

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

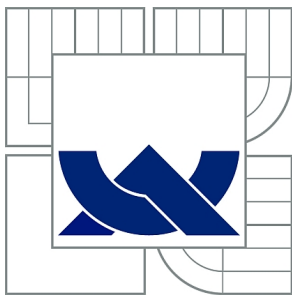
VLIV ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ NA BUNĚČNÉ STRUKTURY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

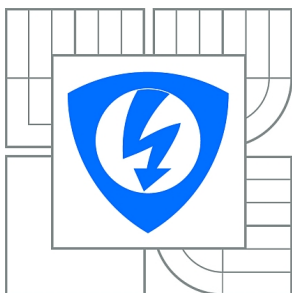
JIŘÍ URBÁNEK

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# **VLIV ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ NA BUNĚČNÉ STRUKTURY**

THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON CELL STRUCTURE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ URBÁNEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ELIŠKA VLACHOVÁ HUTOVÁ**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Jiří Urbánek

**ID:** 146984

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

### Vliv elektromagnetických polí na buněčné struktury

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se základním stavebním prvkem živých organismů, buňkou, a dále s pojmem bioelektrické jevy. Prostudujte a následně proveďte rešerši dostupné literatury, která se zabývá vlivem elektromagnetických polí na buňky a popisuje biofyziku elektrických projevů organismu na buněčné úrovni. Na základě dostupné literatury vytvořte v prostředí ANSYS nebo COMSOL jednoduchý 2D model buňky. Na vytvořeném modelu simulujte vliv elektromagnetických polí. Z výsledků simulací vyvodte závěry a diskutujte získané výsledky.

Ke splnění semestrálního projektu BB2E je nutné zpracovat jeho zadání.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DĚDKOVÁ, J. Modelování elektromagnetických polí. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005.
- [2] ŠIMURDA J. Bioelektrické jevy. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [3] MEYL, K. DNA – and Cell Radio: Communication of cells explained by field physics including magnetic scalar waves. Villingen – Schwenningen: INDEL GmbH, publishing department, 2011.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Eliška Vlachová Hutová

**Konzultanti bakalářské práce:** Ing. Tomáš Kříž

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá zkoumáním vlivu elektromagnetického pole na buněčné struktury. Buněčné struktury chápeme jako souhrnný popis všech organel umístěné v buňce. V našem jednouchém 2D modelu uvažujeme pouze základní organely jako je buněčná membrána, cytoplazma a jádro. Cílem práce bylo seznámit se s vnějším prostředím, do kterého jsme umístily 2D model buňky, na který jsme působili elektromagnetickým polem. Tato práce obsahuje výsledky, které byly získány numerickým modelováním v programu COMSOL. Na získaných výsledcích byly ověřeny teoretické předpoklady.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Elektromagnetické pole, magnetická indukce, COMSOL, bioelektrické jevy, buňka, metoda konečných prvků, síť, numerické modelování.

## **ABSTRACT**

The main concern of the work is researching the influence of electromagnetic field on cellular structures. Cellular structures is a general term for all the organelles placed in a cell. In our 2D model we take into consideration just the fundamental organelles such as cell membrane, cytoplasm and cell nucleus. The aim of the work was to get acquainted with the outer environment into which we had placed the 2D model of the cell and on which we had applied the magnetic field. The work contains the results gained by numeric modelling in the physical programme COMSOL. These results prove the theoretical presumption.

## **KEYWORDS**

Electromagnetic fields, magnetic induction, COMSOL, bioelectric phenomena, cell, finite element method, mesh, numerice modeling

URBÁNEK, Jiří. *Vliv elektromagnetických polí na buněčné struktury*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. 50 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Eliška Vlachová Hutová.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vliv elektromagnetických polí na buněčné struktury jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Elišce Vlachové Hutové a odbornému konzultantovi Ing. Dušanu Nešporovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Seznam obrázků</b>   | <b>viii</b> |
| <b>Seznam tabulek</b>   | <b>x</b>    |
| <b>Úvod</b>   | <b>1</b>    |
| <b>1 Teoretický úvod</b>  | <b>2</b>    |
| 1.1 Buněčná stavba organismů.....                                   | 2           |
| 1.1.1 Historie.....   | 3           |
| 1.1.2 Velikost buněk.....   | 3           |
| 1.1.3 Typy buněk.....   | 3           |
| 1.2 Bioelektrické jevy.....   | 10          |
| 1.2.1 Struktura membrány.....                                       | 10          |
| 1.2.2 Klidové membránové napětí.....                                | 14          |
| 1.2.3 Akční napětí.....   | 14          |
| 1.3 Vlastnosti vnějšího prostředí.....                              | 15          |
| 1.3.1 Elektrické pole.....  | 15          |
| 1.3.2 Magnetické pole.....  | 16          |
| 1.3.3 Elektromagnetické pole.....                                   | 18          |
| 1.4 Rozdělní magnetických látek a polí.....                         | 19          |
| 1.4.1 Nestacionární magnetické pole.....                            | 21          |
| 1.4.2 Stacionární magnetické pole.....                              | 22          |
| 1.5 Přehled současného stavu výzkumu k dané problematice.....       | 26          |
| 1.6 Definování cíle úlohy.....                                      | 30          |
| <b>2 Modelování</b>   | <b>31</b>   |
| 2.1 Metoda konečných prvků.....                                     | 31          |
| 2.2 Modelování buňky pomocí programu COMSOL.....                    | 33          |
| 2.2.1 Osnova modelování buňky.....                                  | 33          |
| 2.3 Modelování elektromagnetických polí.....                        | 33          |
| 2.3.1 Modelování hrubé sítě.....                                    | 36          |
| 2.3.2 Modelování jemné sítě.....                                    | 37          |
| <b>3 Výsledky</b>   | <b>38</b>   |
| 3.1 Rozložení elektrického pole na struktuře buňky (Hrubá síť)..... | 38          |
| 3.2 Rozložení elektrického pole na struktuře buňky (Jemná síť)..... | 41          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.3      | Porovnání dosažených výsledků .....     | 43        |
| <b>4</b> | <b>Závěr</b>                            | <b>44</b> |
|          | <b>Literatura</b>                       | <b>45</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b> | <b>48</b> |



# SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1.1: Řez prokaryotickou buňkou [7] .....   | 4  |
| Obr. 1.2: Cytoplazmatická membrána prokaryotické buňky [9].....   | 5  |
| Obr. 1.3: Řez rostlinnou buňkou [11] .....  | 7  |
| Obr. 1.4: Řez živočišnou buňkou [11] .....  | 8  |
| Obr. 1.5: Srovnání mezi živočišnou buňkou, rostlinnou buňkou a zástupcem prokaryotické buňky bakterií [11] .....  | 9  |
| Obr. 1.6: Povrchová membrána a elektrolyty vně a uvnitř buňky [13].....   | 10 |
| Obr. 1.7: Schéma membránového kanálu [13].....  | 11 |
| Obr. 1.8: A: Chemické vrátkování; B: Napěťové vrátkování [16].....  | 12 |
| Obr. 1.9: Způsoby přenosu iontů [13] .....  | 13 |
| Obr. 1.10: Schéma přenašečového systému [13] .....  | 13 |
| Obr. 1.11: Charakteristické průběhy akčního napětí. A - nervové vlákno; B - svalová buňka srdeční komory; C - buňka sinoatriálního uzlu; D - buňka hladkého svalu [13] .... | 15 |
| Obr. 1.12: Přejídný děj.....  | 22 |
| Obr. 1.13: Orientace magnetické síly na směr proudu[32] .....   | 24 |
| Obr. 1.14: Orientace magnetické pole rovnoběžného vodiče s proudem[37] .....  | 24 |
| Obr. 1.15: Směr magnetické síly za přítomnosti druhého vodiče[37] .....   | 25 |
| Obr. 1.16: Předpokládaný model[23] .....  | 27 |
| Obr. 1.17: Popis struktury buňky pomocí elektrického zapojení[23] .....   | 27 |
| Obr. 2.1: Příklad sítě konečných prvků s uzly [21].....   | 31 |
| Obr. 2.2: Elementární rovinné prvky [21].....   | 32 |
| Obr. 2.3: Elementární prostorové prvky [21].....  | 32 |
| Obr. 2.4: Model buňky .....   | 35 |
| Obr. 2.5: Detail buněčné membrány .....   | 35 |
| Obr. 2.6: Příklad hrubé sítě modelu .....   | 36 |
| Obr. 2.7: Detailní zobrazení sítě v jednoduchém čtverci .....   | 36 |
| Obr. 2.8: Příklad jemné sítě modelu.....  | 37 |
| Obr. 2.9: Detailní zobrazení jemné sítě v jednoduchém čtverci .....   | 37 |
| Obr. 3.1: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1kHz .....  | 38 |
| Obr. 3.2: Rozložení elektrického pole o frekvenci 100kHz .....  | 39 |
| Obr. 3.3: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1MHz .....  | 39 |
| Obr. 3.4: Rozložení elektrického pole o frekvenci 10MHz .....   | 40 |
| Obr. 3.5: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1kHz.....   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 3.6: Rozložení elektrického pole o frekvenci 100kHz ..... | 42 |
| Obr. 3.7: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1MHz .....   | 42 |
| Obr. 3.8: Rozložení elektrického pole o frekvenci 10MHz .....  | 43 |

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1: Srovnání prokaryotických a eukaryotických buněk [12] ..... | 9  |
| Tab. 2: Základní parametry modelu buňky .....                      | 34 |
| Tab. 3: Vysvětlivky k modelu buňky (Obr. 2.4, Obr. 2.5) .....      | 34 |

# ÚVOD

Magnetismus a je považován za jeden z hlavních fyzikálních jevů. I když si to spousta z nás neuvědomuje, setkáváme se s ním každý den. Magnetismus se může vyskytovat jak ve formě magnetické indukce, tak elektromagnetismu. Jakmile se tedy lidský organismus ocitne v blízkosti jakéhokoliv elektrického záření, vytvoří se kolem něj elektromagnetické pole. Působením tohoto pole na lidské tělo se již zabývalo mnoho odborných studií a výzkumů.

Z výsledků těchto experimentů a výzkumů vyplývá, že magnetické pole může mít za určitých podmínek na člověka pozitivní vliv. Tohoto pozitivního vlivu je využito například v mnoha různých odvětvích medicíny. Takovým příkladem je magnetoterapie, která je v současné době poměrně rozšířenou léčebnou metodou. Její uplatnění najdeme v oblasti chirurgie, ortopedie, neurologie, očním lékařství, dermatologie a mnoha dalších.

Jak se tedy projevuje elektromagnetické pole na buněčné struktury? Abychom pochopili vliv jakéhokoliv působení energie na buňku je nejlépe tuto situaci modelovat pouze na jediné buňce. Cílem mé bakalářské práce je tedy popsat chování buněčné struktury umístěné v elektromagnetickém poli.

Pro vypracování této práce je zapotřebí se seznámit se základní stavbou buňky a pojmem bioelektrické jevy. Nedílnou součástí je také zpracování vlastností vnějších prostředí, jako je pole elektrické, magnetické a elektromagnetické. Abychom mohli vyhodnotit chování buněčné struktury v daném prostředí je potřeba vytvořit metodiku experimentu a vykonat výpočet modelu pomocí programu COMSOL. Následně tyto získané výsledky porovnat s předpokládanými hodnotami.

# 1 TEORETICKÝ ÚVOD

## 1.1 Buněčná stavba organismů

Buňka je považována za základní stavební a funkční jednotku všech živých organismů, která je schopna základních projevů života. V přírodě existuje často jako samostatný organismus. (např. bakterie, sinice, prvoci). Organismy dělíme na jednobuněčné a mnohobuněčné. Mezi jednobuněčné organismy řadíme například bakterie, ty jsou tvořeny pouze jedinou buňkou, která zajišťuje všechny životní funkce. Jiné organismy jsou složeny z mnoha buněk, nazýváme je mnohobuněčnými. U mnohobuněčných organismů tvoří buňka nejmenší a nejjednodušší stavební jednotku, která je vybavena souborem genetických informací. Ty zde hrají zásadní roli, zabezpečují totiž buňce její autoreprodukci, základní vitální funkce a dokonce i samostatnou existenci[1].

Základní dělení organismů podle stupně složitosti[2]:

1. viry
2. jednobuněční
3. kolonie jednobuněčných
4. mnohobuněční
5. kolonie mnohobuněčných
6. obligátní společenstva

dále rozděluje základní říše organismů:

1. nebuněční - viry
2. prvobuněční – bakterie, sinice
3. rostliny
4. houby
5. živočichové

Buňka je považována za základní jednotku života, nic menšího než buňku bychom neměli pokládat za živé. Je vybavena mimořádnou schopností vytvářet kopie sebe samých a to růstem či dělením. Proto nebuněčné organismy nemůžeme zahrnovat mezi živou přírodu. Takovým příkladem jsou viry, ty obsahují některé podobné typy molekul jako buňky, avšak nejsou schopny se samy reprodukovat, pouze parazitují na reprodukčním aparátu buněk, do nichž pronikly a tím se kopírují[3].

### 1.1.1 Historie

Za objevitele buňky jako stavebního prvku organismů je považován anglický přírodovědec Robert Hooke. Svým vlastnoručně sestrojeným primitivním mikroskopem pozoroval v roce 1665 strukturu, která připomínala včelí plástev, její komůrky pojmenoval jako buňky (lat. cellula). Dalším významným jménem je český lékař a přírodovědec Jan Evangelista Purkyně, který je autorem buněčné teorie. Z německých přírodovědců musíme zmínit jména Thomas Swann a Matthias Schleiden. S příchodem elektronové mikroskopie došlo k velkému pokroku ve výzkumu buněk. Díky elektronovému mikroskopu došlo k objevení struktur buněk[4],[5].

### 1.1.2 Velikost buněk

Mezi buňkami jsou značné rozdíly ve velikosti, tvaru a struktuře. Tyto rozdíly jsou dány odlišnými funkcemi různých druhů buněk. Živočišné buňky mají průměrnou velikost mezi 10-30 $\mu$ m, rostlinné buňky jsou větší než živočišné. Jejich velikost se pohybuje v rozmezí od 10 až po 100  $\mu$ m. Existují však buňky, které dosahují rozměrů několika celých centimetrů až desítek centimetrů, příkladem je slepičí či pštrosí vejce, jejichž žloutek je totiž jedinou buňkou. Základním tvarem buňky je kulovitý, tento tvar nalezneme u bakterií, tukových buněk savců. Mezi další tvary patří oválný, tyčinkovitý, nepravidelný či proměnlivý [1].

### 1.1.3 Typy buněk

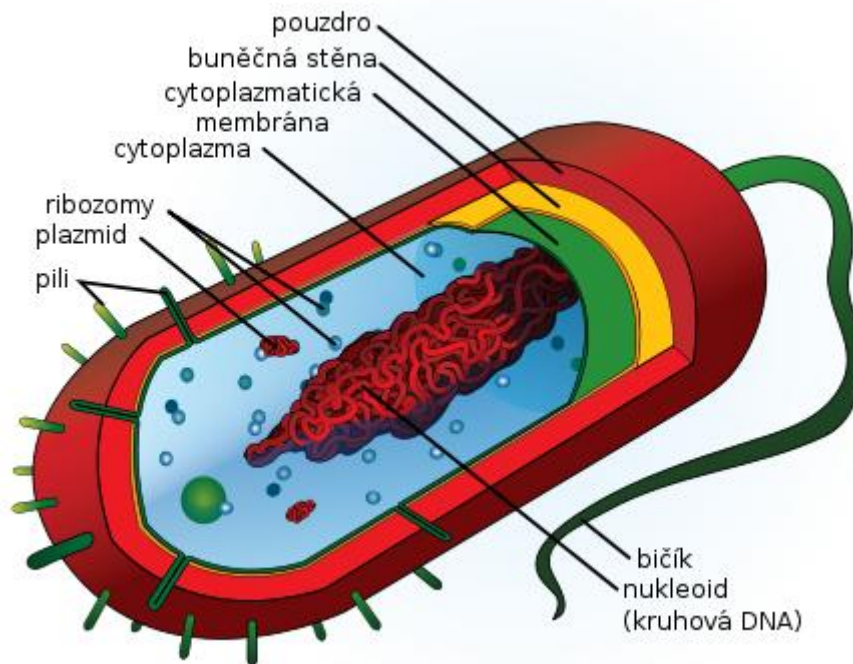
Buňky můžeme rozdělit podle stavby a funkce na dva typy: buňku prokaryotickou a eukaryotickou. Organismy s typem prokaryotické buňky označujeme jako **prokaryota** (prokaryotické organismy) a jsou výhradně jednobuněčné. Organismy s eukaryotickým typem buňky označujeme jako **eukaryota** (eukaryotické organismy), ty mohou být jednobuněčné i mnohobuněčné.

Všechny buňky mají ovšem společnou strukturu, kterou nazýváme tzv. obecnou strukturu buňky, tu tvoří[4]:

- Buněčné povrchy – buněčná stěna, cytoplazmatická membrána
- Cytoplazma – jedná se o vnitřní hmotu buňky
- Buněčné organely – „tělíska“ vykonávající různé funkce
- Buněčné inkluze – krystalky nebo kapénky zásobních a odpadních látek

## **Prokaryotická buňka**

Za prokaryotu považujeme organismy, které nemají buněčné jádro. Jako jsou např. bakterie a sinice. Ve srovnání s eukaryotickou buňkou má prokaryotická buňka mnohem jednodušší organizaci, je zpravidla menší (průměrná velikost je asi 1-2 mikrometry) a je také jednodušší svou stavbou. Prokaryotická buňka (Obr. 1.1) se skládá z buněčné stěny, cytoplazmatické membrány, cytoplazmy, nukleoidu, ribozomu a inkluze[6].



Obr. 1.1:Řez prokaryotickou buňkou [7]

**Buněčná stěna** tvoří pevný obal buňky, má za úkol chránit buňku a zároveň ji uděluje tvar. Vrstva pod buněčnou stěnou se nazývá **cytoplazmatická membrána**. Mezi nimi je tzv. periplazmatický prostor. Cytoplazmatická membrána je složena z fosfolipidové dvojvrstvy. V této vrstvě jsou zanořeny molekuly proteinů, které přenáší látky buňkou. Vrstva je obohacena o receptory, kteří na sebe vážou chemické látky, enzymy. Ty ovlivňují probíhající reakce na povrchu membrány. Proteiny umístěné v membráně se vyskytují ve dvou typech periferní a integrální. Základní funkcí cytoplazmatické membrány je dodávání a přesouvání látek mezi buňkou a okolím, ve kterém se buňka nachází a také zprostředkovává přenos informací mezi okolím a buňkou [4].

**Cytoplazma** (Obr. 1.2), je to velmi viskózní, koncentrovaný roztok organických a anorganických látek, který vyplňuje prostor buňky. Jsou v něm uloženy buněčné organely a buněčné inkluze [4].

Jádro prokaryotické buňky není ohraničeno membránou a nedělí se mitoticky, je označován jako **nukleoid**. Je tvořen jedinou kruhovou molekulou DNA (deoxyribonukleová kyselina). Nukleoid se nachází uprostřed buňky a díky kružnicovému stočení je asi tisíckrát delší než je celá buňka. Zabírá v buňce asi 20% z celkového objemu. Občas se označuje jako prokaryotický chromozom, avšak není to pravda, pro typickou skladbu chromozomu je potřeba protein, který prokaryotický chromozom postrádá oproti eukaryotickému

chromozomu[4], [6].

**Ribozomy** jsou tělíska v cytoplazmě. Nachází se v buňce v obrovských počtech až několik tisíc. Ribozom je organela, která je složena z rRNA (ribosomální ribonukleová kyselina) a proteinů. Dělí se na dvě podjednotky. Probíhá na nich tzv. translace, při níž je z řetězce RNA (Ribonukleová kyselina) syntetizován polypeptid (protein)[4], [8].

**Inkluze** se nachází v cytoplazmě a jsou zde krystalky nebo kapénky, které obsahují zásobník nebo sběr odpadních látek.

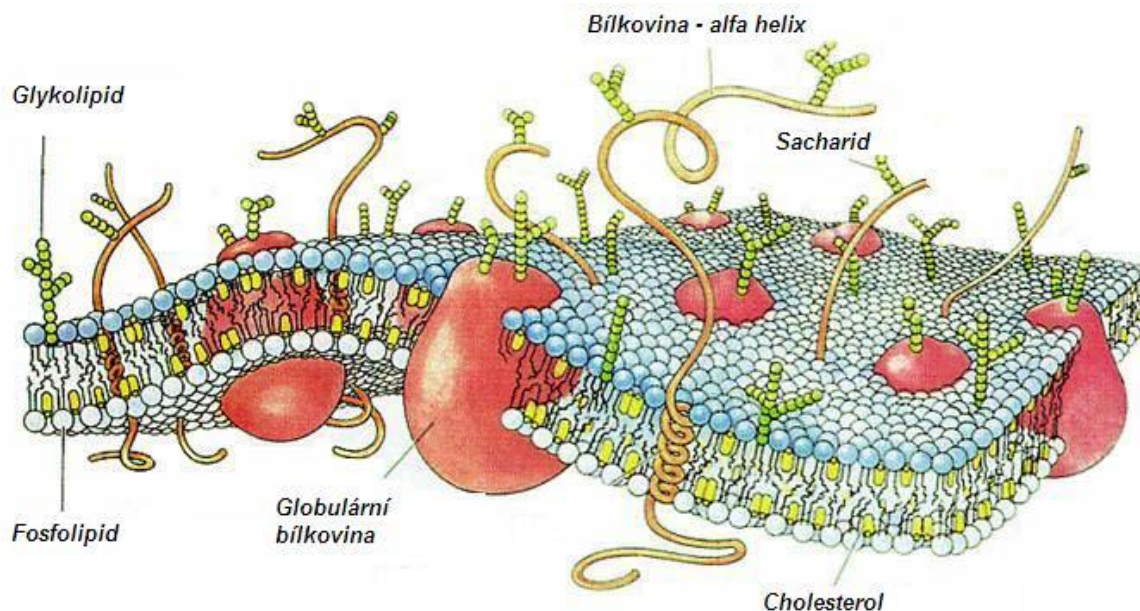
V prokaryotické buňce se vyskytují i další struktury[4]:

**Bičík**–je delší než buňka a slouží k pohybu buňky.

**Plazmidy**– malé uzavřené molekuly Deoxyribonukleové kyseliny (DNA), které se nachází v cytoplazmě a nesou s sebou genetickou informaci o odolnosti buňky vůči antibiotikům. Tato informace v nich obsažená je pouze doplňková.

**Glykokaly**– vnější polysacharidový obal buňky, který napomáhá k lepšímu přilnutí buňky k podkladům.

**Fimbrie (pily)** – jsou to krátká proteinová vlákna, která slouží k přilnavosti buněk.



Obr. 1.2: Cytoplazmatická membrána prokaryotické buňky [9]



## ***Eukaryotická***

Jedná se o typ buněk radikálně odlišný od prokaryotické buňky. Je evolučně dosti mladší, složitější a větší než prokaryotická. Její velikost se pohybuje okolo 10 – 100µm. Vnitřek eukaryotické buňky je rozdělen na kompartmenty (funkční prostory). Od prokaryotické se liší strukturou jádra, chromozomy a uspořádání vnitřních struktur, které se nazývají organely. Všechny eukaryotické buňky obsahují mitochondrie. Jádro eukaryotické buňky má složitější uspořádání, je odděleno od cytoplazmy. V cytoplazmě se nachází několik nových organel a vláknité bílkovinné útvary, které tvoří tzv. cytoskelet (buněčnou kostru). Čirá protoplazma mezi organelami se nazývá cytosol. Eukaryotické buňky můžeme rozlišit na živočišné, rostlinné a houbovitě buňky[4], [6], [10].

### ***Společné organely pro rostlinnou a živočišnou buňku:***

**Jádro** eukaryotické buňky tvoří chromatin což je určité uspořádání chromozómů, které obsahují komplex DNA, histonů a proteinů. Jádro je zde odděleno od okolních částí buňky pomocí dvojitém jaderným membránovým obalem s póry. Je největší organelou a zaujímá asi 10% z celkového objemu buňky. V jádru je také uložena genetická informace buňky a to pomocí DNA. Kromě hlavní funkce řízení má jádro další význam pro metabolismus.

V jádře se nachází **jadérko**, mohou se zde vyskytovat jedno až dvě. Jadérko, které je tvořeno proteiny a RNA není nijak ohraničeno v jádře membránou. Je to část genomu, který slouží k syntéze některých proteinů, vzniká v něm komplex rRNA a také ribozomy.

**Endoplazmatická retikulum (ER)** se nachází v blízkosti jádra. Je to membránový systém propojených váčků a kanálků, navazují na jaderný perinukleární prostor jádra. V eukaryotické buňce se vyskytuje dvojího typu hladké a drsné. Kde na drsné ER jsou připojeny ribozomy, na kterých probíhá syntéza proteinů. Hladké ribozomy neobsahují, probíhá zde syntéza lipidů a sacharidů.

**Ribozomy** jsou bílkovinná tělíska obsahující ribozomovou RNA (r-RNA). Jsou dvojího typu, volné anebo vázané na endoplazmatické retikulum.

**Golgiho aparát (GA)** je soustava měchýřů a váčků, které upravují látky vznikající na ER. Vyskytuje se ve dvou formách souvislé a nesouvislé. Soubory větších počtu plochých váčků se nazývají diktyzomy. Jeho funkce spočívá v tom, že shromažďuje odpadní a přebytečné vody a zpracovává produkty z ER.

**Mitochondrie**, v buňce se jich nachází 100-1000. Jejich obal je tvořen dvěma vrstvami, vnitřní a vnější. Vnitřní membrána je tvoří záhyby nazývané *kryta* prostor uvnitř mitochondrie je vyplněn proteinovou hmotou, které se říká matrix. Funkce mitochondrie je velice důležitá, uvolňuje se zde energie.

**Cytoskeletální systém (cytoskelet)** určuje rozložení organel v buňce. Elementy cytoskeletu však podmiňují především buněčné pohyby, aktivně či pasivně. Cytoskelet je tvořen z *mikrotubulů, mikrofilamentů* a *intermediální filamentů*. *Mikrotubula* jsou trubicovité útvary, které tvoří svazky. Mohou se prodlužovat nebo zkracovat, tím je způsoben pohyb buňky. Z mikrotubulů vznikají vlákna dělicího vřeténka, bičíky anebo řasinky. *Mikrofilamenta* se uplatňují u vzniku dceřiných buněk při dělení. Kdežto *intermediální filamenta* zajišťují buňce mechanickou pevnost a podílejí se na rozložení organel v buňce[4], [5], [6].

## Rostlinná buňka

Rostlinná buňka (Obr. 1.3) je základním stavební a funkční jednotkou všech rostlin. Rostlinná buňka se vyznačuje pevnou buněčnou stěnou, cytoskeletu a množstvím organel. Dále pak obsahuje mnoho membránových organel, jádro, endoplazmatické retikulum, Golgiho aparát, mitochondrie a mimo jiné také vakuoly a plastidy.

### Rozdíly od obecné eukaryotické buňky:

**Buněčná stěna** u rostlinné buňky tvoří ochranu před vlivy vnějšího prostředí a zpevňuje buňku. Její základem je polysacharid celulóza, který je uspořádán do vláknitých útvarů mikro fibril. Mikro fibrily tvoří kostru buněčné stěny. Mladé buňky se vyznačují primární stěnou, je pružná a rozlišuje se šířky. U starších nerostoucích buněk se vyskytuje sekundární stěna, vzniká přikládáním dalších nových vrstev.

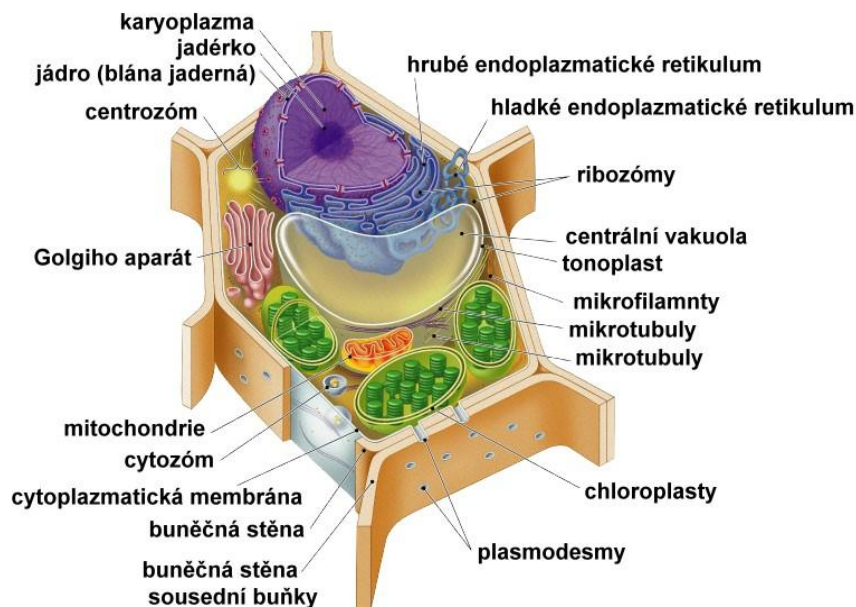
**Vakuola** zde se nacházejí odpadní a zásobní látky v kapalném skupenství. Vakuola je od cytoplazmy oddělena membránou zvaná tonoplast. U mladých buněk se vyskytuje několik malých vakuolek, které postupem stáří buňky se mění v jednu velkou vakuolu. Slouží také jako zásobárna vody a udržuje tlak v buňce.

**Plastidy** jsou to oválná tělíska uzavřená obalem ze dvou membrán, obsahují barviva a zásobní látky. Podle přítomnosti převládajících barviv je lze rozdělit do tří skupin:

Chloroplasty – jsou to větší mitochondrie, umožňují fotosyntézu rostlin. Světelnou energii pak využívají k rozkladu vody. Povrch chloroplasty kryjí dvě membrány, z nichž jedna je napnutá, a proto se na ní nevytváří žádné ohyby. Vnitřní prostor chloroplastu je tvořen proteinovou hmotou zvanou *stroma*. Vlivem odškrfování od vnitřní membrány vznikají *tylakoidy*, které jsou stupňovitě na sebe uloženy v tzv. grana.

Chromoplasty – obsahují karoteny a xantofyly, které určují zbarvení a strukturu.

Leukoplasty – vykytují se v neosvětlených částech, jako je např. kořen. Obsahují škrob, proteiny, nebo lipidy [4], [5], [6], [10].



Obr. 1.3: Řez rostlinnou buňkou [11]

## Živočišná buňka

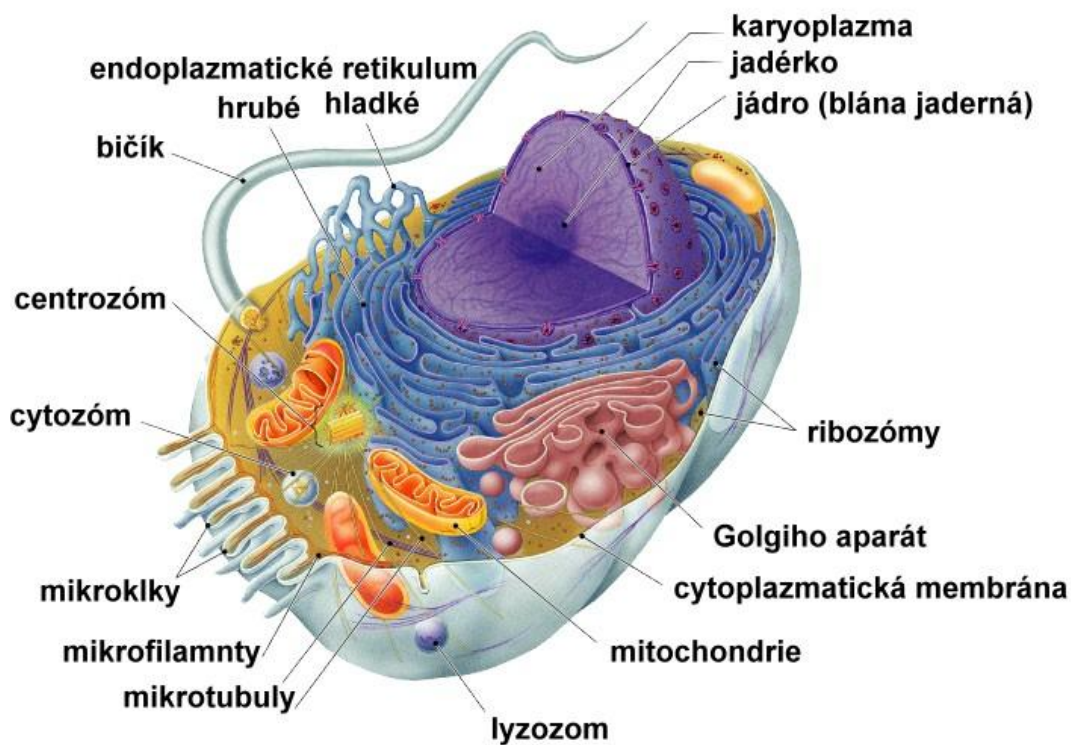
Struktura živočišné buňky (Obr. 1.4) se dosti podobá buňce rostlinné. Živočišná buňka se vyznačuje tím, že nemá **buněčnou stěnu**. Její obal se skládá z cytoplazmatické membrány, která je obohacena o cholesterol. U živočišné buňky nenalezneme plastidy. Vakuoly se zde nachází v malém počtu.

Hlavním znakem pro živočišné buňky jsou **lysozomy**. Jedná se o kruhové váčky, které jsou uzavřené membránou a vznikají „odškrcováním“ od GA. Jejich funkcí je napomáhat v rozkladu nadbytečných a poškozených struktur buňky.

Jedna z dalších organel, která se vyskytuje v živočišných buňkách, je **centriola**. Tato organela napomáhá k jadernému dělení vzniku dělicího vřeténka.

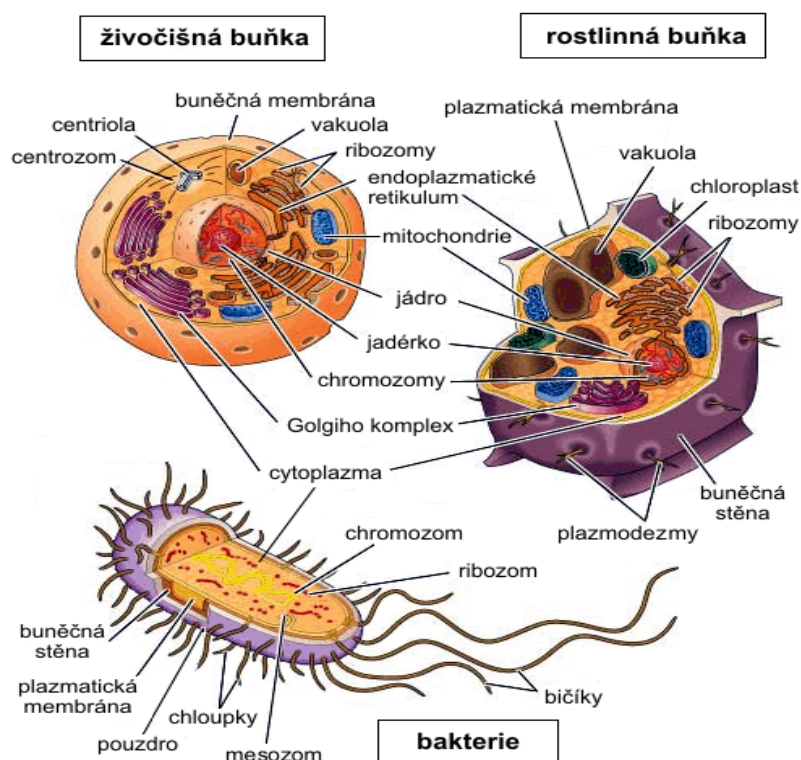
**Inkluze** je volně vložena v cytoplazmě. Zásobní látkou jsou zde polysacharidy, lipidy anebo glykogen.

Živočišná buňka je opatřena **bičikem** anebo **řasinkou**. Jsou podobné svoji stavbou, skládají se z mikrotubulů, v buňce jsou pak ukotveny bazálním tělískem.



Obr. 1.4:Řez živočišnou buňkou [11]

## Srovnání rostlinné a živočišné buňky



Obr. 1.5: Srovnání mezi živočišnou buňkou, rostlinnou buňkou a zástupcem prokaryotické buňky bakterií [11]

Tab. 1: Srovnání prokaryotických a eukaryotických buněk [12]

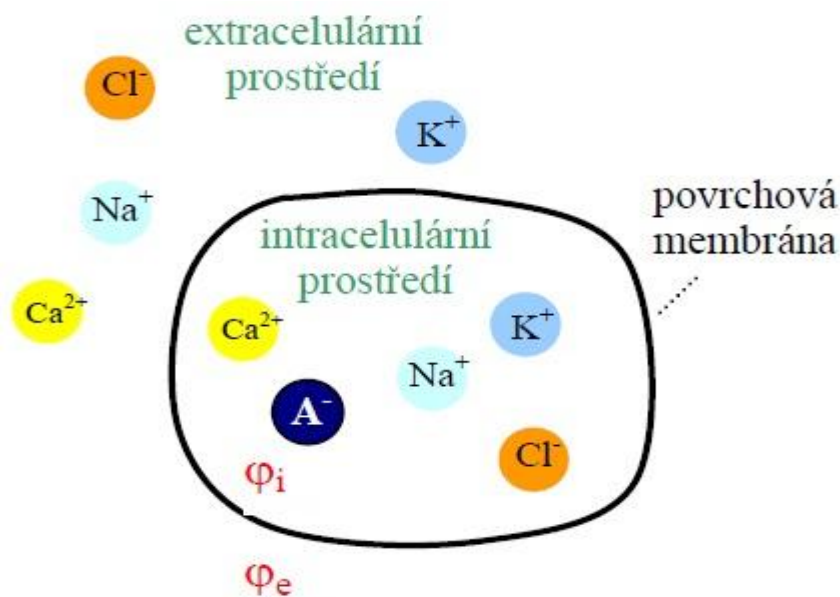
| Charakteristika           | Prokaryota                                    | Eukaryota   |
|---------------------------|---|---|
| Jádro                     | Ne  | Ano   |
| jadérko                   | Ne  | Ano   |
| Genetická informace       | jediný chromozom                              | mnohočlenné chromozomy                                |
| DNA                       | spojená s HLP                                 | spojená s histony                                     |
| Syntéza proteinů          | spřažena s transkripcí v stejném kompartmentu | RNA se tvoří v jádře a pak je přenesena do cytoplazmy |
| Energetický metabolismus  | anaerobní a aerobní                           | Aerobní   |
| Respirační enzymy         | v plazmatické membráně                        | v mitochondriích                                      |
| Množení buňky             | dělení  | mitóza a meióza                                       |
| Buněčná stěna             | přítomna                                      | Chybí   |
| Cytoskelet                | Ne  | Ano   |
| Endocytóza nebo exocytóza | Ne  | Ano   |
| Organely                  | nepřítomny                                    | přítomny  |

## 1.2 Bioelektrické jevy

Bioelektrické jevy se zabývají zkoumáním elektrických signálů ve všech živých organismech, vzrušivých tkání a také živých buněk. Tyto signály jsou životně důležité pro chod organismu, jsou dopravovány po vlákních nervových a svalových buňkách, které vedou k jejich kontrakci. Signály šířící se po vlákních mohou být doprovázeny elektromagnetickým polem z okolního prostředí. Podstatou je zkoumání elektrických a magnetických signálů, které působí na daný povrch buňky. Z toho zkoumání pak vyplývají různé diagnostické metody jako je např. elektrokardiografie, elektroencefalografie, atd.

### 1.2.1 Struktura membrány

Buňka, jak už bylo řečeno je nejmenší jednotka živých systémů, je schopna samostatné existence a splňuje všechny základní znaky života. Pomocí buňky jsou pak tvořeny různé struktury, ze kterých se skládají živé organismy. Pro pochopení bioelektrických jevů je potřeba se seznámit se strukturami. Mezi struktury se řadí buněčná membrána buňky vodné roztoky nacházející se ve vnějším (extracelulárním) a vnitřním (intracelulárním) prostředí. V roztocích, které se nacházejí v obou prostředí, obsahují anorganické ionty (**kationty**  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  a **aniont**  $Cl^-$ ). Ve vnitřním prostředí se navíc uplatňují také organické anionty, které značíme  $A^-$ . Z pohledu elektrického proudu se jedná o elektrolyty. Membránové napětí je rozdílem mezi elektrickými potenciály intracelulárního a extracelulárního [13].



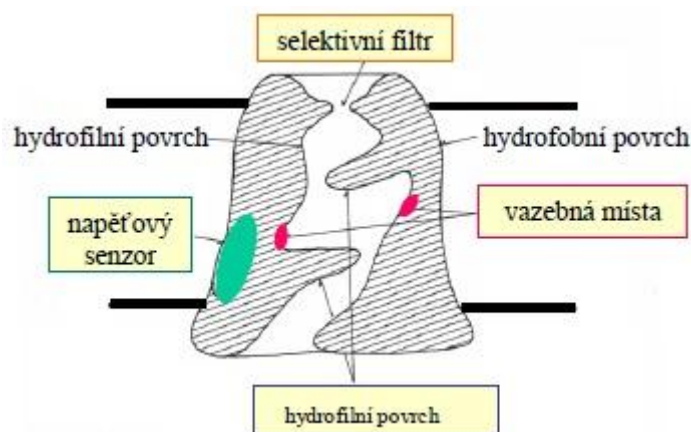
Obr. 1.6: Povrchová membrána a elektrolyty vně a uvnitř buňky [13]

Zkoumáním struktury a vlastností povrchové membrány (Obr. 1.6) buňky bylo dokázáno, že jejím základem je elektricky nevodivá dvojvrstva tvořená molekulami fosfolipidů, ve které se jsou zabudovány makromolekuly (bílkovin) proteinů, které plní různé funkce. Z pohledu elektrického jsou zde podstatné dva druhy, budeme je označovat jako **kanály** a **přenašeče**. Přenašeče i kanály jsou transportní mechanismy, které umožňují přenos iontů nevodivou fosfolipidovou membránou.



## Kanálové systémy

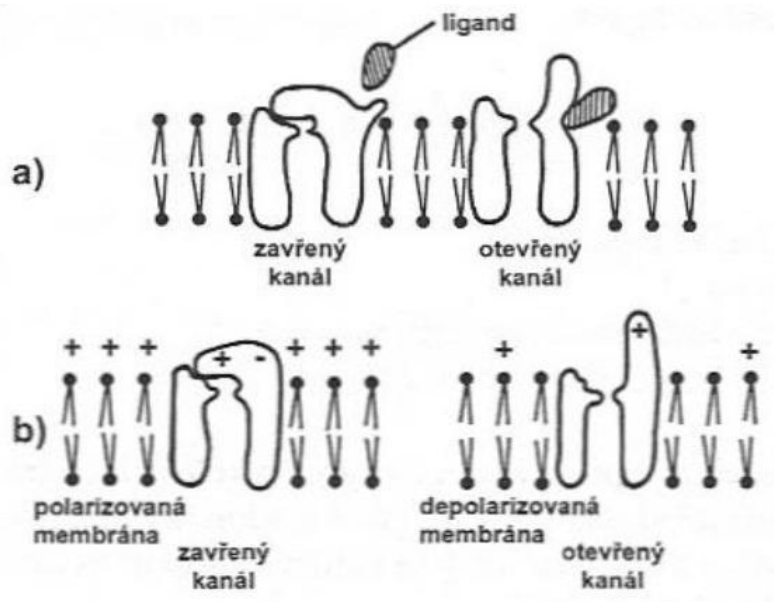
Prvním mechanismem výměny iontů mezi intracelulárním a extracelulární prostředím jsou kanálové systémy. Jsou tvořeny molekulami bílkovin. Hlavní jejich funkcí je vytvářet póry selektivně propustné pro některé ionty. Jejich princip je založen na vytvoření póru v membráně, který umožňuje řízený postup iontů. Kanál je skládán z funkčních částí polypeptidového řetězce, který prochází membránou, kvůli tomu pak rozlišujeme ne jeho povrchu části hydrofobní a hydrofilní. Jeho schéma vidíme na Obr. 1.7.



Obr. 1.7: Schéma membránového kanálu [13]

Významnou roli zde má selektivní filtr. Dochází zde k vzájemnému působení mezi ionty a shluky kanálového proteinu. Selektivní, protože propouští jen určité druhy iontů. Ionty před vstupem do filtru jsou hydratovány (obklopeny vrstvou polárních molekul vody) a po průchodu filtrem jsou částečně nebo úplně této hydratace zbaveni. Tento filtr není zcela dokonalý, dochází zde i k případům že projdou i jiné ionty.

Vrátkový systém je další funkční jednotkou, která ovlivňuje funkci kanálu. Dochází zde k otevírání a zavírání kanálů kvůli změnám konformace molekul bílkovin. Vrátkování je náhodný proces, kdy kanál přechází řadou uzavřených stavů a zpravidla jedním otevřeným stavem. Tyto přechody jsou mnohdy závislé na membránovém napětí. Na tuto změnu reaguje určitá část kanálu, je nazývána jako napěťový senzor. Jedná se o tzv. napěťové vrátkování. Máme i další mechanismy, které rozhodují o stavu kanálu. Mezi ně patří chemické vrátkování. Je založeno na principu navázání ligandu na bílkovinou molekulu a tím dojde ke změně konformace [13], [16].

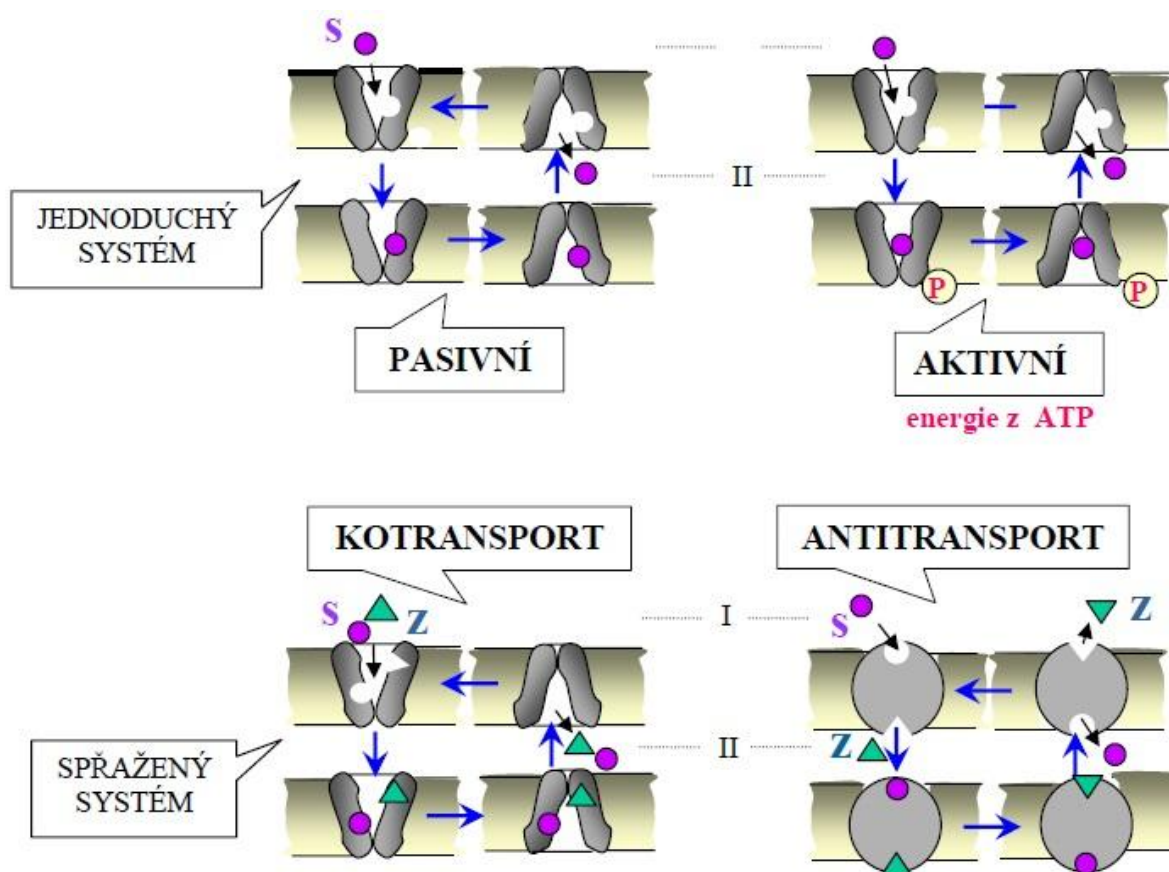


Obr. 1.8: A: Chemické vrátkování; B: Napěťové vrátkování [16]

### ***Přenašečové systémy***

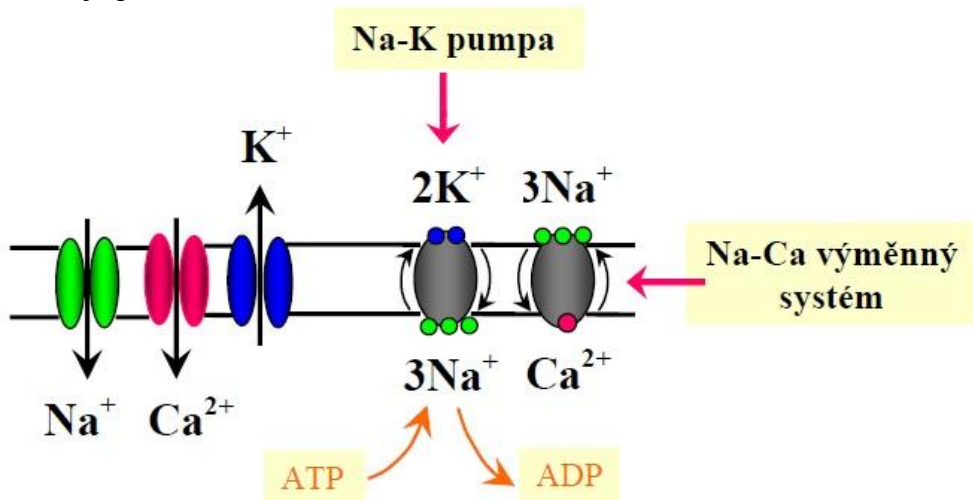
Druhým mechanismem výměny iontů mezi intracelulárním a extracelulárním prostředím jsou přenašečové systémy. Podobně jak u kanálu, tak i molekuly bílkovin vytváří přenašečový systém. Na rozdíl od kanálů je přenášený iont přístupný pouze z jedné strany membrány. Přenášený iont se váže k přenašeči z jedné strany membrány a na druhé straně membrány je uvolňován. Směr přenosu iontu závisí na elektrochemickém potenciálu přenášených iontů z obou stran membrány. Pokud přenos iontů probíhá spontánně z místa vyššího do místa nižšího elektrického a nedochází u nich k dalším reakcím, mluvíme o tzv. pasivním transportu. Pro opačný případ přenosu iontu je zapotřebí velký přísun energie, kvůli změně směru elektrochemického potenciálu. Tato energie se získává štěpením molekuly adenosintrifosfátu (ATP). Zde se hovoří o aktivním transportu [13], [16], [17].

Přenašečový systém může také zprostředkovat spřažený transport dvou druhů iontů (***kotransport, antitransport***). O jeho výsledném směru transportu rozhoduje celková energetická bilance. Jednotlivé druhy transportu jsou zobrazeny na Obr. 1.9.



Obr. 1.9: Způsoby přenosu iontů [13]

V membránových buňkách můžeme pozorovat různé druhy přenašečových systémů. Mezi jednu z nejdůležitějších přenašečových systémů patří Na/K a Na/Ca pumpa. Hlavní úkol této pumpy je uchovávat intracelulární prostředí konstantní. Princip pumpy Na/K spočívá v tom, že vytěsňuje z buňky tři ionty  $\text{Na}^+$  a zároveň vrací do buňky dva  $\text{K}^+$  ionty, čímž je přes membránu přenesen náboj. Princip druhé pumpy Na/Ca je založen na tom, že vytěsňuje z buňky ionty  $\text{Ca}^{2+}$  a současně poskytuje vstup tří  $\text{Na}^+$  a podobně jako u pumpy Na/K dochází přenesení náboje přes membránu.



Obr. 1.10: Schéma přenašečového systému [13]



### 1.2.2 Klidové membránové napětí

Vznik membránového napětí se dá demonstrovat pomocí následujícího experimentu. Představme si, že je nejprve membrána zcela nepropustná pro všechny ionty, ale po určitém okamžiku se stane propustnou pouze pro ionty draslíkové  $K^+$ . Při splnění podmínek (1) a (2) nastane to, že  $K^+$  ionty budou vlivem difuze postupovat membránou přes kanály směrem ven. Tím dojde k narušení elektrické rovnováhy. Vnitřek buňky získá negativní potenciál vzhledem k vnějšímu prostředí a v membráně se vytvoří elektrické pole. Dále dojde k tomu, že elektrický gradient, který je v membráně, působí proti koncentračnímu gradientu. Následně se ustaví rozdíl potenciálu do rovnováhy a proud, který teče membránou je nulový. Tomuto stavu se říká rovnovážné napětí, je závislé na poměru koncentrací (pro tento případ draslíkových  $K^+$ ) v jednom i druhém prostředí a vyjadřuje se pomocí Nernstova vzorce (3) vyplývající z termodynamických úvah[13], [16], [17]:

$$[Na^+]_e \gg [Na^+]_i, [K^+]_e \ll [K^+]_i \quad (1)$$

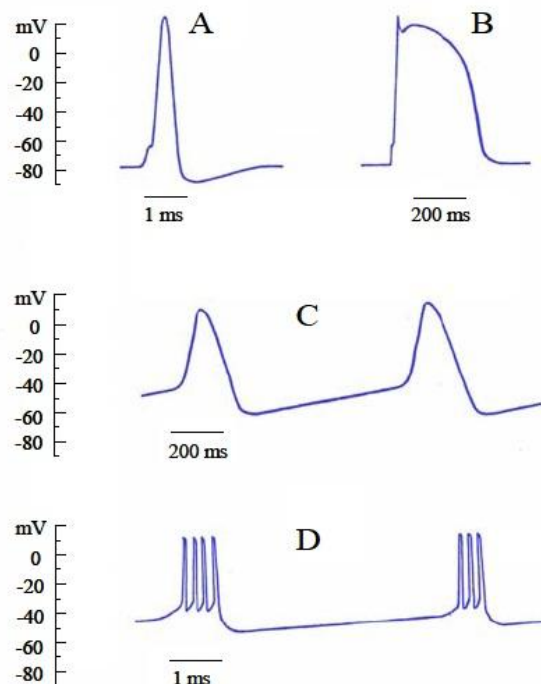
$$[Ca^{+2}]_e \gg [Ca^{+2}]_i, [Cl^-]_e \gg [Cl^-]_i \quad (2)$$

$$U_x = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[x]_e}{[x]_i} \quad (3)$$

kde  $R$  je plynová konstanta ( $8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $T$  je absolutní teplota,  $F$  je Faradayův náboj ( $96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $z$  je počet elementárních nábojů, které nese iont  $Xz$  (včetně znaménka; např. pro  $\text{Cl}^-$  je  $z = -1$ ). Nernstův vzorec není nijak omezen, používá se i pro výpočet rovnovážného napětí pro vícemocné kationty.

### 1.2.3 Akční napětí

Akční napětí lze chápat jako rychlou změnu membránového napětí, je schopno se šířit do okolního prostředí. Akční napětí vzniká u vzrušivých (excitabilních) buněk. Hlavní podmínkou vzniku je podmíněné nadprahové podráždění, které se vyvolává se pomocí chemických činitelů, nebo změnou napětí na membráně. Akční napětí není nijak závislé na nadprahovém podmětu, ale u různých druhů vzrušivých buněk je velikost a doba trvání impulzu akčního napětí různá[13], [16].



Obr. 1.11: Charakteristické průběhy akčního napětí. A - nervové vlákno; B - svalová buňka srdeční komory; C -buňka sinoatriálního uzlu; D -buňka hladkého svalu [13]

## 1.3 Vlastnosti vnějšího prostředí

Fyzika je vědní obor, který zkoumá zákonitosti přírodních jevů. Součástí fyziky je také nauka o elektřině a magnetismu. Zabývá se teda studiem elektromagnetických jevů, dějí probíhajícími v elektromagnetickém poli a interakcemi tohoto pole s látkou. Elektromagnetické pole je tedy forma hmoty, jejímž prostřednictvím se uskutečňují elektromagnetické interakce. Tato interakce probíhá mezi elektricky nabitými částicemi nebo elektricky nabitými tělesy. Elektromagnetické pole má dvě navzájem související složky. Jednou z nich je pole elektrické a druhou pole magnetické[19].

### 1.3.1 Elektrické pole

Elektrické pole vytvořené pomocí konstantních elektrických nábojů se nazývá elektrostatické pole. Elektrostatické pole se projevuje vzájemným působením elektricky nabitých částic. Velikost tohoto vzájemného působení vyjadřuje elektrická síla  $\mathbf{F}$ . K vytvoření elektrostatického pole je zapotřebí zdroj částic, které nesou elektrický náboj.

Elektrický náboj se označuje písmenem  $Q$ . Je to skalární fyzikální veličina, která je spojována se vznikem vzájemné interakci mezi tělesy. Velikost elektrické síly  $\mathbf{F}$  je přímo úměrná velikosti náboje  $Q$ , na nějž síla působí. Jednotkou elektrického náboje je coulomb  $C$ . Pro zjednodušení situace, postavíme proti sobě 2 bodové náboje, které na sebe působí, o velikosti  $Q_1$  a  $Q_2$ . Pomocí Coulombova zákona vyjádříme elektrickou sílu mezi dvěma náboji vzorcem:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q_1Q_2}{d^2} \quad (4)$$

Kde  $\mathbf{F}$  je velikost síly a vyjadřuje se v [N], dále pak  $d$  označuje vzdálenost mezi náboji [m]. Permittivita prostředí je závislá na prostředí, ve kterém se nachází a označuje se  $\epsilon$ . Je dána součinem dvou prostředí a to, permitivity vakua ( $\epsilon_0 = 8,854188 \cdot 10^{-12} [\text{Fm}^{-1}]$ ) a relativní permitivitě  $\epsilon_r$ .

Síla může být přitažlivá nebo odpudivá. Při síle přitažlivé mají náboje různý charakter (jeden kladný a druhý záporný). V opačném případě síla odpudivá, náboje mají stejný charakter (jeden kladný a druhý kladný nebo jeden záporný a druhý také záporný náboj).

Elektrické pole pozorujeme, budeme-li v prostoru mít pouze jeden zkušební náboj  $Q$ , a budeme řídit jeho velikost elektrické síly a směr. V každém bodě prostoru kolem něho bude síla různá. Proto obraz pole kolem náboje znázorníme pomocí siločar. Siločáry nám zde vyznačují dráhy, po kterých se pohybují zkušební náboje, které jsou uvolněny vlivem působení síly pole. Tím se dostáváme k teorii, že velikost síly je úměrná velikosti zkušební síly. Definujeme proto intenzitu elektrického náboje  $\mathbf{E}$  [18], [19].

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (5)$$

Jednotkou intenzity elektrického pole je  $[\text{N} \cdot \text{C}^{-1}]$ , ale používá se častěji jednotka  $[\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$ ,  $q$  je elektrický náboj.

### **Projevy elektrického pole na člověka**

Hodnoty vodivosti a permitivity biologických tkání vzhledem ke vzduchu jsou při frekvencích vyskytujících se při přenosu elektrického výkonu takové, že vnější elektrické pole je v místě, kde vstupuje do těla, vždy kolmé k jeho povrchu, a pole uvnitř těla  $E_{int}$  je vždy o mnoho řádů menší než vnější pole ve vzduchu  $E_{vzd}$  [19]. Výsledek vychází z Maxwellových rovnic při uvážení počátečních okrajových podmínek mezi vzduchem a tkání pro kolmou složku elektrického pole. Tedy pokud nastane případ.

$$\gamma_{int} \gg \omega * \epsilon_{int} \quad \omega * \epsilon_0 \gg \gamma_{vzd} \left| \frac{E_{int}}{E_{vzd}} \right| \approx \frac{\omega * \epsilon_0}{\gamma_{vzd}} \approx 0,7 * 10^{-8}. \quad (6)$$

Kdy kruhová frekvence  $\omega$  (50 Hz), vnitřní vodivost elektrolytu lidské tkáně  $\gamma_{int}$  je rovna hodnotě 0,5S/m. Toto řešení odpovídá ustálenému stavu rozloženého náboje mezi vzduchem a tělem při síťovém napětí. Vodivosti a permeabilita se u biologických materiálů mění nepatrně. Nejhorší případ může nastat, kdy bude v dosahu hlavy dospělého člověka elektrické pole o intenzitě okolo 12000 V/m. Dotyčná osoba bude bosá a půjde v dešti po kolejkách, zde bude vycházet špičková hodnota elektrického pole v elektrolytu těla asi 80  $\mu\text{V/m}$  [20].

### **1.3.2 Magnetické pole**

Magnetické pole je fyzikálním polem. S rozdílem od elektrického pole magnetické pole působí na elektricky nabitě objekty magnetickou silou  $F_m$ , která je závislá na rychlosti v pohybu daného tělesa. Potom kolem toto pole vzniká kolem pohybujících se elektrických nábojů.

Magnetické pole se projevuje silovými účinky na jiné vodiče protékané elektrickým proudem, na pohybující se náboj nebo jiné magnety. Základní veličinou magnetického pole,

pomocí kterého se tyto silové účinky posuzují, je magnetická indukce  $\mathbf{B}$ . Jednotkou magnetické indukce  $\mathbf{B}$  je tesla [T][18].

Magnetická indukce  $\mathbf{B}$  je vektorová veličina, která vyjadřuje velikost síly magnetického pole. Velikost magnetické indukce je v daném bodě magnetického pole definována jako maximální síla  $\mathbf{F}_m$ , na kterou působí elektrický náboj  $Q$ , který má určitou rychlost  $v$ .

$$\mathbf{F}_m = Q \times \mathbf{v} \times \mathbf{B} \times \sin \alpha \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{F}_{max}}{Qv}. \quad (8)$$

Magnetickou indukci může znázornit pomocí indukčních čar. Jedná se o orientované čáry, jejichž orientované tečny v libovolném bodě zobrazují směr magnetické indukce. Jejich směr se vyznačuje šipkou. V porovnání s elektrickými siločarami jsou magnetické siločáry orientovány od kladně nabitých těles k záporně nabitým, magnetické siločáry jsou vždy uzavřené křivky. Hustota magnetických indukčních siločar je rovna velikosti vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$ .

Síla magnetického pole, která působí na pohybující se částice, je vždy vektor této síly kolmý na směr rychlosti  $\mathbf{v}$ , tak i na vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a úměrný velikosti náboje  $Q$ .

$$\mathbf{F} = Q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]. \quad (9)$$

Síla  $\mathbf{F}$  má tedy kolmý směr na vektor  $\mathbf{B}$ , její velikost určíme podle vztahu (7), popisuje např. silové působení uvnitř elektronového mikroskopu na volný elektron.

Další veličinou, kterou lze popsat magnetické pole, je intenzita magnetického pole  $\mathbf{H}$ , která má jednotku ampér na metr [ $\text{Am}^{-1}$ ], a je charakterizována pomocí rovnice:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (10)$$

kde  $\mu$  je magnetická permeabilita,  $\mu_r$  relativní permeabilita prostředí,  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Hm}^{-1}]$ ).

Ampérův zákon celkového proudu zde určuje kvantitativní vztah mezi magnetickým polem a proudem, který toto pole budí. Ampérův zákon celkového proudu můžeme znát také pod názvem věta o obvodovém napětí v magnetickém poli[17], [18].

$$\int_i \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (11)$$

### **Magnetický indukční tok**

Velikost magnetického pole, která postupuje určitou plochou jádra transformátoru, cívkou elektrického stroje, atd. můžeme definovat jako magnetický tok  $\Phi$ . Je to skalární veličina, která představuje celkový počet magnetických indukčních čar, v daném místě magnetického pole orientovaný plochou. Pokud budeme uvažovat, že magnetické pole je homogenní, pak magnetický indukční tok  $\Phi$  je dán součinem:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \cdot \cos \alpha, \quad (12)$$

kde  $\alpha$  je úhel mezi vektorem indukce  $\mathbf{B}$  magnetického pole a kolmicí na plochu  $S$ . Tento vztah však můžeme vyjádřit ve skalární formě.

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}. \quad (13)$$

Pokud nastane případ, že magnetické pole není homogenní, je zapotřebí celou plochu  $S$  rozdělit na několik malých elementů  $dS$  a spočítat velikost magnetického indukčního toku  $d\Phi$ . Ten je pak definován pomocí vzorce

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}. \quad (14)$$

Jeho jednotkou je weber [Wb].

S následujícím vztahem je spojen vztah (13), který udává velikost vektoru plošné hustoty magnetického toku.

$$\mathbf{B} = \frac{d\Phi}{dS \cos \alpha} = \frac{d\Phi}{dS_n}, \quad (15)$$

kde  $\alpha$  je úhel mezi vektory magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a plošného elementu  $dS$ ,  $dS_n$  je pak průmět plošného elementu  $dS$  do roviny kolmé ke směru magnetické indukce. Tento vztah však platí pro nehomogenní magnetické pole [18], [19].

### **Projevy magnetického pole na člověka**

Pokud vezmeme v potaz, že permeabilita živé tkáně je velice podobná permeabilitě vakua, projde magnetické pole tělem bez překážky. Avšak může nastat případ, kdy bude interakce mezi magnetickým polem a člověkem významná. V těle by se musel vyskytnout trvalý zdroj magnetické domény, o dostatečné velikosti, který by byl velký ve srovnání s  $k \cdot T$  ( $k$  – Boltzmannova konstanta,  $T$  – teplota těla), aby mohla konkurovat interakční energii. A dále by musel být interakce významná především u stejnosměrných polí.

Tyto domény byly nalezeny v živých organismech od bakteriích až po mořské živočichy a také člověka. Předpokládá se, že tyto nalezené magnetické domény slouží u některých živočichů k navigaci. Jedna magnetická doména je asi 50nm široká a její magnetický moment  $m$  má velikost kolem  $6 \cdot 10^{-17} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ . U člověka byla také nalezena jedna takováto magnetická doména a to v nadledvince s polem o velikosti  $1 \mu\text{T}$ . Přímá interakce s magnetickým polem proudu tekoucím dráty vedení přenášející vysoké výkony by tedy byla překryta tepelnými efekty [20].

### **1.3.3 Elektromagnetické pole**

Elektromagnetické pole je fyzikální pole, které je složeno ze dvou polí. První z nich je pole magnetické  $\mathbf{B}$  a druhé pole elektrické  $\mathbf{E}$ . Popis elektromagnetického pole je pomocí čtyř Maxwellových rovnic. Nejdůležitější rovnice pro popis, jsou rovnice I a II, které vyjadřují vztah mezi elektrickým a magnetickým polem. Rovnice II a IV popisují, co je jejich zdroje [18], [19].

I. První Maxwellova rovnice (Zákon celkového proudu, zobecněný Ampérův zákon)

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (16)$$

II. Druhá Maxwellova rovnice (Zákon elektromagnetické indukce, Faradayův indukční zákon)

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (17)$$

III. Třetí Maxwellova rovnice (Gaussův zákon elektrostatiky)

$$\oint_c \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (18)$$

IV. Čtvrtá Maxwellova rovnice (Zákon spojitosti indukčního toku)

$$\oint_c \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (19)$$

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (20)$$

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (21)$$

### ***Projevy elektromagnetického pole na člověka***

Při působení na buňku dochází projevům celé buňky. Na hodnotě změn záleží mnoho faktorů, jako jsou například velikost magnetické indukce a expoziční doba působení. Avšak při terapeutickém používání těchto působení, se na buňkách projevují jen slabé změny, které jsou po ukončení působení slabým zářením vráceny zpět do původní podoby. Při použití silnějších magnetických polí, po delší dobu, může dojít i k deformaci buňky. Tyto změny už nelze vrátit zpět.

Při ozařování orgánů a tkání elektromagnetickým polem, dochází ke zvýšené spotřebě kyslíku. Která pak způsobí nadměrný průtok krve. V ozáření oblasti stoupá teplota tkáně o 0,5°C. Dochází zde také k uvolnění křečí ve svalech. Dále pak bylo ukázáno, že u slabších jedinců docházelo ke zvýšenému pocení, snížení krevního tlaku a zvýšení žaludečních šťáv. Tyto změny jsou pouze na krátkou chvíli, po určité době se zase vrátí zpět do původního stavu.

Dále bylo prokázáno, že ozařování pulzním magnetickým polem pomáhá k hojení otevřených povrchních ran a urychlení čerstvých zlomenin a kloubů [19].

## **1.4 Rozdělní magnetických látek a polí**

Magnetické pole je tvořeno pohybem částic s elektrickým nábojem (protony a neutrony), které jsou neustále v pohybu. Tyto elektricky nabitě částice pak periodicky běhají pro uzavřené orbitě. Její tvar je ekvivalentem proudové smyčky tvaru dráhy a vytváří tak magnetický moment. Magnetický moment je jinak nazýván *orbitální (dráhový) magnetický moment*, který má elektron i proton. Další důležitou vlastností elektronu je *spinový magnetický moment*. Jedná se o rotaci elektronu kolem vlastní osy. Celkový magnetický moment je dá vektorovým součtem spinového momentu a orbitálního momentu pro všechny elektrony a protony.

Magnetická susceptibilita  $\chi_m$  a relativní permeabilita  $\mu$ , jsou fyzikální veličiny, které popisují magnetické vlastnosti látek. Magnetické vlastnosti ovlivňují především magnetické dipóly, které jsou buď permanentní, nebo jsou naindukovány z vnějšího magnetického pole. Z pohledu velikosti magnetického momentu atomů při nepřítomnosti vnějšího magnetického pole rozdělujeme látky na diamagnetické, které jsou charakterizovány tím, že nemají vlastní

magnetický moment a na látky paramagnetické, které mají vlastní magnetický moment. Speciálním případem jsou pak látky feromagnetické, které patří mezi látky paramagnetické. Vyznačují se tím, že mají větší permeabilitu a susceptibilitu ve srovnání s ostatními paramagnetickými látkami [28], [29].

Pro výpočet magnetické susceptibility je zapotřebí znát následující vztahy:

$$\mu_r = 1 + \chi_m, \quad (22)$$

kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita, která je bezrozměrná a charakterizuje magnetické vlastnosti. Další důležitý vztah je pro výpočet magnetické susceptibility:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (23)$$

kde  $M$  je magnetizace a  $H$  je intenzita magnetického pole. Magnetizace a intenzita magnetického pole se uvádí v jednotce ampér na metr ( $A \cdot m^{-1}$ ).

Podle velikosti magnetické susceptibility, můžeme látky rozdělit na:

1. Paramagnetické, kde  $\chi_m < 0$ ,  $\mu_r < 1$
2. Diamagnetické, kde  $\chi_m > 0$ ,  $\mu_r > 1$
3. Feromagnetické, kde  $\chi_m > 0$ ,  $\mu_r \gg 1$

### ***Diamagnetismus***

Diamagnetismus je vlastnost všech látek. Látku vykazující diamagnetismus lze překrýt paramagnetismem nebo feromagnetismem, protože je velmi slabý. U látek, kde se diamagnetismus vyskytuje v čisté podobě, má zápornou magnetickou susceptibilitu  $\chi_m$ , její hodnoty se velmi málo liší od nuly a relativní permeabilita  $\mu_r$ , je jen málo menší než jedna. Diamagnetismus není závislý na teplotě z důvodu tepelného pohybu molekul, který jej nijak neovlivňuje.

### ***Paramagnetismus***

Paramagnetismus je přítomen u látek, které mají nenulový magnetický moment. Vložíme-li takovou látku do magnetického pole, dojde k přeorientování magnetických momentů jednotlivých atomů, či molekul do směru pole. Paramagnetizace je založena na otáčení magnetických momentů atomu, či molekul do směru působícího magnetického pole. Pojem paramagnetismus se používá výhradně pro materiály, které vykazují vlastnosti paramagnetismu, ne však feromagnetismu.

### ***Feromagnetismus***

Feromagnetické látky mají zvláštní postavení mezi magnetiky. Feromagnetické vlastnosti vyazuje např. železo, nikl a několik dalších prvků. Vychází z paramagnetických látek, až na to, že je možno v nich vzbudit i malým vnějším magnetickým polem velmi silnou magnetizaci, kterou si feromagnetika udrží i po odstranění vnějšího magnetického pole. Pojem feromagnetismus se používá výhradně pro materiály, které vykazují vlastnosti feromagnetismu [18], [29].

### 1.4.1 Nestacionární magnetické pole

Zdrojem nestacionárního magnetického pole je pohybující se vodič s konstantním nebo časově proměnným elektrickým proudem, dále pak pohybující se permanentní elektromagnet nebo magnet anebo nepohybující se vodič s časově proměnným elektrickým proudem. Vlastnosti nestacionárního magnetického pole se mění v čase a charakteristickou veličinou nestacionárního pole je elektromagnetická indukce.

#### *Elektromagnetická indukce*

Hlavní příčinou vzniku indukovaného elektrického pole je nestacionární magnetické pole, které je nazváno elektromagnetická indukce. V tomto poli vznikne na obou koncích cívky indukované elektromotorické napětí a vlivem uzavření obvodu cívky prochází indukovaný proud[30].

#### *Magnetický indukční tok*

Jedná se o skalární veličinu  $\Phi$ , jednotkou indukčního toku je Wb (weber). Tato veličina je nutná pro kvantitativní popis elektromagnetické indukce. Zde uvážíme, že máme rovinnou plochu o daném obsahu  $S$ . Tato plocha je umístěna do homogenního magnetického pole o magnetické indukci  $\mathbf{B}$ . Pokud je plocha kolmá vzhledem k magnetickým indukčním čarám, platí vzorec

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot S. \quad (24)$$

Pokud však je naše daná rovina není kolmá vzhledem k indukčním čarám, je nutno uvažovat velikost úhlu  $\alpha$ , který svírá magnetická indukce  $\mathbf{B}$  a plocha  $S$ [30].

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot S \cdot \cos \alpha. \quad (25)$$

#### *Faradayův zákon elektromagnetické indukce*

V roce 1831 Michael Faraday dělal pokusy s magnetem umístěným ve smyčce. Zjistil, že při pohybu magnetu vzhledem k smyčce, dojde k indukování proudu. Při přibližování magnetu k smyčce dojde k indukci proudu. Při pohybu magnetu od cívky se indukuje proud opačné polarity. Tento jev je označován jako elektromagnetická indukce. Znění Faradayova zákona:

Při změně magnetického indukčního toku ve vodiči za dobu  $\Delta t$  o  $\Delta\Phi$ , vzniká ve vodiči indukované elektromotorické napětí, jehož střední hodnota je definována vztahem[31], [40]:

$$U_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (26)$$

#### *Indukovaný proud (Lenzův zákon)*

Pro vysvětlení indukovaného proudu si představíme hliníkový kroužek, který umístíme na pohyblivý stojánek. Pokud do tohoto kroužku zasuneme magnet, dojde k vychýlení kroužku ve směru magnetu. Naopak při prudkém vytažení magnetu z kroužku se kroužek vychýlí na opačnou stranu vzhledem ke směru magnetu. Je to zapříčiněno naindukovaným proudem, který vzniká v uzavřeném vodiči při elektromagnetické indukci: Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která jej vyvolala[39].



Platí zde vztah pro výpočet velikosti indukovaného proud  $I_i$ :

$$I_i = \frac{U_i}{R}. \quad (27)$$

Kde  $R$  je odpor vodiče a  $U_i$  je velikost indukovaného napětí.

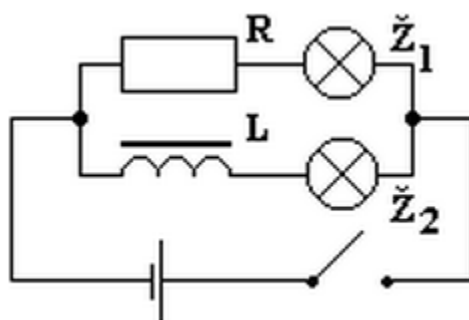
### ***Vlastní indukce***

Obecně indukce  $L$  je konstantní veličina, která je závislá na velikosti procházejícího proudu  $I$ . Pro vysvětlení jevu vlastní indukce použijeme vodič, kterým prochází proud, kolem něho vytváří časově proměnné pole. Poté se na vodiči naindukuje elektromotorické napětí, až do doby kdy se hodnota procházející proudu odpovídá odporu vodiče. Proud se přestane měnit a indukované elektrické pole zaniká[38], [41].

### ***Přechodový děj***

Přechodový děj se projevuje u indukčnosti cívky, kdy dochází k různým změnám napětí. Vycházíme ze zapojení na Obr. 1.12. Při připojení obvodu ke zdroji, dojde ke skokovému růstu indukovaného napětí na cívce a proud tímto obvodem je dán vztahem[43]:

$$I = \frac{U_e + U_l}{R}. \quad (28)$$



Obr. 1.12: Přechodný děj

## **1.4.2 Stacionární magnetické pole**

Magnetické pole je součástí elektromagnetického pole, vytváří v něm magnetické síly. Pokud elektrickou část potlačíme, vznikne nám pole stacionární. Toto časově neproměnné magnetické pole vzniká rovnoměrným pohybem elektrického náboje. Stacionární magnetické pole je definováno jako, magnetické pole, u něhož se časově nemění magnetická indukce, a tím ani tok. Stacionární magnetické pole vytváří permanentní magnet nebo elektromagnet. Silové účinky magnetu jsou soustředěny v pólech – severní pól S (*N – nord*) a jižní pól J (*S – south*). Magnetické pole u permanentních magnetů vysvětlujeme pohybem elektronů [33].

### ***Magnetické pole vodiče s proudem***

Hans Christian Oersted všiml si, že pokud je umístěn magnet poblíž vodiče a vodičem začne procházet proud, magnetika se vychýlí ze své polohy. Na jeho výsledky navázal

francouzský fyzik André Marie Ampér. Prokázal vzájemné silové působení vodičů, pokud vodiči prochází proud. Tímto byla dokázána přítomnost silové působení nejen mezi magnety, ale i mezi vodiči s proudem.

Magnetické indukční čáry přímého vodiče jsou uspořádány tvaru soustředných kružnic se středy ve vodiči. Orientaci magnetických indukčních čar závisí na směru proudu ve vodiči, k jeho určení používáme Ampérovo pravidlo pravé ruky. To zní: „*Naznačíme uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu ve vodiči, prsty pak ukazují orientaci magnetických indukčních čar*“[32]. Ampérovo pravidlo pravé ruky pravidlo používáme při určení orientace pro přímý vodič a pro cívku[32].

### **Magnetická indukce**

Vektorová veličina, která popisuje magnetické pole kvantitativně. Značíme ji písmenem  $B$ , jednotkou je T (Tesla). Charakterizuje silové účinky magnetické pole. Je dána vztahem:

$$B = \frac{F_m}{I \cdot l} \quad (29)$$

kde  $F_m$  je magnetická síla,  $I$  proud,  $l$  délka vodiče. Z tohoto vztahu tedy vyplývá, že jednotkou magnetické indukce je jeden tesla[T].

$$B = \frac{F_m}{I \cdot l} = \frac{[N]}{[A] \cdot [m]} = [T]. \quad (30)$$

Výpočet magnetické indukce v určitém bodě okolí vodiče nám definuje Biotův-Savartův (-Laplaceův) zákon[34]:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I d\mathbf{s} \times \mathbf{r}}{4\pi r^3}. \quad (31)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vákua, která má hodnotu  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ .  $d\mathbf{s}$  je polohový vektor, který směřuje od proudového elementu ( $I d\mathbf{s}$ ) k našemu určitému bodu.

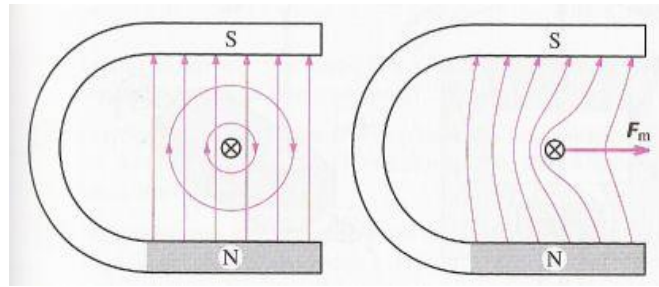
Velikost magnetické síly závisí na velikosti úhlu  $\alpha$  mezi vodičem a indukčními čarami.

$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (32)$$

Směr síly magnetického pole určujeme pomocí Flemingova pravidla levé ruky. „*Položíme-li otevřenou levou ruku k přímému vodiči tak, aby prsty ukazovaly dohodnutý směr proudu a indukční čáry magnetu vstupovaly do dlaně, ukazuje odtážený palec směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem*“[30].

### **Magnetická síla**

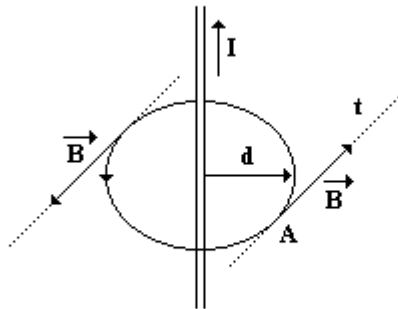
Magnetická síla ( $F_m$ ) je projevem silového působení na vodič, kterým prochází proud. Jestliže mezi póly magnetu umístíme vodič, bude se vychylovat vpravo či vlevo dle směru proudu a orientace indukčních čar. Jakmile bude procházet proud zepředu dozadu, tak směr působení bude doleva a obráceně při změně směru proudu[32].



Obr. 1.13: Orientace magnetické síly na směru proudu[32]

### **Magnetické pole rovnoběžných vodičů s proudem**

Magnetické indukční čáry okolo přímého, tenkého a velmi dlouhého vodiče jsou soustředné kružnice se středem v ose vodiče. Vektor magnetické indukce tohoto pole leží v rovině kolmé k vodiči. Jeho směr je směr tečny vedoucí k indukční čáře.



Obr. 1.14: Orientace magnetického pole rovnoběžného vodiče s proudem[37]

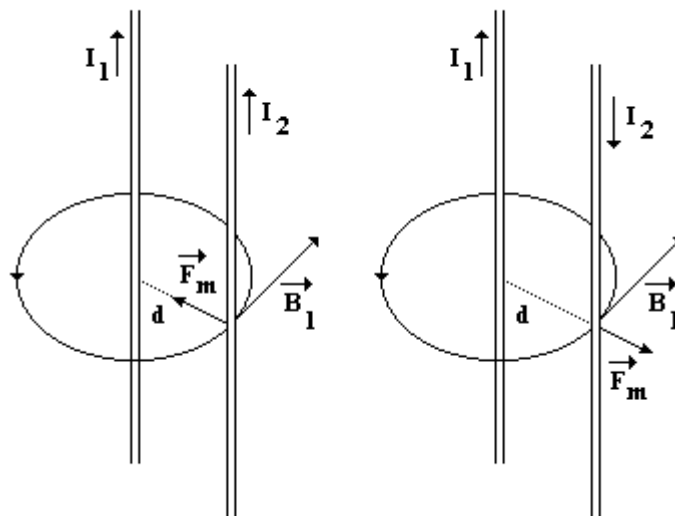
Velikost magnetické indukce  $B$  v bodě  $A$  vypočítáme dle vztahu:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi d}, \quad (33)$$

$I$  je procházející proud vodičem,  $d$  je poloměr magnetické indukční čáry, a  $\mu$  je permeabilita, která charakterizuje prostředí. Pro vakuum (přibližně také pro vzduch) má hodnotu  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ . Uvádíme ještě relativní permeabilitu, která srovnává různá látková prostředí. Platí pro ni[37]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (34)$$

Považujeme situaci, kdy jsou v magnetickém poli rovnoběžně umístěny dva velmi dlouhé tenké vodiče, kterými protékají proudy  $I_1$  a  $I_2$ . Vzdálenost vodičů je  $d$ . Oba vodiče na sebe působí magnetickou silou. Flemingovým pravidlem levé ruky určíme směr magnetické síly. Směr magnetické síly jednoho z vodičů závisí na směru proudu v druhém vodiči. Pokud mají proudy ve vodičích souhlasný směr, tak se vodiče navzájem přitahují. Při opačném směru se vodiče odpuzují [34].



Obr. 1.15: Směr magnetické síly za přítomnosti druhého vodiče[37]

Velikost magnetické síly, která působí na část délky  $l$  jednoho velmi dlouhého vodiče, určíme vztahem:

$$F_m = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot l. \quad (35)$$

Na základě tohoto vzorce, můžeme definovat jednotku proudu ampér (A), která je základní jednotkou soustavy SI.

### **Magnetické pole cívky**

Magnetické pole cívky může znázornit pomocí pilinových obrazců. Jako cívku považujeme solenoid a toroid. Pokud mluvíme o solenoidu, vyznačuje se velkým počtem závitů, kde je průměr cívky několikrát menší než celková délka cívky. Toroid vznikne stočením solenoidu do tvaru prstence.

Při pohledu na piliny uvnitř solenoidu zjišťujeme, že magnetické indukční čáry jsou rovnoběžné s osou solenoidu. Tudiž je zde homogenní magnetické pole a orientaci těchto indukčních čar určíme pomocí Ampérova pravidla pravé ruky: „*Pravou ruku položíme na cívku (závit), tak aby pokrčené prsty ukazovaly dohodnutý směr proudu v závitech cívky, palec ukazuje orientaci magnetických indukčních čar*“ [32],[36].

### **Hallův jev**

Americký fyzik E. H. Hall zjistil, že magnetická síla, nepůsobí na vodič, ale na pohybující se elektrony uvnitř vodiče. To mělo za následek, že při působení magnetické síly, která působí kolmo vzhledem k vodiči, dojde k přesunutí elektronu na okraje. A mezi těmito okraji pak vznikne malé napětí, které je popisováno jako Hallovo napětí.

Pro popis Hallova jevu je zapotřebí kovové destičky. Touto destičkou bude procházet proud ve směru nejdelší strany. Vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$  je kolmý vzhledem k ploše pásku. Při přiložení voltmetru na boční nejdelší strany pak změříme napětí  $U_H$ , což je Hallovo napětí [32],[35].

## ***Magnetické materiály***

Velikost magnetické intenzity je závislá na proudu a na počtech závitů cívky. Tuto závislost lze popsat křivkou prvotní magnetizace. V určitém bodě dojde k tomu, že jádro bude při daném proudu magneticky nasyceno a nebude se dál měnit. Pokud proud odpojíme, magnetické pole bude postupně zanikat. Avšak nikdy nedojde do bodu, že by magnetické pole zcela zaniklo, ale bude pouze částečně zmagnetováno. Má tedy remanentní magnetickou indukci  $B_r$ . Na velikosti  $B_r$  rozlišujeme dva druhy magnetických materiálů.

- **Magneticky tvrdý** materiál má širokou hysterezní smyčku, jsou odolné vůči zmagnetování. Pokud chceme magnetické pole daného materiálu zrušit, je potřeba na něj působit obrácenou polaritou.
- **Magneticky měkký** materiál má úzkou hysterezní smyčku, lze je snadno zmagnetovat. Má malou hodnotu  $B_r$ , u těchto materiálů dochází při přerušení proudu a rychlému zániku magnetické pole.

## **1.5 Přehled současného stavu výzkumu k dané problematice**

### ***Elektrický ekvivalent biologické buňky***

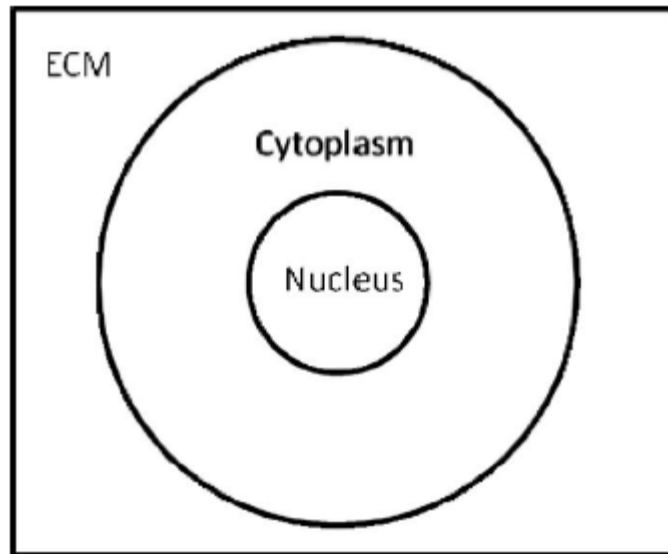
Jedním z nejdůležitějších aspektů v oblasti biomedicínského inženýrství je vliv vnějších polí na buňku. Jako jsou elektrické, magnetické a elektromagnetické. Pochopit vliv jakéhokoliv působení energie na buňku, je nejlépe modelovat pouze na jediné buňce, která pak bude umístěna do mezibuněčné hmoty (EMC). Měření je velice náročné a je zapotřebí zvážit jak bude elektrický proud ovlivňovat elektrické vlastnosti buněčné membrány, cytoplazmy, jaderné membrány, nukleoplazmy.

Dalším bodem je důležité si říct, že buňka obsahuje různé ionty, jako jsou například  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ . atd., avšak tyto všechny ionty obsahuje i ECM, ale s různou koncentrací. Pokud nastane případ, že membránový potenciálový rozdíl dosáhl v rozmezí 0,7 až 1 V, pak působením vnějšího elektrického pole dojde ke změnám v struktury membrány a také přechodné tvorbě pórů přes membránu. Tento proces známý jako elektroporace (*electroporation*). Elektroporace ovlivňuje celkový tvar buňky, póry v membráně, rotace buňky. Záleží také na době trvání tohoto pulsu, intenzity pole a typu buňky.

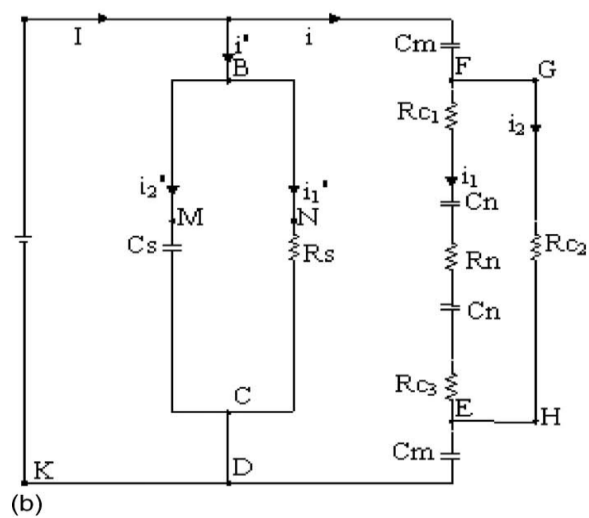
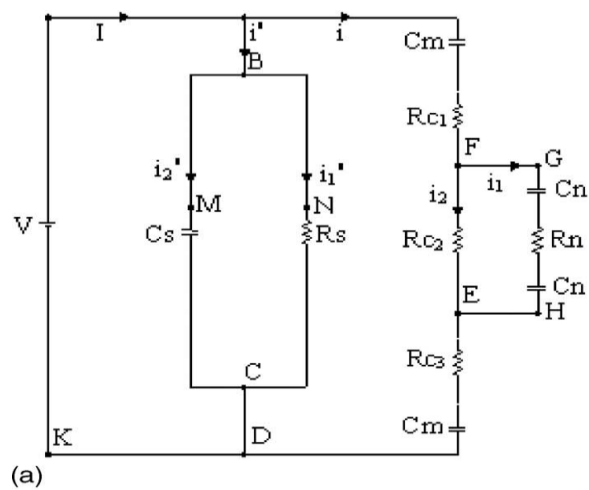
Popis zjednodušeného modelu buňky a stanovení základních předpokladů:

- a) Kulovitý charakter buňky a jádra.
- b) Měrný odpor cytoplazmy a nukleoplazmy je považován za identický
- c) Kapacita na jednotku plochy buněčné membrány a jaderné membrány se považuje stejné.
- d) I když biologická buňka obsahuje řadu organel, předpokládá se přítomnost pouze jádra. Ostatní organely v cytoplasmě, např. Golgiho aparát, mitochondrie jsou v modelu nepřítomny
- e) Vodivost buněčné membrány a jaderné membrány jsou nulové.

Analýzu lze použít v případě, že nenastane elektroporace. Jakmile nastane elektroporace bude se dynamicky měnit odpor membrány.



Obr. 1.16: Předpokládaný model[23]



Obr. 1.17: Popis struktury buňky pomocí elektrického zapojení[23]

Elektrické náboje se nám hromadí na povrchu membrány, stejně jako na jaderné membráně. Pak dochází ke generování proudu od vnějšího elektrického pole. Za izolaci zde považujeme membrány, ty ošetříme jako kondenzátor. Cytoplazma a nukleoplasma se budou chovat jako odpor. Hlavní rozdíl v zapojení A a B je v iontových drahách. Model 2 (Obr. 1.17) se zabývá třemi cestami. První z nich je cesta jen přes cytoplazmu, druhá je přes cytoplazmu a nukleoplasma a třetí je přes EMC. Kde  $C_m$  a  $C_n$  jsou kapacity jaderné membrány a  $R_{C1}$ ,  $R_{C2}$  a  $R_{C3}$  jsou odpory různých oblastí v cytoplazmě.

Membránu buněk a membránu jádra lze považovat jako kondenzátory, zatímco tekutiny což je cytoplazma a nukleoplasma jsou odpory. Dále pak se domníváme, že cytoplazma a nukleoplasma jsou homogenní látky.

Měrný odpor cytoplazmy a nukleoplazmy se předpokládá asi  $100 \Omega/\text{cm}$ . Kapacita na jednotku plochy buněčné membrány a jaderné membrány je rovno  $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ . Poloměr buňky se předpokládá  $25 \mu\text{m}$ [23].

### ***Biologická buňka-elektrické pole interakce: stochastický přístup***

V posledních letech, byl značný zájem o zkoumání vlivu elektrického pole při různých biofyzikálních a biochemických procesech v laboratorních a klinických studiích. Například nízkofrekvenční pulzní elektrické pole stimuluje růst kostí a urychlení hojení zlomenin. Účinek závisí na době trvání pulsu, intenzitě a typu buněk. Ale mohou mít za následek elektroporace. Cílem tohoto dokumentu je vytvořit model stochastického nelineárního elektrického pole soustavy v náhodném rozrušení buňky.

V této práci byl úspěšně proveden stochastický postup v analýze, tok proudu přes živé buňky v přítomnosti mikro-organel a nabitých biomolekul. Jedním z důležitých aspektů je ten, že na jaderné membráně má kapacita největší vliv na časovou konstantu evoluce. Je známo, že kapacita je rovna celkovému náboji v daném potenciálovém rozdílu. Z biologického pohledu je struktura jaderné membrány u jakékoliv eukaryotické buňky charakterizována přítomností jaderných pórů obsažených ve vnitřní i vnější straně membrány. Zatím co vnější jaderná membrána je kontinuální s membránou z endoplazmatického retikula, vnitřní jaderná membrána obsahuje specifické proteiny (nabité entity), které fungují jako vazební místa pro jaderné laminy. Tato celá struktura jaderné membrány je známá pod pojmem jaderný obal. Dále je známo, že obousměrný provoz nastává kontinuálně mezi cytoplazmou a jádrem prostřednictvím komplexů jaderných pórů, které jsou obsaženy v nukleární obálce. Takovýto transport proteinu záleží na jejich různých velikostech, počtech, volném šíření nebo aktivním transportem, který je náhodný a záleží na vlivu elektrického pole, který na tento transport působí. Velikost buněk se dynamicky mění při přizpůsobování buňky s povrchem.

Stochastická postup byl úspěšně proveden v analýze tok proudu přes živé buňky, s ohledem na náhodnost biologických interakcí s vnějším polem. Model stochastického procesu jasně ukazuje, že hluk v jaderné membránové kapacitě ( $C_n$ ), je určujícím faktorem, pokud jde o interakce elektrického pole s biologickou buňkou[24].

### ***Matematické modelování elektrické aktivity svalové buňky dělohy***

Děloha je obvykle v průběhu těhotenství relativně v klidu až na období kolem termínu vykazuje rytmické kontrakce. Tyto kontrakce se objevují, na buněčné úrovni, generováním elektrické aktivity. Různé studie ukázaly, že tato elektrická aktivita je vysoce korelována z děložních kontrakcí a má významný klinický potenciál. Tvar i charakteristika impulzu se během postupu těhotenství mění. Cílem bylo vyvinout fyziologický model děložní elektrické aktivity, aby koreloval s fyziologickými mechanismy, a to zejména z pohledu vzniku a šíření děložní elektrické aktivity zaznamenané děložní elektromyogram (EMG).

Byl vyvinut elektrofyziologický model, zástupce elektrické aktivity buňky dělohy. Je postaven na základě iontových projevů popsaných Huxley a Hodgkin. To dovolilo reprodukci děložní elektrickou aktivitu pozorovanou v termínu, a změnou parametrů, jako je  $I_{stim}$  proudu, pomocí něho nám vznikají různé druhy buněčných elektrických aktivit. Struktura ideálního modelu byla založena na úplném děložním myocyty elektrofyziologických dat získaných z dané fáze těhotenství. Pro vlastní model byla potřeba udělat pár změn. Udělaly se předpoklady pomocí hodnot získaných ze svaloviny různých druhů (potkan, člověk). Chybějící parametry byly odhadnuty a následně doladěny.

Druhý model se zabývá spouštěním elektrické aktivity. Pro spuštění elektrické aktivity jediné buňky byl použit stimulující proud  $I_{stim}$ , byl také spojen s kardiostimulátorem. Na začátku těhotenství dochází k malým elektrickým odezvám, až na konci těhotenství dochází k obrovským výbuchům akčních potenciálů. Model dokáže simulovat jeden impuls inicializující malé kontrakce během těhotenství a více impulsů, které udržují velké stahy na konci těhotenství, ale to ještě není schopen reprodukovat jev podílející se na spuštění činnosti kardiostimulátoru.

Tento model může být přínosem myometriálních iontových kanálů v průběhu těhotenství a porodu. Dále pak i ke studiu účinku drog injekcemi nebo chování děložní buňky [25].

### ***Mechanismus pro akci oscilovat elektrických polí na buňkách***

Tento teoretický model je založen na jednoduché hypotéze. Na vnějším oscilujícím elektrickém poli budou vyvíjeny oscilační síly na každý z volných iontů, které existují na obou stranách všech plazmatických membrán. Tyto membrány se mohou pohybovat prostřednictvím transmembránových proteinů.

Když amplituda vynucených kmitů iontů překročí určitou kritickou hodnotu, mohou oscilující ionty dávat falešný signál pro otevření nebo uzavření kanálů, které jsou napěťově řízeny nebo i mechanicky. Tím dojde ke špatnému uspořádání elektrochemické rovnováhy plazmatické buňky a je ovlivněna celá funkce buňky.

Teoretický model poskytuje možný mechanismus pro působení oscilujících elektromagnetických polí na buňky ve skutečných biologických situacích. Vlivem těchto vzniklých oscilací může dojít narušení rovnováhy plazmatické membrány a tím bude ovlivněna i funkce celé buňky[26].

### ***Lepší přístup k elektrickému numerickému modelování biologických buněčných shluků***

Intenzivní elektrická pole aplikovaná v biologických tkáních jsou schopny produkovat nelineární změny vodivosti kvůli otevření pórů v plazmatické membráně buňky. Tento jev se nazývá elektroporace. Je prostudována mnohokrát avšak zatím nemá definitivní model. Elektroporace se používá v elektrochemoterapii nádorů, a má výrazně škodlivé účinky na srdeční defibrilace.

Vzhledem k tomu, že shluky buněk mají různou geometrii, proto jsou velmi obtížně řešitelné v elektromagnetické analýze. Je zde numerický přístup velice důležitým nástrojem, který může být použit v simulaci polarizace a permeabilizace na buněčné membráně za různých podmínek stimulace. Numerický přístup umožňuje posouzení účinnosti stimulačního protokolu pro žádoucími účinky elektroporace nebo rozsahu škody v případě škodlivých účinků.

Můžeme rozdělit tento problém modelování ve dvou krocích:



- a) Výpočet elektrického pole, iontových proudů, a membránových potenciálů v buňkách;
- b) Výpočet membránové vodivosti;

Způsob navrhovaný v tomto článku je snadno proveditelný a umožňuje realistické modelování jevů souvisejících s polarizací buněk v koncentrovaných suspenzích, a to zejména vlivů těsné blízkosti mezi buňkami.

Srovnání s analytickými modely ukazuje, že výpočet akumulovaného náboje membránového potenciálu a vodivosti jsou správné a přesné. Tato metoda může být užitečná při hodnocení nových modelů elektropráce a analýzy experimentálních výsledků[27].

## **1.6 Definování cíle úlohy**

Cílem naší úlohy je vytvořit numerický model, u kterého bude zobrazeno rozložení magnetického pole kolem a uvnitř biologické buňky. Bude se tedy jednat o intenzitu magnetického pole a magnetického indukčního toku a zobrazení jejich průběhů. Pro jejich zobrazení je důležité vytvořit správnou síť modelu pomocí metody konečných prvků.

## 2 MODELOVÁNÍ

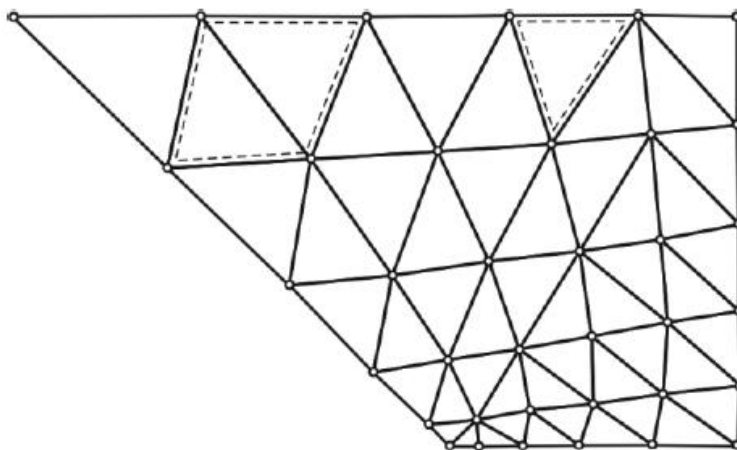
Modelování je způsob, při kterém může získat určité výsledky, aniž bychom museli daný objekt vyrábět či jinak dochovávat. K tomuto způsobu zkoumání došlo k ohromným pokrokům s nástupem počítačů. Avšak první modely nevznikly na počítači, ale na papíře. K jejich sestavení bylo zapotřebí mnoho složitých počítání na základě teoretických předpokladů zkoumaných objektů, které popisovali jejich chování za určitých podmínek.

Pro provádění simulací máme na výběr mnoho softwaru pro náročné i jednoduché simulování. Mezi kvalitní softwary pro simulaci můžeme uvést COMSOL Multiphysics. Jeho program, který nám nabízí širokou škálu různých nástrojů umožňující co nejrealističtější nastavení simulace. Jeho další výhodou je propojení s CAD nástroji či MATLAB systémem.

### 2.1 Metoda konečných prvků

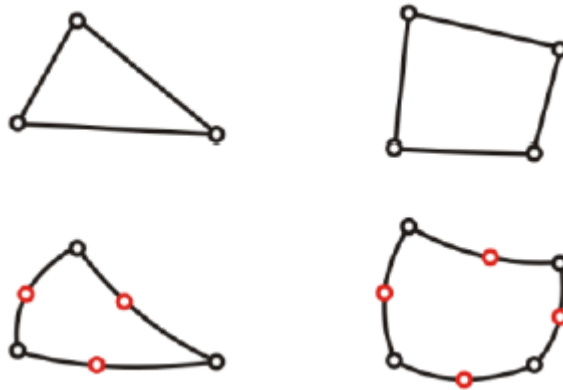
Jedná se o metodu, ve které se řeší určité počáteční podmínky. Tyto podmínky jsou popsány diferenciálními rovnicemi. Nejprve se tato metoda použila k různým úlohám pro výpočet pružnosti a pevnosti materiálu v leteckém průmyslu. Odtud byla dále zavedena do dalších oblastí, jako jsou např. strojírenství, stavebnictví a elektrotechnika. Metoda konečných prvků (MKP) byla vyvinuta na konci padesátých let s nástupem digitálních počítačů.

MKP se zavádí do oblastí, kde se počítá pole, uzly a uzlové potenciály. Kde uzly mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat tvar hraničních ploch. V místech, kde předpokládáme prudkou změnu pole, zavedeme větší hustotu sítě. Na obrázku (Obr. 2.1) vidíme příklad sítě konečných prvků.



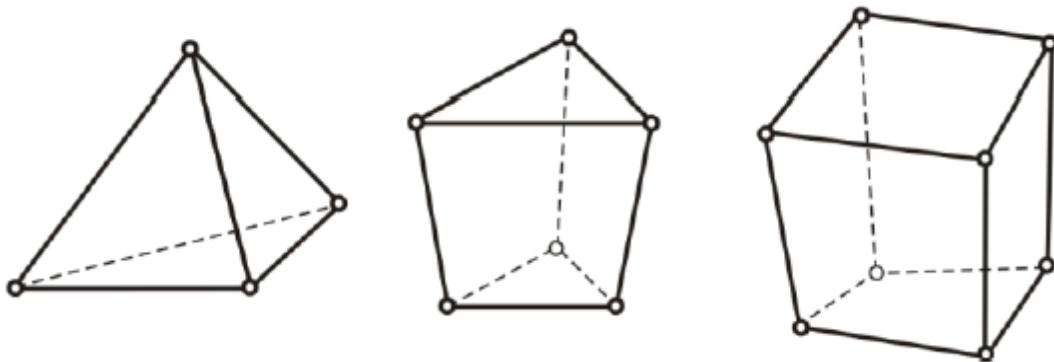
Obr. 2.1: Příklad sítě konečných prvků s uzly [21]

Metodou se řeší soustava rovnic pro neznámé uzlové potenciály. Koeficienty matice soustavy a pravých stran se nepočítají z diferencí, ale nahrazují se derivací jako integrály přes elementární plošky nebo objemy. Ve vrcholech těchto plošek jsou uzly. Vzniklé elementární útvary nazýváme jako konečné prvky. Na Obr. 2.2 máme naznačeny konečný prvek tvaru trojúhelníku a čtyřúhelníku a další základní rovinné prvky [20], [21].



Obr. 2.2: Elementární rovinné prvky [21]

Prostorové konečné prvky mají tvar čtyřstěnu, pětistěnu a šestistěnu, mohou mít i uzly ve středu hran.



Obr. 2.3: Elementární prostorové prvky [21]

Postup při aplikaci MKP se stává z těchto bodů:

- Generace sítě prvků s uzly
- Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot
- Sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty
- Vyřešení soustavy
- Zpracování dodatečných požadavků

## 2.2 Modelování buňky pomocí programu COMSOL

Modelování biologické buňky bylo prováděno pomocí programu COMSOL Multiphysics (COMSOL 5.1). Jedná se o program, který umí řešit fyzikální úlohy popsané pomocí parciálních diferenciálních rovnic metodou konečných prvků. Program dokáže pracovat s několika fyzikálními procesy najednou. Díky tomu pak můžeme simulovaný model považovat za realističtější a lze odhadnout jeho vlastnosti. Avšak je zde zapotřebí nejprve definovat prostředí, ve kterém se bude model simulovat a okrajové podmínky v určitých bodech na geometrickém modelu.

Postup při modelování v programu COMSOL jsme postupovali v několika krocích. Nejprve si vytvoříme geometrický model, kterým znázorníme naši biologickou buňku a zobrazíme ji pomocí grafického editoru. Dále pak je nutné nastavit počáteční podmínky a vlastnosti oblastí, které jsou nezbytnou součástí modelování. Po vybrání materiálů z knihoven, nebo námi definované materiály pro určité oblasti, můžeme spustit generování výpočetní sítě, v jejichž uzlových bodech budou vypočtena potřebná data. Pro řešení úlohy program COMSOL obsahuje několik řešičů pro výpočet výsledků, ať už ve frekvenční, časové nebo námi zvolené oblasti zobrazit výsledky. Konečné zpracování výsledků lze zobrazit pomocí barevných map, izochar, izoploch, proudnic, šipek, částic nebo řezů. Úlohy, které jsou řešené v čase lze i animovat [21], [42].

### 2.2.1 Osnova modelování buňky

Postup řešení úlohy v programu COMSOL lze rozdělit do několika kroků:

- Nakreslení geometrického modelu, který odpovídá obecnému zjednodušenému modelu buňky.
- Definice jednotlivých materiálů a přiřazení ke geometrickému modelu
- Vygenerování sítě konečných prvků
- Vyřešení nadefinovaných podmínek
- Zpracování grafických výsledků

## 2.3 Modelování elektromagnetických polí

Naším úkolem bylo nasimulovat vliv elektromagnetických polí na buněčné struktury. Vycházeli jsme z jednoduchého modelu buňky, který vidíme na Obr. 2.4. Čtverec kolem buňky simuluje prostředí mezibuněčné hmoty, ve které je intenzita magnetického pole  $B_0 = 2 \text{ T}$ , a uvnitř umístěna samotná buňka. Její parametry jsme nastavili podle Tab. 2.

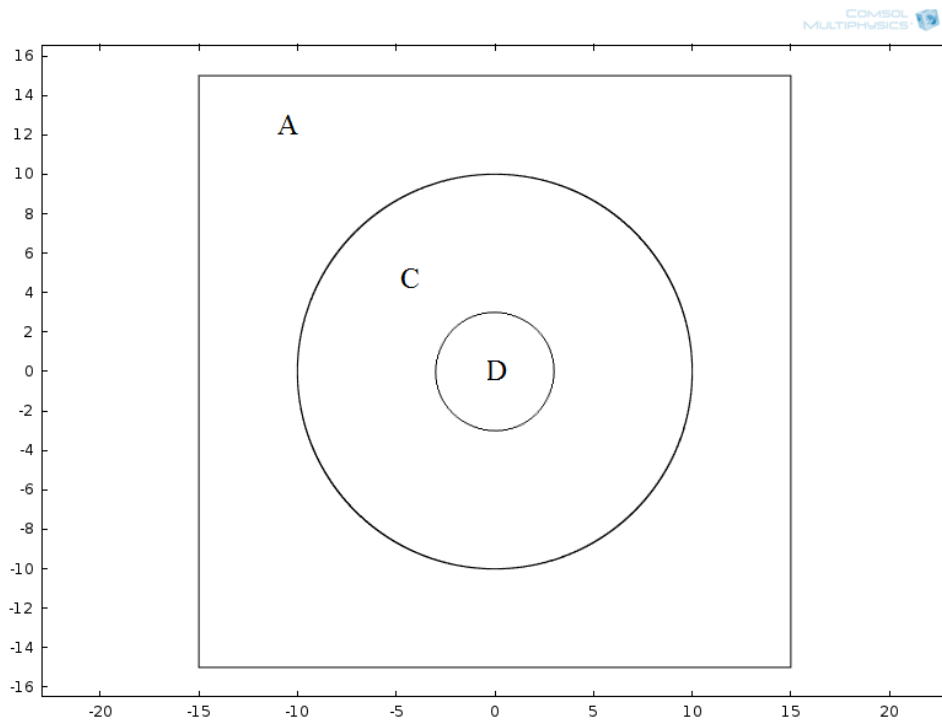
Celý tento model jsme zasít'ovali síti konečných prvků. Nejprve jsme použili hrubou síť, kterou vidíme na Obr. 2.6. Kvůli menšímu počtu uzlových bodů v řidší síti dochází ke zkreslení požadovaných výsledků. Pro jsme po simulování hrubé sítě zvolily jemnější síť, aby výpočty byli přesnější. Zasít'ovaný model buňky s jemnější sítí vidíme na Obr. 2.8

Tab. 2: Základní parametry modelu buňky

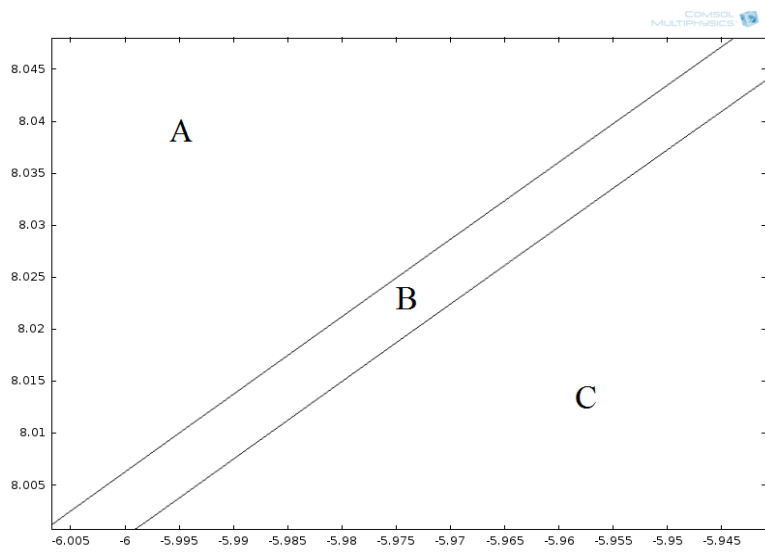
| <b>Parametry</b>  | <b>Standartní hodnota</b> | <b>Dolní limit</b> | <b>Horní limit</b> | <b>Použito</b> |
|---|---------------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| Mezibuněčná hmota vodivost ( $\sigma_0$ , S/m)                            | 1,2                       | -                  | -                  | 1,2            |
| Buněčná membrána vodivost ( $\sigma_1$ , S/m)                             | 3e-7                      | 1.0e-8             | 1.0e-6             | 3e-7           |
| Cytoplazmatická membrána vodivost ( $\sigma_2$ , S/m)                     | 0.3                       | 0.1                | 1.0                | 0.3            |
| Mezibuněčná hmota dielektrická permitivita ( $\epsilon_0$ , As/Vm)        | 6.4e-10                   | -                  | -                  | 6.4e-10        |
| Buněčná membrána dielektrická permitivita ( $\epsilon_1$ , As/Vm)         | 4.4e-11                   | 1.8e-11            | 8.8e-11            | 4,4e-11        |
| Cytoplazmatická membrána dielektrická permitivita ( $\epsilon_2$ , As/Vm) | 6.4e-10                   | 3.5e-10            | 7.0e-10            | 6.4e-10        |
| Poloměr jádra(R, $\mu$ m)   | 10                        | 5                  | 100                | 10             |
| Tloušťka buněčné membrány (D, nm)   | 5                         | 3                  | 7                  | 5              |
| Magnetická intenzita pole ( $B_0$ , Tesla)                                | 2                         | -                  | -                  | 2              |
| Elektrické pole (V)   | 200                       | -                  | -                  | 200            |

Tab. 3: Vysvětlivky k modelu buňky (Obr. 2.4, Obr. 2.5)

| <b>Označení</b> | <b>Buněčná část</b> |
|-----------------|---------------------|
| A               | Mezibuněčná hmota   |
| B               | Buněčná membrána    |
| C               | Cytoplazma          |
| D               | Jádro               |



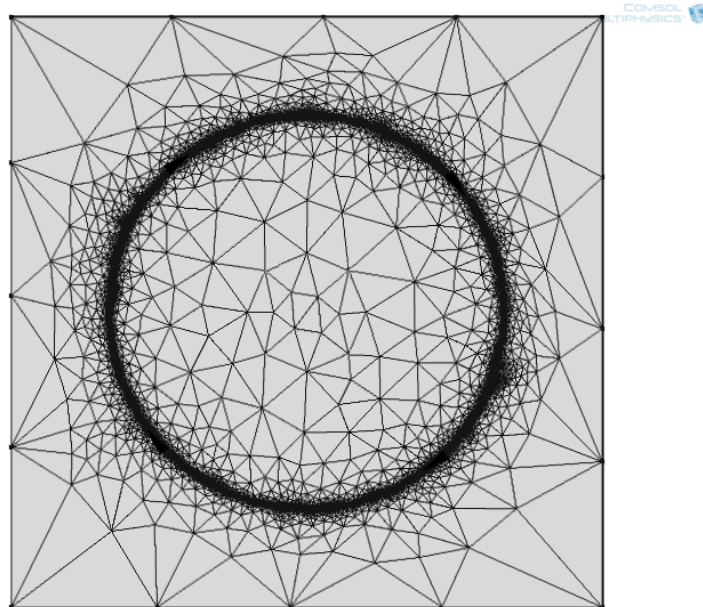
Obr. 2.4: Model buňky



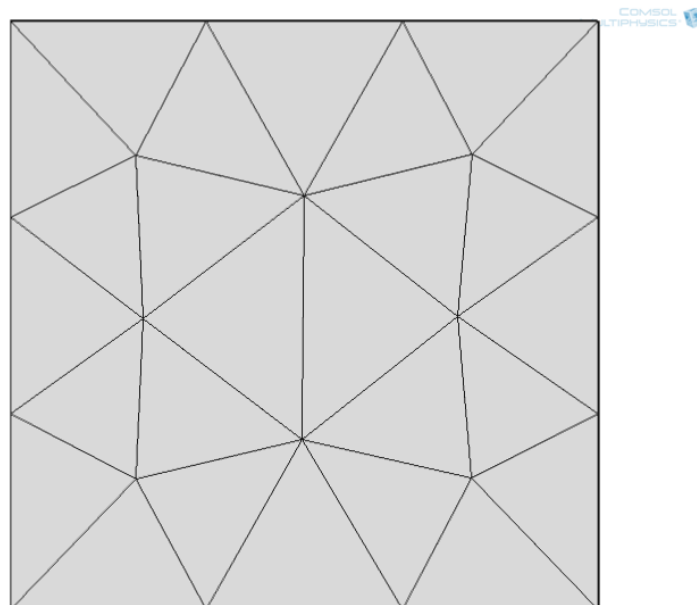
Obr. 2.5: Detail buněčné membrány

### 2.3.1 Modelování hrubé sítě

Pro výpočet našich simulací je potřeba nejprve vytvořit síť konečných prvků pomocí programu COMSOL, kterou vidíme na Obr. 2.6. Pro představu kolik je potřeba bodů v síti pro výpočet metody konečných prvků jsme vytvořili model čtverce o straně 30  $\mu\text{m}$  (Obr. 2.7). Na tento model bylo potřeba 26 bodů. Kdežto u našeho modelu jich bylo potřeba 133138 bodů.



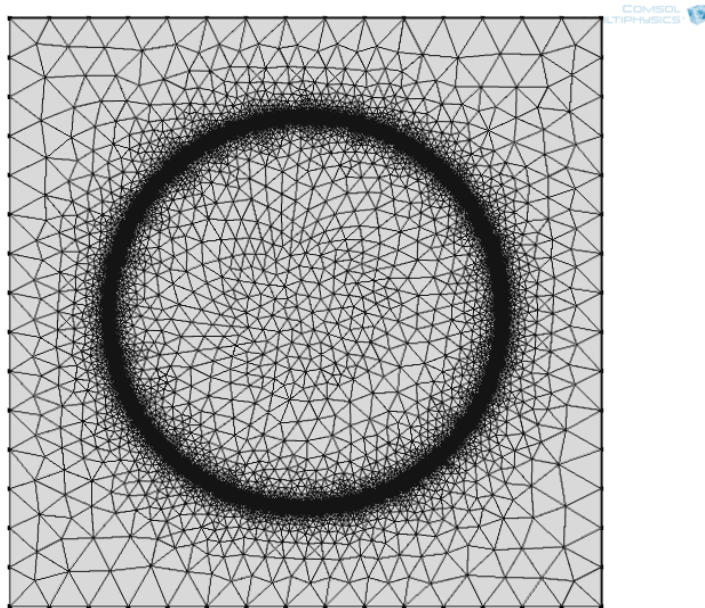
Obr. 2.6: Příklad hrubé sítě modelu



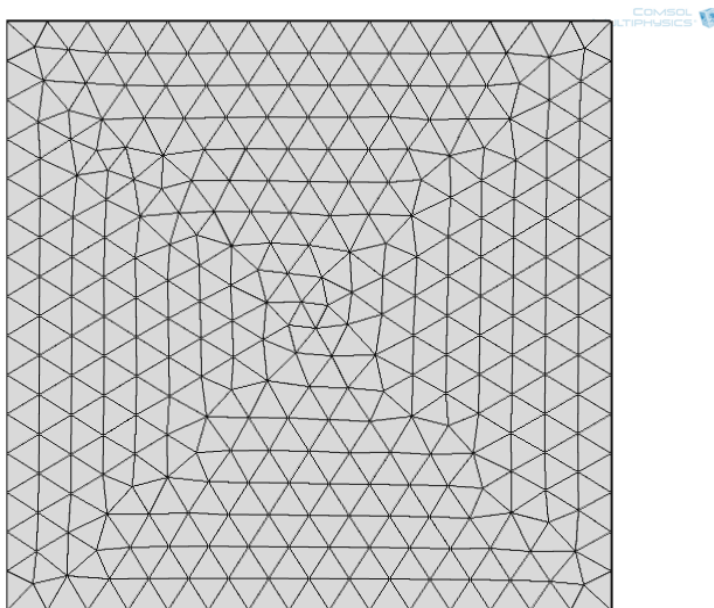
Obr. 2.7: Detailní zobrazení sítě v jednoduchém čtverci

### 2.3.2 Modelování jemné sítě

Dalším bodem bylo vytvořit jemnější síť. Na Obr. 2.8 a Obr. 2.9 vidíme stejný model buňky a model čtverce jako v předchozí kapitole, avšak s tím rozdílem, že je tu zde vytvořena síť konečných prvků pomocí programu COMSOL, která je výrazně hustší. Tím dosáhneme přesnějších výsledků. Na model čtverce byla potřeba vytvořit síť o 578 bodech. Model buňky má 281880 bodů.



Obr. 2.8: Příklad jemné sítě modelu



Obr. 2.9: Detailní zobrazení jemné sítě v jednoduchém čtverci

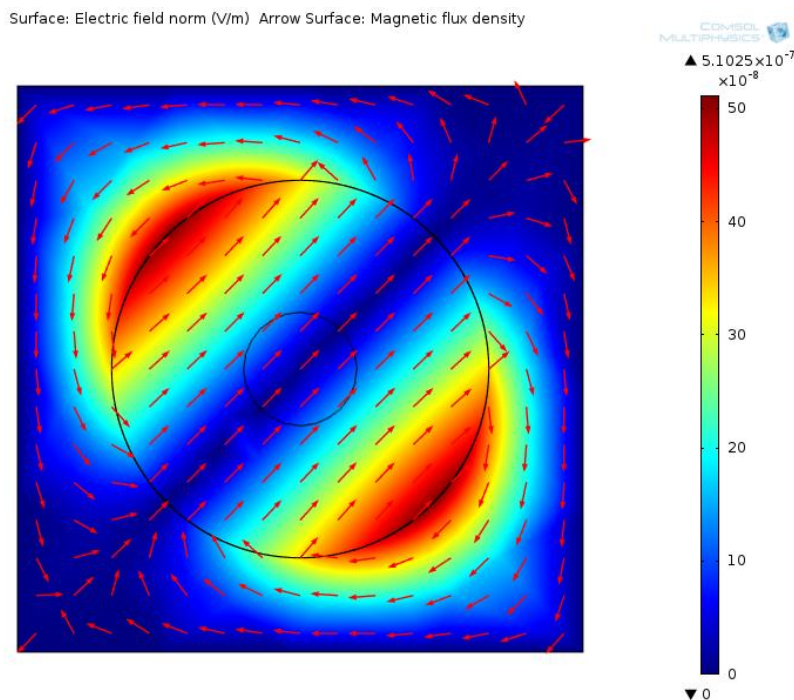


### 3 VÝSLEDKY

Pro získání odpovídajících výsledků v zadané práci jsme využili obou vytvořených sítí. Volba sítě modelu se ukázala jako velmi důležitý krok celé práce, v jemnější síti se zobrazilo více důležitých detailů, ale nezanedbatelným faktem byla délka doby, která byla nutná k výpočtu výsledků modelování. Z tohoto důvodu a z důvodu paměťové kapacity jsme zvolili modelování na modelu s hrubou sítí (133138 bodů).

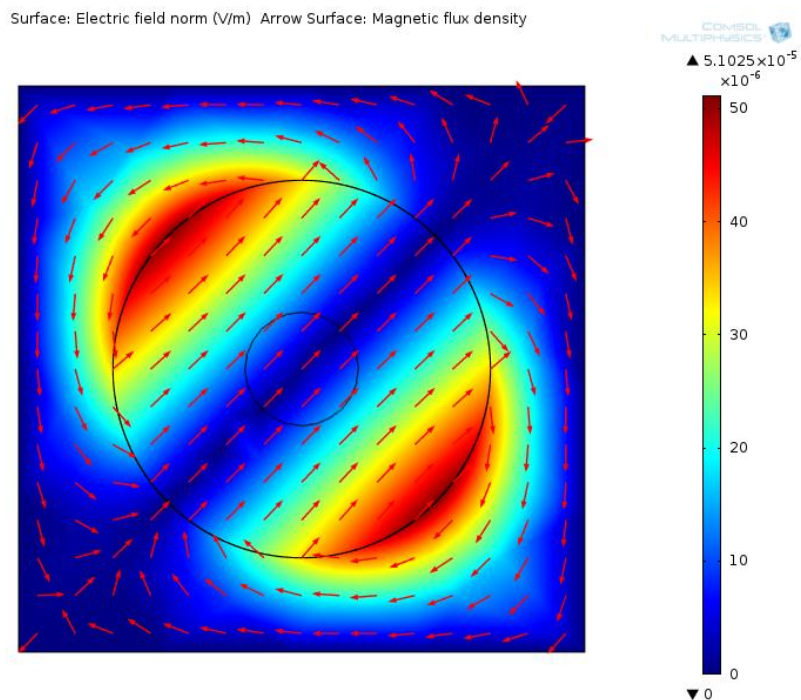
#### 3.1 Rozložení elektrického pole na struktuře buňky (Hrubá síť)

Na Obr. 3.1 vidíme rozložení elektrického pole. Elektrického pole má frekvenci 1kHz. Maximální intenzita elektrického pole v místech styku dosahuje hodnoty  $5,1025 \cdot 10^{-15} \text{V/m}$ . Buněčnou membránu tato intenzita nebude nijak ovlivňovat.



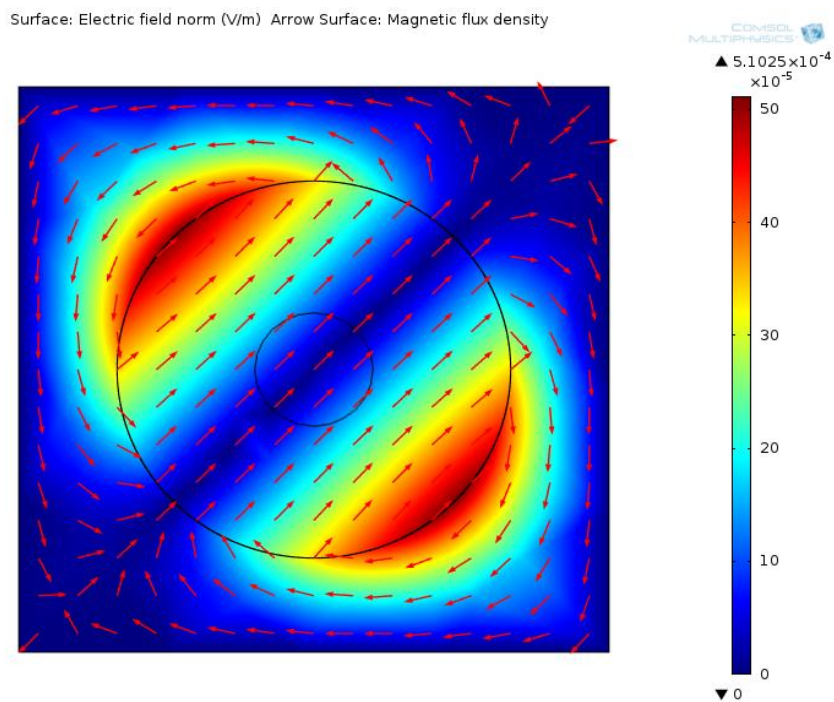
Obr. 3.1: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1kHz

Na Obr. 3.2 vidíme rozložení elektrického pole. Elektrického pole má frekvenci 100kHz. Maximální intenzita elektrického pole v místech styku se blíží k hodnotě  $5,1025 \cdot 10^{-11} \text{V/m}$ . Buněčná membrána se bude při této intenzitě mírně deformovat.



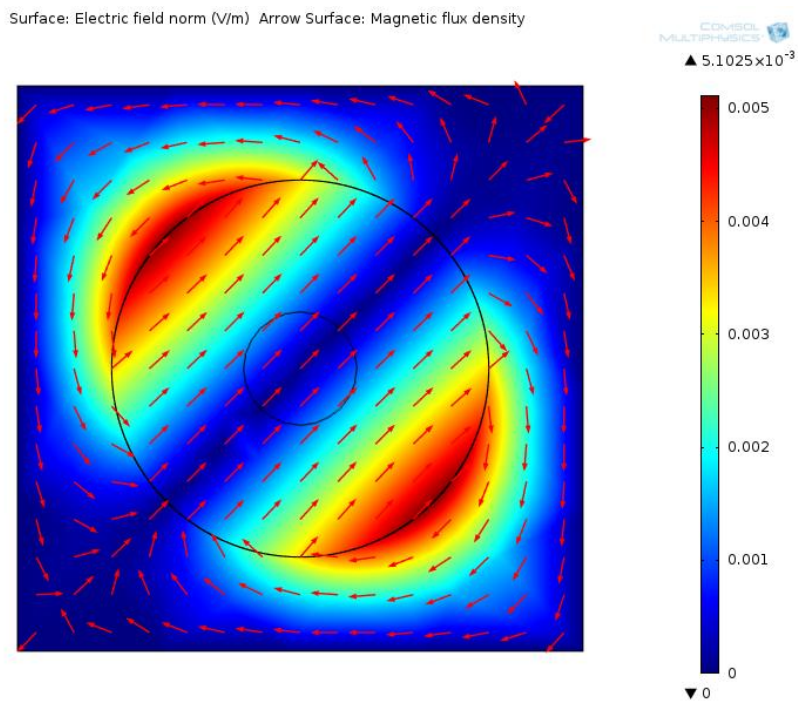
Obr. 3.2: Rozložení elektrického pole o frekvenci 100kHz

Na Obr. 3.3 vidíme rozložení elektrického pole o frekvenci 1MHz. Maximální intenzita elektrického pole v místech styku dosahuje hodnotě  $5,1025 \cdot 10^{-9}$  V/m. V porovnání s intenzitou elektrického pole o frekvenci 1kHz je intenzita elektrického pole o frekvenci 1MHz  $1 \cdot 10^6$  větší. Což vede k částečné deformaci buněčné membrány nebo úplnému zničení buňky.



Obr. 3.3: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1MHz

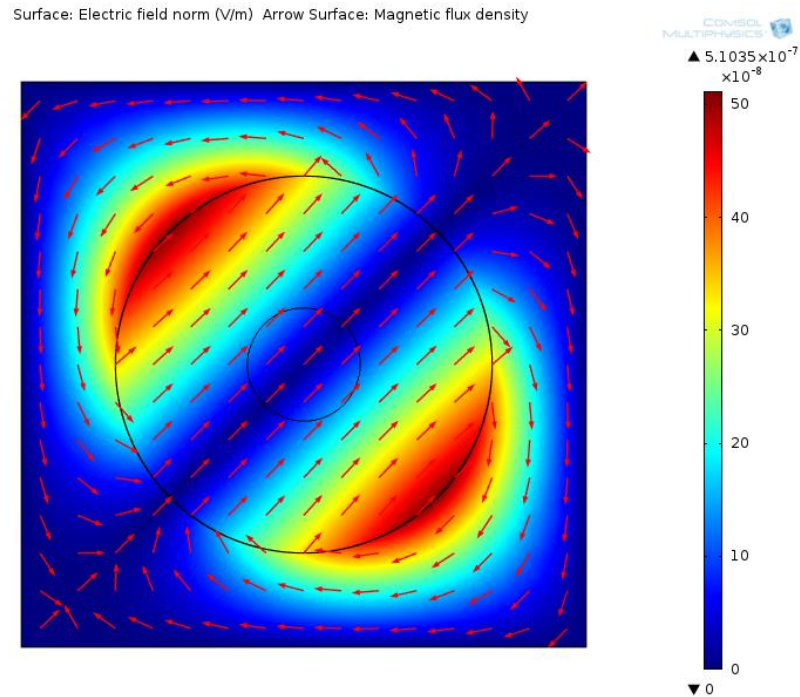
Na Obr. 3.4 vidíme rozložení elektrického pole o frekvenci 10MHz. Maximální intenzita elektrického pole v místech styku dosahuje hodnoty  $5,1025 \cdot 10^{-3}$  V/m. Zde dojde k úplnému zničení buňky.



Obr. 3.4: Rozložení elektrického pole o frekvenci 10MHz

### 3.2 Rozložení elektrického pole na struktuře buňky (Jemná síť)

Na Obr. 3.5 je zobrazeno rozložení elektrického pole, které má frekvenci 1kHz. Maximální intenzita elektrického pole je v určitých místech styku  $5,1035 \cdot 10^{-15}$  V/m . Při vystavení buněčné membrány takovéto intenzitě nedojde k žádnému ovlivnění její struktury.

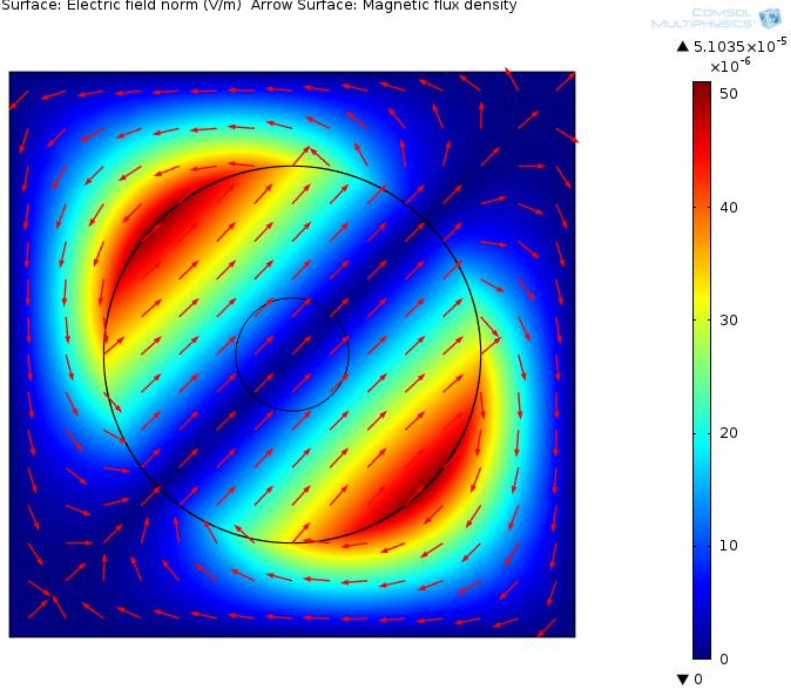


Obr. 3.5: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1kHz

Na Obr. 3.6 je možno vidět rozložení elektrického pole o frekvenci 100kHz. Maximální intenzita elektrického pole dosahuje v určitých místech styku až  $5,1035 \cdot 10^{-11}$  V/m. Pokud dojde k vystavení buněčné membrány takovéto intenzitě, může se buněčná membrána začít mírně deformovat.



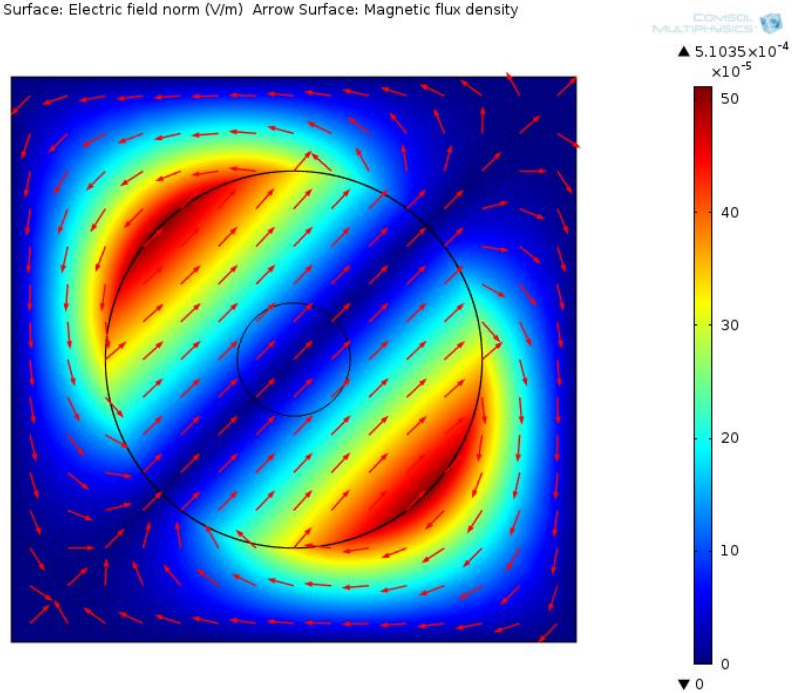
Surface: Electric field norm (V/m) Arrow Surface: Magnetic flux density



Obr. 3.6: Rozložení elektrického pole o frekvenci 100kHz

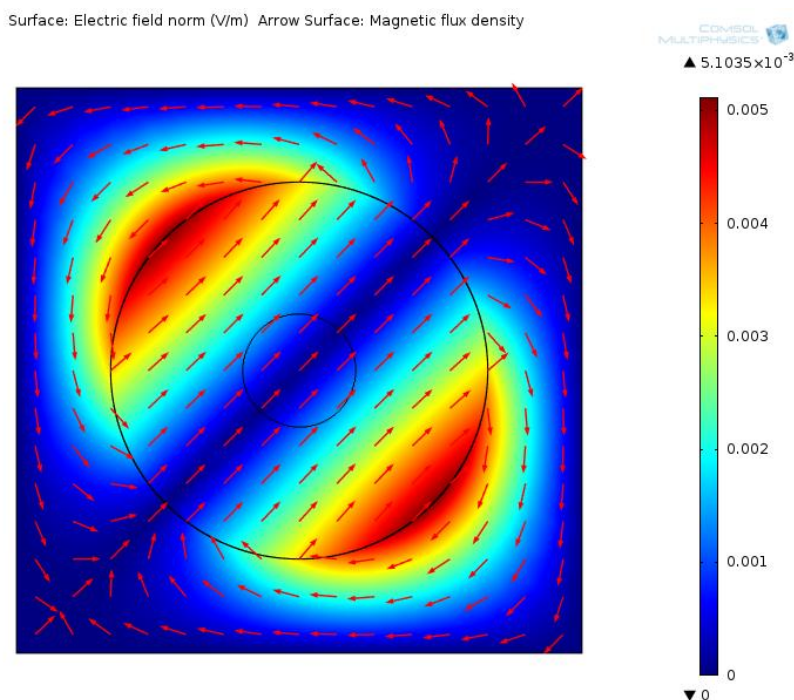
Na Obr. 3.7 vidíme rozložení elektrického pole o frekvenci 1MHz. Maximální intenzita elektrického pole dosahuje v určitých místech až  $5,1035 \cdot 10^{-9}$  V/m. Pokud se buněčná membrána ocitne v takovéto intenzitě, dochází k deformaci buněčné membrány nebo ke zničení buňky.

Surface: Electric field norm (V/m) Arrow Surface: Magnetic flux density



Obr. 3.7: Rozložení elektrického pole o frekvenci 1MHz

Na Obr. 3.8 vidíme rozložení elektrického pole o frekvenci 10 MHz. Maximální intenzita elektrického pole dosahuje v určitých místech styku až  $5,1035 \cdot 10^{-3}$  V/m. Při vystavení buněčné membrány takovéto intenzitě vede ke zničení celé buňky.



Obr. 3.8: Rozložení elektrického pole o frekvenci 10MHz

### 3.3 Porovnání dosažených výsledků

Po porovnání získaných výsledků modelování pro frekvenci elektrického pole o hodnotě 1 kHz je patrné, že využití jemnější sítě (281 880 bodů) přináší přesnější a přehlednější výsledky získané intenzity elektrického pole. Jak ale bylo již v úvodu této kapitoly zmíněno, je modelování pro jemnější síť více náročné na paměť použitého výpočetního systému. Pro získání výsledků, které mohou nahradit práci s buňkami *in vivo*, však stačí využít síť s méně zobrazenými body a tím můžeme dokázat vliv vnějšího prostředí na buněčnou strukturu názorněji než při využití živočišných a rostlinných buněk.

## 4 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zaměřila na problematiku vlivu elektromagnetických polí na buněčné struktury. Cílem práce bylo seznámit se se základním stavebním prvkem živých organismů, buňkou, která je popsána v první části kapitoly. Je v ní uveden nejen popis eukaryotické a prokaryotické buňky tak i popis živočišné a rostlinné buňky. Další část první kapitoly je věnována bioelektrickým jevům. Jedná se zkoumání elektrických signálů ve všech živých organismech. Zbylá část kapitoly se zabývá vlastnostmi vnějšího prostředí, do kterého jsme buňku umístily a přehledem současného stavu výzkumu ohledně buňky.

Důležitým bodem této práce bylo modelování vlivu elektromagnetického pole na buněčné struktury. Numerické modelování elektromagnetického pole bylo provedeno za pomoci programu COMSOL Multiphysics (COMSOL 5.1). Nejprve bylo zapotřebí prostudovat permeabilitu buňky. Jelikož je buňka tvořena z 70% vodou a zbývajících 30 % tvoří ostatní látky, hodnota permeability buňky byla zvolena tak, aby odpovídala hodnotě vody. Po nastavení základních parametrů buňky jsme pomocí metody konečných prvků vytvořili daný model. Tato metoda je popsána v kapitole 2.1.

Pro modelování buněčných struktur je také důležité znát vlastnosti jednotlivých organel, které v současné době nejsou v dostupné literatuře popsány taky, aby mohly být využity pro účely numerického modelování. Model buňky byl taky vystaven vlivu stacionárního magnetického pole, nedocházelo zde však k žádným výrazným změnám na buněčné struktuře.

Při působení elektrického pole o daných frekvencích (1 kHz, 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz) docházelo ke změnám intenzity elektrického pole na buněčné membráně, to mělo za následek deformaci membrány, případně zničení celé buňky.

Práce by mohla pokračovat rozšířením o experimenty s živou buňkou, kdy by mohly být porovnány výsledky numerického modelování s výsledky experimentů, při kterých by byly buňky vystaveny vlivu elektrického pole „na živo“.

# LITERATURA

- [1] ZÁVODSKÁ, R. *Biologie buněk: základy cytologie, bakteriologie, virologie*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2006, 160 s. ISBN 80-869-6015-3.
- [2] KISLINGER, F.; LANÍKOVÁ, J.; ŠLÉGR, J.; ŽURKOVÁ, I. *Biologie I. (Základy mikrobiologie, botaniky a mykologie)*. Klatovy: Gymnázium v Klatovech, 1995.
- [3] ALBERTS, B. *Základy buněčné biologie: úvod do molekulární biologie buňky*. 2. vyd. Překlad Arnošt Kotyk, Bohumil Bouzek, Pavel Hozák. Ústí nad Labem: Espero, c1998, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 80-902-9062-0.
- [4] HELEŠICOVÁ, M. *Základy obecné biologie* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/30506/pedf\\_r/PRILOHA\\_XVI\\_-\\_UCEBNI\\_TEXT.pdf](http://is.muni.cz/th/30506/pedf_r/PRILOHA_XVI_-_UCEBNI_TEXT.pdf). Učební text. Střední průmyslová škola chemická.
- [5] ROSYPAL, S. *Přehled biologie*. 3. vyd. Praha: Scientia, 1998, 642 s. ISBN 80-718-3110-7.
- [6] ROSYPAL, S. *Nový přehled biologie*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2003, xxii, 797 s. ISBN 80-718-3268-5.
- [7] Bakterie a prokaryota obecně. *Genetika-biologie* [online]. 2014 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.genetika-biologie.cz/prokaryota>
- [8] TICHÝ, F., HORKÝ D., KOCIÁNOVÁ I. *Histologie: cytologie a obecná histologie*. 1. vyd. Brno: Veterinární a farmaceutická univerzita v Brně, 2000, 165 s. ISBN 80-851-1486-0.
- [9] Staff. *Chemists create artificial cell membrane* [online], January 26, 2012, [cit. 2014-10-14]. Dostupné z: <http://www.kurzweilai.net/chemists-create-artificial-cell-membrane>.
- [10] KUBIŠTA, V. *Obecná biologie: úvodní učební text biologie pro 1. ročník gymnázií*. 3. upr. vyd. Praha: Fortuna, 2000, 103 s. ISBN 80-716-8714-6.
- [11] *Biologie: Schémata rostlinné a živočišné buňky*. Gymnázium Jana Opletala v Litovli [online]. 2004 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://bze.kvalitne.cz/uvod.htm>
- [12] SLÁDEK, Z. *Buněčná biologie*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007, 106 s. ISBN 978-80-7375-086-2.
- [13] ŠIMURDA, J. *Bioelektrické jevy*. Brno, 2009. Elektronická skripta. Vysoké učení technické v Brně.
- [14] *Obecná biologie. Předmětová komise biologie a chemie* [online]. 2013 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://giobio.ic.cz/studijni-materialy/biologie-obrazky/obecna-biologie.html>
- [15] KUBÁČEK, S. *Simulace elektrofyzilogických experimentů*. Brno, 2011. 61 l. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [16] ŠVECOVÁ, O. *Analýza elektrických vlastností membrán srdečních buněk*. Brno, 2013. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [17] BRANČÍK, L. *Elektrotechnika I* [online]. 2004 [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: [http://pardi.wz.cz/Elektrotechnika\\_1\\_S.pdf](http://pardi.wz.cz/Elektrotechnika_1_S.pdf)
- [18] ZAJÍC, J. *Fyzika II: (elektřina a magnetismus)*. 2., oprav. vyd. Pardubice: Univerzita



Pardubice, 2004, 171 s. ISBN 80-719-4641-9.

- [19] IVÁNEK, L. *Elektromagnetismus*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1486-5.
- [20] DĚDKOVÁ, J., KŘÍŽ T. *Modelování elektromagnetických polí (MMEM): přednášky: počítačová cvičení*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2012, 98 s. ISBN 978-80-214-4401-0.
- [21] MRÁZEK, J. *Numerická analýza a měření magnetických vlastností nehomogenních materiálů technikami NMR*[online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010 [cit. 2014- 12-5]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29465](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29465). Bakalářská práce. VUT BRNO. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.
- [22] CIFRA, M; TOGNI, P. *Úvod do používání COMSOL Multiphysics v modelování elektromagnetického pole v biologických systémech*. [online]. [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: [http://old.elmag.org/lib/exe/fetch.php/wiki:user:cifra:uvod\\_do\\_cm.pdf](http://old.elmag.org/lib/exe/fetch.php/wiki:user:cifra:uvod_do_cm.pdf)
- [23] DUBEY, A. K., DUTTA-GUPTA S., KUMAR R., TEWARI A. a BASU B. Timeconstant determinativ for electrical equivalent of biological cells. *Journal of Applied Physics*. 2009, vol. 105, issue 8, s. 084705. DOI: 10.1063/1.3086627. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/105/8/10.1063/1.3086627>
- [24] DUBEY, A. K., BANERJEE M. a BASU B. Biological cell–electrical field interaction: stochastic approach. *Journal of Biological Physics*. 2011, vol. 37, issue 1, s. 39-50. DOI: 10.1007/s10867-010-9194-4. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10867-010-9194-4>
- [25] RIHANA, S., TERRIEN J., GERMAIN G. a MARQUE C. Mathematical modeling of electrical activities of uterine muscle cells. *Medical*. 2009, vol. 47, issue 6, s. 665-675. DOI: 10.1007/s11517-009-0433-4. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11517-009-0433-4>
- [26] PANAGOPOULOS, Dimitris J., Niki MESSINI, Andreas KARABARBOUNIS, Alexandros L. PHILIPPETIS a Lukas H. MARGARITIS. A Mechanism for Action of Oscillating Electric Fields on Cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2000, vol. 272, issue 3, s. 634-640. DOI: 10.1006/bbrc.2000.2746. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006291X00927463>
- [27] RAMOS, Airton. Improved numerical approach for electrical modeling of biological cell clusters. *Medical*. 2010, vol. 48, issue 4, s. 311-319. DOI: 10.1007/s11517-010-0591-4. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11517-010-0591-4>
- [28] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2570-0
- [29] HUTOVÁ, E. *Studium vlivu magnetických polí na biologické tkáně* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012 [cit. 2015-03-28]. 90 l. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=51478](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51478). Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.

Vedoucí práce prof. Ing. Karel Bartušek, DrSc.

- [30] EICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. 2015. Elektromagnetická indukce. Encyklopedie fyziky[online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/302-elektromagneticka-indukce>
- [31] JANDORA, Radek. 2000. ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f16.htm#tok>
- [32] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. 2000. *Fyzika pro gymnázia: elektřina a magnetismus*. 5. přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 342 s. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 80-719-6202-3
- [33] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. 2005. *Úvod do studia materiálů: elektřina a magnetismus*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 190 s. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 80-708-0568-4.
- [34] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. 2006. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. Praha: Prometheus, vii, 1034-1198, [30]. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 80-214-1869-9.
- [35] EICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. 2015. Hallův jev. Encyklopedie fyziky[online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>
- [36] EICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. 2015. Magnetické pole cívky. Encyklopedie fyziky[online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/290-magneticke-pole-civky>
- [37] EICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. 2015. Magnetické pole rovnoběžných vodičů s proudem. Encyklopedie fyziky[online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/289-magneticke-pole-rovnobeznych-vodicu-s-proudem>
- [38] JANDORA, Radek. 2000. ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE [online]. [cit. 2015-05-12]. <http://radek.jandora.sweb.cz/f16.htm#Vlastní>
- [39] EICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. 2015. Indukovaný proud. Encyklopedie fyziky[online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/306-indukovany-proud>
- [40] EICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. 2015. Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Encyklopedie fyziky[online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/304-faradayuv-zakon-elektromagneticke-indukce>
- [41] VYBÍRAL, Bohumil. 2015. *Elektromagnetická indukce* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/indukce.pdf>
- [42] HUMUSOFT. *Software COMSOL Multiphysics* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol/>
- [43] EICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. 2015. Přechodný děj. Encyklopedie fyziky[online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/308-prechodny-dej>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|                |  |
|----------------|--|
| $R$            | Plynová konstanta ( $8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), |
| $F$            | Faradayův náboj ( $96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ )                      |
| $T$            | Absolutní teplota  |
| $z$            | Počet elementárních nábojů   |
| $\mathbf{F}$   | Elektrická síla  |
| $Q$            | Elektrický náboj   |
| $d$            | Vzdálenost mezi náboji   |
| $\epsilon_0$   | Permitivita vakua ( $8,854188\cdot 10^{-12}[\text{Fm}^{-1}]$ )                 |
| $\epsilon_r$   | Relativní permitivita  |
| $\mathbf{E}$   | Intenzita elektrického náboje  |
| $\omega$       | Kruhová frekvence  |
| $\gamma_{int}$ | Vnitřní vodivost elektrolytu lidské tkáně                                      |
| $E_{int}$      | Intenzita elektrického pole uvnitř těla  |
| $E_{vzd}$      | Intenzita elektrického pole ve vzduchu   |
| $F_m,$         | Magnetická síla  |
| $\mathbf{B}$   | Magnetická indukce   |
| $v$            | Rychlost   |
| $\mathbf{H}$   | Intenzita magnetického pole  |
| $\mu$          | Magnetická permeabilita  |
| $\mu_r$        | Relativní permeabilita prostředí   |
| $\mu_o$        | Permeabilita vaku ( $4 \pi \cdot 10^{-7}[\text{Hm}^{-1}]$ )                    |
| $\Phi$         | Magnetický indukční tok  |
| $\chi_m$       | Magnetická susceptibilita  |
| $\mathbf{M}$   | Magnetizace  |
| $U_i$          | Elektromotorické napětí  |
| $R$            | Odpor  |
| $I_i$          | Indukovaný proud   |
| $B_0$          | Intenzita magnetického pole  |

|      |                                   |
|------|-----------------------------------|
| ATP  | Adenosin trifosfát                |
| DNA  | Deoxyribonukleová kyselina        |
| EMC  | Mezibuněčná hmota                 |
| EMG  | Elektromyografie                  |
| ER   | Endoplazmatická retikulum         |
| GA   | Golgiho aparát                    |
| MKP  | Metoda konečných prvků            |
| RNA  | Ribonukleová kyselina             |
| rRNA | Ribozomální ribonukleová kyselina |

