

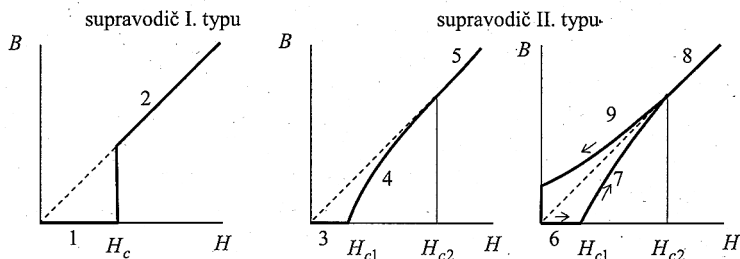
Setrvačník na supravodivém ložisku*

Vladimír Vicha**, Miroslav Pošta, Hanuš Seiner, Gymnázium Pardubice, Dašická ul.

Supravodivost rtuti objevil roku 1911 Kamerlingh Onnes při kritické teplotě $T_c = 4,2\text{ K}$. Vysokoteplotní supravodivost sloučeniny La-Ba-Cu-O ohlásili v roce 1987 Bednorz a Müller při kritické teplotě okolo 90 K. To umožnilo nahradit chlazení drahým heliem levnějším kapalným dusíkem, jehož teplota varu je za normálního tlaku 77 K, a který je poměrně snadno dostupný i pro experimenty na školách (vlastní ho každé kožní oddělení).

Supravodivost se projevuje vymizením odporu k nule. Tento jev ale ve škole demonstrovat většinou nelze, protože vyžaduje speciální aparaturu. Zaměřili jsme se proto na experimentování se supravodičem v magnetickém poli.

Bylo zjištěno, že supravodivý stav může být zrušen největším magnetickým polem, které překročí svou intenzitou jistou kritickou hodnotu. U prvků k tomu stačí magnetické pole o nízké intenzitě, u některých sloučenin supravodivost existuje i ve velmi silných magnetických polích. Supravodiče podle jejich chování ve vnějším poli o intenzitě H můžeme rozdělit na supravodiče I. a II. typu, a ty ještě na homogenní a nehomogenní. Rozdíly vysvětlují následující grafy:



Obr. 1: B – magnetická indukce uvnitř supravodiče, H – intenzita vnějšího magnetického pole, 1, 3, 6 – supravodič v Meissnerově fázi, 4, 7, 9 – smíšený stav (dvě fáze), 2, 5, 8 – normální (nesupravodivý) stav.

Meissnerova fáze je stav, kdy z objemu supravodiče je vytlačeno magnetické pole, což lze prakticky demonstrovat tak, že supravodič a magnet se odpužují. Položíme-li tedy na supravodič o složení Y-Ba-Cu-O o průměru 20 mm silný magnet tvaru hranolku o hraně 2–3 mm a zalijeme kapalným dusíkem, dojde po vychlazení supravodiče pod T_c k nadzdvihnutí magnetu. Levitace magnetu nad supravodičem je důsledkem Meissnerova jevu. Takovýto supravodič se dá vyrobit při dodržení technologie slinováním při teplotě např. 940 °C. Odpudivá síla je však malá a těžší magnet již nelevituje.

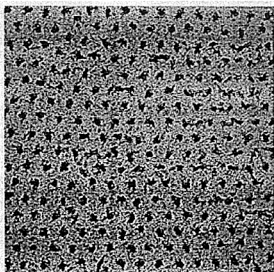
Zajímavější levitaci umožňují nehomogenní supravodiče Y-Ba-Cu-O II. typu, který vyrábí pražská firma CAN SUPERCONDUCTORS***. Jde o texturovaný vysokoteplotní supravodič připravený růstem z taveniny se zárodkem a rozhodující význam pro jeho vlastnosti mají de-

* Článek je výtahem ze studentské práce, která obsadila v roce 1999 v celostátním kole Středoškolské odborné činnosti 1.–3. místo, v soutěži AMAVET 1. místo a reprezentovala tak Českou republiku na mezinárodní výstavě ESI 99 v Mexiku.

** vlada.vicha@seznam.cz

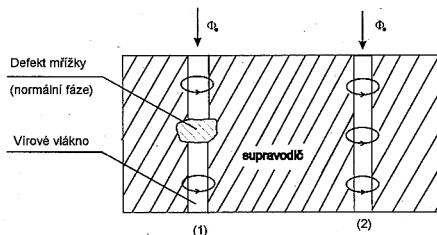
*** Informace o pomůckách pro demonstraci supravodivosti firmy CAN SUPERCONDUCTORS najdete na internetové stránce <http://www.can.cz>.

fekty krystalové mřížky. Při zvýšení intenzity nad H_{c1} začne magnetické pole pronikat do objemu supravodiče jako vírová vlákna, pro něž jsou defekty jakýmsi záchytnými centry.

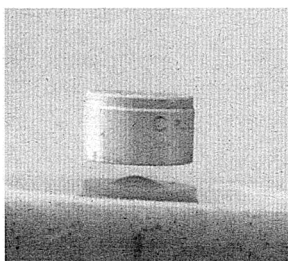


Obr. 2: Uspořádání vírových vláken, která jsou zviditelněna pomocí jemného feromagnetického prášku – snímek z elektronového mikroskopu. Zvětšení 8 300.

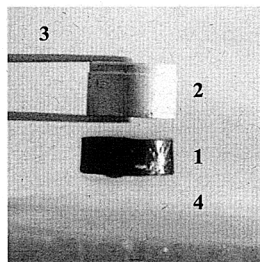
Převzato z knihy: Kittel, Ch.: Úvod do fyziky pevných látek, Academia, Praha 1985.



Obr. 3: Pronikání indukčního toku do nehomogenního supravodiče.



Obr. 4: Demonstrace odpudivé síly. Magnet levituje nad supravodičem.

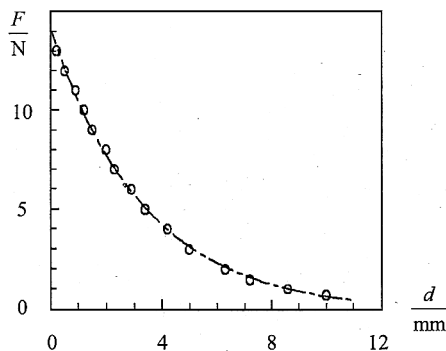


Obr. 5: Demonstrace přitažlivé síly. Zdvihnutím levitujícího magnetu se za ním zdvihne i supravodivá tableta, která po chvíli odpadne, protože supravodič již není chlazen.

1 – supravodivá tableta, 2 – silný magnet, 3 – pinzeta, 4 – miska s kapalným dusíkem, z níž byl supravodič vytažen

Provedeme experiment: Na zmíněný supravodič tvaru válce o průměru 21 mm a výšce 8,5 mm položíme distanční destičku o tloušťce 1,5 mm a na ni větší silný magnet tvaru válce o průměru 15 mm, výšce 10 mm a hmotnosti 16,5 g. Zalijeme kapalným dusíkem a po několika minutách vyjmeme destičku. Magnet levituje. Část magnetického indukčního toku vystupujícího z magnetu byla „zachycena“ v supravodiči a mezi oběma objekty teď existují jak odpudivé, tak přitažlivé síly bránící vzájemné změně polohy.

Odpudivá síla závisí na vzdálenosti a dosahuje tak vysokých hodnot, že nás to inspirovalo k myšlence „zavěsit“ nad supravodič setrvačnick, který bychom roztáčeli na vysoké otáčky a při snímání jeho frekvence vyhodnocovali tlumení pohybu. Možná, že by se tak dala akumulovat kinetická energie.

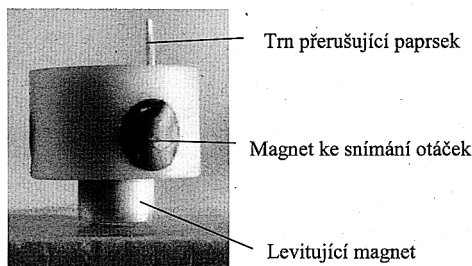


Obr. 6: Graf závislosti levitační odpudivé síly na vzdálenosti supravodiče a magnetu. Převzato z dokumentace firmy CAN SUPERCONDUCTORS.

METODA MĚŘENÍ A MĚŘICÍ APARATURA

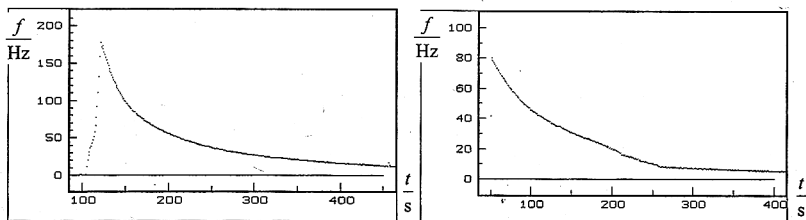
Supravodivá tableta Y-Ba-Cu-O je vložena do misky z izolačního pěnového polystyrenu. Mezi supravodič a levitátor (magnet) je vložena distanční podložka široká asi 1,5 mm a tableta je zalita kapalným dusíkem. Po 1 až 2 minutách je supravodič vychlazen pod kritickou teplotu a můžeme vyjmout podložku. Setrvačnick připevněný na levitujícím magnetu roztáčíme třecí spojkou pomocí elektromotorku (stejnoseměrný 6 V, 5 A, 30 000 otáček za minutu) až asi na 13 000 otáček za minutu¹. Dusík se intenzivně vypařuje, proto je třeba jej dolévat. Otáčky jsme měřili opticky pomocí přerušování laserového paprsku. Zhotovená fotobuňka byla napojena přes voltmetr systému ISES na počítač. Program vytvořený v jazyce Turbo Pascal 7.0 a v assembleru (využití obvodu 8254) zaznamenával závislost poklesu otáček na čase.

Jako kontrolní měření sloužilo snímání frekvence napětí, které trojice magnetů osazených v setrvačnicku indukovala do přiblížené cívky.



Obr. 7: Základem setrvačnicku je válec ze silonu o průměru 44 mm a výšce 26 mm. V něm jsou osazeny 3 válcové magnety, nahoře je kuželový otvor pro třecí spojkou a kovový trn přerušující laserový paprsek. Hmotnost včetně levitujícího magnetu činí 71 g.

¹ Drsný kužel nasazený na ose elektromotorku zapadá do kuželového otvoru v horní podstavě setrvačnicku. Pákovým mechanismem se přibližuje až k setrvačnicku a pomocí reostatu se pak zvyšují otáčky elektromotorku. Při citlivém přitlačení nabere setrvačnick otáčky, třecí spojka se zdvihne a nedochází k žádným precesím. Setrvačnick



Obr. 8: Ukázky typických závislostí frekvence na čase získaných optickým měřením

Pokles frekvence je vždy zpočátku velmi rychlý, ale později se udržují otáčky kolem 10 Hz několik minut. Pohyb ustává zhruba za 20 minut.

Pokusili jsme se provést rozbor brzdění setrvačnicku. Rotace je brzděna zřejmě těmito mechanismy:

1. Aerodynamicky třením povrchu setrvačnicku o vzduch a unikající chladný dusík.
2. Interakcí mezi magnetem a supravodičem, která vznikla při „zamrznutí“ magnetického indukčního toku, případně Foucaultovými proudy.

Teoreticky lze vliv všech těchto mechanismů na brzdění rotace setrvačnicku jen stěží vyřešit pomocí rovnic. Přitom kvantitativní popis má zásadní význam pro návrhy aplikací – např. jako akumulace rotační energie.

Rozhodli jsme se proto získat funkční závislost frekvence na čase regresí z naměřených dat. Při volbě regrese je však nutné navrhnout funkci, která se bude metodou nejmenších čtverců do naměřených dat aproximovat.

Vyjdeme z pohybové rovnice pro rotující těleso: $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M$, kde J je moment setrvačnosti vzhledem k rotační ose setrvačnicku, ω je úhlová frekvence, M je moment brzdících sil.

Budeme předpokládat závislost M na ω . Řešením pohybové rovnice získáme vztah pro závislost frekvence na čase (tab. 1).

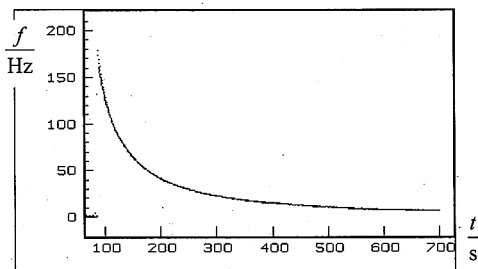
	Předpokládaná závislost momentu M na ω	Závislost frekvence f na čase t
1	$M = -\alpha \cdot \omega$	$f = f_0 \cdot e^{-\frac{\alpha}{J}t}$
2	$M = -\beta \cdot \omega^2$	$f = \frac{1}{\frac{2 \cdot \pi \cdot \beta}{J} \cdot t + \frac{1}{f_0}}$
3	$M = -\alpha \cdot \omega - \beta \cdot \omega^2$	$f = \frac{1}{A + B \cdot e^{ct}}$

Tab. 1: Závislost frekvence na čase je výsledkem řešení pohybové rovnice

V rovnicích v tab. 1 je f_0 počáteční frekvence, f frekvence v čase t , α a β jsou konstanty, $A = \frac{-2 \cdot \pi \cdot \beta}{\alpha}$, $B = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \beta + \alpha}{\alpha \cdot f_0}$, $c = \frac{\alpha}{J}$.

je totiž i v klidu v rovnovážné poloze stabilní, což je zásadní rozdíl proti mechanickému setrvačnicku např. na hrotu, u kterého můžeme precese snadno pozorovat.

Proložením křivek do grafu pomocí systému Famulus a výpočtem koeficientu korelace R se ukázalo, že třetí závislost popisuje chování rotoru nejlépe.



Obr. 9: Experimentální data a graf proložené funkce (tab. 2, měření č. 1) v obrázku splývají. Koeficient korelace $R = 0,998\ 5$.

Číslo měření	Doba měření	{A}	{B}	{c}	R
1	610 s	-0,078 9	0,072 6	0,001 75	0,998 5
2	325 s	-0,038 2	0,033 4	0,002 90	0,999 2
3	455 s	-0,054 7	0,055 7	0,001 88	0,999 6
4	650 s	-0,067 0	0,070 2	0,002 15	0,998 0
Průměrná hodnota		-0,059 7	0,058 0	0,002 17	0,999 8
Směrodatná odchylka aritmetického průměru		0,008 7		0,000 26	
Relativní odchylka		15 %		12 %	

Tab. 2: Koeficient korelace R v posledním sloupci se velice blíží jedné, což znamená dobrou shodu mezi experimentálními daty a aproximovanou funkcí.

Různost parametrů A , c při opakování pokusů je způsobena především odlišností v počátečním uchycení setrvačnicku při vychlazení supravodiče. Svůj vliv měla jistě i vznikající námraza na setrvačnicku a případný sklon rotační osy při roztáčení. V hodnotě parametru B se projevuje různá počáteční frekvence.

DISKUSE APROXIMOVANÉ FUNKCE

V předchozím textu jsme hovořili o možnosti akumulace energie v rotačním pohybu setrvačnicku. Nyní, když jsme našli funkci popisující závislost frekvence na čase, můžeme postupit dále. Pokud se počáteční frekvence f_0 blíží k nekonečnu, platí

$$\lim_{f_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{A + B \cdot e^{ct}} = \frac{1}{A \cdot (1 - e^{ct})}$$

Parametr B se již v zápisu funkce neobjevuje a funkce má v nulovém čase osu f jako asymptotu. Důsledkem je rychlý pokles frekvence setrvačnicku i z velmi vysokých otáček. Abychom získali lepší kvantitativní představu o tomto poklesu, provedli jsme výpočet vycházející z funkcí tab. 2.

Pokles na: Měření číslo	500 Hz	200 Hz	100 Hz	50 Hz	25 Hz	10 Hz
1	14 s	35 s	68 s	129 s	234 s	468 s
2	18 s	42 s	80 s	145 s	247 s	443 s
3	19 s	47 s	89 s	166 s	292 s	553 s
4	14 s	33 s	65 s	121 s	218 s	425 s

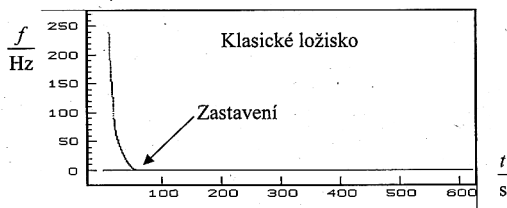
Tab. 3: Tabulka demonstruje, jak by z nekonečna klesaly otáčky setrvačnicku v závislosti na čase. Každý řádek tab. 3 se vztahuje k odpovídajícímu řádku tab. 2.

Podle měření č. 1 by frekvence z nekonečných otáček klesla na 500 Hz za 14 s. Přestože na tak vysokých otáčkách jsme neměřili, dá se očekávat, že moment brzdících sil bude větší nebo roven momentu, který předpokládáme v tab. 1 (řádek 3). Z toho vyplývá, že skutečná doba poklesu na 500 Hz bude menší než 14 s.

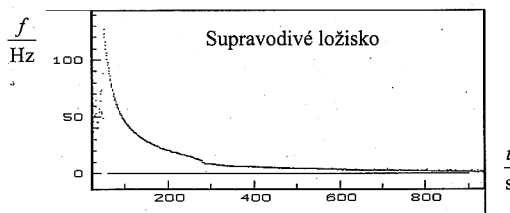
Pokud bychom technicky dále zdokonalovali naše zařízení (uvedený setrvačnick byl šestý ve vývojové řadě), mohli bychom se sice dostat k ještě vyšším otáčkám, ale setrvání na nich by bylo časově velice krátké.

POROVNÁNÍ SUPRAVODIVÉHO A KLASICKÉHO (KULIČKOVÉHO) LOŽISKA

Pro porovnání vlastností supravodivého ložiska s běžným modelářským ložiskem jsme upravili setrvačnick. Při návrhu jsme nahradili magnet takovým uložením ložiska, aby se moment setrvačnosti nezměnil. Roztočili jsme setrvačnick a získali grafy odpovídající obr. 10.



Obr. 10: Pokles otáček na kuličkovém ložisku



Obr. 11: Pokles otáček na supravodivém ložisku

Pokles otáček u kuličkového ložiska je velmi rychlý a k zastavení dochází zhruba po minutě.

Na supravodivém ložisku vykazují naměřené grafy závislosti frekvence rotujícího setrvačnicku na čase (obr. 11) opakovaně průběh, který bychom mohli rozdělit do tří oblastí:

1. Oblast od nejvyšších dosažených frekvencí (u nás asi 215 Hz) do frekvencí okolo 25 Hz. Zde pozorujeme poměrně rychlý pokles frekvence.
2. V oblasti okolo 25 Hz se často graf mění z konvexního na konkávní a opět na konvexní.
3. Oblast frekvencí menších než asi 10 Hz, kde frekvence pomalu klesá k nule a setrvačnick se točí 10 až 15 min, než jeho frekvence klesne na asi 2 Hz.

ZÁVĚR

Při porovnání se setrvačnickem usazeným na kuličkovém ložisku je vidět především rozdíl v rychlosti poklesu frekvence v 1. oblasti, průběh druhé oblasti také můžeme zaznamenat. Hlavní rozdíl je ale vidět ve 3. oblasti, která u kuličkového ložiska prakticky neexistuje.

Jestliže jsme na počátku práce uvažovali o možnosti akumulovat rotační energii, po řadě měření můžeme učinit tyto závěry:

1. Rotor se nám podařilo roztočit na otáčky zhruba 13 000 otáček za minutu. Rotuje velmi klidně a nezpůsobuje viditelné vibrace stojanu z plastické hmoty, nad nímž setrvačnick levituje. Rotor na klasickém ložisku roztočený na tytéž otáčky způsoboval velmi silné vibrace plastové trubky doprovázené daleko slyšitelným zvukem. Na podstavci se samy začaly povolovat matky, což svědčí o potřebě dynamického vyvážení, které jsme z technických důvodů neprováděli. Pokles otáček na supravodivém ložisku je však tak rychlý, že vysoké frekvence se nehodí pro akumulaci energie. Výborně se však supravodivé ložisko osvědčuje jako tiché, nevibrační a s malým momentem brzdících sil.
2. V oblasti 2 začínají otáčky rotoru nečekaně více klesat, více než napovídá dosavadní průběh grafu. Viditelně se uplatňuje další fyzikální faktor. Současně byly pozorovány zvětšené vibrace plastového podstavce a rotor začal jevit precesní pohyb. Usoudili jsme, že dochází k rezonanci a předávání energie podstavci. Při zpevnění podstavce se předávání energie poněkud zmenšilo. Tato oblast by se hodila k bezkontaktnímu zjišťování rezonančních vlastností určitých mechanických soustav.
3. Třetí oblast, ve které rotor setrvává nejdéle, je od frekvencí nižších než asi 10 Hz. Zde by se dal setrvačnick využít k akumulaci energie. Vyzkoušeli jsme „odebíráni“ energie ve formě elektrické – indukování napětí do přiblížené cívky.

Na počátku naší dvouleté práce jsme se snažili získat především po internetu informace o supravodivých ložiscích. Dozvěděli jsme se pouze o jedné německé a jedné americké letecké firmě, které ložiska vyrábějí. Žádné zajímavé podrobnosti nebyly ale uvedeny. Zdá se, že využití supravodičů pro tento účel není zatím příliš rozšířené a technické podrobnosti nejsou zveřejňovány. Jednou z hlavních příčin bude jistě i nutnost trvalého chlazení na poměrně nízké teploty.

Naše práce byla spíše krůčkem do budoucnosti. Supravodiče by měly chlazení „zadarmo“ v kosmickém prostoru a na různých tělesech sluneční soustavy. Pro větší rozšíření na Zemi by bylo třeba vyrobit stabilní supravodič s ještě vyšší kritickou teplotou.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Technická dokumentace firmy CAN SUPERCONDUCTORS dodávaná k pomůcce „Sada pro demonstraci supravodivosti 2“.
- [2] Frei V.: *Fyzika pevných látek*. Slovenské pedagogické nakladatelstvo, Bratislava 1986.
- [3] Kuba J.: *Supravodivé materiály*. ČVUT, Praha 1982.
- [4] Dvořák L., Sobotka M., Ledvinka M.: *Famulus 3.5 – Příručka pro uživatele*. Praha 1992.
- [5] Lustig F., Lustigová Z., Vlášek P.: *Školní experimentální systém ISES*. Praha 1992.