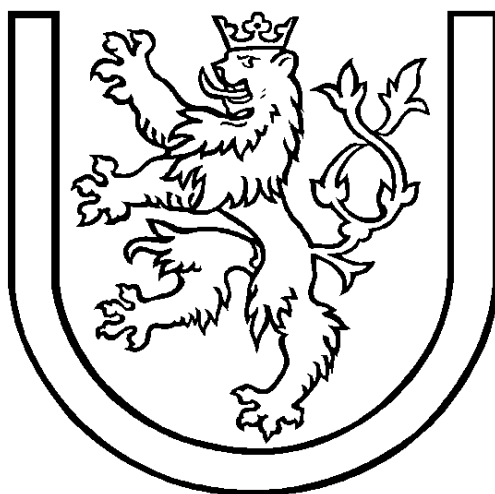


Supravodivý akumulátor energie

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

***FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ***

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY



**Supravodivý akumulátor energie**

*Plzeň 2004*

*Jan Kazda*



## **Anotace**

Supravodivý akumulátor energie slouží k uchování elektrické energie v magnetickém poli supravodivé cívky protékané proudem. Tato práce je zaměřena na pochopení základní problematiky teoretických principů a technických provedení supravodivého akumulátoru energie. Je rozdělena do několika částí, ve kterých zpočátku seznamuje se supravodivými materiály, teoretickým základem supravodivého akumulátoru energie a jeho základními vlastnostmi. Hlavní částí práce je samotné obecné stanovení základních rozměrů akumulátoru a porovnání návrhů rozměrů solenoidální a toroidní cívky. Dále následuje část o problematice ztrát supravodivého akumulátoru. A na závěr shrnutí a zhodnocení poznatků uvedených v této práci.

## **Klíčová slova**

Supravodivý akumulátor energie, SMES, supravodivost, supravodič, solenoid, toroid, kryostat, energetické ztráty, magnetické pole, supravodivá cívka

## **Annotation**

Superconducting magnetic energy storage serves for storing of electric energy in the magnetic field of supraconductive coil with electric current. The goal of this work is understanding of basic knowledge of theoretical principles and techical implementations superconducting magnetic energy storage. This work is divided into several chapters. The superconductors, theoretical basis of superconducting magnetic energy storage and its real basic functions are presented in introduction. The core of this work is an actual general design of accumulator basic dimensions and a of design comparison of solenoid dimensions and toroid dimensions. The next chapter concerns losses of superconducting magnetic energy storage. Summary and appraisal of knowledge mentioned in this work can be found in conclusion.

## **Keywords**

Superconducting magnetic energy storage, SMES, superconductivity, superconductor, solenoid, toroid, cryostat, energy losses, magnetic field, superconducting coil

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne 20. ledna 2004

podpis diplomanta

## **UPOZORNĚNÍ**

Využití a společenské uplatnění výsledků této bakalářské práce včetně uvádění vědeckých poznatků a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě autorské smlouvy a souhlasu Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Milanu Kraslovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky k bakalářské práci.

Dále bych chtěl poděkovat celému pedagogickému sboru Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, za získání všech odborných znalostí během mého studia.

Děkuji

## OBSAH

<b>1. Úvod</b> .....	7
<b>2. Supravodivost</b> .....	8
<b>2.1. Historie supravodivosti</b> .....	8
<b>2.2. Teorie supravodivosti</b> .....	9
<b>2.3. Kritické vlastnosti supravodičů</b> .....	9
2.3.1. <i>Kritický proud</i> .....	9
2.3.2. <i>Kritická indukce a kritická teplota</i> .....	10
<b>2.4. Supravodivé materiály</b> .....	11
2.4.1. <i>Nízkoteplotní supravodiče (LTS)</i> .....	11
2.4.2. <i>Vysokoteplotní supravodiče (HTS)</i> .....	11
<b>3. Supravodivý magnetický akumulátor energie</b> .....	13
<b>3.1. Základní principy SMES systémů</b> .....	13
<b>3.2. Vývoj supravodivých magnetických akumulátorů energie</b> .....	16
3.2.1. <i>Stav vývoje v Japonsku</i> .....	17
3.2.2. <i>Stav vývoje v Německu</i> .....	18
3.2.3. <i>Stav vývoje v USA</i> .....	19
<b>4. Návrh supravodivého magnetického akumulátoru energie</b> .....	20
<b>4.1. Rozměry a akumulovaná energie SMES</b> .....	20
4.1.1. <i>Obecný návrh</i> .....	20
4.1.2. <i>Příklady navržených SMES</i> .....	25
<b>4.2. Solenoid a Toroid</b> .....	27
4.2.1. <i>Solenoidální cívka s NbTi</i> .....	27
4.2.2. <i>Toroidní cívka s NbTi</i> .....	29
<b>5. Ztráty v supravodivém akumulátoru</b> .....	33
<b>6. Závěr</b> .....	35
<b>7. Seznam použité literatury</b> .....	36
<b>8. Seznam obrázků</b> .....	37

## 1. Úvod

Supravodivý akumulátor energie (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage) je jedním z možných řešení akumulace elektrické energie. Energie je akumulována v magnetickém poli supravodivé cívky protékané proudem. Tato cívka je zhotovena ze supravodivého vodiče, takže v ní nedochází k žádným odporovým ztrátám, a proto energie cívce dodaná může být i za dlouhou dobu beze zbytku odebrána.

Důvodů k akumulaci energie je celá řada, ale asi největším je vyrovnání odběrových špiček během denního cyklu odběru elektrické energie. To je dnes zajišťováno především pomocí regulace činnosti vodních elektráren a stavbou přečerpávacích elektráren, avšak s přibývajícím spotřebou elektřiny by bylo třeba stavět stále nové, což je velice nákladné a náročné na prostor. Přečerpávací elektrárny navíc vlastně žádnou energii nevyrábí a jejich účinnost akumulace okolo 70% není zrovna nejlepším řešením. Dalším důvodem je překlenutí krátkých či delších výpadků napájení způsobených závadami na přenosové síti, kdy je třeba, aby v dodávce energie došlo jen k nepatrným a velice krátkým změnám. Zde všude by se v budoucnu mohl supravodivý akumulátor velice dobře uplatnit právě pro své nesporné výhody. Ať už je to velká účinnost nebo velice krátký čas reakce na změny napětí. Bude ale třeba snížit nevýhody způsobené především nutností chlazení na podkritické teploty supravodiče.

Tato práce má za cíl nejprve prozkoumat současný stav v oblasti supravodivosti, ať už jde o samotnou teorii supravodivosti, starší a odzkoušené supravodivé materiály, či nové supravodiče a jejich praktické využití. Dále seznámit s teorií a problematikou samotného supravodivého akumulátoru, kde půjde hlavně o vytvoření představy o teoretických principech akumulace a základním schématu jednoduchého SMES systému. V této části je i přehled vývoje a aplikací SMES systémů v asi nejaktivnějších zemích světa, kterými jsou Japonsko, Německo a USA. Další část se zabývá obecným stanovením rozměrů takového akumulátoru a návrhy dvou základních typů cívek supravodivých akumulátorů tj. solenoidu a toroidu. Potom následuje část o problematice ztrát supravodivého akumulátoru. A na závěr shrnutí a zhodnocení poznatků uvedených v této práci.

## 2. Supravodivost

Supravodivostí označujeme pokles rezistivity některých materiálů většinou při teplotách blízkých absolutní nule na neměřitelně nízkou hodnotu za současného dokonalého vytěsňování magnetického pole ze svého objemu. Supravodivost je jeden z nejvýznamnějších fyzikálních objevů ve fyzice pevné fáze. Někteří fyzikové předpovídají, že objev supravodivosti bude znamenat pro lidstvo asi totéž jako objev kola a že 21. století bude stoletím supravodivosti. Potenciální možnosti aplikace supravodivosti jsou skutečně veliké.

### 2.1. Historie supravodivosti

Supravodivost objevil Heike Kamerlingh-Onnes již v roce 1911. Při měření teplotní závislosti elektrického odporu rtuti zjistil, že při jejím ochlazení pod teplotu 4,2K elektrický odpor rtuti náhle poklesne a stane se neměřitelně malým. Hodnota, na kterou poklesl odpor rtuti, nebyla tehdy měřitelná jeho prostředky, i když je stále zlepšoval. Sám přechod v oblasti teploty přechodu, kterou budeme nazývat kritickou teplotou  $T_c$ , byl velice úzký – jen 0,02K. Onnes hledal další kovy a zjistil, že olovo a cín ztrácejí náhle odpor při zhruba 7,2K (Pb) a 3,7-5,3K (Sn). Ukázalo se, že jde o jev velice častý, a to nejen u kovů, ale i u slitin.

Při vytváření silných magnetických polí však čekalo Onnese zklamání, které se zdálo být nepřekonatelné a sám Onnes se správného řešení nedočkal. Ukázalo se totiž, že u cívek zhotovených z čistých kovových prvků existuje ještě magnetická indukce  $B_c$ , po jejímž dosažení přejde vodič do normálního stavu. Kromě kritické teploty  $T_c$  existuje ještě i kritická indukce  $B_c$ . Při  $B < B_c$  je vodič v supravodivém stavu a při  $B > B_c$  je vodič opět v normálním odporovém stavu. Příčinu a zdůvodnění této skutečnosti odhalila v roce 1933 dvojice Walther Meissner a R.Ochsenfeld, když objevili, že supravodiče mají rovněž schopnost dokonale vytlačovat magnetické pole ze svého objemu. Tento jev se nazývá „perfektní diamagnetismus“ (supravodič je ideálním diamagnetikem), nebo po svém objeviteli Meissnerův efekt. Vyvrátili tím jednoduchou představu o supravodiči, jako o vodiči jen s nulovým elektrickým odporem.

Hodnota pole  $B_c$  však byla stále příliš malá a nedávala naději na vytváření silných magnetických polí. Řešení bylo nalezeno až po druhé světové válce ne však v čistých materiálech, ale naopak v znečištěných slitinách některých kovů. V roce 1960 byl materiál s nejvyšší teplotou přechodu do supravodivého stavu (tzv. kritickou teplotou, neboli  $T_c$ ) slitina niobu a germania ( $Nb_3Ge$ ) s  $T_c = 23$  K.

Za jeden z milníků vědy a techniky lze považovat objev vysokoteplotní supravodivosti v roce 1986. V lednu tohoto roku (75 let po objevu vlastní supravodivosti) objevili A. Miller a J.G. Bernorz v laboratoři IBM v Curychu supravodivost ve sloučenině La-Ba-Cu-O při kritické teplotě asi 30K. Studovali množství materiálů, které jsou tvořeny vrstvami oxidů mědi oddělenými vrstvami vhodných kationů, např. Ba, Y, Sr, La, Ca, Bi či Tl. V únoru 1987 objevil C.W. Chu se svým týmem na Houstonské univerzitě supravodivost materiálu Y-Ba-Cu-O při  $T_c = 90$ K. Pokračující výzkum posunul u dalších materiálů hranici  $T_c$  na 125K. Vysokoteplotním supravodičům je společná jejich krystalová struktura - patří do skupiny materiálů nazývaných perovskity. Tato zvláštní struktura umožňuje vznik materiálů s různými elektrickými vlastnostmi - mohou být izolátory, polovodiči, vodiči s kovovým chováním a vysokoteplotními supravodiči. Všechny uzlové body krystalové mřížky jsou zaplněny a silné iontové vazby drží atomy na místě. Jestliže dříve byla supravodivost využívána jen v ojedinělých případech, pak nové vysokoteplotní supravodiče mohou vést k bouřlivému rozvoji techniky. K jejich chlazení totiž stačí levný, lehce manipulovatelný a běžně dostupný kapalný dusík, který má teplotu varu 77K.

V současné době je známo více než tisíc supravodivých látek. Patří mezi ně kovové prvky, slitiny, intermetalické sloučeniny, polovodiče i polymery.

### 2.2. Teorie supravodivosti

V letech 1910-1950 byly postupně nalézány různé materiály, které vykazovaly supravodivé vlastnosti. Kritická teplota u nich byla menší než 20K. Úspěchy experimentální fyziky byly doprovázeny snahou teoretických fyziků o vypracování teorie supravodivosti. V roce 1957 tři američtí fyzikové J. Bardeen, L. Cooper a J. R. Schriffer vytvořili mikroskopickou teorii supravodivosti, která se zkráceně nazývá BCS teorie a je nyní „prověřována“ i u vysokoteplotních supravodičů. BCS teorie říká, že vazba mezi elektrony a fonony (kmity krystalové mřížky) může vést k párování elektronů, tj. že přitažlivá interakce mezi elektrony může za jistých okolností vzniknout prostřednictvím kmitů krystalové mřížky. U vodičů a polovodičů v normálním stavu vzájemné působení mezi elektrony a fonony způsobuje elektrický odpor. Elektrony, které nesou elektrický náboj, narážejí na příměsí v krystalové mřížce a rozptylují se na kmitech krystalové mřížky. Proto jsou kovy, které jsou dobrými supravodiči, v normálním stavu špatnými vodiči. V supravodivém stavu (při velkém zjednodušení) dochází k „přemístění“ záporného náboje elektronu. Ten při svém pohybu krystalovou mřížkou vytvoří spolu s elektronem kladně nabitou oblast, kam je přitahován jiný elektron. Výsledkem je, že jeden elektron nepřímo přitahuje druhý elektron. Tato dynamická vazba nastává mezi dvěma elektrony a vytvoří se tak vázané páry elektronů. Každý z těchto tzv. Cooperových párů je tvořen dvěma elektrony (nebo dírami) a opačným spinem (vlastním momentem hybnosti) a nepůsobí-li vnější magnetické pole a netečou-li supravodičem elektrické proudy, pak mají oba nositelé stejně velké a navzájem opačné hybnosti. Celkový spin a hybnost páru elektronů jsou rovny nule. Cooperovy páry se na rozdíl od jednotlivých elektronů, které jsou fermiony (mají poločíselný spin), chovají jako bosony (mají celočíselný spin) a neplatí pro ně Pauliho vylučovací princip. Proto se prakticky všechny páry mohou nahromadit v jednom kvantovém stavu odpovídajícímu nejnižší energii. Důležitou vlastností Cooperových párů je jejich tzv. koherence, neboli není možné, aby se jeden Cooperův pár choval nezávisle na ostatních. Supravodivost je právě důsledkem této koherence, která vede k tomu, že se Cooperovy páry chovají jako celek. Zatímco interakce elektronů s fonony jsou v normálním stavu vnitřně nezávislé, v supravodiči jsou vzájemně vázané. Supravodivost je tedy spojena s vysokým stupněm uspořádání elektronů (jedná se o uspořádání na velkou vzdálenost – střední vzdálenost mezi páry je menší než rozměr jednotlivých párů).

### 2.3. Kritické vlastnosti supravodičů

Jak již bylo řečeno supravodivý stav trvá pouze tehdy, je-li teplota, indukce a proudová hustota pod danou kritickou hodnotou. Tyto veličiny  $T_c$ ,  $B_c$  a  $J_c$  na sobě vzájemně závisí a vytyčují tak oblast, kdy je materiál supravodivý.

#### 2.3.1. Kritický proud

Ještě před vznikem BCS teorie supravodivosti, pokračovali experimentátoři v pokusech, aby odkryli další vlastnosti supravodičů. V roce 1916 F. Silsbee vyslovil hypotézu, že u čistých kovů válcového tvaru, je supravodivost rozrušena tzv. kritickým proudem  $I$ , který vyvolá na povrchu kritickou hodnotu magnetické indukce  $B_c$  [T].

$$I_c = \frac{2\pi R_0 B_c}{\mu_0} \quad (2.1)$$

kde  $R_0$  [m] je poloměr válcového vodiče,  $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$  H/m je permeabilita vakua.

Vztah (2.1) je v podstatě klasický výraz pro výpočet hodnoty indukce pole  $B$  ve vzdálenosti  $R_0$  od nekonečně dlouhého vodiče. Tento Silsbeeho vztah docela dobře souhlasil v případě čistých supravodičů válcovitého tvaru a u masivních vzorků. Kromě kritických parametrů ( $T_c$ ,  $B_c$ ) se nám objevuje třetí kritický parametr – kritický proud  $I_c$ .

Výraz (2.1) není možné použít pro výpočet  $I_c$  či  $B_c$  v případě tenkého filmu. U tenké vrstvy má  $B_c$  dvojí charakter. Mluvíme o kritické indukci  $B_c^{(I)}$  vyvolané proudem  $I$  a úměrné tloušťce filmu  $d$  -  $B_c^{(I)} \sim d$  a magnetické kritické indukci  $B_c$  vzhledem k vnějšímu poli, která je nepřímo úměrná tloušťce filmu -  $B_c \sim (d^{-1})$ . Tak se může stát, že  $B_c \gg B_c^{(I)}$ . Vztah  $B_c \sim d^{-1}$  platí jen v případě, že  $d \ll \lambda_L$ , kde  $\lambda_L$  je hloubka vniku magnetického pole do supravodiče.

Při zániku supravodivosti proudem však nedochází k fázovému přechodu a mluvíme pouze o kritickém proudu rozpárování. Při proudu  $I$ , spojitě rostoucím od nuly do kritické hodnoty  $I_c$ , se totiž část spárovaných supravodivých elektronů postupně rozpárovává na jednotlivé elektrony díky kinetické energii proudu. Hustota supravodivých elektronů  $n_s$  a supravodivého proudu  $J_s$  jsou tedy závislé na  $v_s$  (rychlosti supravodivého kondenzátu).

### 2.3.2. Kritická indukce a kritická teplota

Ve fyzice existuje důležitá funkce - tzv. volná energie  $F=E-TS$ , kde  $E$  je energie tělesa či soustavy a  $S$  je entropie. Volná energie  $F$  nám určuje práci, a určuje nám také základní, tj. nejnižší stav soustavy. V bodě  $T=T_c$  by měly být volná energie normálního stavu  $F_N(T)$  a supravodivého stavu (bez vnějšího pole) sobě rovny  $F_S(B=0, T_c) = F_N(T_c)$ . Předpokládáme, že  $F_N$  nezávisí na magnetickém poli. Vložíme-li nyní supravodič do vnějšího magnetického pole  $B_a$ , zvětší se jeho volná energie o energii magnetického pole „vypuzenou“ ze supravodivého objemu  $V_0$ .

$$F_S(B_a, T) = F_S(0, T) + \frac{B_a^2 V_0}{2\mu_0 \mu_r} \quad (2.2)$$

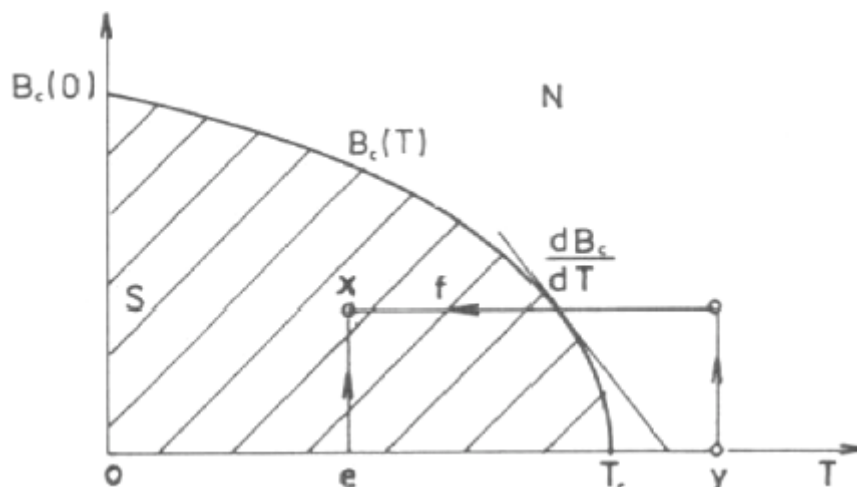
V okamžiku, kdy hodnota  $B_a = B_c(T)$  a supravodič přejde do normálního stavu, se musí rovnat

$$F_N(0, T) = F_N(B_c, T) = F_S(0, T) + \frac{B_c^2 V_0}{2\mu_0 \mu_r} \quad (2.3)$$

Odtud dostaneme výraz pro kritickou indukci  $B_c^2$

$$B_c^2(T) = \frac{2\mu_0 \mu_r [F_N(0, T) - F_S(0, T)]}{V_0} \quad (2.4)$$

jako rozdíl volných energií v nulovém magnetickém poli při dané teplotě  $T$ . To je základní rovnice termodynamiky supravodiče. Závislost  $B_c(T)$  můžeme snadno naměřit při různých  $T$  a dostaneme výsledek, který je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 2.1: Závislost termodynamického kritického pole  $B_c$  na teplotě  $T$

Skutečnost, že fáze S je termodynamickou fází potvrzuje to, že do bodu X se z bodu Y můžeme dostat buď cestou e či f – stav X nezávisí na cestě. Obrázek 2.1 nám ukazuje fázovou křivku supravodiče oddělující od sebe normální fázi N od fáze supravodivé S. Tuto závislost popisuje empiricky získaná závislost (kde  $t = T / T_c$ )

$$B_c(t) = B_c(0) * (1 - t^2) \quad (2.5)$$

## 2.4. Supravodivé materiály

### 2.4.1. Nízkoteplotní supravodiče (LTS)

Postupně bylo objeveno velké množství látek se supravodivými vlastnostmi, všechny ovšem dosahovaly těchto vlastností až při velmi nízkých teplotách pohybujících se jen málo nad absolutní nulou ( $0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$ ). Pro tyto supravodiče převážně vyrobené na bázi slitin Nb-Ti a Nb-Sn a pracující při teplotách kapalného hélia (cca  $4 \text{ K}$ ) se vžilo označení **nízkoteplotní supravodiče** (LTS - *Low Temperature Superconductors*). Vysoké náklady a technické problémy (vysoká rozpínavost hélia, supertekutost) s chladicími systémy využívajícími helium způsobily, že komerční využití supravodičů se omezilo jen na specifické účely, např. magnetické systémy urychlovačů, magnetické rezonátory v medicínské technice, supravodivé magnetické akumulátory SMES atd. Avšak vlastnosti nízkoteplotních supravodičů jsou zatím nejvíce probádány, a proto jsou nejvhodnějšími materiály pro teoretické úvahy.

### 2.4.2. Vysokoteplotní supravodiče (HTS)

Zlom ve využívání supravodivosti znamenal rok 1986, kdy byly objeveny **vysokoteplotní supravodiče** (HTS - *High Temperature Superconductors*), jež mají kritické teploty v průměru okolo  $90 \text{ K}$ , některé až  $150 \text{ K}$ , tedy nad teplotou kapalného dusíku (bod varu  $77 \text{ K}$ ), který se používá jako chladicí médium. Kapalný dusík je relativně levná chladicí kapalina, k dispozici je zatím v neomezeném množství, životnímu prostředí neškodí, jeho zkapalňování je levné a jako chladicí, izolační i hasící médium je pro použití vhodný. Při teplotách kapalného dusíku

## Supravodivý akumulátor energie

je možné dosáhnou účinnější tepelné izolace. Chlazení na teplotu 77 K je asi 25 krát energeticky méně náročné než chlazení na teplotu 4 K, kterou potřebují pro dosažení supravodivého stavu nízkoteplotní supravodiče.

Vysokoteplotní supravodiče jsou vesměs velmi křehké keramické materiály a technologie výroby vodičů z nich je velmi náročná. V současné době se prosazují dvě cesty, jak obejít křehkost těchto materiálů, a to jednak válcováním polykrystalického materiálu ve stříbrné matici (HTS vodiče 1. generace), jednak napařováním nebo chemickým nanášením tenkých monokrystalických vrstev supravodičů na ohebné podložky ve formě dlouhého pásku (HTS vodiče 2. generace). Pro aplikace supravodivosti v silnoproudé elektrotechnice jsou vhodné pásy o šířce okolo 4 mm, tloušťce řádově desetiny mm. Snahou je vyrobit vodič s velkými hodnotami kritického proudu při co největší jeho délce. Délky těchto vodičů se pohybují od několika metrů (2. generace) až po stovky metrů (1. generace).

Představiteli **1. generace HTS vodičů** (označované také jako MFC - *Multi-Filamentary Composite* – vícevláknové vodiče) jsou sloučeniny bismut - stroncium - vápník - kysličník mědi (BSCCO), konkrétně  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  (BSCCO 2223) a  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$  (BSCCO 2212), s kritickou teplotou  $T_c \approx 110\text{K}$ . Vlákna o tloušťce 10  $\mu\text{m}$  a šířce 200  $\mu\text{m}$  jsou umístěny v matici ze slitiny kovu a stříbra. Takto vzniklé pásy mohou být pro zvýšení mechanické odolnosti potaženy nerez ocelí (odolnost až 250 MPa). V současné době parametry těchto materiálů dosáhly stavu komerční využitelnosti v silových zařízeních (kabely, transformátory, točivé stroje, magnety). Výrobce *American Superconductor* postavil první velký závod na světě na výrobu vodičů MFC, který při plné výrobní kapacitě vyrobí až 20 000 km vodičů ročně.

Představiteli **2. generace HTS vodičů** (označované také jako CCC - *Coated Conductor Composite* – vodiče s povlakem) jsou sloučeniny ytrium - barium - kysličník mědi (YBCO), konkrétně  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO 123), s kritickou teplotou  $T_c \approx 70\text{K}$ . Nově testovaný materiál  $\text{MgB}_2$  s kritickou teplotou  $T_c \approx 39\text{K}$  zatím dosahuje desetkrát nižších hodnot kritické proudové hustoty. Supravodiče  $\text{MgB}_2$  by mohly být chlazeny tekutým vodíkem.

Na substrát, který je obvykle ze slitiny niklu a jehož tloušťka se pohybuje od 50 do 100  $\mu\text{m}$ , se nanese supravodivá vrstva o tloušťce 1 nebo více  $\mu\text{m}$ , povrch se ještě pokryje vrstvou z ušlechtilého kovu. Celková tloušťka vodiče je řádově desetiny milimetru. K napařování nebo nanášení supravodivé vrstvy na substrát ve formě pásku se používají obdobné technologie pro výrobu polovodičů (např. IBAD, PLD, MOD). Technologie IBAD vyvinutá japonskou firmou *Fujikura* a zdokonalená laboratoří *Los Alamos National Laboratory* je velmi pomalá a nákladná. Méně nákladnou metodu výroby substrátu pomocí válcování a tepelné úpravy vyvinula americká laboratoř *Oak Ridge National Laboratory* pod obchodním názvem RABiTS. U této technologie se zatím dosahuje zhruba polovičních hodnot kritických proudů. Supravodivá vrstva dosahuje kritické proudové hustoty řádově  $10^6\text{ A/cm}^2$ , což je mnohonásobně více než  $J_c$  pro supravodiče 1. generace (1 až  $5 \times 10^4\text{ A/cm}^2$ ). Vzhledem k velmi tenké nanesené supravodivé vrstvě je proudová hustota celého průřezu vodiče (substrát + supravodič) srovnatelná s  $J_e$  vodičů 1. generace. S vývojem výrobních technologií bude moci být nanášena tlustší supravodivá vrstva a dojde ke zvýšení hodnoty  $J_e$ . V závislosti na orientaci magnetického pole mohou mít vodiče 2. generace až 75x nižší střídavé ztráty než vodiče 1. generace.

### 3. Supravodivý magnetický akumulátor energie

#### 3.1. Základní principy SMES systémů

Supravodivý magnetický akumulátor energie (SMES) je jednou z nových voleb pro akumulaci elektrické energie. Zkratka SMES byla vytvořena v 70 letech 20. století na univerzitě ve Wisconsinu. Energie je akumulována v magnetickém poli cívky protékané proudem. Tato cívka je zhotovena ze supravodivého vodiče, takže v ní nedochází k žádným odporovým ztrátám. V zásadě to znamená, že jde o velmi výkonný způsob akumulace energie. Žádný systém ale není 100% účinný a zde patří k hlavním energetickým ztrátám energie potřebná k chodu chladicí jednotky, která udržuje cívku pod kritickou teplotou supravodiče.

Když byl SMES poprvé navrhován, byla ve světě spotřeba elektřiny již velmi velká. Proto bylo třeba, aby množství elektřiny, které mohl SMES v případě potřeby dodávat do sítě, bylo upraveno pro použití během denního cyklu spotřeby. Návrhy byly vytvořeny pro použití SMES jako systému pro uskladnění tisíců megawatt-hodin elektrické energie (jeden z prvních návrhů byl přibližně 5 GW) pro vyrovnání špiček spotřeby. V současné době jsou SMES systémy navrženy ve více stupních, s určitým plánem řízení jejich jednotlivých jednotek. Následkem vysoké pořizovací a provozní ceny je zapotřebí každou jednotku přizpůsobit přesnému použití.

*Teoretický základ akumulátoru energie*

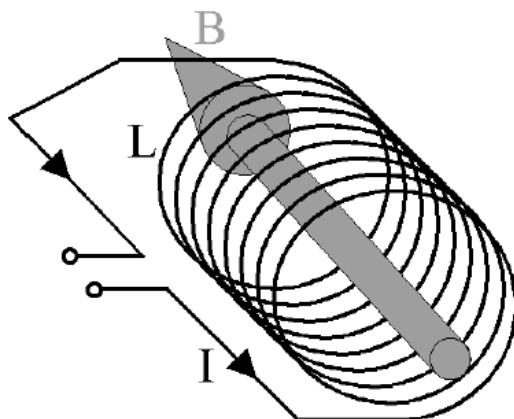
Energie akumulovaná v cívce o indukčnosti  $L$  při průchodu proudem  $I$  cívkou je dána:

$$E = \frac{1}{2} L * I^2 \quad (3.1)$$

a hustota energie magnetického pole je:

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (3.2)$$

kde  $B$  = indukce magnetického pole  
 $\mu_0$  = permeabilita vakua



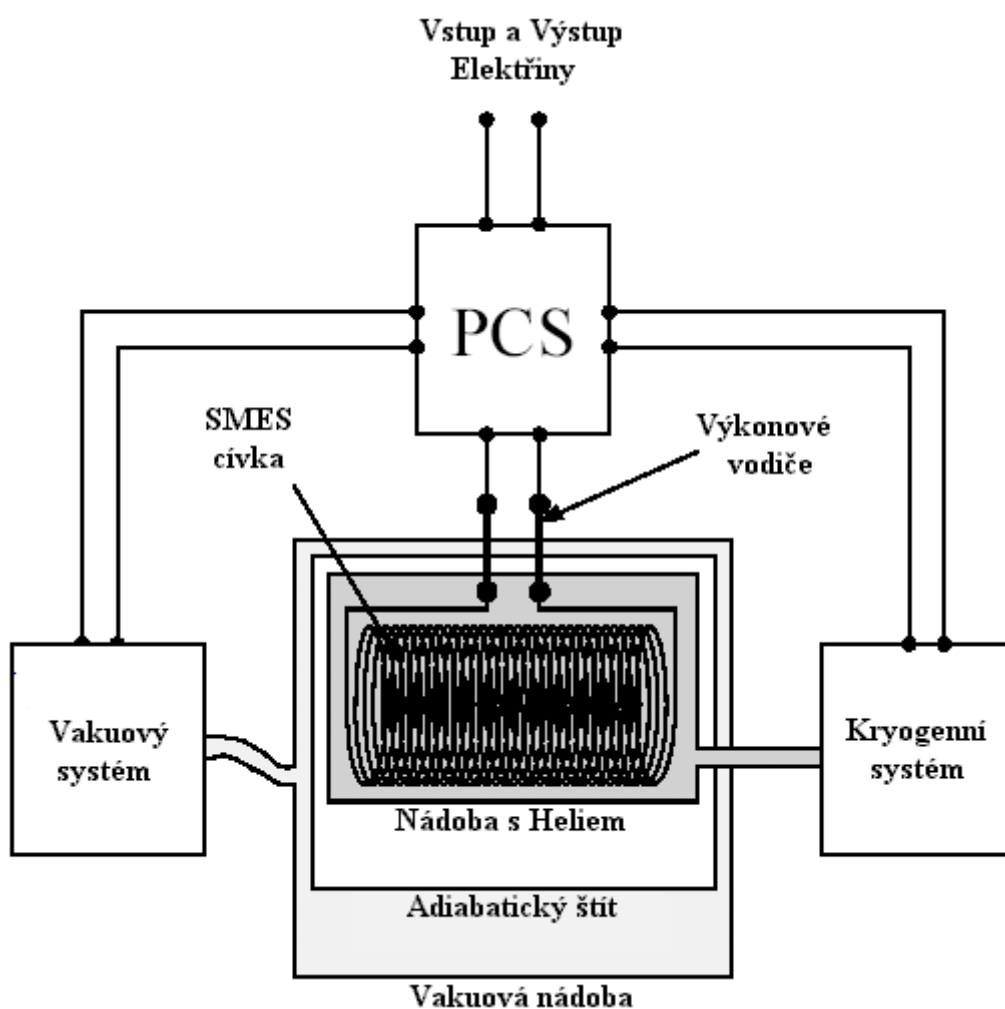
Obr. 3.1: Schematický náčrt indukční cívky

## Supravodivý akumulátor energie

Tok elektrického proudu vytváří magnetické pole a dohromady způsobují Lorentzovu sílu. Cívky větších SMES systémů vytvářejí zřetelnou Lorentzovu sílu. Konstrukce opravdu velkých cívek jsou většinou pevně namontovány ke konstrukčnímu materiálu, tak aby síly byly přeneseny na tento materiál.

### *Schématický diagram SMES zařízení*

Obecné blokové schéma SMES je nakresleno na obrázku 3.2. Vstupující a odebíraná elektřina prochází Systémem stavu energie (Power conditioning system - PCS), který je spojen se supravodivou cívkou (uvnitř nádoby s héliem) přes výkonové vodiče. Kryogenní okruh se stará o chlazení nezbytné k udržení chladiva (zpravidla tekuté hélium) a tím i supravodivé cívky na požadované teplotě. Podle použití může být oddělen zdroj energie pro obslužné systémy z důvodu prodloužení doby funkčnosti zařízení a tím i doby překlenutí výpadku energie.



*Obr. 3.2: Schématický diagram SMES zařízení*

### Supravodivá cívka

Srdcem zařízení je supravodivá cívka z technického supravodiče. Typicky je zhotovena z LTS supravodiče Niob-Titan a měděného kompozitu, kde je uspořádáno několik tisíc Nb-Ti vláken o průměru několika mikronů v měděné matici. Nb-Ti vlákna jsou skutečným supravodivým médiem, ale potřebují být držena na velmi nízkých teplotách, protože v normálním stavu

## Supravodivý akumulátor energie

nevedou dobře proud. Měď slouží ke třem účelům. Za prvé poskytuje mechanickou podporu a odděluje Nb-Ti vlákna. Za druhé navzájem elektricky izoluje vlákna za předpokladu odporové překážky tak, že zmenšuje ztráty během nabíjení a vybíjení. Za třetí se stará o stabilitu procházejícího proudu během krátkých období, kdy dojde v supravodiči k přechodu na normální stav (nesupravodivý). Proudů v řádu 2000 - 3000 A na jeden kompozitní vodič jsou dostačující a zařízení jde snadno sestavit a navinout. Pro vyšší proudy (výkony) je preferován celý svazek vodičů, což vede k zmenšení ztrát střídavými proudy při vybíjení cívky.

Bylo navrženo mnoho řešení supravodivé cívky. Protože cívka je nejdražší část systému, maximální akumulovaná energie musí být dosažena za použití minimálního množství supravodivého vodiče. V závislosti na rozměrech a použití může být vybrán solenoid nebo toroid. Hlavní výhodou solenoidu je nižší cena pro velké SMES systémy (více jak 5 MWh), protože pro stejné množství akumulované energie v toroidu je potřeba většího množství supravodivého vodiče. Solenoidální cívky jdou také snadno vyrábět. Hlavní nevýhodou solenoidu je nehomogenita magnetického pole na koncích cívky (která předkládá místo pro další úvahy) a která je eliminována v toroidu.

Výdaje při realizaci zařízení s přibývajícím rozměry SMES již o mnoho nevzrůstají, proto jsou upřednostňovány velké systémy. Odhad poloměru cívky o objemu akumulované energie 5000 MWh, 1000MW je 150-500m v závislosti na špičkové hodnotě pole a poměru výšky k průměru cívky, zatímco zařízení o energii 5000 MW by potřebovalo jen cívku o poloměru 800m. Nicméně nedávný vývoj, změna potřeb zákazníků a uplatnění výrobků na trhu, vedou k produkci malých akumulátorů tzv. micro-SMES. Tyto jednotky mohou akumulovat energii asi 1-10 MWs (megawatt-sekund) a jsou určeny pro zlepšení kvality dodávané energie. Velikostně vzdálené od kilometrových průměrů mohou být micro-SMES se vším příslušenstvím umístěny v nákladních autech a přepravovány podle potřeby.

### Kryogenní systém

Efektivita SMES zařízení není typicky dána supravodivou cívkou, která je neobyčejně efektivní, ale konstrukční volbu kryogenního systému a výkonových vodičů. U Nb-Ti supravodiče se kryogenní systém skládá z kryostatu, který odděluje studenou nádobu s héliem od okolí, a zkapalňovače hélia. Cívka pracuje na 1,8°K v heliu při atmosférickém tlaku. Tato teplota je vybrána, jelikož je to optimální hodnota pro přestup tepla a tepelnou vodivost supratekutého hélia. Složitost, velikost a cena chladicího systému závisí na velikosti a teplotě chlazeného prostoru.

Kryogenní systém může také vytvářet chladivo o několika různých teplotách. Některé systémy používají chladivo na 4,2°K k udržení stálého tlaku v 1,8°K studené lázni a zadržení jakéhokoli tepla vstupujícího do chlazeného systému přes výkonové vodiče. Jiná část může chladit na 77°K (tekutý dusík) potřebných k chlazení HTS výkonových vodičů.

### Výkonové vodiče

Supravodivá cívka je propojena se Systémem stavu energie (PCS) přes výkonové vodiče, někdy nazývané Výpary chlazené vodiče (Vapour Cooled Leads - VCL). Protože tyto VCL spojují podchlazenou nádobu se supravodivou cívkou s okolím (tj. s PCS), jsou podstatnou částí SMES zařízení z důvodu spolehlivosti a výkonnosti. Pro zařízení pod 10 MWh, představují VCL větší část ztrát z celkového chlazení, a proto mohou určovat celkovou efektivitu zařízení. Použití měděných vodičů mezi supravodivou cívkou a okolními teplotami vytváří teplo a může zapříčinit vypařování tekutého hélia, které chladí SMES. Zdokonalení vyvinuté Argonne a American Superconductor využívá vysokoteplotní supravodiče (HTS) jako výkonové vodiče, které pracují při teplotách vyšších jak 77°K. Nahrazení měděných vodičů HTS vodiči způsobí, že se tato část SMES stane energeticky efektivnější.

## Supravodivý akumulátor energie

Experimentální test prokázal snížení elektrotechnických provozních nákladů při použití HTS vodičů na 55% oproti původním.

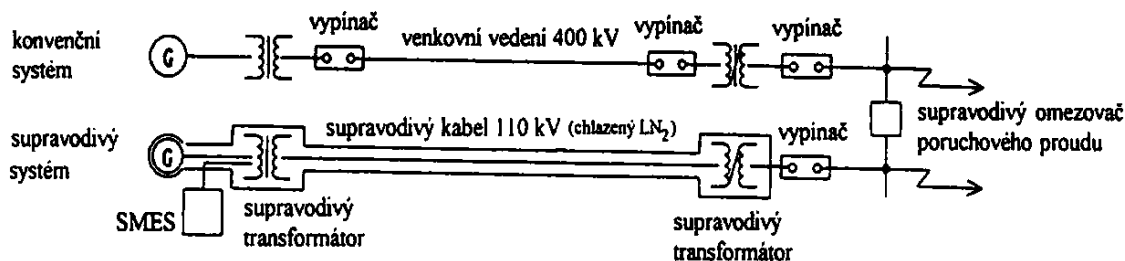
### Výhody a nevýhody SMES

Mezi výhody patří především efektivnost akumulace energie větší jak 95%, krátký čas reakce na výkyvy v připojené síti (milisekundy), krátké časy celkového nabití a vybití (1-2 sekundy), miliony cyklů nabití-vybití a dosahované vysoké proudové hustoty.

Největší nevýhody je požadavek na kryogenní systém a problémy s ním spojené. Dále pak menší hustota akumulované energie než například u bateriových systémů.

### Použití SMES

Jak již bylo výše zmíněno supravodivé akumulátory energie jsou určeny především k překonávání špiček odběru elektřiny, dodání elektřiny v případě výpadku některých zdrojů a zlepšení kvality dodávané energie. Velmi perspektivním v energetice se jeví celý supravodivý systém přenosu elektrické energie (viz obr. 3.3), který se skládá z několika částí a umožňuje propojení supravodivých a konvenčních větví.



Obr. 3.3: Propojený supravodivý a konvenční systém přenosu el. energie

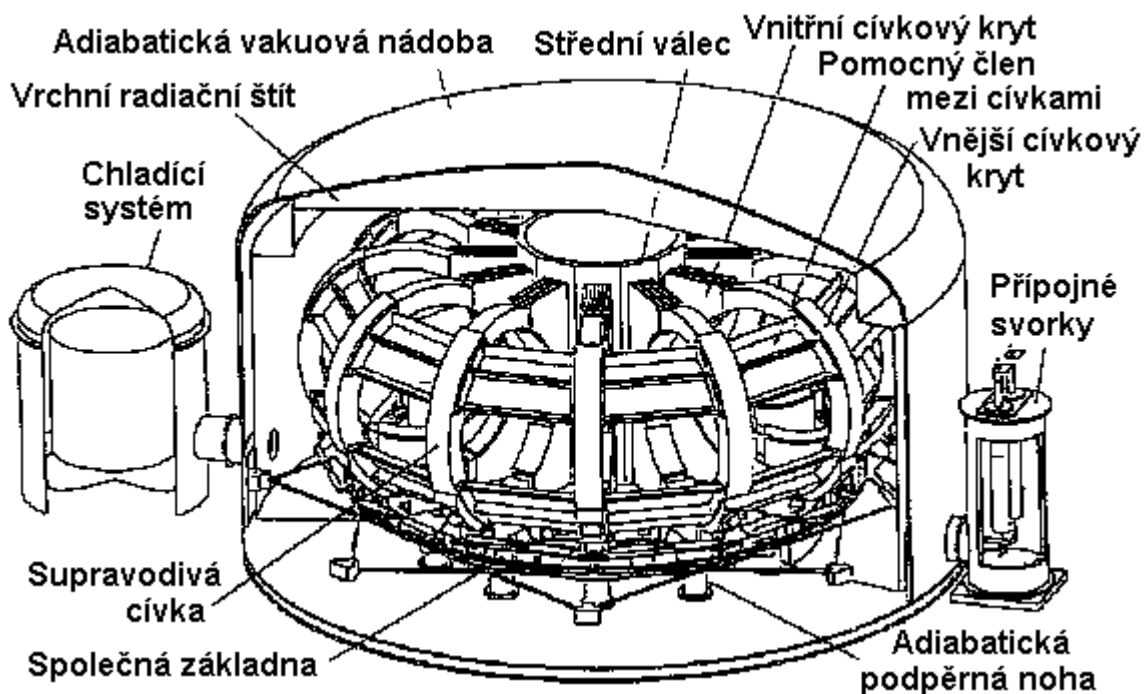
Zatím bylo realizováno několik micro-SMES, určených k překonání krátkodobých výpadků proudu v závodech na výrobu polovodičů, čipů a filmů, kde i výpadek pouhé desetiny sekundy může způsobit velké škody a ochromit výrobu. Větší supravodivý akumulátor SMES o kapacitě 800 Wh stabilizuje spojovací vedení společnosti Bonneville Power v Oregonu.

## 3.2. Vývoj supravodivých magnetických akumulátorů energie

Výzkumem a vývojem supravodivých magnetických akumulátorů energie (SMES) a supravodivých aplikací obecně se ve světě zabývají některé vládní i nevládní organizace. Je to především výzkum na různých univerzitách či vládních laboratořích, vývoj praktických aplikací různých společností zabývajících se vývojem a výrobou supravodičů a vývoj a užití těchto aplikací ve velkých společnostech podnikajících v elektrotechnice a energetice. Za nejdůležitější je považován vstup praktických aplikací vysokoteplotních supravodičů (HTS) chlazených jen tekutým dusíkem z důvodu snížení provozních nákladů, a tím zvýšení celkové efektivity SMES systémů. Nejdůležitější projekty jsou rozvíjeny především v Japonsku, Německu a USA.

## 3.2.1. Stav vývoje v Japonsku

Integrace akumulátorů energie do energetického systému je dlouhodobě považována za cestu k maximalizaci výroby a zároveň přenosové kapacity energetických společností. Elektrická energie může být akumulována mimo energetickou špičku a ve špičce vracena zpět pro zvýšení výrobní nebo přenosové kapacity. V Japonsku jsou každodenní odběrové výkyvy úspěšně kompenzovány přečerpávacími elektrárnami, které jsou ale poměrně neúčinné. Jejich celková účinnost se pohybuje okolo 70%. Také Japonský říční systém, hustota osídlení a vysoké ceny nemovitostí nevytvářejí příznivé podmínky pro stavbu dalších přečerpávacích stanic. Japonsko tedy musí prozkoumávat alternativní technologie akumulace energie, jako jsou SMES a setrvačnickové akumulátory energie. Od počátku 70. let bylo v Japonsku postaveno několik prototypů a zkoušeno v provozních podmínkách. V roce 1988 začalo japonské Mezinárodní Centrum Supravodivých Technologii (ISTEC) vypracovávat realizační studii o energetických zařízeních, včetně SMES, v rámci programu podporovaného Agenturou pro Obnovitelné Zdroje a Energii. Součástí této studie byl i detailní návrh zmenšeného SMES vytvořeného pomocí dostupných technologií buď s toroidním nebo solenoidním tvarem pole. Tento program nenařizoval použití vysokoteplotních supravodičů (HST), a tak byly použity Nb-Ti a Nb<sub>3</sub>Sn. Ukázka zmenšeného SMES, jejíž rozměry odpovídaly potřebám pro stabilizaci energetického systému, ukázala na mnoho hlavních sporných otázek skrývajících se v běžném provozu SMES. Jako například střídavé ztráty, zatěžovací podmínky a chlazení. V roce 1991 ISTEC spustil šestiletý program pro dokončení stavby a testování zmenšeného prototypu SMES s kapacitou 360MJ/20MW výkonu. Tento program, zahrnující firmy Toshiba jakožto hlavního výrobce magnetu, Electric Power Development Corporation poskytující zatěžovací podmínky a různé další společnosti vedené Chubu Electric.



Obr. 3.4: Principiální návrh supravodivé cívky pro 360MJ toroidní SMES

Principiální návrh SMES systému 360MJ/20MW je ukázán na obrázku 3.4. Jedná se o toroidní magnet s vnějším průměrem kryostatu přibližně 12m. Na polovinu zmenšený prototyp cívky byl vyroben firmou Toshiba a v současné době zřejmě probíhají testy v Japonsku. Pro testovanou cívku byl použit supravodivý vodič z Nb-Ti zavedený v ochranné trubce s nuceným oběhem chladiva. Toto uspořádání umožňuje dosažení 20kA při 2,8T, které je požadováno pro základní konstrukci. Základní testování bylo prováděno v Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) a další testy jsou plánovány v Lawrence Livermore National Labs (LLNL) ve Spojených Státech. Další program, který byl zaměřen na využití SMES při stabilizaci energetické sítě, byl veden společností Kansai Electric Power Company (KEPCO). Zařízení se skládá ze tří prstencových cívek s kapacitou 400kJ na cívku. Tento systém byl v rámci testování připojen k energetické síti KEPCO přes měnič a transformátor. Dvě z cívek byly vyrobeny společnostmi Sumitomo Electric a Mitsubishi Heavy Industries s využitím Nb-Ti vodičů. Třetí cívka, vyrobená v Mitsubishi Electric, je z Nb<sub>3</sub>Sn. Na tomto programu se také podílí univerzita v Osace, která se společně s KEPCO zaměřuje na využití SMES při řízení a stabilizaci energetické sítě.

### 3.2.2. Stav vývoje v Německu

Nejvíce úsilí ve vývoji SMES v Německu je vynakládáno laboratoří Forschungszentrum v Karlsruhe (FZK), kde zkonstruovali 250kJ SMES s toroidním jádrem. Zařízení je určeno pro udržení parametrů sítě během rozběhu velkých motorů pro pohon pil v dřevařském závodě. Analýzy ukazují, že SMES systémy mohou být ideální pro potlačení problému těchto krátkodobých přechodných dějů, s ohledem na svoji schopnost rychlé reakce. FZK také zkoumá v Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) možnost využití SMES jako zdroje výkonových pulsů přibližně 10GW po dobu 1ms s frekvencí 10Hz pro napájení vysokofrekvenčních klystronů. V posledních několika letech se o problematiku SMES zajímá také Siemens, ale omezuje se spíše na konstrukci a výpočty bez záměru skutečného vývoje nebo stavby. Siemens, RWE (největší Německá energetická společnost) a Preussen Electra dokončily vyhodnocovací a koncepční zprávu o 7,2GJ/ 50MW SMES pro potřeby frekvenční stabilizace energetické sítě. SMES se zdá být neustále zajímavý, ale nedávná ekonomická studie provedená firmou Siemens ukazuje, že je příliš nákladný ve srovnání s jinými technologiemi akumulace energie. Je zde také myšlenka na využití vysokoteplotních supravodičů, které jsou v současné době k dispozici a mohou být nakoupeny u mnoha výrobců jako například Hoechst nebo ASC, jež mohou omezit pronikání tepla do SMES systému. Užití vysokoteplotních supravodičů vyrobených pro SMES o vysokých indukcích a proudových hustotách je zajímavá myšlenka pro budoucí aplikace. Technická univerzita v Mnichově se také zabývá výzkumem SMES a staví 1,4 MJ toroidní SMES s použitím nízkoteplotních supravodičů. V ABB ve Švýcarsku je akumulace energie považována za důležitou oblast. Alespoň to bylo silně sledováno v minulosti a nízkoteplotní SMES byl postaven pro experimentální použití. Nedávno byl ale vývoj SMES systému s nízkoteplotním supravodičem pro Švýcarské železnice ukončen z důvodu nalezení méně nákladného řešení. ABB v současné době nepánuje pokračovat ve vývoji technologií na bázi supravodivých akumulátorů energie.

### 3.2.3. Stav vývoje v USA

Zřejmě nejvýznamnější světový program na téma akumulace energie je uskutečňován společností Babcock and Wilcox (B&W) ve Spojených státech. B&W má postavit a uvést do provozu 1800MJ SMES určený k zajištění pohotovostní zásoby pro energetickou společnost Anchorage Municipal Light and Power (AML&P). Tato společnost je součástí Aljašského energetického systému, který je největší izolovanou soustavou ve Spojených státech. Tato oblast obsluhovaná AML&P vyvolává téměř polovinu zátěžových špiček přenosové sítě, které dosahují průměrně 600MW během zimy. AML&P vyžaduje, jakožto součást přenosové sítě, zajištění přibližně 30% instalovaného výkonu pro pohotovostní zásobu. Část této kapacity je poskytována hydroelektárnou v Bradley Lake. Z fyzikálních omezení v Bradley Lake plyne, že doba reakce této hydroelektárny je nejméně jedna minuta. Tato doba je příliš dlouhá pro zamezení dalšímu úbytku výkonu v případě, jako je výpadek generátoru vyvolaný poklesem frekvence sítě díky odběrové špičce. Plánovaný SMES systém může okamžitě dodávat přibližně 30MW po dobu přibližně jedné minuty, což dává dostatek času k náběhu hydroelektárny a připojení na síť, pro případ příchodu další špičky. Navrhovaný SMES bude akumulovat 1800MJ energie v solenoidu o průměru 7m využívajícím hliníkem stabilizovaný Nb-Ti vodič.

Několik amerických společností se věnuje výrobě mikro-SMES určených, jak již bylo zmíněno, pro zlepšení kvality dodávané energie. Tyto jednotky jsou komerčně vyráběny společnostmi Superconducting Inc. v Madisonu ve státě Wisconsin a IGC v Latham, ve státě New York. Obě společnosti dodávají mikro-SMES systémy pro americké vzdušné síly (USAF) jako součást programu, který má zajistit nepřetržité dodávky energie a napětíovou stabilitu pro vybrané řídicí centra USAF.

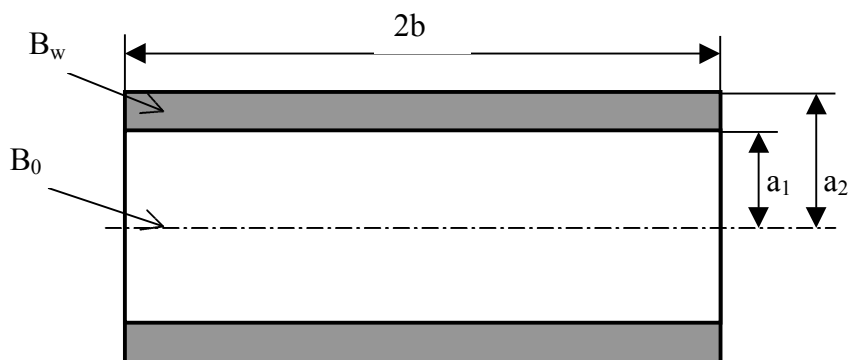
## 4. Návrh supravodivého magnetického akumulátoru energie

### 4.1. Rozměry a akumulovaná energie SMES

Rozměry supravodivého magnetického akumulátoru energie, pro dané množství akumulované energie, nelze většinou vypočítat přímo. Zpravidla si na počátku výpočtu pro daný supravodivý materiál odhadneme určité rozměry akumulátoru a po vypočtení návrhu zhodnotíme velikost výsledné akumulované energie. Podle této velikosti zpětně určíme, zda je třeba tyto vstupní rozměry zvětšit či zmenšit tak, aby jsme dosáhli námi požadovaného množství akumulované energie. Tento postup opakujeme do té doby, dokud velikost akumulované energie neodpovídá zadání návrhu.

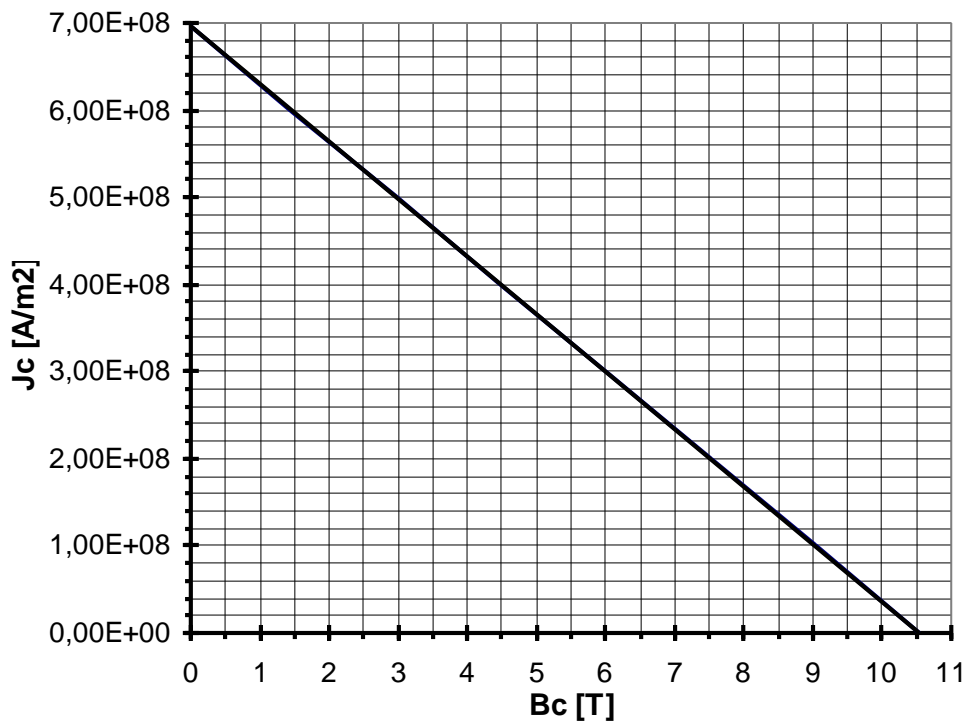
#### 4.1.1. Obecný návrh

Pro příklad obecného návrhu rozměrů supravodivého magnetického akumulátoru energie jsem použil zjednodušený návrh založený na funkci poměrných rozměrů  $F(\alpha, \beta)$ , a to pro solenoidální cívku bez stínění. Pro vytvoření představy o rozměrech akumulátorů s různým množstvím akumulované energie jsem spočítal několik návrhů tak, že jsem si na počátku určil vnitřní průměr solenoidální cívky a velikost pole o indukci  $B_0$  ve středu cívky. Jako materiál jsem v návrhu použil LTS technický supravodič Nb-Ti stabilizovaný Cu, který je jedním z nejpoužívanějších supravodičů. A to při teplotě He lázně = 4,2 °K. Tento obecný návrh lze aplikovat i na jiné technické supravodiče při jiných chladících teplotách. Je vždy nutné mít nejlépe experimentálně zjištěnou závislost  $J_c$  na  $B_c$  pro daný technický supravodič.



Obr. 4.1: Návrh solenoidální cívky

- Určíme si velikost indukce  $B_0$  ve středu cívky a vnitřní průměr solenoidu  $D_i$
- Z vnitřního průměru solenoidu vypočteme vnitřní poloměr  $a_1 = D_i / 2$  (4.1)
- Pro indukci  $B_0$  stanovíme z grafu závislosti ( $J_c$ ,  $B_c$ ) při 4,2 °K na obr. 4.2 hodnotu kritické proudové hustoty pro daný materiál  $\Rightarrow J_{c1} [A / m^2]$

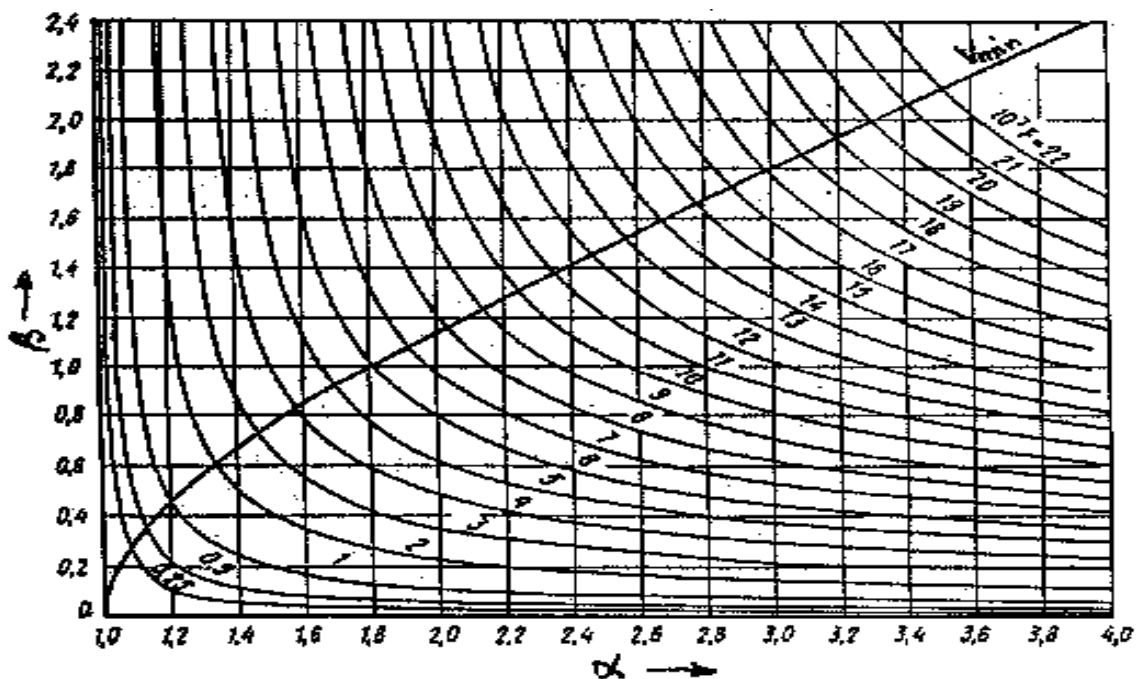


Obr. 4.2: Závislost  $J_c$  na  $B_c$  pro NbTi / Cu při teplotě 4,2 °K včetně

d) Hodnotu činitele tvaru stanovíme ze vztahu

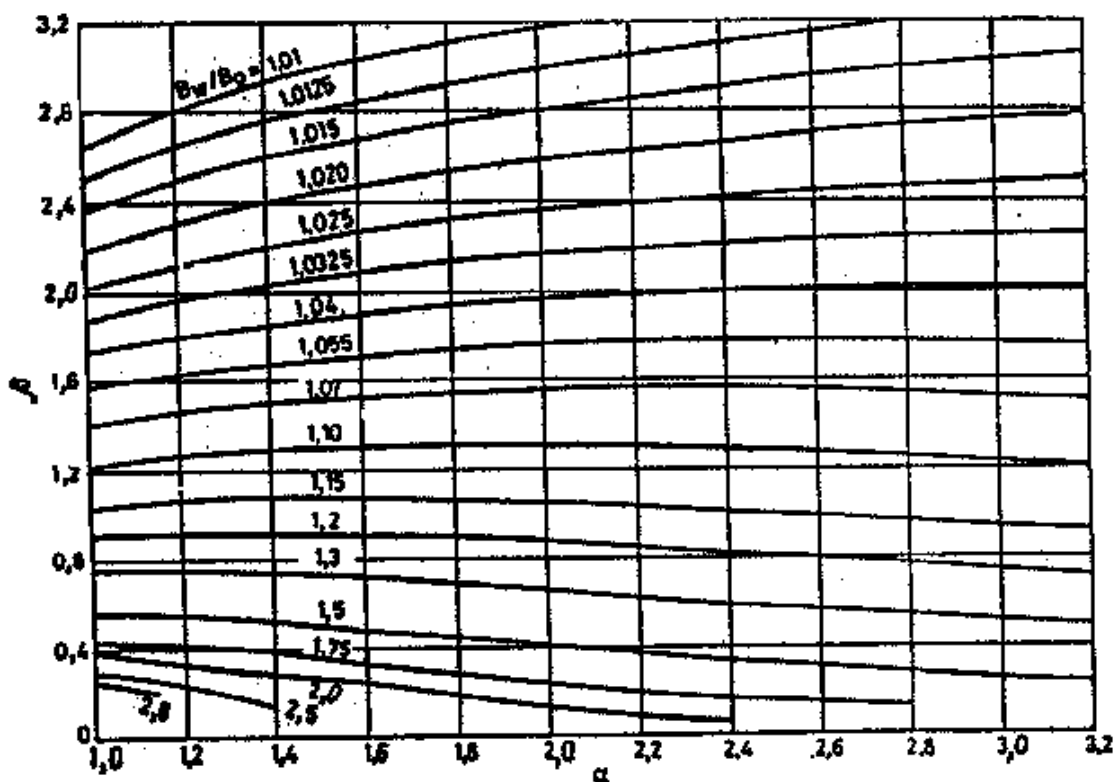
$$B_0 = J_c * a_1 * F(\alpha, \beta) \Rightarrow F(\alpha, \beta) = \frac{B_0}{J_c * a_1} \quad (4.2)$$

e) Při požadavku minimálního objemu solenoidu nalezneme v grafu na obr. 4.3 (průnik:  $F(\alpha, \beta) * 10^{-7} = \text{konstanta}$  a  $V_{\min}$ ) hodnoty  $\alpha_1$  a  $\beta_1$ .



Obr. 4.3: Závislost poměrných rozměrů  $\alpha$ ,  $\beta$  na činiteli tvaru

f) Z hodnot  $\alpha_1$  a  $\beta_1$  určíme, že tomuto charakteristickému tvaru odpovídá podle grafu na obr. 4.4 [ $B_w/B_0(\alpha,\beta)$ ] odečtená hodnota poměru  $(B_w/B_0)_1$ .



Obr. 4.4: Poměr  $B_w/B_0$  pro charakteristický tvar  $\alpha,\beta$

g) Hodnotu indukce  $B_{w1}$  uvnitř vinutí teď můžeme vypočítat z poměru  $B_w/B_0(\alpha,\beta)$  podle vzorce:

$$B_w = (B_w/B_0)_x * B_0 \quad (4.3)$$

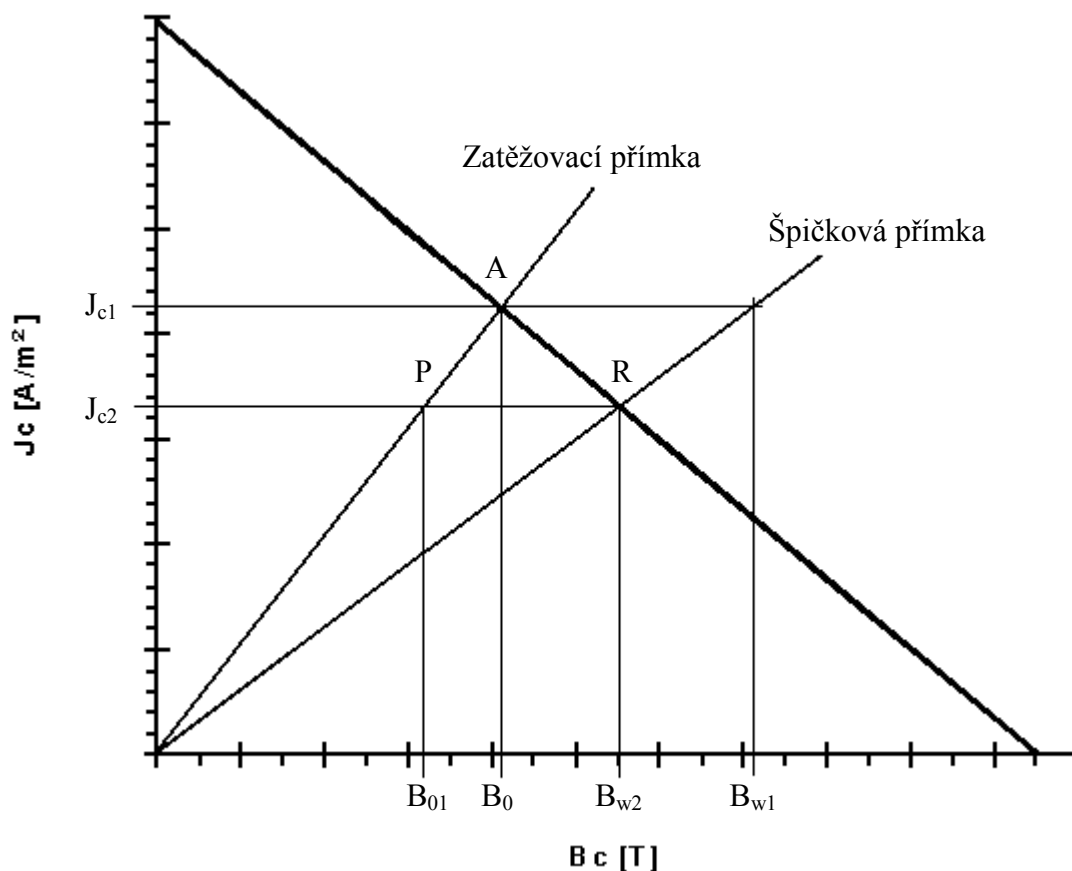
h) Sestrojíme zatěžovací přímku jako spojnici počátku a průniku  $B_0, J_{c1}$  (viz obr. 4.5)

i) Definujeme charakteristiku pro  $B_w$  tj. špičkovou přímku - spojnice  $B_{w1}$  a rovnoběžky s osou  $B$  [T] v pomocném bodě A

Bod A je průnikem zatěžovací přímky s bodem na závislosti  $J_c$  na  $B_c$  pro NbTi/Cu

Protože  $B_{w1}$  je příliš velká než aby mohl být ve vinutí zachován stav supravodivosti při dané proudové hustotě  $J_{c1}$ , musíme najít takový bod  $B_w$  aby zůstala supravodivost ve vinutí zachována. Tím je bod **R**, který leží na hranici supravodivosti materiálu.

j) Tedy  $B_w$  dosáhne kritické hodnoty (v bodě **R**) – z grafu na obr. 4.5 určíme  $B_{w2}$  (indukci ve vinutí solenoidu) a na zatěžovací přímce určíme hodnoty v bodě **P**, který stanovuje indukci ve středu solenoidu  $B_{01}$  a kritickou proudovou hustotu  $J_{c2}$  pro dané rozměrové provedení supravodivého akumulátoru energie.



Obr. 4.5: Určení  $B_{01}$  na grafu závislosti  $J_c$  na  $B_c$  pro NbTi / Cu

- k) Pro splnění zadané hodnoty  $B_0$  ve středu solenoidu tj. tak, aby se  $B_0$  rovnalo  $B_{01}$  je nutné změnit rozměry solenoidu, tedy změnit  $\alpha$  a  $\beta$ . Proto odhadneme novou hodnotu činitele tvaru  $F(\alpha, \beta)$  a stanovíme nové hodnoty  $\alpha_2$  a  $\beta_2$  z grafu na obr. 4.3 stejně jako v bodě e).
- l) Podobně jako v bodu f) z hodnot  $\alpha_2$  a  $\beta_2$  určíme, že tomuto charakteristickému tvaru odpovídá podle grafu na obr. 4.4 hodnota poměru  $(B_w/B_0)_2$ . Hodnotu indukce  $B_{w3}$  uvnitř vinutí vypočteme podle vzorce 4.3.
- m) Vypočteme  $J_{c3}$  pro novou zatěžovací přímku ze vztahu:

$$B_0 = J_c * a_1 * F(\alpha, \beta) \Rightarrow J_c = \frac{B_0}{F(\alpha, \beta) * a_1} \quad (4.4)$$

- n) Sestrojíme zatěžovací přímku jako spojnicí počátku a průniku  $B_0, J_{c3}$ .

Dále sestrojíme špičkovou přímku ze spojnice  $B_{w3}$  a rovnoběžky s osou  $B$  [T] v pomocném bodě A. (Bod A je průnikem zatěžovací přímky s bodem na závislosti  $J_c$  na  $B_c$  pro NbTi/Cu).

Tím získáme bod **R** a odečteme hodnotu  $B_{w4}$ . (viz obr. 4.6)

- o) Pokud jsme zvolili hodnotu činitele tvaru  $F(\alpha, \beta)$  správnou, leží bod **R** na hodnotě proudové hustoty  $J_{c3}$ , a tedy bod **P** na zatěžovací přímce má hodnotu  $B_0$  (tj.  $B_0$  se rovná  $B_{02}$ ), což je znázorněno na obr. 4.6.

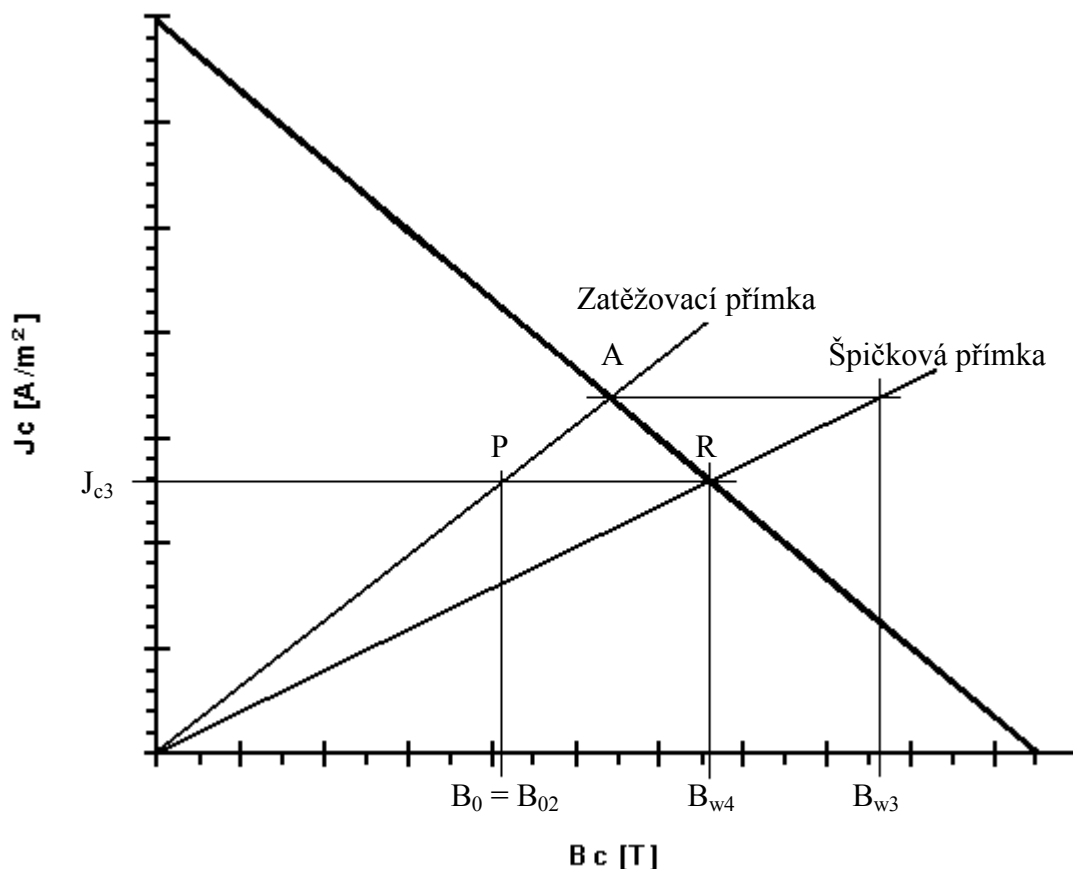
## Supravodivý akumulátor energie

V tomto případě známe všechny hodnoty potřebné k výpočtu akumulované energie:

$B_0$  – požadovanou indukci ve středu solenoidu

$B_{w4}$  – indukci ve středu vinutí cívky

$J_{c3}$  – kritickou proudovou hustotu ve vinutí



Obr. 4.6: Splnění zadané hodnoty  $B_0$  na grafu závislosti  $J_c$  na  $B_c$  pro NbTi / Cu

Pokud bod **R** neleží na hodnotě proudové hustoty  $J_{c3}$  a tedy bod **P** není na hodnotě  $B_0$ , musíme se znovu vrátit k bodu k), zvolit jinou hodnotu činitele tvaru  $F(\alpha, \beta)$  (potažmo jiné rozměry solenoidu) a znovu příklad spočítat. Tento postup opakujeme dokud není splněna podmínka  $B_0$  se rovná  $B_{02}$ .

- p) Nyní si můžeme dopočítat ostatní rozměry solenoidální cívky ze vztahů pro činitele tvaru cívky  $\alpha$  a  $\beta$ .

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1} \Rightarrow a_2 = \alpha * a_1 \quad \beta = \frac{b}{a_1} \Rightarrow b = \beta * a_1 \quad (4.5)$$

Takto spočtené  $a_2$  a  $b$  si můžeme dosadit do nákresu solenoidální cívky (obr.4.1).

- q) Zbývá zjistit objem akumulované energie pro toto rozměrové provedení supravodivého akumulátoru energie.

Spočteme si objem magnetického pole uvnitř solenoidu (uvažujeme pole ze středního poloměru vinutí, protože jsme spočetli indukci ve středu vinutí cívky) podle:

$$V = S * 2b = \pi * \left( \frac{a_2 - a_1}{2} + a_1 \right)^2 * 2b \quad (4.6)$$

## Supravodivý akumulátor energie

Pro zjednodušení výpočtu si určíme průměrnou indukci  $B_S$  v objemu mag. pole  $V$ :

Kruhovou plochu určenou jako  $S$  (z vzorce 4.6) si rozdělíme na  $n$  mezikruží, do kterých rozdělíme indukci od středu solenoidu  $B_0$  až k indukci ve vinutí  $B_w$ .

Plochy jednotlivých mezikruží vynásobíme přidělenými indukcemi. Sečteme celkovou sumu  $\sum_{1-n} B_n * S_n$  a tu vydělíme celkovou plochou  $S$ .

Vyjde nám přibližná průměrná indukce  $B_S$  v objemu  $V$ , kterou použijeme k výpočtu hustoty energie magnetického pole  $w_m$  [ $J/m^3$ ] ( $\mu_r$  tekutého hélia je přibližně rovno 1).

$$w_m = \frac{1}{2} * \frac{B_S^2}{\mu} \quad (4.7)$$

Z objemu magnetického pole uvnitř cívky  $V$  a hustoty energie  $w_m$  můžeme určit množství akumulované energie  $W_m$  [J].

$$W_m = V * w_m \quad (4.8)$$

- r) Nakonec si návrh zhodnotíme. Podle velikosti množství akumulované energie  $W_m$  a rozměrů solenoidu rozhodneme, jestli je vypočtené provedení supravodivého akumulátoru vyhovující. Když nám nevyhovuje například nízké množství akumulované energie  $W_m$ , musíme zvětšit rozměry či zvýšit indukci ve středu solenoidu (tím se nám ale bohužel sníží kritická proudová hustota ve vinutí).

### 4.1.2. Příklady navržených SMES

Pro vytvoření představy o velikostech supravodivých magnetických akumulátorů energie a jejich akumulované energie jsem vytvořil několik modelových výpočtů podle výše popsaného obecného návrhu. Použil jsem již v grafu na obrázku 4.2 zmíněnou závislost  $J_c$  na  $B_c$  pro technický supravodič NbTi / Cu při teplotě 4,2 °K včetně. Jako srovnávací jsem si zvolil indukci ve středu solenoidu  $B_0 = 6$  T a vnitřní průměr solenoidu  $D_i = 0,5$  m.

*Příklad výpočtu pro  $B_0 = 6$  T a  $D_i = 0,5$  m*

- $B_0 = 6$  T a  $D_i = 0,5$  m
- Vypočetl jsem vnitřní poloměr solenoidu  $a_1 = 0,25$  m
- Z grafu na obr. 4.2 jsem stanovil hodnotu kritické proudové hustoty  $J_{c1} = 3,00 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup>
- Vypočetl jsem hodnotu činitele tvaru  $F(\alpha, \beta) = 0,8 \cdot 10^{-7}$
- Při požadavku minimálního objemu solenoidu jsem našel v grafu na obr. 4.3 hodnoty:  
 $\alpha_1 = 1,17$  a  $\beta_1 = 0,41$
- Pro  $\alpha_1, \beta_1$  jsem odečetl z grafu na obr. 4.4 hodnotu poměru  $(B_w/B_0)_1 = 1,67$
- Vypočetl hodnotu indukce uvnitř vinutí  $B_{w1} = 10,02$  T
- Sestrojil jsem zatěžovací a špičkovou přímku a dosáhl hodnot:  
Indukce ve vinutí solenoidu  $B_{w2} = 7,3$  T  
Kritická proudová hustota  $J_{c2} = 2,15 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup>  
Indukce ve středu solenoidu  $B_{01} = 4,2$  T
- Pro splnění zadané hodnoty  $B_0 = B_{01}$  jsem změnil rozměry solenoidu:  
Hodnotu činitele tvaru na  $F(\alpha, \beta) = 1,22 \cdot 10^{-7} \Rightarrow \alpha_2 = 1,24$  a  $\beta_2 = 0,49$
- Pro  $\alpha_2, \beta_2$  jsem odečetl z grafu na obr. 4.4 hodnotu poměru  $(B_w/B_0)_2 = 1,53$   
a vypočetl hodnotu indukce uvnitř vinutí  $B_{w3} = 9,18$  T

## Supravodivý akumulátor energie

m) Vypočetl jsem krit. proudovou hustotu pro novou zatěžovací přímkou  $J_{c3} = 1,97 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$   
 n,o) Sestrojil jsem novou zatěžovací a špičkovou přímkou a dosáhl hodnot:

Indukce ve vinutí solenoidu  $B_{w4} = 7,65 \text{ T}$   
 Indukce ve středu solenoidu  $B_{02} = 6 \text{ T}$   
 při kritické proudové hustotě  $J_{c3} = 1,97 \cdot 10^8 \text{ [A/m}^2\text{]}$   
 Tím jsem splnil podmínku, že  $B_{02}$  se rovná  $B_0$ .

p) Vypočetl jsem si ostatní rozměry solenoidální cívky:

Vnější poloměr solenoidu  $a_2 = 0,31 \text{ m}$   
 Polovina délky solenoidu  $b = 0,1225 \text{ m}$   
 Délka solenoidu  $2b = 0,245 \text{ m}$

q) Při určení množství akumulované energie jsem vypočetl:

Objem magnetického pole uvnitř solenoidu  $V = 0,0603437 \text{ m}^3$   
 Přibližná průměrná indukce  $B_S = 7,14056 \text{ T}$   
 Hustota energie magnetického pole  $w_m = 20\,287\,320,3 \text{ J/m}^3$   
 A konečně množství akumulované energie  $W_m = 1\,224\,212,21 \text{ J}$

### Výsledky některých spočtených variant

Vypočetl jsem několik variant a vybral pro srovnání tyto čtyři. U každé varianty zde uvádím pouze některé hodnoty a konečné výsledky. Zvýraznil jsem klíčové hodnoty akumulátoru, které jsou zvláště důležité pro posouzení jednotlivých návrhů. Mimo srovnávacího návrhu, který je vypočten výše (a který jsem uvedl pro snazší porovnání i v tabulce s ostatními hodnotami), jsem vybral ještě varianty se stejnou indukcí ve středu solenoidu  $B_0 = 6 \text{ T}$  a vnitřním průměrem solenoidu  $D_i = 0,15 \text{ m}$  a  $D_i = 1 \text{ m}$ . A poslední se stejným vnitřním průměrem solenoidu  $D_i = 0,5 \text{ m}$ , ale s indukcí ve středu solenoidu  $B_0 = 3 \text{ T}$ .

<b>Vnitřní průměr solenoidu</b>	<b><math>D_i</math> [m]</b>	<b>0,5</b>	<b>0,15</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>
<b>Indukce ve středu solenoidu</b>	<b><math>B_0</math> [T]</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
Činitel tvaru	$F(\alpha, \beta)$ [-]	$1,22 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$0,8 \cdot 10^{-7}$	$0,36 \cdot 10^{-7}$
<b>Kritická proudová hustota</b>	<b><math>J_{c3}</math> [A/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>1,97 \cdot 10^8</math></b>	<b><math>2,29 \cdot 10^8</math></b>	<b><math>1,5 \cdot 10^8</math></b>	<b><math>3,33 \cdot 10^8</math></b>
Indukce ve vinutí solenoidu	$B_{w4}$ [T]	7,65	7,05	8,28	5,5
Vnitřní poloměr solenoidu	$a_1$ [m]	0,25	0,075	0,5	0,25
Vnější poloměr solenoidu	$a_2$ [m]	0,31	0,114	0,585	0,275
Délka solenoidu	$2b$ [m]	0,245	0,1155	0,41	0,15
<b>Objem mg. pole v solenoidu</b>	<b><math>V</math> [m<sup>3</sup>]</b>	<b>0,06034</b>	<b>0,00324</b>	<b>0,37908</b>	<b>0,03247</b>
Přibližná průměrná indukce	$B_S$ [T]	7,14056	6,72581	7,57605	4,72813
Hustota energie mag. pole	$w_m$ [J/m <sup>3</sup> ]	20 287 320	17 999 053	22 837 355	8 894 838
<b>Akumulovaná energie</b>	<b><math>W_m</math> [J]</b>	<b>1 224 218</b>	<b>58 317</b>	<b>8 657 230</b>	<b>288 827</b>

Z vypočtených variant je zřejmé, že akumulovaná energie roste s objemem magnetického pole a s indukcí v tomto objemu. Se zvětšujícími se rozměry akumulátoru se zvětšuje i hodnota indukce ve vinutí solenoidu a tím i hustota energie magnetického pole. Avšak pro zachování supravodivého stavu zařízení je logické, že když se zvyšuje indukce, musí se proudová hustota snižovat. Při snížení indukce ve středu solenoidu na polovinu nám objem mag. pole také klesl přibližně na polovinu (54 %), ale z důvodu malé hustoty energie mag. pole způsobené malou indukcí kleslo množství akumulované energie na přibližně 24% původního, přičemž kritická proudová hustota vzrostla jen o 69%. Nejvýhodnější je asi co nejvíce zvětšit hustotu energie mag. pole (potažmo indukcí v solenoidu) i za cenu snížené kritické proudové hustoty.

## 4.2. Solenoid a Toroid

Solenoid a Toroid jsou dva základní typy provedení supravodivého akumulátoru energie. Pro představu o vlastnostech a rozdílech těchto typů cívek jsem použil výpočty podle [2], které jsou provedeny tak, aby velikost akumulované energie byla přibližně 100 MJ. Je zde uveden návrh solenoidální cívky a toroidní cívky s nízkoteplotním supravodičem NbTi.

### 4.2.1. Solenoidální cívka s NbTi

V návrhu se omezíme na solenoidální cívku bez stínění. Pro základní úvahy použijeme zjednodušený návrh založený na funkci poměrných rozměrů  $F(\alpha, \beta)$  stejně jako v obecném návrhu v předchozí kapitole. Vzhledem k tomu, že na koncích cívky může docházet k určité nehomogenitě magnetického pole, nebude zřejmě možné dosahovat vyšších indukci. V další práci budou získané hodnoty použity jako základ pro předběžný návrh toroidní cívky, kde by mělo být možné dosažení vysokých hustot energie cca 30-100 MJ/m<sup>3</sup>. Během experimentů provedených v Rusku na toroidním SMES byla dosažena hustota energie 32 MJ/m<sup>3</sup>. Vlivem výše zmíněných omezení budeme předpokládat hodnotu asi 60% tj. asi 20 MJ/m<sup>3</sup>. Při požadavku na akumulaci energie přibližně 100 MJ získáme předběžný objem magnetického pole v cívce přibližně 5m<sup>3</sup>.

Na základě předchozích úvah zvolíme:

Vnitřní průměr cívky  $D_i = 2a_1 = 1,5$  m

Indukce ve středu cívky  $B_0 = 6,5$  T

Materiál vodiče cívky NbTi

Teplota He lázně 4,2 K

Pro indukci  $B_0 = 6,5$ T můžeme z experimentálně zjištěné závislosti z grafu na obr. 4.2 určit kritickou proudovou hustotu  $J_c = 2,67 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup>. Tento údaj ovšem není střední proudová hustota po průřezu vinutí. Při praktickém použití technického supravodiče je nutné ještě zahrnout tloušťku izolace a případné kanály pro styk s chladicí lázní. Pro další postup vyjdeme z údajů o provedených magnetech a zvolíme proudovou hustotu vinutí  $J_c = 1,24 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup>. Na základě takto zvolených hodnot můžeme určit hodnotu činitele tvaru vinutí podle:

$$F(\alpha, \beta) = \frac{B_0}{J_c * a_1} \quad (4.9)$$

pro zvolené hodnoty vychází  $F(\alpha, \beta) = 6,99 \cdot 10^{-8}$  [-].

Podle velikosti činitele tvaru nalezneme v grafu na obr. 4.3 hodnoty poměrných rozměrů  $\alpha = 1,045$  a  $\beta = 2,2$  a z nich už je možné určit ostatní rozměry cívky.

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1} \quad \beta = \frac{b}{a_1} \quad (4.10)$$

potom

vnější poloměr cívky  $a_2 = 0,783$  m

polovina délky cívky  $b = 1,65$  m.

## Supravodivý akumulátor energie

Nyní již můžeme z daných rozměrů cívky a z rozměrů vodiče určit počet závitů. Pro naše účely bude vyhovující vodič 3,8x3,5 mm ruské výroby vinutý na vysoko. Vodič je složen ze dvou paralelních kabelů o rozměru 3,8x1,7 vyrobených z 8 kroucených supravodivých NbTi vodičů o průměru 0,85mm.

Zvolíme krok vinutí 5mm a vzdálenost mezi vrstvami 2mm. Po jednoduchém výpočtu zjistíme, že počet závitů v jedné vrstvě vychází 660 a počet vrstev 8. Celkový počet závitů potom bude  $N_z=5280$ . Pro proud vodičem  $I_v=3,6\text{kA}$  můžeme zkontrolovat proudovou hustotu průřezem cívky podle

$$J = \frac{N_z * I_v}{2b * (a_2 - a_1)} \quad (4.11)$$

po dosazení získáme  $J=1,28 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ . Tato hodnota je v souladu s předpokládanou proudovou hustotou.

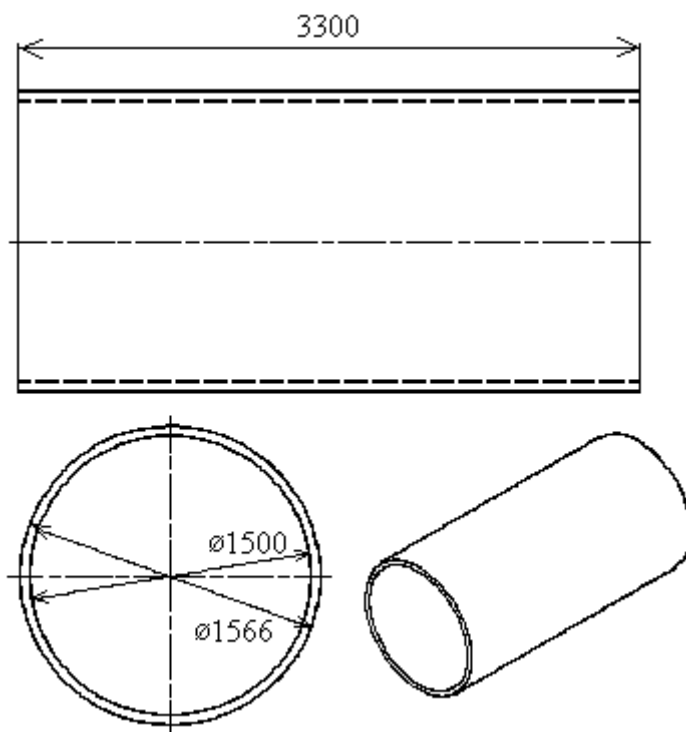
Nyní stanovíme hodnotu intenzity magnetického pole  $H_0$  ve středu cívky

$$H_0 = \frac{J}{2} \int_{a_1-b}^{a_2+b} \int_{-b}^b \frac{a^2}{\sqrt{(a^2 + \zeta^2)^3}} d\zeta da = J * a * \beta * \left[ \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right] \quad (4.12)$$

Po dosazení získáme hodnotu intenzity  $H_0=5,36 \cdot 10^6 \text{ A/m}$ . Vypočtená indukce ve středu cívky  $B_0$  je 6,74 T. Nyní již můžeme stanovit hustotu energie ve středu cívku podle známého vztahu

$$w_m = \frac{1}{2} B_0 H_0 \quad (4.13)$$

kde  $w_m$  je hustota energie magnetického pole. Po dosazení získáme  $w_m=18,1 \text{ MJ/m}^3$ . Uvedená hodnota je ve srovnání s počátečním předpokladem nižší, ale pro orientační výpočet ji můžeme považovat za vyhovující. Z objemu magnetického pole uvnitř cívky můžeme přibližně určit množství uložené energie  $W_m=105,3 \text{ MJ}$ .



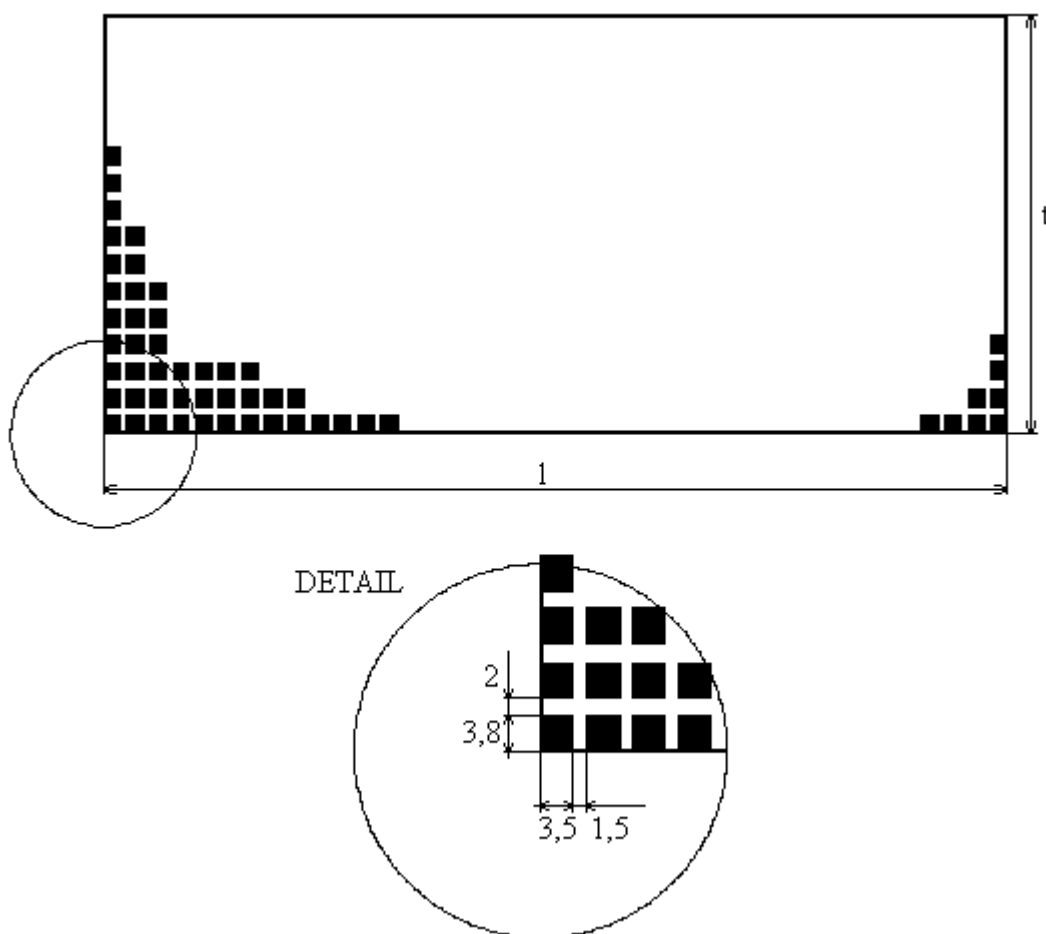
Obr. 4.7: Návrh solenoidální cívky s NbTi -  $W_m=105,3 \text{ MJ}$

## 4.2.2. Toroidní cívka s NbTi

Navrhujeme toroidní cívku pro technický supravodič Nb-Ti. V předběžném návrhu toroidní cívky můžeme pro zjednodušení vyjít z rozměrů solenoidní cívky. Základním předpokladem je, že množství akumulované energie zůstane konstantní, a pro srovnání ponecháme stejný i maximální proud cívkou. Jednoduchým rozdělením solenoidní cívky na určitý počet segmentů dojde k poměrně výraznému poklesu množství akumulované energie, protože dojde k prodloužení integrační cesty v I.Maxwellově rovnici.

$$\oint_c H dl = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (4.14)$$

Délka integrační cesty je v případě toroidu poměrně delší. V případě toroidní cívky, ale můžeme využít vyšší homogenity pole, protože nedochází k nárůstu jeho intenzity v rozích na koncích cívky. Těchto vlastností můžeme využít zvýšením počtu vrstev cívky. Pro toroidní cívku je kritickým bodem velikost indukce na vnitřním poloměru cívky. Na základě předchozích úvah zvolíme cívku složenou z 12 segmentů. Každý segment je navinut z NbTi vodiče 3,5x3,8 na vysoko. V cívce je 45 závitů v jedné vrstvě a 16 vrstev. Celkem je v jednom segmentu 720 závitů a v cívce 8640. Sestavení vinutí je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 4.8: Vinutí jednoho segmentu toroidní cívky NbTi

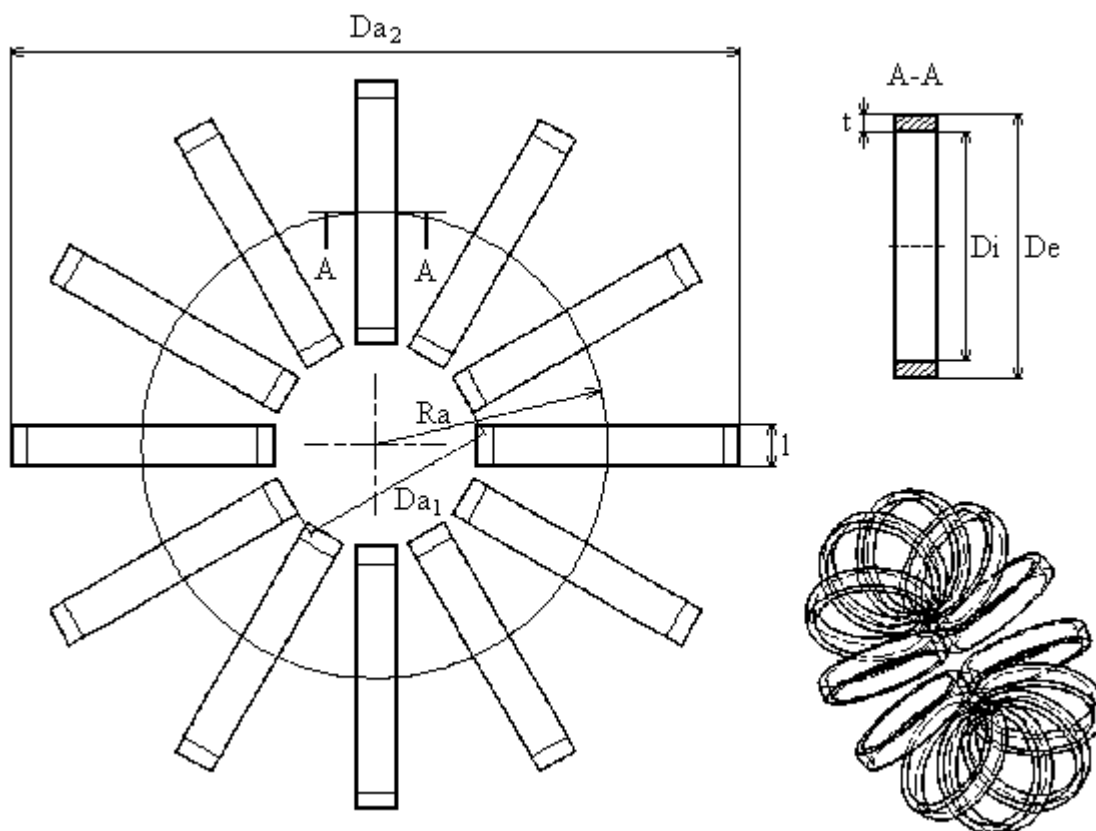
Vodiče budou navinuty do pevného rastru a impregnovány metodou VPI epoxidovou pryskyřicí, která si zachovává výborné mechanické vlastnosti i při kryogenních teplotách. Celá cívka pak bude upevněna ve speciálním rámu odolávajícím působícím silám. Z rozměrů a počtu vodičů vypočteme rozměry průřezu cívky. Délka  $l=225\text{mm}$  a tloušťka  $t=92,8\text{mm}$ . Na základě délky cívky vypočteme minimální vnitřní poloměr

$$R_{a1MIN} = \frac{N_c l}{2\pi} = 429,7 \text{ mm} \quad (4.15)$$

kde  $N_c$  je počet cívek toroidu. Z konstrukčního hlediska volíme vnitřní poloměr o trochu větší, aby zde bylo možné umístit opěrnou konstrukci cívek. Z elektromagnetického hlediska je zvýšení poloměru výhodné, protože se zlepší homogenita pole uvnitř toroidu. Nevýhodou je nárůst rozměrů kryostatu (objem roste s druhou mocninou  $R$ ), a proto je snaha o co nejmenší poloměr  $R_{a1}$ . Vnitřní poloměr tedy zvolíme  $R_{a1}=550\text{mm}$ . Z hlediska rozložení indukce uvnitř cívky a minimálních rozměrů kryostatu volíme vnitřní průměr cívky  $D_i=1250\text{mm}$ . Tato hodnota je vyhovující i z hlediska minimálních poloměrů ohybu vodiče vinutí. Nyní můžeme vypočítat střední poloměr toroidu  $r_s$  a vnější průměr  $R_{a2}$ .

$$R_{a2} = R_{a1} + D_i + 2t = 1985,6 \text{ mm} \quad (4.16)$$

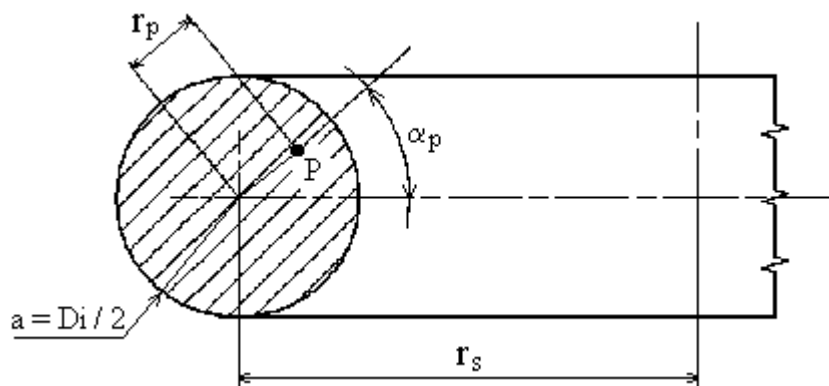
$$r_s = \frac{R_{a2} + R_{a1}}{2} = 1267,8 \text{ mm} \quad (4.17)$$



Obr. 4.9: Základní návrh toroidu NbTi s kruhovým průřezem jádra

## Supravodivý akumulátor energie

Na základě známých geometrických rozměrů můžeme vypočítat indukčnost a akumulovanou energii podle [9].



Obr. 4.10: Schématický obrázek pro odvození indukčnosti cívky

V magnetickém poli cívky s proudem  $I$  platí pro siločáru procházející bodem  $P[r_p, \alpha_p]$  průřezu  $S$  podle I. Maxwellovi rovnice (viz obr. 4.10)

$$H * 2\pi * l = N_z I s \quad (4.18)$$

$$H * 2\pi (r_s - r_p \cos \alpha_p) = N_z I \quad (4.19)$$

$$H = \frac{N_z I}{2\pi (r_s - r_p \cos \alpha_p)} \quad (4.20)$$

Magnetický tok plochou jednoho závitu je

$$\Phi = \int_S B dS = \mu \int_S H dS = \frac{\mu N_z I}{2\pi} \int_0^a \int_{-\pi}^{\pi} \frac{r_p dr_p d\alpha_p}{r_s - r_p \cos \alpha_p} = \mu N_z I \left( r_s - \sqrt{r_s^2 - a^2} \right) \quad (4.21)$$

Indukčnost ve středu cívky tj. v bodě  $P [0, 0]$  je

$$L = \frac{\Phi_c}{I} = \frac{N_z \Phi}{I} = \mu N_z^2 \left( r_s - \sqrt{r_s^2 - a^2} \right) = 15,45 H \quad (4.22)$$

kde  $N_z$  je počet závitů  $r_s$  je střední poloměr cívky,  $a$  je poloměr vnitřku cívky tj.  $a = D_i / 2$ .

Na základě známého proudu  $I=3,6$  kA a indukčnosti cívky můžeme vypočítat akumulovanou energii

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 = 100,1 MJ \quad (4.23)$$

Množství akumulované energie odpovídá předpokladům. Nyní musíme ověřit, zda nebyla překročena kritická proudová hustota a kritická indukce pro daná typ supravodiče.

Proudovou hustotu supravodiče vypočteme ze známých hodnot. Supravodivý kabel je složen ze 16-ti vláken o průměru 0,85mm. Celkový průřez kabelu je tedy  $S_v = 4,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Proudovou hustotu vypočteme podle vztahu

$$J = \frac{I}{S_v} = 7,93 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (4.24)$$

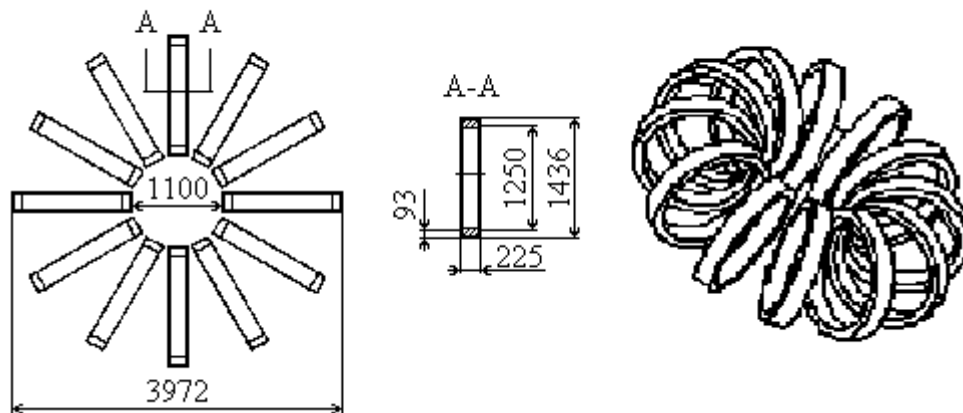
## Supravodivý akumulátor energie

Pro výpočet indukce využijeme vztah (4.20) a budeme předpokládat, že největší indukce je na minimálním poloměru  $r_s$  tedy na vnitřním povrchu cívky.

$$B = \frac{\mu_0 N_z I}{2\pi(r_s - r_p \cos \alpha_p)} = 9,95 T \quad (4.25)$$

Nakonec z grafu na obr. 4.2 zjistíme, že pro hodnotu indukce  $B = 9,95 T$  je kritická proudová hustota  $J_c = 3,81 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ .

Srovnáním s hodnotou uvedenou ve vztahu (4.24) je patrné, že disponujeme jistou bezpečnostní rezervou. Rozumnou hodnotu této rezervy nelze ještě v tomto stupni poznání dosti přesně odhadnout. Kritické parametry se mohou zhoršit například vlivem zaoblení konců jednotlivých cívek.



Obr. 4.11: Návrh toroidní cívky s NbTi -  $W_m = 100,1 \text{ MJ}$

Toroidní cívka v našem návrhu má, jak by se dalo teoreticky předpokládat, vyšší hustotu energie magnetického pole a to přibližně  $30 \text{ MJ/m}^3$  oproti solenoidální cívce s hustotou  $18,1 \text{ MJ/m}^3$ . Z toho by se dalo usuzovat, že je lepší zabývat se jen toroidy. Ale na stavbu toroidu, i když v našem návrhu má jeden závit cívky menší poloměr, bychom spotřebovali asi 1,5krát více supravodiče, při přibližně stejném množství akumulované energie. Také předpokládaný kryostat by měl pro toroidní cívku větší objem. Proto jsou, v případě že nepožadujeme vysokou homogenitu magnetického pole, z ekonomického hlediska prozatím výhodnější solenoidální cívky.

## 5. Ztráty v supravodivém akumulátoru

V supravodivém akumulátoru energie vznikají ztráty především nepřímo, tedy ztracným výkonem potřebným na chlazení supravodivé cívky. Nezanedbatelné jsou ale i ztráty způsobené průchodem střídavého proudu, není-li cívka provozována stejnosměrně.

Supravodivé vinutí musí být tedy tepelně izolováno od okolí, prakticky je to provedeno jeho vložením do kryostatu s dvojitými vakuovanými stěnami, mezi nimiž jsou navíc vloženy stínící fólie, omezující tepelné záření. Tepelný tok přivedený do kryostatu, ať z okolí přes stěny kryostatu nebo výkonové vodiče, či způsobený ztrátami uvnitř kryostatu, způsobuje odpařování chladicího média, na jehož zkapalnění je potřeba mnoho energie. Např. Výkon 1W odpaří 1,24 l kapaliny na jejíž znovuzkapalnění je potřeba k-krát větší výkon. Činitel k se někdy nazývá účinností zkapalňovací soustavy, záleží na její dokonalosti a velikosti, běžně k dosahuje hodnoty 400 pro He, avšak jen 10 pro N<sub>2</sub>. Zkapalňovací proces tedy k-násobně zvyšuje ztráty v kryostatu, které je proto třeba minimalizovat.

Ztráty uvnitř kryostatu dělíme na ztráty ve vinutí, ztráty v konstrukčních částech a ztráty dielektrické. Jouleovy ztráty v supravodiči jsou nulové jen v případě, že jím protéká stejnosměrný proud. Při průtoku střídavého proudu však vznikají ztráty magnetizační, transportní a vířivými proudy. Ze ztrát v konstrukčních částech zřejmě budou největší ve stěnách kryostatu. Jejich redukcí je možno provést magnetickým či elektrodynamickým stíněním vnitřní stěny kryostatu. Dielektrické ztráty jsou určeny izolačním systémem a použitým kapalným plynem. Supravodiče jsou izolovány skelným vláknem a impregnovány syntetickou pryskyřicí a mají nepatrné dielektrické ztráty. Kapalným plynem má podobné izolační vlastnosti jako olej, je však nutno zabránit tvoření bublinek, v nichž vznikají parciální výboje.

### *Ztráty střídavým proudem v keramickém supravodiči*

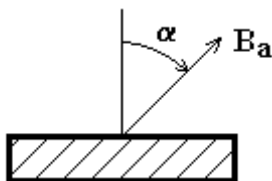
Předpokládáme použití obdélníkového mnohovláknového supravodiče typu BSCCO 2212 protékaného střídavým proudem a pracujícího ve vařícím, případně podchlazeném kapalném dusíku. Všeobecně platí, že pokud je vinutí protékáno střídavým proudem vznikají ve vodiči následující ztráty energie, vztahené na jeden cyklus:

- magnetizační, způsobené vnějším magnetickým polem (polem v místě uvažovaného závitu buzeným ostatními závity).
- transportní, způsobené průtokem střídavého proudu

Magnetizační ztrátová energie  $Q_m$  závisí tedy na vnějším poli  $B_a$  takto:

$$\begin{array}{ll} \text{Pro } B_a < B_p & Q_m \sim B_a^3 \\ \text{Pro } B_a \geq B_p & Q_m \sim 3(B_a/B_p - 2) \end{array} \quad (5.1)$$

Kde  $B_p$  je indukce, při níž je vodič plně proniknut magnetickým polem. Přejít mezi zmíněnými vztahy nelze jednoduše vyjádřit. Závislost magnetizační ztráty na transportním proudu je zanedbatelná. V případě obdélníkového či eliptického vodiče je však důležitý směr magnetické indukce, který je dán úhlem  $\alpha$  (viz obr. 5.1).



Obr. 5.1: Označení směru indukce

## Supravodivý akumulátor energie

Jeden ze způsobů jak vyjádřit magnetizačních ztráty pro technické aplikace je uveden v [10], kde je magnetizační ztráta vyjádřena vztahem:

$$Q_m = \left( \frac{C_1(\alpha)B_a^p \cdot C_2(\alpha)B_a}{C_1(\alpha)B_a^p + C_2(\alpha)B_a} \right) \quad (5.2)$$

kde  $C_1(\alpha)$ ,  $C_2(\alpha)$  a exponent  $p$  je třeba určit měřením na vzorku a vztah (5.2) odpovídá vztahům (5.1) s dostatečnou přesností.

Ztráta transportním proudem bez vlivu vnějšího magnetického pole je dána:

$$Q_{t1} \sim I_t^2 \quad (5.3)$$

v případě, že vodič je ve vnějším střídavém poli o indukci  $B_a$  ztráta se zvyšuje o hodnotu

$$Q_{t2} \sim B_a I_t^2 \quad (5.4)$$

což je obvykle označováno jako ztráta na dynamickém odporu vodiče. Tato ztráta je měřitelná na vodiči protékaném stejnosměrným proudem a ležícím ve střídavém vnějším magnetickém poli.

Výsledné transportní ztráty lze vyjádřit

$$Q_t = C_3 I_t^q + C_4(\alpha) B_a I_t^2 \quad (5.5)$$

kde  $C_3$ ,  $C_4(\alpha)$  a  $q$  je nutno určit měřením na vzorku.

Celkové ztráty ve vodiči, vztažené na jeden cyklus, můžeme tedy vyjádřit jako součet dílčích ztrát podle (5.2) a (5.5)

$$Q_{tot}(B_a, I_t, \alpha) = Q_m(B_a, \alpha) + Q_t(B_a, I_t, \alpha) \quad (5.6)$$

### Výpočet ztrát ve vinutí

Vzorec (5.6) vyjadřuje ztrátu energie v 1m supravodiče v průběhu jedné periody střídavého proudu. Pokud můžeme vypočítat ztracený výkon jako součet ztrát jednotlivých závitů

$$\Delta P_{V1} = 2\pi f \sum_{i=1}^N r_i Q_{toti} \text{ [W]} \quad (5.7)$$

kde  $\Delta P_{V1}$  je ztracený výkon ve vinutí 1 [W]

$Q_{toti}$  výsledné ztráty v i-tém závitě [J/m]

$r_i$  poloměr i-tého závitu

$f$  frekvence střídavého proudu protékajícího vodiči cívky [Hz]

K určení  $Q_{toti}$  musíme znát vektory vnějšího magnetického pole  $\hat{B}_a$ , tedy  $\hat{B}_a$  a  $\alpha$  v místě jednotlivých vodičů. Ty můžeme určit při známých proudech ve všech závitěch některou numerickou metodou, například MKP. Při řešení musíme zadat relativní permeabilitu vodičů, které se však skládají ze supravodivých vláken a stříbrné matrice. Zřejmě bude vhodné zadat střední hodnotu po průřezu vodiče.

## 6. Závěr

Cílem práce bylo seznámit s teorií a problematikou supravodivého akumulátoru energie. V supravodivém akumulátoru energie je energie uložena v magnetickém poli cívky protékané proudem. Cívka je zhotovena ze supravodivého vodiče a je uložena v kryostatu, který ji udržuje na podkritické teplotě.

Supravodivé materiály dosáhly za dobu od objevení supravodivosti značného zlepšení svých kritických parametrů. Nejlepší supravodivé materiály (vysokoteplotní supravodiče) jsou již použitelné při teplotě kapalného dusíku 77 °K. Nyní se většina laboratoří, zabývajících se supravodivými materiály, snaží o nalezení nejlepší technologie výroby technických supravodičů, tak aby mohlo být dosaženo značně dlouhých a mechanicky odolných vodičů, při zachování jejich supravodivých vlastností.

Hlavní částí práce je obecný návrh rozměrů supravodivého akumulátoru, pro který jsem použil zjednodušený návrh založený na funkci poměrných rozměrů  $F(\alpha, \beta)$ . Pro vytvoření představy o rozměrech akumulátorů s různým množstvím akumulované energie jsem spočítal několik návrhů solenoidální cívky bez stínění pro nízkoteplotní technický supravodič NbTi/Cu při teplotě 4,2 °K. Z těchto návrhů je zřejmé, že akumulovaná energie roste s objemem magnetického pole a s velikostí indukce v tomto objemu. Při zachování konstantní indukce ve středu cívky se zvětšováním rozměrů akumulátoru zvětšuje i hodnota indukce ve vinutí, což má za následek nižší kritickou proudovou hustotu. Protože se tím zvětšuje hustota energie magnetického pole, a proto i množství akumulované energie, což je výhodné, je nutné najít přijatelný kompromis nižší proudové hustoty a vyšší indukce.

Vlastní supravodivou cívku může být, v závislosti na rozměrech a použití, solenoid nebo toroid. Hlavní výhodou solenoidu je nižší cena pro velké SMES systémy (více jak 5 MWh), protože pro stejné množství akumulované energie v toroidu je potřeba větší množství supravodivého vodiče. Solenoidální cívky jdou také snadno vyrábět. Hlavní nevýhodou solenoidu je nehomogenita magnetického pole na koncích cívky, která je eliminována v toroidu.

Supravodivý akumulátor energie by se mohl v příštích letech stát vyhledávanou alternativou k uchování elektrické energie, ale ekonomické studie zatím ukazují, že je příliš nákladný ve srovnání s jinými technologiemi akumulace energie. Proto bude nutné snížit nevýhody způsobené především nutností chlazení na podkritické teploty supravodiče a výdej energie s tím spojený, ať už vytvořením supravodičů z lepšími vlastnostmi (a pracujícími při vyšších teplotách) či lepším technickým řešením celého SMES systému.

## 7. Seznam použité literatury

- [1] Krasl M., Tesařová M., Valečka M.: Supravodivé materiály pro vinutí elektrických strojů. Plzeň, 2003, Západočeská univerzita v Plzni
- [2] Šašek Jiří : disertační práce : Akumulace brzdné energie v magnetickém poli supravodivé cívky. Plzeň, 2003, Západočeská univerzita v Plzni
- [3] Krasl M., Vlk R., Skala B.: Technické využití supravodivosti v elektrických strojích. Plzeň, 2003, Západočeská univerzita v Plzni
- [4] Supravodivost a levitace. 2002, <http://www.fzu.cz/texty/brana/supravodivost2/index.php>
- [5] Gandy Simon: A guide to the range and suitability of electrical energy storage systems for various applications, and an assessment of possible policy effects. Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2002, University of London
- [6] Goodchild J.: Energy storage page – SMES. 1999, <http://www.mech.uwa.edu.au/courses/ES407/Storage/1998/smes.html>
- [7] Cesty k akumulaci elektrické energie. 1999, Simopt, s.r.o., [http://www.cez.cz/encyklopedie/encyklopedie\\_energetiky/06/cesty\\_1.html](http://www.cez.cz/encyklopedie/encyklopedie_energetiky/06/cesty_1.html)
- [8] Larbalester D., Blaugher R., Schwall R., aj.: Power Applications of Superconductivity in Japan and Germany. World Technology Evaluation Center, 1997
- [9] Mayer D., Polák J.: Metody řešení elektrických a magnetických polí. SNTL/ALFA
- [10] Rabbers J.J., B. ten Haken : An engineering formula to describe the AC loss of BSCCO/Ag tape. ASC2000 conference, September 17-22 2000 Virginia Beach, VA, USA.

## 8. Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1: Závislost termodynamického kritického pole <math>B_c</math> na teplotě <math>T</math> .....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 3.1: Schematický náčrt indukční cívky .....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3.2: Schématický diagram SMES zařízení .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3.3: Propojený supravodivý a konvenční systém přenosu el. energie .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3.4: Principiální návrh supravodivé cívky pro 360MJ toroidní SMES .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4.1: Náčrt solenoidální cívky .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4.2: Závislost <math>J_c</math> na <math>B_c</math> pro NbTi / Cu při teplotě 4,2 °K včetně .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4.3: Závislost poměrných rozměrů <math>\alpha</math>, <math>\beta</math> na činiteli tvaru .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4.4: Poměr <math>B_w/B_0</math> pro charakteristický tvar <math>\alpha, \beta</math> .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.5: Určení <math>B_{01}</math> na grafu závislosti <math>J_c</math> na <math>B_c</math> pro NbTi / Cu .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.6: Splnění zadané hodnoty <math>B_0</math> na grafu závislosti <math>J_c</math> na <math>B_c</math> pro NbTi / Cu .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4.7: Návrh solenoidální cívky s NbTi - <math>W_m=105,3</math> MJ .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.8: Vinutí jednoho segmentu toroidní cívky NbTi .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4.9: Základní návrh toroidu NbTi s kruhovým průřezem jádra .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4.10: Schématický obrázek pro odvození indukčnosti cívky .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4.11: Návrh toroidní cívky s NbTi - <math>W_m=100,1</math> MJ .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.1: Označení směru indukce .....</i>	<i>33</i>

## Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje bakalářská práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU Plzeň.

.....  
Datum

.....  
Podpis

Uživatel stvrzuje čitelným podpisem, že tuto bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

<b>Jméno</b>	<b>Fakulta/katedra</b>	<b>Datum</b>	<b>Podpis</b>