

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a realizace laboratorního demonstrátoru supravodivého jevu

Autor práce: **Bc. Filip Zmeko**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.**

---

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip ZMEKO**  
Osobní číslo: **E20N0036P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Návrh a realizace laboratorního demonstrátoru supravodivého jevu**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

1. Formou literární rešerše zpracujte stručný přehled aktuálních poznatků v oblasti supravodivého jevu a používaných materiálů.
2. Uvedte možné perspektivní aplikace využívající supravodivého jevu v průmyslovém odvětví s důrazem na jejich klady a zápory.
3. Navrhněte a zkonstruuje laboratorní demonstrátor supravodivého jevu.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Drápala, J. Materiály pro elektrotechniku. Ostrava: VŠB –Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3380-4.
2. BANKUTI, J., I. VAJDA, L. MOHACSI, A. SZALAY, I. KOTSIS a M. ENISZ. Design and construction of a small-scale model of a high-temperature superconducting magnetically levitated vehicle. IEEE Transactions on Magnetics. 32(4), 2288-2291. DOI:10.1109/20.508623.
3. Elektronické informační zdroje (databáze SCIENCE DIRECT, Scopus, Interscience-Wiley apod.).

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Uvedená práce poskytuje v první části ucelený náhled do oblasti supravodivosti a v druhé části popisuje klíčové kroky při realizaci laboratorního demonstrátoru supravodivého jevu v podobě levitujícího vláčku. Cílem první části je seznámení s problematikou supravodivosti z pohledu fyzikálního, materiálního a technologického. Vzhledem k rozsáhlosti je kapitola o materiálech věnována pouze komerčně využívaným supravodičům. V poslední kapitole o supravodivých technologiích jsou shrnuty nejperspektivnější možnosti aplikace supravodivosti s důrazem na klady a zápory v oblasti energetiky.

## **Klíčová slova**

Supravodivost, kritické parametry, termojaderná fúze, akumulace, magnetismus.

## **Abstract**

This work provides a comprehensive overview of superconductivity in the first part, whereas the second part describes the key steps during the realization of a laboratory demonstrator of a superconducting phenomenon in the form of levitating train. The main goal of the first part is to get familiar with the issue of superconductivity from a physical, material, and technological point of view. Due to its large extent, the part dealing with materials focuses only on commercially used superconductors. The last part on superconducting technologies summarizes the most promising electric power applications of superconductivity, emphasizing advantages and disadvantages.

## **Key words**

Superconductivity, critical parameters, thermonuclear fusion, energy storage, magnetism.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Radkovi Polanskému za cenné profesionální rady v prvních i koncových krocích originálního projektu, který se v konečné podobě rozrostl do reprezentativní podoby. Dále bych rád poděkoval i všem ostatním, kteří se s nemalým nadšením na tomto projektu podíleli a velkou měrou se zasloužili o jeho úspěšné dokončení.

**Obsah**

<b>OBSAH</b>	<b>vii</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>viii</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>1 SUPRAVODIVOST A JEJÍ PROJEVY</b>	<b>2</b>
1.1 <i>Silná supravodivost</i> .....	3
1.2 <i>Slabá supravodivost</i> .....	7
<b>2 OBLAST SUPRAVODIVÝCH MATERIÁLŮ</b>	<b>8</b>
2.1 <i>Čisté kovy a nekovy</i> .....	9
2.2 <i>Sloučeniny a slitiny kovů</i> .....	10
2.3 <i>Vysokoteplotní supravodiče</i> .....	12
<b>3 TECHNOLOGIE NA BÁZI SUPRAVODIVOSTI</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Termojaderná fúzní zařízení s magnetickým udržením</i> .....	16
3.2 <i>Elektrické stroje</i> .....	21
3.3 <i>Přenos elektrické energie</i> .....	24
3.4 <i>Akumulace elektrické energie</i> .....	26
<b>4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI</b>	<b>28</b>
<b>5 REALIZACE DEMONSTRÁTORU SUPRAVODIVÉHO JEVU</b>	<b>29</b>
5.1 <i>Návrh magnetické dráhy</i> .....	30
5.2 <i>Návrh nádoby na tekutý dusík a dva YBCO supravodiče</i> .....	36
5.3 <i>Návrh nosné platformy</i> .....	37
<b>6 SHRUTÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI</b>	<b>38</b>
<b>POUŽITÁ A DOPORUČENÁ LITERATURA</b>	<b>40</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	<b>45</b>

## Seznam zkratk a symbolů

1G HTS	1. generace vysokoteplotních supravodičů (HTS-Bi)
2G HTS	2. generace vysokoteplotních supravodičů (REBCO)
APC	Metoda zpracování LTS do podoby kompozitních vodičů (Artificial Pinning Center)
BCS teorie	Teorie nízkoteplotních supravodičů vytvořená Johnem Bardeenem, Leonem Cooperem a Johnem Robertem Schriefferem
DEMO	Demonstrační elektrárna využívající termojadernou fúzní reakci
FESS	Levitující setrvačníky (Flywheel Energy Storage System)
HTS	Vysokoteplotní supravodiče/supravodivost (High-Temperature Superconductivity)
ITER	Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor (International Thermonuclear Experimental Reactor), iter latinsky cesta
LHC	Velký hadronový urychlovač na hranici Francie a Švýcarska poblíž Ženevy (Large Hadron Collider)
LTS	Nízkoteplotní supravodiče/supravodivost (Low-Temperature Superconductivity)
MRI	Magnetická rezonance (Magnetic Resonance Imaging)
PIT	Metoda zpracování LTS do podoby kompozitních vodičů (Powder In Tube)
S <sup>I</sup>	Supravodiče/supravodivost I. typu (též měkké supravodiče)
S <sup>II</sup>	Supravodiče/supravodivost II. typu (též tvrdé supravodiče)
SS	Synchronní stroje
SMES	Akumulace elektrické energie do supravodivých cívek (Superconducting Magnetic Energy Storage)
SQUID	Supravodivé kvantové interferenční zařízení (Superconducting QUantum Interference Device)
YBCO	2G HTS (YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub> )



## Úvod

Supravodivost, tj. skoková ztráta elektrického odporu v celém objemu materiálu, se od počátku svého objevení velice rychle stala oblastí velkého očekávání a optimismu, a to ať už v oblasti zdokonalování dosavadních a vývoji zcela nových technologií, či v oblasti nového směru teoretické fyziky, tzv. kvantové fyziky, díky které opět došlo k rozvoji nových technologií – kvantové počítače, tunelové diody aj. V průběhu času se ovšem ukázalo, že vše má své ale a ani zde se nejedná o výjimku. Podstatnými negativy v oblasti supravodivých technologií jsou kritické parametry supravodičů, které určují hranice provozních podmínek (kritická teplota, magnetické pole a proudová hustota), technologie zpracování vysokoteplotních supravodičů do požadovaných tvarů s odpovídajícími mechanickými vlastnostmi a jiné více specifické nedostatky (technologie výroby hybridních polovodič-supravodivých součástek aj.).

Jednalo se ovšem o tak markantní fenomén, že navzdory prvotním velkým neúspěchům, které byly z velké části zastíněny objevením vysokoteplotních supravodičů v roce 1986, se tématika supravodivosti dostala do popředí a nyní se objevuje v mnoha velkých projektech, které bezesporu ovlivní budoucnost lidské společnosti. Řeč je o supravodivých magnetech pro termojaderné fúzní reaktory s magnetickým udržením, které v budoucnosti slibují komerční využití a řešení mnoha nejaktuálnějších problémů (zvyšující se spotřeba elektrické energie, nutnost přechodu na bezemisní zdroj energie aj.), dále pak velké částicové urychlovače, které jsou mimo jiné schopné vytvářet látku, která zde existovala krátce po vzniku vesmíru. Se supravodivostí se tedy setkáme všude tam, kde použití obyčejných elektromagnetů (na bázi mědi a dalších, odpor vykazujících, materiálů), magnetů permanentních, nebo obyčejných ztrátových vodičů je buď velice ošemetné, či naprosto nerealizovatelné. Zcela obecně je rozvoj technologií fungujících na principu kvantově koherentních (makroskopicky se projevujících) jevů zcela jistý, avšak nesmíme chybně předpokládat, že zcela nahradí dosavadní technologie (příkladem může být soužití počítačů obyčejných a kvantových, nebo elektromagnetů ztrátových a supravodivých).

Existuje tedy znatelná převaha argumentů, proč se supravodivými materiály a obecně kvantovými jevy zabývat a proč budou v budoucnosti dozajista součástí jak největších projektů v oblasti energetiky, na mnoha místech i dopravy, tak v projektech menších v dalších oblastech, ale ne méně důležitých, jako je elektronika, medicína a jiné.

# 1 Supravodivost a její projevy

Supravodivá „horečka“ se projevila hned ve dvou vlnách. První v roce jejího objevení holandským fyzikem Heikem Kamerlinghem Onnesem (rok 1911) u rtuti při 4,15 K a druhá po objevení supravodivých vlastností u keramiky na bázi mědi výzkumníky z IBM (Karl Alexander Müller a Johannes Georg Bednorz) v roce 1986. Pouze rok na to americký vědec čínského původu Paul Ching Wu Chu objevil supravodivou keramiku ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ ), která vykazovala ztrátu odporu v celém svém objemu při teplotě 94 K, a nevyžadovala tedy nákladné a technologicky náročné chlazení kapalným heliem. Aplikace supravodivé keramiky se stala znatelně méně nákladnou záležitostí, jelikož chlazení dusíkem není tolik technologicky náročné (bod varu  $\text{N}_2$  je 77,4 K, 78% zastoupení v atmosféře, větší chladicí výkon) [1 - 3].

V oblasti supravodivých materiálů se obvykle setkáme s několika označeními, která mohou být matoucí a je tedy nutné je objasnit [1]:

- *supravodiče/supravodivost I. typu* (též měkké supravodiče, dále jen  $S^I$ ) jsou materiály vykazující ideální diamagnetismus (Meissnerův-Ochsenfeldův jev), tj. úplné vytlačování magnetického pole z objemu  $S^I$ . Další vlastností jsou nízké hodnoty kritických parametrů, tj.  $T_c$ ,  $B_c$ ,  $J_c$  ( $T_c$  do cca 5 K,  $B_c \sim 10$  mT),
- *supravodiče/supravodivost II. typu* (též tvrdé supravodiče, dále jen  $S^{II}$ ) jsou materiály vykazující ideální diamagnetismus pouze do kritické hodnoty magnetického pole  $B_{c1}$ . V intervalu  $B_{c1}$  až  $B_{c2}$  jsou  $S^{II}$  v tzv. smíšeném stavu, kde vykazují slabší diamagnetismus, viz dále. Další vlastností jsou vysoké hodnoty kritických parametrů ( $T_c$  až do 135 K,  $B_{c2} \sim 10$  T),
- *nízkoteplotní supravodiče/supravodivost* (dále jen LTS) je pojem, který nejčastěji označuje supravodiče s kritickou teplotou pod 77,4 K, tj. bodem varu dusíku, které je nutné chladit kapalným, či plynným heliem. LTS obsahují všechny  $S^I$  a některé  $S^{II}$ ,
- *vysokoteplotní supravodiče/supravodivost* (dále jen HTS) s kritickou teplotou nad 77,4 K, tj. chlazené dostupnějším dusíkem a obecně technologicky jednoduššími systémy. HTS obsahují pouze  $S^{II}$ .

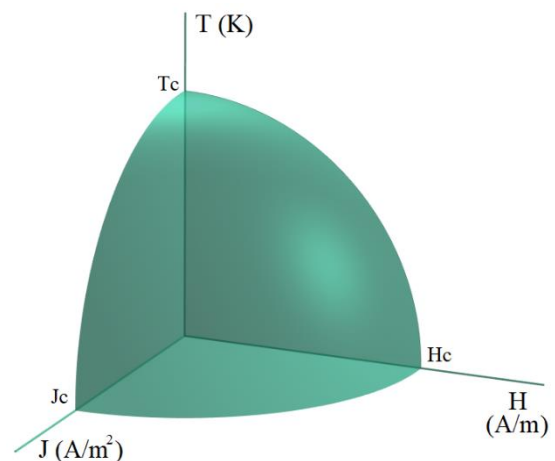
Uvedená teplotní hranice mezi LTS a HTS je často nedodržována, jelikož pojem HTS je mimo jiné spojován s keramikou na bázi mědi, která představuje první skupinu materiálů s  $T_c$  nad 77,4 K. Další rozdělení představuje supravodiče, na které lze aplikovat teorii

Johna Bardeena, Leona Coopera, Johna Roberta Schriefferera z roku 1957, tzv. BCS teorii, a supravodiče jež zatím svou vlastní plnohodnotnou teorii nemají (vysokoteplotní supravodiče). Dle BCS teorie je maximální kritická teplota okolo 23,2 K [1], tj. nad uvedenou teplotou by supravodivost v rámci BCS teorie neměla existovat. Kuriozitou jsou také nové supravodiče typu 1.5 (kombinace vlastností  $S^I$  a  $S^{II}$ ) [4], supravodiče při pokojové teplotě, ale za extrémně vysokých tlaků, supravodiče nestabilní a seznam dále pokračuje.

## 1.1 Silná supravodivost

Pro začátek se budeme věnovat tomu, co to pojem supravodivost znamená a ve zkratce si shrneme nejzákladnější projevy  $S^I$  a  $S^{II}$ , které je možné využít pro vývoj nových technologií. Pro hlubší nahlédnutí do problematiky a její historie odkazují na [1 - 3].

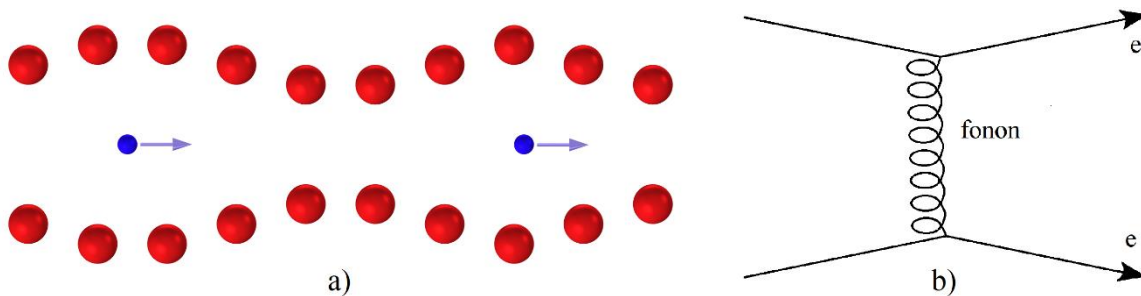
Nejdůležitější vlastností všech supravodičů je **skoková ztráta elektrického odporu** čili teoreticky nekonečná vodivost při zchlazení pod kritickou teplotu  $T_c$ . Aby supravodič zůstal v supravodivém stavu, je dále nutné nepřekračovat kritickou hodnotu magnetického pole  $B_c$  (též  $H_c$ ) a kritickou hodnotu proudové hustoty  $J_c$ . Kritické parametry jsou charakteristické pro každý supravodič zvlášť a při jejich překročení může dojít buď k lokální, či úplné ztrátě supravodivých vlastností. Na *obr. 1* je ilustrativně znázorněna závislost kritických parametrů mezi sebou navzájem, tzv. kritická plocha supravodiče. Obecně platí, že kritické parametry  $S^I$  jsou nižší než u  $S^{II}$ . Často se proto setkáme s označením **měkké supravodiče** pro  $S^I$  a **tvrdé supravodiče** pro  $S^{II}$  [1].



Obr. 1: Kritická plocha supravodičů  
(obrázek autora).

Podle zmíněné **BCS teorie** je supravodivost kvantově koherentním projevem částic (elektronů a fononů) s velice nízkou tepelnou energií. Podobně jako je supratekutost helia novou fází obyčejné tekutiny, tak supravodivost lze brát jako novou fází látky, kde se elektronový plyn chová velice podobně jako supratekuté médium. Analogie se téměř překryjí po srovnání dvou experimentů, kde v prvním supratekutá fáze helia krouží v toroidní nádobě s nulovým třením a ve druhém supravodivá fáze elektronů krouží v supravodivé uzavřené smyčce s nulovým odporem. Tímto způsobem byla měřena rezistivita během supravodivosti: vzorek byl ve tvaru smyčky procházen proudem a chlazen kapalným héliem po dobu dva a půl roku. Experiment skončil, když asistent zapomněl dolít do chladicího systému helium, a vzorek

přešel do normálního nesupravodivého stavu. Bylo odhadnuto, že se rezistivita použitého supravodiče pohybovala okolo  $10^{-25} \Omega\text{m}$  [1] (rezistivita mědi  $1,78 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ). Je důležité také připomenout, že ať už se jedná o jakýkoli supravodič, tak ztráta odporu je vždy skoková (fázový přechod II. druhu) a výsledný stav je u každého supravodiče v podstatě nerozlišitelný, což nasvědčuje o projevu nové interakce, která byla nad teplotami  $T_c$  zastíněna [1].



Obr. 2: Znázornění a) interakce Cooperových elektronových párů s kovovou mřížkou, b) Feynmanův diagram elektron-fononové interakce (obrázek autora).

Na obr. 2 je znázorněno totéž dvěma různými způsoby. Obr. 2 a) znázorňuje zjednodušený pohled na interakci „tuhé“ kovové mřížky a elektronů za vzniku tzv. Cooperových elektronových párů. Jedná se o provázání jednoho elektronu skrz polarizaci kladné málo pohyblivé iontové mřížky (fononu) s elektronem druhým. Takzvané zvukové oscilace iontové mřížky jsou tedy zodpovědné za párování elektronů, které by se za vyšších teplot (vyšších než  $T_c$ ) projevovaly vzájemným Coulombovým odpuzováním [1]. V případě prvotního vnějšího silového impulzu (napěťový impulz) na podkriticky zchlazený supravodič se elektronové páry, spolu s fononovými kvazičásticemi iontové mřížky, dají do pohybu a v tomto „elegantním“ pohybu pokračují teoreticky po nekonečně dlouhou dobu. Když si odmyslíme složité elektron-fononové interakce, vše připomíná první Newtonův zákon o setrvačném pohybu tělesa. Z uvedeného výkladu je patrné, že vše bude fungovat, dokud bude proud stejnosměrný.

**Ztráty v supravodiči** se začnou projevovat, umístíme-li supravodič, protékaný nejprve stejnosměrným proudem, do vnějšího magnetického pole s nenulovým  $dB/dt$ . Na povrchu se začnou indukovat střídavé vířivé proudy, které nedovolí vnějšímu poli vniknout dovnitř supravodiče, viz dále o  $S^I$ . V případě  $S^{II}$  může střídavé magnetické pole vnikat do supravodivé oblasti a vytvářet zde nesupravodivá magnetická vlákna, viz dále o  $S^{II}$ . V případě střídavého magnetického pole se mohou nesupravodivá vlákna pohybovat v objemu  $S^{II}$ , což je samo o sobě spojeno s vývinem tepelných ztrát a vznikem vířivých proudů v těchto nesupravodivých oblastech, které dále přispívají ke ztrátám. Dalším přispěvatelem ke ztrátám jsou ztráty hysterezní, které jsou úměrné ploše hysterezní smyčky vznikající při každé periodě ve všech nesupravodivých oblastech, tj. v oblasti stínících povrchových proudů (hloubka vniku magnetického pole) a oblasti nesupravodivých magnetických vláken. Ztráty charakteristické pro kompozitní supravodiče (supravodivá vlákna v nesupravodivé kovové matici) vznikají

indukováním proudů do nesupravodivé matrice, kde vznikají tepelné ztráty, ohrožující provoz supravodivé složky [5], [6].

Podobně supravodič, který je protékán střídavým proudem v nulovém magnetickém poli, bude generovat své vlastní nenulové  $dB/dt$ , které bude opět generovat vířivé proudy, pohyb nesupravodivých oblastí a hysterezní ztráty. Skutečná situace je poté kombinace obou krajních případů a je jednou z řešených problematik v oblasti aplikace supravodivosti, např. přenos elektrické energie a elektrické stroje na bázi supravodivosti [5], [6].

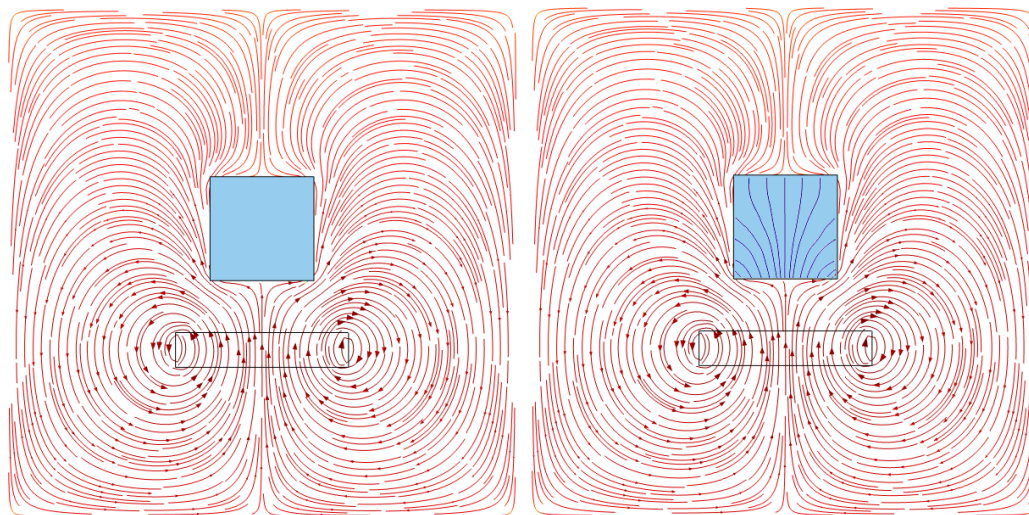
**Redukce hysterezních ztrát** a pohybu nesupravodivých oblastí v objemu se provádí rozdělením supravodiče na tenká vlákna, která jsou následovně uložena do nesupravodivé kovové matrice (nejčastěji měď a stříbro, které mají mimo jiné výbornou tepelnou vodivost). Často se supravodivá vlákna, uložena do měděných plášťů, dále stáčí. Zamezení ztrát způsobených pohybem nesupravodivých magnetických vláken je dále možné dosahovat záměrným zaváděním poruch do mřížky supravodiče (cizí atomy, dislokace atd.), které tvoří záchytné body pro tyto oblasti. V praxi se nejčastěji setkáme právě s aplikací  $S^{\text{II}}$ , a to z důvodu zmíněných vyšších hodnot kritických parametrů (AC/DC kabely, transformátory, generátory a motory). Podrobně se ztrátami v  $S^{\text{II}}$  zabývá [5], [6].

## Supravodiče I. typu

Pro intuitivní náhled do LTS (všechny  $S^{\text{I}}$  jsou zároveň i LTS) není na škodu se nejprve krátce zmínit o fyzice nízkých teplot, která v několika ohledech připomíná cestu na dno Mariánského příkopu, kde každý tvor vynakládá ke svému pohybu minimum energie, potřebné pouze ke svému přežití. I v případě stálého snižování teploty částic, klesá vliv chaotického tepelného pohybu a začínají se projevovat i ty nejjemnější interakce a vše se začíná projevovat až elegantním způsobem (entropie systému klesá). Projevy takto „elegantně“ uskupěného souboru částic jsou pozorovatelné pouhým okem (supratekutost, supravodivost aj.). Podle třetího zákona termodynamiky je ovšem absolutní nula kelvinu nedosažitelná, a tak i v uměle dosažené rekordně nízké teplotě 450 pK [7] existuje stále „život“ a částice se nepřestávají mihotat. Další podobností s dosahováním dna oceánských příkopů je technologická náročnost ochlazování látky na rekordně nízké teploty.

Základním projevem  $S^{\text{I}}$  je **ideální diamagnetismus**, viz *obr. 3 vlevo a 4 a*), který je také po svých objevitelích označován jako Meissnerův-Ochsenfeldův jev. Diamagnetismus je projevem každé látky vypuzovat do jisté míry vnější magnetické pole. Nachází-li se  $S^{\text{I}}$ , během procesu chlazení pod teplotu  $T_c$ , v blízkosti vnějšího magnetického pole, které je menší než  $B_c$ , dochází k indukování vířivých proudů na povrchu  $S^{\text{I}}$ , které bez vykazování odporu generují

magnetické pole stejně velké, ale opačného směru, tzn. magnetické pole je uvnitř  $S^I$  nulové (až na tzv. hloubku vniku magnetického pole do  $S^I$ ), a supravodič je tak odpuzován. Stejný výsledek bychom dostali, kdyby byl  $S^I$  před kontaktem s vnějším magnetickým polem již zchlazen pod  $T_c$ , tj. ideální diamagnetismus u  $S^I$  závisí pouze na hodnotách okolního pole a teplotě  $S^I$  [1].

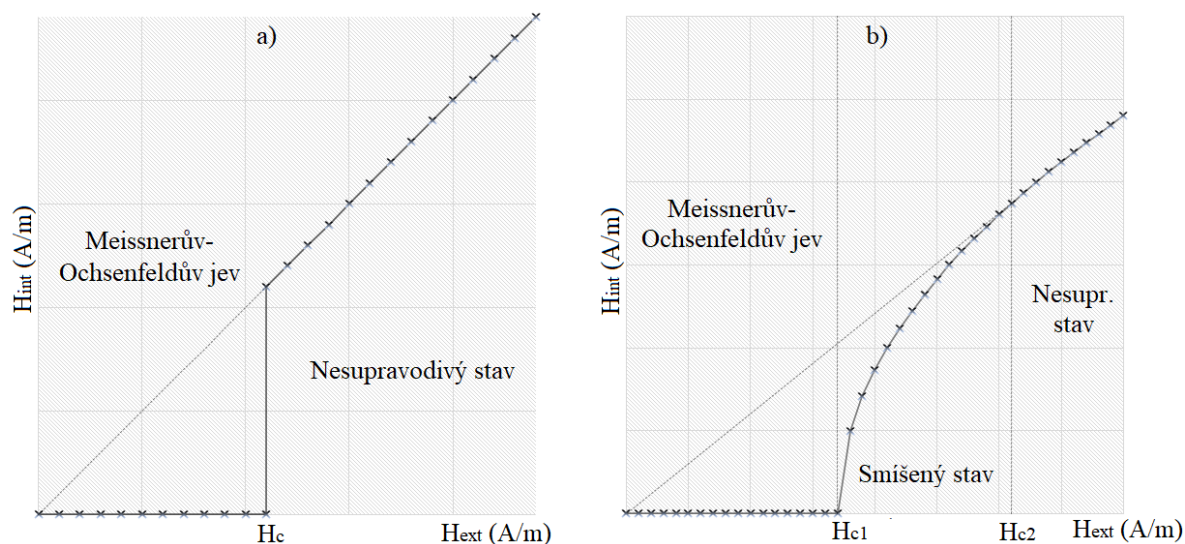


Obr. 3: Ilustrativní vyobrazení ideálního diamagnetismu  $S^I$  (vlevo) a smíšeného stavu  $S^{II}$  (vpravo) (obrázek autora).

Jev, který je označován jako **anti-Meissnerův-Ochsenfeldův**, se projevuje při rovnoměrném zchlazení  $S^I$  v přítomnosti magnetického pole. Jelikož je do supravodivého stavu uveden nejprve povrch  $S^I$ , je magnetické pole v objemu  $S^I$  uvězněno. Stlačováním magnetického pole uvězněného uvnitř  $S^I$ , rozšiřováním supravodivé oblasti směrem dovnitř  $S^I$ , dojde po určité době k dosažení kritické hodnoty  $B_c$ , a pole unikne z  $S^I$  ven [8].

## Supravodiče II. typu

Jak již bylo zmíněno,  $S^{II}$  se od  $S^I$  odlišují především vyššími hodnotami kritických parametrů, což je důvodem jejich častějšího využití. Další odlišností je interval hodnot magnetického pole  $B_{c1}$  až  $B_{c2}$  ( $H_{c1}$  až  $H_{c2}$ ), kde je  $S^{II}$  v tzv. **smíšeném stavu**, viz obr. 4 b). Pod hodnotou  $B_{c1}$  je  $S^{II}$  ideálním diamagnetikem stejně jako  $S^I$ , ale nad hodnotou  $B_{c1}$  dochází v objemu  $S^{II}$  ke vzniku nesupravodivých magnetických vláken, viz obr. 3 vpravo. Kolem vláken krouží vířivé proudy při  $R \rightarrow 0$  a v případě překročení hodnoty  $B_{c2}$  se nesupravodivé oblasti rozšíří do celého objemu a materiál přejde do normálního nesupravodivého stavu (quench supravodiče) [1]. Smíšeného stavu využívá i model levitujícího vláčku (viz dále) obsahující dva  $S^{II}$ , a to ke své stabilizaci. V případě vychýlení  $S^{II}$  z původní polohy (ve které byl v magnetickém poli zchlazen pod  $T_c$ ), se supravodič vrátí do původní polohy jako do jamky, a to kvůli zmíněnému magnetickému „otisku“ ve své struktuře.  $S^{II}$  má proto jediný stupeň volnosti, a to podél vnějšího homogenního magnetického pole.



Obr. 4: Závislost magnetického pole v supravodiči  $H_{int}$  na vnějším magnetickém poli  $H_{ext}$  pro a)  $S^I$  a pro b)  $S^{II}$  (obrázek autora).

## 1.2 Slabá supravodivost

Výše uvedený výklad se zabýval tzv. **silnou supravodivostí**, tj. samotnými supravodiči. **Slabá supravodivost** je problematika přechodů S-I-S, tj. supravodič-izolant-supravodič. Jev, který vzniká v místě přechodu (v izolantu), se nazývá Josephsonův a hraje důležitou roli ve velmi citlivých detekčních a diagnostických zařízeních (SQUID – Superconducting QUantum Interference Device) [1].

Samotný supravodič je charakteristický existencí Cooperových párů, které se chovají podle Boseho-Einsteinovy statistiky. Ve výsledku je možné chování Cooperových párů v supravodiči popsat jedinou vlnovou funkcí, která má mimo jiné i svou vlastní fázi  $\theta_I$ . V případě topologie S-I-S dochází v oblasti izolantu k interferenci vlnových funkcí obou supravodičů, které mají za určitých podmínek rozdílné fáze ( $\theta_1 \neq \theta_2$ ). Vztahy, které určují chování Josephsonova přechodu jsou

$$\theta_J = \theta_1 - \theta_2, \quad (1)$$

$$I = I_c \sin \theta_J, \quad (2)$$

$$U = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\theta_J}{dt}. \quad (3)$$

Vztah (2) znázorňuje závislost velikosti stejnosměrného proudu  $I$  Cooperových párů přes izolační bariéru při  $U = 0$  (proud je tunelového charakteru) z prvního supravodiče do druhého, tj. při  $\theta_J = konst.$  ( $I_c$  je kritická hodnota proudu). Situace se označuje jako **stejnosemřný Josephsonův jev**. Je-li na přechodu stejnosměrné napětí  $U$ , tak podle (3) dostáváme

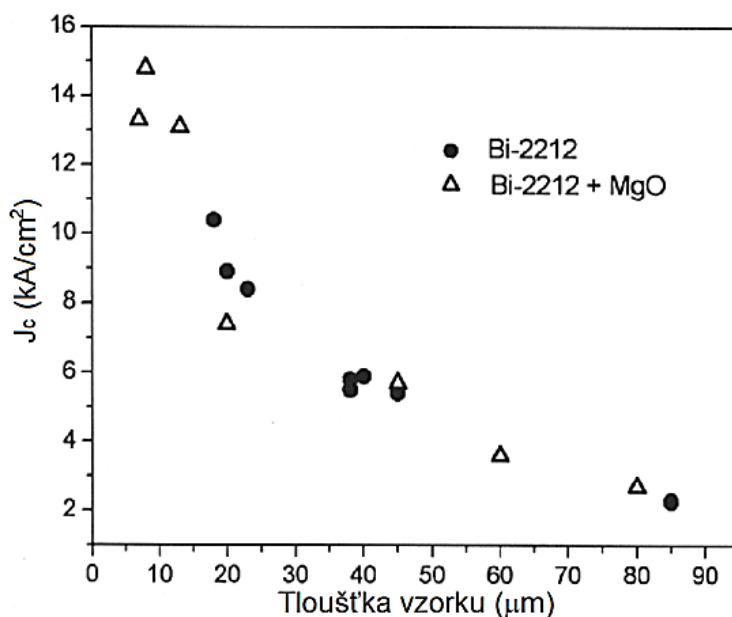
$$f = \frac{2eU}{h}, \quad (4)$$



což odpovídá frekvenci Cooperových párů tunelujících mezi supravodiči, tj. střídavému proudu  $I$  ( $h$  – Planckova konstanta,  $e$  – elementární náboj). Nyní se jedná o tzv. **střídavý Josephsonův jev**, který funguje jako převodník napětí na frekvenci proudu tekoucího přes Josephsonův přechod [1].

## 2 Oblast supravodivých materiálů

Supravodivé materiály jsou tak rozsáhlou a proměnlivou oblastí, že se o ní píše celé knihy, ve kterých se obvykle jednotlivé údaje o kritických parametrech a aplikovaných tlacích velice liší, a to z důvodu silné závislosti kritických parametrů na způsobu zpracování, výsledné geometrii a složení konkrétního testovaného vzorku, viz *obr. 5*. Často se stává, že prvek, který je někde považován za nesupravodivý, je v novější literatuře charakterizován jako supravodivý, ovšem za velmi vysokých tlaků, či v podobě tenkého filmu. Velice důležitým faktorem je také závislost kritických parametrů mezi sebou navzájem, která je typická pro každý supravodič a která hraje významnou roli u HTS, kde je rezerva v tepelném rozsahu nezanedbatelná ( $0 \div 135$  K), viz *obr. 10*. Zahrnout proto do jedné kapitoly celou oblast supravodivých materiálů by bylo nad rámec této práce a po pár letech by kapitola skončila podobně jako všechny ostatní, které se o to pokusily. Z tohoto důvodu dále uvádím pouze stručný náhled do některých vybraných skupin supravodičů a spíše se budeme věnovat konkrétním materiálům, které se již využívají v technické sféře, viz milníky perspektivních supravodivých materiálů na *obr. 12*. Pro podrobnější náhled do problematiky supravodivých materiálů doporučuji [11 - 15].



Obr. 5: Závislost kritické proudové hustoty  $J_c$  na tloušťce supravodivé pásky z Bi-2212 a Bi-2212 dopovaný MgO (převzato z [9]).



## 2.1 Čisté kovy a nekovy

Prvním objeveným supravodivým materiálem byla rtuť a za ní následovalo mnoho dalších čistých prvků, které patřily do skupiny kovů a přechodných kovů. Všechny tyto prvky, až na Nb, Tc a V, vykazují  $S^I$ , a proto nejsou z pohledu vývoje nových silnoproudých technologií ve formě čistých prvků na bázi supravodivosti příliš zajímavé. Později se ukázalo, že supravodivost vykazují při vysokých tlacích všechny polokovy a některé nekovové prvky. Periodická tabulka prvků na *obr. 6* zobrazuje prvky vykazující supravodivost za atmosférického tlaku (modře) a za vysokých tlaků (červeně,  $T_c \sim 1$  K,  $p \sim 10$  GPa). Existuje možnost, že počet červeně označených prvků bude více (např. hypotetická supravodivost u kovové fáze vodíku za extrémně vysokých tlaků). Z uvedeného obrázku je dále patrné, že některé běžně používané vodivé materiály supravodivost nevykazují za žádných teplot ani při dnes dosahovaných tlacích (zlato, stříbro, měď) a naopak kovy se znatelně vyšším měrným elektrickým odporem se supravodivostí prokazují. Ze všech kovů se nejlépe projevuje niob s  $T_c = 9,25$  K, který se objevuje ve významných supravodivých slitinách a sloučeninách či v čisté podobě ve formě vodičů v různé elektronice (detekční zařízení, interferometry aj.) [11], [14], [15].

1	H	<b>X</b> $T_c$ (K) $p$ (GPa)										13	B	C *	N	O	F	18	He
2	Li $T_c$ (p)	Be 0.026 K											14	Al 1.18 K	Si $T_c$ (p)	P $T_c$ (p)	S $T_c$ (p)	Cl	Ar
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ga 1.08 K	Ge $T_c$ (p)	As $T_c$ (p)	Se $T_c$ (p)	Br $T_c$ (p)	Kr	
4	K	Ca $T_c$ (p)	Sc $T_c$ (p)	Ti 0.5 K	V 5.4 K	Cr	Mn	Fe $T_c$ (p)	Co	Ni	Cu	Zn 0.85 K	In 3.4 K	Sn 3.72 K	Sb $T_c$ (p)	Te $T_c$ (p)	I $T_c$ (p)	Xe	
5	Rb	Sr $T_c$ (p)	Y $T_c$ (p)	Zr 0.61 K	Nb 9.25 K	Mo 0.92 K	Tc 8.2 K	Ru 0.5 K	Rh 0.0003 K	Pd	Ag	Cd 0.55 K	Tl 2.39 K	Pb 7.2 K	Bi $T_c$ (p)	Po	At	Rn	
6	Cs $T_c$ (p)	Ba $T_c$ (p)	La 5.9 K	Hf 0.13 K	Ta 4.4 K	W 0.01 K	Re 1.7 K	Os 0.65 K	Ir 0.14 K	Pt	Au	Hg 4.15 K	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
6	Ce $T_c$ (p)	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu $T_c$ (p)	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu $T_c$ (p)					
7	Th 1.4 K	Pa 1.4 K	U 0.8 K	Np 0.075 K	Pu	Am 0.8 K	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

\* C - Diamant dopovaný borem

Obr. 6: Seznam supravodivých prvků s hodnotami  $T_c$  (převzato z [11], [14]).

## 2.2 Sloučeniny a slitiny kovů

Mezi první objevené supravodivé sloučeniny a slitiny (1928) po čistých kovech patřily  $\text{SbSn}$ ,  $\text{Sb}_2\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Bi}_5\text{Tl}_3$  a  $\text{Pb-Bi}$ . Následovala dlouhá odmlka, dokud Bernd T. Matthias a John K. Hulm nezačali s výzkumem, který přinesl přibližně 1000 nových supravodivých sloučenin a slitin kovů mezi roky 1950 a 1960 [14]. Mezi dnes nejvyužívanější slitiny a sloučeniny patří  $\text{Nb-Ti}$ ,  $\text{Nb-Ti-Zr}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Al}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Ge}$  a mnoho dalších, viz *tab. 1*. Hlavní výhodou těchto materiálů je projev  $S^{\text{II}}$ , tj. vysoké hodnoty kritických parametrů, a jejich snadné zpracování do podoby vodičů s dobrými mechanickými vlastnostmi. Upřednostňuje se především kompozitní struktura vodičů, a to z důvodu zamezení vzniku střídavých ztrát, které jsou iniciovány především pohybem nesupravodivých oblastí v objemu supravodiče, a ztrát hysteretzních [6].

Technologie výroby kompozitních LTS vodičů lze rozdělit na dva různé přístupy:

- mechanické zpracování supravodivých slitin či sloučenin v měděné matici do požadovaných tvarů a rozměrů, nebo
- mechanické zpracování vstupních ingrediencí daného supravodiče spolu s měděnou maticí do požadovaných rozměrů a následné tepelné zpracování za vzniku supravodivé fáze v nesupravodivé matici.

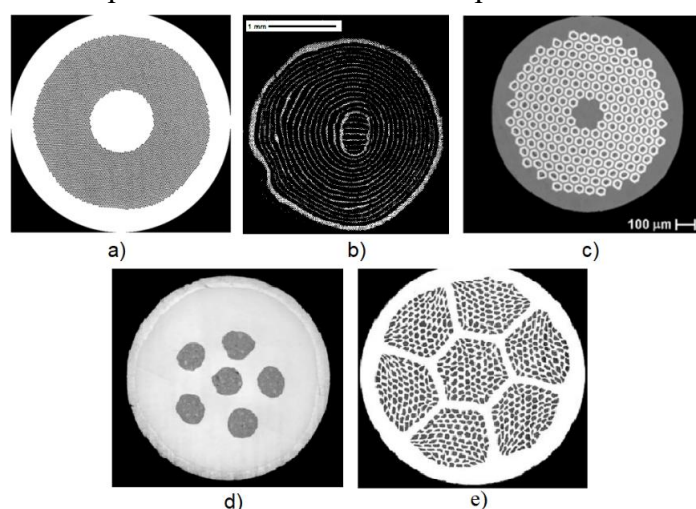
Stále se ovšem jedná o nízkoteplotní supravodiče, a je proto potřeba drahá chladicí technika. LTS se objevují v technologiích, jako jsou cívky termojaderných fúzních zařízení s magnetickým udržením (COMPASS aj.), elektromagnety pro LHC a jiné urychlovače, elektromagnety pro MRI aj.

Tab. 1: Významné slitiny a sloučeniny s přibližnými hodnotami kritických parametrů.

Materiál	$T_c$ (K)	$B_{c2}$ (0 K) (T)	Materiál	$T_c$ (K)	$B_{c2}$ (0 K) (T)
Nb-Ti	9,6 [10]	17 [10]	$\text{Nb}_3\text{Al}$	18,7 [18]	29,5 [18]
Nb-Zr	10 [18]	9 [18]	$\text{Nb}_3\text{Ge}$	23,2 [15]	60 [15]
Nb-Zr-Ti	11 [18]	11 [18]	$\text{V}_3\text{Ga}$	14 [18]	20 [18]
NbO	1,4 [11]	-	$\text{V}_3\text{Si}$	17 [16]	20 [16]
NbN	15 [17]	36 [17]	$\text{MgB}_2$	40 [13]	~ 10 [13]
$\text{Nb}_3\text{Sn}$	17,9 [11]	30 [10]	$\text{La}_3\text{In}$	10,4 [15]	-

Slitina **Nb-Ti** je vyráběna nejčastěji v obloukových pecích tavením ve vakuu. Po odlití je žíhána a tvářena válcováním do konečných polotovarů, tj. drátů nebo tyčí [15]. Do podoby kompozitních vodičů se spolu s nesupravodivou kovovou maticí (nejčastěji měď) dále zpracovávají různými metodami, které zahrnují tažení, protlačování, či válcování, viz *obr. 7 a*). Počet vláken v měděné matici se pohybuje od jednoho s průměrem okolo 0,1 mm až po několik

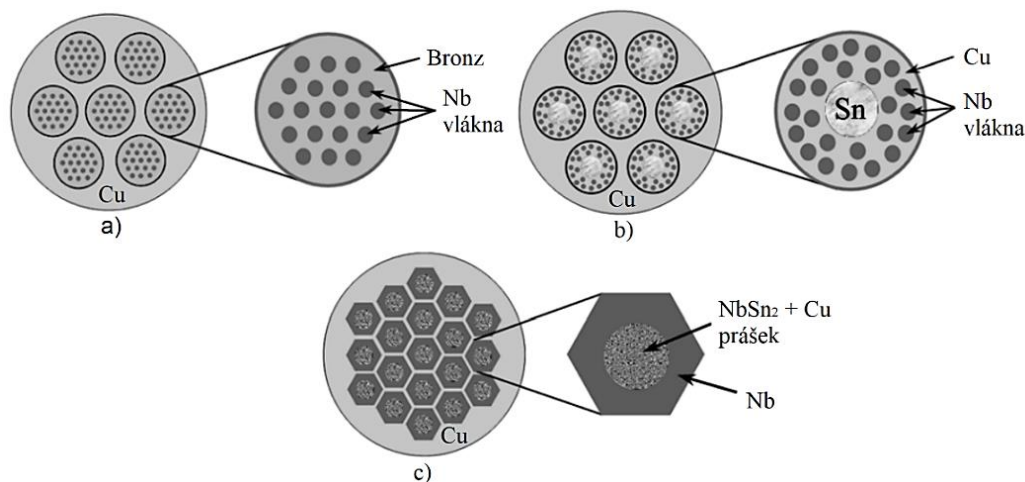
desítek tisíc s průměry  $5 \div 50 \mu\text{m}$ . Další důležitou funkcí měděné matrice je převzetí proudu v případě přechodu LTS do nesupravodivého stavu, jelikož slitina má v nesupravodivém stavu výrazně větší měrný elektrický odpor, než měď. Tato metoda se označuje jako APC (Artificial Pinning Center) a byla vyvinuta již v roce 1985. V anglické literatuře se často setkáme se zkratkou APC i pro jiný přístup, který byl vyvinut v roce 1989 stejnou firmou (Supercon, Inc.). Metoda je založena na vrstvení Nb a Ti do podoby strukturovaných vodičů, uložených do měděných plášťů, následuje tažení, protlačování do požadovaných rozměrů a uložení strukturovaných vláken, viz *obr. 7 b*), do většího měděného válce, který je dále mechanicky zpracován. Posledním krokem je tepelné zpracování za účelem vyvolání difúze v místech styku Nb a Ti. Výsledný produkt je slitina Nb-Ti obklopená zbylým nesupravodivým materiálem, tj. struktura normální vodič/supravodič. Více o metodách zpracování LTS v [13], [15], [20].



Obr. 7: a) struktura kompozitního vodiče s Nb-Ti vlákny a Cu matricí, b) strukturovaný vodič s Nb a Ti vrstvami před difúzním zpracováním, c) PIT kompozit  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , d) kompozitní struktura  $\text{MgB}_2$  vláken v měděné matrici, e) struktura kompozitního vodiče s Bi-2212 vlákny a Ag matricí (*převzato z [13], [20]*).

Intermetalická sloučenina  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  má znatelně vyšší kritické parametry než Nb-Ti. Navzdory své křehkosti a prvotním obtížím v produkci kompozitních vodičů, byly vyvinuty metody, které tyto problémy odstranily a vodiče na bázi  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  jsou využívány například v supravodivých cívkách projektu ITER. Proces bronzování je založen na společném tažení Nb tyčí v matrici ze slitiny Cu-Sn (15% hmotnostní podíl Sn), viz *obr. 8 a*). Následným difúzním žíháním vzniká  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , které má ovšem malý podíl na celkovém průřezu [13]. Lepší rozvržení počátečních komponentů je patrné na *obr. 8 b*), *c*).

Další intermetalickou sloučeninou je  $\text{Nb}_3\text{Al}$ , ze které se kompozitní vodiče vyrábějí podobně jako v případě  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , tj. sub-element z Al tyče obklopený menšími Nb tyčemi uvnitř měděné matrice, následuje tažení sub-elementů, tažení souboru sub-elementů v měděné matrici a konečné tepelné zpracování do formy  $\text{Nb}_3\text{Al}$  kompozitu, viz *obr. 8 b*), nebo metodou PIT (Powder In Tube), která se skládá z tažení kompozitu s práškovým substrátem a konečného tepelného zpracování, viz *obr. 8 c*), [13].

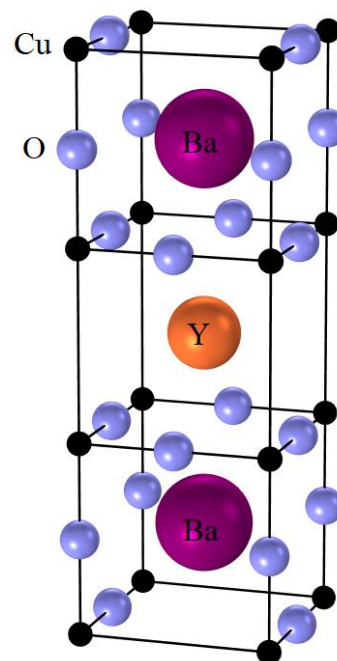


Obr. 8: Kompozitní vodiče Nb<sub>3</sub>Sn: a) bronzování, b) Sn jádro, c) PIT (Powder In Tube) (převzato z [13]).

Sloučenina **MgB<sub>2</sub>** z roku 2001 také vykazuje prominentní kritické parametry ( $T_c = 39$  K,  $B_{c2}$  silně závislá na směru a geometrii:  $10 \div 70$  T [10]) a již se prosazuje jako substituent za starší slitiny a sloučeniny z minulého tisíciletí. Supravodič na bázi MgB<sub>2</sub> lze vyrobit procesem PIT [13], viz obr. 7 d).

### 2.3 Vysokoteplotní supravodiče

Pojem vysokoteplotní supravodiče (HTS) stojí především za keramickými materiály na bázi mědi, které byly objeveny v roce 1986. Kritické parametry HTS jsou vyšší než u předešlých materiálů, a je proto možné je chladit tekutým dusíkem, viz tab. 2. Navzdory náročnosti přípravy HTS vodičů o požadovaných mechanických vlastnostech se s těmito materiály setkáme u silových kabelů pro přenos elektrické energie, motorů, generátorů, synchronních kompenzátorů, omezovačů poruchového proudu, transformátorů, citlivých senzorů, magnetické rezonance aj. Důvodem jejich využití v některých aplikacích je také vysoký rozsah provozních teplot, který umožňuje nastavení kritické hodnoty  $B_{c2}$  podle potřeb (dříve zmíněná závislost kritických parametrů) [2], [13], viz obr. 10.



Obr. 9: Struktura YBCO supravodiče bez typických kyslíkových vakancí (obrázek autora).

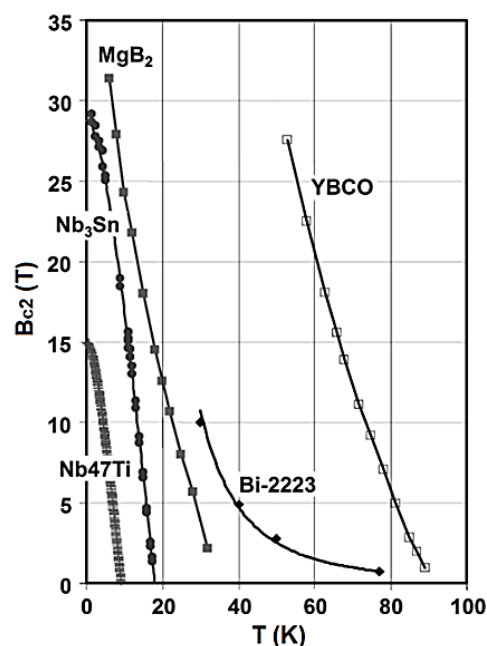
Tab. 2. Seznam perspektivních HTS oxidů na bázi mědi (hodnoty  $T_c$  převzaty z [14]).

Název	$T_{c(max)}$ (K)	Název	$T_{c(max)}$ (K)
<b>REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub></b> RE – Y, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu		<b>Tl<sub>m</sub>Ba<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>2n+m+2</sub></b>	
		Tl-1201	50
		Tl-1212	82
Y-123	92	Tl-1223	133
Nb-123	96	Tl-1234	127
Gd-123	94	Tl-2201	90
Er-123	92	Tl-2212	110
Yb-123	89	Tl-2223	128
<b>(Pb, Bi)<sub>m</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>2n+m+2</sub></b> m = 1, 2; n = 1, 2, 3, ...		Tl-2234	119
		<b>Hg<sub>m</sub>Ba<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>2n+m+2</sub></b>	
Bi-1212	102	Hg-1201	97
Bi-2201	34	Hg-1212	128
Bi-2212	96	Hg-1223	135
Bi-2223	110	Hg-1234	127
Bi-2234	110	Hg-1245	110
Pb-1212	70	Hg-1256	107
Pb-1223	122	Hg-2212	44
<b>Cu<sub>m</sub>Ba<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>2n+m+2</sub></b>		Hg-2223	45
		Hg-2234	114
Cu-1223	60	<b>B<sub>m</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>2n+m+2</sub></b>	
Cu-1234	117		
Cu-2223	67	B-1223	75
Cu-2234	113	B-1234	110
Cu-2245	110	B-1245	85
<b>RuSr<sub>2</sub>GdCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub></b>		<b>Au<sub>m</sub>Ba<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>2n+m+2</sub></b>	
		Ru-1212	72

První skupina HTS je **REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>** (též zkráceně REBCO, či 2G HTS), kde RE představuje prvek vzácného kovu, např. skandium a yttrium. Často se setkáváme s označeným HTS-123 podle poměru vstupních surovin. Struktura je většinou u Y-HTS tetragonální a ortorombická, což má za následek, že hodnota  $B_{c2}$  je závislá na směru k osám  $a$ ,  $b$ ,  $c$  a pohybuje se od jednotek T až přes 100 T [24]. Na obr. 9 je znázorněna krystalická struktura YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>9</sub> s dobře patrnými vrstvami CuO<sub>2</sub>, podél kterých se šíří Cooperovy elektronové páry (projev anizotropie). Kolmo na vrstvy se elektronové páry šířit nemohou, a proto musí být jednotlivá krystalická zrna vzájemně správně orientována. Skutečná struktura ovšem obsahuje kyslíkové vakance na CuO<sub>2</sub> vrstvách, které jsou svým uspořádáním významným faktorem výsledných kritických parametrů (YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>, kde  $x$  se pohybuje od 0,07 do 0,6) [11], [14], [15].

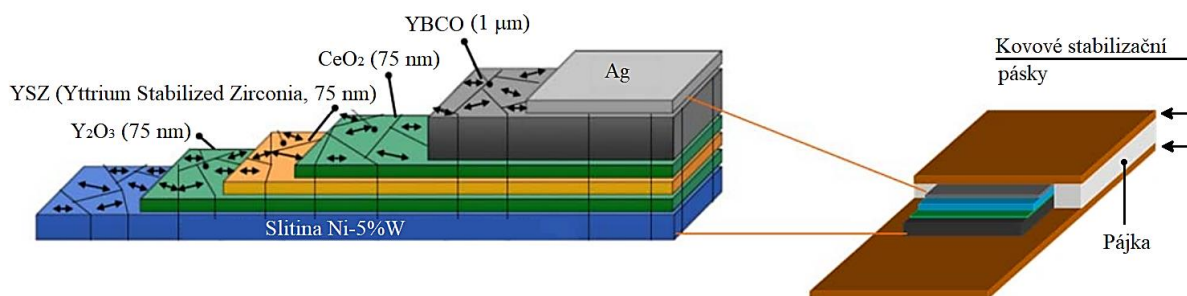
2G HTS se v aktuální době ukazují, jako nejperspektivnější směr rozvoje všech supravodičů pro komerční účely, a to především v oblasti termojaderných fúzních zařízení s magnetickým udržením, kde se nám otevírají možnosti kompaktních zařízení se silnými magnetickými poli.

Příprava HTS YBCO vodičů se skládá z tvorby práškového substrátu a plnění stříbrných trubek, které se dále zpracovávají tažením a válcováním do konečných tvarů, a které plní mimo jiné i ochrannou vrstvu proti vnějšímu prostředí (analogie procesu PIT). Další funkcí stříbrného pláště, v případě ztráty supravodivosti, je vedení zbytkového elektrického proudu po určitou krátkou dobu. Po zpracování do požadovaných tvarů následuje tepelné zpracování, tj. žíhání v oxidační atmosféře (důvod využití inertního stříbra). Pro docílení tvárnosti samotného práškového substrátu se využívá organických materiálů. Po jejich aplikaci je možné substrát protlačovat do drátů o požadovaných tvarech a tloušťkách. Konečným procesem je vypalování organického materiálu a slinování samotného HTS.



Obr. 10: Závislost  $B_{c2}$  na teplotě některých HTS a LTS (převzato z [13]).

Schůdnější přístup, obcházející problémy se vstupním práškovým substrátem a křehkostí výsledného HTS, je příprava tenkých vrstev na vhodných substrátech napařováním, napařováním a dalšími tenkovrstevními metodami. Podstatnou nevýhodou HTS YBCO zůstává náročné zpracování do podoby vodičů, náchylnost na vlhkost, oxid uhličitý a radiaci [11], [15]. Na obr. 11 je zobrazena struktura čtyřvrstvého HTS vodiče druhé generace, který je používán u supravodivých omezovačů poruchového proudu, elektrických strojů a dalších aplikací.

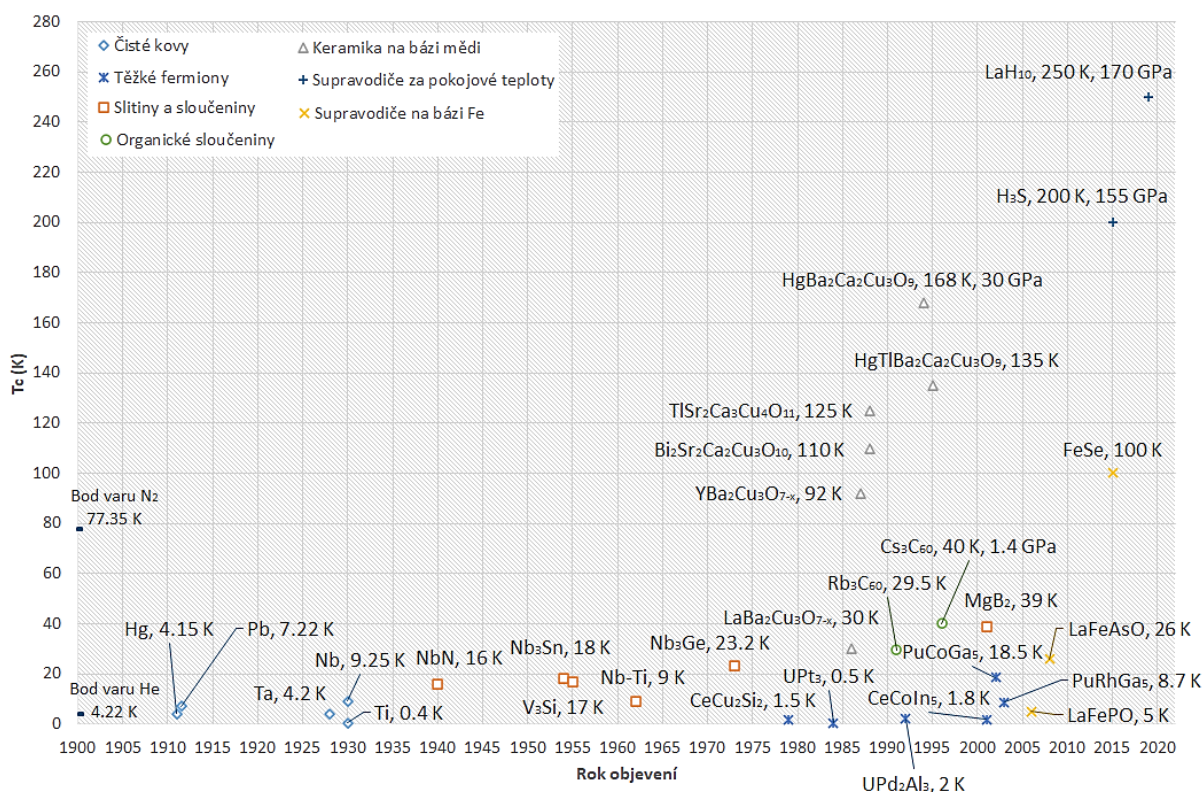


Obr. 11: Struktura 2G HTS na bázi YBCO od společnosti American Superconductor (převzato z [21]).

HTS na bázi Bi a Pb, které představují skupinu materiálů s tvarem  $(\text{Pb/Bi})_m\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+m+2}$  (též 1G HTS), kde Bi lze nahradit Pb, viz tab. 2, se opět zpracovávají do podoby kompozitních vodičů s matricí ze stříbra jako samotné vodiče, tenké pásy, či do podob nanášených tenkých vrstev. Technologie jsou obdobné jako v předchozím případě s tím rozdílem, že výchozí substrát HTS na bázi Bi je lépe zpracovatelný do požadovaných tvarů než YBCO ze skupiny 123 [11], [15].



Keramiky na bázi jiných prvků, jako je bismut, ruthenium, kobalt a další, také vykazují supravodivé vlastnosti, a ztelně tak rozšiřují oblast supravodivých materiálů. Z obr. 12 je patrné, že supravodivost lze očekávat v každém materiálu, který doposud nebyl podroben testům (např.  $\text{H}_3\text{S}$  je za normálního tlaku plyn –  $\text{H}_2\text{S}$  [22]). Otázkou zůstává, které úspěšně testované materiály dosáhnou až na úroveň hromadného technického využití, jako v případě např. Nb-Ti či  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ . Hlubší náhled do oblasti supravodivých materiálů nabízí také [23].



Obr. 12: Milníky některých významných supravodivých materiálů a jejich kritické teploty, popř. aplikované tlaky (hodnoty převzaty z [11 - 15], [19]).

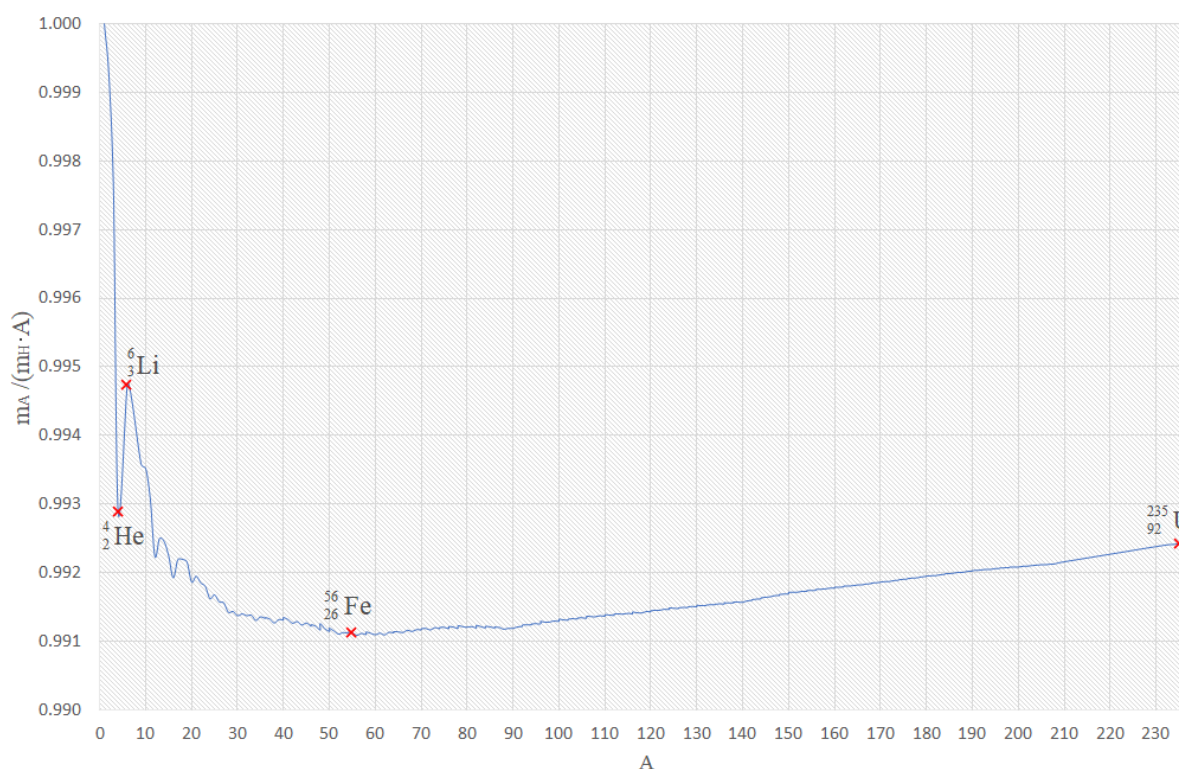
### 3 Technologie na bázi supravodivosti

Objev supravodivosti ztelně přispěl k rozvoji dnes používaných či vyvíjených technologií v oblasti energetiky, elektrotechniky, elektroniky, medicíny aj. Zároveň, nasazování HTS na místo LTS výrazně snižuje náklady za chladicí systémy, a technologie na bázi supravodivosti se tak stává o něco dostupnější, než tomu bylo v minulosti (rozvoj komerčních technologií na bázi HTS).

V oblasti energetiky a elektrotechniky jsou nejrozšířenější tématikou termojaderné fúzní reaktory s magnetickým udržením s cílem využívat HTS, HTS kabelová vedení, elektrické stroje na bázi HTS či lákavá perspektiva nízko ztrátové akumulace energie, viz dále.

### 3.1 Termojaderná fúzní zařízení s magnetickým udržením

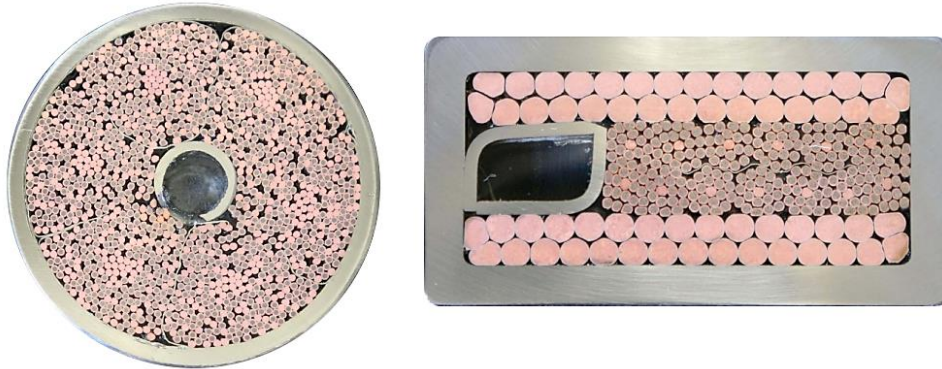
Dva primární problémy z hlediska energetiky jsou: nízká energetická koncentrovanost běžně používaných zdrojů (spalování dřeva 4,4 kWh/kg, spalování černého uhlí 5,9 kWh/kg aj. [25]) a vypouštění emisí do ovzduší. Čelíme globálnímu problému, kdy narůstající potřeby lidské společnosti ovlivňují klima naší planety a nízko koncentrované zdroje nenabízí ustálené řešení. K našemu štěstí jsme v přírodě objevili skrytý „silný proud“, jehož potenciálu můžeme využívat podobně jako proudu v řece. Zmíněný proud, či síla je patrná ze závislosti na *obr. 13*, a sice přirozená tendence všech prvků transmutovat do globálního minima, tj. do podoby  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ . „Proud“ zprava do minima jsme se již používat naučili, tj. štěpení těžkých jader, kde energetická koncentrovanost štěpení jader  $\text{U}^{235}$  činí přibližně 22,81 GWh/kg (jaderné palivo pro elektrárnu Temelín s cca 4,74% obohacením 1,08 GWh/kg [25]), tj. přibližně  $3\,870\,000\times$  vyšší než pro uhlí. „Proud“ zleva do minima nebyl prozatím realizován pro výrobu elektřiny, tzn. aktuálně neexistuje termojaderný fúzní reaktor pro výrobu elektřiny. Energetická koncentrovanost fúzního paliva činí přibližně 24,29 GWh/kg pro reakci deuterium-deuterium a 93,78 GWh/kg pro reakci deuterium-tritium, tj. pro reakci DT přibližně  $15\,890\,000\times$  vyšší než pro spalování černého uhlí [26]. Lze předpokládat, že člověk v horizontu několika desítek let napodobí přírodu v tom největším měřítku vůbec a podrobí si zdaleka nejkoncentrovanější a nejrozšířenější zdroj energie, který známe, tj. termojadernou fúzi lehkých jader.



Obr.13: Míra nestability atomu v závislosti na nukleonovém čísle A, kde  $m_A$  je hmotnost daného jádra a  $m_H$  je hmotnost jednoho protonu (hodnoty hmotností převzaty z [27]).



Aby se tak stalo, je nezbytné se mimo jiné zabývat supravodivými materiály, jelikož fúzní zařízení s magnetickým udržením jsou jedním z největších spotřebitelů LTS pro generování silných magnetických polí, která jako jedny z mála dokážou při vhodné konfiguraci stabilizovat plazma o teplotách v řádu stovek milionů kelvinů. Zmínky o řízené termojaderné fúzi s magnetickým udržením se objevily již v roce 1938 a od té doby vzniklo několik konceptů [28]. My se ovšem omezíme na ty, které mají aktuálně největší potenciál a které využívají LTS či HTS, viz *obr. 14*. Pro podrobnější náhled do problematiky fúze doporučuji [26], [28 - 31].



Obr. 14: Průřez vodiče cívek toroidního pole na bázi Nb<sub>3</sub>Sn pro ITER vlevo a pro DEMO vpravo (patrný je kanálek na chladicí kapalinu) (převzato z [32]).

Podstatnou výhodou termojaderné fúze je zmíněná energetická koncentrovanost paliva, ale také nulový podíl škodlivých emisí ze samotné reakce, zásoby paliva na miliardy a více let (vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru) a bezpečný provoz. K termojaderné fúzi dochází pouze v plazmatu (plně ionizované prostředí), které je charakteristické svou nestabilitou, tzn. při malém rozruchu má tendenci měnit svou celkovou konfiguraci (kolektivní chování). Nestabilní projev plazmatu nás přivádí do oblasti supravodivosti, jelikož metody stabilizace plazmatu jsou:

- *gravitační udržení*, které je pozorované pouze u hvězd,
- *inerciální udržení* založené na řízené explozi malého množství fúzního paliva za pomoci rychlého zahřátí a stlačení výkonnými lasery a
- *magnetické udržení* – generování silných magnetických polí (za pomoci běžných ztrátových materiálů, nebo LTS a HTS), která stabilizují plazma ve vakuové nádobě tak, aby se nedotýkalo stěn [30].

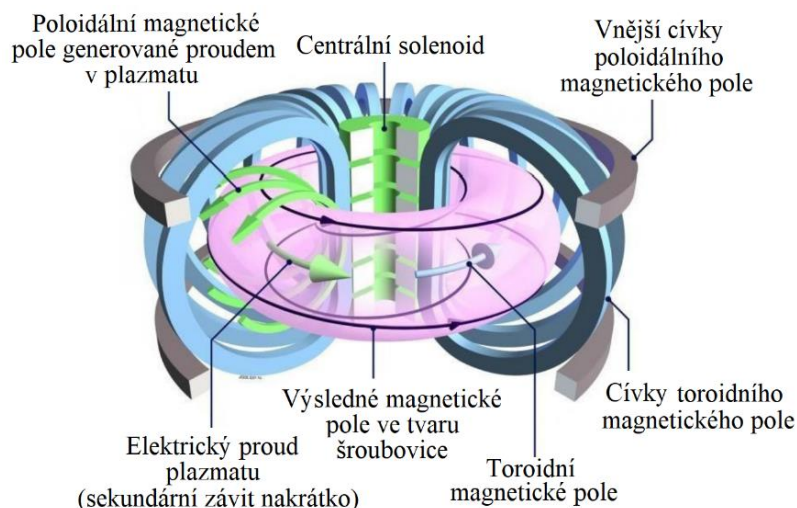
Poslední metoda se ukázala jako nejperspektivnější a dala popud, po několika neúspěších, k vývoji dvou dnes uvažovaných konceptů:

- *reaktor typu tokamak* byl poprvé zkonstruován v roce 1955 a po Mezinárodním sympoziu o udržení plazmatu v roce 1969 v sovětské Dubně se tokamak okamžitě stal

preferovaným konceptem fúzního reaktoru, a to z důvodu efektivního dosahování vysokých teplot plazmatu za pomoci krátkých proudových pulzů [28].

- *Stelarátor*, vyvinutý Lymanem Spitzerem, nevyžaduje proud plazmatem, jako je tomu u tokamaku, jelikož šroubovicové magnetické pole (nejstabilnější konfigurace) je generováno pouze pomocí vnějších cívek. Stelarátory jsou proto schopné nepřetržitého provozu, ovšem za cenu nižších parametrů plazmatu [30].

**Projekt ITER** byl iniciován v roce 1985 na sammitu v Ženevě, a to Ronaldem Reaganem a Michaiilem Gorbačovem a má za cíl prokázat energetické využití fúzní reakce. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, iter latinsky cesta) se realizuje od roku 2007 u francouzského výzkumného střediska Cadarache a podílí se na něm EU, Japonsko, Ruská federace, USA, Čína, Jižní Korea a Indie. Samotné fúzní zařízení je Rusy vyvinutý tokamak (TOroidnaja KAmera s MAgnitnymi Katuškami, tj. toroidní komora s magnetickými cívkami) a plánovaný tepelný výkon činí 500 MW [28], [29].

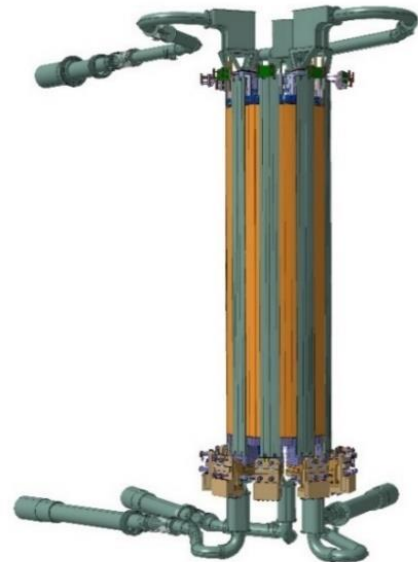


Obr. 15: Systém magnetického udržení fúzního reaktoru typu tokamak (převzato z [29]).

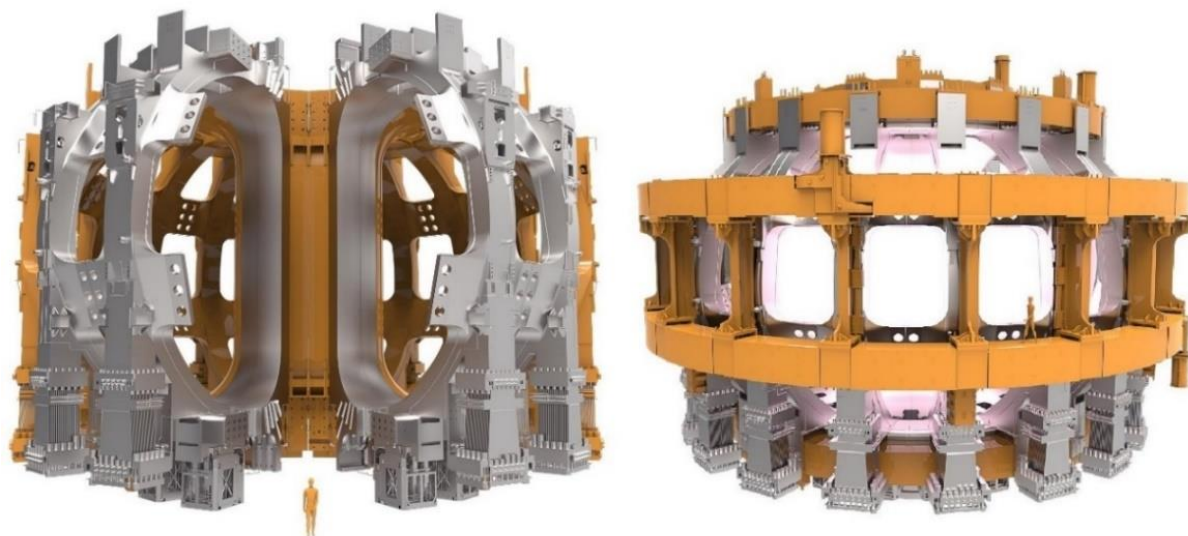
Tokamak ITER se skládá z LTS cívek, které generují toroidní a poloidální magnetické pole, viz *obr. 15*, a které budou chlazené na teplotu cca 4,5 K (chlazení kapalným héliem) [29]. Součet těchto dvou polí dohromady vytvoří pole šroubovicové, které je pro stabilizaci plazmatu neoptimálnější. Tokamak bude vybaven 18 sériově propojenými **cívkami toroidního magnetického pole** ve tvaru D o rozměrech 17 m na výšku, 9 m na šířku a hmotnosti 310 t pro každý segment [31], viz *obr. 17 vlevo*. S plánovaným proudem 68 kA budou generovat pole o hodnotě 11,8 T [29]. Pole poloidální bude generováno proudovými pulzy (délka trvání ~ 1 s), které budou probíhat v samotném plazmatu ve vakuové komoře toroidního tvaru. Proudové pulzy budou mimo jiné schopné plazma ohřívat do teplot cca 50 mil. K [29] (plazma je sekundární závit nakrátko pulzního transformátoru se vzduchovým jádrem) a bude vybuzen pomocí **centrálního solenoidu**, který je 13 m vysoký, má 4 metry na průměr a váží 1000 t [31],

viz obr. 16. Šest **vnějších cívek poloidálního pole** (nejtěžší 400 t a 24 m na průměr [31]) se bude podílet na udržení plazmatu ve středu nádoby, viz obr. 17 vpravo. Kromě zmíněných cívek jsou přítomny **korekční cívky** a **rychlé stabilizační cívky** pro nutnou manipulaci s plazmatem ve vakuové nádobě [29].

**Centrální solenoid**, který představuje primární vinutí pulzního transformátoru se vzduchovým jádrem, a **cívky toroidního pole** budou vyrobeny ze slitiny Nb<sub>3</sub>Sn, viz obr. 14. **Cívky poloidálního pole** a **korekční cívky** budou zhotoveny ze slitiny Nb-Ti. Proudové pulzy v plazmatu, indukované od centrálního solenoidu, budou dosahovat hodnot až 17 MA [29]. Všechny cívky využívají LTS, a jsou proto chlazené na teplotu 4,5 K. Výsledné magnetické pole ve středu nádoby, které bude plazma stabilizovat, bude dosahovat hodnot 5,3 T [32]. Včetně zmíněné helicity je dalším z požadavků tzv. faktor  $\beta$ , který udává poměr tlaku plazmatu k tlaku magnetického pole. S nárůstem tlaku plazmatu stoupá generovaný fúzní výkon, avšak pro stabilizaci plazmatu je nutné udržovat dostatečnou rezervu v tlaku magnetického pole, a proto bude i faktor  $\beta \ll 1$  (jednotky procent) [29]. HTS se budou u reaktoru ITER využívat pouze jako propojky mezi přívodními měděnými kabely a zmíněnými LTS [29]. Budoucí projekt DEMO (DEMOstration power plant) ovšem s HTS cívkami již počítá, jelikož tak dojde ke značnému snížení nákladů na chladicí systém [32].

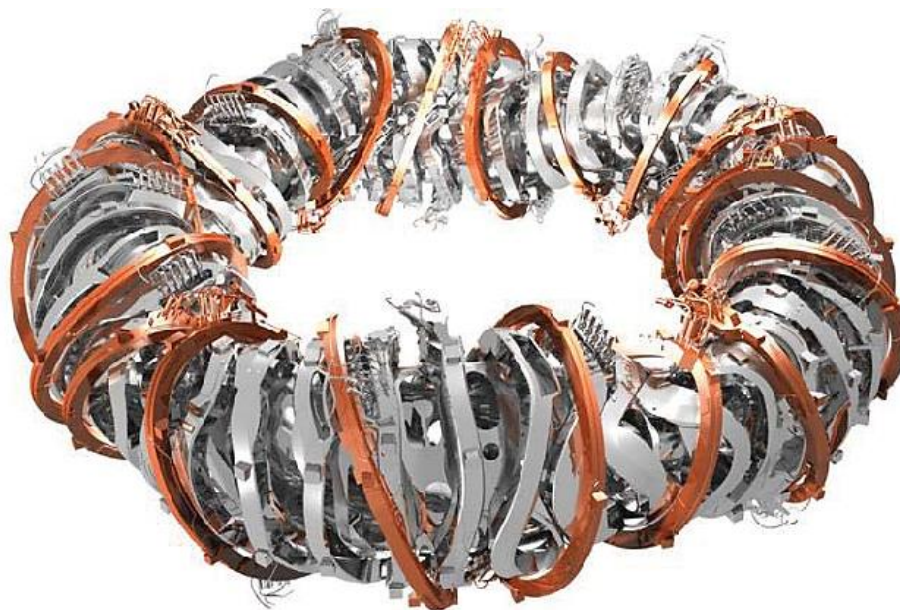


Obr. 16: Centrální solenoid (převzato z [31]).



Obr. 17: Cívky toroidního magnetického pole (vlevo) a vnější cívky poloidálního pole (vpravo) projektu ITER (převzato z [31]).





Obr. 18: Plně supravodivý (slitina Nb-Ti) stelarátor Wendelstein 7-X  
(převzato z [33]).

Kromě ITER existuje mnoho dalších projektů, které zahrnují i jiné koncepty než tokamak, např. **stelarátor Wendelstein 7-X** v Ústavu fyziky plazmatu Maxe Plancka v Greifswaldu, kde hlavní výhodou oproti tokamaku je absence proudových pulzů v plazmatu. Cívky toroidního pole proto musí mít složité tvary, aby výsledné pole bylo ve tvaru šroubovice, viz *obr. 18*.

Jiný cíl si vzal Technologický ústav v Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT) a společnost Tokamak Energy Ltd, a sice zmenšit fúzní reaktor na úkor silnějšího magnetického pole, což klade zvýšené nároky na použité supravodiče, kde se nejperspektivnějším řešením jeví použití REBCO HTS [32].

Tab. 3: Shrnutí významných fúzních zařízení s magnetickým udržením využívající supravodivé cívky  
(převzato z [32]).

Název projektu	Koncept	Materiál	$B^*$ (T)	$I^*$ (kA)	Rok <sup>°</sup>	Stát
Tokamak T-7	Tokamak	Nb-Ti	5 [34]	6 [34]	1979	Rusko
TRIAM-1M	Tokamak	Nb <sub>3</sub> Sn	11 [34]	6,2 [34]	1986	Japonsko
Tokamak T-15	Tokamak	Nb <sub>3</sub> Sn	9,3 [34]	5,6 [34]	1988	Rusko
Tore Supra	Tokamak	Nb-Ti	9 [34]	1,4 [34]	1988	Francie
LHD	Stelarátor	Nb-Ti	6,5 [34]	21÷31 [34]	1998	Japonsko
EAST	Tokamak	Nb-Ti	5,8 [32]	14,5 [32]	2006	Čína
KSTAR	Tokamak	Nb <sub>3</sub> Sn, Nb-Ti	7,2 [32]	35,2 [32]	2008	Jižní Korea
Wedelstein 7X	Stelarátor	Nb-Ti	3 [35]	14 [35]	2015	Německo
JT60SA	Tokamak	Nb <sub>3</sub> Sn, Nb-Ti	8,9 [32]	25,7 [32]	2021	Japonsko
ITER	Tokamak	Nb <sub>3</sub> Sn, Nb-Ti	13 [32]	68 [32]	2025	Francie

<sup>°</sup> Rok zahájení provozu

\* Hodnoty pro konkrétní cívku

## 3.2 Elektrické stroje

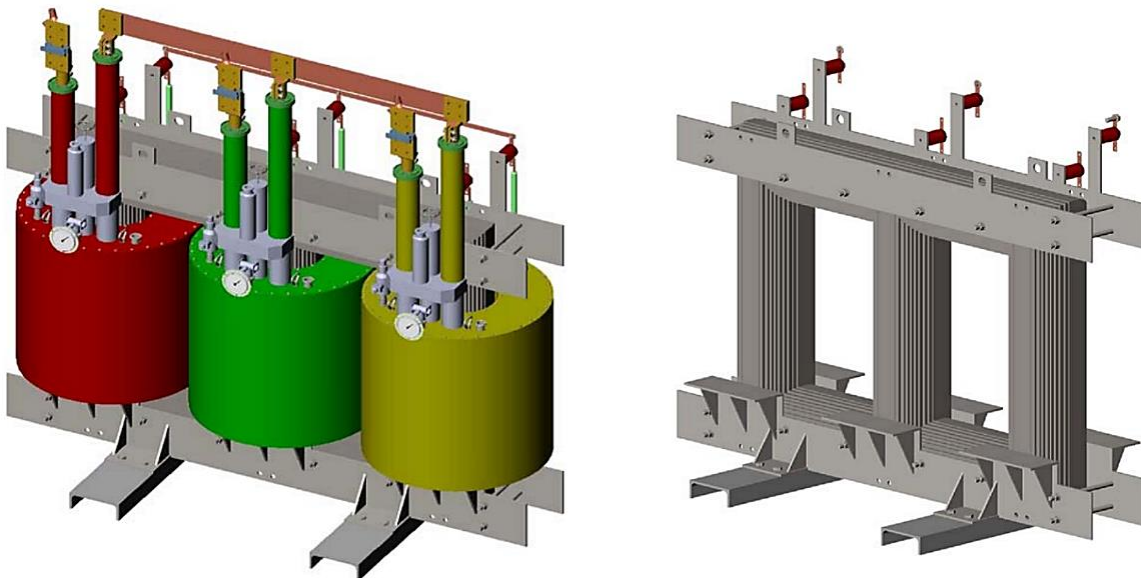
Elektrické stroje jsou měniče energie, a proto jednou z nejvíce řešených problematik u všech vysokonapěťových elektrických strojů je eliminace ztrát, tj. zamezení vývinu tepla při přeměně energie elektrické na magnetickou a naopak (Jouleovy ztráty), zamezení ztrát energie magnetického pole rozptylem a při přestupu přes vzduchovou mezeru u točivých strojů a jiné. V kapitole o supravodivých projevech jsme zmínili, že supravodivé materiály jsou schopné přeměny elektrické energie na magnetickou bez vývinu tepla za předpokladu, že  $dB/dt = 0$ . Tohoto předpokladu lze v dostatečně míře dosáhnout pouze u budícího vinutí synchronních generátorů a stejnosměrných alternátorů. Další možné aplikace supravodivosti, zahrnující asynchronní motory a transformátory, musí již počítat s vývinem tepelných ztrát vlivem nenulového  $dB/dt$ . Tyto ztráty jsou ovšem znatelně nižší, než jsou ztráty u běžných odpor vykazujících materiálů, a proto je-li cílem eliminace ztrát, či kompaktnost stroje, jsou supravodiče perspektivním řešením.

Podstatnou nevýhodou všech elektrických strojů na bázi supravodivosti je mnohokrát zmíněný chladicí systém, který znatelně zesložituje konstrukci celého stroje. Částečným řešením je zdokonalená technologie výroby HTS vodičů o požadovaných mechanických vlastnostech (viz kapitola 2.3 *Vysokoteplotní supravodiče*), jejichž nároky na chladicí systémy jsou znatelně ekonomicky příznivější než v případě aplikace LTS, které jsou díky nízkým hodnotám  $T_c$  z pohledu elektrických strojů naprosto neekonomické. Úplné odstranění chladicího systému by si vyžádalo pokrok v oblasti supravodičů za pokojové teploty, které ovšem v současné době rozšiřují seznam nám dosud známých kritických parametrů ( $T_c$ ,  $H_c$ ,  $J_c$ ) o vysoké tlaky v řádu desítek GPa. Rozvoj supravodičů za pokojové teploty, atmosférického tlaku a s dobrými materiálovými vlastnostmi je velice nepravděpodobný, a proto je v aktuální době věnována největší pozornost HTS. Konečnou otázkou tedy je, zda se přes všechny obtíže s chlazením a nepříznivými materiálovými vlastnostmi všech HTS elektrické stroje se supravodivým vinutím vyplatí.

Pro **transformátory** velkých výkonů se supravodivým vinutím odpadá izolační olej, což má pozitivní dopad na životní prostředí a zároveň odpadá riziko požáru. Hmotnost a rozměry jsou redukovány přibližně na polovinu, a proto je varianta transformátoru s HTS vinutím (nejčastěji 1G Bi-2223, nebo novější 2G YBCO ve formě pásek a vodičů) vítána ve stísněných prostorech. Dalším benefitem je znatelně vyšší přetížitelnost a menší hodnota napětí nakrátko. Menší rozměry transformátorového jádra dále souvisí s menšími ztrátami magnetizací. Chladicí systém na druhou stranu přináší zmíněnou komplikovanost stroje a má mimo jiné negativní dopad na jádro transformátoru, kde s klesající teplotou klesá rezistivita a narůstají ztráty vířivými proudy. Řešení je v oddělení jádra od kryostatu tepelnou izolací, což s sebou přináší

dodatečnou složitost konstrukce a vyšší náklady. Chladicí systém musí mimo jiné kompenzovat dříve zmíněné střídavé ztráty, které narůstají s frekvencí a velikostí magnetického pole. Podstatnou otázkou je také dielektrický systém, jelikož volba vhodného izolačního materiálu je omezena na nejodolnější polymerní materiály (skleněná epoxidová struktura G10/FR4, Nomex, Kapton). Samotné chladicí médium, tj. tekutý  $N_2$ , funguje jako dostatečná náhrada za izolační olej, ovšem je nutné dosažení nižších teplot (65 K) pro eliminaci tvorby bublinek při vypařování  $N_2$  [36]. Další faktor určující provozní teplotu je hodnota kritické proudové hustoty  $J_c$ , která pro Bi-2223 pásy o tloušťce 80  $\mu\text{m}$  při 77 K dosahuje až 690  $\text{A}/\text{mm}^2$  (pro měď je maximální přípustná proudová hustota okolo 5  $\text{A}/\text{mm}^2$  [37]) [38]. Porovnáme-li účinnost HTS transformátoru (99,93 % [39]) a běžného olejového transformátoru (99,7 %), dojdeme k závěru, že aplikace HTS transformátorů bude ekonomicky nejvýhodnější pro největší výkony, popřípadě vytipované situace žádající si kompaktní provedení bez rizika vzniku požáru, např. trakční transformátory [36], [40], [41].

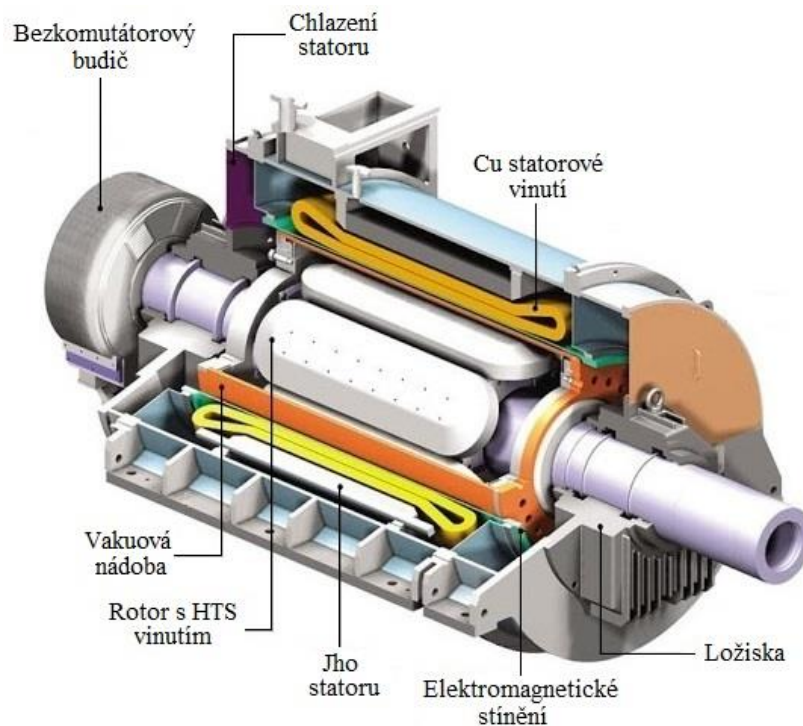
Na obr. 19 vlevo je uveden model 3f transformátoru Yy 10,5/0,4 kV s výkonem 1250 kVA, primárním a sekundárním vinutím z HTS na bázi Bi-2223 (izolace – Kapton a Nomex T410). Barevné části představují kryostat, který je rozdělen pro každou fázi zvlášť, a to z důvodu udržení vyšší teploty transformátorového jádra. Pro eliminaci ztrát vířivými proudy je kryostat vyroben z kompozitní struktury epoxidu se skleněnými vlákny. Vpravo je znázorněno příslušné jádro, složené z orientovaných plechů (křemíková ocel) [42].



Obr. 19: Model HTS transformátor o výkonu 1250 kVA s převodem 10,5 kV/0,4 kV (převzato z [42]).

V prvním odstavci byly zmíněny možné aplikace HTS u točivých strojů, kde pravděpodobně největší část představují **stroje synchronní (SS)**. Výhody a nevýhody použití HTS jsou podobné jako u transformátorů, tj. snížení rozměrů, hmotnosti, ztrát cca o 50 %, znatelné snížení hlučnosti během provozu oproti stejně výkonným konvenčním strojům a komplikace s chlazením. Chladicí systém rotoru je zprostředkován dutou hřídelí a je v provedení úplného chlazení rotoru, nebo chlazení pouze rotorového vinutí, viz [37]. Vysoké proudové hustoty HTS dovolují bezdrážkové provedení statoru, které eliminuje problém s přesycením jha a sníží podélnou a příčnou synchronní reaktanci. Rotor je v provedení buď bez železného jha, kde je možné využití většího množství HTS pro vybudování silnější magnetické vazby, ale použití je omezeno na pomaloběžné stroje o menších výkonech, nebo v provedení masivním, které není omezeno vysokými otáčkami, a je proto častější variantou. Své uplatnění našly, především pro svou kompaktnost, synchronní motory pro lodní pohon, viz *obr. 20*, a synchronní generátory (např. pro větrné elektrárny) a kompenzátory (HTS vinutí je využito ve všech případech pouze na rotoru) [37], [43].

S ohledem na širokou škálu možných designů SS, které HTS nabízí, není možné jednoznačně určit negativa spojená s touto oblastí. Perspektivní jsou proto vytipované aplikace, kde vychází použití HTS SS jednoznačně ekonomičtěji, nebo je požadavkem kompaktnost. Pro posílení komercializace HTS SS je vynakládáno úsilí v minimalizaci AC ztrát a rozvoji 2G HTS, které vykazují vyšší kritické parametry a výrobní proces je méně nákladný než u 1G HTS [37].

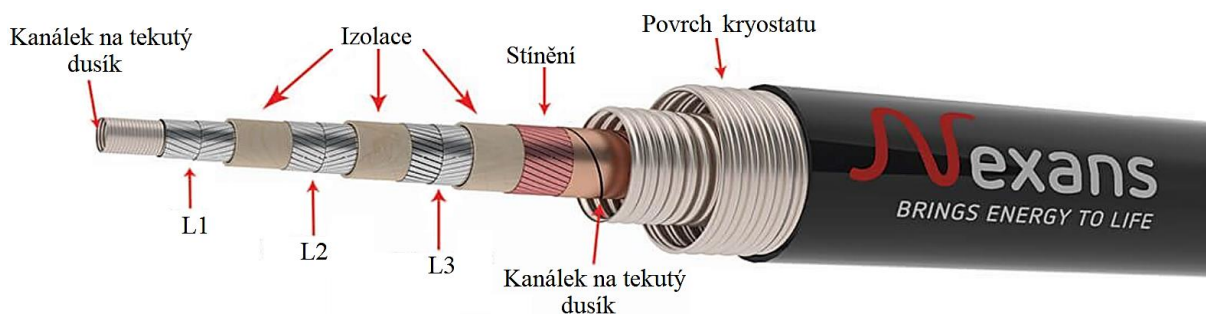


Obr. 20: Konstrukce synchronního motoru s vyniklými póly o výkonu 5 MW pro lodní pohon s BSCCO HTS vinutím na rotoru (*převzato z [43]*).



### 3.3 Přenos elektrické energie

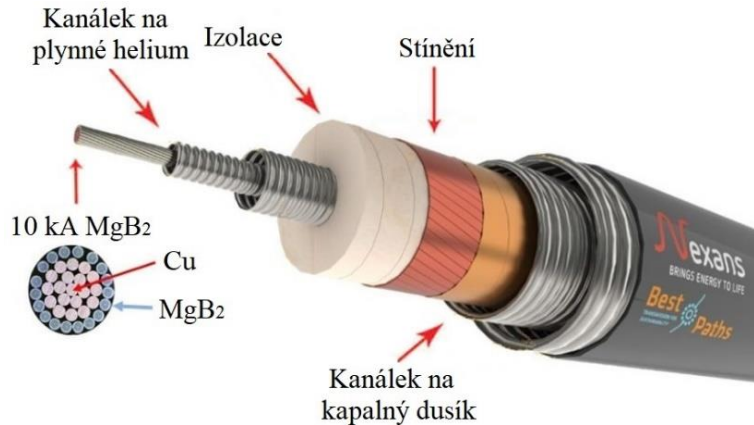
V místech s požadavkem na minimalizaci (i) ztrát (dlouhodobý odběr proudu) a (ii) negativního působení na krajinu (cca o 50 % užší koridor pro velké výkony), nachází své uplatnění kabely na bázi HTS/LTS materiálů (AC/DC), které jsou schopné při zachování rozměrů přenést mnohonásobně více elektrické energie než konvenční kabely, a to s výraznou minimalizací ztrát (největší část ztrát tvoří napájení chladicího systému). Pro ilustraci, konvenční kabelové vedení na 110 kV, o výkonu 50 MW bude využívat průřez 400 mm<sup>2</sup> na každou fázi, což odpovídá proudové hustotě cca 0,7 A/mm<sup>2</sup> (270 A/400 mm<sup>2</sup>). AC HTS kabel o výkonu 250 MW (5× vyšší výkon) může operovat s průřezem 50 mm<sup>2</sup> na fázi, a to už při 35 kV, jelikož proudová hustota je zde přibližně 90 A/mm<sup>2</sup> (připustné proudové hustoty HTS vodičů ~ 100 A/mm<sup>2</sup>). Podstatou zmíněných kabelů je tedy nižší provozní hladina napětí, což se projeví v nižších požadavcích na izolaci, nákladech za transformátorové body, a tedy i ve výsledných rozměrech rozveden [12]. Jeden z důvodů, proč technologie na bázi supravodivosti hromadně nenahrazuje konvenční vedení, tkví opět v kryostatu, který je elektricky závislý. Chladicí systém nám tak zdatelně navyšuje počet rizikových komponent, které v případě výpadku ohrožují provoz celé linky. Eliminace těchto rizik na úroveň rovnající se pravděpodobnosti bezporuchového provozu konvenčního vedení jsou poté zodpovědné za často zmiňované vysoké náklady, které jsou kompenzovány pouze na vytipovaných kabelových vedeních. Další část nákladů představuje výroba kabelů samotných. Konfigurace na *obr. 21* (AC HTS kabel v 3f provedení) je charakteristická nižší provozní indukčností a vyšší kapacitou, než je tomu u konvenčních kabelových vedení. Tepelné stínění je zprostředkováno vakuově, a kabel tak neztrácí chladicí výkon a nenarušuje své bezprostřední okolí nízkými teplotami (či vyššími teplotami, jako u konvenčních kabelů). V případě vysokých poruchových proudů (větších, než je kritická hodnota  $I_c$ ) je vodivá cesta převedena na nesupravodivou část HTS, a to pouze po dobu trvání poruchy (vývin velkého ztrátového tepla musí být kompenzován chladicí soustavou) [36].



Obr. 21: Supravodivý AC kabel společnosti Nexans v třífázovém provedení (převzato z [44]).

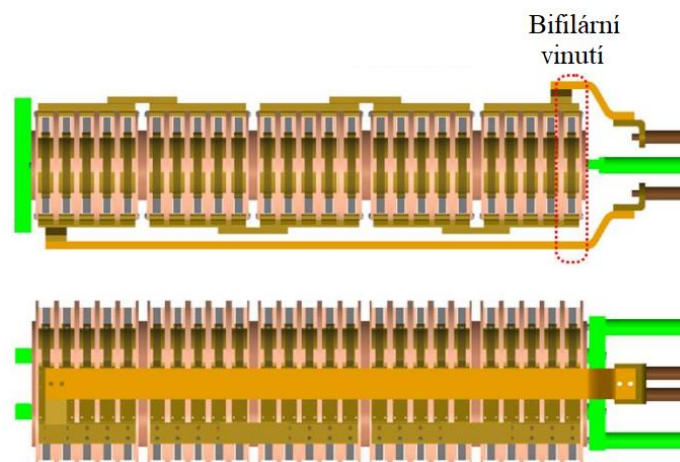


Konfigurace na *obr. 22* představuje HVDC MgB<sub>2</sub> kabel na 320 kV a 10 kA (projekt Best Paths), kde struktura modrého MgB<sub>2</sub> segmentu je patrná na *obr. 7 d*) [45], [46]. Podstatnou výhodou DC kabelů se supravodiči na bázi MgB<sub>2</sub> oproti AC HTS kabelům je absence induktivní a kapacitní reaktance a AC ztrát [36].



Obr. 22: Konstrukce DC kabelu na bázi MgB<sub>2</sub> (převzato z [47]).

U rozvodných sítí s velkým zatížením (supravodivých i konvenčních) vykazují velký potenciál **omezovače poruchového proudu**, které ke své činnosti využívají kritické parametry HTS ( $J_c$ ,  $H_c$ ,  $T_c$ ). Při poruše dojde k překročení jednoho z kritických parametrů, např. hodnoty  $I_c$ , omezovač zareaguje a okamžitě omezí poruchový proud. Následuje přechod do nesupravodivého stavu a přeměna vysokého poruchového proudu na tepelnou energii v paralelně připojeném odporovém modulu. Po navrácení požadovaných parametrů pod kritické dojde k znovuoobnovení provozu. Výhodou supravodivých omezovačů je kompaktnost, podíl na omezení škodlivého izolačního plynu SF<sub>6</sub> a nižší nároky na zkratovou odolnost u chráněných zařízení [36], [48], [49]. Na *obr. 23* je provedení jedné fáze omezovače proudu s bifilárním vinutím z 2G HTS ve formě tenkého pásku, kde  $I_c \approx 700$  A a odpor v nesupravodivém stavu je cca 150 mΩ/m (odpor stříbrné vrstvy, viz *obr. 11*) [50].



Obr. 23: Jedna fáze omezovače poruchového proudu s 2G HTS vinutím v bifilárním provedení (převzato z [50]).

### 3.4 Akumulace elektrické energie

Akumulaci elektrické energie lze v dnešní době zprostředkovat několika způsoby: přečerpávací elektrárny (účinnost cca 80 %), velké setrvačníky (účinnost cca 80 %), výroba vodíku elektrolýzou (účinnost přeměny cca 90 %), lithium-iontové baterie (hustota energie cca 300 kWh/m<sup>3</sup>), akumulace do roztavených solí, stlačeného vzduchu aj. [51]. Supravodivost přináší nový přístup, jak účinně uložit elektrickou energii (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage) a zlepšuje účinnost setrvačnicků (FESS – Flywheel Energy Storage System).

**Princip SMES** spočívá v uložení stejnosměrného proudu do uzavřené supravodivé smyčky (cívky), kde může, při udržení základních parametrů pod kritickými, existovat po libovolně dlouhou dobu, a generovat tak příslušné magnetické pole ( $\sim 1$  T) [36]. Uložená magnetická energie  $E_m$  odpovídá známému vztahu

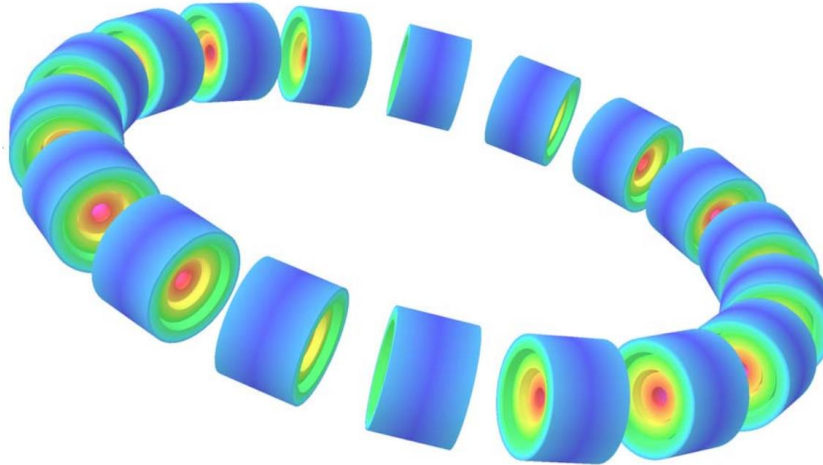
$$E_m = \frac{1}{2} LI^2, \quad (5)$$

kde  $L$  je indukčnost supravodivé cívky (daná geometrií) a  $I$  je stejnosměrný proud. Další možné vyjádření je pomocí objemu druhé mocniny intenzity magnetického pole, tj.

$$E_m = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0} dx dy dz. \quad (6)$$

Důležitou roli zde proto hrají opět kritické parametry, kde se s vyšší hodnotou  $J_c$  a  $B_c$  snižují nároky na objem supravodivé cívky. Kritické parametry  $J_c$  a  $B_c$  lze navýšit snížením teploty, viz *obr. 10*, či volbou vhodných materiálů, a jednou z výhod je proto kompaktnost supravodivé části SMES. Výhodná je i úměrnost  $V \sim E_m^{2/3}$ , která vychází ze vztahu (6) a geometrie supravodivé cívky. Například pro uložení 10× více energie, stačí objem navýšit přibližně 4,6× (pozn. jedná se pouze o úměrnost) [36]. Chceme-li navýšit  $E_m$  pomocí navýšení  $B$  (další možností je navýšení objemu cívky dle (6)), je nutné uvažovat síly, které budou na supravodivou cívku působit. Podobně jako u fúzních zařízení s magnetickým udržením je proto nedílnou součástí supravodivých cívek i mechanická opora. Mezi další nutné komponenty patří reverzibilní usměrňovač, chladicí systém a řídicí jednotka, která vytváří spojení mezi požadavky ze sítě a tokem energie do, nebo ze supravodivé cívky. Samotná supravodivá cívka je ve většině případech ze slitiny Nb-Ti, a to pro své dobré mechanické vlastnosti a dostatečně vysokou hodnotu  $B_{c2}$ , která není ovlivněna anizotropií, jako v případě HTS [36]. SMES s vysokým magnetickým polem (až 25 T) a 2G HTS toroidními cívkami se zabývá [52], viz *obr. 24*. Hlavním záměrem je zchlazení HTS na teploty okolo 4 K pro dosažení vysokých hodnot  $B_{c2}$ .

Oproti předešlým konceptům akumulace je rychlost nabíjení a odběru elektrické energie u SMES podstatně rychlejší, a to při vysoké účinnosti (pro velké systémy až přes 95 %) [51]. Ztráty vznikají především ve zmíněném usměrňovači a energií dodávanou do chladicího systému. Navzdory všem výhodám, vysoké náklady dovolují využití SMES pouze v oblastech s vysokými nároky na kvalitu dodávky elektrické energie [51].



Obr. 24: Toroidní struktura SMES obsahující 18 modulů sestávajících z HTS cívek (barevně vyznačena intenzita magnetického pole) (převzato z [52]).

**FESS** představuje koncept levitujícího setrvačnicku rotujícího s vysokými otáčkami (~ 10 000 ot/min) a minimálními třecími ztrátami s využitím permanentních magnetů, nebo HTS ložisek (supravodivá levitace). Levitující setrvačnick je skrz hřídel připojen k rotoru SS s permanentními magnety (jiný koncept využívá asynchronní stroj). Mezi další nutné komponenty patří kryogenní systém, frekvenční měnič a řídicí jednotka. Při přebytecích v síti je setrvačnick urychlován a při energetických špičkách je setrvačnick zpomalován (motorický/generátorický režim) [53]. Odmyslíme-li si technologické odlišnosti, je FESS na bázi HTS ložisek zařízení se stejnými výhodami i nevýhodami, jako má SMES (rychlost nabíjení a odběru elektrické energie, vysoká účinnost, ztráty v měniči, chladicí systém). Energie akumulovaná v setrvačnicku je dána podle známého vztahu

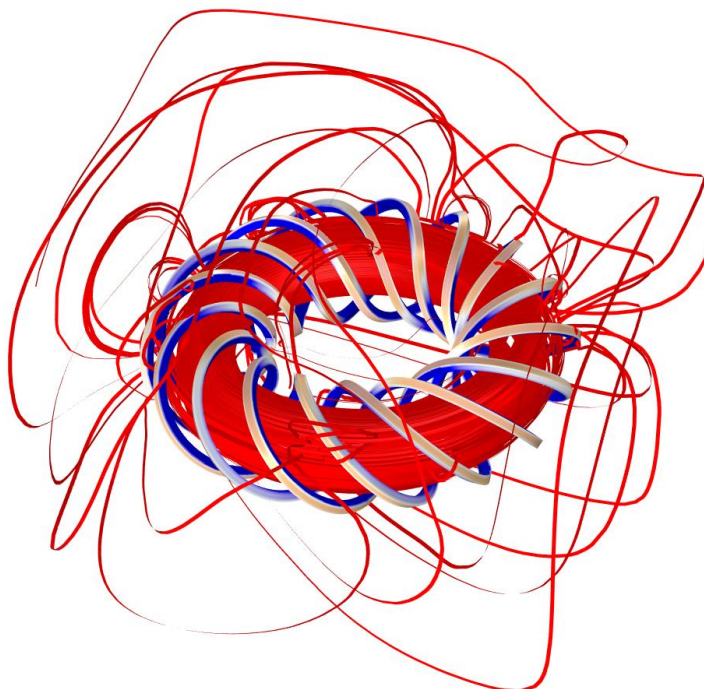
$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2. \quad (7)$$

Podrobněji se problematikou FESS zabývá například [53 - 55]. Supravodivá levitace má své perspektivní využití i v dopravě, kde SCMaglev vlaky (Superconducting Magnetic levitation), využívající 2G HTS, dosahují rekordně vysokých rychlostí (600 km/h) díky eliminaci valivé třecí síly [36].

## 4 Shrnutí teoretické části

Závěrem teoretické části této práce lze říci, že předpoklad o blízkém (v řádu let) a hromadném nahrazování technologií na bázi běžných ztrátových materiálů (měď, hliník, zlato aj.), které byly rozvíjeny již dlouhou dobu před samotným objevením supravodivosti, technologiemi na bázi LTS či HTS je nepravděpodobný. Důvodů bylo zmíněno hned několik: nutnost chladicího systému, nepříznivé mechanické vlastnosti oproti běžně používaným materiálům, riziko vypadnutí ze supravodivého stavu (HTS je po překročení kritických parametrů izolant), vysoké náklady na produkci kompozitních vodičů aj. Prozatím tedy převládají negativa nad pozitivy, a proto má supravodivost největší potenciál pouze jako krajní substituent, a to v oblastech, kde aplikace běžných materiálů není možná, nebo značně neekonomická, tj. velkorozměrové projekty, jako jsou například budoucí fúzní reaktory s magnetickým udržením, urychlovače částic a v komerční sféře spíše vytipované aplikace, kde jsou kladeny nároky na minimalizaci ztrát (kabelová vedení), kompaktnost či jiné více specifické požadavky (eliminace rizika požáru a úniku transformátorového oleje).

Proto aby se supravodivost v budoucnosti objevila v námi běžně užívaných technologiích, a došlo tak ke zmíněnému hromadnému nahrazování, musel by nejprve nastat 3. průlom v řadě, tj. pokrok v oblasti supravodičů za pokojových teplot (1. – objev supravodivosti, 2. – objev HTS). Nicméně pravděpodobnost objevení supravodičů za pokojové teploty, atmosférických tlaků a s dobrými mechanickými vlastnostmi je mizivá, a to z důvodu narušení dříve zmiňovaných skrytých interakcí, zodpovědných za vznik Cooperových párů, tepelným chaosem, který je za pokojové teploty všudypřítomný.



Obr. 25: Supravodivé cívky stellarátoru a příslušné toroidní magnetické silokřivky (*obrázek autora*).

Supravodiče nicméně nabízí i zcela nové, donedávna nemyslitelné technologie (nízko ztrátové HVDC kabely, nízko ztrátová akumulace energie, levitující rychlovlaky, cívky fúzních zařízení a mnoho dalších), které dále rozšiřují náš technologický repertoár.

Uspokojivým výstupem mé diplomové práce by proto bylo podnícení o důležitosti problematiky supravodivých materiálů, ale obecně i technologií na bázi jiných kvantových jevů (např. superpozice stavů v kvantových počítačích), jelikož lidská společnost s postupem času více a více narušuje přirozený ekosystém naší planety. Na tento globální problém existují jednak zcela očividná řešení, která ovšem kromě zmírnění uvedeného problému nenabízí nic nového (rozvoj obnovitelných zdrojů elektrické energie, tlak na snížení produkce emisí aj.), ale i řešení, která na první pohled s ekosystémem naší planety nesouvisí. Nicméně supravodivé materiály (LTS, a především pak HTS) se nevyhnutelně stanou podstatnou součástí termojaderných fúzních reaktorů s magnetickým udržením (velkorozměrových i kompaktních sférických tokamaků a stelarátorů), které nabízí řešení zmíněného globálního vlivu lidské společnosti na ekosystém a klimatické podmínky naší planety, ale také další bonusové klady, jako je nevyčerpatelnost používaného paliva, dostupnost paliva každou zemí a mnoho dalších.

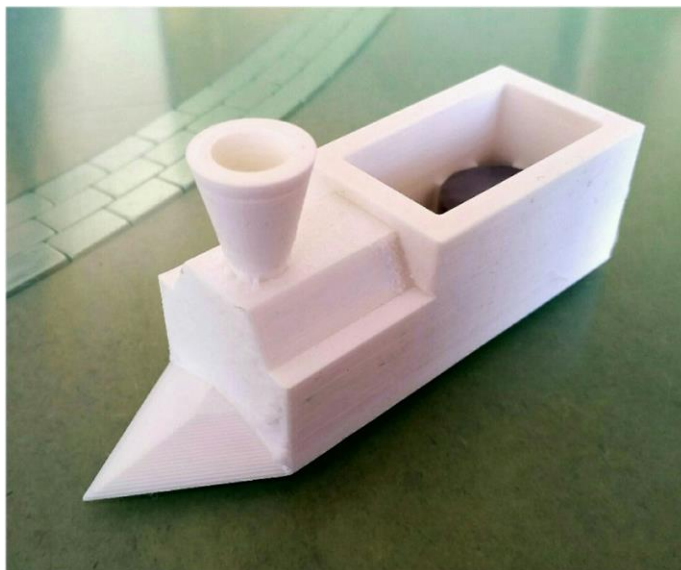
Podobně jako je tomu při hraní šachů, ne každý tah se může zdát, jako tah vedoucí okamžitě ke správnému cíli, přesto jeho provedením spolu s dalšími klíčovými rozhodnutími můžeme docílit konečného vítězství a po cestě získat i nové zkušenosti a řešení na problémy, které se doposud ani neprojevíly být podstatnými.

## 5 Realizace demonstrátoru supravodivého jevu

Praktická část diplomové práce je zaměřena na realizaci laboratorního demonstrátoru supravodivého jevu v podobě modelu vláčku levitujícího nad magnetickou dráhou, viz *obr. 26*. Model vláčku nese dva YBCO supravodiče chlazené tekutým dusíkem, viz *obr. 31*. Volba levitujícího modelu vláčku, jako vhodné reprezentativní ukázky supravodivého jevu, byla iniciována zejména z důvodu výsledného hmatatelného projevu supravodivosti, relativně snadné realizace (oproti jiným navrhovaným projektům, např. model akumulace elektrické energie), dostupné technologie (tisk modelu pomocí 3D tiskárny, výpočetní software), ale také z důvodu dalšího potenciálního rozšiřování projektu budoucími zájemci o tuto problematiku, či problematiku související s realizací jednotlivých etap projektu.

Model levitujícího vláčku bude reprezentovat tzv. smíšený stav YBCO supravodiče, viz podkapitola *Supravodiče II. typu*. Magnetická dráha se skládá z ocelového prstence nesoucí celkem 534 neodymových magnetů (15×9×5 mm) rozložených do tří řad. Prstenec s magnety je zasazen do MDF desky o rozměrech 1037×834 mm. Stabilita supravodiče v poloze, ve které

byl zchlazen pod kritickou teplotu  $T_c$ , je všesměrová, tedy i ve stavu, kdy je YBCO s celou dráhou otočen vzhůru nohama. Příčinou všesměrové stability je magnetický „otisk“ ve struktuře supravodiče, který je typický pro supravodiče II. typu. Jediný stupeň volnosti je **ve směru**



Obr. 26: Magnetická dráha s modelem vláčku, který obsahuje 2 YBCO supravodiče.  
Více na <https://www.youtube.com/channel/UCrOkpjXlodOwadegAajZLvw>.

**homogenního magnetického pole**, tj. podél dráhy, kde se uspořádání magnetů nemění.

Kritické body v průběhu realizace byly:

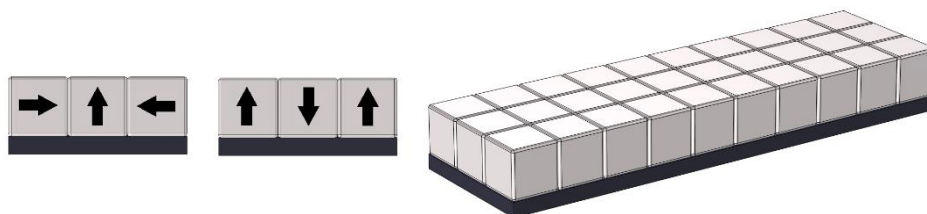
- návrh magnetické dráhy,
- návrh nádobky na tekutý dusík a dva YBCO supravodiče,
- návrh nosné platformy.

## 5.1 Návrh magnetické dráhy

Magnetickou dráhou je myšlen prstenec, který je zasazen do nosné platformy. Prstenec je tvořen ocelovou nosnou částí a 534 neodymovými magnety, které na ocelovém prstenci drží pouze magnetickým přitahováním, a jsou tedy odnímatelné. Geometrie prstence a výsledný počet magnetů, byl kalkulován s pomocí softwaru Matlab. Vytvořený script je plně parametrický, a lze ho proto využít pro vykreslení libovolných rozměrů prstence, viz příloha 3. Konečné rozměry ocelového prstence byly zvoleny 977×774 mm s tloušťkou 2 mm z důvodu možnosti snadného převozu. Neodymové magnety mají rozměry 15×9×5 mm. Část zabývající se porovnáním dvou možných konfigurací, viz *obr. 27* a *29*, jsem převzal z projektu [56], který jsem zpracoval v rámci předmětu Modelování multifyzikálních problémů. Kompletní geometrie prstence, počet a rozměry magnetů viz příloha 1.

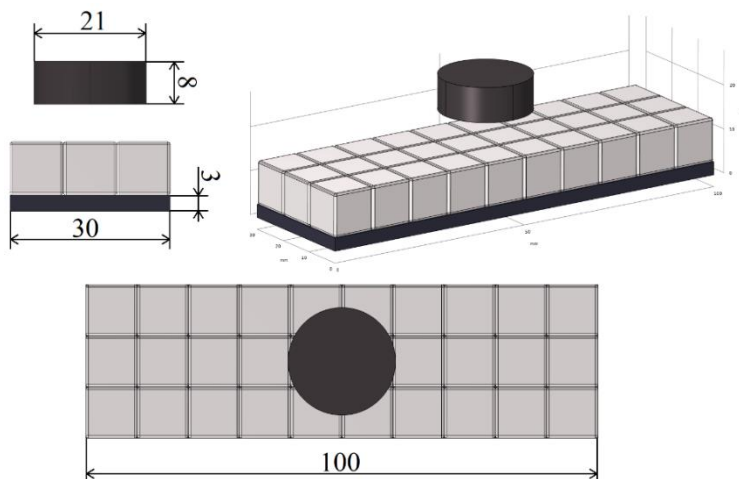


Konečné uspořádání magnetů na dráze v příčném směru (v podélném je neměnné) bylo zvoleno dle náročnosti realizace dvou malých prototypů dráhy, viz *obr. 29*. Levý prototyp představoval tzv. Halbachovo uspořádání magnetů a pravý konvenční uspořádání, viz *obr. 27*. Konvenční uspořádání se ve výsledku ukázalo jako snadněji realizovatelné, a především jako stabilnější konfigurace, jelikož nevyžadovalo žádné lepení magnetů na ocelový prstenec.



Obr. 27: Halbachovo (vlevo) a konvenční (uprostřed) uspořádání magnetů.

Níže uvedená problematika se zabývá dalším rozhodujícím kritériem volby konečné konfigurace, a to kalkulací síly za pomoci softwaru COMSOL Multiphysics, která působí na supravodič YBCO ( $r = 10,5$  mm,  $h = 8$  mm) v silném nehomogenním magnetickém poli, jehož zdrojem jsou neodymové magnety ( $10 \times 10 \times 10$  mm) uspořádané podle dvou různých konceptů. Níže uvedená geometrie modelu je určena pro zmíněnou kalkulaci síly a následné porovnání obou konceptů, a je tedy pro oba koncepty totožná (rozdíl se týká pouze orientace magnetů). Součástí modelu je kalkulace závislosti síly na vzdálenosti supravodiče YBCO nad plochou magnetů.



Obr. 28: Řešený model: železná platforma, 30 neodymových magnetů a YBCO supravodič.

První model představuje **Halbachovo uspořádání** magnetů, které je patrné na *obr. 27 vlevo*, kde boční řady magnetů jsou svými severními póly orientovány proti řadě prostřední, která je orientována vertikálně. Použitý koncept ve výsledku zesílí magnetické pole, a tedy i sílu působící na supravodič. Rozložení magnetických indukčních čar v okolí neodymových magnetů je zobrazeno na *obr. 30 vlevo*. Samotné sestavení silných neodymových magnetů ( $10 \times 10 \times 10$  mm) do zmíněného uspořádání a sestavení reálného prototypu je značně zkomplikováno silami působícími mezi jednotlivými magnety.

Druhý model se týká **konvenčního uspořádání** magnetů, které je patrné na *obr. 27 uprostřed*, kde boční řady magnetů jsou svými severními póly orientovány ve shodném směru vertikálně. Prostřední řada je opět orientována vertikálně, ovšem v opačném směru, tj. o  $180^\circ$  pootočená oproti bočním řadám. Rozložení magnetických indukčních čar v okolí neodymových magnetů je zobrazeno na *obr. 30 vpravo*.



Obr. 29: Prototyp Halbachova (vlevo) a konvenčního uspořádání magnetů (vpravo).

### Matematický model

- Oblast okolního prostředí (vzduch), železná platforma a supravodič YBCO:

Okolní prostředí je tvořeno vzduchem, kde rozměry jsou parametricky nastaveny na délku platformy, 450 % šířky platformy a 500 % výšky celého modelu (spodek platformy až vršek YBCO supravodiče). Pro zmíněné oblasti byla aplikována 4. Maxwellova rovnice (rovnice kontinuity magnetických indukčních čar), která má v diferenciálním tvaru podobu

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (8)$$

Další výraz použitý ve zmíněných oblastech je v plné podobě ve tvaru

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}, \quad (9)$$

kde  $\vec{H}$  představuje pomocný (sekundární) vektor zahrnující vliv materiálu na výsledné magnetické pole, tzv. intenzita magnetického pole, a  $\mu_0$  je permitivita vakua. Vektor  $\vec{M}$  představuje magnetizaci, která představuje hustotu magnetického dipólového momentu, tj.

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{P}_M}{\Delta V}, \quad (10)$$



kde vektor  $\vec{P}_M$  je magnetický dipólový moment a  $V$  je objem. Ovšem, jelikož  $\vec{M}$  je komplikovanou funkcí  $\vec{B}$  a v našem modelu je primárním cílem výpočet  $\vec{B}$ , je výraz (9) zjednodušen a upraven do podoby

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (11)$$

kde  $\mu_r$  je parametr zadávaný do našeho modelu: pro okolní prostředí  $\mu_r = 1$ , pro železnou platformu  $\mu_r = 4000$  a pro YBCO supravodič  $\mu_r \rightarrow 0$ , jelikož se jedná o téměř dokonalé diamagnetikum (supravodič II. typu).

Poslední vztah použitý v řešených třech oblastech je

$$\vec{H} = -\nabla \cdot V_m. \quad (12)$$

Uvedený vztah je analogický k elektrickému poli, tj.  $V_m$  je skalární magnetický potenciál, který má ryze matematický význam.

- Oblast neodymových magnetů:

V této oblasti platí stejné vztahy a odvození jako v předchozích třech oblastech, ovšem navíc se zde uplatňuje člen  $\vec{B}_r$ , a to ve vztahu (11), tedy

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r, \quad (13)$$

kde  $\vec{B}_r$  představuje remanentní magnetickou indukci neodymových magnetů. Do našeho modelu je tedy nutné zadat jak velikost, tak i směr vektoru  $\vec{B}_r$ . Velikost vektoru  $\vec{B}_r$  je přibližně 0,57 T a směr jednotkového vektoru  $\vec{e}$  je závislý na použitém konceptu uspořádání magnetů.

- Hranice okolního prostředí:

Pro hranice okolního prostředí byla použita podmínka, říkájící, že normálový vektor plochy krychle (okolního prostředí)  $\vec{n}$  je kolmý na vektor magnetické indukce  $\vec{B}$ , tj. platí, že

$$\vec{B} \cdot \vec{n} = 0. \quad (14)$$

- Kalkulace síly působící na YBCO supravodič:

V případě Maxwellova tenzoru nás bude zajímat především jeho integrace, jelikož tak získáme sílu

$$\vec{F} = \int_{\partial\Omega} \vec{n} \mathbf{T} dS, \quad (15)$$

kde  $\partial\Omega$  je povrch řešeného objektu, vektor  $\vec{n}$  je normála k povrchu řešeného objektu a  $\mathbf{T}$  je zmiňovaný Maxwellův tenzor, jehož podoba v ryze magnetickém poli je

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}(\vec{H} \cdot \vec{B}) - \vec{H} \times \vec{B}, \quad (16)$$

kde jsou všechny komponenty známy až na tenzor  $\delta_{ij}$ , který je označován jako Kroneckerovo delta a platí pro něj, že např.  $\delta_{12} = 0$ , tj. pro všechny  $i \neq j$ , ale např.  $\delta_{11} = 1$ , tedy pro všechny  $i = j$ .

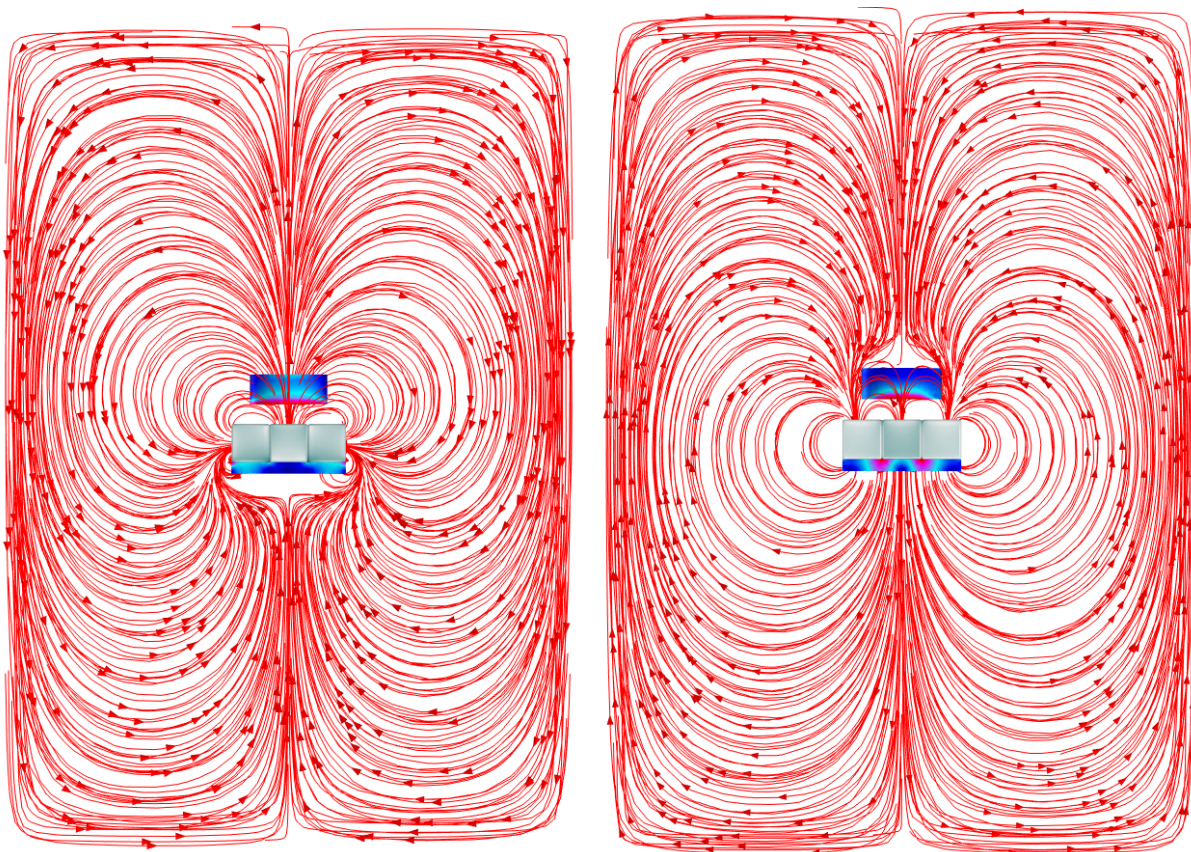
Další využití Maxwellova tenzoru je pro moment působící na řešený objekt

$$\vec{\tau} = \int_{\partial\Omega} (\vec{r} - \vec{r}_0) \times \vec{n} \mathbf{T} dS, \quad (17)$$

kde výraz  $(\vec{r} - \vec{r}_0)$  představuje délku a směr páky, na kterou působí síla  $\vec{F}$  ( $\vec{r}_0$  je zadán v počátku souřadnicového systému). Z dopočteného momentu se vyjme pouze složka působící ve směru zadávaného vektoru  $\vec{r}_{ax}$  a ponechá se jí pouze skalární charakter:

$$\tau_{ax} = \frac{\vec{r}_{ax} \cdot \vec{\tau}}{\|\vec{r}_{ax}\|} = \tau \cdot \cos\vartheta, \quad (18)$$

kde  $\vartheta$  je úhel mezi  $\vec{r}_{ax}$  a  $\vec{\tau}$ .



Obr. 30: Rozložení magnetických indukčních čar v okolí neodymových magnetů (řez dráhy) pro Halbachovo (vlevo) a konvenční uspořádání magnetů (vpravo).

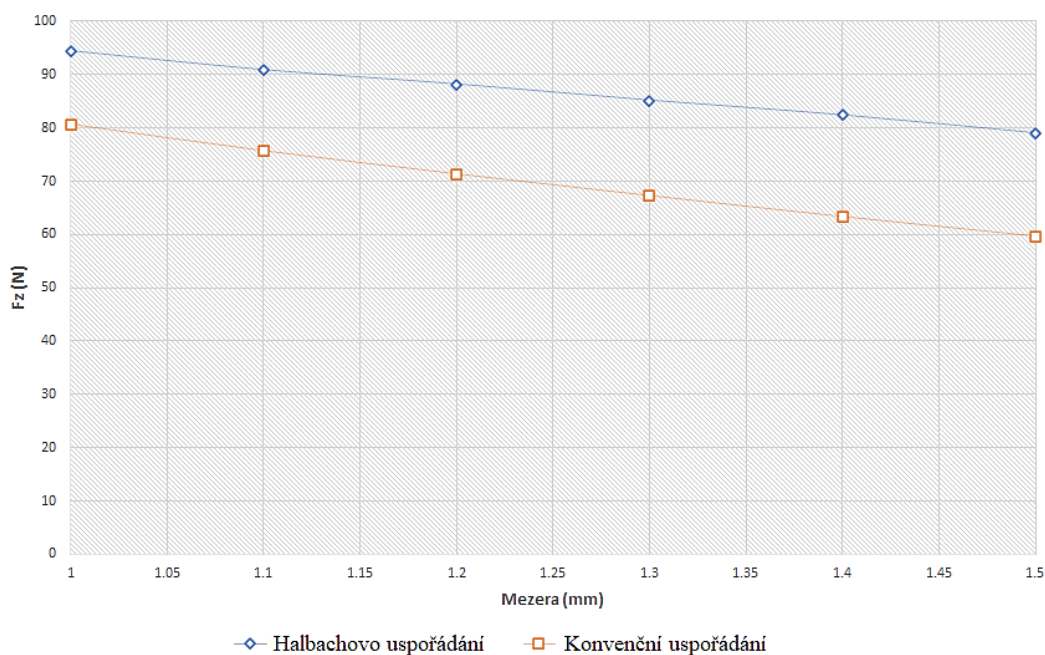
## Výsledky matematického modelu

V tab. 4 jsou shrnuty výsledky výše uvedeného modelu, které reprezentují závislost síly  $F_z$  působící na ideální diamagnetikum v závislosti na mezeře mezi supravodičem a magnetickou dráhou. Je nutné podotknout, že model neodpovídá realitě, jelikož nebyl brán v úvahu samotný smíšený stav supravodiče a síly jsou v realitě podstatně nižší. Ze závislosti níže je nicméně patrné, že Halbachovo uspořádání zesiluje výsledné magnetické pole nad dráhou, tj. magnetický tlak na diamagnetikum je větší. Ovšem vzhledem k náročnosti realizace Halbachova uspořádání byla jako konečná konfigurace magnetů zvolena konvenční varianta, která opět poskytuje homogenní magnetické pole orientované podél dráhy a samotné skládání magnetů navíc nevyžaduje použití lepidla. Další výhodou konvenčního uspořádání je větší volnost ve volbě tvaru neodymových magnetů, což se ve výsledku projeví nižšími náklady za magnety. Jedinou nevýhodou konvenčního uspořádání je slabší magnetické pole, což lze ovšem kompenzovat silnějšími (většími) magnety.

Tab. 4: Síly působící na YBCO supravodič pro dva koncepty uspořádání magnetů.

10 magnetů v řadě			
Halbachovo uspořádání		Konvenční uspořádání	
Mezera (mm)	$F_z$ (N)	Mezera (mm)	$F_z$ (N)
1	94,388	1	80,700
1,1	90,859	1,1	75,726
1,2	88,180	1,2	71,373
1,3	85,150	1,3	67,296
1,4	82,384	1,4	63,346
1,5	79,008	1,5	59,680

Srovnání sil působících na YBCO supravodič pro Halbachovo a konvenční uspořádání v závislosti na vzdálenosti od magnetů



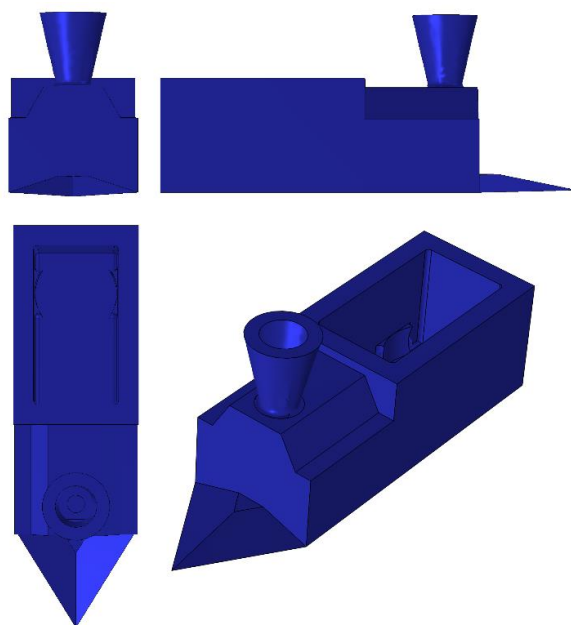
## 5.2 Návrh nádoby na tekutý dusík a dva YBCO supravodiče

Model vláčku byl vytištěn za pomoci 3D tiskárny a nese dva supravodiče YBCO, které jsou zasazeny do dvoudílných úchyťů a chlazeny určitým objemem tekutého dusíku ( $31 \div 34 \text{ cm}^3$ ). Prvním prototypem byla obyčejná krabička  $35 \times 35 \text{ mm}$  s tloušťkou stěn  $2 \text{ mm}$ , která sloužila pouze jako testovaný subjekt podrobený rychlému zchlazení. V *tab. 5* jsou shrnuty výsledky z testování odolnosti vybraných polymerních materiálů proti prudkému zchlazení na teplotu cca  $-196 \text{ °C}$  a následnému pádu z výšky  $60 \text{ cm}$ , kde se sledoval vznik prasklin.

Tab. 5: Výsledky testování odolnosti vybraných polymerních materiálů proti prudkému zchlazení a následnému pádu z výšky  $60 \text{ cm}$  (drop test).

Obchodní název	Výrobce	Materiál	Stav po zchlazení na cca $-196 \text{ °C}$	Drop test ( $60 \text{ cm}$ )
Prusa PLA	Neznámo	PLA	Bez prasklin a výrazných deformací	Vyhověly
Prusament PETG	Prusa Polymers	PET-G		
Prusa ABS-T	Neznámo	ABS-T		
Prusament PC Blend	Prusa Polymers	PC		
Fillamentum Nylon FX256	Fillamentum	Nylon		
Fillamentum Vinyl 303	Fillamentum	PVC		
HiTemp100 PETG	Spectrum	PET-G		
Flex TPS	Herz Tech Line FILAMENT	TPS		
Verbatim Durabio	Verbatim	PMMA		
ABS CNT	Kimya	ABS s karbonovými vlákny		
ABS Kevlar	Kimya	ABS s aramidovými vlákny		
ColorFab Copolyester	ColorFab	Copolyester		
ColorFab Copolyester CNT	ColorFab	Copolyester s karbonem		
Moldlay (wax)	LAYFilaments	Není specifikováno		
HD PLA	Fiberlogy	PLA	Bez prasklin, deformace způsobená rychlým zchlazením, ztráta flexibilního charakteru	
Fillamentum Flexfill 92A	Fillamentum	TPU		
Fillamentum Flexfill 98A	Fillamentum	TPU		
PM TPE 32D	Plasty Mladeč	TPE		
FilaFlex 70A	Recreus	TPU		
Fillamentum PP 2320	Fillamentum	PP		
Prusament ASA	Prusa Polymers	ASA	Vznik praskliny	Nevyhověl

Pro výsledný model, viz *obr. 31*, byl zvolen materiál Prusa PLA (polylaktidová vlákna), který se ze všech testovaných vzorků projevil jako nejodolnější. Dva YBCO supravodiče jsou uloženy ve dvoudílných nástavcích (součástí bočních stěn), které se po zchlazení smrští, a uchyťí tak oba supravodiče. Rozměry nástavců byly zvoleny 21,2 mm na průměr (rezerva 0,1 mm pro každý nástavec) a 8 mm na výšku (druhý nástavec je ve vnitřní části modelu a je příslušně snížen). Součástí níže uvedeného modelu je i svrchní víčko, které je z důvodu tepelné kontrakce vláčku, která po nalití tekutého dusíku postupuje od spodní části k horní, nutné realizovat s rozměry alespoň o 0,5 mm menší, než jsou rozměry příslušného otvoru za pokojové teploty. Za účelem snížení rychlosti odpařování tekutého dusíku je celý model realizován z voštinových stěn, které navyšují izolační schopnost nádoby. Důležitým faktorem, který zabraňuje prasknutí modelu po nalití tekutého dusíku (převážně ve spodní části boční stěny), je tloušťka stěn okolo 5 mm.

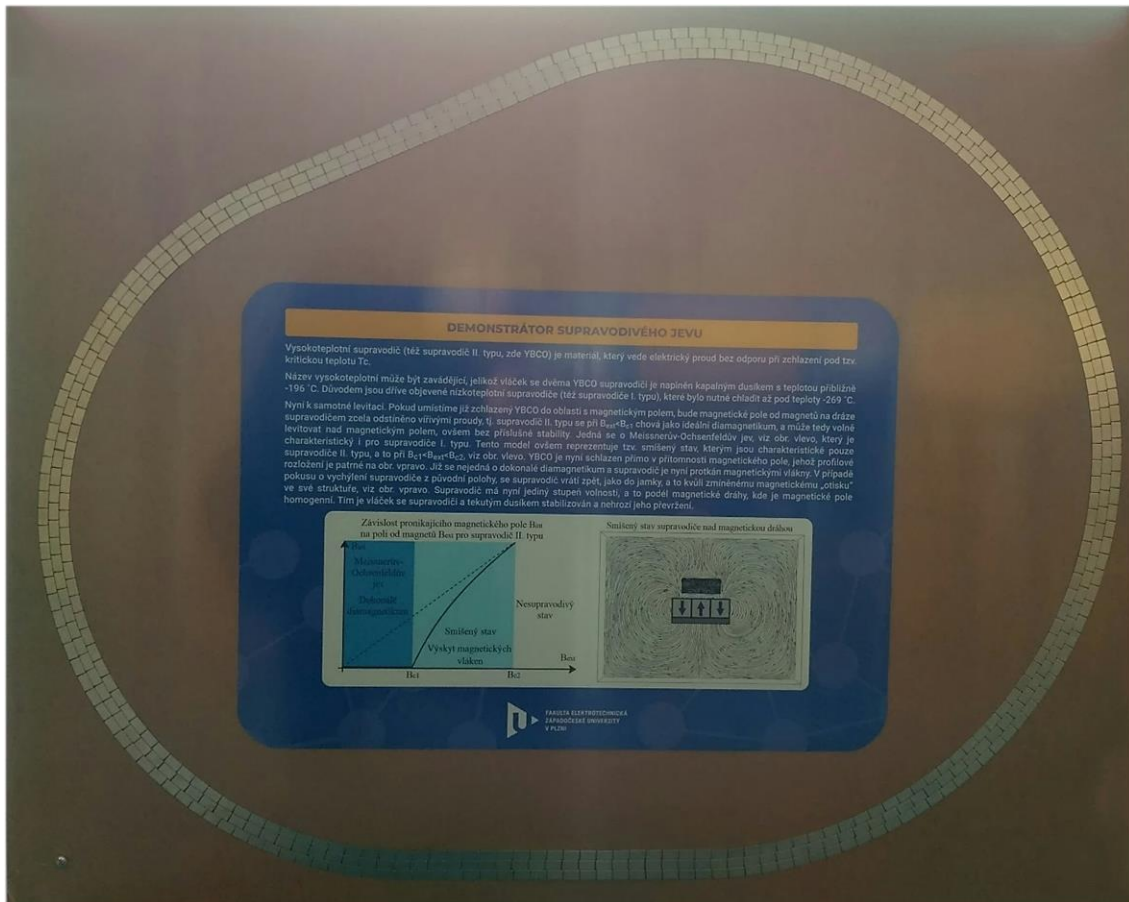


Obr. 31: Model vláčku vytvořený v softwaru SolidWorks a následně vytištěný za pomoci 3D tisku.

### 5.3 Návrh nosné platformy

Nosná platforma je MDF deska o rozměrech 1037×834 mm a tloušťce 18 mm, viz *obr. 32*, do které byla vyfrézována drážka pro ocelový prstenec nesoucí magnety. Svrchní část je tvořena průhlednou polymerní deskou (tloušťka 2 mm), která je k desce přišroubována čtyřmi šrouby v každém rohu. Pod polymerní deskou je volně vložen plakát (logo fakulty, text se stručným popisem reprezentovaného jevu, fázový diagram přechodu supravodiče do supravodivých stavů  $S^I$  a  $S^{II}$  a obrázek s profilovým rozložením magnetických indukčních čar nad dráhou, viz příloha 2 této práce). Aktuální plakát je proto možné nahradit jiným motivem, který bude lépe sloužit konkrétní situaci.





Obr. 32: Magnetická dráha zasazená do MDF desky a plakát s popisem demonstrovaného jevu.

## 6 Shrnutí praktické části

Praktická část mé diplomové práce (kapitola 5 *Realizace demonstrátoru supravodivého jevu*) podává ucelený průřez klíčovými kroky při realizaci supravodivého modelu vláčku, a to ve formě, která umožňuje případnou reprodukovatelnost celého projektu dalšími zájemci, či jeho možné rozšíření o nové prvky:

- *kontinuální pohyb vláčku po dráze* realizovatelný periodickým nakláněním dráhy elektromotorem, či jinými principy zahrnující použití čidel,
- *realizace modelu levitujícího setrvačnicku* v podobném formátu, jako je uvedeno zde,
- *rozbor polymerních materiálů za extrémně nízkých teplot*, a to z hlediska mechanické odolnosti či tepelné izolace,
- *optimalizace modelu vláčku* pomocí 3D tisku,
- *nové motivy* svrchní části magnetické dráhy (upravený text, grafy atd.),
- rozšíření kapitoly o *supravodivých materiálech* aj.

V průběhu realizace demonstrátoru supravodivého jevu bylo nutné postupně řešit problémy, které zasahovaly do několika různých technických oborů. Mezi cenné postřehy lze zahrnout:

- *řešení geometrie a rozměrů prstence* tak, aby v magnetické dráze nebyly příliš velké mezery mezi magnety v jednotlivých řadách a následná tvorba technické dokumentace (pro vyřízení ocelového prstence za pomoci vodního paprsku, či laseru a frézování do nosné MDF desky) bylo provedeno za pomoci skriptovacího jazyka Matlab. Zamezení vzniku mezer je spíše estetický detail, jelikož homogenita magnetického pole, důležitá pro kontinuální pohyb supravodiče, by v našem případě byla viditelně narušena (projevující se hopsáním supravodiče) až u mezery okolo 5 mm a lze předejít výběrem dostatečně malých magnetů, které plně pokryjí celý prstenec, či volbou jiného tvaru dráhy,
- *nutný přístup k tekutému dusíku a testování odolnosti vybraných polymerních materiálů* o složitých tvarech před prudkým zchlazením s ohledem na posílení tepelné izolace.

Výsledný model je k nahlédnutí na:

<https://www.youtube.com/watch?v=WHXmtijtVig>

## Použitá a doporučená literatura

### Supravodivost a její projevy

- [1] ODEHNAL, Milan. *Supravodivost a jiné kvantové jevy*. Academia, 1992, 380 s. ISBN 80-200-0225-1.
- [2] KULHÁNEK, Petr, 2004. *Vysokoteplotní supravodivost*. Aldebaran Bulletin, **2**(36). ISSN 1214-1674. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2004\\_36\\_hts.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_36_hts.php)
- [3] GREGOR, Vladimír, KUZNÍK, Jan, ODEHNAL, Milan, ŠEBEK, Josef, 1988. *Vysokoteplotní supravodivost – revoluce ve fyzice pevné fáze*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, **33**(2), s. 65-80. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/137708>
- [4] BABAEV, Egor, CARLSTROM, D., Johan, SILAEV, A., A., Mihail, SPEIGHT, J., Martin, 2017. *Type-1.5 superconductivity in multicomponent systems*. Physica C: Superconductivity and its Applications, **533**, s. 20-35. ISSN 0921-4534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2016.08.003>
- [5] OOMEN, M. Pieter. *AC loss in superconducting tapes and cables*. Eerste Uitgave, 2000, 179 s. ISBN 90-365-1444-4.
- [6] ZHANG, Hongye, GRILLI, Francesco , WEN, Zezhao , GYFTAKIS, N., Konstantinos, MUELLER, A., Markus, 2021. *Alternating Current Loss of Superconductors Applied to Superconducting Electrical Machines*. Energies, č. 22334, **14**(8). DOI: 10.3390/en14082234
- [7] PASQUINI, A., Thomas, LEANHARDT, E., Aaron, SABA, Michele, SANNER, Christian, SCHIROTZEK, Andre, SHIN, Yong-II, PRITCHARD, E., David, KETTERLE, Wolfgang, 2004. *Experiments with dilute Bose-Einstein condensates*. International Quantum Electronics Conference (IQEC), s. 285-286. DOI: 10.1364/IQEC.2004.IMM5
- [8] HE, Yusheng, MUIRHEAD, M., Chris, VINEN, F., William, 1998. *Paramagnetic Meissner effect in high  $T_c$  superconductors (I)*. Science in China Series A: Mathematics, **41**(6), s. 647-655. DOI: 10.1007/BF02876235

### Oblast supravodivých materiálů

- [9] AGRANOVSKI, E., Igor, ILYUSHECHKIN, Y., Alexander, ALTMAN, S., Igor, BOSTROM, E., Thor, CHOI, Mansoo, 2006. *Methods of Introduction of MgO Nanoparticles into Bi-2212/Ag Tapes*. Physica C: Superconductivity and Its Applications, **434**(1), s. 115-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2005.12.005>
- [10] EISTERER, Michael. *HTS versus LTS: physics, technology, and application prospects* [prezentace]. Atominstitut, TU Wien. 19.9. 2017 [cit. 3.11.2021].
- [11] POOLE, P. Charles. *Handbook of Superconductivity*. Academic Press, 2000, 693 s. ISBN 0-12-561460-8.



- [12] BUSSMANN-HOLDER, Annette, KELLER, Hugo, 2020. *High-temperature superconductors: underlying physics and applications*. Zeitschrift für Naturforschung B, **75**(1-2), s. 3-14. DOI: 10.1515/znb-2019-0103
- [13] SCANLAN, M., Ronald, MALOZEMOFF, P., Alexis, LARBALESTIER, C., David, 2004. *Superconducting Materials for Large Scale Applications*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **92**(10), s. 1639-1654. ISSN 1558-2256. DOI: 10.1109/JPROC.2004.833673
- [14] HOTT, Roland, KLEINER, Reinhold, WOLF, Thomas, ZWICKNAGL, Gertrud, 2016. *Review on Superconducting Materials*. Wiley – Encyclopedia of Applied Physics. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527600434.eap790>
- [15] DRÁPALA, Jaromír, KURSA, Miroslav. *Elektrotechnické materiály*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012, 439 s. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [16] ZEHETMAYER, Martin, HECHER, Johannes, 2014. *Testing  $V_3Si$  for two-band superconductivity*. Superconductor Science and Technology, č. 044006, **27**(4). Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/27/4/044006>
- [17] KAMPWIRTH, T., Robert a kol., 1985. *Application of NbN films to the development of very high field superconducting magnets*. IEEE Transactions on Magnetics, **21**(2), s. 459-462. DOI: 10.1109/TMAG.1985.1063679
- [18] BUREŠ, Jiří, 2002. *Jednotky a tabulky*. Úvod / Tabulky / Supravodiče [cit. 3.11.2021]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/supravodice.htm>
- [19] RAY, J., Pia, 2015. *Structural investigation of  $La_{2-x}Sr_xCuO_{4+y}$* . Kodaň. Disertační práce. Faculty of science, University of Copenhagen. Vedoucí práce Kim Lefmann a Linda Udby.
- [20] RUDZIAK, K., Mark, RENAULD, V., Charles, WONG, Terence a kol., 1995. *Development of APC Nb-Ti composite conductors at Supercon, Inc*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **5**(2), s. 1709-1712. ISSN 1558-2515. DOI: 10.1109/77.402906
- [21] RUPICH, W., Martin, LI, Xiaoping, SATHYAMURTHY, Srivatsan, THIEME, L., H., Cornelis, DEMORANVILLE, Kenneth, GANNON, John, FLESHLER, Steven, 2013. *Second Generation Wire Development at AMSC*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **23**(3), s. 6601205-6601209. ISSN: 1558-2515. DOI: 10.1109/TASC.2012.2235495
- [22] SNIDER, Elliot, DASENBROCK-GAMMON, Nathan, MCBRIDE, Raymond, DEBESSAI, Mathew, VINDANA, Hiranya, VENCATASAMY, Kevin, LAWLER, V., Keith, SALAMAT, Ashkan, DIAS, P., Ranga, 2020. *Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride*. Nature, č. 586, s. 373-377. DOI: 10.1038/s41586-020-2801-z
- [23] HOSONO, Hideo a kol., 2015. *Exploration of new superconductors and functional materials, and fabrication of superconducting tapes and wires of iron pnictides*. Science and Technology of Advanced Materials, č. 033503, **16**(3). DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/033503

- [24] SMITH, J.L., BROOKS, J.S., FOWLER, C.M. a kol., 1994. *Low-temperature critical field of YBCO*. J Supercond 7, 269–270. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00724550>

### Technologie na bázi supravodivosti

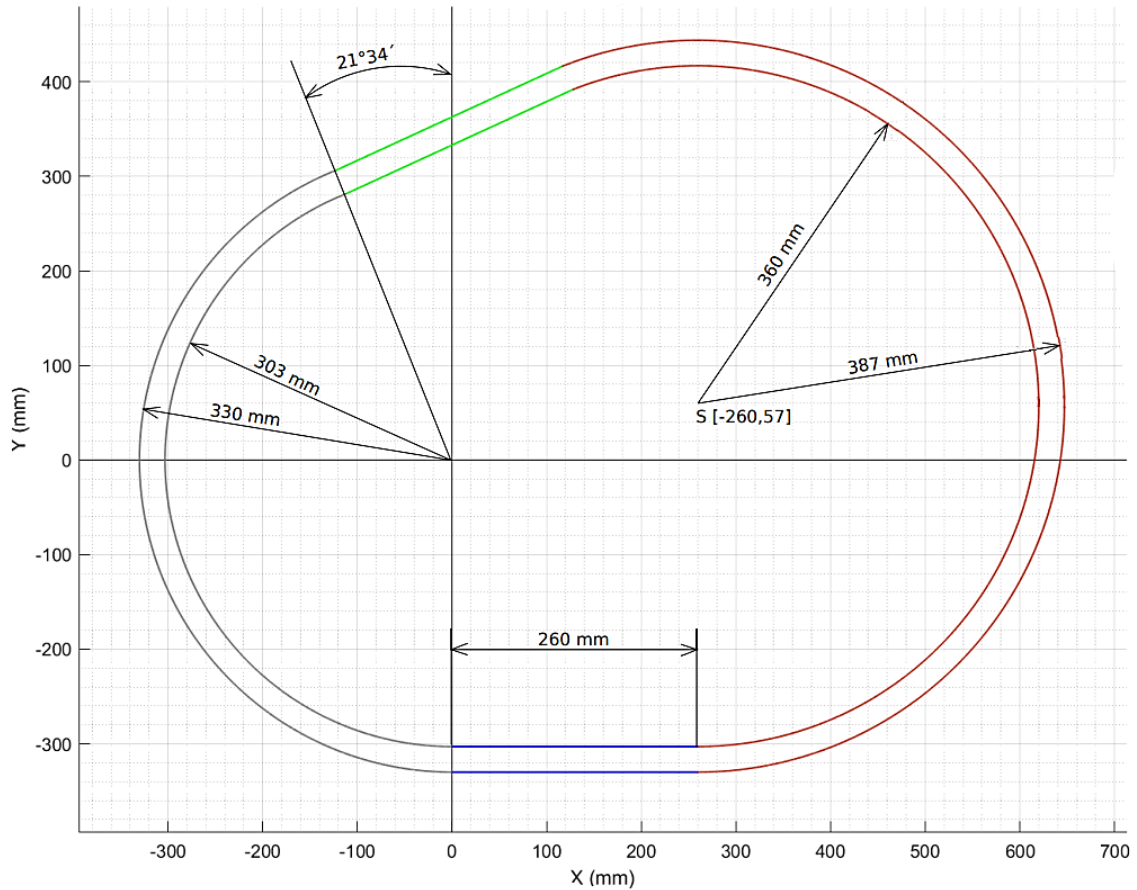
- [25] Svět Energie – Vzdělávací portál ČEZ. *Palivo*. Domů/Energetika zblízka/Jaderné elektrárny/Jaderná elektrárna podrobně/Charakteristika zdroje/Palivo [cit. 3.11.2021]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jadernoelektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/palivo>
- [26] ENTLER, Slavomír, MLYNÁŘ, Jan. *Spoutání slunce*. Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., 2016, e. č. 12031. ISSN 2464-6245.
- [27] Scientific Instrument Services (SIS). *Exact Masses of the Elements and Isotopic Abundances*. Home/MS/Heaters/Sensors/Agilent Heaters and Sensors/Literature/MS Online Tools/MS Links/Labs/ Organizations/Exact Masses of the Elements and Isotopic Abundances [cit. 3.11.2021]. Dostupné z: <https://www.sisweb.com/referenc/source/exactmas.htm>
- [28] ŘÍPA, Milan. *Historie výzkumu řízené termojaderné fúze*. Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., 2014. e. č. 11759.
- [29] ENTLER, Slavomír, MLYNÁŘ, Jan, DOSTÁL, Václav, 2016. TZB-info / Energetika / Elektroenergetika / *Základy fúzní energetiky I. – Historie, Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů, Základy fúzní energetiky III. – Reaktorové technologie, Základy fúzní energetiky IV. – Jaderné komponenty, Základy fúzní energetiky V. – Výroba elektřiny* [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14482-zaklady-fuzni-energetiky-i-historie>
- [30] MCCracken, Garry, STOTT, Peter. *Fúze – energie vesmíru*. Academia, 2. vydání, 2019. 333 s. ISBN 978-80-200-2986-7.
- [31] ITER Organization – Homepage. Photo/Technical [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <https://www.iter.org/>
- [32] MITCHELL, Neil a kol., 2021. *Superconductors for fusion: a roadmap*. Superconductor Science and Technology, č. 103001, **34**(10). Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ac0992>
- [33] WOLF, C., Robert, DINKLAGE, Andreas, HELANDER, Per, SCHAUER, Felix, PEDERSEN, S., Thomas, WARMER, Felix a kol., 2016. *Wendelstein 7-X Program— Demonstration of a Stellarator Option for Fusion Energy*. IEEE Transactions on Plasma Science, **44**(9), s. 1466-1471. ISSN: 1939-9375. DOI: 10.1109/TPS.2016.2564919
- [34] BRUZZONE, L., Pierluigi, 2010. *Superconductors for fusion: Achievements, open issues, roadmap to future*. Physica C: Superconductivity and its Applications, **470**(20), s. 1734-1739. ISSN 0921-4534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.196>
- [35] RUMMEL, Thomas, RISSE, Konrad, NAGEL, Michael, MÖNNICH, Thomas, FÜLLENBACH, Frank, BOSCH, Hans-Stephan, 2018. *Challenges for the Wendelstein 7-X Magnet Systems During the Next Operation Phase*. IEEE

- Transactions on Plasma Science, **46**(5), s. 1517-1521. DOI: 10.1109/TPS.2018.2816399
- [36] HASSENZAHL, V., William, HAZELTON, W., Drew, JOHNSON, K., Brian, KOMAREK, Peter, NOE, Mathias, REIS, T., Chandra, 2004. *Electric power applications of superconductivity*. Proceedings of the IEEE, **92**(10), s. 1655-1674. ISSN 1558-2256. DOI: 10.1109/JPROC.2004.833674
- [37] KLAUS, Gunar, WILKE, Markus, FRAUENHOFER, Joachim, NICK, Wolfgang, NEUMULLER, Heinz-Werner, 2007. *Design Challenges and Benefits of HTS Synchronous Machines*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, s. 1-8. ISSN: 1932-5517. DOI: 10.1109/PES.2007.385756
- [38] QI, Li, HJULER, H., Aage, FRELTOFT, Thorsten a kol., 1993. *Critical current density enhancement in Ag-sheathed Bi-2223 superconducting tapes*. Physica C: Superconductivity, **217**(3-4), s. 360-366. ISSN 0921-4534. DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(93\)90340-V](https://doi.org/10.1016/0921-4534(93)90340-V)
- [39] JIN, Jianxun, CHEN, Xiaoyuan, 2008. *Development of HTS transformers*. IEEE International Conference on Industrial Technology, s. 1-6. ISBN 978-1-4244-1705-6. DOI: 10.1109/ICIT.2008.4608455
- [40] Redakce Elektro, 2007. *Supravodivost – perspektivní technologie blízké budoucnosti*. Časopis Elektro, č. 1. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/obsah-cisla-01-2007--258>
- [41] ČERNÝ, Václav, 2006. *Supravodivost*. Časopis Elektro, č. 1-10. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/archiv>
- [42] DAI, Shaotao, MA, Tao, QIU, Qingquan, ZHU, Zhiqin, TENG, Yuping, HU, Lei, 2016. *Development of a 1250-kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **26**(1), s. 1-7. ISSN 1558-2515. DOI: 10.1109/TASC.2015.2501105
- [43] GIERAS, F., Jacek, 2009. *Superconducting Electrical Machines State of the Art*. Przegląd Elektrotechniczny, **85**(12), s. 1-19. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228619785\\_Superconducting\\_Electrical\\_Machines\\_State\\_of\\_the\\_Art](https://www.researchgate.net/publication/228619785_Superconducting_Electrical_Machines_State_of_the_Art)
- [44] Nexans – Electrify the Future. *Power Networks – Superconductivity* [cit. 7.11.2021]. Dostupné z: <https://www.nexans.com/newsroom/news/details/2020/06/nexans-wins-amsc-contract-chicago-resilient-electric-grid-project.html>
- [45] THOMAS, Heiko, MARIAN, Adela, CHERVYAKOV, Alexander, STÜCKRAD, Stefan, SALMIERI, Delia, RUBBIA, Carlo, 2016. *Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance?* Renewable and Sustainable Energy Reviews, **55**, s. 59-72. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.041>
- [46] MCCONNELL, W., Benjamin, 2005. *Applications of High Temperature Superconductors to Direct Current Electric Power Transmission and Distribution*.

- IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **15**(2). ISSN 1558-2515. DOI: 10.1109/TASC.2005.849479
- [47] Modern Power Systems. *Taking the best path to superconducting HVDC* [cit. 7.11.2021]. Dostupné z: <https://www.modernpowersystems.com/features/featuretaking-the-best-path-to-superconducting-hvdc-8786922/featuretaking-the-best-path-to-superconducting-hvdc-8786922-554631.html>
- [48] WEST, Beate, STEMMLE, Mark, BERRY, Jonathan, HOBL, Achim, 2015. *Commercial Application of Superconducting Fault Current Limiters in the Western Power Distribution Grid in the UK*. 23rd International Conference on Electricity Distribution. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/COMMERCIAL-APPLICATION-OF-SUPERCONDUCTING-FAULT-IN-West-Stemmler/7d5eec59d48c885671a5190ef27c22a47ffce286>
- [49] TESAŘOVÁ, Miloslava, 2003. *Současný Stav a Perspektivy Využití Supravodivých Komponent v ES*. Elektroenergetika 2003.
- [50] KIM, J., Min a kol., 2019. *Conceptual Design of a 25.8 kV, 2.0 kA Compact Resistive SFCL for Power System Interconnection*. 25th International Conference on Electricity Distribution, č. 549. ISBN 978-2-9602415-0-1. Dostupné z: <https://www.cired-repository.org/handle/20.500.12455/450>
- [51] WAGNER, Vladimír, 2018. *Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie*. oEnergetice: Akumulace energie [cit. 10.11.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>
- [52] GUPTA, Ramesh a kol., 2016. *Design, Construction, and Testing of a Large-Aperture High-Field HTS SMES Coil*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, č. 5700208, **26**(4), s. 1-8. DOI: 10.1109/TASC.2016.2517404
- [53] MOHAMMAD, M., G., Sayed a kol., 2017. *A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **67**, s. 477-490. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.060>
- [54] ASGHAR, A., A., Khodadoost a kol., 2017. *Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **69**, s. 9-18. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.166>
- [55] AMIRYAR, E., Mustafa, PULLEN, R., Keith, 2017. *A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications*. Applied Sciences, č. 286, **7**(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/app7030286>
- [56] ZMEKO, Filip, 2021. *Kalkulace síly působící na YBCO supravodič v magnetickém poli*. Plzeň. Semestrální projekt. Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí projektu Pavel Karban.

## Přílohy

**Příloha 1:** geometrie ocelového prstence a základní parametry modelu dopočtené z matlabovského skriptu, viz příloha 3.



Info_1	Radius_1	Radius_2	Upper	Bottom	Left	Right	Overall
"Vnitřní poloměr/délka/obvod (mm)"	303	360	263.79	260	825.38	1271.5	2620.7
"Počet magnetů (všechny řady)"			52.759	52	170.03	260.66	535.44
"Počet mag. v 1. řadě"			17.586	17.333	55.025	84.766	174.71
"Počet mag. v 2. řadě"			17.586	17.333	56.676	86.885	178.48
"Počet mag. v 3. řadě"			17.586	17.333	58.327	89.004	182.25

Info_2	Components
"Délka mag. (mm)"	15
"Šířka mag. (mm)"	9
"Tloušťka mag. (mm)"	5
"Počet magnetů"	534
"Celkové náklady za mag."	6425.3

## Příloha 2: grafický návrh svrchní části nosné desky.

DEMONSTRÁTOR SUPRAVODIVÉHO JEVU


Vysokoteplotní supravodič (též supravodič II. typu, zde YBCO) je materiál, který vede elektrický proud bez odporu při zchlazení pod tzv. kritickou teplotu  $T_c$ .

Název vysokoteplotní může být zavádějící, jelikož vláček se dvěma YBCO supravodiči je naplněn kapalným dusíkem s teplotou přibližně  $-196\text{ }^\circ\text{C}$ . Důvodem jsou dříve objevené nízkoteplotní supravodiče (též supravodiče I. typu), které bylo nutné chladit až pod teploty  $-269\text{ }^\circ\text{C}$ .

Nyní k samotné levitaci. Pokud umístíme již zchlazený YBCO do oblasti s magnetickým polem, bude magnetické pole od magnetů na dráze supravodičem zcela odstíněno vířivými proudy, tj. supravodič II. typu se při  $B_{\text{ext}} < B_{c1}$  chová jako ideální diamagnetikum, a může tedy volně levitovat nad magnetickým polem, ovšem bez příslušné stability. Jedná se o Meissnerův-Ochsenfeldův jev, viz obr. vlevo, který je charakteristický i pro supravodiče I. typu. Tento model ovšem reprezentuje tzv. smíšený stav, kterým jsou charakteristické pouze supravodiče II. typu, a to při  $B_{c1} < B_{\text{ext}} < B_{c2}$ , viz obr. vlevo. YBCO je nyní schlazen přímo v přítomnosti magnetického pole, jehož profilové rozložení je patrné na obr. vpravo. Již se nejedná o dokonalé diamagnetikum a supravodič je nyní protkán magnetickými vlákny. V případě pokusu o vychýlení supravodiče z původní polohy, se supravodič vrátí zpět, jako do jamky, a to kvůli zmíněnému magnetickému „otisku“ ve své struktuře, viz obr. vpravo. Supravodič má nyní jediný stupeň volnosti, a to podél magnetické dráhy, kde je magnetické pole homogenní. Tím je vláček se supravodiči a tekutým dusíkem stabilizován a nehrozí jeho převržení.

Závislost pronikajícího magnetického pole  $B_{\text{int}}$  na poli od magnetů  $B_{\text{ext}}$  pro supravodič II. typu

Smíšený stav supravodiče nad magnetickou dráhou



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY  
V PLZNI

## Příloha 3: algoritmus pro vykreslení požadované geometrie dráhy a výpočet základních parametrů.

```
%Zadávané parametry (délky v mm)
%Při napsání velkého písmena T1 a T2 do Command Window se
vypíše tabulka
%Poloměr levé kružnice R1 ≥ R2!

R1 = 303;           %Poloměr levé kružnice
R2 = 360;           %Poloměr pravé kružnice
D1 = 260;           %Vodorovná vzdálenost mezi kružnicemi
Mag_a = 15;         %Délka magnetu (strana vnitřního obvodu dráhy)
Mag_b = 9;          %Šířka magnetu (určuje tloušťku dráhy)
Mag_c = 5;          %Tloušťku magnetu
Price_Mag = 12;     %Cena za jeden magnet (Kč)
r = 10.5;           %Poloměr supravodiče
Rows = 3;           %Počet rad magnetu (neměnitelný parametr)

D2 = (D1^2+(2*R2-2*R1)^2)^(0.5);
alfa = acos(D1/D2);
a = 1+(tan(alfa))^2;
b = tan(alfa)*(4*R1-2*R2)-2*D1;
c = D1^2+4*(R1)^2-4*R1*R2;

x1b = (-b-(b^2-4*a*c)^(0.5))/(2*a);
```

```

x2b = (-b+(b^2-4*a*c)^(0.5))/(2*a);
x3b = x1b+((x2b-x1b)/2);

aa = 1;
bb = -2*(R2-R1);
cc = (R2-R1)^2-R2^2+x3b^2-2*x3b*D1+D1^2;

y1b = (-bb+(bb^2-4*aa*cc)^(0.5))/(2*aa);
y2b = (-bb-(bb^2-4*aa*cc)^(0.5))/(2*aa);
y3b = max(y1b,y2b);

aaa = 1+(tan(alfa))^2;
bbb = 2*R1*tan(alfa);
ccc = 0;

x1a = (-bbb-(bbb^2-4*aaa*ccc)^(0.5))/(2*aaa);
x2a = (-bbb+(bbb^2-4*aaa*ccc)^(0.5))/(2*aaa);
x3a = x1a/2;
y3a = (R1^2-x3a^2)^(0.5);

A = (y3b-y3a)/(x3b-x3a);
B = y3a-x3a*((y3b-y3a)/(x3b-x3a));

osaxy = -1.5*R1:0.1:1.5*(D1+R2);
osa_y = 0*osaxy;
osa_x = 0*osaxy;

x1 = x3a:0.1:x3b;
x2 = 0:0.1:D1;
y1 = A*x1+B;
y2 = 0*x2-R1;
x11 = (x3a-Rows*Mag_b*sin(atan((y3b-
y3a)/(abs(x3a)+x3b)))):0.1:(x3b-Rows*Mag_b*sin(atan((y3b-
y3a)/(abs(x3a)+x3b))));
x22 = 0:0.1:D1;
y11 = A*x11+B+Rows*Mag_b/(cos(atan((y3b-
y3a)/(abs(x3a)+x3b))));
y22 = 0*x22-R1-Rows*Mag_b;
xa1 = -R1:0.1:x3a;
xa2 = -R1:0.1:0;
xb1 = x3b:0.1:(D1+R2);
xb2 = D1:0.1:(D1+R2);
y1a = (R1^2-xa1.^2).^^(0.5);
y2a = -(R1^2-xa2.^2).^^(0.5);
y1b = R2-R1+(R2^2-(xb1-D1).^2).^^(0.5);
y2b = R2-R1-(R2^2-(xb2-D1).^2).^^(0.5);
xa11 = -(R1+Rows*Mag_b):0.1:(x3a-Rows*Mag_b*sin(atan((y3b-
y3a)/(abs(x3a)+x3b))));
xa22 = -(R1+Rows*Mag_b):0.1:0;
xb11 = (x3b-Rows*Mag_b*sin(atan((y3b-
y3a)/(abs(x3a)+x3b)))):0.1:(D1+R2+Rows*Mag_b);

```



```

xb22 = D1:0.1:(D1+R2+Rows*Mag_b);
y11a = ((R1+Rows*Mag_b)^2-xa11.^2).^0.5;
y22a = -((R1+Rows*Mag_b)^2-xa22.^2).^0.5;
y11b = R2-R1+((R2+Rows*Mag_b)^2-(xb11-D1).^2).^0.5;
y22b = R2-R1-((R2+Rows*Mag_b)^2-(xb22-D1).^2).^0.5;

x3 = ((D1/2)-r):0.1:((D1/2)+r);
ya3 = -R1-((3*Mag_b)/2)+(r^2-(x3-(D1/2)).^2).^0.5;
yb3 = -R1-((3*Mag_b)/2)-(r^2-(x3-(D1/2)).^2).^0.5;

x4 = ((D1/2)-3*r):0.1:((D1/2)-r);
ya4 = -R1-((3*Mag_b)/2)+(r^2-(x4-((D1/2)-2*r)).^2).^0.5;
yb4 = -R1-((3*Mag_b)/2)-(r^2-(x4-((D1/2)-2*r)).^2).^0.5;

Info_1 = ["Vnitřní poloměr/délka/obvod (mm)"; "Počet magnetu
(všechny řady)"; "Počet mag. v 1. řadě"; "Počet mag. v 2.
řadě"; "Počet mag. v 3. řadě"; "Náklady za dráhu
(Kč)"; "Přibližná mezera (mm)"];
Radius_1 = [R1;0;0;0;0;0;0];
Radius_2 = [R2;0;0;0;0;0;0];

Inner_right = (pi+atan((D1-x3b)/(y3b-R2+R1)))*R2;
Middle_right = (pi+atan((D1-x3b)/(y3b-R2+R1)))*(R2+Mag_b);
Outer_right = (pi+atan((D1-x3b)/(y3b-R2+R1)))*(R2+2*Mag_b);
Outer_right_2 = (pi+atan((D1-x3b)/(y3b-
R2+R1)))*(R2+Rows*Mag_b);
Amount_right_1 = (Inner_right/Mag_a);
Amount_right_2 = (Middle_right/Mag_a);
Amount_right_3 = (Outer_right/Mag_a);
Amount_right = Amount_right_1+Amount_right_2+Amount_right_3;
Price_right = Price_Mag*Amount_right;
Gap_right = (Outer_right_2-
Amount_right_1*Mag_a)/(Amount_right_1+1);

Inner_left = (pi-atan(abs(x3a)/y3a))*R1;
Middle_left = (pi-atan(abs(x3a)/y3a))*(R1+Mag_b);
Outer_left = (pi-atan(abs(x3a)/y3a))*(R1+2*Mag_b);
Outer_left_2 = (pi-atan(abs(x3a)/y3a))*(R1+Rows*Mag_b);
Amount_left_1 = (Inner_left/Mag_a);
Amount_left_2 = (Middle_left/Mag_a);
Amount_left_3 = (Outer_left/Mag_a);
Amount_left = Amount_left_1+Amount_left_2+Amount_left_3;
Price_left = Price_Mag*Amount_left;
Gap_left = (Outer_left_2-
Amount_left_1*Mag_a)/(Amount_left_1+1);

Inner_upper = ((abs(x3a)+x3b)^2+(y3b-y3a)^2)^0.5;
Amount_upper = Rows*(Inner_upper/Mag_a);
Amount_upper_1 = (Inner_upper/Mag_a);
Price_upper = Price_Mag*Amount_upper;

```

```

Inner_bottom = D1;
Amount_bottom = Rows*(Inner_bottom/Mag_a);
Amount_bottom_1 = (Inner_bottom/Mag_a);
Price_bottom = Price_Mag*Amount_bottom;

Upper =
[Inner_upper;Amount_upper;Amount_upper_1;Amount_upper_1;Amount
_upper_1; Price_upper;0];
Bottom =
[Inner_bottom;Amount_bottom;Amount_bottom_1;Amount_bottom_1;
Amount_bottom_1;Price_bottom;0];
Left =
[Inner_left;Amount_left;Amount_left_1;Amount_left_2;Amount_lef
t_3;
Price_left;Gap_left];
Right =
[Inner_right;Amount_right;Amount_right_1;Amount_right_2;Amount
_right_3;
Price_right;Gap_right];

Info_2 = ["Délka mag. (mm)";"Šířka mag. (mm)";"Tloušťka mag.
(mm)";"Poloměr YBCO";"Celkové náklady"];
Components = [Mag_a;Mag_b;Mag_c;r;
(Price_upper+Price_bottom+Price_left+Price_right)];

Lenght = Inner_upper+Inner_bottom+Inner_left+Inner_right;
Amount = Amount_upper+Amount_bottom+Amount_left+Amount_right;
Amount_1 =
Amount_upper_1+Amount_bottom_1+Amount_left_1+Amount_right_1;
Amount_2 =
Amount_upper_1+Amount_bottom_1+Amount_left_2+Amount_right_2;
Amount_3 =
Amount_upper_1+Amount_bottom_1+Amount_left_3+Amount_right_3;
Price = Price_upper+Price_bottom+Price_left+Price_right;
Overall = [Lenght;Amount;Amount_1;Amount_2;Amount_3;Price;0];

Info_3 = ["Levá kružnice";"Pravá kružnice"];
Points_X = [x3a;x3b];
Points_Y = [y3a;y3b];

T1 =
table(Info_1,Radius_1,Radius_2,Upper,Bottom,Left,Right,Overall
);
T2 = table(Info_2,Components);
T3 = table(Info_3,Points_X,Points_Y);

figure(1);
hold on;
p =
plot(osaxy,osa_x,osa_y,osaxy,xa1,y1a,xa2,y2a,xb1,y1b,xb2,y2b,x
1,y1,x2,y2);

```

```
f =
plot(x11,y11,x22,y22,xa11,y11a,xa22,y22a,xb11,y11b,xb22,y22b);
pp = plot(x3,ya3,x3,yb3,x4,ya4,x4,yb4);
p(1).Color = [0,0,0];
p(2).Color = [0,0,0];
p(3).LineWidth = 1;
p(3).Color = [0.5,0.5,0.5];
p(4).LineWidth = 1;
p(4).Color = [0.5,0.5,0.5];
p(5).LineWidth = 1;
p(5).Color = [0.8,0.2,0.1];
p(6).LineWidth = 1;
p(6).Color = [0.8,0.2,0.1];
p(7).LineWidth = 1;
p(7).Color = 'g';
p(8).LineWidth = 1;
p(8).Color = 'b';
f(1).LineWidth = 1;
f(1).Color = 'g';
f(2).LineWidth = 1;
f(2).Color = 'b';
f(3).LineWidth = 1;
f(3).Color = [0.5,0.5,0.5];
f(4).LineWidth = 1;
f(4).Color = [0.5,0.5,0.5];
f(5).LineWidth = 1;
f(5).Color = [0.8,0.2,0.1];
f(6).LineWidth = 1;
f(6).Color = [0.8,0.2,0.1];
pp(1).Color = [0,0,0];
pp(2).Color = [0,0,0];
pp(3).Color = [0,0,0];
pp(4).Color = [0,0,0];
title('Dráha pro vlak');
xlabel('X (mm)');
ylabel('Y (mm)');
grid on
grid minor
axis('equal');
set(gca,'xlim',[-1.3*R1,1.15*(D1+R2)]);
set(gca,'ylim',[-1.3*R1,1.15*(2*R2-R1)]);
```