nejslabší a při interakci v mikrosvětě je zanedbávána (tab. 6). Dosah má rovněž neomezený a významně se projevuje mezi fyzikálními objekty s velkou hmotností. Je zprostředkována gravitony, které mají nulovou klidovou hmotnost. Tyto částice (gravitony) nebyly prozatím experimentálně prokázány (i když v nedávné době byla prokázána existence gravitačních vln na základě fúze dvou černých děr). Příkladem je stabilita galaxie, sluneční soustavy.

**Slabá interakce** – na všechny částice působí síla, která je zodpovědná nikoliv za stabilitu mikročástic, ale za jejich rozpad. Z interakcí s omezeným dosahem je slabá interakce interakcí nejsilnější. Tato síla je rozhodující pro radiobiologii a je spojována také se vznikem radioaktivity (např. při vzniku  $\beta$  - radioaktivity dochází k přeměně d-kvarku na u-kvark za současného působení intermediálních bosonů).

**Silná interakce** – síla, která je nejsilnější ze všech známých sil, a která působí mezi kvarky. Prostřednictvím kvarkově - gluonového pole zajišťuje stabilitu hadronů (např. nukleonů).

### Elementární částice podstatné pro magnetickou rezonanci

Elementárními částicemi využívanými v magnetické rezonanci jsou zejména **protony** (člověk je z 68% tvořen vodou, tudíž ho v podstatě lze považovat za makrosystém protonů). S protony, jako **částicemi s elementárním elektrickým nábojem**, je spojena frekvence Larmorovy precese během absorpce a emise fotonu. Proton má spin ("rotuje"), to představuje pohyb elektrického náboje. Z Maxwellových rovnic lze vyvodit, že se proton chová jako malý magnet. **Kvarkové složení protonu je uud**, jak je možné vidět na přiloženém obrázku (obr. 12).



**Obrázek 12: Kvarkové složení neutronu a protonu**

Zdroj: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>

Druhou podstatnou elementární částicí pro magnetickou rezonanci je **foton – elektricky neutrální částice**. Jak již bylo zmíněno, jedná se o nositele elektromagnetické interakce využívané pro magnetickou rezonanci. Jeho klidová hmotnost je nulová a spin je roven jedné. S fotony je spojena rezonanční frekvence elektromagnetických impulsů během magnetické rezonance.

Princip těchto dvou elementárních částic v magnetické rezonanci si můžeme zjednodušeně popsat následujícím způsobem:

Člověk (popisovaný "makrosystémem protonů") je položen do silného vnějšího elektromagnetického pole  $B_0$ . Z Maxwellových rovnic lze vyvodit, že se proton chová jako malý magnet. Jelikož se v těle vyskytuje mnoho protonů (zvláště v rámci molekul vody) po vložení pacienta do silného vnějšího elektromagnetického pole  $B_0$  se protony uspořádají ve směru magnetického pole  $B_0$  (původně je distribuce chaotická) a v podstatě je člověk tvořen řadou paralelně a antiparalelně orientovaných „tyčových



magnetů". Pomocí vysokofrekvenčních vysílačů je vyslán radiofrekvenční pulz o velikosti Larmorovy frekvence. Dále je uplatněna role fotonů, které narazí do jednotlivých magnetů (protonů). Touto cestou fotony předají veškerou energii magnetům, které se "pootočí" do stavů s vyšší energií se současným zánikem fotonů. Po vypnutí vysokofrekvenčního signálu se magnety (protony) vrátí z excitovaného stavu do stavu s původní energií. Přijímací anténa zachytí nově vyslané (vyzářené) fotony, vzniklé rozdílem energií mezi excitovaným a původním stavem, které nesou informace o vyšetřované struktuře. Sofistikovaná technika posléze umožní po zpracování výpočetní technikou zobrazit 3D obraz vyšetřované struktury.

## **Rádiové vlny**

**Rádiové vlny jsou druhem elektromagnetického záření, které se využívá pro magnetickou rezonanci.** Jejich frekvence se pohybuje mezi  $10^4 - 10^8$  Hz a vlnová délka dosahuje  $10^0 - 10^4$  m. Přírodním zdrojem vzniku rádiových vln je pohyb téměř volných elektronů. Za umělý zdroj lze považovat vysílač vysokofrekvenčního elektromagnetického signálu a detekci rádiových vln umožňuje přijímač vysokofrekvenčního elektromagnetického signálu. V běžném životě se rádiových vln využívá k přenosu televizního či rozhlasového signálu (rádio), ke komunikaci za pomoci vysílaček, ale také k přenosu signálu mobilních telefonů.

## **Rezonance**

Rezonance nastává za podmínky rovnosti úhlové frekvence  $\omega$  nucených kmitů a frekvence  $\omega_0$  vlastních kmitů oscilátoru. **Zjednodušeně lze říci, že k rezonanci dochází, jestliže je vlastní frekvence shodná s frekvencí přijímaného signálu.** Jako příklady, kdy dochází k rozkmitání rezonancí, lze uvést: rozkmitání mostu při pochodu vojenského útvaru přes most, rozkmitání oken při přeletu letadla nebo rozkmitání struny hudebního nástroje od tónu vydávaného jiným zdrojem o kmitočtu, na který je struna naladěna.

Rezonance je rovněž využívána pro ladění rozhlasových stanic, kdy se otočným kondenzátorem mění vlastní frekvence ladícího oscilačního obvodu v rádiu. Pokud je tato naladěná frekvence odlišná od frekvence signálu, který přišel do obvodu z antény, je impedance obvodu tak nízká, že je tento signál zkratován. Ovšem v případě, že bude přicházející frekvence signálu shodná s frekvencí naladěnou (vlastní) dojde

k rezonanci. Oscilační obvod bude touto frekvencí rozkmitán a signál se dále zpracuje v zesilovači. Na obdobném principu pracuje i magnetická rezonance.

## 7.2 Edukační test

**1. Teorie elektromagnetického pole, která umožňuje popsat klasickou dimenzi magnetické rezonance, má název:**

- a. Stacionární teorie
- b. Nestacionární teorie
- c. Kvazistacionární teorie
- d. Statická teorie

**2. Maxwellovy rovnice pro teorii elektromagnetického pole, která umožňuje popsat klasickou dimenzi magnetické rezonance, zní:**

- a.  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$ ,  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ ,  $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ ,  $\operatorname{rot} \vec{B} = 0$
- b.  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$ ,  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ ,  $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ ,  $\operatorname{rot} \vec{B} = \mu \vec{i}$
- c.  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$ ,  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ ,  $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ,  $\operatorname{rot} \vec{B} = \mu \vec{i}$
- d.  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$ ,  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ ,  $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ,  $\operatorname{rot} \vec{B} = \mu \vec{i} + \varepsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

**3. Víry silového pole lze hledat pomocí operátoru:**

- a. Rotace
- b. Laplaceův operátor
- c. Divergence
- d. Gradient

**4. Zřídlo silového pole je obecně popisováno:**

- a. Je to bod, se kterým jsou spojeny siločáry, a který umí hledat divergence
- b. Je to bod, kolem kterého siločáry krouží, a který umí hledat divergence
- c. Je to bod, kolem kterého siločáry krouží, a který umí hledat rotace
- d. Je to bod, ze kterého vycházejí siločáry, a který umí hledat rotace

- 5. Elektromagnetická vlna má dvě neoddělitelné složky:**
- Elektrickou, popsanou vektorem  $\vec{B}$ , a magnetickou, popsanou vektorem  $\vec{E}$
  - Elektrickou, popsanou vektorem  $\vec{E}$ , a magnetickou, popsanou vektorem  $\vec{B}$
  - Obě složky lze oddělit
  - Magnetickou, popsanou vektorem  $\vec{B}$ , a mechanickou, popsanou vektorem  $\vec{E}$
- 6. Elektromagnetická vlna ve vakuu se šíří:**
- Rychlostí zvuku
  - Rychleji než rychlost zvuku
  - Nemá rychlost
  - Rychlostí světla
- 7. Elektromagnetické pole se šíří ve vzduchu jako elektromagnetická vlna:**
- Již bylo matematicky prokázáno
  - Tento poznatek je prozatím zkoumán
  - Tento poznatek nelze matematicky potvrdit
  - Matematicky lze prokázat, že jen elektrické pole se šíří jako elektrická vlna, o magnetickém poli totéž nelze říci.
- 8. Proton má kvarkové složení:**
- udd
  - udu
  - dud
  - uud
- 9. Proton (s protony je spojena frekvence Larmorovy precese během absorpce a emise fotonu) je:**
- Částice s elementárním elektrickým nábojem
  - Elektricky neutrální částice
  - Jedná se jen o vlnu, nikoli o částici
  - Částice s třetinovým elementárním nábojem

**10. Pro magnetickou rezonanci se využívá následující druh elektromagnetického záření:**

- a. Gama záření
- b. Rentgenové záření
- c. Rádiové vlny
- d. Optické záření

**11. Foton (s fotony je spojena rezonanční frekvence elektromagnetických impulsů během magnetické rezonance) je:**

- a. Částice s elementárním elektrickým nábojem
- b. Elektricky neutrální částice
- c. Jedná se jen o vlnu, nikoli o částici
- d. Částice s třetinovým elementárním nábojem

**12. Pro klasickou dimenzi magnetické rezonance se využívá:**

- a. Silná interakce
- b. Slabá interakce
- c. Elektromagnetická interakce
- d. Gravitační interakce

**13. K rezonanci dochází, jestliže:**

- a. Je vlastní frekvence vyšší než frekvence přijímaného signálu
- b. Je vlastní frekvence shodná s frekvencí přijímaného signálu
- c. Je vlastní frekvence nižší než frekvence přijímaného signálu
- d. Mezi těmito frekvencemi není žádný zvláštní vztah

## **8 Seznam použitých zkratk**

MR/MRI – magnetická rezonance

NMR – nukleární magnetická rezonance

RTG – rentgen

MRA – MR angiografie

fMRI – funkční magnetická rezonance

DT MRI/DTI – difuzní magnetická rezonance

CT – výpočetní tomografie

EKG – elektrokardiografie

stř. int. – střední interval