

Visokotemperaturni supravodiči

Devčić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:882070>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-13**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

IVAN DEVČIĆ

VISOKOTEMPERATURNI SUPRAVODIČI

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**VISOKOTEMPERATURNI SUPRAVODIČI
HIGH TEMPERATURE SUPRACONDUCTORS
ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Brodski električni strojevi

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Vučetić

Student: Ivan Devčić

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065794

Rijeka, rujan 2022.

Student/studentica: Ivan Devčić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065794

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

Visokotemperaturni

supravodiči

(naslov završnog rada)

izradio/la samostalno pod mentorstvom

PROF. DR. SC. DUBRAVKO

VUČETIĆ

(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom _____

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke _____

(naziv tvrtke).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica

Devčić

Ime i prezime studenta/studentic

Student/studentica: Ivan Devčić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065794

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica – autor



(potpis)

SAŽETAK

U radu su obrađeni visokotemperaturni supravodiči i njihova današnja primjena. Visokotemperaturnim supravodičima (HTSC) električni otpor naglo pada točno na nulu kada se ohlade na ili ispod temperature koja se naziva kritična temperatura. Supravodljivost je 1911. godine otkrio nizozemski fizičar Heike Kamerlingh Onnes. Supravodiči se prema ponašanju u magnetskom polju klasificiraju na TIP I i TIP II. Postoje također i niskotemperaturni supravodiči kojima je kritična temperatura ispod 30 K. Objašnjene su teorije supravodljivosti, koje nas upućuju u strukturu i principe djelovanja supravodljivih elemenata. Opisana je i tehnološka primjena supravodiča koja se svakodnevno koristi u medicini, znanosti i energetici.

Ključne riječi: električni, kritična temperatura, supravodljivost, supravodiči, strojevi

SUMMARY

The paper deals with high-temperature superconductors and their current application. High-temperature superconductors (HTSC) have electrical resistance that drops to exactly zero when cooled to or below a temperature called the critical temperature. Superconductivity is 1911. discovered by Dutch physicist Heike Kamerlingh Onnes. Superconductors are classified according to their behavior in a magnetic field into TYPE I and TYPE II. There are also low-temperature superconductors whose critical temperature is below 30 K. Superconductivity theories are explained, which guide us to the structure and principles of operation of superconducting elements. The technological application of superconductors, which is used every day in medicine, science and energy, is also described.

Key words: electrical, critical temperature, superconductivity, superconductors, machines

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. FIZIKALNE OSNOVE SUPRAVODLJIVOSTI.....	2
2.1. POVIJESNI RAZVOJ	2
2.2. KRITIČNE VRIJEDNOSTI	6
2.3. MEISSNEROV EFEKT	7
2.4. PODJELA SUPRAVODIČA.....	9
2.4.1. Supravodiči tipa I.....	9
2.4.2. Supravodiči tipa II	10
2.5. VISOKOTEMPERATURNI SUPRAVODIČI.....	12
2.5.1. LTSC (low temperature superconducotors)	12
2.5.2. HTSC (high temperature superconducotors)	13
2.5.3. Kuprati.....	14
2.5.4. Supravodiči sa željeznom bazom	16
3. TEORIJE SUPRAVODIČA.....	17
3.1. KLASIČNA TEORIJA VODLJIVOSTI	17
3.2. FENOMENOLOŠKE TEORIJE SUPRAVODLJIVOSTI	18
3.2.1. Londonova teorija	18
3.2.2. Ginzburg–Landauova teorija.....	19
3.3. Mikroskopska (BCS) teorija supravodljivosti.....	20
4. PRAKTIČNA PRIMJENA SUPRAVODIČA	24
4.1. TEHNIČKI PROBLEMI PRIMJENE.....	24
4.1.1. Hlađenje	24
4.1.2. Magnetsko polje.....	25
4.1.3. Izmjenične struje.....	25
4.2. KABELI	26
4.3. ELEKTROMAGNETI.....	29
4.4. ELEKTRIČNI GENERATORI.....	32
4.5. ELEKTROMOTORI.....	36
4.6. LEVITIRAJUĆI VLAKOVI.....	38
4.7. MAGNETOHIDRODINAMIČKA PROPULZIJA	41

4.8. MR DIJAGNOSTIKA	43
5. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA	48
POPIS SLIKA.....	53
POPIS OZNAKA	54
POPIS KRATICA	56

1. UVOD

U ovome radu obrađena je tema visokotemperaturnih supravodiča od njihovog otkrića, pa sve do najnovijih spoznaja i upotrebe. Visokotemperaturni supravodiči vrlo su interesantni zbog njihovih svojstava i široke upotrebe. Pojam supravodiča odnosi se na fenomen kod kojeg dolazi do nestajanja električkog otpora i potiskivanja magnetskog polja iz unutarnjeg dijela vodiča do kojeg dolazi na vrlo niskoj temperaturi. Od njenog otkrića supravodljivost je postala vrlo značajna u znanstvenim istraživanjima štobzirom da su od tada svakih nekoliko godina znanstvenici pronašli nova svojstva supravodljivosti, primjerice pojavu zvanu Meissnerov efekt i razvoj raznih teorija supravodiča od kojih je najviše proučavana BCS teorija. Primjena supravodljivih materijala danas je veoma raširena upravo zbog njihovih svojstava koja omogućuju prijenos energije bez gubitaka te stvaranje izuzetno jakog magnetskog polja. Raširenost primjene supravodljivih materijala očituje se u primjeni u medicini i kod prijevoznih sredstava poput vlaka Maglev u Japanu i Kini. Tema rada obrađena je pomoću adekvatne literature, pouzdanih podataka i dosadašnjih saznanja o pojmu supravodiča. Uz uvod i zaključak rad je strukturiran u još tri poglavlja. U drugom poglavlju obrađene su fizikalne osnove supravodljivosti, povijesni razvoj supravodiča, te meissnerov efekt. Također je detaljno obrađena i podjela supravodiča. Treće poglavlje objašnjava teorije supravodiča. Predstavljene su 4 osnovne teorije supravodljivosti, od kojih je najinteresantnija BCS teorija. U četvrtom poglavlju obrađena je praktična primjena supravodiča s posebnim osvrtom na probleme tehničke naravi. Svrha rada je prikazati i detaljno razraditi pojam visokotemperaturnih supravodiča dok je cilj rada ukazati na važnost otkrića i primjene visokotemperaturnih supravodiča. Danas se pokušavaju razviti supravodiči pri sobnoj temperaturi, koji bez toplinske izolacije i kriogenih sustava provodili električnu energiju bez gubitka u dalekovodima ali i u našim svakodnevnim električnim uređajima. Postojanje fenomena supravodljivosti zaintigiralo je mnoge znanstvenike te se zbog toga u budućnosti očekuju nova otkrića i napredci u razvoju supravodljivosti.

Metode korištene pri izradi ovog završnog rada su metoda sistematizacije, metoda klasifikacije, metoda deskripcije i metoda kompilacije.

2. FIZIKALNE OSNOVE SUPRAVODLJIVOSTI

Supravodiči su materijali koji, kada se ohlade ispod sobne temperature, pokazuju nagli pad električnog otpora materijala točno na nulu pri temperaturi koja se naziva kritična temperatura, T_c . Fenomen supravodljivosti je otkrio Heike Kamerlingh Onnes 1911. godine kada je proučavao svojstva žive na temperaturi tekućega helija. Većina supravodiča prve generacije bili su elementarni metali i metalne legure [1].

Supravodljivost je skup fizikalnih svojstava uočenih u određenim materijalima gdje električni otpor naglo nestaje. Svaki materijal koji pokazuje ta svojstva je supravodič. Za razliku od običnoga metalnog vodiča, čiji se otpor postupno smanjuje kako se njegova temperatura spušta (sve do apsolutne nule), supravodič ima karakterističnu kritičnu temperaturu ispod koje otpor naglo pada na nulu. Električna struja kroz petlju supravodljive žice može i bez izvora energije teći zauvijek.

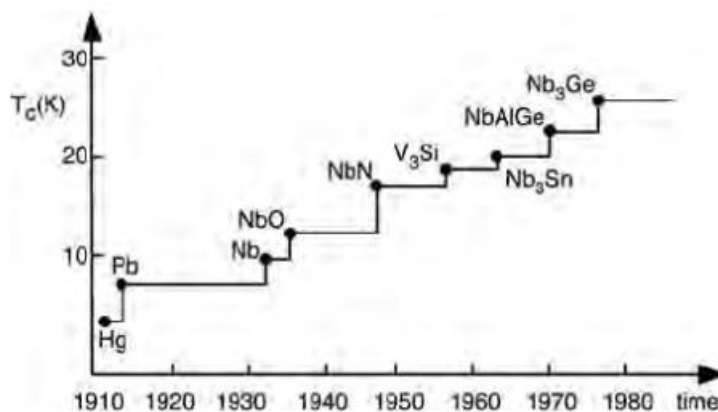
2.1. POVIJESNI RAZVOJ

Bilo je potrebno gotovo 50 godina dok se 1957. nije razvila mikroskopska teorija supravodljivosti, takozvana BCS teorija. Nakon njezina otkrića pronađeni su brojni supravodljivi materijali s prijelaznim temperaturama ispod 23 K. Veliki napredak na tom polju dogodio se 1986. godine kada su Bednorz i Müller otkrili potpuno novu klasu supravodiča. To iznenađujuće otkriće pokrenulo je nova istraživanja na polju fundamentalne fizike, znanosti o materijalima i mogućim tehnološkim primjenama supravodiča.

Nakon što je dokazana supravodljivost u živi, istražen je niz metala za koje je također utvrđeno da su supravodljivi, ali samo na vrlo niskim temperaturama. Najviša prijelazna temperatura $T_c = 9,25$ K u elementarnim metalima izmjerena je kod niobija. Kako bi se supravodiči ohladili na tako niske temperature, mora se koristiti prilično skup sustav hlađenja na bazi tekućeg helija. Tek 1950. godine otkriveni su supravodiči A15, koji su dosegli $T_c =$

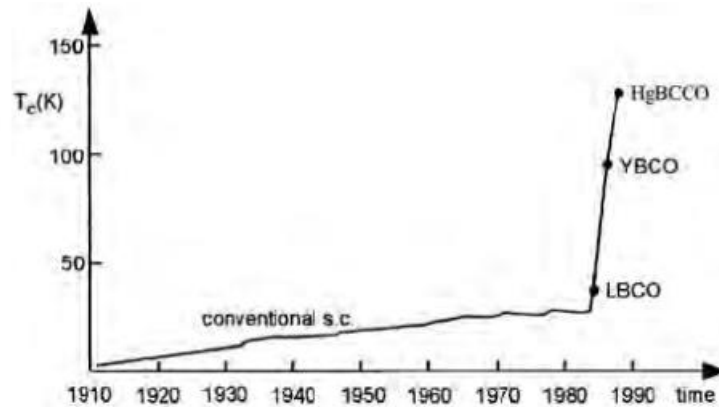
23,2 K. Godine 1986. Bednorz i Müller pronašli su novu klasu supravodiča – keramičke, takozvane kupratne, visokotemperaturne supravodiče - s trenutačno najvećim $T_c = 135$ K pri atmosferskom tlaku (slika 2). Samo godinu dana kasnije dobili su Nobelovu nagradu za fiziku.

Otkrićem keramičkih kuprata započela je nova era u istraživanju supravodljivosti pa su u samo nekoliko mjeseci rekordne temperature T_c premašile vrelište tekućega dušika i potakle rašireniju primjenu supravodiča. Međutim, nedostatak kuprata njihova je keramička priroda koja materijal čini lomljivim i teškim za obradu, što je u međuvremenu tehnološkim razvojem djelomično prevladano. Niz godina pretpostavljalo se da su kuprati jedinstveni i jedini pravi visokotemperaturni supravodiči, sve dok 2001. godine Akimitsu i suradnici nisu otkrili su još jedan visokotemperaturni supravodič - Magnezij diborid MgB_2 s $T_c = 39$ K.



Slika 1. Rast kritične temperature T_c u prvih 70 godina od otkrića supravodljivosti

Izvor: https://www.researchgate.net/publication/226563775_History_of_Superconductivity_Conventional_HighTransition_Temperature_and_Novel_Superconductors [1]



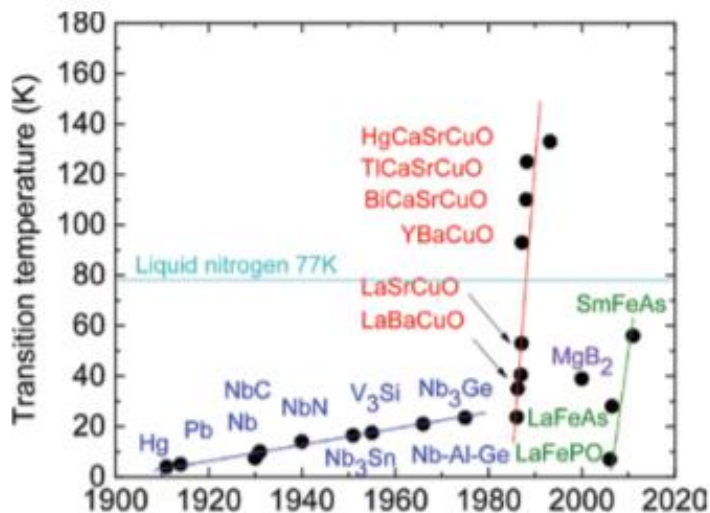
Slika 2. Porast kritične temperature nakon otkrića kuprata 1986. godine

Izvor: https://www.researchgate.net/publication/226563775_History_of_Superconductivity_Conventional_HighTransition_Temperature_and_Novel_Superconductors [1]

U ožujku 2001. pronađen je magnezijски diborid (MgB_2), supravodič s kritičnom temperaturom 39 K. 2008. godine otkriveni su oksipniktidi odnosno supravodiči na bazi željeza, što je dovelo do niza znanstvenih istraživanja u nadi da će njihovo proučavanje iznjedriti teoriju koja bi objasnila ponašanje kupratnih supravodiča.

2013. godine supravodljivost pri sobnoj temperaturi postignuta je u Itrij barijevom bakrenom oksidu (YBCO) korištenjem kratkih impulsa infracrvenog laserskog svjetla za deformaciju kristalne strukture materijala [18]. 2017. godine sugerirano je da bi neotkriveni materijali mogli biti kandidati za novi supravodič s T_c znatno višim od HgBaCuO (138 K), vjerojatno do 233 K, što bi bilo više čak i od sumporovodika H_2S . Mnoga istraživanja sugeriraju da bi nikal, dodatno mogao zamijeniti bakar u nekim perovskitima, nudeći drugi put do supravodljivosti kod sobne temperature [19-21].

Od otkrića visokotemperaturne supravodljivosti u kupratima, iščekivanja postizanja supravodljivost pri sobnoj temperaturi (RT) znatno se povećalo a time i intenzitet istraživačkih aktivnosti u tom smjeru.



Slika 3. Prikaz prijelazne temperature

Izvor: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1911/1911.02303.pdf> [45]

Od 2020. materijal s najvišom prihvaćenom temperaturom supravodljivosti je ugljični sumpor hidrid. Pod ekstremnim tlakom od 267 GPa postignuta je kritična temperatura prijelaza od +15 °C na. [31]. Pri atmosferskom tlaku temperaturni rekord još uvijek drže kuprati, koji su pokazali supravodljivost na temperaturama do 138 K (-135 °C).

Godine 2015. godine članak Instituta Max Planck objavljen u časopisu Nature objavio je da je pod određenim uvjetima H₂S prešao u supravodljivi oblik H₃S na 150 GPa (oko 1,5 milijuna puta veći od atmosferskog tlaka) u ćeliji dijamantnog nakovnja. Kritična temperatura bila je 203 K (-70 °C) [32]. Njihova istraživanja sugeriraju da bi drugi vodikovi spojevi mogli biti supravodljivi već kod 260 K (-13 °C) [33][34]. I zaista, 2018. godine istraživači su primijetili moguću supravodljivu fazu na 260 K (-13 °C) u dekahidridu lantana ali naravno pri ekstremno visokom tlaku od 200 GPa [35].

Neki istraživački naponi trenutno se kreću prema ternarnim superhidridima, gdje se predviđa da će Li₂MgH₁₆ (bilitij magnezijev heksadekahidrid) imati T_c kod 473 K (200 °C) na 250 GPa [36] [37].

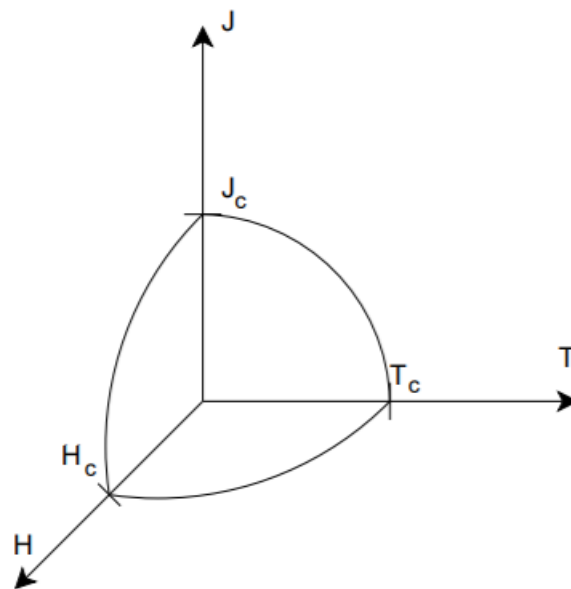
U listopadu 2020. zabilježena je supravodljivost temperaturi od 288 K (15 °C) u ugljičnom sumporovom hidridu koji je pokrenut u kristalizaciju putem zelenog lasera pri vrlo visokom tlaku (267 GPa) [38][39].

U ožujku 2021. u najavljena je supravodljivost na sobnoj temperaturi u slojevitom materijalu itrij-paladij-hidron na 262 K i tlaku od 187 GPa. Paladij može djelovati kao katalizator migracije vodika u materijalu. [38]

2.2. KRITIČNE VRIJEDNOSTI

Postojanje supravodljivog stanja ograničeno je s tri međusobno ovisne kritične vrijednosti: temperaturom T_c , magnetskim poljem H_c i gustoćom struje J_c .

Ovisnost između njih grafički je prikazana na slici 4. Što je veće magnetsko polje i gustoća struje, to je niža kritična temperatura.

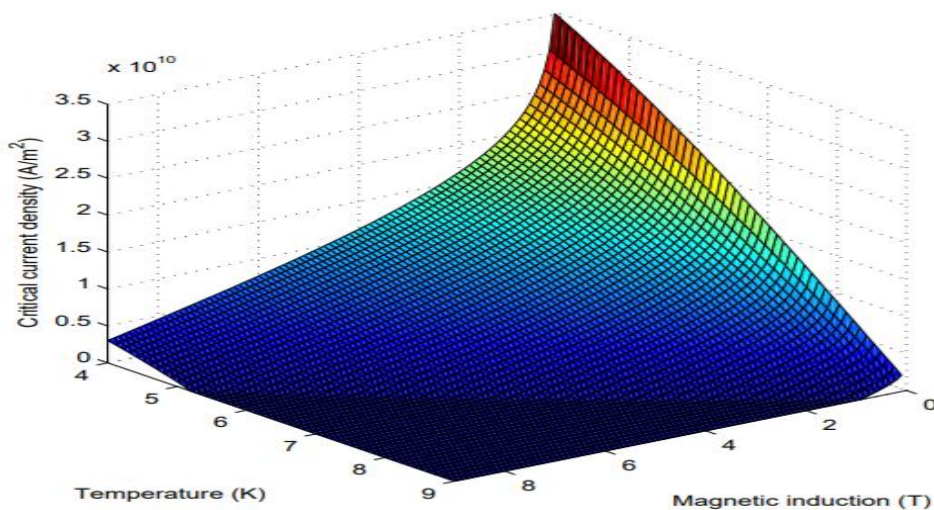


Slika 4. Tri kritične vrijednosti supravodiča

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Three-critical-values-of-a-superconductor_fig1_337683212

[46]

Supravodič je u supravodljivom stanju kada su svi parametri ispod kritičnih vrijednosti. Primjer kritične površine NbTi (nobilij-titanij) prikazan je na slici 5.



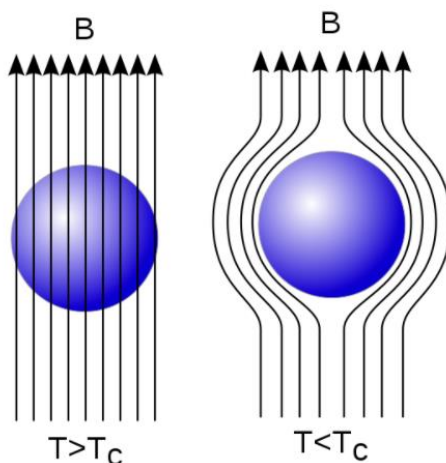
Slika 5. Površina kritične jakosti struje

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Three-critical-values-of-a-superconductor_fig1_337683212 [46]

2.3. MEISSNEROV EFEKT

Meissnerov efekt opisuje ponašanje supravodljivoga materijala kada se stavi u magnetsko polje. Otkrili su ga W. Meissner i R. Ochsenfeld u Njemačkoj 1933. godine.

Kada se supravodljivi materijal na temperaturi $T > T_c$, stavi u vanjsko magnetsko polje, silnice magnetske indukcije očekivano prolaze kroz njega. Kada se, međutim, ohladi ispod kritične temperature $T < T_c$, i prema tome pređe u supravodljivo stanje silnice magnetske indukcije se istiskuju iz njega (Slika 6.) Meissnerov efekt je najpoznatiji po demonstracijama levitacije supravodiča iznad permanentnog magneta i obratno (slika 7.).

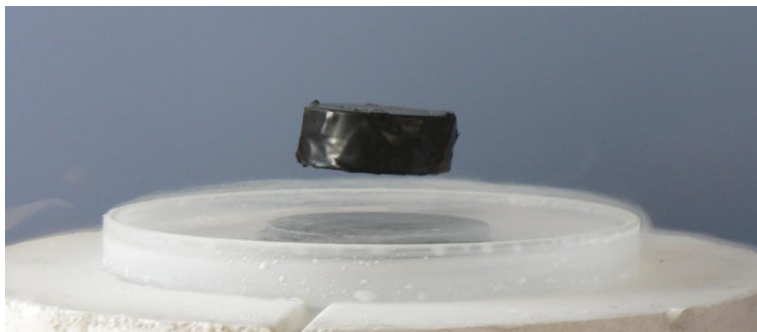


Slika 6. Dijagram Meissnerovog efekta. Silnice magnetskog polja, izbačene su iz supravodiča kada je ispod svoje kritične temperature.

Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Meissner_effect [44]

Kako se supravodič u magnetskom polju hladi do temperature na kojoj naglo gubi električni otpor, izbacuje se iz njega cijelo ili dio magnetskoga polja. Relativno slaba magnetska polja potpuno se odbijaju od unutrašnjosti svih supravodiča, ali ipak ulaze u površinski sloj. Vanjsko magnetsko polje može biti toliko jako da onemogući prijelaz supravodiča u supravodljivo stanje, u kojem slučaju ne dolazi do Meissnerova učinka.

Neki supravodiči, nazvani tip I (na primjer kositar i živa), mogu se izraditi tako da pokazuju potpuni Meissnerov učinak uklanjanjem različitih kemijskih nečistoća i fizičkih nedostataka te odabirom odgovarajućega geometrijskog oblika i veličine. Ostali supravodiči, nazvani tip II (primjerice vanadij i niobij), pokazuju samo djelomični Meissnerov učinak pri srednjim jakostima magnetskoga polja bez obzira na njihov geometrijski oblik ili veličinu. Supravodiči tipa II pokazuju smanjenje izbacivanja magnetskoga polja s povećanjem njegove jakosti sve dok, u relativno jakim magnetskim poljima, naglo ne prestanu biti supravodiči.



Slika 7. Meissnerov efekt [44]

Izvor: <https://www.britannica.com/science/Meissner-effect>

2.4. PODJELA SUPRAVODIČA

Postoje dva glavna tipa supravodiča. Klasificiraju se prema tome kako reagiraju u magnetskom polju, a to su:

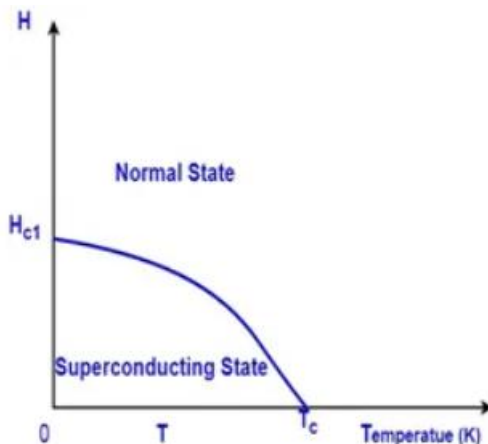
- Tip I: Obično se izrađuju od čistog metala koji, kada se ohladi ispod svoje kritične temperature, pokazuje nulti otpor i pokazuje savršen dijamagnetizam. To znači da magnetska polja ne mogu prodrijeti u njega dok je u supravodljivom stanju.
- Tip II: Ovi su supravodiči obično legure i njihov dijamagnetizam je složeniji.

2.4.1. Supravodiči tipa I

Supravodiči tipa I uglavnom se sastoje od metala i metaloida koji pokazuju određenu vodljivost na sobnoj temperaturi. Kritično magnetsko polje ovisi o tome koliko je materijal ispod kritične temperature.

Prvi su otkriveni i zahtijevaju najniže temperature da bi postali supravodljivi. Oni pokazuju vrlo oštar skok u supravodljivo stanje i „savršeni“ dijamagnetizam, odnosno sposobnost potpunog odbijanja magnetskog polja.

Prijelaz iz supravodljivog stanja u normalno stanje zbog vanjskog magnetskog polja je oštar kao što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Granice supravodljivog stanja ovisno o temperaturi i jakosti magnetskog polja

Izvor: <http://www.superconductors.org/Type1.htm> [63]

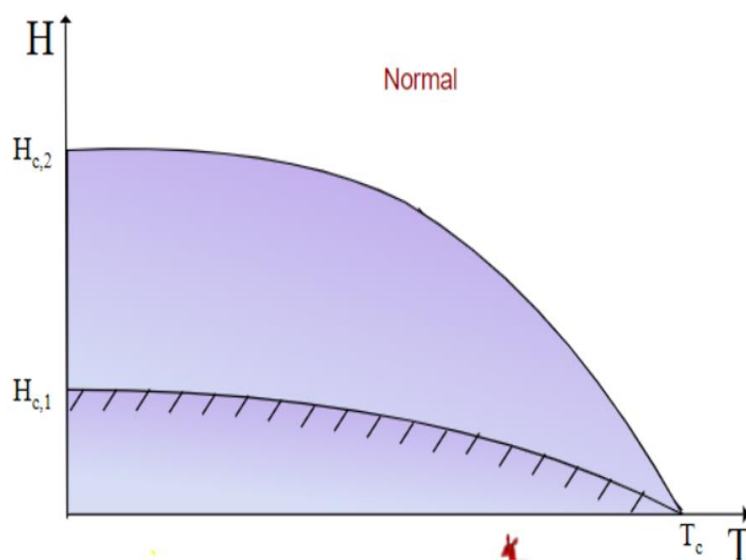
Osnovna svojstva supravodiča tipa I:

- niska kritična temperatura (obično u rasponu od 0 K do 10 K)
- nisko kritično magnetsko polje (obično u rasponu od 0,0000049 A/m do 1 A/m)
- ima jedno kritično magnetsko polje
- pokazuju savršeni dijamagnetizam
- primjeri: Hg, Pb, Zn...

2.4.2. Supravodiči tipa II

Supravodiči tipa II - također poznati kao „tvrđi“ supravodiči - razlikuju se od tipa I po tome što je njihov prijelaz iz normalnog u supravodljivo stanje postupan u području tzv. „mješovitog stanja“ kao što je prikazano na slici 9.

S druge strane, supravodiči tipa II pokazuju slično ponašanje tako što u potpunosti isključuju magnetsko polje ispod niže vrijednosti kritičnog polja i ponovno postaju normalni na gornjem kritičnom polju. Međutim, kada je magnetsko polje između ovih donjih i gornjih kritičnih polja, supravodič ulazi u mješovito stanje kada postoji djelomični prodor magnetskog toka. Kako bi se smanjila ukupna magnetska energija, materijal omogućuje snopovima toka da prodru u supravodič. Unutar ovih niti je vrlo jako magnetsko polje pa se supravodič vraća u normalno stanje. Oko svake od niti postoji kružni vrtlog struje koji se suprotstavlja polju unutar jezgre. Ovaj raspored osigurava da materijal izvan ovih snopova ostane u supravodljivom stanju.



Slika 9. Ovisnost magnetskog polja o temperaturi kod supravodiča tipa II

Izvor: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/superconductivity/type.php> [47]

Osnovna svojstva supravodiča tipa II:

- visoka kritična temperatura (obično veća od 10 K)
- visoko kritično magnetsko polje (obično veće od 1 A/m)
- djelomično se javlja Meissnerov efekt, ali ipak ne u potpunosti pa magnetsko polje može prodrijeti unutar materijala
- imaju dva kritična magnetna polja
- primjeri: NbTi, Nb₃Sn...

2.5. VISOKOTEMPERATURNI SUPRAVODIČI

Visokotemperaturni supravodiči (HTS) smatraju se definiranim materijalima koji se ponašaju kao supravodiči na temperaturama višim od 78 K. Ova je granica postavljena jer je 78 K vrelište dušika, odnosno temperatura koja se postiže isparavanjem tekućeg dušika. Dušik se smatra najdostupnijim kriogenim rashladnim sredstvom [2, 3]. Sve vrste supravodiča trenutno u primjeni rade pod atmosferskim tlakom ali na vrlo niskim temperaturama. Većina visokotemperaturnih supravodiča (HTSC) su materijali keramičkoga tipa. Metalni supravodiči uglavnom rade na mnogo nižim temperaturama pa se nazivaju LTSC (niskotemperaturni supravodiči).

2.5.1. LTSC (low temperature superconductors)

Niskotemperaturni supravodiči odnose se na materijale s kritičnom temperaturom ispod 30 K. U običnim metalima električni otpor pri niskim temperaturama raste s kvadratom temperature. Na niskim temperaturama, ispod takozvane supravodljive prijelazne temperature, oni uopće ne pokazuju električni otpor, a iznad te temperature otpor raste linearno umjesto kvadratno s temperaturom. Magnezijev diborid krasi jednostavna proizvodnja, a kritična temperatura od $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$ čini ga neprikladnim za hlađenje tekućim dušikom. Može se naravno kao i svi LTSC supravodiči hladiti tekućim helijem.

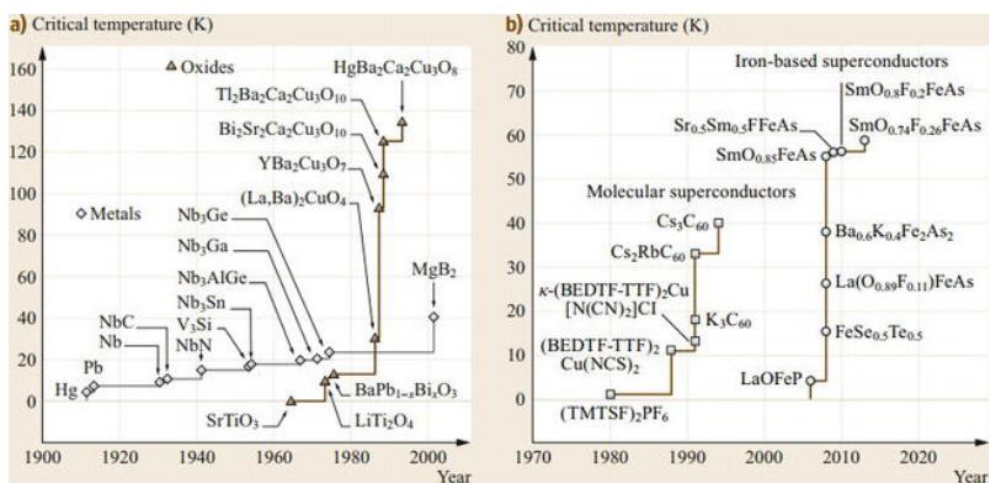
Dva uobičajena niskotemperaturna supravodiča su olovo i živa. Olovo je supravodič tipa I s kritičnom temperaturom od 7,2 K. Iako takvi supravodiči mogu provoditi struje bez otpora, njihova je korisnost jako ograničena zbog niskih kritičnih magnetskih polja. Iznad određene struje, magnetsko polje stvoreno strujom izbacuje ih iz supravodljivog stanja.

Živa je povijesno bila prva koji je pokazala supravodljivost i primjer je supravodiča tipa I. Njezina praktična korisnost ograničena je činjenicom da je njezino kritično magnetsko polje samo 0,019 T, pa je jako ograničena i količina električne struje koju može voditi.

2.5.2. HTSC (high temperature superconductors)

Glavna je prednost visokotemperaturnih keramičkih supravodljivih materijala njihovo hlađenje tekućim dušikom. Naprotiv, metalni supravodiči često trebaju skuplja rashladna sredstva kao što je tekući helij [4, 5].

Vrhunski visokotemperaturni supravodiči pripadaju grupi oksida bakra. Druga grupa HTS-a se klasificira kao spojevi na bazi željeza [6, 4, 5]. Prikaz razvoja HTSC supravodiča prikazan je na slici 10.

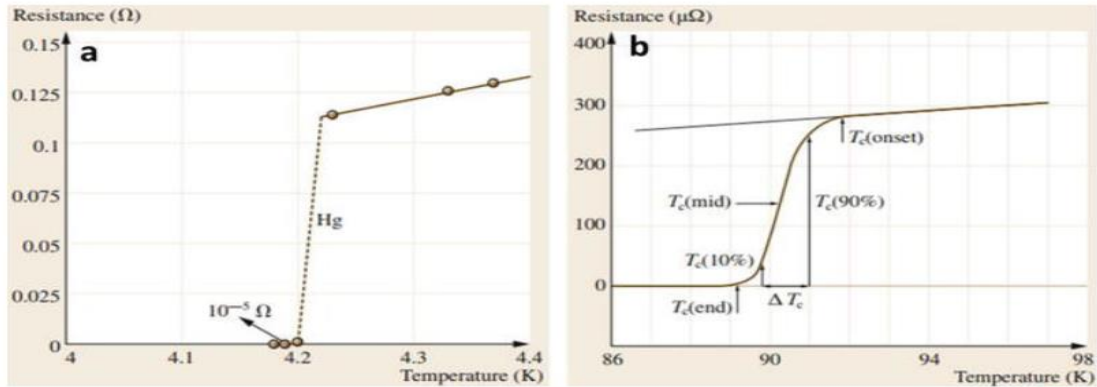


Slika 10. Razvoj supravodiča na bazi molekularnog željeza, metala i oksida.

Izvor: Muhammad Ikram, Ali Raza, Shehnika Altaf, Arslan Ahmed Rafi, Misbah Naz, Sarfraz Ali, Syed Ossama Ali Ahmad, Aysha Khalid, Salamat Ali and Junaid Haider (March 10th 2021). [4,

5]

Visokotemperaturni supravodiči temelje se na ponašanju konvencionalnih i metalnih supravodiča. Uočeno je da se ispod kritične temperature (T_c) električni otpor supravodiča smanjuje na nulu. Očiglednije za čiste metale, procijenjeno je da se stanje nulte otpornosti možda doseglo u rasponu od nekoliko mK, kao što je prikazano na slici 11.

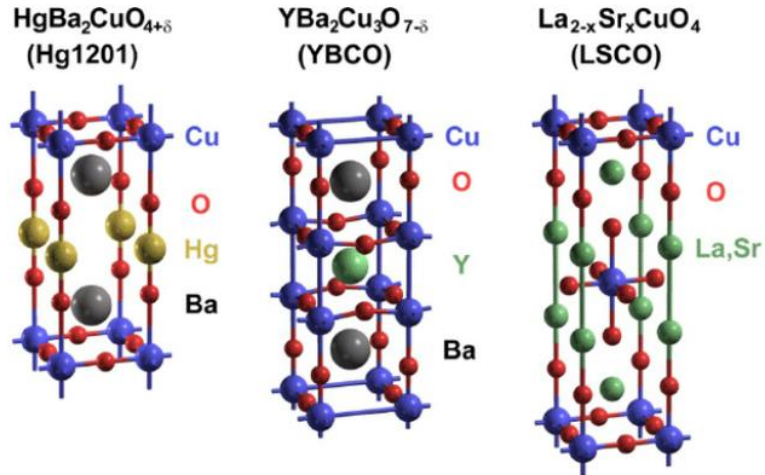


Slika 11. Prikaz ovisnosti otpora o temperaturi

Izvor: *Muhammad Ikram, Ali Raza, Shehnika Altaf, Arslan Ahmed Rafi, Misbah Naz, Sarfraz Ali, Syed Ossama Ali Ahmad, Aysha Khalid, Salamat Ali and Junaid Haider (March 10th 2021). [4, 5]*

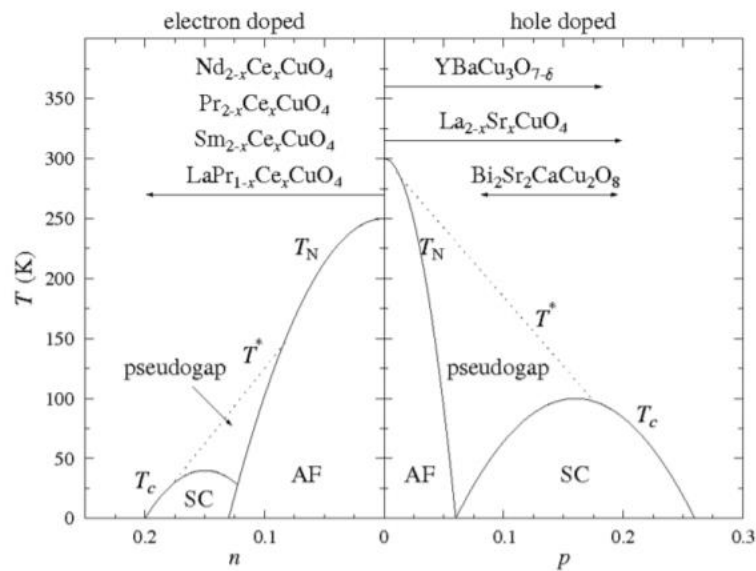
2.5.3. Kuprati

Kuprati su supravodiči otkriveni 1986. godine i još uvijek drže rekord za temperaturu prijelaza supravodivosti (T_c) pod atmosferskim tlakom. Visoki T_c i H_c tih materijala bili su ključni za mnoge tehnološke primjene. Kupratni supravodiči imaju slojevit kristalnu strukturu koja se sastoji od bakrenih ravnina kisika i slojeva spremnika naboja. Na pojednostavljenoj slici 12, ravnina bakrenoga oksida može se promatrati kao kvadratna rešetka gdje svako mjesto sadrži jednu šupljinu s $d_{x^2-y^2}$ orbitalnim karakterom. Koncentracija šupljina može se promijeniti dopiranjem šupljine (p) ili dopiranjem elektrona (n) iz slojeva spremnika naboja koje prikazuje slika 13.



Slika 12. Prikaz kristalnih rešetki kupratnih supravodiča

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Crystal-structures-of-four-cuprates-a-The-unit-cells-total-number-of-atoms_fig1_247772839 [48]



Slika 13. Fazni dijagram kupratnih supravodiča s elektronskim i šupljinskim dopiranjem

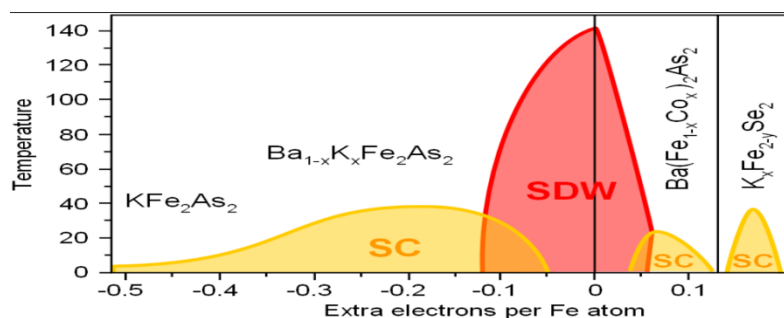
Izvor: <https://www.wikiwand.com/en/Pseudogap> [49]

2.5.4. Supravodiči sa željeznom bazom

Supravodiči temeljeni na željezu (FeSC) kemijski su spojevi sadržani od željeza čija su supravodljiva svojstva otkrivena 2006. godine [11]. Prije je većina visokotemperaturnih supravodiča bila kuprati i temeljila se na slojevima bakra i kisika smještenim između drugih tvari (La, Ba, Hg). Već 2008. godine predvođeni nedavno otkrivenim spojevima željeznih pnictida (izvorno poznati kao oksipnictidi) bili su u prvim fazama eksperimentiranja i implementacije [4].

Ova nova vrsta supravodiča temelji se na provođenju slojeva željeza i pnictida (kemijski elementi u skupini 15 periodičnoga sustava, npr. arsen (As) i fosfor (P)) i čini se da je to obećavajuća sljedeća generacija visokotemperaturnih supravodiča [11]. Pobudili su velik interes jer se jako razlikuju od kuprata i mogu dovesti do nove teorije supravodljivosti.

Svojstva supravodiča na bazi željeza dramatično se mijenjaju dopiranjem, slično kao i kod supravodljivih kuprata. Matični spojevi FeSC-a, za razliku od kuprata, obično su metali, ali su slično kao i kuprati poredani antiferomagnetski, što se često naziva i val spinozne gustoće (SDW). Supravodljivost nastaje pri dopiranju rupe ili elektrona. Općenito je fazni dijagram sličan kupratima (slika 14) [12].



Slika 14. Fazni dijagram obitelji fero-pnictida 122 dopunjen obitelji 122 (Se) kao generalizirani fazni dijagram za supravodiče temeljene na željezu. [12]

Izvor: A. A. Kordyuk (2012). *Iron-based superconductors: Magnetism, superconductivity, and electronic structure*

3. TEORIJE SUPRAVODIČA

3.1. KLASIČNA TEORIJA VODLJIVOSTI

Vodljivost je sposobnost materijala da vodi električnu struju. Princip po kojem instrumenti mjere vodljivost materijala je jednostavan: dvije ploče se postavljaju na uzorak, na ploče se primjenjuje napon (obično sinusni) i mjeri se struja koja prolazi kroz materijal. Otpor se izračunava pomoću Ohmovog zakona. Vodljivost G je recipročna vrijednost otpora R .

Električni otpor metalnog vodiča postupno se smanjuje kako se temperatura snižava. U normalnim (nesupravodljivim) vodičima, poput bakra ili srebra, ovo smanjenje je ograničeno nečistoćama i drugim nedostacima. Čak i blizu apsolutne nule uzorak normalnog vodiča pokazuje vrlo mali otpor. U supravodiču otpor naglo pada na nulu kada se materijal ohladi ispod kritične temperature.

Mjerenja vodljivosti ovise o temperaturi. Stupanj do kojeg temperatura utječe na vodljivost varira i može se izračunati pomoću sljedeće formule:

$$G_t = G_{T_{cal}}[1 - \alpha(T - T_{cal})]$$

gdje su:

G_T - vodljivost pri bilo kojoj temperaturi T u $^{\circ}C$

$G_{T_{cal}}$ - vodljivost pri temperaturi kalibracije T_{cal} u $^{\circ}C$

α - temperaturni koeficijent promjene otpora pri t_{cal} in $^{\circ}C$

Teoriju vodljivosti postavio je F. Bloch u razdoblju od 1928. do 1930. Promatrane su promjene koje elektroni moraju pretrpjeti u električnom polju koji čine električna sila i raspršivanje titranjem električne rešetke. Električno polje nastoji elektronske šupljine usmjeriti u svojem smjeru, a titranja mreže ih raspršuju nepravilno na sve strane. Kao stanje ravnoteže između tih dviju djelovanja stvara se stanje kod kojeg pretežu brzine elektrona u smjeru električnog polja. [40]

F. Bloch je uspio izračunati električnu vodljivost za vrlo visoke i vrlo niske temperature. Što kristalna rešetka jače titra, to je električni otpor veći. Kod visokih temperatura, titranje kristalne rešetke je jače pa je zato i električni otpor veći. Bloch je izračunao da električni otpor kod visokih temperatura raste linearno s temperaturom. Pri vrlo niskim temperaturama bitna postaje struktura kristala. [40]

3.2. FENOMENOLOŠKE TEORIJE SUPRAVODLJIVOSTI

3.2.1. Londonova teorija

Londonova teorija koju su razvila braća Fritz i Heinz London 1935. godine je relacija koja povezuje supravodljivu struju s elektromagnetskim poljima u i oko supravodiča. Senzacionalni uspjeh jednadžbi bila je njihova sposobnost da objasne Meissnerov učinak [22].

Rani eksperimenti su pokazali da ispod kritične temperature, konvencionalni vodič može naglo prijeći u supravodljivo stanje, pri čemu se činilo da struje teku bez otpora. Ovo je dovelo do sljedeće jednadžbe:

$$\frac{m}{ne^2} \frac{dJ}{dt} = E$$

gdje su m , e i n masa, naboj i gustoća nositelja naboja, koji se obično uzimaju kao elektroni u vrijeme kada se ova jednadžba razmatrala.

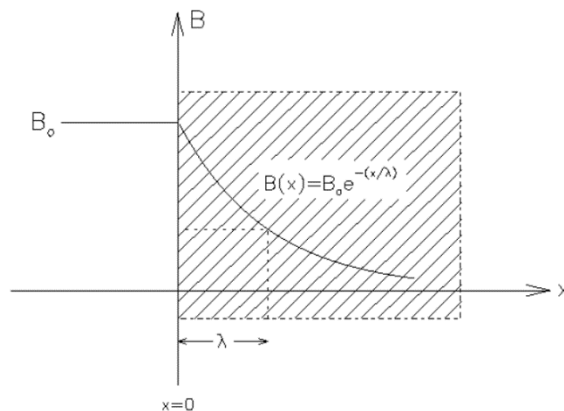
$$\Lambda = \frac{m}{ne^2}$$

Ova jednadžba implicira da je kristalna rešetka koja podržava supravodljivost na neki način nevidljiva za same supravodljive naboje.

Londonova teorija predviđa da se magnetski tok eksponencijalno raspada u supravodiču.

$$\vec{B}(x) = \vec{B}(0)e^{-x/\lambda_L}$$

gdje je B magnetsko polje na površini supravodiča, a x je udaljenost od površine supravodiča (slika 15). Potiskivanje magnetskog polja postiže se zaštitnim strujama (ili superstrujama) koje teku na površini supravodiča bez ikakvih omskih gubitaka.



Slika 15. Londonova dubina prodiranja

Izvor: <https://musr.ca/theses/Sonier/MSc/node8.html> [22]

3.2.2. Ginzburg–Landauova teorija

Ginzburg–Landauova teorija, nazvana po Vitaliju Lazareviču Ginzburgu i Levu Landau, je matematička fizikalna teorija koja se koristi za opisivanje supravodljivosti. U svom početnom obliku, postulirana je kao fenomenološki model koji bi mogao opisati tip-I supravodiča bez ispitivanja njihovih mikroskopskih svojstava. Ginzburg-Landauova teorija izvedena je iz Bardeen-Cooper-Schriefferove mikroskopske teorije i daje novo tumačenje svih njihovih parametara.

Ginzburg i Landau su utvrdili da se slobodna energija F , supravodiča u blizini supravodljivog prijelaza može izraziti u izrazu kompleksnog polja parametra reda ψ , koje je različito od nule ispod faznog prijelaza u supravodljivo stanje i povezano je s gustoćom supravodljive komponente.

Razmotrimo homogeni supravodič u kojem nema supravodljive struje pa se jednačba za ψ pojednostavljuje na:

$$\alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi = 0.$$

Ova jednađba ima trivijalno rješenje: $\psi = 0$. Ovo odgovara normalnom stanju supravodiča, odnosno za temperature iznad supravodljive prijelazne temperature, $T > T_c$. Ispod temperature supravodljivog prijelaza, očekuje se da gornja jednađba ima netrivialno rješenje (odnosno $\psi \neq 0$). Pod ovom pretpostavkom gornja jednađba može biti preuređena u:

$$|\psi|^2 = -\frac{\alpha}{\beta}.$$

Ovo može biti ostvareno uz pretpostavku temperaturne ovisnosti:

$$\alpha(T) = \alpha_0 (T - T_c) \text{ s } \alpha_0 / \beta > 0;$$

Iznad supravodljive prijelazne temperature, $T > T_c$, izraz $\alpha(T) / \beta$ je pozitivan, a desna strana gornje jednađbe je negativna.

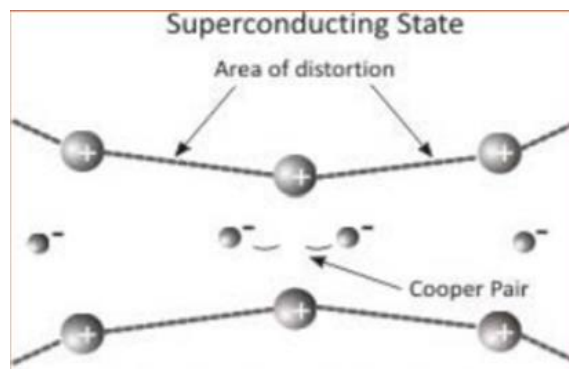
3.3. Mikroskopska (BCS) teorija supravodljivosti

BCS teorija nazvana je po prvim slovima poznatih fizičara Bardeena, Coopera i Schrieffera. Oslanja se na kvantno-mehaničke proračune koji pokazuju da u supravodljivom stanju ispod T_c postoji energetski favorizirano uređeno stanje koje tvore elektroni i nazivaju se Cooperovi parovi. Prije se smatralo da u supravodljivom stanju elektroni ne stupaju u destruktivnu interakciju s atomima rešetke. Nasuprot tomu BCS teorija podržava interakciju elektrona s atomima, ali na konstruktivan način vodeći do stvaranja Cooperovih parova (slika 16).

Teorija pretpostavlja da postoji privlačna sila između elektrona u tipičnim supravodičima tipa I, što je posljedica privlačnosti između elektrona i rešetke [10].

Temelji se na shvaćanju da zbog negativnoga naboja elektrona u rešetki, oko njega postoji niz blagih pozitivnih naboja koji privlače drugi elektron. Ta dva elektrona su poznata kao Cooperov par.

Par je stabilan samo ako je energija vezanja tog para manja od energije toplinskih vibracija rešetke koje bi ih pokušale razdvojiti. Zbog toga je supravodljivost zapravo fenomen niske temperature.



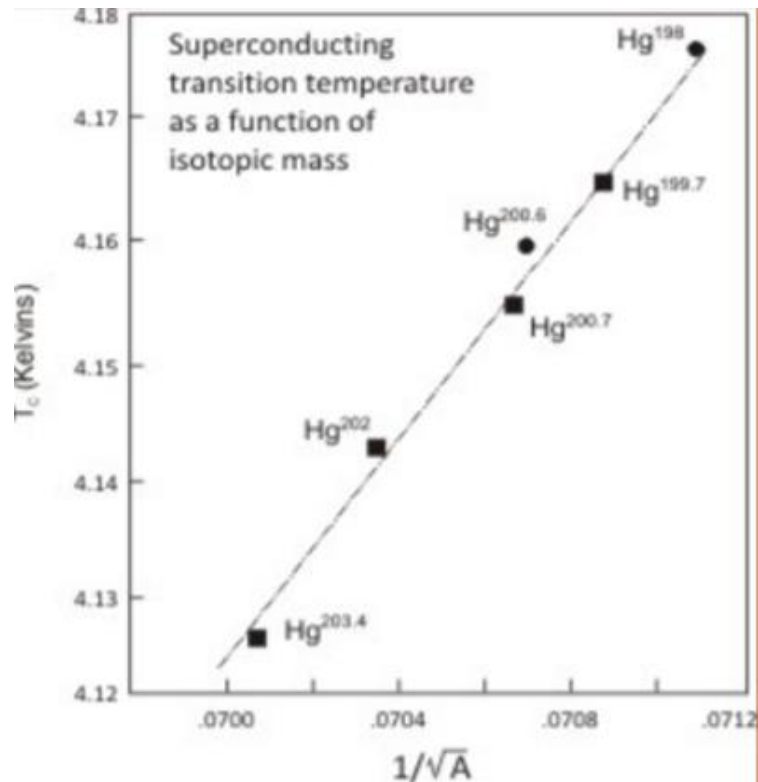
Slika 16. Formiranje Cooperovog para u supravodljivom materijalu

Izvor: Ivo Batistić, *Supravodljivost, fizika čvrstog stanja, predavanja 2013./2014.*, Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu [10]

Pokusi su izvedeni na temelju pretpostavke da, ako je električna vodljivost u živi bila isključivo elektronička, onda ne bi trebala ovisiti o nuklearnim masama. Uočena ovisnost kritične temperature supravodiča o izotopskoj masi bio je prvi izravni dokaz interakcije između elektrona i rešetke koja je prikazana na slici 17. [13].

Ovi pokusi podržali su BCS teoriju koja se temelji na interakciji elektron – rešetka i stvaranju Cooperovih parova. Učinak se jasno uočava u slučaju supravodiča tipa I, dok je u supravodičima tipa II prilično slab.

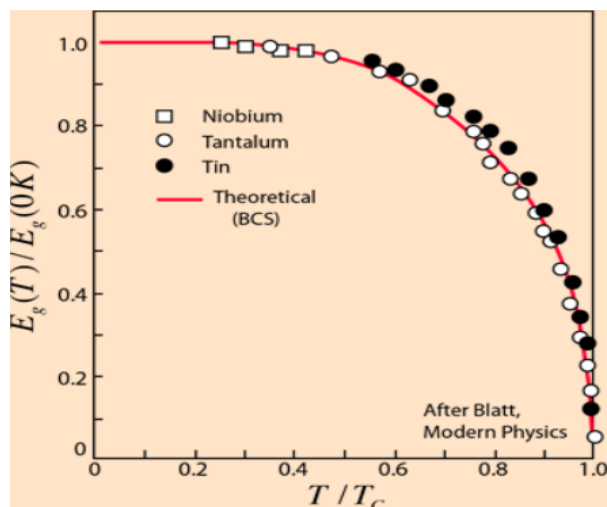
Učinkoviti energetski rascjep u supravodičima može se mjeriti u pokusima mikrovalne apsorpcije. Podaci na slici 18. daju opću potvrdu BCS teorije supravodljivosti.



Slika 17. Ovisnost kritične temperature o atomskoj masi A

Izvor: M. Cyrot, *Ginzburg-Landau Theory for superconductors, Reports on Progress in Physics, vol. 36, no. 2, N. Novosel, Magnetska svojstva odabranih nanočestica i njihov utjecaj na supravodljivost magnezijeva diborida, disertacija, Prirodoslovno matematički fakultet, Zagreb, 2012.*[13]

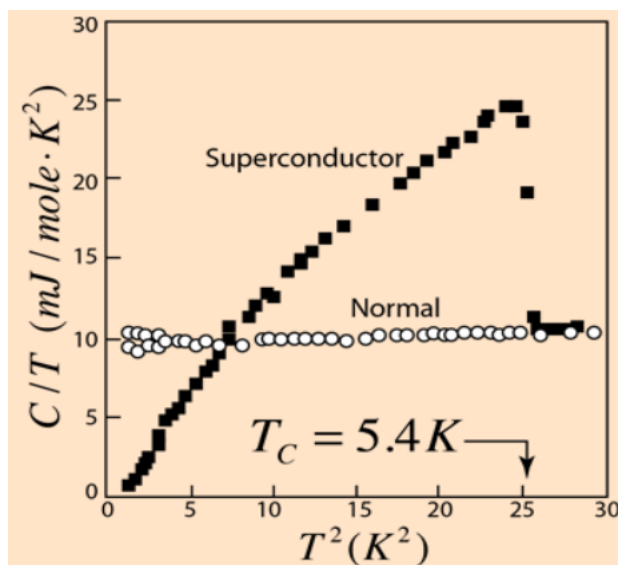
Smanjenje energetske raskoraka dok se približava kritičnoj temperaturi može se uzeti kao pokazatelj da nositelji naboja imaju neku vrstu kolektivne prirode. To znači da se nositelji naboja moraju sastojati od najmanje dviju elemenata koji su povezani zajedno, a energija vezanja im slabi kako se približavaju kritičnoj temperaturi. Iznad kritične temperature takve parovi ne postoje, a prevladava normalni otpor. Ta vrsta dokaza, zajedno s izotopskim učinkom, koji je pokazao da je u pitanju kristalna rešetka, pomogla je stvoriti sliku uparenih elektrona povezanih fononskim interakcijama s rešetkom.



Slika 18. Energetski rascjep u supravodičima u zavisnosti od temperature

Izvor: <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.103.L021601> [50]

Toplinski kapacitet supravodljivoga vanadija jako se razlikuje od onoga koji se održava u normalnom stanju nametanjem magnetskoga polja na uzorak. Eksponencijalno povećanje toplinskoga kapaciteta u blizini kritične temperature upućuje na energetski raspon supravodljivoga materijala. Ti dokazi o pojasu jedan su od eksperimentalnih dokaza koji podupiru BCS teoriju supravodljivosti (slika 19).



Slika 19. Toplinski kapacitet vanadija

Izvor: <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.103.L021601> [50]

4. PRAKTIČNA PRIMJENA SUPRAVODIČA

4.1. TEHNIČKI PROBLEMI PRIMJENE

Supravodljivi materijali su supravodljivi samo ako se drže ispod zadane temperature koja se naziva prijelazna temperatura. Za trenutačno poznate praktične supravodiče temperatura je znatno ispod 77 K, odnosno temperature tekućega dušika. Njihovo držanje ispod te temperature uključuje skupe kriogene tehnologije. Stoga se supravodiči još uvijek izuzetno rijetko javljaju u praktičnoj primjeni. Znanstvenici rade na projektiranju supravodiča koji bi mogli funkcionirati na sobnoj temperaturi.

Glavni nedostaci supravodiča su:

- Moraju se hladiti na vrlo niske temperature, a to je poprilično skupo.
- Supravodiči su skloni razvoju termičkih nestabilnosti (tzv. najtoplijih točaka).
- Izmjenične struje uzrokuju tzv. izmjenične gubitke koji zagrijavaju supravodič i povećavaju troškove hlađenja.

4.1.1. Hlađenje

Temperatura supravodiča mora se održavati konstantnom ispod kritične temperature kako bi pravilno funkcionirao, odnosno vodio struju bez otpora. U protivnom će se materijal vratiti u normalno stanje vodljivosti i stvarati gubitke. Često to zahtijeva mnogo energije samo za hlađenje supravodiča. Čak i visokotemperaturni supravodiči zahtijevaju znatnu količinu energije da bi se ohladili iako je kod njih održavanje kritične temperature jeftinije nego kod konvencionalnih supravodiča. Tekući helij kao rashladno sredstvo je vrlo skup i nije obnovljiv. Ne bi bilo učinkovito pokušavati ohladiti kilometre supravodljivoga kabela jer bi troškovi u ovom trenutku nadmašili probitke. Znanstvenici još nisu otkrili supravodič s dovoljno visokom kritičnom temperaturom da bi se mogao koristiti uz malo ili bez hlađenja.

4.1.2. Magnetsko polje

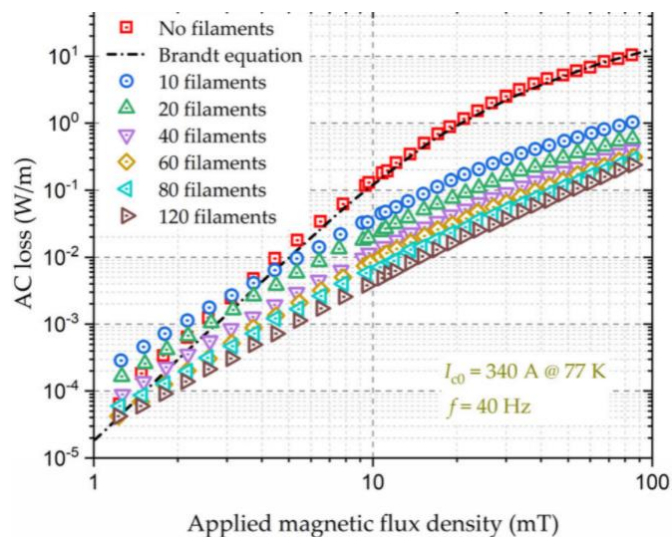
Drugi problem s kojim se susreću supravodiči izloženost je magnetskim poljima. Poput kritične temperature, supravodljivi materijal ima i kritično magnetsko polje. Nakon što se prijede ta granična vrijednost, materijal prestaje pokazivati supravodljiva svojstva pa treba biti jako oprezan pri uporabi supravodiča tamo gdje su stalno izloženi vrlo velikim magnetskim poljima. To također ograničava i gustoću struje koju bi mogla voditi supravodljiva žica budući da struje stvaraju vlastita magnetska polja. Ako je struja dovoljno velika, njeno magnetsko polje će rezultirati gubitkom supravodljivih svojstava.

Zbog tih se komplikacija supravodiči trenutno ne smatraju iznimno pouzdanima. Kad se riješe problemi elektromagnetskoga zračenja, savitljivosti, niske kritične temperature i kritičnog magnetskog polja, supravodiči će naći područja primjene na svim poljima ljudske djelatnosti.

4.1.3. Izmjenične struje

Gubici zbog izmjenične struje (AC) nastaju zbog nastanka magnetskih vrtloga unutar supravodiča izloženih vremenski promjenjivim strujama, magnetskim poljima ili oboje. Konkretno, kada supravodič vodi istosmjernu struju (DC) i istodobno je izložen izmjeničnom polju, dolazi do pojave dinamičkoga otpora i dinamičkoga gubitka. Kvantificiranje i smanjenje gubitaka izmjenične struje je ključno jer proizvedena toplina ne samo da može biti ozbiljan izazov kriogenim sustavima, već može narušiti pouzdanost i sigurnost supravodljivih uređaja.

Slika 20 prikazuje gubitak izmjenične struje visokotemperaturnog supravodiča širokog 12 mm (HTS), obloženog vodiča (CC) i njegovih traka izloženih vanjskom izmjeničnom magnetskom polju s amplitudom magnetske indukcije koja varira od 1 do 100 mT, na 40 Hz [29]. Može se vidjeti da gubitak AC HTS CC raste s primijenjenom magnetskom indukcijom, a za CC bez filamenata, disipacija snage po jedinici duljine može doseći 1 W/m čak i pod poljem od samo 20 mT i pri relativno niskoj frekvenciji od 40 Hz. Snaga se raspršuje na kriogenoj temperaturi, npr. pri temperaturi tekućeg dušika 77 K, što može predstavljati veliki kriogeni teret.



Slika 20. Pregled AC gubitka YBCO širine 12 mm

Izvor: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2234/html> [51]

Supravodiče karakterizira nulti otpor istosmjernoj struje (DC). Oni, dakle, ne pokazuju gubitke pri vođenju istosmjerne struje. Međutim, supravodiči u primjeni najčešće moraju podnositi vremenski promjenjive struje ili magnetska polja (npr. supravodljivi električni strojevi, kabeli, magneti...).

4.2. KABELI

Supravodljivi kabeli temelje se na posebnim supravodljivim materijalima koji se hlade na ekstremno niske temperature (npr. -180°C) pomoću tekućeg dušika (ili tekućeg helija za MgB₂) kako bi se uspostavila supravodljivost.

Ovi vodiči su smješteni u cijevi s vakuumom koji toplinski izolira supravodič od okoliša. Provode pet puta veću struju od konvencionalnog kablenskog sustava istih vanjskih dimenzija i ne emitiraju nikakvu toplinu u okoliš. Kada se uspoređi isplativost HTS-a u odnosu na konvencionalne vodiče, gubici supravodljivih kabela jednaki su energiji potrebnoj za održavanje niske temperature dušika i njegovu cirkulaciju. Tehnologija zahtijeva posebne kablenske spojeve i specifičan završetak kabela za ekstremne temperaturne razlike te trajno hlađenje za održavanje kriostata.

Prednosti HTS kabela za napajanje:

- Kompaktni
- Veliki kapacitet prijenosa
- Mali gubitak prijenosa
- EMI potiskivanje pomoću HTS štita

Razvijeni su različiti koncepti kabela. Trenutačno postoje dvije glavne vrste supravodljivih energetskih kabela koji se razlikuju po vrsti dielektrika koji posjeduju:

- topli električni supravodljivi kabel
- hladni električni supravodljivi kabel

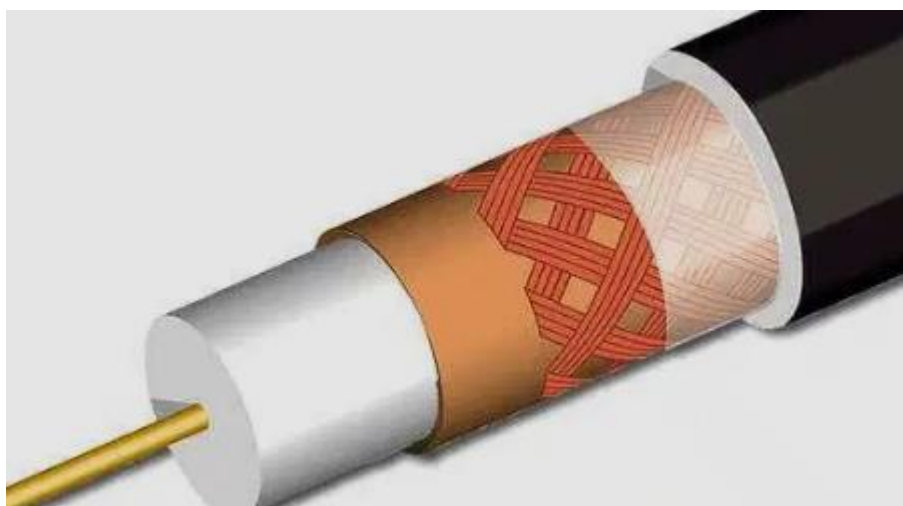
Topli električni supravodljivi kabel (slika 21) temelji se na vodiču, hlađenom protokom tekućeg dušika okruženog kriogenim omotačem pomoću dvije koncentrične fleksibilne cijevi od nehrđajućeg čelika s vakuumom i supraizolacijom između. Vanjska dielektrična izolacija, zaslon kabela i vanjski omotač kabela su na sobnoj temperaturi. Nedostatak zaštite može rezultirati vrtložnim strujama u kriostatu i drugim komponentama pri većim jačinama struje.



Slika 21. Topli električni supravodljivi kabel. Dielektrik se nalazi izvan fleksibilne cijevi

Izvor: *F. Schmidt, A. Allais Nexans – Superconducting Cable System (Hanover – Germany)[52]*

Hladni električni supravodljivi kabel (slika 22) koristi tekući dušik kao dio dielektričnog sustava. Iako je teži za proizvodnju, hladna konfiguracija ima prednost što sadrži elektromagnetsko polje unutar supravodljivog zaslona, što značajno smanjuje induktivnost kabela. Ova jedinstvena karakteristika hladnog dielektrika ne samo da može smanjiti gubitak prijenosa svakog pojedinog kabela, već također omogućuje da kabeli budu usko raspoređeni u instalaciji, štedeći tako prostor i troškove.



Slika 22. Supravodljivi kabel s hladnim dielektrikom. Ovo je koaksijalni kabel gdje se dielektrik između jezgre i štita održava na kriogenoj temperaturi.

Izvor: *F. Schmidt, A. Allais Nexans – Superconducting Cable System (Hanover – Germany)[52]*

Na toplom dizajnu dielektričnog kabela nema supravodljivog štita, tako da se ne može postići učinak magnetske zaštite tijekom rada. Kao posljedica toga, imamo veće električne gubitke i veću induktivnost kabela u odnosu na druge vrste supravodljivih kabela.

4.3. ELEKTROMAGNETI

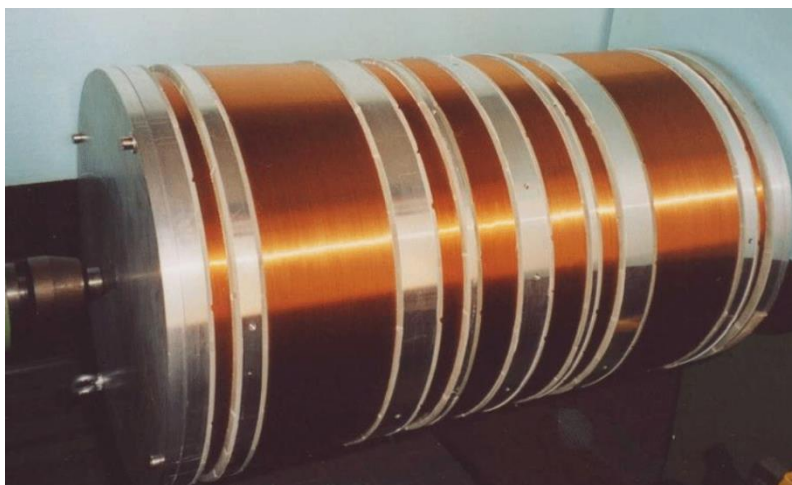
Supravodljivi magnet (slika 23) je elektromagnet napravljen od zavojnica supravodljive žice. Tijekom rada moraju se ohladiti na kriogene temperature. U svom supravodljivom stanju žica nema električni otpor i može provoditi mnogo veće električne struje od obične žice, stvarajući intenzivna magnetska polja. Supravodljivi magneti mogu proizvesti veća magnetska polja od svih nesupravodljivih elektromagneta i mogu biti jeftiniji za rad jer se energija ne rasipa kao toplina u namotima.

Tijekom rada, namoti magneta moraju se ohladiti ispod njihove kritične temperature, temperature pri kojoj materijal namota prelazi iz normalnog otpornog stanja i postaje supravodič, što je daleko ispod sobne temperature. Namoti se obično hlade na temperature koje su znatno ispod njihove kritične temperature.

Tekući helij koristi se kao rashladno sredstvo za mnoge supravodljive namote. Ima vrelište od 4,2 K, što je daleko ispod kritične temperature. Magnet i rashladna tekućina nalaze se u toplinski izoliranom spremniku koji se naziva kriostat.

Maksimalno magnetsko polje koje se može postići u supravodljivom magnetu ograničeno je poljem u kojem materijal namota prestaje biti supravodljiv a to je njegovo kritično polje H_c . Za supravodične II vrste to je njegovo gornje kritično polje. Drugi ograničavajući čimbenik je kritična struja I_c , pri kojoj materijal namota također prestaje biti supravodljiv.

Supervodljivi magneti se široko koriste u MRI strojevima, NMR opremi, masenim spektrometrima, procesima magnetskog odvajanja i akceleratorima čestica.



Slika 23. Prikaz supravodljivog magneta

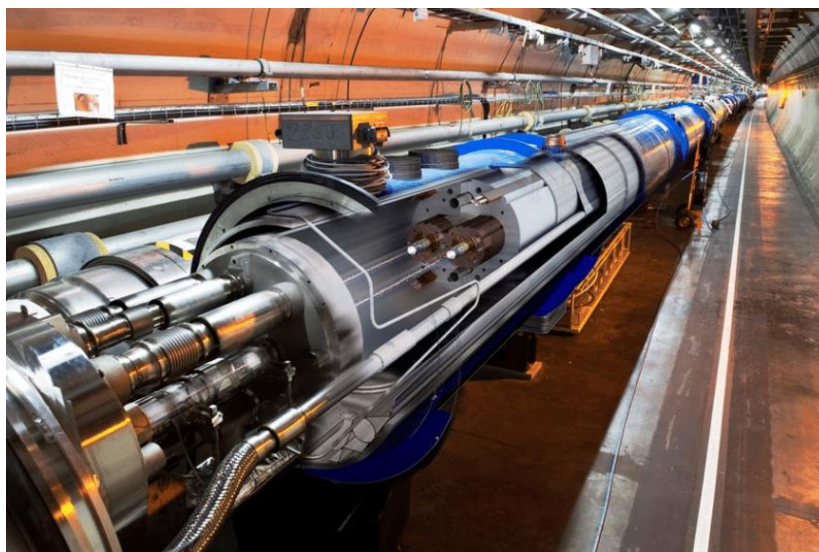
Izvor: <https://mriquestions.com/superconductive-design.html> [53]

Namoti svitka supravodljivog magneta izrađeni su od žica ili traka supravodiča tipa II (npr. niobij-titan ili niobij-kositar). Sama žica ili traka može biti izrađena od malih filameta (debljine oko 20 mikrometara) supravodiča u bakrenoj matrici. Bakar je potreban da bi se dodala mehanička stabilnost i osigurala staza niske otpornosti za velike struje u slučaju da temperatura poraste iznad T_c ili struja poraste iznad I_c pa da se izgubi supravodljivost.

Struja zavojnice osigurava se pomoću istosmjernog napajanja visoke struje, vrlo niskog napona, budući da je u stacionarnom stanju jedini napon na magnetu zbog otpora napojnih žica. Svaka promjena struje kroz magnet mora biti učinjena vrlo sporo, prvo zato što je električni magnet veliki induktor i nagla promjena struje rezultirat će velikim skokom napona na namotima. Još je važnijeda brze promjene struje mogu uzrokovati vrtložne struje i mehanička naprezanja u namotima koja mogu uzrokovati gašenje.

Veliki hadronski sudarač koji je prikazan na slici 24 (LHC) najveći je i najmoćniji akcelerator čestica na svijetu. Izgradila ga je Europska organizacija za nuklearna istraživanja (CERN) između 1998. i 2008. a financiralo više zemalja [17]. Leži u tunelu od 27 kilometara ispod granice između Francuske i Švicarske u blizini Ženeve. Tunel sudarača sadrži dva susjedna paralelna snopa od kojih svaki sadrži zraku, koji putuju u suprotnim smjerovima oko

prstena. Zrake se sijeku u četiri točke oko prstena, gdje se događaju sudari čestica. Nekih 1.232 dipolnih magneta drže snopove na njihovoj kružnoj putanji, dok se dodatna 392 kvadrupolna magneta koriste za održavanje fokusa snopa, s jačim kvadrupolnim magnetima blizu točaka presjeka kako bi se povećale šanse za interakciju gdje se dvije grede križaju. Magneti višeg višepolnog reda koriste se za ispravljanje manjih nesavršenosti u geometriji polja. Ukupno je instalirano oko 10.000 supravodljivih magneta, a dipolni magneti imaju masu od preko 27 tona [24]. Otprilike 96 tona superfluidnog helija-4 potrebno je da bi magneti, izrađeni od niobij-titanija obloženog bakrom, bili na radnoj temperaturi od 1,9 K ($-271,25$ °C), što LHC čini najvećim kriogenim postrojenjem na svijetu na tekućini temperatura helija. LHC koristi 470 tona Nb–Ti supravodiča [28].



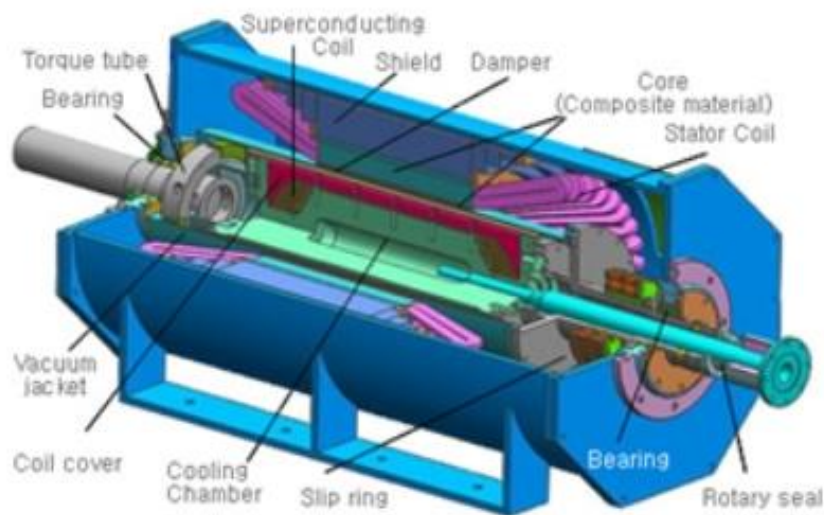
Slika 24. Prikaz LHC tunela, te presjek LHC dipolnog magneta

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/View-of-the-LHC-tunnel-with-an-artistic-cut-through-a-LHC-dipole-magnet-highlighting-the_fig2_306186204 [17]

4.4. ELEKTRIČNI GENERATORI

U proizvodnji električne energije, generator je uređaj koji pretvara mehaničku energiju u električnu energiju. Izvori mehaničke energije mogu biti parne turbine, plinske turbine, vodene turbine, motori s unutarnjim izgaranjem i vjetroturbine. Električni generatori rade na principu induciranja napona prolaskom vodiča kroz magnetsko polje. Što je postignuta veća magnetska indukcija bit će veći i inducirani napon.

Princip rada koji se oduvijek koristio na starim sinkronim generatorima danas se također koristi i u supravodljivim generatorima. Jedina razlika su uzbudni namoti supravodljivog generatora, koji u usporedbi s konvencionalnim generatorima mogu stvoriti mnogo veću magnetsku indukciju. Korištenje HTSC zavojnice kao i u svim drugim rotirajućim strojevima i kod generatora poboljšava njihovu učinkovitost i čini ih kompaktnijima. S druge strane u HTSC generatoru se najčešće zadržava klasična nekriogena armatura koja koristi standardni bakreni namot.



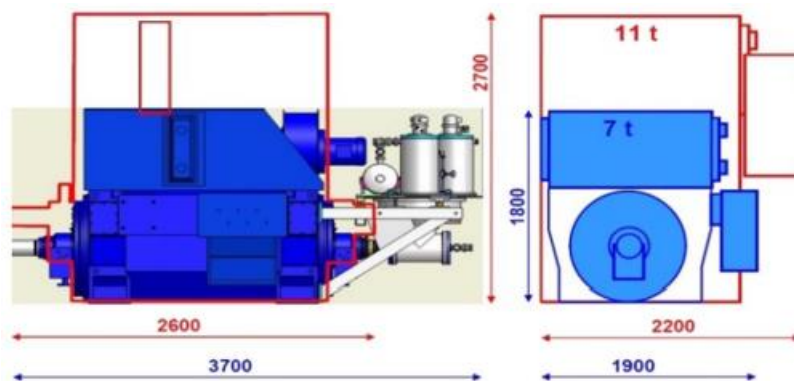
Slika 25. HTSC generator klasične izvedbe

Izvor: <https://engineering.electrical-equipment.org/electrical-distribution/super-conducting-generators.html> [62]

Generatori sa supravodičima (HTSC) (slika 25.) imaju poklopac zavojnice (coil) da je podupire kada je pod centrifugalnom silom i prigušivač za zaštitu od visokofrekvencijskog magnetskog polja. Rashladna komora (cryocooler) služi za održavanje ultra niske temperature. Jezgra (core) je napravljena od nemagnetske jezgre dok je zavojnica statora izrađena od bakra. Uzbudna struja se dovodi na supravodljivi svitak preko kliznih prstena (slip rings). Prisutne su tri izolacije, štit za zaštitu širenja magnetskog polja u okolinu i vakuumski omotač koji tvori vakuumski izolacijski sloj.

Prednosti komercijalnih HTSC generatora uključuju smanjene gubitke energije, manje zagađenje po jedinici proizvedene energije, povećanu stabilnost mreže, smanjene kapitalne troškove i troškove održavanja.

Supravodljivi generatori mogu povećati učinkovitost generatora iznad 99%, smanjujući gubitke u namotima za čak 50% u usporedbi s konvencionalnim generatorima. Imaju trećinu ukupnog volumena svojih konvencionalnih ekvivalenata, te su naravno i lakši od njih (slika 26). U ovu usporedbu uključen je naravno i neophodan kriogeni rashladni sustav.



Slika 26. Usporedba veličine i težine HTSC i konvencionalnog generatora

Izvor:

https://www.researchgate.net/publication/318834324_High_power_density_superconducting_rotating_machines_-_Development_status_and_technology_roadmap [61]

Temelj uštede na volumenu i težini je činjenica da je za dobivanje istog magnetskog polja potrebno manje supravodljive žice nego bakrene.



Slika 27. Siemens 4 MVA HTSC generator [61]

Izvor:

https://www.researchgate.net/publication/318834324_High_power_density_superconducting_rotating_machines_-_Development_status_and_technology_roadmap [61]

Na slici 27. je prikazan Siemensov 4 MVA HTSC generator koji radi na 3600o/min. Pokazali su se sljedeće prednosti i nedostaci:

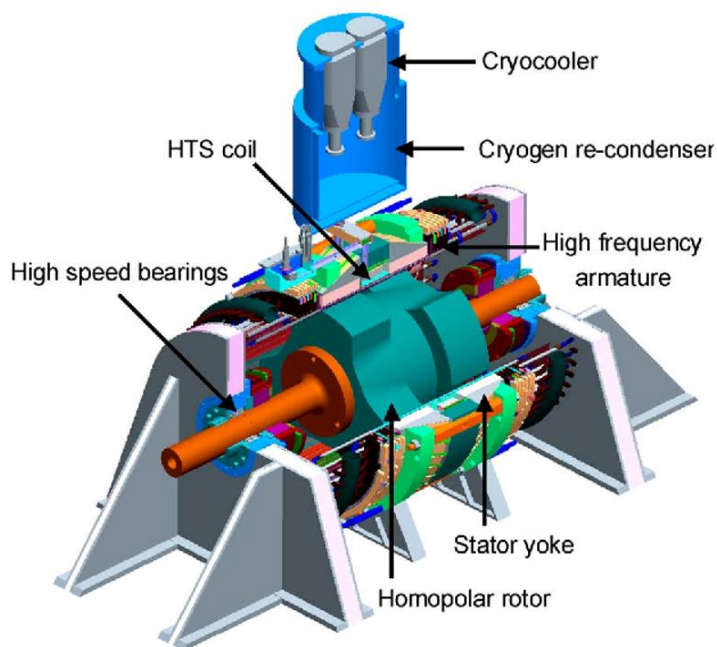
PREDNOSTI:

1. Smanjeni električni gubici, ali samo u elektromagnetu rotora.
2. Smanjena veličina i težina bez obzira na dodatni kriogeni sustav.

NEDOSTACI:

1. Cijena, veličina, težina i komplikacije rashladnog sustava.
2. Ležajevi moraju izdržati hladnoću ili biti izolirani od hladnog rotora
3. Naglo smanjenje snage ili gašenje generatora ako supravodiči izađu iz supravodljivog stanja

Osim klasične izvedbe HTS generatora postoji i izvedba nazvana homopolarni HTS generator koja se koristi za manje jedinice. Glavni dijelovi homopolarnog generatora su: kriogeni kondenzator, kriogeni hladnjak, zavojnica, armatura, stator i rotor (slika 28.).



Slika 28. Homopolarni HTSC generator

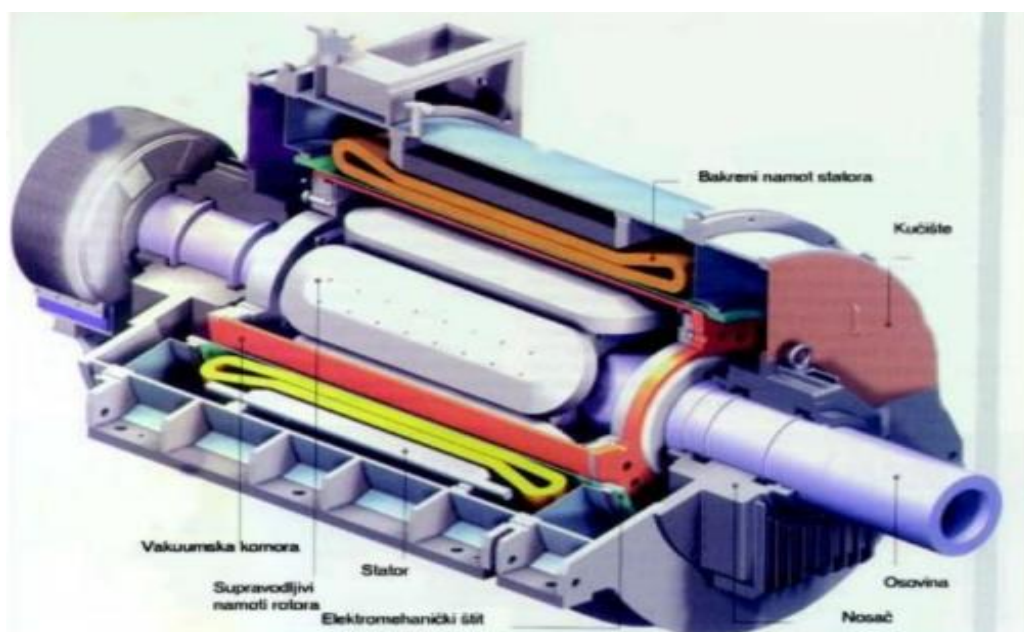
Izvor: <https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/50f2d7753487ef55a0285c8499f54831f7a119e2/2-Figure2-1.png> [58]

HTSC homopolarni generator je specifična vrsta generator koji se koristi kod pogonskih strojeva velike brzine. Generator ima na rotoru jednostavan uzbudni HTSC namot se sastoji od istosmjerne uzbude polja zavojnica, rotora i statora. Armatura se sastoji od tekućinom hlađenih namota. Jezgra rotora ima dva skupa istaknutih polova koji su na oba kraja pomaknuti za jedan pol.

4.5. ELEKTROMOTORI

Supravodljivi električni strojevi su elektromehanički sustavi koji se oslanjaju na korištenje jednog ili više supravodljivih elemenata. Budući da supravodiči nemaju otpora, obično imaju veću učinkovitost. Najvažniji parametar za supravodljivi stroj je stvaranje vrlo visoke magnetske indukcije koju nije moguće postići u konvencionalnom stroju. To dovodi do značajnog smanjenja volumena stroja. To znači veliko povećanje specifične snage. Međutim, budući da supravodiči imaju nulti otpor samo ispod kritične temperature T_c , koja je stotinama stupnjeva niža od sobne temperature, nužno je koristiti kriogeniku.

Supravodljivi motori (slika 29) su novi tipovi sinkronih motora na izmjeničnu struju koji koriste HTSC (visokotemperaturni supravodiči) namote umjesto konvencionalnih bakrenih zavojnica. Budući da HTS žica može voditi znatno veće struje od bakrene žice, ovi namoti su sposobni stvoriti mnogo snažnija magnetska polja.



Slika 29. Presjek HTSC elektromotora

Izvor: <https://thetransportjournal.com/2020/02/25/super-conducting-electric-motors-for-russian-aircraft/> [59]

Zamjena konvencionalnih bakrenih namota rotora HTSC zavojnicama rezultira smanjenim električnim gubicima u rotoru. Povećana električna struja u rotoru motora u konačnici rezultira povećanom specifičnom snagom a time i manjom veličinom. Manja veličina HTSC motora znači da je znatno lakši pa se može koristiti na nove i inovativne načine. Osim toga, povećana učinkovitost motora rezultira nižim operativnim troškovima od konvencionalnih motora.

Prednosti supravodljivih električnih motora:

- Smanjeni gubici u namotima, ali samo u elektromagnetu rotora.
- Smanjena veličina i težina po razvijenoj snazi (bez uzimanja u obzir rashladne opreme).

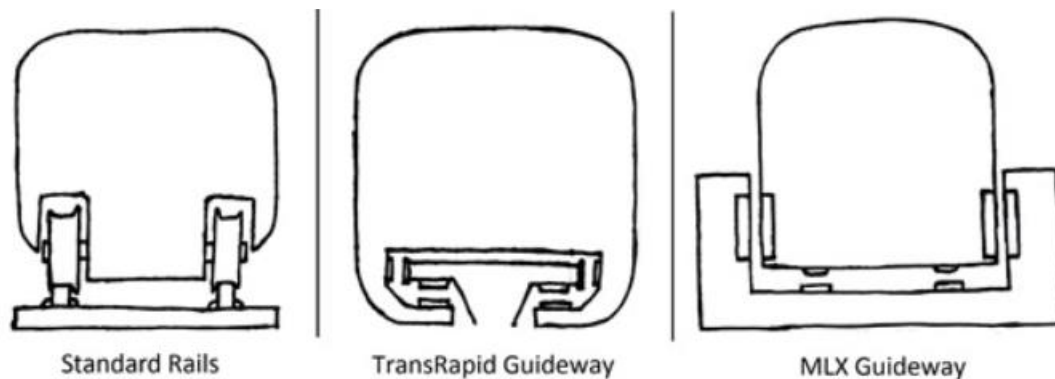
Tu su i sljedeći nedostaci:

- Cijena, veličina, težina i komplicirani rashladni sustav.
- Iznenadno otkazivanje rada motora ili generatora ako supravodiči napuste svoje supravodljivo stanje.
- Ležajevi motora moraju biti sposobni izdržati hladnoću ili moraju biti izolirani od hladnog rotora.

Kada struja prolazi kroz namotaje koji leže u magnetskom polju, stvara se sila koja nastoji pokrenuti te namote. U motorima se ova sila prenosi na osovinu i uzrokuje njenu rotaciju. Ta se rotacijska energija zatim koristi za mehanički rad. Supravodljivi motori su nove vrste sinkronih motora koji koriste HTS (visokotemperaturni supravodiči) namote umjesto konvencionalnih bakrenih zavojnica. HTS žica može voditi znatno veće struje od bakrene žice pa ovi namoti generiraju mnogo snažnija magnetska polja.

4.6. LEVITIRAJUĆI VLAKOVI

Magnetska levitacija (maglev) ili magnetska suspenzija je metoda kojom objekt lebdi iznad površine bez ikakve podrške osim magnetskih polja. Magnetska sila se koristi za suprotstavljanje učincima gravitacijske sile i bilo koje druge sile. Maglev vlakovi koriste magnetizam da levitiraju iznad pruge kojom putuju. Oni su brži, učinkovitiji i ekološki prihvatljiviji od modernih vlakova na kotačima. Kao što je prikazano na slici 30, Maglev vlakovi imaju vodilice, ali po njima putuju bez da ih uopće ne dodiruju. Postoje brzi međugradski sustavi prijevoza putnika (brzine preko 400 kilometara na sat) i gradski sustavi male brzine (80 kilometara na sat do 200 kilometara na sat (koji su u izgradnji). Tri su bitna dijela za postizanje Maglev sustava: levitacija, pogon i vođenje.



Slika 30. Usporedba kotača i tračnice u odnosu na vodilice

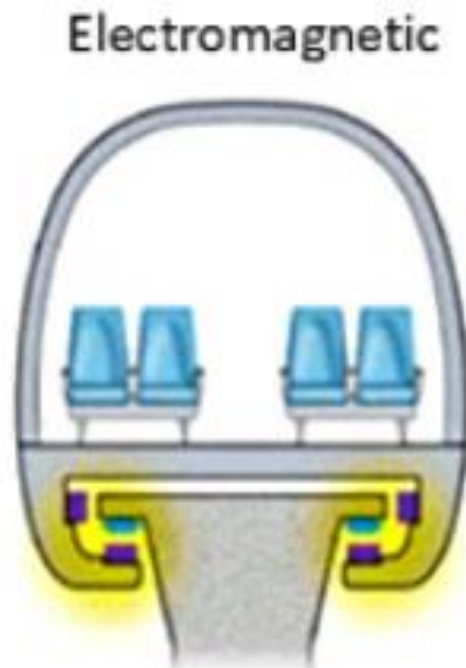
Izvor:

https://sites.tufts.edu/eeseniorhandbook/files/2015/04/ECE_SHP_Figure03_v1_CornellWilson.jpg
pg [54]

Dvije su osnovne vrste tehnologije levitacije:

Elektromagnetski ovjes (**EMS**): EMS (slika 31) koristi privlačnu silu elektromagneta postavljenih na vodilicu i na vlak kako bi postigao levitaciju. Prednosti ove metode su što je

jednostavnija za implementaciju od elektrodinamičke i što održava levitaciju i pri nultoj brzini. Nedostaci su što je sustav nestabilan. Pri velikim brzinama postaje teško održavati ispravnu udaljenost između vlaka i vodilice.

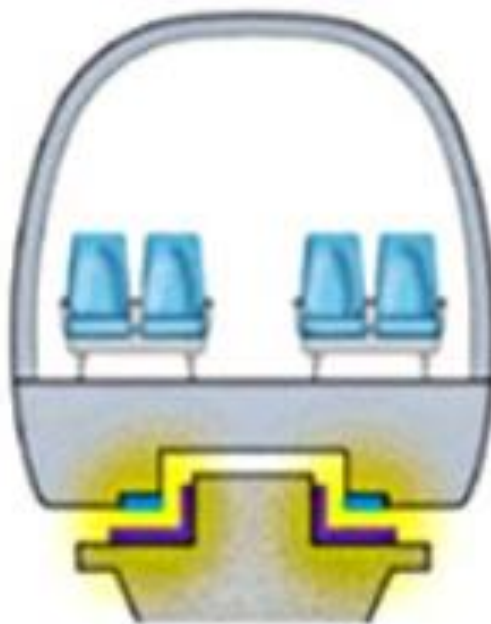


Slika 31. Prikaz elektromagnetske suspenzije

Izvor: <https://journals.eco-vector.com/transsyst/article/view/10861> [54]

Elektrodinamički ovjes (**EDS**): EDS (slika 32) koristi odbojnu silu (supervodljivih) magneta postavljenih na vodilicu i na vlak kako bi postigao levitaciju. Magneti se kreću jedan pored drugog dok vlak vozi i pri tome stvaraju odbojnu silu. Prednosti ove metode su da je nevjerojatno stabilna pri velikim brzinama. Nedostaci su što je potrebno postići dovoljnu brzinu da bi vlak uopće mogao levitirati.

Electrodynamic



Slika 32. Prikaz elektrodinamičke suspenzije

Izvor: <https://journals.eco-vector.com/transsyst/article/view/10861> [54]

Maglev koristi električni linearni motor za postizanje pogona. Normalni električni rotacijski motor koristi magnetizam za stvaranje zakretnog momenta i okretanje osovine. Ima stator, koji okružuje rotor. Stator se koristi za stvaranje okretnog magnetskog polja. Ovo polje omogućuje pojavu sile na rotoru koja uzrokuje njegovo okretanje. Kod linearnog motora, umjesto okretnog magnetskog polja, stator stvara polje koje putuje njegovom dužinom. Dakle, električni linearni motor izravno proizvodi pravocrtno gibanje.

Usmjeravanje je ono što vlak drži u središtu iznad vodilice. Tračnice za levitaciju s obje strane vlaka povezane su jedna s drugom. Kroz ovu vezu, kada se vlak pomiče bliže jednoj strani inducira se sila vraćanja koja ga gura natrag prema sredini.

Šangajski maglev vlak (slika 33) ili Shanghai je najstariji komercijalni maglev koji još uvijek radi i prvi komercijalni maglev velike brzine s krstarećom brzinom od 431 km/h. To je ujedno i najbrži komercijalni električni vlak na svijetu.



Slika 33. Šangajski maglev vlak

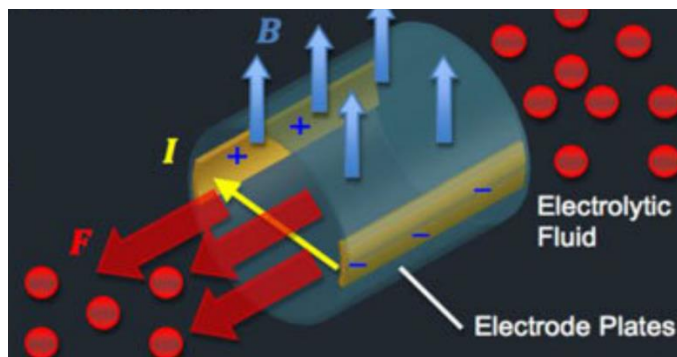
Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Shanghai_maglev_train [55]

Njemačka je razvila Transrapid, sustav maglev vlakova. Transrapid postiže brzinu do 550 km/h (340 mph).

4.7. MAGNETOHIDRODINAMIČKA PROPULZIJA

Magnetohidrodinamički pogon ili MHD akcelerator je metoda za pogon plovila koja za stvaranje poriva koristi samo električno i magnetsko polje koja direktno izazivaju strujanje vode oko ili u tunelu kroz plovilo. To znači da takvo plovilo nema u vodi nikakvih pokretnih dijelova. Voda se usmjerava straga pa kao reakcija plovilo ubrzava prema naprijed [25][26]. Princip rada prikazan je na slici 34. Kako morska voda ulazi u cijev potisnika sa prednje strane, električna struja i magnetsko polje prolaze kroz cijev. Sol prisutna u morskoj vodi čini je elektrolitom i omogućuje nesmetan protok struje. Morska voda tako stupa u vezu sa električnim i magnetskim poljima na način da se voda punom snagom istiskuje iz stražnjeg

dijela plovila. Kako morska voda izlazi straga, vozilo ubrzava prema naprijed. Cijev potisnika kontinuirano usisava vodu s prednjeg kraja i ispumpava je većom brzinom sa stražnje strane, osiguravajući konstantnu brzinu plovilu. Na slici 34 je prikazano MHD plovilo.



Slika 34. Pr1incip rada MHD propulzije

Izvor: <https://slideplayer.com/slide/5287858/> [25, 26]

Problem s MHD tehnologijom je što je ona skuplja od konvencionalnih plovila, a također je mnogo sporija od uobičajenih propelerskih motora. Štoviše, u usporedbi brzinom plovila, veličina motora je relativno mnogo veća [41].



Slika 35. Prikaz MHD plovila

Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamic_drive#/media/File:Yamato1_1.jpg [41]

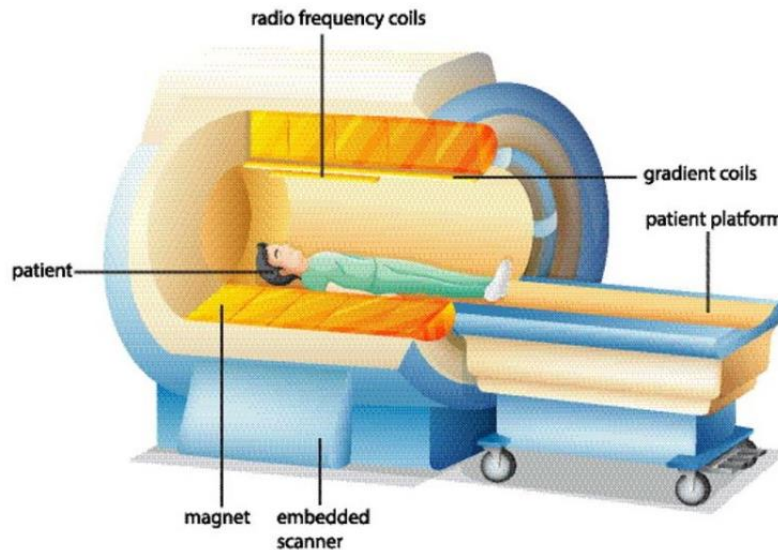
Prvi prototip, 3 metra (10 stopa) duge podmornice nazvane EMS-1, dizajnirao je i testirao Stewart Way, 1966. godine. Ova MHD podmornica radila je na baterije. One su isporučivale struju elektrodama i elektromagnetima, koji su proizvodili magnetsko polje. Tijekom testa u zaljevu Santa Barbara u Kaliforniji, izmjerena je brzina krstarenja od oko 0,4 metra u sekundi [42] [43].

4.8. MR DIJAGNOSTIKA

Magnetska rezonanca (MRI) je medicinska tehnika snimanja koja koristi magnetsko polje i računalno generirane radio valove za stvaranje detaljnih 3D slika organa i tkiva u tijelu kao što je prikazano na slici 36. Većina MRI strojeva su u osnovi veliki snažni elektromagneti u obliku cijevi.

Magneti koji se danas koriste u MRI sustavima stvaraju magnetsko polje od 0,5 T do 4T.

Većina MRI sustava koristi supravodljivi magnet, koji se sastoji od više zavojnica ili namota žice kroz koje prolazi električna energija, stvarajući magnetsko polje do 4T. Održavanje tako velikog magnetskog polja zahtijevalo mnogo energije kada se ne bi primijenili supravodiči. Da bi se postiglo supravodljivo stanje, žice se nalaze u tekućem heliju koji je ohlađenom na -296.1°C . Kao toplinska izolacija koristi se vakuum.



Slika 36. Prikaz stroja za snimanje magnetske rezonancije

Izvor: <https://www.computerhistory.org/makesoftware/exhibit/mri/> [56]

Unutar MRI uređaja nalaze se tri gradijentna magneteta. Ovi magneti imaju mnogo manju snagu u usporedbi s glavnim magnetskim poljem. Mogu raditi s magnetskom indukcijom od 0.018 do 0.026T. Dok glavni magnet stvara snažno i stabilno magnetsko polje oko pacijenta, gradijentni magneti stvaraju promjenjivo polje.

Drugi dio MRI sustava je skup zavojnica koje odašilju radiofrekventne valove u tijelo pacijenta. Postoje različite zavojnice za različite dijelove tijela (slika 37).

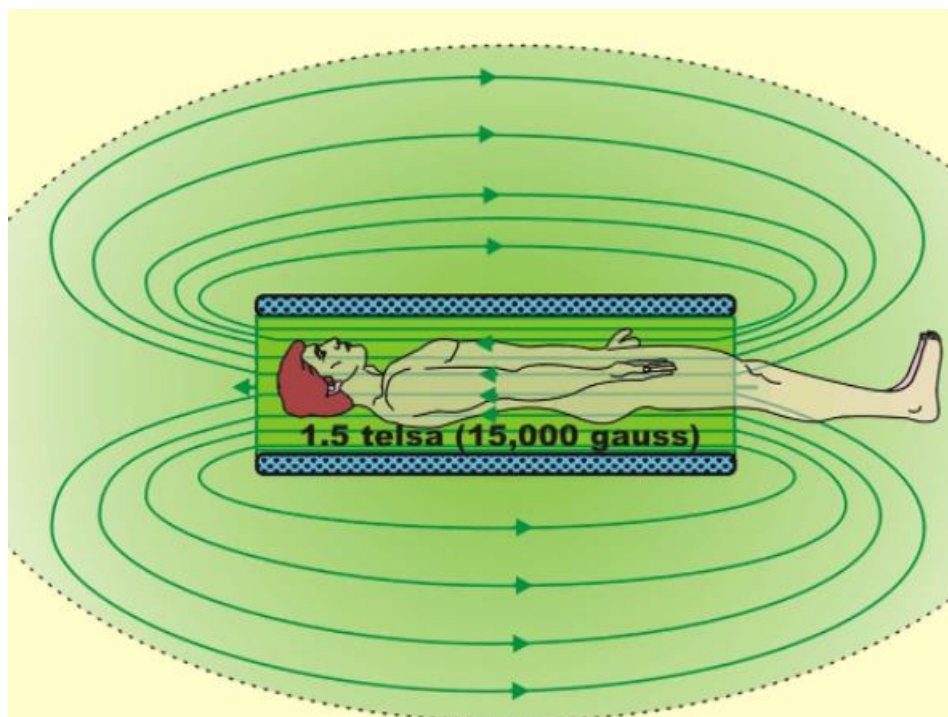
Sustav magnetske rezonancije sastoji se od nekoliko glavnih komponenti koje zajedno funkcioniraju za proizvodnju slika. Tijekom procesa dobivanja slike tijelo pacijenta se stavlja u jako magnetsko polje. U svakoj točki magnetsko polje ima određeni smjer. Ovaj smjer se koristi kao referenca za izražavanje smjera magnetizacije tkiva. Jačina magnetskog polja određena je vrstom i dizajnom magneteta. Supravodljivi magneti mogu proizvesti jaka magnetska polja. Homogenost, odnosno ujednačenost jakosti polja neophodna je za kvalitetno snimanje.

MRI proces se sastoji od razmjene RF impulsa i signala između opreme i tijela pacijenta. To se radi preko RF zavojnica koje služe kao antena za prijenos impulsa i primanje

signala. Potrebno je zaštititi područje snimanja tako da ga se zatvori u vodljivu metalnu prostoriju kako bi se blokirale vanjske RF smetnje.

Proces snimanja je kontroliran informacijama pohranjenim u računalu. Protokoli programirani u računalu i odabrani od strane operatera vode proces snimanja i određuju karakteristike slika. RF signale prikupljene iz pacijentovog tijela tijekom procesa akvizicije računalu koristi za rekonstrukciju slike

MRI ne emitira ionizirajuće zračenje koje se nalazi u rendgenskim i CT slikama, već koristi jako magnetsko polje. Magnetno polje se proteže izvan stroja i vrši vrlo snažne sile na predmete od željeza i drugih predmeta koji se mogu magnetizirati. Dovoljno je jak da baci invalidska kolica preko sobe. Pacijenti bi trebali obavijestiti svoje liječnike o bilo kojem obliku implantata prije MR skeniranja.



Slika 37. Magnetsko polje koje stvaraju supravodljivi magneti.

Izvor: <http://www.sprawls.org/mripmt/MRI02/index.html> [57]

I otporni i trajni magneti obično su dizajnirani za proizvodnju vertikalnih magnetskih polja koja se kreću između dva magnetska pola, kao što je prikazano na slici 35.

MRI je moguće napraviti neelektričnim permanentnim magnetom. Očigledna prednost je da trajni magnet ne zahtijeva ni električnu energiju ni rashladne tekućine za rad. Međutim, ova vrsta magneta također je ograničena na relativno niske jakosti polja pa je kvaliteta slika lošija.

5. ZAKLJUČAK

Najvažnije svojstvo supravodiča je odsustvo električnog otpora. Ono omogućava protok električne energije bez gubitka. Upravo je ta pojava najviše zaintrigirala mnoge fizičare i potaknula ih da sve više istražuju fenomen supravodljivosti. Usprkos temeljitom istraživanju kroz 110 godina od njegova otkrića, supravodljivost ostavlja još mnogo prostora za istraživanje i primjenu.

Od otkrića, svojstva supravodljivih materijala postupno su se razvijala. Na početku su to bili jednostavni supravodljivi materijali, a s vremenom su se otkrili i složeniji, odnosno materijali koji nastaju spajanjem nekoliko elemenata. Složeniji supravodljivi materijali imaju višu kritičnu temperaturu te se zbog toga nazivaju visokotemperaturni supravodiči. Otkrićem keramičkih materijala baziranih na željezu ili bakru znanstvenici su omogućili širu primjenu supravodiča. Iako ovaj pojam nije toliko poznat, u općoj primjeni supravodiči se mogu pronaći i u svakodnevnici, primjerice kod snimanja magnetnom rezonancom. Bez primjene supravodljivih materijala kod magnetne rezonance snimanje bi bilo mnogo slabije kvalitete pa čak i onemogućeno. Najpoznatiji primjer primjene supravodljivih materijala izražen je kod levitacijskog vlaka. Zbog primjene supravodiča te posebne izgradnje taj vlak postiže nevjerojatznu brzinu te velike udaljenosti prelazi u kratkom roku. Predviđa se da će u bližoj budućnosti ove materijale biti moguće pronaći i u prijenosnoj mreži tj. u dalekovodima. Zbog činjenice da je supravodičima potrebno omogućiti hlađenje tekućim dušikom ili helijem, ova tehnologija je vrlo skupa, ali dugoročno veoma isplativa. Uskoro se očekuje i šira primjena supravodiča jer fizičari svojim istraživanjima stalno dolaze do novih spoznaja.

LITERATURA

- [1] Babić, D. Supravodiči u nanoznanosti, Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu (2003.), str. 2–3.
- [2] Uglietti, D. “A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors”, Superconductor Science and Technology, vol. 32, no. 5, p. 053001, 2019/04/09 2019
- [3] Vulusala, V. S. G., Madichetty, S. “Application of superconducting magnetic energy storage in electrical power and energy systems: a review,” vol. 42, no. 2, pp. 358-368, 2018
- [4] Liu, T., He, J. J., Nori, F. “Majorana corner states in a two-dimensional magnetic topological insulator on a high-temperature superconductor”, Physical Review B, vol. 98, no. 24, p. 245413, 12/13/2018
- [5] Hübner, S., et al. “Two gaps make a high-temperature superconductor?,” Reports on Progress in Physics, vol. 71, no. 6, p. 062501, 2008/05/02 2008
- [6] Huang, J., Wang, H. “Effective magnetic pinning schemes for enhanced superconducting property in high temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: a review“, Superconductor Science and Technology, vol. 30, no. 11, p. 114004, 2017/10/27 2017
- [7] Tamir, I. et al. “Sensitivity of the superconducting state in thin films”, vol. 5, no. 3, p. eaau3826, 2019
- [8] Kemper, A. F. et al. „Sensitivity of the superconducting state and magnetic susceptibility to key aspects of electronic structure in ferropnictides“, New Journal of Physics, vol. 12, no. 7, p. 073030, 2010/07/23 2010
- [9] Kamerlingh Onnes, H. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 120b, 122b, 124 c, Leiden (1911.)
- [10] Cyrot, M. Ginzburg-Landau Theory for superconductors, Reports on Progress in Physics, vol. 36, no. 2
- [11] Kamihara, Yoichi; Hiramatsu, Hidenori; Hirano, Masahiro; Kawamura, Ryuto; Yanagi, Hiroshi; Kamiya, Toshio; Hosono, Hideo (2006). Iron-Based Layered Superconductor

- [12] Kordyuk, A. A. (2012). „Iron-based superconductors: Magnetism, superconductivity, and electronic structure (Review Article)”. *Low Temp.*
- [13] Batistić, I. *Supravodljivost, fizika čvrstog stanja*, predavanja 2013./2014. Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu,
- [14] Schäfer, T., Wilczek F. *Phys. Rev. D* 60:114033(1999)
- [15] Bardeen, J., Cooper, L. N., Schrieffer, J. R. *Phys. Rev.* 106:162(1957); *Phys. Rev.* 108:1175(1957)
- [16] Berges, J, Wetterich, C. hep-ph/0012311(2000)
- [17] Highfield, Roger (16 September 2008). "Large Hadron Collider: Thirteen ways to change the world". *The Daily Telegraph*. London. Archived from the original on 24 September 2009. Retrieved 10 October 2008.
- [18] Mankowsky, R.; Subedi, A.; Först, M.; et al. (December 3, 2014). „Nonlinear lattice dynamics as a basis for enhanced superconductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ “. *Nature*. **516** (1): 71–73.
- [19] „Nickel for thought: Compound shows potential for high-temperature superconductivity“. phys.org. June 16, 2017. Retrieved August 2, 2017.
- [20] „Scanning the surface of lithium titanate“. Tohoku University. July 4, 2017. Retrieved August 2, 2017.
- [21] „Lab discovers titanium-gold alloy that is four times harder than most steels“. phys.org. July 20, 2016. Retrieved August 2, 2017.
- [22] London, F.; London, H. (1935). „The Electromagnetic Equations of the Supraconductor“. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 149 (866): 71.
- [23] Meissner, W.; R. Ochsenfeld (1933). „Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit“. *Naturwissenschaften*. 21 (44): 787.
- [24] Stephen Myers (4 October 2013). "The Large Hadron Collider 2008-2013". *International Journal of Modern Physics A*. 28 (25)

- [25] Dane, Abe (August 1990). „100 mph Jet Ships“ (PDF). Popular Mechanics. pp. 60–62. Retrieved 2018-04-04.
- [26] Normile, Dennis (November 1992). „Superconductivity goes to sea“ (PDF). Popular Science. Bonnier Corporation. pp. 80–85. Retrieved 2018-04-04.
- [27] http://www.superconductors.org/400K_SC.htm , lipanj 2015.
- [28] "Status of the LHC superconducting cable mass production 2002".
- [29] Demencik, E.; Vojenciak, M.; Kario, A.; Nast, R.; Jung, A.; Goldacker, W.; Grilli, F. AC Loss and Coupling Currents in YBCO Coated Conductors With Varying Number of Filaments. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014, 24, 1–8.
- [30] “Characteristics of Superconducting Magnets”. Superconductivity Basics. American Magnetics Inc. 2008. Retrieved October 11, 2008.
- [31] Dai, P.; Chakoumakos, B.C.; Sun, G.F.; Wong, K.W.; Xin, Y.; Lu, D.F. (1995). “Synthesis and neutron powder diffraction study of the superconductor $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ by Tl substitution”. Physica C. 243 (3–4): 201–206. Bibcode:1995PhyC..243..201D. doi:10.1016/0921-4534(94)02461-8.
- [32] Drozdov, A. P.; Eremets, M. I.; Troyan, I. A.; Ksenofontov, V.; Shylin, S. I. (2015). “Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system“. Nature. 525 (7567): 73–76. arXiv:1506.08190. Bibcode:2015Natur.525...73D. doi:10.1038/nature14964. ISSN 0028-0836. PMID 26280333. S2CID 4468914.
- [33] Cartlidge, Edwin (18 August 2015). „Superconductivity record sparks wave of follow-up physics“. Nature. 524 (7565): 277. Bibcode:2015Natur.524..277C. doi:10.1038/nature.2015.18191. PMID 26289188.
- [34] Ge, Y. F.; Zhang, F.; Yao, Y. G. (2016). „First-principles demonstration of superconductivity at 280 K (7 °C) in hydrogen sulfide with low phosphorus substitution“. Phys. Rev. B. 93 (22): 224513. arXiv:1507.08525. Bibcode:2016PhRvB..93v4513G. doi:10.1103/PhysRevB.93.224513. S2CID 118730557.
- [35] Grant, Andrew (23 August 2018). „Pressurized superconductors approach room-temperature realm“. Physics Today. doi:10.1063/PT.6.1.20180823b.

- [36] Sun, Ying; Lv, Jian; Xie, Yu; Liu, Hanyu; Ma, Yanming (26 August 2019). „Route to a Superconducting Phase above Room Temperature in Electron-Doped Hydride Compounds under High Pressure“. *Physical Review Letters*. 123 (9): 097001. Bibcode:2019PhRvL.123i7001S. doi:10.1103/PhysRevLett.123.097001. PMID 31524448. S2CID 202123043.
- [37] Extance, Andy (1 November 2019). „The race is on to make the first room temperature superconductor“. www.chemistryworld.com. Royal Society of Chemistry. Retrieved 30 December 2019.
- [38] Kenneth Chang (14 October 2020). „Finally, the First Room-Temperature Superconductor“. *The New York Times*.
- [39] Snider, Elliot; Dasenbrock-Gammon, Nathan; McBride, Raymond; Debessai, Mathew; Vindana, Hiranya; Vencatasamy, Kevin; Lawler, Keith V.; Salamat, Ashkan; Dias, Ranga P. (October 2020). „Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride“. *Nature*. 586 (7829): 373–377.
- [40] Ivan Supek: "Nova fizika", Školska knjiga Zagreb, 1966.
- [41] Cébron, David; Viroulet, Sylvain; Vidal, Jérémie; Masson, Jean-Paul; Viroulet, Philippe (2017). "Experimental and Theoretical Study of Magnetohydrodynamic Ship Models". *PLOS ONE*. 12 (6): e0178599. arXiv:1707.02743. Bibcode:2017PLoSO..1278599C. doi:10.1371/journal.pone.0178599. PMC 5493298. PMID 28665941.
- [42] "Run Silent, Run Electromagnetic". *Time*. 1966-09-23. Archived from the original on January 14, 2009.
- [43] "EMS-1 electromagnetic submarine on US television (1966)" on YouTube
- [44] "[Meissner effect | physics](#)". *Encyclopedia Britannica*. Retrieved 22 April 2017.
- [45] A. Bussmann-Holder and H. Keller: High-temperature superconductors
- [46] FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research)Magnetic shielding with superconductorsNICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility)
- [47] 2004-2022 University of Cambridge.
- [48] July 2013Proceedings of the National Academy of Sciences 110(30)
DOI:10.1073/pnas.1301989110

- [49] Timusk, Tom; Bryan Statt (1999). "The pseudogap in high-temperature superconductors: an experimental survey". *Reports on Progress in Physics*. 62 (1): 61–122. arXiv:cond-mat/9905219. Bibcode:1999RPPh...62...61T. doi:10.1088/0034-4885/62/1/002. S2CID 17302108.
- [50] G. Potel, F. Barranco, E. Vigezzi, and R. A. Broglia
Phys. Rev. C 103, L021601 – Published 25 February 2021
- [51] Demencik, E.; Vojenciak, M.; Kario, A.; Nast, R.; Jung, A.; Goldacker, W.; Grilli, F. AC Loss and Coupling Currents in YBCO Coated Conductors With Varying Number of Filaments. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2014, 24, 1–8. [Google Scholar] [CrossRef]
- [52] : F. Schmidt, A. Allais Nexans – Superconducting Cable System (Hanover – Germany)
- [53] Superconducting Magnets. Wikipedia, The Free Encyclopedia.
- [54] Master degree Specialist, Adjunct Professor Portugal, Dr. António Bernardino de Almeida str., 431, 4249-015 Porto
- [55] Hunt, Hugh (2017-01-19). "How we can make super-fast hyperloop travel a reality". Independent. Retrieved 19 January 2017.
- [56] 2022 Computer History Museum
- [57] Magnetic Resonance Imaging System Components
Perry Sprawls, Ph.D.
- [58] July 2009 *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 19(3):1656 - 1661
- [59] 2022 THE TRANSPORT JOURNAL
- [60] K. Sivasubramaniam, T. Zhang, M. Lokhandwalla, E. Laskaris, J. Bray, B. Gerstler, M. Shah, J. Alexander, Published 23 June 2009, *Physics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity*
- [61] ‘Development of HTS machines’ to TU Darmstadt, 15 July 2009 and press picture of HTS-2-machine (press release 16 April 2009).
- [62] Copyright © 2022. Electrical Equipment.
- [63] CRC Handbook of Chemistry and Physics, the Technische Universität München, Reade Metals and Minerals Corp., industry news sources

POPIS SLIKA

Slika 1. Rast kritične temperature T_c u prvih 70 godina od otkrića supravodljivosti	3
Slika 2. Porast kritične temperature nakon otkrića kuprata 1986. godine.....	4
Slika 3. Prikaz prijelazne temperature.....	5
Slika 4. Tri kritične vrijednosti supravodiča	6
Slika 5. Površina kritične jakosti struje	7
Slika 6. Dijagram Meissnerovog efekta.	8
Slika 7. Meissnerov efekt	9
Slika 8. Granice supravodljivog stanja ovisno o temperaturi i jakosti magnetskog polja	10
Slika 9. Ovisnost magnetskog polja o temperaturi kod supravodiča tipa II.....	11
Slika 10. Razvoj supravodiča na bazi molekularnog željeza, metala i oksida.	13
Slika 11. Prikaz ovisnosti otpora o temperaturi	14
Slika 12. Prikaz kristalnih rešetki kupratnih supravodiča	15
Slika 13. Fazni dijagram kupratnih supravodiča s elektronskim i šupljinskim dopiranjem.....	15
Slika 14. Fazni dijagram obitelji fero-pnictida 122 dopunjen obitelji 122 (Se) kao generalizirani fazni dijagram za supravodiče temeljene na željezu.	16
Slika 15. Londonova dubina prodiranja	19
Slika 16. Formiranje Cooperovog para u supravodljivom materijalu	21
Slika 17. Ovisnost kritične temperature o atomskoj masi A	22
Slika 18. Energetski rascjep u supravodičima u zavisnosti od temperature	23
Slika 19. Toplinski kapacitet vanadija	23
Slika 20. Pregled AC gubitka YBCO širine 12 mm.....	26
Slika 21. Topli električni supravodljivi kabel. Dielektrik se nalazi izvan fleksibilne cijevi	27
Slika 22. Supravodljivi kabel s hladnim dielektrikom	28
Slika 23. Prikaz supravodljivog magneta.....	30
Slika 24. Prikaz LHC tunela, te presjek LHC dipolnog magneta	31
Slika 25. HTSC generator klasične izvedbe.....	32
Slika 26. Usporedba veličine i težine HTSC i konvencionalnog generatora.....	33
Slika 27. Siemens 4 MVA HTSC generator	34
Slika 28. Homopolarni HTSC generator	35
Slika 29. Presjek HTSC elektromotora	36
Slika 30. Usporedba kotača i tračnice u odnosu na vodilice	38
Slika 31. Prikaz elektromagnetske suspenzije.....	39
Slika 32. Prikaz elektrodinamičke suspenzije.....	40
Slika 33. Šangajski maglev vlak	41
Slika 34. Princip rada MHD propulzije.....	42
Slika 35. Prikaz MHD plovila	42
Slika 36. Prikaz stroja za snimanje magnetske rezonancije	44
Slika 37. Magnetsko polje koje stvaraju supravodljivi magneti.....	45

POPIS OZNAKA

T – temperatura

K – kelvin

T_c – kritična temperatura

$^{\circ}\text{C}$ – Celzijev stupanj

$\text{Li}_2\text{MgH}_{16}$ - bilitij magnezijev heksadekahidrid

$C_v T$ – kapacitet proporcionalne temperature

GPa - gigapaskal

H – jačina magnetskog polje

H_c – kritično magnetsko polje

H_0 – konstanta

H_2S – vodikov sulfid

Hz - frekvencija

J_c – gustoća struje

ξ , – duljina koherencije

$|\xi_k|$ – energija vezivanja

FeSC – supravodiči temeljeni na bazi željeza

G_t = vodljivost pri bilo kojoj temperaturi u $^{\circ}\text{C}$

G_{tcal} = vodljivost pri temperaturi kalibracije t_{cal} u $^{\circ}\text{C}$

α = temperaturni koeficijent otopine pri t_{cal} in $^{\circ}\text{C}$

MgB_2 – magnezijev diborid

NbTi - nobij-titanij

YBCO – itrij barijev bakreni oksid

I – struja

E – napon

R – otpor

ms – milisekunda

As – arsen

P – fosfor

G – vodljivost

R - obrnuti otpor

β - fenomenološki parametri

α - fenomenološki parametri

ψ – valna funkcija

POPIS KRATICA

TF – Fermijeva temperatura (Temperature Fermi)

HTSC – visokotemperaturni supravodiči (High temperature superconductors)

LTSC – niskotemperaturni supravodiči (Low temperature superconductors)

QCD – kvantna kromodinamika (Quantum chromodynamics)

RT – sobna temperatura (Room temperature)

RTS – supraprovodljivost sobne temperature (Room temperature superconducting)

SCTL – supravodljivi dalekovodi (Superconductive Transmission Lines)

MRI – magnetska rezonanca (Magnetic resonance)

LHC – veliki hadronski sudarač (Large hadron collider)

CERN - Europska organizacija za nuklearna istraživanja (European Council for Nuclear Research)

SDW - val spinozne gustoće (Spin density wave)

AC – izmjenična struja (Alternate current)

DC – istosmjerna struja (Direct current)

CC- obloženi vodič (Coated conductor)

SC – supravodljivost (superconducting)

RPM – okretaji u minuti (rounds per minute)

MVA – megavolti amperi (megavolts – amperes)