



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

**Návrh indukčního zařízení pro nabíjení akumulátorů**

**The proposal of induction transfer for charging battery**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Musálek

**Dmitriy Kondratchik**

---

**Praha 2015**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Dmitriy Kondratchik**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Návrh indukčního zařízení pro nabíjení akumulátorů**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou nabíjení akumulátorů.
- 2) Pro zadaný typ akumulátoru zjistěte požadavky na nabíjecí zařízení.
- 3) Navrhněte geometrické uspořádání indukčního přenosu energie
- 4) Vytvořte model akumulátor-indukční přenos-nabíjený akumulátor

Seznam odborné literatury:

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [2] CETL, Tomáš. Aplikace elektrochemických zdrojů. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001028593.
- [3] [www.wolfram.com](http://www.wolfram.com)

Vedoucí: Ing. Lubomír Musálek

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji pánu Ing. Lubomíru Musálkovi za vedení, cenné rady a připomínky při vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporuje v mém studiu.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá bezdrátovým nabíjením akumulátorů. V dnešní době k řešení takového problému nejvíc se používá indukční přenos energie.

Náplní práce je možnosti použití indukčních zařízení pro nabíjení špatně dostupných akumulátorů a jejich model. V podstatě se pro modelování používá náhradní schéma indukčního ohřevu a modelu jejich parametrů. Důležitou součástí je také popis jednotlivých akumulátorových systémů a systémů záložního napájení.

## **Abstrakt**

This diploma thesis concerns wireless accumulator recharging. At present, the most common solution involves induction energy transmission. The content of this thesis is the use of induction devices for inaccessible accumulators recharge and their models. For the modeling purpose, most frequently, we use substitute schemes of inductive heating and their parameters. Importantly, find attached the description of individual accumulator systems and backup recharge systems.

# Obsah

Definice a rozměr použitých symbolů .....	vii
1 Úvod.....	1
2 Indukční zařízení.....	2
2.1 Současné zařízení pro indukční přenos energie .....	2
2.2 Princip indukčního ohřevu .....	3
2.3 Výpočty parametrů indukčních elektrotepelných zařízení.....	5
2.3.1 Výpočet odporu $R_{I(I)}$ .....	8
2.3.2 Výpočet indukčnosti $L_{I(I)}$ .....	10
2.3.3 Způsob výpočtu indukčních zařízení.....	11
3. Akumulátory .....	14
3.1 Olověné akumulátory .....	14
3.2 Nikl-kadmiové akumulátory .....	17
3.3 Lithiové akumulátory .....	20
3.3.1 Lithium – iontové články s tekutým elektrolytem .....	20
3.3.2 Lithium – iontové polymerové a lithium polymerové články .....	20
3.4 Zdroje nepřerušovaného napájení .....	22
3.5 Akumulátory v UPS .....	24
3.6 Monitorování stavu akumulátorových baterií .....	25
3.7 Zařízení pro nabíjení akumulátorů .....	26
3.8 Napěťový střídač.....	28
3.9 Jednofázový můstkový usměrňovač .....	30
4 Nabíjecí zařízení .....	31
4.1 Popis nabíjecího systému .....	31
4.2 Účinnost jednotlivých typů uspořádání transformátorů.....	33
4.3 Model transformátoru .....	34
4.4 Model můstkového usměrňovače s baterií.....	36
5 Závěr .....	38
6. Seznam literatury .....	39

# Definice a rozměr použitých symbolů

Značka	Veličina	Základní jednotka
$J$	proudová hustota	(A.m <sup>-2</sup> )
$a$	hloubka vniku	(m)
$\rho$	rezistivita vodiče	( $\Omega$ .m)
$\mu$	magnetická permeabilita vodiče	(H.m <sup>-1</sup> )
$U$	napětí	(V)
$P$	činný výkon	(W)
$I$	proud	(A)
$L$	indukčnost	(H)
$Z$	impedance	( $\Omega$ )
$N$	počet závitů cívky	( - )
$\gamma$	konduktivita	(S.m <sup>-1</sup> )
$l$	délka	(m)
$\mu_r$	poměrná permeabilita	( - )
$A$	plocha	(m <sup>2</sup> )
$M$	vzájemná indukčnost	(H)
$\omega$	úhlová frekvence	(s <sup>-1</sup> )
$CA$	kapacita baterie	(Ah)
$t$	čas	(h)

# Kapitola 1

## 1 Úvod

V současné době si člověk nemůže představit život bez elektrické energie. Největším problémem elektrické energie je její skladovatelnost. Například solární a větrné elektrárny vyrábějí elektrickou energii, když mají splněné určité klimatické podmínky, a ne zrovna v ten okamžik, kdy elektrickou energii potřebujeme. Proto námi vyrobenou elektrickou energii potřebujeme nějakým způsobem uschovat. Elektrochemické články mají za úkol skladovat vyrobenou energii s co nejvyšší účinností.

V přenosných zařízeních jako jsou mobilní telefony, notebooky, fotoaparáty atd. jsou elektrochemické zdroje jediným zdrojem elektrické energie. Jedním z nejdůležitějších parametrů akumulátorů je počet cyklů nabití a vybití. Většina akumulátorů snese stovky nebo dokonce i tisíce nabití a vybití.

Velmi často elektrochemické zdroje používáme jako záložní zdroje, například pro počítače, světla pro nouzové východy, semaforey atd. Tyto záložní zdroje potřebujeme za nějakou určitou dobu nabít. Proces nabíjení závisí na typu elektrochemického zdroje a jeho vlastnostech.

Lidský život by byl mnohem pohodlnější, kdyby naše elektrické přístroje nebyly natolik závislé na délce kabelů a na zásuvkách.

V této diplomové práci bude popsán návrh indukčního zařízení pro nabíjení akumulátorů. Pro naše nabíjecí zařízení jsem zvolil metodu válec ve válci z důvodu větší účinnosti.



# Kapitola 2

## 2 Indukční zařízení

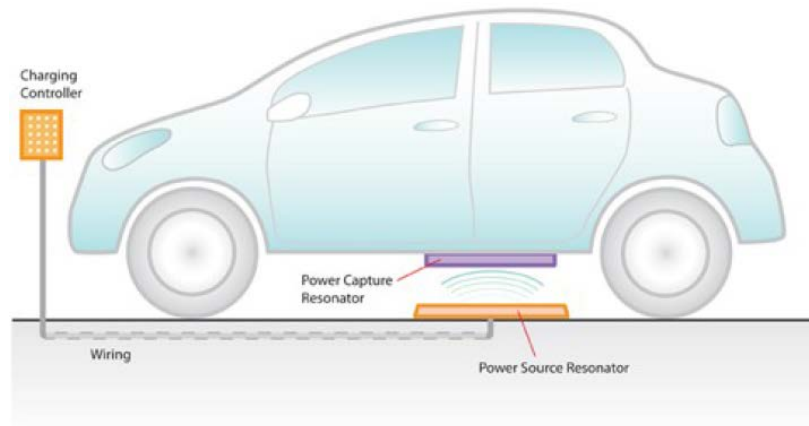
### 2.1 Současné zařízení pro indukční přenos energie

Současné systémy pro bezdrátové nabíjení se začaly vyvíjet v posledních letech. Tato zařízení nepotřebují žádnou klasickou drátovou nabíječku. Princip takové nabíječky spočívá v tom, že máme nabíjecí podložku s primární cívkou, na tuto podložku položíme přístroj, který má v sobě zakomponovanou sekundární cívkou. Pro dosažení co nejvyšší účinnosti potřebujeme tyto dvě cívky vycentrovat. Výhodou tohoto typu nabíjení je malý, řádově jednotky wattů, přenášený výkon a tím pádem není nutné řešit ztráty, protože v absolutní hodnotě jsou velmi malé.



*Obrázek 1 Příklad nabíjecí podložky od firmy Powermat[2]*

Ještě jednou významnou skupinou jsou nabíjecí systémy pro elektromobily. Sekundární cívka nabíjecího zařízení je umístěna na spodní straně auta. Primární cívka se umísťuje do podlahy garáže nebo je zabudována do ploché bedny, která je zasunutá pod podvozek. Takový způsob je vhodný pro automatické dobíjení elektromobilu hned po zastavení vozu na určitém místě bez nutnosti připojení kabelů. V dnešní době existují projekty pro městskou dopravu, například pro autobusy, které se mohou na zastávce automaticky nabíjet.

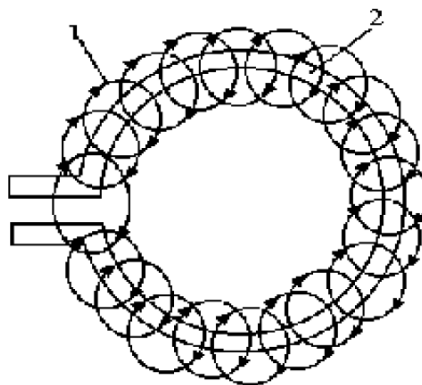


Obrázek 2 Nabíjecí systém elektromobilu[17]

## 2.2 Princip indukčního ohřevu

V této diplomové práci je použit indukční přenos energie. Pro jeho výpočet použijeme výpočet pospaný pro výpočet parametrů indukčního ohřevu z [1].

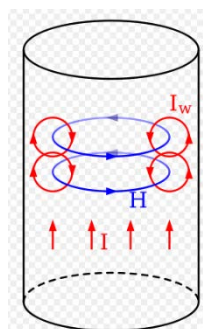
Indukční ohřev vzniká působením tepelného toku, který se indukuje do materiálu. Při průchodu střídavého elektrického proudu vodičem vzniká kolem tohoto vodiče kruhové magnetické pole o frekvenci stejné jako frekvence elektrického proudu.



Obrázek 3 Elektromagnetické pole kolem vodiče [1]

Síločáry magnetického pole protínají kovový vzorek umístěný v střídavém elektrickém poli a tím v materiálu vzniká elektromotorické napětí. Působením tohoto napětí vznikají indukční vířivé proudy. Tyto proudy cirkulují obrobkem a způsobují jeho ohřev.

Skin efekt je jeden z nejdůležitějších jevů při indukčním ohřevu kovů. Je to děj, při kterém je elektrický proud vytlačován k povrchu vodiče. Největší proudová hustota tedy bude na povrchu vodiče.



Obrázek 4 Ilustrace skin efektu [2]

Střídavá proudová hustota  $J$  ve vodiči exponenciálně klesá od hodnoty  $J_s$  na povrchu vodiče až k hodnotě v hloubce  $d$ :

$$J = J_s e^{-\frac{d}{a}} \quad (2.2.1)$$

Kde  $a$  je hloubka vniku a je definována jako hloubka pod povrchem vodiče, kde proudová hustota klesne na  $1/e J_s$ .

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.2.2)$$

$\rho$  rezistivita vodiče

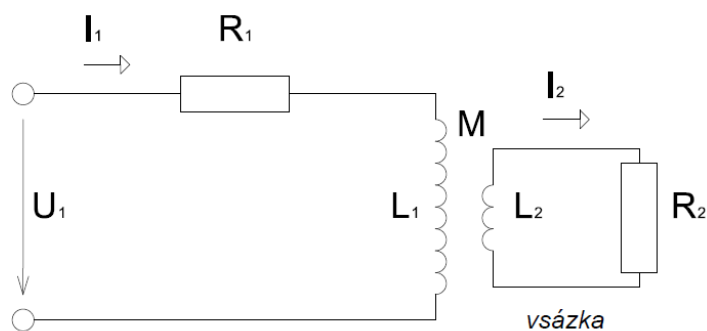
$\omega$  úhlová rychlost proudu

$\mu$  magnetická permeabilita vodiče [2]

Pokud vodičem prochází stejnosměrný proud, uplatní se všechny elementy průřezu tohoto vodiče ve stejném poměru. U vysokofrekvenčních proudů se uplatní pouze tenká vrstva na povrchu vodiče. Tato vrstva se s rostoucí frekvencí zmenšuje. Pro výkonové soustavy se používají vodiče ve formě dutých těles.

## 2.3 Výpočty parametrů indukčních elektrotepelných zařízení

Náhradní schéma indukčního ohřevu je tvořeno dvěma indukčně vázanými obvody. Ohřivací cívku reprezentuje primární obvod. Hodnoty tohoto obvodu označíme indexem 1. Indexem 2 označíme sekundární obvod, který tvoří vsázka. Vsázka má vzájemnou indukčnost  $M$  s ohřivací cívkou, jelikož se nachází v její blízkosti nebo v dutině ohřivací cívky (induktoru).



Obrázek 5 Náhradní schéma indukčního ohřevu

$U_1$  napětí přiváděné na svorky ohřivací cívky (efektivní hodnota)

$I_1$  proud ve vinutí induktoru (efektivní hodnota)

$R_1$  činný odpor induktoru

$L_1$  indukčnost ohřivací cívky

$L_2$  indukčnost vsázky

$R_2$  činný odpor vsázky [11]

Pro tento obvod platí

$$R_1 \hat{I}_1 + j\omega L_1 \hat{I}_1 + j\omega M \hat{I}_2 = \hat{U}_1 \quad (2.3.1)$$

$$R_2 \hat{I}_2 + j\omega L_2 \hat{I}_2 + j\omega M \hat{I}_1 = 0 \quad (2.3.2)$$

Z těchto rovnic odvodíme proud  $\hat{I}_2$  a dosadíme do rovnice (3)

$$\hat{I}_2 = \frac{-j\omega M \hat{I}_1}{R_2 + j\omega L_2} \quad (2.3.3)$$

$$\hat{I}_1 \left( R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2} \right) = \hat{U}_1 \quad (2.3.4)$$

Dále vypočítáme proud  $\hat{I}_1$

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}_1}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2}} \quad (2.3.5)$$

Z předchozí rovnice vidíme, že impedance  $\hat{Z}_1$  na svorkách induktoru je

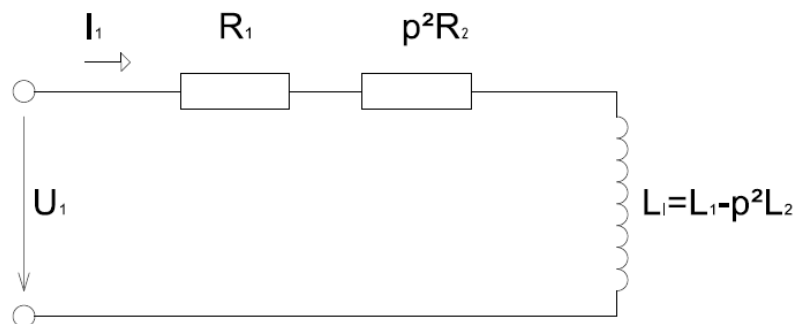
$$\hat{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2 (R_2 - j\omega L_2)}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (2.3.6)$$

Po malých úpravách rovnice bude mít tvar

$$\hat{Z}_1 = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + j\omega \left( L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \right) \quad (2.3.7)$$

Hlavním cílem našeho výpočtu je určení uspořádání, tvaru a elektrických parametrů induktoru k dané vsázce tak, aby soustava odebírala potřebný výkon ze zdroje o velikosti napětí  $U_1$ . Po návrhu uspořádání induktoru a vsázky můžeme spočítat počet závitů ohřivací cívky pro daný zdroj a další parametry.

Náhradní schéma indukčního ohřevu můžeme zjednodušit na tento obvod



Obrázek 6 Zjednodušené schéma indukčního ohřevu

Převod  $p$  vyjádříme pomocí poměru proudů

$$\hat{p} = \frac{\hat{I}_2}{\hat{I}_1} = -\frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2} \quad (2.3.8)$$

Tento poměr proudů vyjadřuje *transformační převod* v komplexní formě. Nás ale zajímá pouze absolutní hodnota.

$$p = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\sqrt{\omega^2 M^2}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} \quad (2.3.9)$$

$$p^2 = \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (2.3.10)$$

Dosazením do  $\hat{Z}_1$  dostaneme

$$\hat{Z}_1 = R_1 + p^2 R_2 + j\omega(L_1 + p^2 L_2) = R_I + j\omega L_I \quad (2.3.11)$$

kde

$$R_I = R_1 + p^2 R_2 \quad (2.3.12)$$

$$L_I = L_1 - p^2 L_2 \quad (2.3.13)$$

Výraz  $p^2 R_2$  vyjadřuje přetransformovaný odpor ze sekundárního obvodu na primární obvod,  $p^2 L_2$  vyjadřuje stejně přetransformovanou indukčnost. Tím můžeme obvod podle obrázku 5 nahradit jednodušším obvodem podle obrázku 6, který odebírá při napětí  $U_1$  naprosto stejný proud  $I_1$  co do velikosti i fáze. Přitom  $R_2$  se transformuje na primární obvod kladně,  $L_2$  záporně. Výsledný odpor primárního obvodu proto vzroste, indukčnost se zmenší [11].

V praxi, pro výpočet indukčního ohřevu, známe nejčastěji frekvenci  $f$  napájecího zdroje, napětí  $U_1$  tohoto zdroje a příkon  $P_I$ . Občas je zadán příkon  $P_2$ , jdoucí do vsázky místo příkonu  $P_I$ .

Budeme předpokládat, že induktor má jenom jeden závit stejných geometrických rozměrů, jako bude mít celé vinutí s  $N$  závity. Indexem (1) budeme označovat hodnoty, které spočítáme pro cívku s jedním závitem. Známe-li napětí  $U_{1(1)}$ , můžeme spočítat skutečný počet závitů  $N$

$$N = \frac{U_1}{U_{1(1)}} \quad (2.3.14)$$

Uvažujeme, že ohřívací cívka  $L_I$  má pouze jeden závit. Vsázku také uvažujeme jednozávitovou, jelikož vícezávitové vsázky se nevyskytují. Pro induktor s jedním závitěm rovnice budou mít tvar

$$\hat{\mathbf{Z}}_{1(1)} = R_{I(1)} + j\omega L_{I(1)} \quad (2.3.15)$$

kde

$$R_{I(1)} = R_{1(1)} + p_1^2 R_2 \quad (2.3.16)$$

$$L_{I(1)} = L_{1(1)} - p_1^2 L_2 \quad (2.3.17)$$

$p_{(1)}$  transformační převod pro jednozávitový induktor

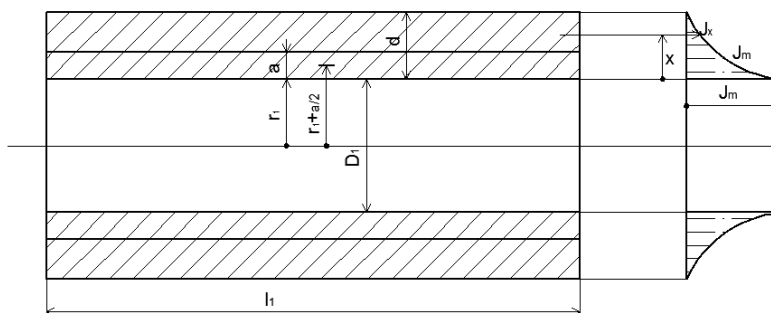
Pro který platí

$$p = N p_{(1)} \quad (2.3.18)$$

### 2.3.1 Výpočet odporu $R_{1(1)}$

Předpokládáme, že máme jednozávitovou cívku kruhového průřezu o poloměru  $r_1$ , který je mnohem větší než hloubka vniku  $a$ , což je většinou v praxi splněno. V jednozávitové cívce kruhového průřezu hustota proudu ubývá přibližně exponenciálně směrem ven z dutiny cívky po tloušťce vodiče  $d$ . Fázor hustoty proudu v hloubce  $x$  je

$$\hat{\mathbf{j}} = J_m e^{-x/a} e^{-jx/a} \quad (2.3.1.1)$$



Obrázek 7 Jednofázová cívka kruhového průřezu a průběh hustoty proudu

Odsud vidíme, že proudová hustota má v každém místě různou amplitudu a jiný fázový posun oproti hustotě na vnitřním povrchu cívky.

Činný odpor tlusté stěny se rovná

$$R = \frac{l}{\gamma a l_1} \quad (2.3.1.2)$$

$\gamma$       konduktivita

$l$       délka stěny ve směru toku proudu

$l_1$      šířka stěny

Když zvolíme tloušťku vodiče  $d$  menší než hloubku vniku  $a$ , snížíme účinnost celého ohřevu, potom průřez vodiče pro výpočet odporu počítáme  $dl_1$ . Tloušťka, při které je odpor nejnižší, se nazývá optimální tloušťka vodiče a rovná se  $d = \frac{\pi}{2}a$ . Nebudeme volit větší tloušťku  $d$  než  $\frac{\pi}{2}a$ , abychom neplýtvali materiálem.

Odpor  $R_{l(l)}$  spočítáme pomocí

$$R_{1(1)} = k \frac{l}{\gamma a l_1} = k \frac{\rho l}{a l_1} \quad (2.3.1.3)$$

Činitel  $k$  respektuje vzrůst odporu vinutí s  $N$  závitů a má hodnotu 1,04 až 1,2. Vícezátvotová vinutí mají mezi závity izolační mezery, proto mají menší průřez a tím pádem větší odpor o 4 % až 20 %. U induktoru na vyšší napětí a tedy s větším počtem závitů bude odpor a činitel  $k$  větší než u induktoru s menším počtem závitů.

Odpor kruhové cívky je dán vztahem

$$R_{1(1)} = k \frac{l}{\gamma a l_1} \quad (2.3.1.4)$$

střední hodnotu na poloměru spočítáme podle

$$l = r_1 + \frac{a}{2} \quad (2.3.1.5)$$



### 2.3.2 Výpočet indukčnosti $L_{I(I)}$

Indukčnost  $L_{I(I)}$  vypočítáme podobně jako odpor  $R_{I(I)}$ . Předpokládejme, že celý proud  $I_{I(I)}$  prochází pouze v hloubce vniku  $a$  a protéká středem hloubky vniku.

$$L_{I(I)} = \mu_0 \mu_r \frac{A_1}{l_1} \alpha_1 \quad (2.3.2.1)$$

$\mu_r$  poměrná permeabilita

$A_1$  plocha průřezu dutiny cívky zahrnující v sobě i plochu vymezenou jednou polovinou hloubky vniku  $a$ .

$$A_1 = \pi \left( r_1 + \frac{a}{2} \right)^2 \quad (2.3.2.2)$$

$l_1$  osová délka cívky – ve směru magnetických siločar

$\alpha_1$  koeficient zahrnující v sobě vliv tvaru průřezu cívky a rozměrových poměrů [11].

Pokud se mění plocha průřezu dutiny  $A_1$  po délce ohřívací cívky, můžeme dosadit za  $A_1$  střední hodnotu  $A_{1S}$

$$\frac{l_1}{A_{1S}} = \frac{l'_1}{A'_1} + \frac{l''_1}{A''_1} + \frac{l'''_1}{A'''_1} + \dots \quad (2.3.2.3)$$

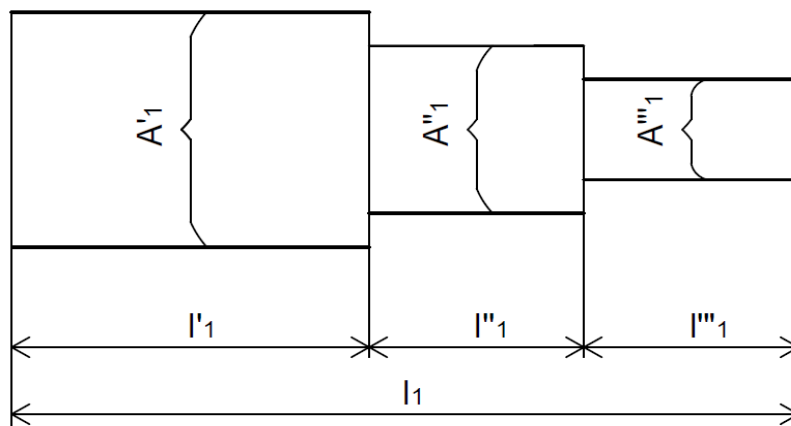
Z toho odvodíme

$$A_{1S} = \frac{l_1}{\frac{l'_1}{A'_1} + \frac{l''_1}{A''_1} + \frac{l'''_1}{A'''_1} + \dots} \quad (2.3.2.4)$$

$A'_1, A''_1, A'''_1$  jednotlivé průřezy dutiny vinutí.

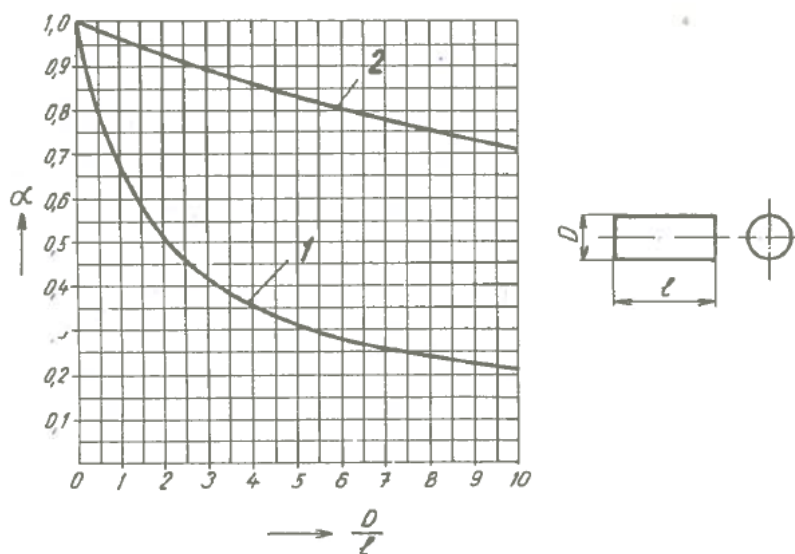
$l'_1, l''_1, l'''_1$  jednotlivé délky průřezu.

Předpokládáme, že se jednotlivé průřezy dutiny vinutí od sebe moc neliší.



Obrázek 8 Odstupňovaný průřez dutiny cívky

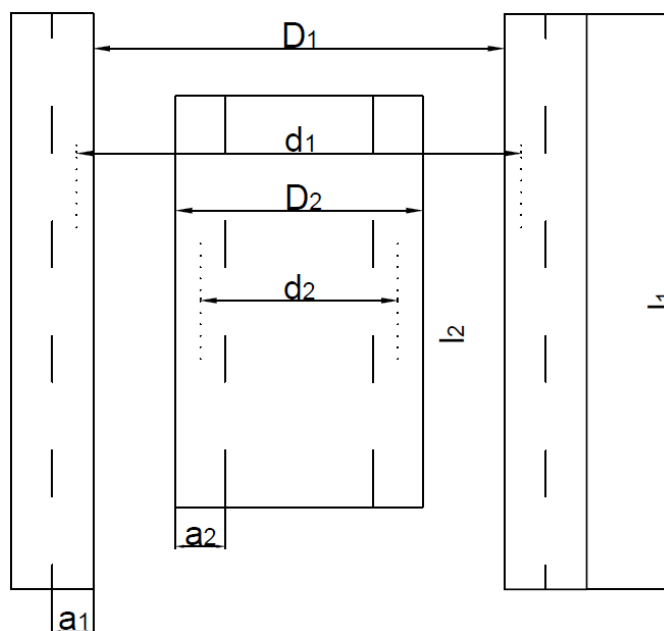
Koeficient  $\alpha_1$  můžeme spočítat nebo odečíst z grafu pro poměry, které patří ke střednímu průřezu  $A_{1S}$ . Přesnost určení indukčnosti prázdné ohřivací cívky je velmi důležitá, jelikož ovlivňuje přesnost celého výpočtu.



Obrázek 9 Součinitel  $\alpha$  pro různé poměry průměrů cívek k jejich délce[11]

### 2.3.3 Způsob výpočtu indukčních zařízení

Tuto metodu používáme pouze pro jednu vsázku s homogenními elektrickými a magnetickými vlastnostmi. Hloubka vniku  $a$  u vsázky i cívky musí být výrazně menší, než je průměr vsázky.



Obrázek 8 Válcová cívka s válcovou vsázkou

Z obrázku vidíme, že hloubka vniku u vsázky je  $a_2$  a u vodiče  $a_1$ .

$$d_1 = D_1 + a_1 \quad (2.3.3.1)$$

$$d_2 = D_2 + a_2 \quad (2.3.3.2)$$

Odpor  $R_{I(l)}$  spočítáme ze vztahu (23) pro  $l = \pi d_1$  a indukčnost  $L_{I(l)}$  ze vztahu (24), kde

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

Odpor  $R_2$  můžeme popsat rovnicí

$$R_2 = \frac{\rho l}{a_2 l_2} \quad (2.3.3.3)$$

kde

$$l = \pi d_2 \quad (2.3.3.4)$$

Indukčnost  $L_2$  pro nemagnetickou vsázku je

$$L_2 = \mu_0 \frac{A_2}{l_2} \alpha_2 \quad (2.3.3.5)$$

kde

$$A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} \quad (2.3.3.6)$$

$$\alpha_1 = f\left(\frac{d_2}{l_2}\right) \quad (2.3.3.7)$$

Vzájemnou indukčnost  $M_{(1)}$  popíšeme vzorcem

$$M_{(1)} = \mu_0 \left( \frac{\pi d_2^2}{4 l_2} \right) F \quad (2.3.3.8)$$

kde

$$F = f\left(\frac{d_1}{l_1}; \frac{d_2}{l_2}; \frac{l_1}{l_2}\right) \quad (2.3.3.9)$$

Činitel  $F$  určíme z tabulky viz. příloha

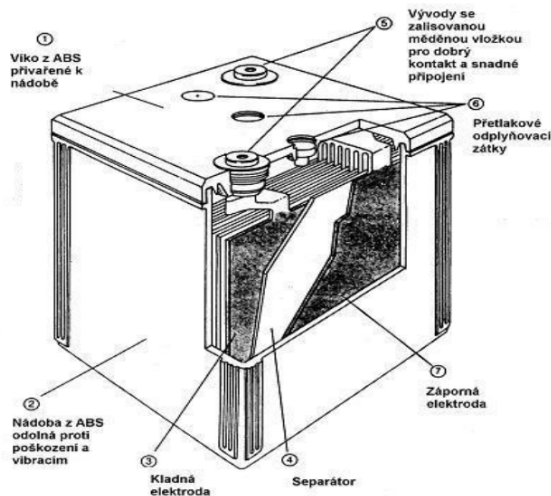
# Kapitola 3

## 3. Akumulátory

### 3.1 Olověné akumulátory

Akumulátory můžeme rozdělit podle hodnoty pH faktoru elektrolytu na akumulátory se zásaditým nebo s kyselým elektrolytem. Kyselý elektrolyt mají jenom olověné akumulátory.

Konstrukce tohoto typu akumulátoru je tvořená deskami s mřížkou ze slitiny olova s přídavkem vápníku, antimonu příp. selenu. Desky jsou vzájemně oddělené separátory z chemicky a elektricky neaktivního materiálu. Do mřížky desky se umísťuje aktivní materiál v pastovité formě. V dalším kroku pasta podléhá tepelnému zpracování a tímse pevně spojí s mřížkou. Kladné elektrody jsou za provozu více namáhány a vzniká nebezpečí uvolnění aktivní hmoty a její usazování na dně článku. U akumulátorů s delší dobou životnosti se používá trubkové provedení nebo provedení tyčové s kapsovitými separátory. Tyto elektrody eliminují vypadávání aktivních hmot. Systém desek je propojen olověnými spojkami, které na svém konci přecházejí do tvaru praporců, zakončených výstupními svorkami [8]. Svorky slouží pro připojení akumulátoru k zátěži.



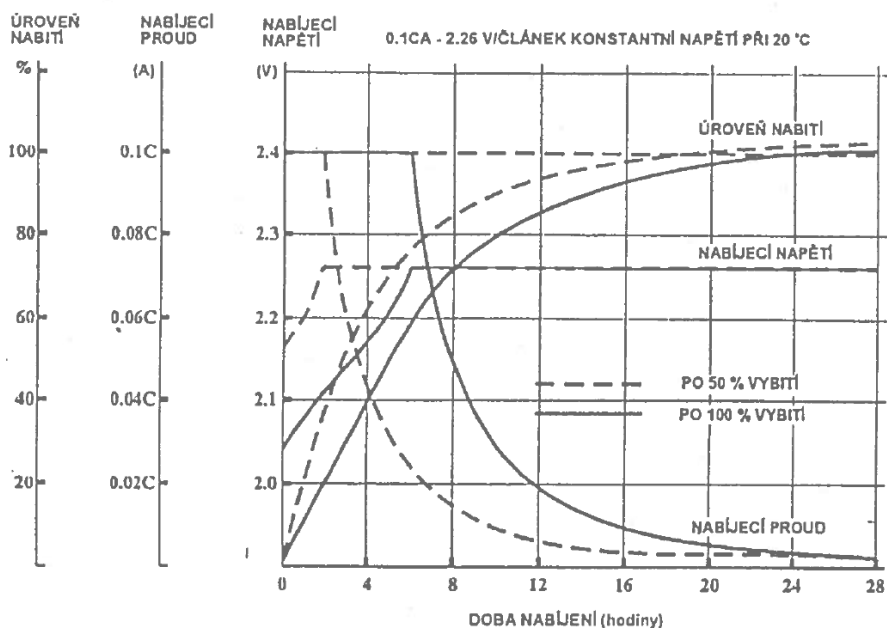
Obrázek 9 Konstrukce olověného akumulátoru [15]

Jako elektrolyt slouží roztok kyseliny sírové  $H_2SO_4$ . Kvalita dané kyseliny je stanovená normou. Pomocí měření hustoty elektrolytu můžeme zjistit stupeň vybití akumulátoru, jelikož

hustota se mění v závislosti na vybití akumulátoru. U staničních a trakčních akumulátorů je hustota elektrolytu v nabitém článku při pokojové teplotě  $1,24 \text{ g/cm}^3$ .

Nádoba akumulátoru se převážně dělá z termoplastů (ABS), výjimečně z tvrzené gumy.

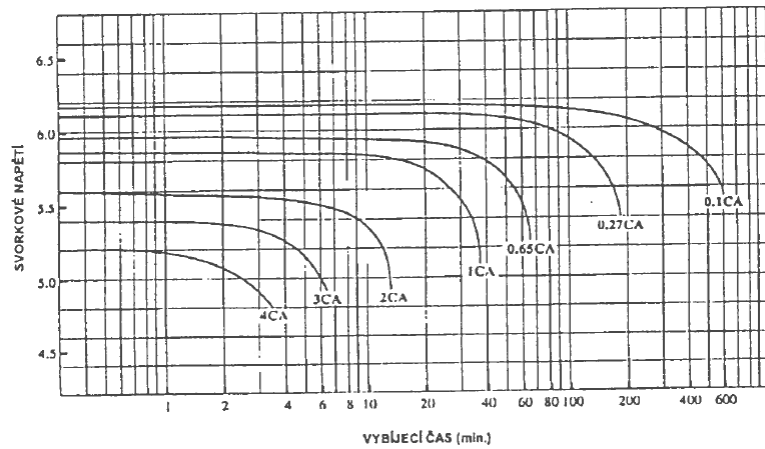
Typická charakteristika nabíjení pro olovené akumulátory je IU charakteristika. V první fázi budeme nabíjet konstantním proudem, který je obvykle 0,1 až 0,2 CA. CA je číselná hodnota nominální ampérhodinové kapacity. Jakmile napětí v průběhu nabíjecího procesu dosáhne hodnoty 2,4 V, přejde nabíjení do druhé fáze s konstantním napětím 2,4 V/článek. V první fázi se do článku uloží 80 % CA. V druhé části nabíjení nabíjecí proud klesá a tím se zpomalí ukládání energie do akumulátoru. Nabíjení ukončíme po dosažení konečného nabíjecího napětí, což je 2,67 V/článek. Tím je akumulátor nabit na 99 % CA.



Obrázek 8 IU charakteristiky Pb akumulátoru [8]

Při vybití akumulátoru klesá hodnota svorkového napětí akumulátoru. Z vybíjecích charakteristik lze zjistit několik potřebných hodnot:

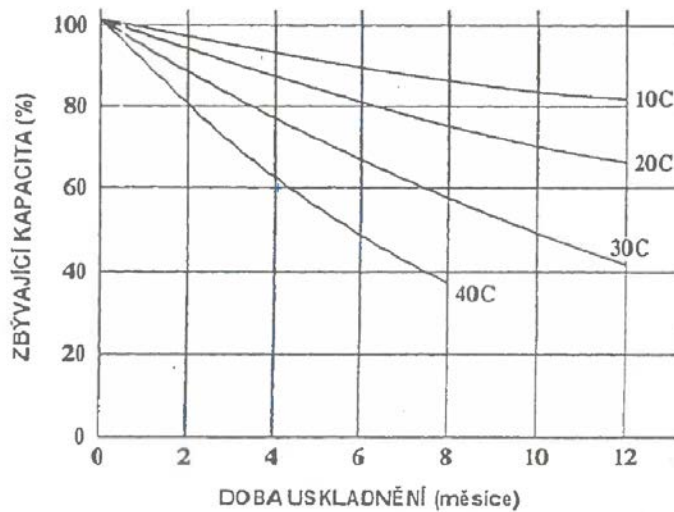
- Počáteční napětí naprázdno. Odpovídá přibližně napětí charakteristiky s nejmenším proudem v čase rovném nule.
- Počáteční napětí při zatížení – napětí dané charakteristiky při  $t = 0$ .
- Konečné napětí a čas při jeho dosažení [8].



Obrázek 9 Vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru [8]

Z výše uvedených hodnot lze určit průměrné napětí článku resp. akumulátoru. Při vybíjení proudem o hodnotě 0,1 CA můžeme průměrné napětí považovat za jmenovité. Jmenovitá hodnota jednoho článku olověné baterie je 2V. Z charakteristik je patrné, že čím vybíjecí proudy větší, tím nižší je svorkové napětí.

Během skladování akumulátory ztrácí část své kapacity samovybíjením. Míru samovybíjení ovlivňuje nejenom konstrukce desek a materiál, ale také skladovací teplota. Z obrázku 10 vidíme, že vhodná teplota pro skladování akumulátorů je do 20 °C, nejlépe ještě nižší. U staničních akumulátorů dochází k poklesu kapacity o 40 % za rok. Trvalé zvýšení teploty akumulátoru o 10 °C zkracuje jeho životnost na polovinu. Proto je zapotřebí zajistit jak skladovací, tak i provozní prostředí s teplotou do 25 °C.

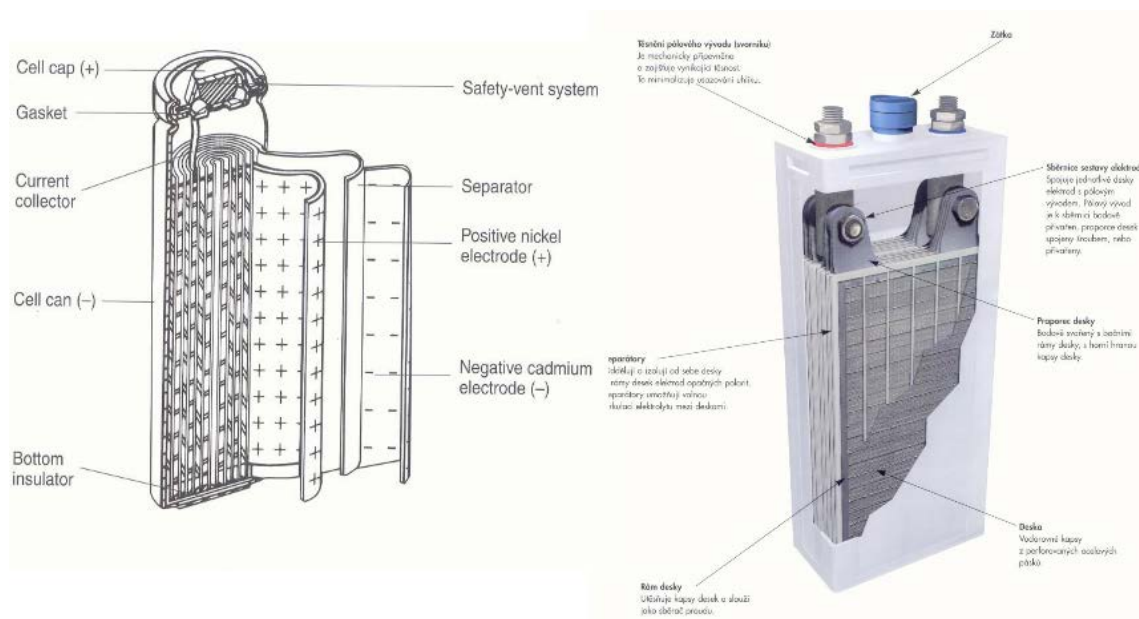


Obrázek 10 samovybíjení PB akumulátoru [8]

### 3.2 Nikl-kadmiové akumulátory

Nikl – kadmiové akumulátory patří do skupiny alkalických akumulátorů. Teto akumulátory se objevily v 80. letech devatenáctého století. V současné době je tento článek hodně rozšířen a jeho aplikace v oblasti jednotek malých kapacit stále narůstají.

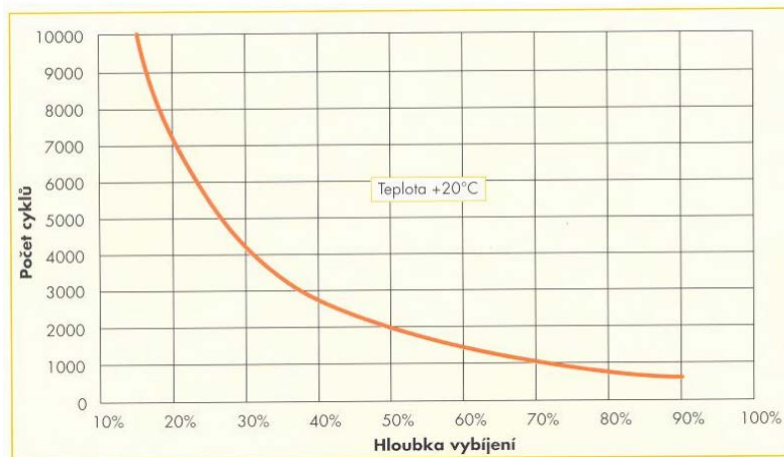
Akumulátorový článek je vyroben pomocí systému kladných a záporných elektrod oddělených separátory v elektrolytu. Vlastnosti a provedení NiCd akumulátorů se odlišuje u článků s deskovými elektrodami a u článků se svinutými elektrodami ve válcových pouzdech.



Obrázek 11 Konstrukční provedení NiCd článků [7]

Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu draselného KOH s přidávkem asi 5 % hydroxidu lithného LiOH o měrné hmotnosti 1,19 až 1,21 g/cm<sup>3</sup>[8]. Funkcí elektrolytu je pouze přenos iontů a během činnosti článku nedochází k jeho chemickým změnám. Během procesů nabíjení a vybíjení nedochází ke změně hustoty a proto nelze tímto způsobem indikovat stav nabití článků. Separátory článku se dělají z inertních průlinčitých materiálů z plastů nebo skelných vláken. Nádoby článků se v dnešní době vyrábí převážně z plastů (polyetylen, polypropylen), u starších provedení a pro náročné aplikace jsou ze silně poniklovaného ocelového plechu. Svorky se dělají většinou ve tvaru svorníku a jsou ocelové, poniklované. U těsných provedení se svinutými elektrodami jsou využívána pouzdra normalizovaných rozměrů. Kontakty jsou upraveny podle předpokládané aplikace [8].

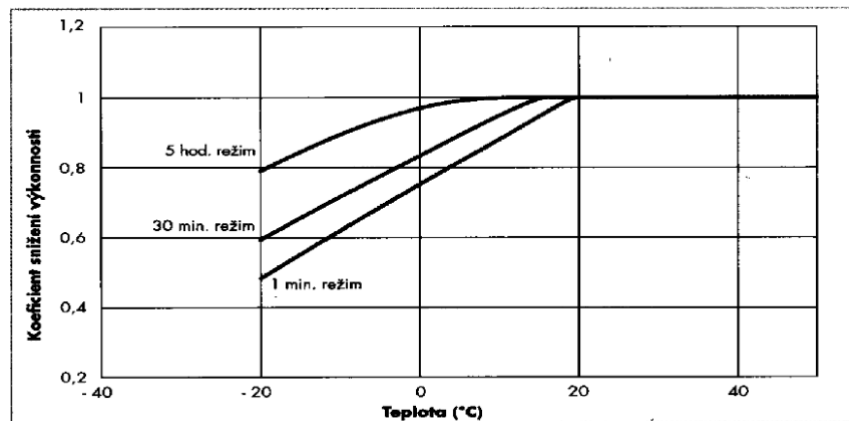




Obrázek 12 Životnost NiCd v závislosti na hloubce vybití [7]

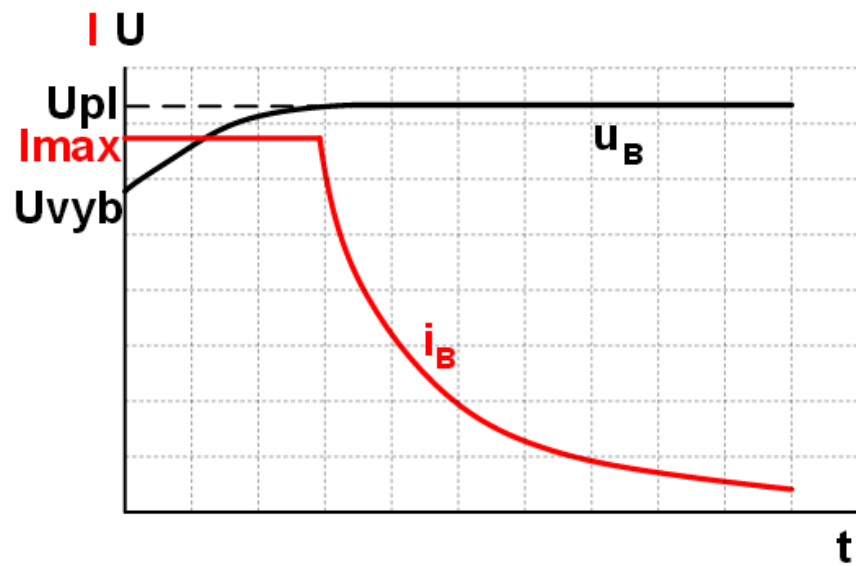
Životnost článků závisí na konstrukci. Z obrázku 9 vidíme, že při hlubokém vybití/nabíjení můžeme dosahovat u lisovaných kapsových elektrod poklesu kapacity na 80 % CA po více než 500 cyklech.

Provozní teplota také významně ovlivňuje životnost a kapacitu článků. Provozní teploty běžných článků jsou od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

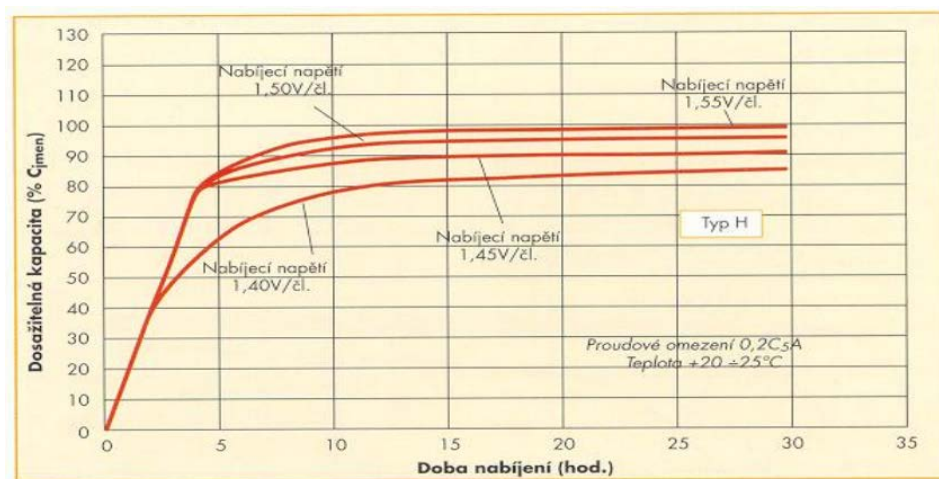


Obrázek 13 Vliv teploty na kapacitu NiCd [7]

Kompromisním řešením pro nabíjení NiCd akumulátoru je IU charakteristika nabíjecího procesu. V první části nabíjení je proud zdroje omezen, v druhé části nabíjení se nabíjí konstantním napětím. V druhé fázi nabíjení elektrolyt plynuje a dochází k úbytku vody. Ke konci nabíjení je vhodné nabíjecí napětí a tím i proud snížit a tím snížit i úbytek vody.



Obrázek 14 Nabíjecí charakteristika IU [9]



Obrázek 15 Dosažitelná kapacita v závislosti na době nabíjení konstantním napětím [7]

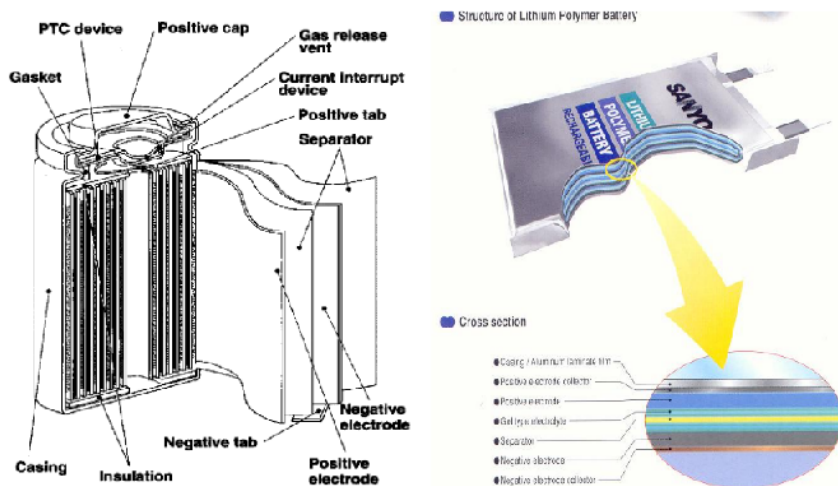
U článků se svinutými elektrodami se může projevit tzv. paměťový efekt. Tento efekt vzniká v důsledku neúplného vybití baterie. Při nabití neúplně vybitých článků nikdy akumulátor nedosáhne své plné kapacity.

### 3.3 Lithiové akumulátory

#### 3.3.1 Lithium – iontové články s tekutým elektrolytem

Záporná elektroda je vyrobená z oxidu kobaltolithného  $\text{LiCoO}_2$ , nebo z ekologických důvodů z oxidu manganičitolithného  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , nebo z oxidu nikelatholithného  $\text{LiNiO}_2$ . Jako materiál kladné elektrody se používá tetrafluoboritan lithný  $\text{LiBF}_4$ .

Napětí článku je 3,6 V. Akumulátorový článek se skládá ze systému kladných a záporných elektrod, oddělených separátory, a elektrolytu [8]. Elektrody jsou vyrobené buď ve tvaru svinutých pásků nebo v deskovém provedení v sendvičovém nebo v meandrovém uspořádání.



Obrázek 16 Li – ion a Li - Pol akumulátory [9]

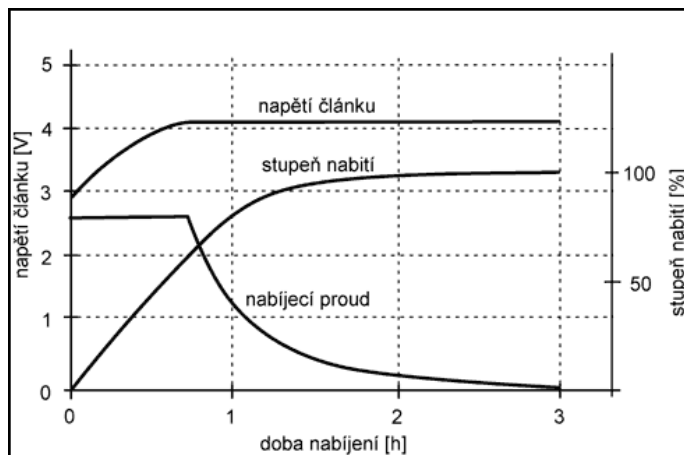
#### 3.3.2 Lithium – iontové polymerové a lithium polymerové články

Je to vylepšená konstrukce lithium – iontového akumulátoru. Elektrolyt je ve formě gelu spojen s polymerem. Mají skoro stejné vlastnosti jako Li – iontový článek s tekutým elektrolytem. Napětí článku je 3,6 V. Využívají se v mobilních telefonech, digitální technice atd.

Pomocí technologie výroby lze vyrobit elektrodový systém velmi pružný a tenký a můžeme jej stočit buď do válcového pouzdra, nebo složit do sendvičové struktury.

Nevýhodou je menší počet nabíjecích cyklů a nebezpečí požáru při přebíjení.

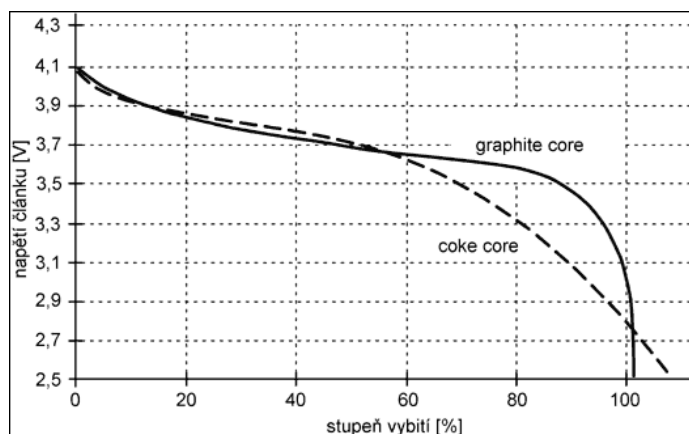
Při nabíjení postupujeme podobně jako při nabíjení ostatních typů akumulátorů. Velikost konečného napětí při nabíjení se rovná 4,2V a je třeba ji dodržet s přesností  $\pm 1\%$ . Při překročení této hodnoty dochází k trvalé degradaci aktivní hmoty článku a tím ke zkrácení jeho životnosti. Při nižším napětí naopak dosáhneme plné kapacity.



Obrázek 17 Nabíjecí charakteristiky lithiového článku [10]

V první fázi nabíjecího cyklu nabijeme článek pomocí konstantního proudu o velikosti 0,7 až 0,8 A. Jakmile se dostaneme na hodnotu konečného napětí, udržujeme napětí na této úrovni do konce nabíjení, tzn. do poklesu nabíjecího proudu pod 5 % hodnoty počátečního proudu.

Vybíjecí charakteristiky jsou obdobné jako u jiných akumulátorů a mají sestupný charakter. Konečné vybíjecí napětí je 3 V. Při vybití článku pod tuto hodnotu je nutno tento článek znovu nabít velmi malým proudem až do hodnoty vybíjecího napětí. Následující postup je standardním postupem.



Obrázek 18 Vybíjecí charakteristiky lithiového článku [10]

Samovybíjení Li – ion článků za normální teploty činí 3 až 5 % CA za měsíc, což umožňuje skladovat nabitě články bez dobíjení více než 1 rok. U Li – polymerových článků je samovybíjení asi 3 až 5 krát rychlejší a vyžadují při skladování interval dobíjení 3 až 6 měsíců podle typu článku a skladovací teploty [8].

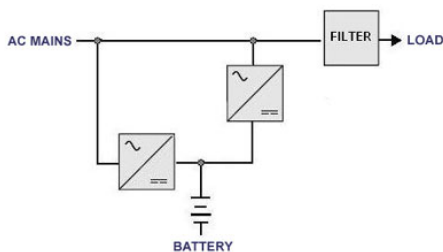
### 3.4 Zdroje nepřerušovaného napájení

Garance stálé dodávky elektrické energie je podmínkou pro bezporuchovou činnost mnohých zařízení, přístrojů, výpočetních systémů a technologických procesů. Většina moderních aplikací je napájena z rozvodné energetické sítě a je závislá na dodávce napětí v potřebném množství a kvalitě. Spotřebitel nemůže předvídat nebo ovlivnit dodávky elektrické energie nebo její kvalitu, protože jsou závislé na momentální situaci v síti. Pro zabezpečení stálé dodávky elektrické energie se používají zálohovací zdroje nepřerušovaného napájení UPS (Uninterruptible Power Sources). Pro krátkodobé zajištění výpadků se používají elektronické zdroje s akumulátory jako zásobníky energie.

V dnešní době rozlišujeme několik základních typů elektronických UPS, které jsou označovány jako on – line a off – line.

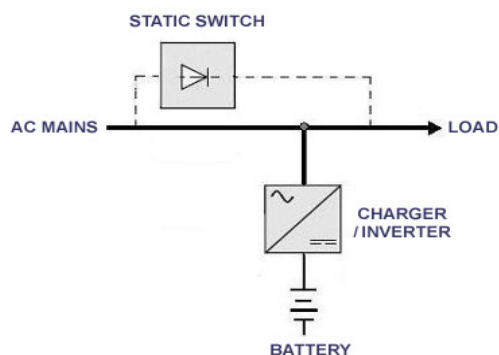
V kategorii off – line výkonový střídač v době dodávky napětí ze sítě nepracuje a běží pouze vyhodnocovací obvody, které indikují situaci.

Uspořádání Standby je nejjednodušší uspořádání a slouží ke kontaktnímu připojení střídače po výpadku sítě. Při tomto zapojení dochází ke krátké bezproudé pauze cca 2 až 5 ms, napětí ze střídače není ve fázi s původním napětím sítě, proto při napájení některých typů zátěží může dojít k přechodovým dějům. Tento typ UPS používáme pro zátěže s výkony do několika stovek voltampérů.



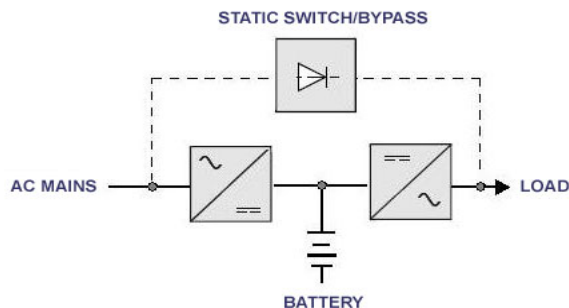
Obrázek 19 UPS typu “Standby” [14]

Line Interactive je dalším typem této kategorie UPS. Tento typ obsahuje navíc člen, který dovoluje regulovat nárůsty nebo poklesy napětí sítě a do zátěže je dodáváno napětí s menší odchylkou od jmenovité hodnoty. Jako regulační člen se většinou používá autotransformátor s přepínáním odboček vinutí. Výkonový obvod střídače je odpojen [8]. Řídicí obvod u většiny těchto UPS sleduje nejenom napětí, ale navíc i fázi. Díky tomu, že po výpadku síťového napětí ve střídači generujeme napětí ve stejné fázi, dojde po přepnutí zátěže na napětí ze střídače k minimálním přechodným dějům. Toto uspořádání používáme pro výkony 0,2 až 10 kVA.



Obrázek 20 UPS typu “Line interactive” [14]

U kategorie on – line výkonový střídač pracuje po celou dobu provozu. Double conversion uspořádání trvale dodává výkon ze střídače do zátěže. Ve stejnosměrném obvodu je trvale zapojený pracující usměrňovač a akumulátor. Když nastane výpadek napětí v síti, okamžitě zareaguje akumulátorová baterie a začne dodávat elektrickou energii bez jakékoliv prodlevy. Problémem tohoto uspořádání je nízká účinnost. Typ double conversion se vyrábí pro výkony řádu jednotek až stovek kVA.

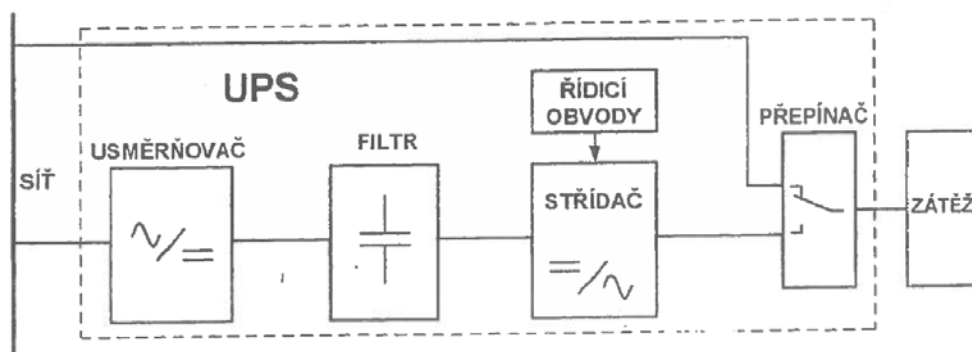


Obrázek 21 UPS typu “Double conversion“ [14]

Typ Single conversion řeší nevýhodu špatné účinnosti. V normálním provozu je střídač trvale v provozu, ale není zatížen výkonem zátěže. Pokud nastane výpadek napětí sítě, převezme střídač plný výkon.

### 3.5 Akumulátory v UPS

Z výše uvedených typů UPS vyplývají různé provozní podmínky pro akumulátory v jednotlivých typech. Prakticky ve všech aplikacích se používají olověné akumulátory, jen někteří výrobci používají hermetizované NiCd články pro zátěže malých výkonů, a to převážně u přenosového provedení UPS. Olověné akumulátory mají uzavřené vlisové nebo gelové provedení a u jednotek malých výkonů jsou umístěny ve skříní přístroje, obvykle v jeho spodní části. U velkých jednotek pro zálohování po delší dobu nebo pro zálohování větších výkonů je typické, že akumulátory jsou umístěny mimo skříně s výkonovou a řídicí elektronikou a jsou instalované v samostatných kontejnerech, které jsou propojeny vnějšími kabely s řídicí elektronikou. Pro provedení kontroly a údržby na akumulátorech jsou UPS vybaveny tzv. bypass obvodem, který umožňuje přepojit provoz UPS přímo na síť a odpojit obvody střídače, akumulátoru a obvody nabíjení.



Obrázek 22 Blokové schéma zdroje nepřerušného napájení – UPS [8]

Používání akumulátoru v UPS nese v sobě určité složitosti. Například u menších jednotek jsou UPS umístěny v blízkosti zálohovaných systémů, mohou to být výpočetní střediska nebo serverovny, tedy v prostředí se zvýšenou teplotou okolí. Pracovní teplota akumulátorů často bývá v rozmezí 30 až 45 °C a více, proto jejich životnost značně klesá.

Proces nabíjení je řízen pomocí programu UPS. Napětí na akumulátoru je udržováno na hodnotě 2,26 V/článek, po částečném vybití se nabíjí na 2,4 V/článek. Jakmile hodnota nabíjecího proudu klesne na 5 % své počáteční hodnoty, nabíjení se přepne na udržovací napětí. Při plném vybití akumulátoru se nabíjení provádí podle IU charakteristiky viz. Obrázek 24.

### **3.6 Monitorování stavu akumulátorových baterií**

Optimální stav akumulátorové baterie během provozu můžeme posuzovat v několika aspektech. Prvním aspektem je dodržování provozních podmínek akumulátorů, abychom mohli zajistit co nejdelší dobu životnosti. Druhým způsobem bude zajištění maximální doby činnosti zařízení napájeného akumulátorem. Pro zabezpečení optimálního stavu akumulátoru potřebujeme znát stav a vlastnosti tohoto akumulátoru v každém okamžiku jeho činnosti.

V dnešní době existuje spousta různých systémů pro monitorování stavu baterií, které nejvíce využívají snadno zjistitelné napětí baterie. Pod pojmem „monitorovací zařízení“ rozumíme zařízení různé složitosti – od poměrně jednoduchých systémů, v podstatě indikátorů napětí baterií, přes měřiče stavu nabití akumulátorů až po satelitní systémy. Univerzální monitorovací zařízení je určeno ke sledování stavu akumulátorů, k řízení činnosti systémů využívajících akumulátory s cílem optimalizovat provoz zařízení, zjednodušit údržbu a prodloužit životnost baterií.

Monitorovací zařízení musí sledovat následující veličiny:

Napětí:

- Celé baterie, kterou používáme v systému.
- Jednotlivých článků baterie, pokud nám to konstrukce tohoto typu baterie umožní.

Proud:

- Vstupní proud tekoucí z nabíječe do baterie při nabíjení, slouží k posouzení nabíjecího režimu.
- Výstupní proud tekoucí z baterie do příslušné zátěže.

Čas:

- Nabíjecího nebo vybíjecího procesu.
- Provozu příslušného zařízení.



Teplota:

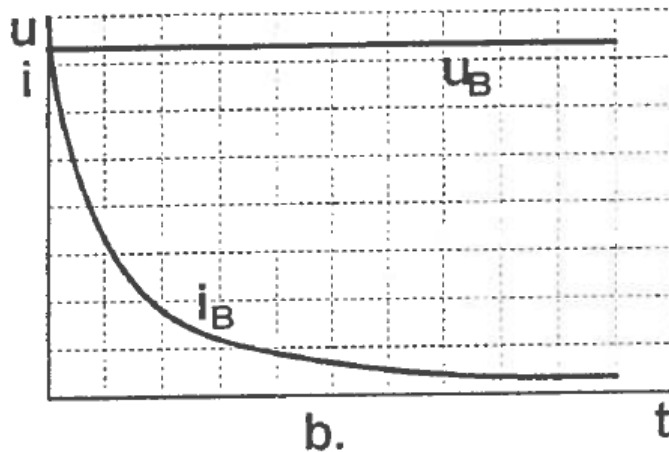
- Bateriového prostoru, z hlediska posouzení teplotního režimu činnosti akumulátoru.
- Povrchu baterie [12].

### 3.7 Zařízení pro nabíjení akumulátorů.

Pro různé typy akumulátorů potřebujeme rozdílné požadavky na vlastnosti nabíjecího zařízení.

U velkých nikl – kadmiových akumulátorů často bývá, že napětí akumulátoru je násobkem hodnoty 1,2 V.

Malé lithiové a nikl – kadmiové akumulátory se liší velikostí napětí a proto i postupem nabíjení.

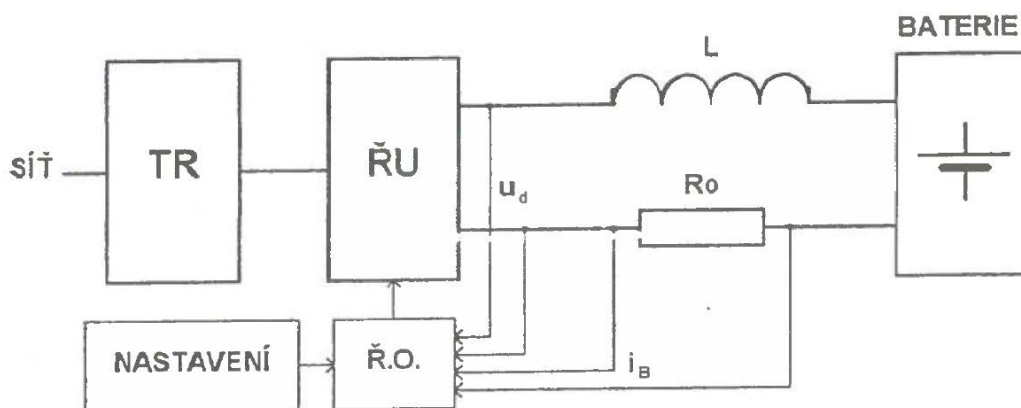


Obrázek 23 Nabíjecí charakteristika U [8]

Při nabíjení akumulátoru nejčastěji používáme charakteristiky s řízením nabíjecího proudu a napětí. Pro nabíjení můžeme použít nabíjecí zdroj s konstantním napětím. Velikost zdroje nepřevyšuje hranici plynovacího napětí (je to napětí, při kterém elektrolyt se začíná vřít), ale je větší než udržovací napětí, které je 2,24 V/článek. Nevýhodou tohoto způsobu nabíjení spočívá v tom, že v první fázi nabíjení je zdroj zatížen velkým proudem. Velikost proudu je omezena jenom vlastnostmi nabíjeného akumulátoru. Nabíjení v první fázi může trvat od několika desítek minut do hodiny, zdroj musí být navržen pro odpovídající velký výkon. V druhé fázi nabíjení bude proud výrazně menší a po celý zbytek nabíjecí doby jeho velikost kolísá

v rozmezí 5 až 20 % počátečního proudu. Tento způsob nabíjení není z ekonomického pohledu výhodný, protože má malou účinnost. Nabíjení pomocí charakteristiky  $U$  používáme tehdy, potřebujeme – li v co nejkratším čase alespoň částečně nabít akumulátor.

Nejlepším zdrojem pro nabíjení je zdroj s charakteristikou  $IU$ . Nejdříve nabíjíme konstantním proudem při postupném nárůstu napětí. Po dosažení napětí 2,4 V/článek se nabíjecí proces změní na nabíjení při konstantním napětí a klesajícím proudu. Regulace proudu na začátku nabíjecího procesu respektuje nejenom proudové možnosti nabíjecího zdroje, ale i doporučený maximální nabíjecí proud akumulátorů. Na konci nabíjení nabíjecí proud poklesne na hodnotu přibližně 1 % CA. Tímto proudem můžeme akumulátor dobít velmi dlouhou dobu bez možnosti poškození.



Obrázek 24 Blokové schéma řízeného nabíječe s charakteristikou  $IU$  nebo složitější

V případě konstantního proudu regulaci zaručuje řízený měnič napětí. Řídicí obvod porovnává napětí úměrné velikosti proudu, které detekuje ve stejnosměrném přívodu k nabíjenému akumulátoru pomocí bočnicku. Vzniklá odchylka je převedena na velikost zatěžovatele nebo na příslušnou velikost řídicího úhlu. Jakmile napětí dosáhne hodnoty 2,4 V/článek, řídicí úhel se udržuje skoro na konstantní velikosti. Řídicí obvod udržuje výstupní napětí na konstantní hodnotě při změnách velikosti napětí napájecí sítě.

Ukončení nabíjecího procesu je řízeno časovačem podle předem nastavené nabíjecí doby.

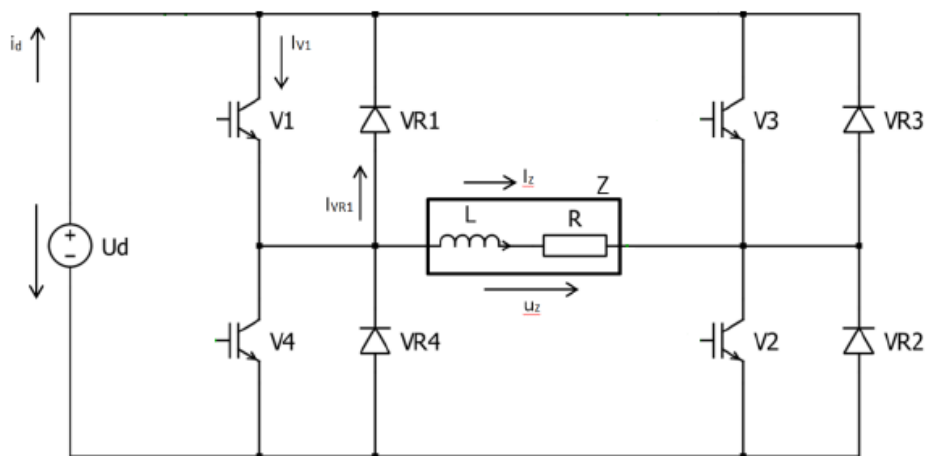
### 3.8 Napět'ový střídač

Střídačem nazýváme statický měnič, který mění elektrický stejnosměrný proud na střídavý. Střídače představují obrovskou skupinu měničů zahrnující velký počet používaných schémat. Při našem návrhu budeme používat jednofázový napět'ový střídač.

Napájecím zdrojem pro napět'ový střídač je zdroj s malou vnitřní impedancí. Výstupní napětí zdroje může být jak konstantní tak i regulovatelné. Zdrojem elektrické energie pro tento typ střídačů bývají sluneční baterie, olověné akumulátory a usměřovače napájené ze střídavé sítě. Napět'ové střídače reprezentují většinu střídačů pro indukční ohřevy, ve zdrojích regulovaného napětí a kmitočtu a zdrojích indukčního a kapacitního VA výkonu.

#### Jednofázový napět'ový střídač

Schéma se podobá zapojení jednofázového můstkového usměřovače. Větve tohoto „můstku“ jsou tvořeny antiparalelním spojením spínačů V1, V2, V3, V4 a diod VR1, VR2, VR3, VR4. Střídač je napájen zdrojem napětí  $U_d$ .

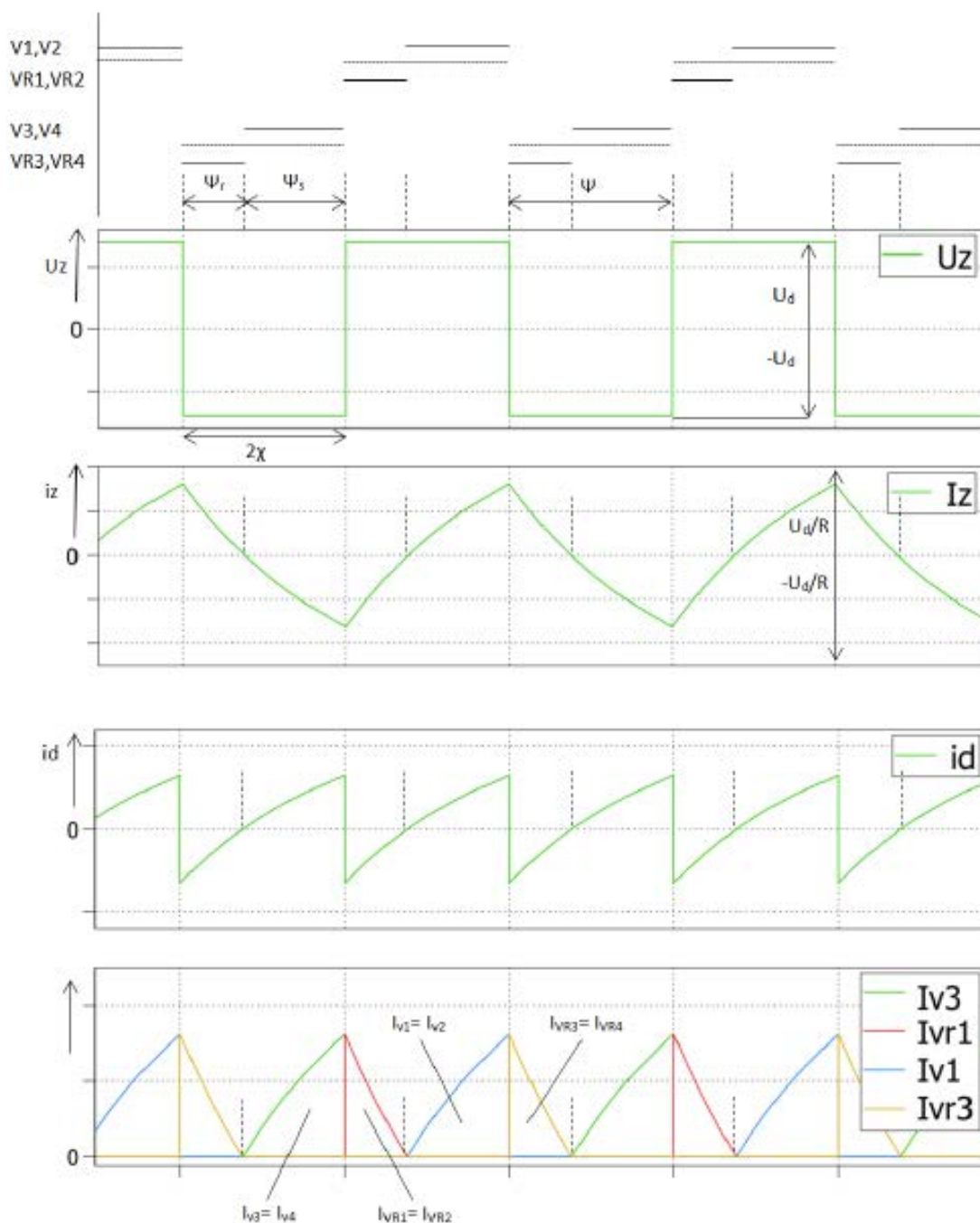


Obrázek 25 Jednofázový napět'ový střídač

V našem případě je zátěž tvořena kombinací odporu a indukčnosti. Z toho vyplývá, že nemůžeme vypnout a změnit polaritu proudů ve spotřebiči bez vzniku přepětí na indukčnosti  $L$ .

Svorka spotřebiče je bez ohledu na smysl proudu připojena vždy k té polaritě zdroje k níž je připojen spínač, mající na svém hradle spínací impuls. Vyslovený závěr je platný bez ohledu na to, jestli proud proteče dotýčným tranzistorem nebo jeho antiparalelní diodou. V případě, že u vstupní svorky spotřebiče nemá žádný z obou tranzistorů řídicí impuls, je tato svorka v případě

kladného smyslu proudu připojena na zápornou polaritu napájecího napětí a v případě záporného proudu připojena na kladnou polaritu napětí. Obráceně platí pro výstupní svorku [13].

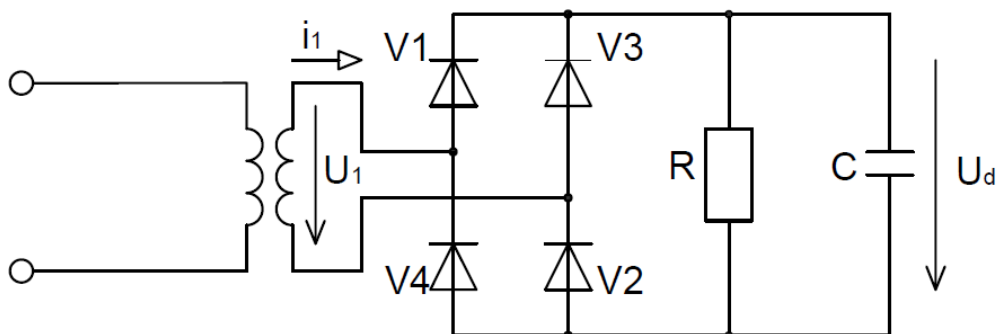


Obrázek 26 Spínací diagram, napěťové a proudové poměry  $I_f$  napěťového střídače [16]

Během taktu V1, V2 jsou sepnuty tranzistory V1 a V2. Na zátěži budeme mít plné napětí, tj.  $u_z = U_d$ . Zátěží protéká kladný proud  $i_z$ . Část energie se akumuluje v indukčnosti L a zbytek se ztrácí v odporu R. Po vypnutí spínačů V1 a V2 má proud  $i_z$  kladný smysl a protéká přes diody

VR3 a VR4. Napětí na zátěži změní svou polaritu  $u_z = -U_d$ . Po zániku proudu zpětnými diodami se sepnou tranzistory V3 a V4. Proud  $i_z$  bude mít zápornou polaritu a napětí na zátěži bude  $u_z = -U_d$ . Znovu se energie bude ztrácet v odporu R a akumulovat se v L. V průběhu taktu VR1, VR2 napětí na zátěži bude  $u_z = U_d$ , ale proud stále bude mít záporný smysl.

### 3.9 Jednofázový můstkový usměrňovač



Obrázek 27 Jednofázový můstkový usměrňovač

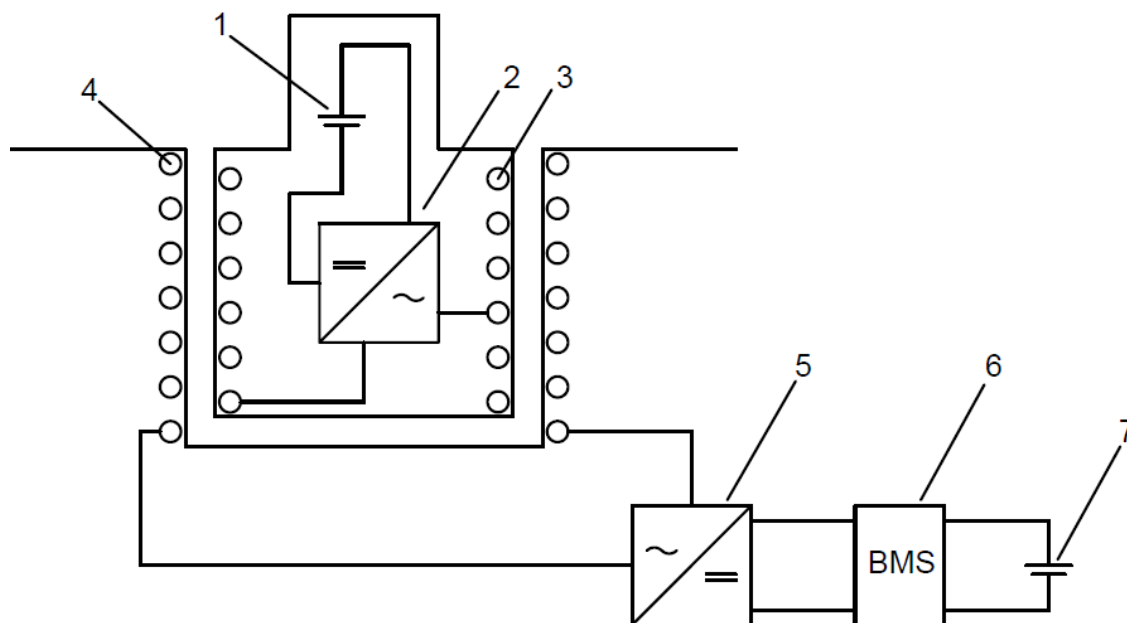
U můstkového usměrňovače prochází kladná půlvlna napájecího napětí  $u$  první dvojicí ventilů na zátěž a záporná půlvlna je pomocí jiné dvojice ventilů pro zátěž převedená na kladnou polaritu. Musíme si uvědomit, že ze dvou ventilů V1 a V3 bude vést pouze ten, kterého anodové napětí je větší než napětí jiného. Ve stavu komutace mohou být ve vedení obě součástky najednou. Po komutaci je na druhém ventilu závěrné napětí rovné velikosti napětí transformátoru. Podobně to bude platit i pro součástky V2 a V4. Bude vést pouze ta součástka, na které katodové napětí bude nejzápornější. V případě řízeného můstku dojde k sepnutí ventilu s kladným blokovacím napětím s malým zpožděním podle řídicího úhlu  $\alpha$ .

Při připojení můstkového usměrňovače na napětí není kondenzátor nabitý, tedy napětí  $U_d$  vzrůstá od nuly. Kondenzátor se brání skokové změně napětí, ale dovoluje skokovou změnu proudu. Součástky mají být dimenzovány na velkou proudovou špičku, ke které dojde v první půlperiodě. Ve druhé půlperiodě už není proudová špička tak velká, protože se jedná o ustálený stav.

# Kapitola 4

## 4 Nabíjecí zařízení

### 4.1 Popis nabíjecího systému



Obrázek 28 Systém pro nabíjení akumulátoru pomocí indukčního přenosu energie

- 1 Primární akumulátorová baterie
- 2 Střídač
- 3 Primární vinutí
- 4 Sekundární vinutí
- 5 Usměrňovač
- 6 Battery management system
- 7 Sekundární akumulátorová baterie

V této diplomové práci řešíme bezdrátové nabíjení akumulátorové baterie, která slouží jako záložní zdroj pro řídicí systém semaforu. Náš nabíjecí systém je založen na indukčním přenosu energie. Pro tento přenos energie jsme vybrali variantu válec ve válci z důvodu lepší účinnosti. Na obrázku 28 je schematicky naznačeno, že akumulátor, který potřebujeme nabíjet, je umístěn

v zemi. Hloubka tohoto umístění je 1 metr, takže budeme předpokládat, že během roku je teplota baterie konstantní. Na svorky baterie je připojen tzv. "Battery management system", který bude zjišťovat stav sekundární baterie během nabíjecího procesu.

Tento systém se skládá z primární a sekundární strany. Primární stranu tvoří válec, ve kterém je umístěný akumulátor, ze kterého budeme záložní zdroj nabíjet, dále střídač a induktor. Střídač potřebujeme pro přeměnu stejnosměrného napětí a proudu na střídavé, jelikož indukční přenos potřebuje střídavou složku elektrické energie. Sekundární stranu tvoří vsázka, usměrňovač a akumulátorová baterie s BMS systémem. Jakmile se výkon dostane přes vzduchovou mezeru do sekundárního obvodu, musí být zase převeden do stejnosměrné složky, jelikož nemůžeme akumulátor nabíjet střídavým proudem. Záložní baterie musí být alespoň jednou za rok vybrána ze země a proměřena, protože se může stát, že akumulátorová baterie měla výrobní vadu a proces stárnutí baterie by mohl být mnohem rychlejší.

Víme, že řídicí systém semaforu má výkon  $P_s = 50 \text{ W}$ , napětí  $U_s = 24 \text{ V}$ . Z toho můžeme spočítat proud  $I_s$ , který systém bude odebírat

$$I_s = \frac{P_s}{U_s} \quad (4.1.1)$$

Akumulátorová baterie musí zajistit trvalý výkon po dobu pěti hodin. Proto je potřeba zjistit potřebnou ampérhodinovou kapacitu. To spočítáme podle

$$CA = I_s \cdot t \cdot k \quad (4.1.2)$$

kde

CA kapacita baterie

$t$  doba, během které musí baterie do systému dodávat trvalý výkon

$k$  bezpečnostní koeficient, reprezentující stárnutí akumulátorové baterie

Pro záložní systém je použit akumulátor typu AGM od firmy EMOS model GT12 – 12, který má ale napětí 12 V a kapacitu 12 Ah. Proto potřebujeme 2 akumulátory spojit do série, abychom získali baterii o velikosti napětí 24 V. Konstrukce baterie je založena na základě olova a elektrolytu vázaného do sklolaminátových mikrovláken (absorbed glass mat). U akumulátoru tohoto typu je výrazně potlačován efekt samovybití. Jedná se přibližně o 1 – 3 % za měsíc.

Pro nabíjení baterie obecně platí pravidlo, že budeme nabíjet proudem o velikosti jedné desetiny kapacity baterie. Ale víme o existenci přesnějšího vzorce, pro který platí

$$I = 0.12 \cdot CA \quad (4.1.3)$$

Pokud akumulátor prakticky kompletně vybijeme a necháme tento stav několik dnů, dostaneme se do stavu hlubokého vybití. Hluboké vybití nastává, když napětí bez zatížení je menší než 11V. V tomto případě uvnitř článku nastartuje proces zvaný sulfatace. Síra, původně obsažená v elektrolytu, se vlivem vybití „nasakuje“ do aktivních hmot olověných desek. Nabíjením by došlo k opětovnému „vytlačení“ a smíchání síry se zředěným vodným elektrolytem, tedy zvýšení koncentrace kyseliny. V opačném případě však reaguje s olovem, dochází k další oxidaci, aktivní hmota olova se mění v síran olovnatý, nebo-li sulfát. Tento proces je nevratný a akumulátor by byl nevratně poškozen [19]. Z výše uvedeného vyplývá, že musíme udržovat akumulátor, pokud možno, neustále v nabitém stavu.

## 4.2 Účinnost jednotlivých typů uspořádání transformátorů

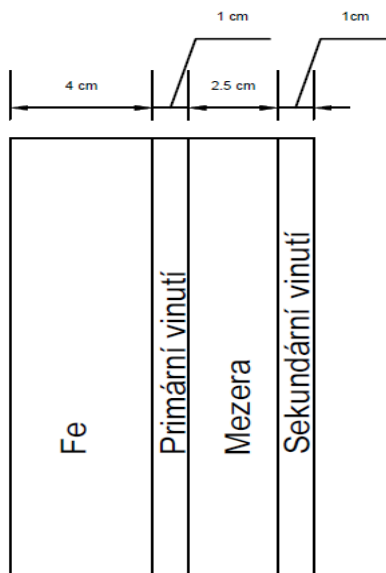
Pro určení účinnosti jsme vytvořili model v Agrosu pro jednotlivá uspořádání. Za první uspořádání „nad sebou“ a za druhé „válec ve válci“. Účinnost jsme modelovali pro různé frekvence, odtud se pokusíme najít optimální hodnotu frekvence pro indukční přenos energie. Výsledné hodnoty účinnosti určuje následující tabulky

f[Hz]	50	100	200	500	1000	1200	20000
$\eta$ (nad sebou)[%]	22	34	39	41	42	42	45
$\eta$ (válec ve válci) [%]	73	69	59	45	21	19	2

Obrázek 29 Vliv frekvence a uspořádání na účinnost indukčního přenosu



Jak je vidět z tabulky nejlepší účinnost vychází pro uspořádání „válec ve válci“ pro frekvenci 50 Hz. Konkrétní rozměry daného uspořádání, pro které byl model spočítán jsou na následujícím obrázku

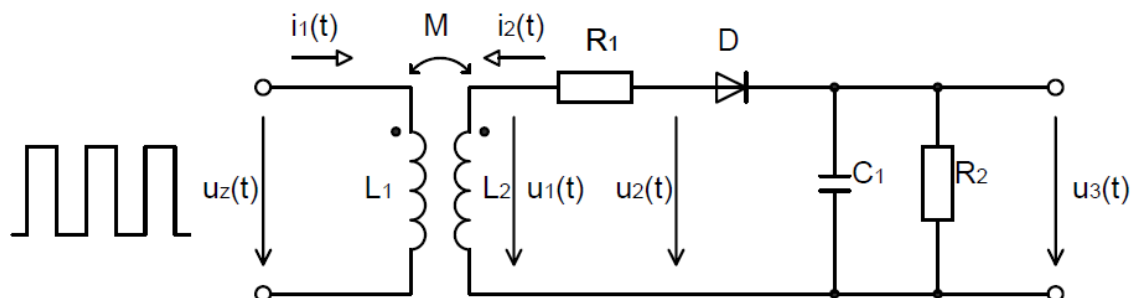


Obrázek 30 Konkrétní uspořádání systému indukčního přenosu

Pod pojmem mezera myslíme vzduchovou mezeru a plastovou mezeru, která má být mezi vinutími.

### 4.3 Model transformátoru

Pro výpočet všech napětí sekundárního obvodu můžeme použít metodu uzlových napětí pro zadané schéma.



Obrázek 31 Sekundární obvod nabíjecího zařízení

Napětí na induktoru  $u_z(t)$  a na vsázce  $u_l(t)$  můžeme popsat pomocí obvodových rovnic

$$u_z(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4.3.1)$$

$$u_1(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M \frac{di_1(t)}{dt} \quad (4.3.2)$$

Z prvního Kirchhoffůva zákona víme, že algebraický součet všech proudů v uzlu se rovná nule. Pro uzel 1 bude platit

$$0 = \frac{u_1(t) - u_2(t)}{R_1} + i_2(t) \quad (4.3.3)$$

Proud usměrňovačem označíme pomocí funkce rozdílu napětí, která popisuje volt – ampérovou charakteristiku diody

$$I_d = f(u_2(t) - u_3(t)) \quad (4.3.4)$$

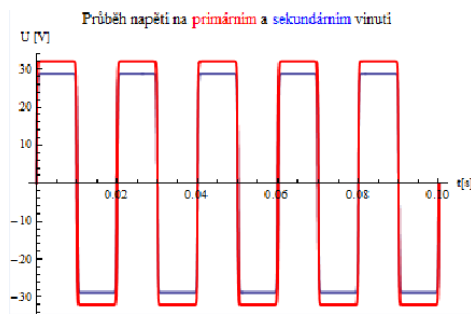
Pak rovnice pro uzel 2 bude mít tvar

$$0 = \frac{u_2(t) - u_1(t)}{R_1} + I_d(u_2(t) - u_3(t)) \quad (4.3.5)$$

Obdobným způsobem odvodíme rovnici pro uzel 3

$$0 = \frac{u_3(t)}{R_2} + C_1 \frac{du_3(t)}{dt} - I_d(u_2(t) - u_3(t)) \quad (4.3.6)$$

Pro model transformátoru jsme použili schéma na obrázku s tím, že na primárním vinutí je průběh obdélníkový s napětím 32 V. Tento model nám řekne, jak vypadá při tomto primárním napětí tvar sekundárního napětí. Výsledek je na následujícím obrázku.

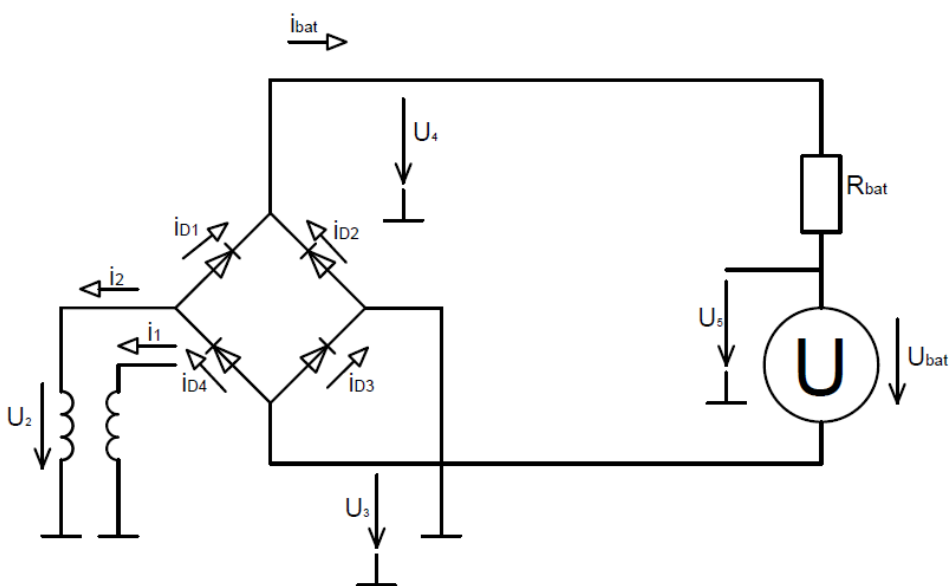


Obrázek 32 Průběh napětí na primárním a sekundárním vinutí

Jak je vidět napětí se tvarově příliš nemění, pouze se změnila amplituda napětí, což je způsobeno ztrátami v transformátoru. Z tohoto důvodu můžeme model usměrňovače a baterie řešit separátně v jiném modelu.

#### 4.4 Model můstkového usměrňovače s baterií

Tuto část budeme modulovat podle následujícího schématu.



Obrázek 33 Model můstkového usměrňovače

,jež je popsáno následujícími rovnicemi

$$i_{D1}(t) = i_D(u_2(t) - u_4(t)) \quad (4.4.1)$$

$$i_{D2}(t) = i_D(0 - u_4(t)) \quad (4.4.2)$$

$$i_{D3}(t) = i_D(u_3(t) - 0) \quad (4.4.3)$$

$$i_{D4}(t) = i_D(0 - u_4(t)) \quad (4.4.4)$$

$$i_{D4}(t) = i_{D1}(t) - i_2(t) \quad (4.4.5)$$

$$u_{bat} = u_5(t) - u_3(t) \quad (4.4.6)$$

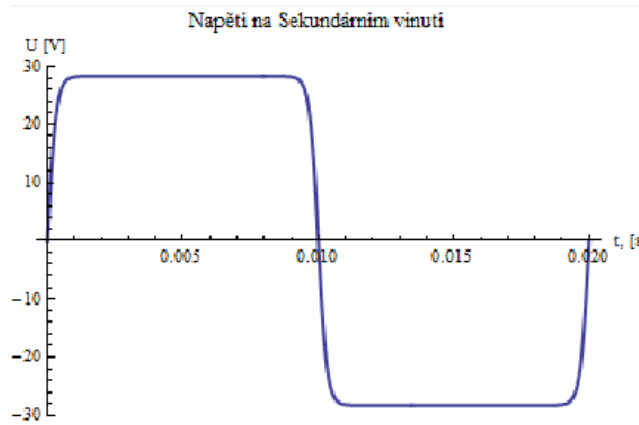
$$i_{bat}(t) * R_{bat} = u_4(t) - u_5(t) \quad (4.4.7)$$

$$i_{bat}(t) = i_{D1}(t) + i_{D2}(t) \quad (4.4.8)$$

$$i_{bat}(t) = i_{D3}(t) + i_{D4}(t) \quad (4.4.9)$$

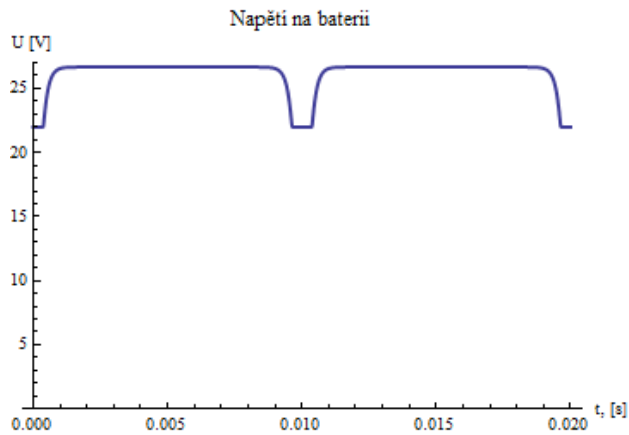
Na vstupu máme obdélníkové napětí o amplitudě 28,8 V, viz obrázek. Tento průběh modelujeme pomocí funkce

$$u_2(t) = 28,8 * \tanh[10 * \sin[2\pi * 50 * t]] \quad (4.4.10)$$



Obrázek 34 Napětí na sekundárním vinutí

Při tomto vstupu je na výstupní straně usměrňovače následující průběh napětí



Obrázek 35 Napětí na baterii

# Kapitola 5

## 5 Závěr

Ve své práci zabýval jsem se návrhem indukčního zařízení pro nabíjení akumulátorů. V úvodu snažil jsem se věnovat pozornost současným zařízením pro indukční přenos energie.

Ve druhé kapitole této práce je popsán indukční přenos energie a výpočet parametrů indukčních elektrotepelných zařízení. Pro naše nabíjecí zařízení byla zvolena varianta válec ve válci, která nejvíce odpovídá transformátoru. Tento „transformátor“ realizuje přenos energie na sekundární vinutí a má největší vliv na účinnost nabíjecího zařízení. Dále v teoretické části, je popsáno několik typů akumulátorů, jejich nabíjecí a vybíjecí charakteristiky a proces samovybíjení. Také zde byly probrány UPS systémy, klasická zařízení pro nabíjení akumulátorů. Jako sekundární akumulátor je použit olověný akumulátor s gelovým elektrolytem.

V poslední části diplomové práce zabývali jsme se návrhem nabíjecího zařízení. Jako primární akumulátor jsme použili lithiovou baterii, protože lithiová baterie má nejvyšší výkonovou hustotu cca 200 Wh/kg. Takže ze všech možných typů akumulátorů lithiové akumulátory budou mít nejmenší rozměry. Dále jsme tady porovnali účinnost dvou systémů pro indukční přenos energie. Jedním systémem bylo uspořádání dvou cívek nad sebou, druhým bylo provedení válec ve válci. Tuto simulaci jsme provedli v SW Agros2D. Nejdůležitějším bodem tady byl návrh matematického modelu v SW Mathematika, pomocí kterého jsme vypočítali parametry nabíjecího zařízení.

Na konci můžeme říct, že zadání práce bylo splněno, ale bohužel jsme neměli možnost v rámci této diplomové práce tento model postavit. Na základě dané diplomové práce by bylo možné takové nabíjecí zařízení postavit, nicméně další výzkum přinese nejspíš další cenné názory.

## 6. Seznam literatury

- [1] ОКОЛОВИЧ, Г. А. *Нагрев и нагревательные устройства*, 2 vyd. Барнаул: АЛТ ГТУ
- [2] WIKIPEDIA.ORG. [online]. [cit. 2015-01-14]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Skin\\_efekt](http://cs.wikipedia.org/wiki/Skin_efekt)
- [3] UHLÍŘ, Miroslav. *Indukční ohřevy ve strojírenství*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.
- [4] ODBORNECASOPISY.CZ. [online]. [cit. 2015-01-16]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25267](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267)
- [5] POWERWIKI.CZ. [online]. [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/Jehner/prednFinal.pdf>
- [6] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [7] OCW.CVUT.CZ. [online]. [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: [http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/245/10.NiCd\\_NiMH\\_aku.pdf](http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/245/10.NiCd_NiMH_aku.pdf)
- [8] CETL, Tomáš. *Aplikace elektrochemických zdrojů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02859-3.
- [9] OCW.CVUT.CZ. [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: [http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/245/11.Li\\_aku.pdf](http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/245/11.Li_aku.pdf)
- [10] BELZA.CZ. [online]. [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/charge/liion1.htm>
- [11] PROF. ING. JOSEF RADA, CSc. a kolektiv. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985.
- [12] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. ISBN 80-86534-03-0.
- [13] PROF. ING. PAVELKA, Jiří DrSc. PROF. ING. ČEŘOVSKÝ, Zdeněk DrSc. *Výkonová elektronika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [14] WWW.LIGHTNINGMAN.COM.AU [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.lightningman.com.au/online.html>
- [15] OCW.CVUT.CZ. [online]. [cit 2015-03-17]. Dostupné z: [http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/245/9\\_Pb\\_aku.pdf](http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/245/9_Pb_aku.pdf)
- [16] NOVOTNÝ, JAN. *Algoritmy řízení měničů pomocných pohonů*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

- [17] JELÍNEK, ALEŠ. *Jednotka pro bezdrátový přenos elektrické energie*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [18] EDUCON.ZCU.CZ. [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z:  
<http://educon.zcu.cz/image/ve/jednocestny-nerizeny/RC/index.htm>
- [19] SHOP.EMOS.CZ. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z:  
[http://shop.emos.cz/soubory-ve-skladu/ke-stazeni/navody/1201003600\\_31-B9683.pdf](http://shop.emos.cz/soubory-ve-skladu/ke-stazeni/navody/1201003600_31-B9683.pdf)

## Příloha

1. Činitel  $F$  jako funkce poměrů:  $d_1/l_1$ ,  $d_2/l_2$ ,  $l_1/l_2$
2. Zdrojový kód v SW Mathematika pro model transformátoru
3. Zdrojový kód v SW Mathematika pro model můstkového usměřovače s baterie
4. Zdrojový kód v SW AGROS pro uspořádání dvě cívky „nad sebou“
5. Zdrojový kód v SW AGROS pro uspořádání „válec ve válci“



**Příloha č. 1:** Činitel F jako funkce poměrů:  $d_1/l_1$ ,  $d_2/l_2$ ,  $l_1/l_2$

$\frac{d_1}{l_1}$	$\frac{d_2}{l_2}$	$l_1/l_2$										
		1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
0,2	0,2	0,966	0,880	0,809	0,746	0,994	0,648	0,608	0,574	0,542	0,514	0,488
0,3	0,2	0,930	0,858	0,781	0,722	0,672	0,628	0,591	0,556	0,527	0,498	0,475
	0,3	0,931	0,858	0,781	0,722	0,673	0,628	0,591	0,556	0,527	0,498	0,475
0,4	0,2	0,885	0,808	0,746	0,692	0,645	0,605	0,568	0,535	0,507	0,482	0,458
	0,3	0,886	0,809	0,747	0,693	0,646	0,605	0,568	0,535	0,507	0,482	0,458
	0,4	0,887	0,811	0,748	0,695	0,647	0,606	0,569	0,536	0,508	0,483	0,459
0,5	0,2	0,853	0,768	0,708	0,660	0,615	0,577	0,543	0,512	0,485	0,461	0,438
	0,3	0,837	0,769	0,710	0,661	0,616	0,578	0,443	0,512	0,485	0,461	0,438
	0,4	0,839	0,771	0,712	0,663	0,617	0,579	0,444	0,513	0,486	0,462	0,439
	0,5	0,841	0,773	0,714	0,663	0,618	0,580	0,515	0,514	0,487	0,462	0,440
0,6	0,2	0,787	0,725	0,672	0,626	0,585	0,548	0,517	0,488	0,422	0,439	0,419
	0,3	0,789	0,727	0,673	0,627	0,586	0,549	0,517	0,488	0,462	0,439	0,419
	0,4	0,791	0,730	0,675	0,629	0,588	0,550	0,518	0,489	0,463	0,440	0,420
	0,5	0,794	0,733	0,677	0,631	0,588	0,551	0,519	0,490	0,464	0,441	0,421
	0,6	0,798	0,736	0,680	0,633	0,590	0,553	0,521	0,491	0,465	0,442	0,422
0,7	0,2	0,740	0,685	0,636	0,593	0,555	0,521	0,491	0,464	0,441	0,418	0,399
	0,3	0,743	0,687	0,638	0,594	0,556	0,522	0,492	0,464	0,441	0,418	0,399
	0,4	0,746	0,690	0,640	0,596	0,557	0,523	0,493	0,465	0,442	0,419	0,400
	0,5	0,750	0,693	0,642	0,598	0,559	0,524	0,494	0,466	0,443	0,420	0,401
	0,6	0,755	0,697	0,645	0,601	0,561	0,526	0,496	0,467	0,444	0,421	0,402
	0,7	0,761	0,702	0,650	0,604	0,564	0,528	0,498	0,469	0,445	0,423	0,402
0,8	0,2	0,699	0,638	0,602	0,558	0,526	0,495	0,467	0,441	0,413	0,398	0,379
	0,3	0,702	0,640	0,603	0,560	0,527	0,496	0,468	0,442	0,419	0,398	0,379
	0,4	0,705	0,643	0,605	0,563	0,529	0,497	0,469	0,443	0,420	0,399	0,380
	0,5	0,710	0,647	0,608	0,566	0,531	0,499	0,470	0,444	0,421	0,400	0,381
	0,6	0,716	0,652	0,612	0,569	0,533	0,501	0,472	0,445	0,422	0,401	0,382
	0,7	0,720	0,657	0,615	0,573	0,536	0,503	0,474	0,447	0,423	0,402	0,383
	0,8	0,728	0,663	0,624	0,577	0,539	0,506	0,476	0,449	0,425	0,404	0,384
0,9	0,2	0,660	0,613	0,570	0,533	0,500	0,470	0,443	0,419	0,398	0,378	0,360
	0,3	0,996	0,615	0,572	0,534	0,501	0,471	0,444	0,420	0,399	0,378	0,360
	0,4	0,667	0,617	0,575	0,536	0,503	0,472	0,445	0,421	0,400	0,379	0,361
	0,5	0,672	0,621	0,577	0,539	0,505	0,474	0,446	0,422	0,401	0,380	0,362
	0,6	0,677	0,626	0,581	0,542	0,507	0,476	0,448	0,423	0,402	0,381	0,363
	0,7	0,685	0,631	0,585	0,546	0,510	0,478	0,450	0,425	0,403	0,382	0,364
	0,8	0,694	0,638	0,591	0,550	0,513	0,481	0,452	0,427	0,405	0,384	0,365
	0,9	0,704	0,644	0,596	0,554	0,517	0,484	0,455	0,429	0,407	0,386	0,366
	1,0	0,2	0,626	0,582	0,542	0,506	0,475	0,447	0,421	0,399	0,378	0,360
0,3	0,628	0,584	0,543	0,507	0,476	0,448	0,422	0,400	0,379	0,360	0,342	
0,4	0,632	0,587	0,545	0,509	0,478	0,449	0,423	0,401	0,389	0,361	0,343	
0,5	0,637	0,591	0,545	0,512	0,480	0,450	0,424	0,402	0,381	0,362	0,344	
0,6	0,643	0,596	0,552	0,515	0,482	0,452	0,426	0,403	0,382	0,363	0,345	
0,7	0,650	0,601	0,557	0,519	0,485	0,454	0,428	0,405	0,383	0,364	0,346	
0,8	0,659	0,608	0,562	0,523	0,488	0,456	0,430	0,407	0,385	0,365	0,347	
0,9	0,668	0,615	0,568	0,528	0,482	0,458	0,433	0,409	0,387	0,367	0,348	
1,0	0,680	0,624	0,575	0,532	0,496	0,460	0,436	0,411	0,389	0,369	0,349	

## Příloha č. 2: Zdrojový kód v SW Mathematica pro model transformátoru

```
ClearAll["Global`*"];
(*vstupnihodnoty*)
D1=0.08;
D2=0.15;
l1=0.15;
l2=0.15;
f=50;
γ1=56000000;
γ2=56000000;
μr1=1;
μr2=1;
α1=0.8;
α2=0.7;
n1=15;
n2=15;
k=1.04;
F=0.8;
(*sempridatfceGeomatd.*)
fceGeometrie[{D1_,D2_,l1_,l2_,f_,γ1_,γ2_,μr1_,μr2_,α1_,α2_,n1_,
n2_,k_,F_}]:=Module[{R1,a1,μ0=4*Pi*10-7,A1,L1,a2,R2,A2,L2,M},
a1=\[Sqrt](2/(2*Pi*f*γ1*μ0*μr1));
R1=n1*((k*2*Pi*(D1/2+0.5*a1))/(γ1*a1*l1));
A1=Pi*(D1/2+a1/2)2;
L1=n12*μ0*μr1*A1/l1*α1;
a2=\[Sqrt](2/(2*Pi*f*γ2*μ0*μr2));
R2=n2*((k*2*Pi*(D2/2-0.5*a2))/(γ2*a2*l2));
A2=Pi*(D2/2-a2/2)2;
L2=n22*μ0*μr2*A2/l2*α2;
M=L2*F;
{R1,R2,L1,L2,M}
]
geom={D1,D2,l1,l2,f,γ1,γ2,μr1,μr2,α1,α2,n1,n2,k,F};
parametry=fceGeometrie[geom];
L1=parametry[[3]];
L2=parametry[[4]];
M=parametry[[5]];
R1=parametry[[2]];
R2=1;
c=10-3;
ω=2*Pi*f;
T=2*Pi/ω;
uz=32*Tanh[20*Sin[ω*t]];
(*rovnice*)
induktory={uz==L1*i1'[t]+M*i2'[t],u1[t]==L2*i2'[t]+M*i1'[t]};
uzel1={0==i2[t]+(u1[t]-u2[t])/R1};
uzel2=D[{(u1[t]-u2[t])/R1==iD[u2[t]-u3[t]]},t];
```

```

uzel3={iD[u2[t]-u3[t]]==c*u3'[t]+u3[t]/R2};
pocs={i1[0]==0,i2[0]==0,u3[0]==0,u1[0]==0,u2[0]==0,u3[0]==0};
dohr=Union[induktory,uzel1,uzel2,uzel3,pocs];
(*reseni*)
nezname=Cases[dohr,_[t],{0,∞}]/.a_'[t]:>a//Union;
tmax=5T;
res=NDSolve[dohr,nezname,{t,0,tmax},StartingStepSize->10-6*T,MaxSteps->106][[1]];
napetiSekundar=Plot[u1[t]/.res,{t,0,tmax},PlotRange->All,PlotRange->All,PlotStyle->Thick,AxesLabel->{"t[s]","U[V]"},PlotLabel->"Průběh napětí na primárním a sekundárním vinutí"];
pl2=Plot[uz/.res,{t,0,tmax},PlotRange->All,PlotRange->All,PlotStyle->{Thick,Red},AxesLabel->{"t[s]","U[V]"}];
napetiTrafo=Show[napetiSekundar,pl2];
(*Exporty*)
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
Export["primASek.tiff",napetiTrafo];

```

**Příloha č. 3:**Zdrojový kód v SW Mathematica pro model můstkového usměřovače s baterie

```
ClearAll["Global`*"];
iD[uD_]:=10-7*(E19uD-1);
Plot[iD[uD],{uD,-1,1},PlotRange->{Automatic,{-
0.1,3}},PlotStyle->Thick,AxesLabel->{"uD[V]","iD[A"]}];
```

```
u2[t_]:=20* $\sqrt{2}$ Tanh[10*Sin[2*Pi*50*t]];
ubat=22;
Rbat=10;
rcediody={iD1[t]==iD[u2[t]-u4[t]],
iD2[t]==iD[0-u4[t]],
  iD3[t]==iD[u3[t]-0],
  iD4[t]==iD[u3[t]-u2[t]]
};
```

```
rcedal={iD4[t]==iD1[t]+i2[t],
ubat==u5[t]-u3[t],
ibat[t]*Rbat==u4[t]-u5[t],
ibat[t]==iD1[t]+iD2[t],
ibat[t]==iD3[t]+iD4[t]
};
```

```
rcepoc=Union[rcediody,rcedal]/.a_[t]:>a/.t->0
rcepoc//Length
Union[Cases[N[rcepoc],_Symbol,{0,∞}]]
respoc=FindRoot[rcepoc,{iD1,10-4},{iD2,10-4},{iD3,10-4},
{iD4,10-4},{ibat,10-4},{i2,10-4},
{u3,1},{u4,10},{u5,10}]]//Quiet;
p1=First/@{{iD1,10-4},{iD2,10-4},{iD3,10-4},{iD4,10-4},
{ibat,10-4},{i2,10-4},{u3,1},{u4,10},{u5,10}};
p2=p1/.respoc;
new=Thread[{p1,p2}];
respocF=FindRoot[rcepoc,new];
pocs=respocF/.{(a_->b_-):>a[0]==b}
rceDohr=Union[D[rcediody,t],rcedal];
nezname=Union[Cases[rceDohr,_Symbol[t]},{0,∞}]]];
```

```

tmax=0.02;
res=NDSolve[Union[rceDohr,pocs],nezname,{t,0,tmax}][[1]];
napetiBaterkaGraf=Plot[u4[t]-
u3[t]/.res,{t,0,tmax},PlotRange-
>{Automatic,{0,27}},PlotLabel-
>"Napětí nabaterii",AxesLabel->{"t, [s]","U
[V]"},PlotStyle->{Thick}]
napetinaSek=Plot[u2[t],{t,0,tmax},PlotRange-
>{Automatic,{-30,30}},PlotLabel-
>"Napětí na sekundárním vinutí",AxesLabel->{"t, [s]","U
[V]"},PlotStyle->{Thick}]
SetDirectory[NotebookDirectory[]]
Export["napetiBaterkaGraf.tiff",napetiBaterkaGraf]

Export["napetinaSek.tiff",napetinaSek]

```

**Příloha č. 4:** Zdrojový kód v SW AGROS pro uspořádání dvě cívky „nad sebou“

```
import agros2d as a2d

# problem

problem = a2d.problem(clear = True)

problem.coordinate_type = "axisymmetric"

problem.mesh_type = "triangle"

problem.frequency = 20000

# fields

# magnetic

magnetic = a2d.field("magnetic")

magnetic.analysis_type = "harmonic"

magnetic.matrix_solver = "mumps"

magnetic.number_of_refinements = 1

magnetic.polynomial_order = 2

magnetic.adaptivity_type = "disabled"

magnetic.solver = "linear"

# boundaries

magnetic.add_boundary("A=0", "magnetic_potential", {"magnetic_potential_real" : 0,
"magnetic_potential_imag" : 0})
```

```
# materials
```

```
magnetic.add_material("primar", {"magnetic_permeability" : 1, "magnetic_conductivity" :  
56000000, "magnetic_remanence" : 0, "magnetic_remanence_angle" : 0,  
"magnetic_velocity_x" : 0, "magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,  
"magnetic_current_density_external_real" : 0, "magnetic_current_density_external_imag" :  
0, "magnetic_total_current_prescribed" : 1, "magnetic_total_current_real" : 2,  
"magnetic_total_current_imag" : 0})
```

```
magnetic.add_material("vzduch", {"magnetic_permeability" : 1, "magnetic_conductivity" :  
0, "magnetic_remanence" : 0, "magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,  
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,  
"magnetic_current_density_external_real" : 0, "magnetic_current_density_external_imag" :  
0, "magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" : 0,  
"magnetic_total_current_imag" : 0})
```

```
magnetic.add_material("sekundar", {"magnetic_permeability" : 1, "magnetic_conductivity" :  
56000000, "magnetic_remanence" : 0, "magnetic_remanence_angle" : 0,  
"magnetic_velocity_x" : 0, "magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,  
"magnetic_current_density_external_real" : 0, "magnetic_current_density_external_imag" :  
0, "magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" : 0,  
"magnetic_total_current_imag" : 0})
```

```
# geometry
```

```
geometry = a2d.geometry
```

```
geometry.add_edge(0.1, 0, 0.11, 0)
```

```
geometry.add_edge(0.11, 0, 0.11, 0.01)
```

```
geometry.add_edge(0.11, 0.01, 0.1, 0.01)
```

```
geometry.add_edge(0.1, 0.01, 0.1, 0)
```

```
geometry.add_edge(0.1, -0.03, 0.11, -0.03)
```

```
geometry.add_edge(0.11, -0.03, 0.11, -0.02)
```

```
geometry.add_edge(0.11, -0.02, 0.1, -0.02)
```

```
geometry.add_edge(0.1, -0.02, 0.1, -0.03)
geometry.add_edge(0, 0.15, 0, -0.25, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0, -0.25, 0.25, -0.25, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0.25, -0.25, 0.25, 0.15, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0.25, 0.15, 0, 0.15, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})

geometry.add_label(0.105302, 0.00410727, materials = {"magnetic" : "primar"})
geometry.add_label(0.106336, -0.0256846, materials = {"magnetic" : "sekundar"})
geometry.add_label(0.108873, 0.0747735, materials = {"magnetic" : "vzduch"})
a2d.view.zoom_best_fit()
```



## **Příloha č. 5:**Zdrojový kód v SW AGROS pro uspořádání „válec ve válci“

```
import agros2d as a2d

# problem

problem = a2d.problem(clear = True)

problem.coordinate_type = "axisymmetric"

problem.mesh_type = "triangle"

problem.frequency = 20000

# fields

# magnetic

magnetic = a2d.field("magnetic")

magnetic.analysis_type = "harmonic"

magnetic.matrix_solver = "mumps"

magnetic.number_of_refinements = 1

magnetic.polynomial_order = 2

magnetic.adaptivity_type = "disabled"

magnetic.solver = "linear"

# boundaries

magnetic.add_boundary("A=0", "magnetic_potential", {"magnetic_potential_real" : 0,
"magnetic_potential_imag" : 0})
```

```
# materials
```

```
magnetic.add_material("primar", {"magnetic_permeability" : 1, "magnetic_conductivity" :  
5600000, "magnetic_remanence" : 0, "magnetic_remanence_angle" : 0,  
"magnetic_velocity_x" : 0, "magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,  
"magnetic_current_density_external_real" : 0, "magnetic_current_density_external_imag" :  
0, "magnetic_total_current_prescribed" : 1, "magnetic_total_current_real" : 2,  
"magnetic_total_current_imag" : 0})
```

```
magnetic.add_material("sekundar", {"magnetic_permeability" : 1, "magnetic_conductivity" :  
56000000, "magnetic_remanence" : 0, "magnetic_remanence_angle" : 0,  
"magnetic_velocity_x" : 0, "magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,  
"magnetic_current_density_external_real" : 0, "magnetic_current_density_external_imag" :  
0, "magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" : 0,  
"magnetic_total_current_imag" : 0})
```

```
magnetic.add_material("vzduch", {"magnetic_permeability" : 1, "magnetic_conductivity" :  
0, "magnetic_remanence" : 0, "magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,  
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,  
"magnetic_current_density_external_real" : 0, "magnetic_current_density_external_imag" :  
0, "magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" : 0,  
"magnetic_total_current_imag" : 0})
```

```
magnetic.add_material("ferro", {"magnetic_permeability" : 500, "magnetic_conductivity" :  
10000000, "magnetic_remanence" : 0, "magnetic_remanence_angle" : 0,  
"magnetic_velocity_x" : 0, "magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,  
"magnetic_current_density_external_real" : 0, "magnetic_current_density_external_imag" :  
0, "magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" : 0,  
"magnetic_total_current_imag" : 0})
```

```
# geometry
```

```
geometry = a2d.geometry
```

```
geometry.add_edge(0.05, 0, 0.05, -0.15)
```

```
geometry.add_edge(0.075, -0.15, 0.085, -0.15)
```

```
geometry.add_edge(0.085, -0.15, 0.085, 0)
```

```
geometry.add_edge(0.085, 0, 0.075, 0)
```

```
geometry.add_edge(0.075, 0, 0.075, -0.15)
geometry.add_edge(0.05, 0, 0.04, 0)
geometry.add_edge(0, 0, 0, -0.15, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0.04, -0.15, 0.04, 0)
geometry.add_edge(0.04, -0.15, 0.05, -0.15)
geometry.add_edge(0.05, 0, 0.075, 0)
geometry.add_edge(0.05, -0.15, 0.075, -0.15)
geometry.add_edge(0, 0, 0, 0.15, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0, 0.15, 0.25, 0.15, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0.25, 0.15, 0.25, -0.35, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0.25, -0.35, 0, -0.35, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0, -0.35, 0, -0.15, boundaries = {"magnetic" : "A=0"})
geometry.add_edge(0.04, -0.15, 0, -0.15)
geometry.add_edge(0, 0, 0.04, 0)

geometry.add_label(0.0273675, -0.0640795, materials = {"magnetic" : "ferro"})
geometry.add_label(0.047296, -0.072845, materials = {"magnetic" : "primar"})
geometry.add_label(0.0615935, -0.0715218, materials = {"magnetic" : "vzduch"})
geometry.add_label(0.0793637, -0.0685365, materials = {"magnetic" : "sekundar"})
geometry.add_label(0.101, 0.0878461, materials = {"magnetic" : "vzduch"})
a2d.view.zoom_best_fit()
```