

# Razvoj i primjena supravodljivih materijala

---

Ćurić, Iris

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:588089>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Preddiplomski sveučilišni studij**

**RAZVOJ I PRIMJENA SUPRAVODLJIVIH  
MATERIJALA**

**Završni rad**

**Iris Ćurić**

**Osijek, 2020.**

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1.1 ZADATAK ZAVRŠNOG RADA</b> .....	2
<b>2. PREGLED RAZVOJA SUPRAVODLJIVOSTI</b> .....	3
<b>2.1. Meissnerov efekt</b> .....	3
<b>2.2 Izotopni efekt</b> .....	5
<b>2.3 BCS-teorija</b> .....	5
<b>2.4 Josephsonov učinak</b> .....	6
<b>2.5 Otkriće visokotemperaturnih vodiča</b> .....	6
<b>3. PODIJELA SUPRAVODLJIVIH MATERIJALA</b> .....	8
<b>3.1 Općenito o supravodljivosti</b> .....	8
<b>3.2 Vrste supravodljivih materijala</b> .....	10
<b>3.3 Proizvodnja supravodiča</b> .....	17
<b>4. TEHNOLOŠKA PRIMJENA SUPRAVODLJIVOSTI</b> .....	18
<b>4.1 Magnetno levitacijski vlak – MAGLEV</b> .....	18
<b>4.2 Magnetska rezonancija</b> .....	20
<b>4.3 Električni strojevi (motori i generatori)</b> .....	21
<b>4.4 Primjena magneta u znanosti</b> .....	23
<b>5. NAJNOVIJI NAPREDAK U RAZVOJU I PRIMJENI</b> .....	26
<b>5.1. Razvoj supravodiča na sobnoj temperaturi</b> .....	26
<b>5.2 Mreža za prijenos električne energije</b> .....	27
<b>5.3 Zanimljivosti u istraživanjima supravodljivosti</b> .....	28
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	29
<b>LITERATURA</b> .....	30
<b>SAŽETAK</b> .....	32

## 1.UVOD

Supravodljivost je pojava koja je otkrivena 1911. godine i od tada je zanimljiva mnogim znanstvenicima, posebice fizičarima diljem svijeta koji ju proučavaju. U tih 110 godina istraživanja supravodljivosti dobiveno je čak devet Nobelovih nagrada u tom području.

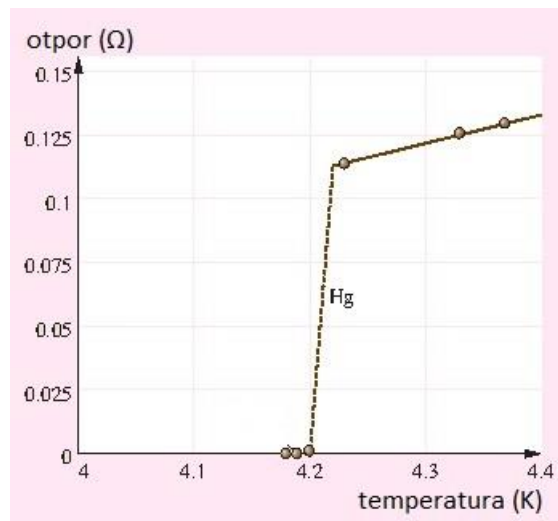
Supravodljivost je fenomen nestajanja električnog otpora i istiskivanja magnetskog polja iz unutrašnjosti vodiča pri niskim temperaturama kod mnogih materijala, od čistih metala kao što su živa ili aluminij pa sve do raznih spojeva s kisikom i slitina. Razvoj supravodljivosti napredovao je kroz godine, svakih nekoliko godina znanstvenici su došli do velikih otkrića poput toga da se javlja Meissnerov efekt, razvoj BCS-teorije s Cooperovim parovima, proučavanje vodiča od jednostavnijih vrsta pa sve do otkrića jedne od složenijih vrsta supravodljivih vodiča, a to su visokotemperaturni supravodiči koji su bili prekretnica za lakšu primjenu supravodljivih materijala. Njihova svojstva, kao što su prijenos energije bez gubitaka i mogućnost stvaranja izrazito jakih magnetskih polja, značajna su te je zbog toga danas primjena supravodljivih materijala dosta raširena. To se vidi iz toga što se supravodljivi materijali koriste od medicine pa sve do prijevoznih sredstava i vlaka Maglev u razvijenim Azijskim zemljama kao što su Japan i Kina. U medicini važna je magnetska rezonancija koja se u dijagnostičke svrhe koristi širom svijeta i bez nje bi bilo teško otkriti mnoge bolesti, a supravodljivi materijali pri tome stvaraju jaka i homogena magnetska polja koja su nužna za uspješno snimanje ljudskog organizma. Također primjena ovih vodiča i materijala vidljiva je kod supravodljivih elektromagneta za strojeve, magneta za električna postrojenja, u znanosti i znanstvenim istraživanjima u CERN-u gdje bez supravodljivih materijala njihovi pokusi ne bi mogli biti izvedivi. Supravodiči sa svojim zanimljivim svojstvima imaju mnoge prednosti u odnosu na standardne vodiče stoga se njihova primjena iz dana u dan pokušava proširiti. Znanstvenici pokušavaju otkriti supravodiče na sobnoj temperaturi koji bi bez gubitaka provodili električnu energiju kako za dalekovode tako i za naše svakidašnje potrepeštine kao što su mobiteli i slično. U budućnosti smatra se da će biti još puno otkrića i napredovanja u smjeru razvoja supravodljivosti jer je postojanje ovoga fenomena zainteresiralo mnoge znanstvenike i tehničare.

## **1.1 ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

U ovome završnom radu zadatak je bio prikazati povijeni razvoj supravodljivih materijala te opisati samu pojavu supravodljivosti i vrste supravodljivih materijala. Na četiri primjera potrebno je prikazati primjenu supravodljivih materijala te na primjeru prikazati smjer razvoja supravodiča.

## 2. PREGLED RAZVOJA SUPRAVODLJIVOSTI

Supravodljivost je pojava koja se počela proučavati početkom 20. stoljeća, točnije 1911. godine kada je nizozemski fizičar Heike Kamerlingh Onnes eksperimentirao sa živom (Hg) i istraživao što se događa s električnim otporom žive pri niskim temperaturama. Od prije je bilo poznato da se otpor metala smanjuje sa snižavanjem temperature, a Onnes je zaključio da u slučaju sa živom otpor nestaje, odnosno iznosi  $0 \Omega$  pri temperaturi od  $4,15 \text{ K}$  ( $-269 \text{ }^\circ\text{C}$ ) i time otkrio supravodljivost. H. K. Onnes je 1913. dobio Nobelovu nagradu za fiziku zbog svog otkrića o supravodljivosti. Na slici 2.1 grafički su prikazani rezultati mjerenja iz pokusa kojim je Onnes otkrio da otpor nestaje na nekoj vrlo niskoj temperaturi, u ovome slučaju za živu.



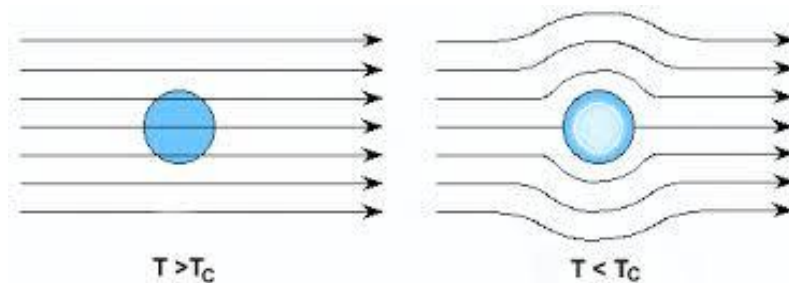
**Slika 2.1:** Prikaz rezultata mjerenja pokusa sa živom [7]

Iz grafa na slici 2.1 vidljivo je da snižavanjem temperature dolazi do smanjenja otpora, a pri vrijednosti temperature od  $4,4 \text{ K}$  otpor iznosi približno  $0,13 \Omega$ . Otpor se postepeno snižava te dolazi na vrijednost nula pri temperaturi od  $4,15 \text{ K}$ . Prema tim saznanjima otkrivena je supravodljivost.

### 2.1. Meissnerov efekt

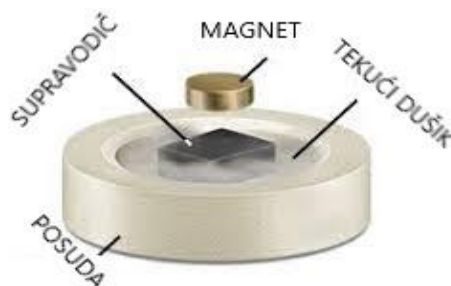
Njemački fizičari Walther Meissner i Robert Ochsenfeld 1933. otkrili su Meissnerov učinak ili Meissnerov efekt dok su proučavali magnetsko polje na supravodljivim metalima kositru (Sn) i olovu (Pb). Meissnerovo stanje vodiča javlja se kada metal, odnosno supravodič koji se nalazi u vanjskom magnetskom polju bude ohlađen ispod kritične temperature  $T_c$ , tada dolazi do

izbacivanja magnetskog polja iz supravodiča. U trenutku kada je magnetsko polje u unutrašnjosti supravodiča jednako nuli, na površini vodiča induciraju se struje. Meissnerov efekt opisuje se kao idealni dijamagnetizam. Dijamagnetizam se pojavljuje kada se materijal izlaže vanjskom magnetskom polju i to je svojstvo kemijskih elemenata da imaju slabu magnetsku permeabilnost (jačina magnetizacije). Vanjsko magnetsko polje utječe na gibanje elektrona oko jezgre te ono proizvodi dodatnu električnu struju. Inducirana struja na površini supravodiča stvara magnetsko polje koje se prema Lenzovom pravilu kreće u suprotnom smjeru od vanjskog magnetnog polja te to dovodi do poništavanja magnetskog polja [1]. Iz slike 2.2 vidimo da za slučaj kada je vodič ohlađen na  $T > T_c$  (temperatura veća od kritične temperature) magnetsko polje postoji i u vodiču i oko njega, a za slučaj kada je  $T < T_c$  (vodič ohlađen na manju temperaturu od kritične temperature) magnetskog polja u vodiču nema, to jest vanjsko magnetsko polje ne prodire u unutrašnjost vodiča.



**Slika 2.2:** Meissnerov efekt [2]

Meissnerov efekt dovodi do levitacije, pojave kod koje magnet lebdi iznad supravodiča jer se magnetsko polje magneta i vanjsko magnetsko polje supravodiča odbijaju, odnosno imaju suprotne magnetske momente. Primjer Meissnerovog efekta je pokus s magnetom i malom pločicom od visokotemperaturnog vodiča, na magnet se stavi pločica i ohladi se tekućim dušikom. Kada se pločica ohladi do kritične temperature i pojave supravodljivog stanja dolazi do lebdenja pločice iznad magneta i pojave Meissnerovog efekta. Levitirati može magnet iznad supravodiča ili supravodič iznad magneta, kao što se vidi prema slici 2.3.



**Slika 2.3:** Levitacija

Ova pojava osnovni je princip koji se primjenjuje za prijevoz lebdećim vozilima kao što je Maglev vlak koji se koristi u Azijskim zemljama poput Japana i Kine.

## 2.2 Izotopni efekt

Efekt izotopa otkrili su fizičari Maxwell i Reynolds 1950. godine, a opisuje odnos između mase izotopa i kritične temperature supravodiča  $T_c$ . Izvodili su pokus na živi i njezinom izotopu te ustanovili da se kritična temperatura smanjuje s porastom mase izotopa, to jest da su obrnuto proporcionalni što vidimo iz formule 2.1.

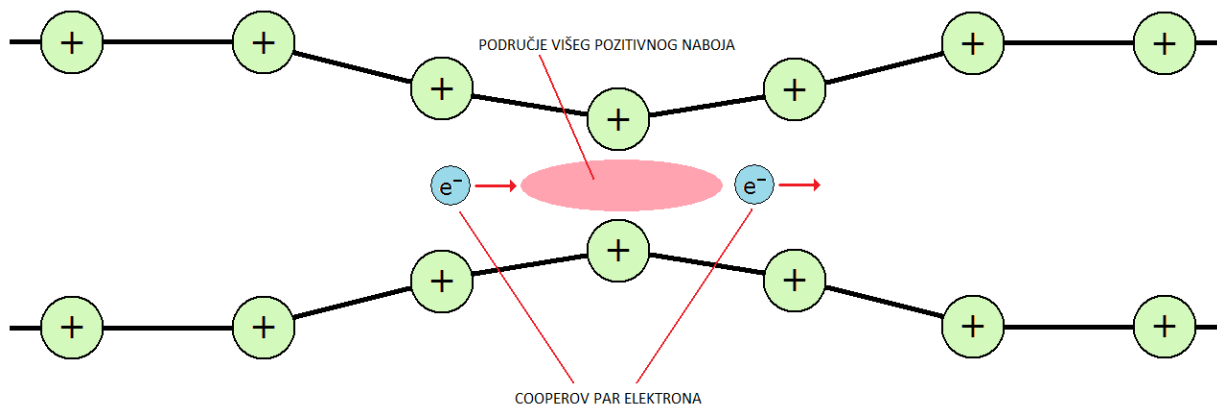
$$T_c = \frac{1}{M^\alpha} \quad (2-1)$$

Gdje oznaka "M" označava relativnu masu atoma izotopa, a " $\alpha$ " je temperaturni koeficijent koji je veći od 0 i karakterističan za svaki materijal.

## 2.3 BCS-teorija

Bardeen-Cooper-Schriefferova teorija ili kraće BCS-teorija je prva teorija o supravodljivosti koja je zaživjela 1957. Za nju su američki fizičari John Bardeen, Leon Cooper i John Robert Schrieffer dobili Nobelovu nagradu 1972. godine. BCS-teorija prikazuje kako se elektroni ponašaju u supravodljivim materijalima prve vrste te opisuje da je međudjelovanje elektron-rešetka-elektron snažnije od odbojne Coulombove sile (elektrostatska sila kojom se dva naboja privlače ili odbijaju, u ovome slučaju elektroni se odbijaju) pri vrlo niskoj temperaturi u kristalnoj rešetki. Veza između dva elektrona je vibracija kristalne rešetke, točnije fonon koji je kvant energije mehaničkih vibracija u čvrstom tijelu, kristalnoj rešetki. Elektroni koji imaju suprotne momente i spinove (vlastite kutne količine gibanja) gibaju se u parovima koji se nazivaju Cooperovi parovi. Cooperovi parovi su parovi elektrona koji se kreću zajedno u kristalnoj rešetki supravodiča pri niskim temperaturama i nemaju gubitak energije pri gibanju kroz kristalnu rešetku. Ova teorija je naišla na probleme kod visokotemperaturnih supravodiča jer se povećanjem temperature elektronski parovi razdvajaju i gibaju se uz gubitke te se pojavljuje električni otpor. Otpor se javlja čim energija uzeta iz električnog polja bude veća nego energija vezanja Cooperovih parova. Na slici 2.4 prikazano je međudjelovanje Cooperovog para elektrona, odnosno elektron-rešetka-elektron.





**Slika 2.4:** Prikaz Cooperovog para [3]

Elektron koji prolazi kroz kristalnu strukturu privlači pozitivno nabijenu rešetku, privlačenjem se struktura malo savije te oslobađa fonon i stvara područje s jakim pozitivnim nabojem. Pozitivno područje privlači drugi elektron koji apsorbira fonon te se spaja s prvim elektronom i tvori Cooperov par. Kao Cooperov par kreću se sve dok ih jača energija od njihove ne rastavi.

## 2.4 Josephsonov učinak

Britanski fizičar Brian David Josephson uočio je 1962. godine da električna struja teče između dva supravodiča čak i onda kada se između njih nalazi tanki sloj izolatora ili materijala koji nije supravodljiv. Takav spoj tankog izolatora i dva supravodiča naziva se Josephsonov spoj. Struja preko izolatora prelazi pomoću tuneliranja, a to je pojava da čestica svlada prepreku, u ovome slučaju izolator, i onda kada to ne ide uz zakone klasične fizike. Ovaj efekt koristi se u razne svrhe, neke od njih su: suprafluidnost, precizno mjeriteljstvo (mjerenje temperature manje od 1 K, mjerenje slabih magnetskih polja pomoću magnetometra), u elektronici, pojačavanje elektromagnetskog signala i mnoge druge. Za to je dobio dio Nobelove nagrade 1973.

## 2.5 Otkriće visokotemperaturnih vodiča

Švicarski fizičar Karl Müller zajedno s kolegom J. G. Bednorzom 1987. godine dobio je Nobelovu nagradu za fiziku u području supravodljivosti jer su 1986. otkrili prvi supravodljivi keramički materijal na 35 K ili  $-238\text{ }^{\circ}\text{C}$  što je do tada bila previsoka temperatura da bi došlo do

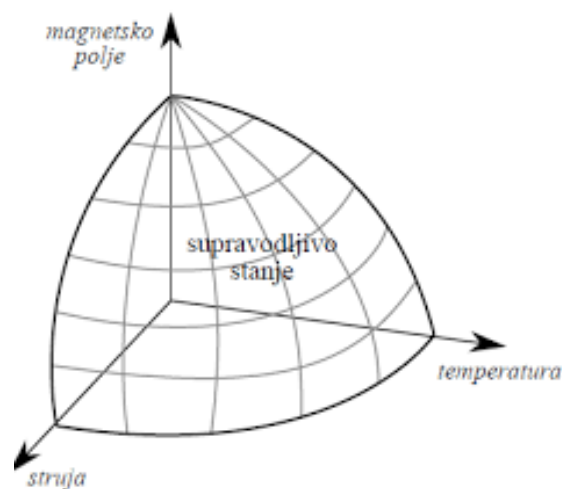
supravodljivosti, time je granica kritične temperature koju je postavila BCS-teorija bila pomaknuta. Svoje eksperimente radili su na keramičkim oksidima, točnije lantan- barij - bakrovom oksidu koji je i bio novootkriveni visokotemperaturni supravodič. Otkriće visokotemperaturnih vodiča dovelo je do toga da su se materijali počeli hladiti pomoću tekućeg dušika koji je bio jeftiniji i pristupačniji nego dotadašnji helij. Temperatura pri kojoj dušik prelazi u tekuće stanje iznosi 77 K. Više o visokotemperaturnim supravodičima i njihovim svojstvima u poglavlju 3.

### 3. PODIJELA SUPRAVODLJVIH MATERIJALA

Supravodljivi materijali mogu se podijeliti na nekoliko načina i prema više kriterija. Osnovna podjela je ovisnost o fizikalnim svojstvima, a na taj način dijele se na niskotemperaturne i visokotemperaturne supravodiče. Niskotemperaturni vodiči su supravodiči prve vrste i nekolicina supravodiča druge vrste, a u visokotemperaturne vodiče spadaju samo supravodiči druge vrste te se baziraju na bakrovom i željeznom oksidu.

#### 3.1 Općenito o supravodljivosti

Supravodljivost je pojava ili fenomen nestajanja specifične električne otpornosti kod nekih materijala pri dovoljno niskim temperaturama [2]. Pod dovoljno niskim temperaturama se smatraju temperature u blizini apsolutne nule, a temperatura pri kojoj određeni materijal iz svog ustaljenog stanja prelazi u supravodljivo stanje naziva se kritična temperatura. Kod vodiča se otpor postepeno smanjuje snižavanjem temperature, a kod supravodiča otpor naglo pada na nulu pri kritičnoj temperaturi. Zanimljivo je što struja u supravodiču teče kao u beskonačnoj petlji, odnosno struja može teći beskonačno dugo i bez strujnog izvora jer zbog nepostojanja otpora u vodiču nema gubitaka energije. Supravodljivo stanje materijala određuju tri značajke: kritična temperatura  $T_c$ , kritično magnetsko polje  $H_c$  i kritična gustoća struje  $J_c$ . Sva tri parametra su međusobno ovisna, a supravodljivost postoji ako je svaki parametar niži od kritične vrijednosti koja je specifična za taj materijal što se vidi i prema slici 3.1. Mjesto na kojoj se siječe x, y i z os predstavlja iznos kritičnih veličina.



Slika 3.1: Područje supravodljivosti

Kritična temperatura za čiste elemente odnosno metale je relativno blizu apsolutne nule. Za nekoliko metala nalazi se skroz u blizini nule, a za većinu temperatura iznosi nekoliko Kelvina. Za legure ili slitine kritična temperatura iznosi više od 10 Kelvina. Na slici 3.2 prikazan je periodni sustav elemenata, na njemu se nalaze metali koji su supravodiči i njihove kritične temperature koje su karakteristične za svaki element. Može se uočiti da elementi koji su inače jaki metali i dobri vodiči poput zlata (Au) i bakra (Cu) uopće ne prelaze u supravodljivo stanje. Također se vidi da najmanju kritičnu temperaturu ima rodij (Rh) kojemu  $T_c$  iznosi 0,0003 K, a odmah iza njega je volfram kojemu je  $T_c$  jednaka 0,01 K. Elementi obojani žutom bojom do kritične temperature dolaze pod povećanim tlakom (na atmosferskom tlaku nisu u supravodljivom stanju), a elementi čije su kućice periodnog sustava plave boje do svoje kritične temperature dolaze pri normalnom atmosferskom tlaku.

H ?	s-d										s-p						He
Li 20 50 GPa	Be 0.026	Element $T_c$ [K] applied pressure										B 11 280 GPa	C 4 B-shaped	N	O 6.6 120 GPa	F	Ne
Na	Mg											Al 1.18	Si 8.5 12 GPa	P 18 30 GPa	S 17 160 GPa	Cl	Ar
K	Ca 15 150 GPa	Sc 0.34 21 GPa	Ti 0.5	V 5.4	Cr	Mn	Fe 2 21 GPa	Co	Ni	Cu	Zn 0.85	Ga 1.08	Ge 5.4 11.8 GPa	As 2.7 24 GPa	Se 7 13 GPa	Br 1.4 155 GPa	Kr
Rb	Sr 4 50 GPa	Y 2.8 15 GPa	Zr 0.6	Nb 9.25	Mo 0.92	Tc 8.2	Ru 0.5	Rh 0.0003	Pd	Ag	Cd 0.55	In 3.4	Sn 3.72	Sb 3.6 0.5 GPa	Te 7.4 35 GPa	I 1.2 25 GPa	Xe
Cs 1.66 1 GPa	Ba 5 20 GPa	La 5.9	Hf 0.13	Ta 4.4	W 0.01	Re 1.7	Os 0.65	Ir 0.14	Pt	Au	Hg 4.15	Tl 2.39	Pb 7.2	Bi 8.5 1 GPa	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
s-f		Ce 1.7 5 GPa	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu 1.1 15 GPa		
		Th 1.4	Pa 1.4	U 0.8	Np 0.075	Pu	Am 0.8	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Slika 3.2: Periodni sustav s kritičnim temperaturama [4]

Magnetsko polje  $H$  snižava kritičnu temperaturu  $T_c$  i to tako da su obrnuto proporcionalni, odnosno povećanjem magnetskog polja smanji se kritična temperatura. Ako dođe do prekoračenja kritičnog magnetskog polja  $H_c$  tada se vodič više ne ponaša kao dijamagnet i iz stanja supravodljivosti će prijeći u normalno stanje vođenja. Jakost struje koja teče supravodičima ima ograničenje ovisno o jakosti magnetskog polja. Ako je temperatura jednaka nuli, tada  $H_c$  i  $J_c$  poprimaju najviše vrijednosti, a u slučaju kada je  $T_c$  maksimalna, tada su magnetsko polje i gustoća

struje jednake nuli. Gustoća struje je veličina koja nam pokazuje ovisnost toka električne struje po površini presjeka nekog vodiča, njezina oznaka je  $J$ , a mjerna jedinica  $A/m^2$ .

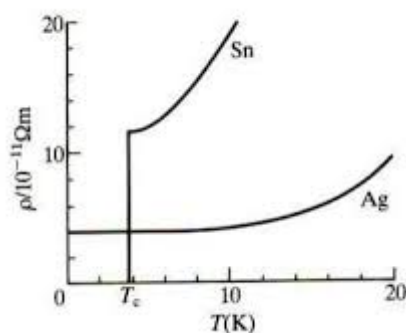
$$H = \frac{B}{\mu} \quad (3-1)$$

$$J = \rho \cdot v \quad (3-2)$$

U formulama 3.1 i 3.2 vidimo izraze za gustoću struje i jakost magnetskog polja te kako ovise o drugim fizikalnim veličinama. Gdje je: "B"- oznaka za magnetsku indukciju, "μ" - magnetska permeabilnost, "ρ"- volumna gustoća električnog naboja i "v"- brzina gibanja nabijenih čestica.

### 3.2 Vrste supravodljivih materijala

- Supravodiči prve vrste nazivaju se još i meki supravodiči, to su vodiči čije su kritične temperature vrlo niske i magnetska polja vrlo mala, oni su prvi pronađeni ili otkriveni supravodiči. Njihova karakteristika je da imaju nagli prijelaz iz vodljivog u supravodljivo stanje pri kritičnoj temperaturi  $T_c$  i također su idealni dijamagneti, odnosno vrijedi Meissnerov efekt da magnetsko polje iz unutrašnjosti vodiča nestaje u potpunosti. Iz slike 3.3 vidi se da kositar (Sn) pri temperaturi  $T_c$  koja iznosi 3,72 K naglo, oštro prelazi iz vodljivog u supravodljivo stanje dok srebro (Ag) ne prelazi u supravodljivo stanje ni pri kojoj temperaturi, a približavanjem apsolutnoj nuli njegov otpor ide prema konstantnoj vrijednosti. Srebro je uz bakar i zlato stalni vodič kojemu se uz smanjenje temperature smanjuje i otpornost, ali ne dolazi do prijelaza.

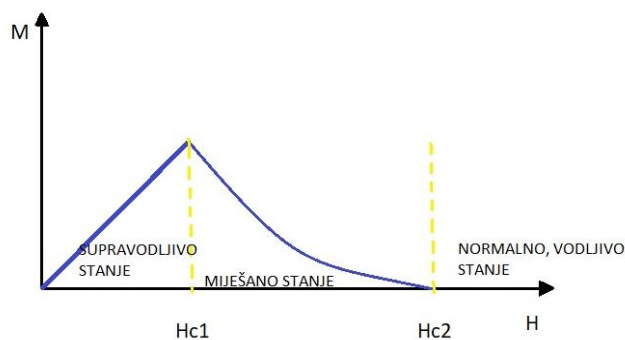


**Slika 3.3:** Prikaz prijelaza kositra u supravodljivo stanje

Neki od najčešće korištenih i najpoznatijih supravodiča prve vrste su: živa ( $\text{Hg} \rightarrow T_c = 4,15 \text{ K}$ ), kositar ( $\text{Sn} \rightarrow T_c = 3,72 \text{ K}$ ), aluminij ( $\text{Al} \rightarrow T_c = 1,18 \text{ K}$ ), cink ( $\text{Zn} \rightarrow T_c = 0,85 \text{ K}$ ) i mnogi drugi. Supravodljivost se u vodičima I vrste opisuje pomoću BCS-teorije. Korištenje ovih supravodiča u praksi je ograničeno jer je njihovo kritično magnetsko polje male vrijednosti i skup je način snižavanja temperature pomoću helija, a on se koristi za vrlo niske kritične temperature poput ovih koje imaju supravodiči I vrste. Oni također nisu dovoljno dobri ni za levitaciju jer se iznad njih ne može postići stabilan položaj magneta.

- Supravodiči druge vrste su vodiči čija kritična temperatura ide do visokih vrijednosti temperatura u Kelvinima, za praktične svrhe koriste se puno više nego vodiči I vrste i mogu se koristiti za izradu jakih elektromagneta. U supravodiče II vrste pripadaju tri čista vodiča, a to su vanadij (V), tehnecij (Tc) i niobij (Nb). Njihova kritična temperatura  $T_c$  manja je od 10 K, ali vrlo je blizu tome. Ostali supravodiči su slitine i kemijski spojevi kojih je poznato jako puno, čak više od tisuću, a u njih spadaju i visokotemperaturni supravodiči. Ovu vrstu supravodiča karakterizira to što imaju tri stanja vođenja, točnije postepeni prijelaz iz jednog u drugo stanje. Imaju supravodljivo stanje, nakon njega ide miješano stanje koje postupno dovodi do normalnog stanja vođenja. Supravodiči prve vrste imaju samo kritično magnetsko polje  $H_c$ , dok kod supravodiča druge vrste postoje dvije vrijednosti kritičnog magnetskog polja  $H_{c1}$  (donje kritično polje) i  $H_{c2}$  (gornje kritično polje). Vrijednosti gornjeg kritičnog polja  $H_{c2}$  su vrlo visoke, što omogućuje dobru primjenu ovih supravodiča, a vrijednosti donjeg kritičnog polja  $H_{c1}$  su jako niske [2]. Ispod donjeg kritičnog polja supravodič druge vrste ponaša se kao supravodič prve vrste, a iznad gornjeg kritičnog polja vodič bude u normalnom stanju.

Na slici 3.4 vidi se ako je  $H < H_{c1}$  tada je vodič idealni dijamagnet, supravodljiv je i pokazuje potpuni Meissnerov efekt, za  $H > H_{c2}$  više nema supravodljivog stanja već je vodič tada u normalnom stanju vođenja. U slučaju kada je  $H_{c1} < H < H_{c2}$  tada je vodič u miješanom stanju. Materijal je supravodljiv, ali ima mjesta gdje magnetsko polje lokalno prodire u supravodič i ovdje je Meissnerov efekt djelomičan.



**Slika 3.4:** Odnos vrijednosti magnetskih polja

Prodiranje magnetskog polja popraćeno je vrtlogom struje u kojemu nema supravodljivih elektrona, već su ti elektroni u normalnom vodljivom stanju. U idealnom slučaju se ti vrtlozi pokreću, rasipaju energiju jer elektroni koji su u vrtlogu nisu u supravodljivom stanju te to dovodi do zagrijavanja supravodiča i nestajanja supravodljivosti u cijelom vodiču na vrijednosti  $H_{c2}$ . Oznaka  $J_c$  je kritična vrijednost gustoće struje iznad koje dolazi do pokretanja vrtloga struje [5]. Neki primjeri supravodiča druge vrste dani su u tablici 3.1 i pridružene su im njihove kritične temperature.

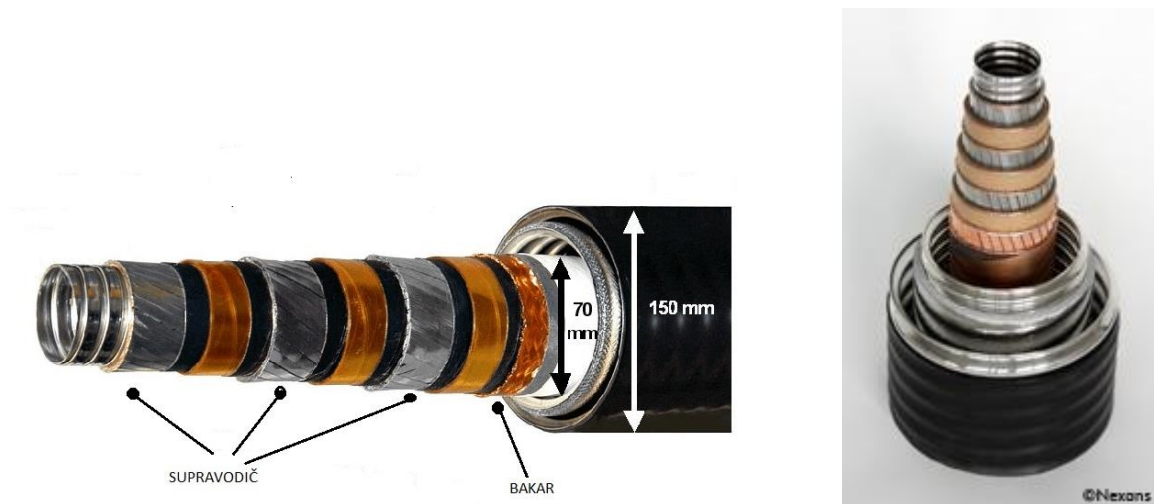
**Tablica 3.1 :** Primjeri supravodiča druge vrste

<i>Formula spoja</i>	<i>Kritična temperatura [K]</i>
PbMoS	14,4 K
NbAl	18,7 K
$V_3Ga$	15,9 K
$SnMo_6S_8$	12 K

U tablici su dani supravodiči čije temperature variraju između 10 i 20 K, to su standardni supravodiči druge vrste nastali reakcijama nekoliko elemenata. Niobij je element koji je samostalni supravodič, ali također se nalazi i u spojevima s drugim elementima te se u tome stanju često koristi u primjeni supravodiča, kao na primjer u dalekovodima.

- Visokotemperaturni supravodiči ili engl. High-temperature superconductors, skraćeno high- $T_c$ , HTSC ili HTC su materijali koji postanu supravodljivi na temperaturi čija vrijednost se nalazi iznad 30 K. Zbog njihovih visokih temperatura koje idu daleko više od 30 K došlo je do korištenja tekućeg dušika za svrhe hlađenja jer je dušik puno jeftiniji i pristupačniji od helija koji se koristi pri nižim temperaturama. Temperatura tekućeg dušika iznosi 77 K. Dugi niz godina smatralo se da su svi visokotemperaturni vodiči građeni na bazi bakrovog oksida i da se nazivaju kuprati, ali 2008. godine otkriven je visokotemperaturni vodič na bazi spojeva sa željezom te se od tada visokotemperaturni supravodiči dijele na dvije grupe ili vrste, a to su: vodiči s bakrovim oksidima i vodiči sa željezom.

Mnogo visokotemperaturnih vodiča su keramički materijali kod kojih se nailazi na probleme zbog fizikalnih karakteristika keramike, krhka je i lomljiva te je zbog toga teško napraviti keramičke duge vodiče. Najpoznatiji keramički materijali su YBCO - opća formula za itrij-barij-bakrov oksid i BSCCO - opća formula za bizmut- stroncij-kalcij-bakrov oksid. HTC mogu imati kritično polje vrlo visoke vrijednosti. Primjena ovih supravodiča je puno opširnija i raširenija u odnosu na druge supravodiče, jednostavniji su za korištenje jer je jednostavnije proizvesti i rabiti materijal s višom kritičnom temperaturom nego materijal s vrlo niskom temperaturom. Na slici 3.5 prikazan je primjer izgleda i građe visokotemperaturnog kabela. Ima supravodljive dijelove, izolatorske dijelove, bakreni dio i prostor kroz koji prolazi dušik.



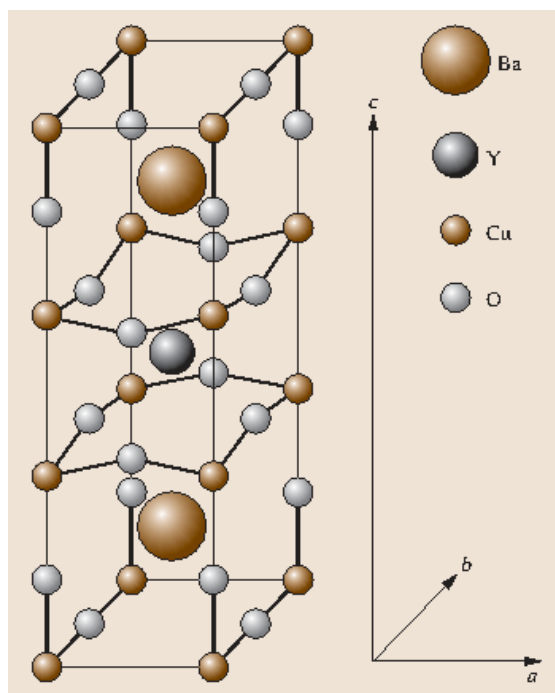
**Slika 3.5:** Prikaz supravodljivog kabela [6]



Primjena visokotemperaturnih vodiča može se pronaći u mnogim područjima pa tako i u medicini kod magnetske rezonance tijela, u postrojenjima za elektromagnete te kod vodiča koji prenose energiju bez njezina gubitka, odnosno u dalekovodima.

Jedna od vrsta visokotemperaturnih vodiča su kuprati koji u svojoj građi imaju bakrov oksid, odnosno sastav kristalne strukture temelji im se na bakru. Neki primjeri kuprata su  $YBa_2Cu_3O_7$  i  $La_2CuO_4$ . Struktura građe kristala im je slojevita, vodljivi dio nalazi se u ravninama bakrovog oksida, a do prijenosa naboja dolazi preko kisika koji je smješten između lanaca i ravnine. Zbog slojevite strukture fizikalna svojstva kuprata su anizotropna, a to je stanje kada svojstva tvari nisu jednaka u svakom dijelu tvari, u ovom slučaju u svakome dijelu kristala. Kao primjer imamo električni otpor koji je puno niži unutar vodljivih ravnina nego u smjeru okomitom na ravninu jer ondje struja nailazi na prepreke, to jest na nosioce naboja. Nosioci naboja mogu biti elektroni ili šupljine, slobodni elektroni nosioci su negativnog naboja dok su šupljine nosioci pozitivnog naboja. Šupljine nastanu kada dođe do oslobađanja elektrona iz veze u kojoj se elektron nalazio te je broj šupljina jednak broju slobodnih elektrona kako bi struktura i dalje bila neutralna i stabilna. Fizička svojstva također jako ovise o kemijskom sastavu kuprata te o količini nosioca naboja. Količina kisika varira od spoja do spoja, spoj s više kisika imat će više pozitivnih nosioca naboja, odnosno dodavanjem kisika povećavamo koncentraciju šupljina. Kritična temperatura također ovisi o koncentraciji nositelja naboja i o broju  $CuO_2$  ravnina. Temperatura raste porastom broja ravnina, ali samo za kuprate koji imaju do tri ravnine [7].

Prvi otkriveni visokotemperaturni supravodič koji ima temperaturu iznad temperature vrelišta dušika je  $YBa_2Cu_3O_7$ , njegova kritična temperatura iznosi 92 K, a njegova struktura prikazana je na slici 3.6. Kristalna struktura građena je od ravnina bakar-kisik i od lanaca bakar-kisik, redoslijed slaganja lanaca i ravnina je takav da se lanci nalaze na vrhu i dnu kristalne strukture. Slaganje strukture ide  $CuO-BaO-CuO_2-Y-CuO_2-BaO-CuO$ . Atom itrija nalazi se između dvije ravnine  $CuO_2$ , a u ravninama bakra i kisika smješteni su vodljivi elektroni.



**Slika 3.6:** Struktura vodiča  $YBa_2Cu_3O_7$  [7]

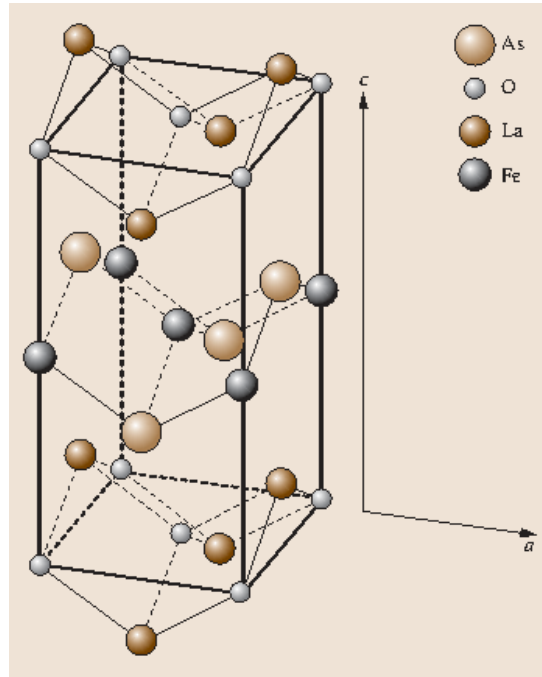
Druga podvrsta visokotemperaturnih supravodiča su vodiči na bazi željeza koji imaju nižu kritičnu temperaturu nego kuprati. Njihova kristalna struktura je također slojevita i anizotropna.

Oni imaju nekoliko načina spajanja elemenata sa željezom:

- Spojevi sa općom formulom  $REOFeAs$ , gdje  $RE$  predstavlja rijetki element. Primjer:  $LaOFeAs$
- Spojevi sa općom formulom  $XFe_2As_2$ , gdje  $X$  predstavlja zemnoalkalijske metale kao  $Ca, Ba$ . Primjer:  $CaFe_2As_2$
- Spojevi s općom formulom  $XFeAs$ , gdje  $X$  predstavlja alkalijske metale kao  $Li, Na$ . Primjer:  $NaFeAs$
- Spojevi s općom formulom  $FeCh$ , gdje  $Ch$  predstavlja selen, telurij ili sumpor. Ovi spojevi su bez  $FeAs$  slojeva, nemaju sloj koji bi mogao biti nositelj naboja.

U kristalnoj strukturi slojevi s  $FeAs$  su vodljivi, a slojevi s metalima ( $REO$  ili  $X$  slojevi) su nositelji naboja. Kritična temperatura im također ovisi o nosiocima naboja i o razini dopiranja. Dopiranje je dodavanje primjesa, točnije nečistoća u spoj, a to su dodatni atomi (trovalentni ili peterovalentni atomi). Na primjer, u spoj  $LaOFeAs$  dopire se fluor kako bi došlo do supravodljivosti. Velika količina dopiranja dovodi do toga da je kristalna struktura sve stabilnija

i kritična temperatura sve niža. Gornje kritično polje kao i jakost gustoće struje postiže im velike vrijednosti [7]. Oni imaju gornje i donje kritično polje jer spadaju u supravodiče druge vrste. Na slici 3.7 prikazana je kristalna struktura vodiča na bazi željeza, ali dok nije dopiran s fluorom.



Slika 3.7: Struktura vodiča  $LaOFeAs$  [7]

Slojevi  $LaO$  izmjenjuju se sa slojem  $FeAs$ , odnosno sloj sa željezom nalazi se između slojeva od lantanovog oksida i tvore kristalnu strukturu. Ovaj spoj supravodljiv je pri temperaturi od 26 K.

### 3.3 Proizvodnja supravodiča

Procesom proizvodnje nastaju supravodljive žice, vrpce, trake te pločice od visokotemperaturnih supravodiča koji se dobivaju miješanjem više različitih kemijskih spojeva i reakcijama na visokim temperaturama. Zbog toga što je većina visokotemperaturnih vodiča keramički materijal, proces njihovog nastajanja sličan je proizvodnji keramike.

Glavni koraci proizvodnje supravodiča:

- miješanje sirovina
- kalcinacija
- sinteriranje

Kalcinacija je postupak zagrijavanja tvari ili smjese na visoku temperaturu s ciljem da se iz tvari istisne ugljikov dioksid ili voda. Temperatura pri kojoj se izvodi proces je visoka, ali niža od temperature tališta smjese ili tvari. U tijeku kalcinacije dolazi do dehidracije (sušenje) i kemijske promjene.

Sinteriranje je proces okrupnjavanja sitnozrnatoga materijala (polimeri, rude) zagrijavanjem na temperaturu površinskoga taljenja na kojoj se zrna staljuju u čvrste tvari [8].

Proizvodnja ili stvaranje supravodiča prikazana je na primjeru visokotemperaturnih supravodiča, odnosno prema itrij-barij-bakrovom oksidu.

Na početku se pravi homogena smjesa, miješaju se dva oksida, u ovom slučaju  $Y_2O_3$  i  $CuO$ . Nakon miješanja njihova smjesa se kalcinira nekoliko sati na  $900\text{ }^\circ\text{C}$  da bi se dobio oksid  $Y_2Cu_2O_5$ , također je na isti način miješana i kalcinirana smjesa barijevog karbonata i bakrovog oksida da bi se dobio  $BaCuO_2$ . Ta dva dobivena oksida samelju se u prah te se naprave kuglice koje se sinteriraju nekoliko sati na vrlo visokoj temperaturi oko  $950\text{ }^\circ\text{C}$  da bismo dobili supravodljivi materijal. Kod nekih materijala prije sinteriranja prah smjese se može prešati u kalup, a nakon toga postupak je isti.

## 4. TEHNOLOŠKA PRIMJENA SUPRAVODLJIVOSTI

Supravodljivi materijali od svog otkrića pa do danas proširili su svoju primjenu, od jednostavnijih pa sve do vrlo složenih upotreba. Ima ih u raznim područjima, u medicini gdje se koristi magnetska rezonancija, postrojenja u kojima su važni magneti za električne strojeve, prijenos električne energije bez puno gubitaka, kod detektora zračenja i u mnogim drugim koja do sada još možda nisu u upotrebi jer su u fazi istraživanja, ali će se u budućnosti koristiti.

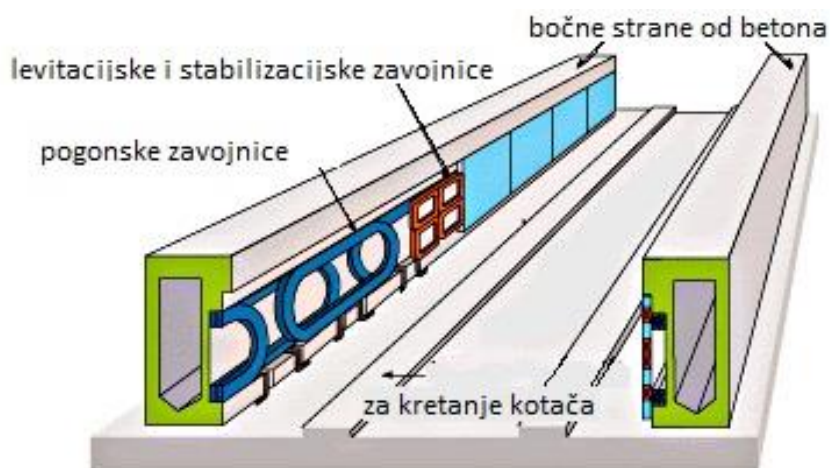
### 4.1 Magnetno levitacijski vlak – MAGLEV

MAGLEV ili magnetsko levitacijski vlak krenuo se razvijati u 20. stoljeću, a danas nekoliko zemalja koristi ovakav način prijevoza. Ovi vlakovi imaju nekoliko prednosti u odnosu na konvencionalne vlakove, a to su veća brzina jer nema trenja s tračnicama, ne koriste fosilna goriva i energetski su učinkovitiji, slabo se mehanički kvare jer nisu u dodiru sa zemljom te ne dolazi do vibracija i nisu bučni. Najveća mana ovih vlakova je ta što su jako skupi i trebaju imati posebnu prugu po kojoj će se kretati, zbog toga manje razvijene zemlje koriste samo konvencionalne vlakove. Njihov motor razlikuje se od motora običnog vlaka, oni imaju linearni indukcijski motor. Linearni indukcijski motor je motor koji nema rotor, rotor se u ovom slučaju izvodi kao niz magneta, a stator se nalazi u samom vlaku. Na slici 4.1 prikazan je Maglev koji se može pronaći u azijskim zemljama kao što je Japan i koji je sve više i više u upotrebi. Maglev je vlak koji se kreće uz pomoć levitacije, različite brzine dostigao je u eksperimentu i u stvarnoj vožnji s putnicima. Eksperimentalna najviša dostignuta brzina iznosi 603 km/h, a stvarna oko 400 km/h.



Slika 4.1: Maglev

Levitacijski vlak pokreće magnetsko polje stvoreno naelektriziranim zavojnicama u bočnim stranama vodilica. Zavojnice su u vodilice ugrađene u obliku broja osam. Prolaskom vozila s magnetom u sebi pokraj zidova sa zavojnicom, a da je brzina vozila velika, javlja se inducirana struja u zavojnicama te se zavojnice počnu ponašati kao elektromagneti. Pojavljuju se privlačne i odbojne sile između magneta u vodilici i magneta u vozilu te dolazi do levitiranja. Zavojnice su smještene u oba bočna zida vodilice te su međusobno spojene i čine petlju. S obzirom da se na obje strane vodilice nalaze zavojnice koje postaju elektromagneti, magnetsko polje drži vlak na sredini vodilice i stabilan je. Levitacijski vlak pokreće se na gumenim kotačima dok ne stekne uvjete za levitaciju, nakon što započne levitaciju kotači se više ne koriste. Ovakav način rada naziva se EDS sustav, elektrodinamička suspenzija. Na slici 4.2 vide se bočni zidovi koji se zovu vodilice i na njima se nalaze zavojnice koje postanu elektromagneti, također vide se tračnice za gumene kotače koje vlak koristi do brzine od 100 km/h. Ovo je primjer s bočnim vodilicama koji se koristi pri elektrodinamičkoj suspenziji.



**Slika 4.2:** Primjer vodilica i tračnica [9]

Maglev može raditi i na principu elektromagnetske suspenzije, a nju karakterizira privlačna sila između elektromagneta u vozilu i vodilice. U ovome slučaju vozilo na jednom dijelu obuhvaća vodilicu i tada se magneti vozila nalaze ispod vodilice i time "guraju" vozilo gore iznad vodilice te dolazi do levitiranja. Regulacijom struje magnetiziranja održava se razmak između vozila i vodilice.

U Europi jedna od značajnijih država koja se 80-tih godina prošlog stoljeća upustila u istraživanja levitacijskih vlakova je Njemačka.

## 4.2 Magnetska rezonancija

Magnetska rezonancija je dijagnostička metoda kojom se snima ljudsko tijelo ili njegovi dijelovi, a temelji se na elektromagnetskom zračenju. Snimanje pomoću magnetske rezonancije nije štetno za ljudski organizam jer se koriste radiovalovi i magnetsko polje za razliku od radiološkog snimanja koje koristi štetne x-zrake ili rendgenske zrake.

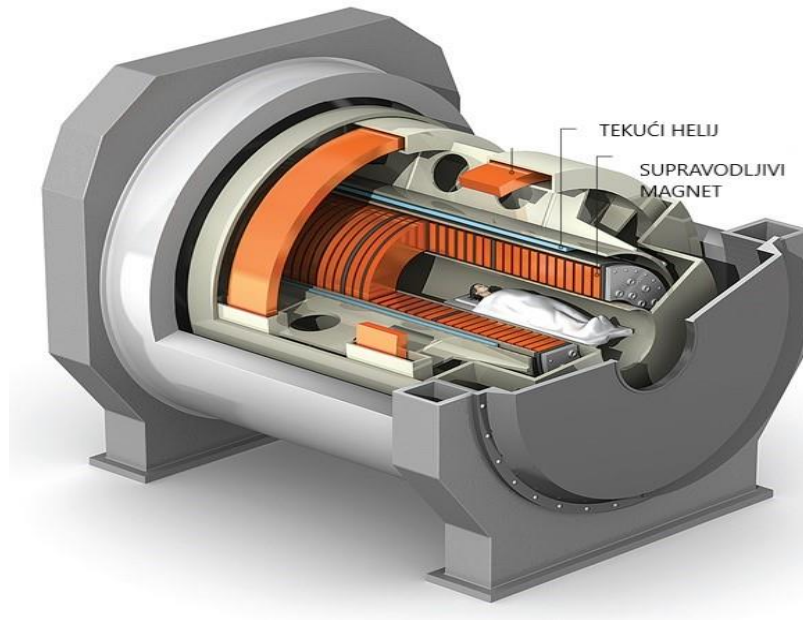
Uređaji za snimanje dijele se prema jakosti magnetskog polja na uređaje niske jakosti polja gdje je polje do 0,5 T, srednje jakosti polja kod kojih polje ide od 0,5 T pa do 1 T i na visoke jakosti polja čije vrijednosti iznose više od 1 T.

Druga podjela uređaja je s obzirom na magnet koji se nalazi u uređaju za snimanje, a to su: otpornički ili rezistivni magneti, permanentni ili stalni magneti i supravodljivi magneti. Supravodljivi magneti koriste se za postizanje homogenog magnetskog polja velike jakosti, mogu stvoriti polje i do 9 T. Takvi uređaji su jako skupi, ali se vrlo često koriste. U dijagnostici se koriste polja do 3 T, a veličine iznad toga se koriste u znanstvene medicinske svrhe. Supravodljivi magneti su zapravo elektromagneti koji imaju supravodljivu zavojnicu s velikim brojem namotaja. Zavojnice koje se koriste u ovakvim uređajima građene su od supravodiča kao što je slitina niobija i titanija koja svojstva supravodljivosti dobiva pri 4 K, a na tu temperaturu hladi se pomoću tekućeg helija. Supravodljivost omogućava da se kroz veliki broj namotaja vodiča propusti velika struja te nastaje jako homogeno magnetsko polje kakvo konvencionalni magneti ne mogu stvoriti. Sadrže i supravodljive prekidače koji se uklope kada struja dostigne svoju određenu maksimalnu vrijednost, u trenutku kada se prekidači uklope struja kruži kroz namotaje bez izvora te tada nema gubitaka struje pri njezinu gibanju. Zbog toga svojstva da nema gubitaka polje je homogeno, a homogenost polja je jako bitna za magnetsku rezonancu.

Da bi se napravila slika dijela tijela potrebno je jako homogeno magnetsko polje glavnog magnet, 3 gradijentne zavojnice za magnetizaciju koje su puno slabije od onih za glavno magnetsko polje, radiofrekvencijske zavojnice za širenje i prihvaćanje signala te računalo koje prima i sakuplja podatke. Glavni magnet magnetizira jezgre atoma vodika u tijelu ili organu koji je podvrgnut snimanju, a smješten je u kućištu uređaja koji ima oblik tunela. Na tijelo djeluju radiovalovi, koji su usmjereni na dio koji se želi snimiti te protoni iz vodika apsorbiraju njihovu energiju, šalju se signali do računala i stvaraju se slike.

Na slici 4.3 vidi se primjer simulacije presjeka uređaja za magnetsku rezonanciju sa supravodljivim magnetom koji omogućava jaka magnetska polja, uređaj je valjkastog oblika i

iznad velikog sloja supravodljivog magneta nalazi se sloj tekućeg helija koji konstantno hladi supravodljivu zavojnicu na magnetu kako ne bi došlo do gubljenja svojstva supravodljivosti.



Slika 4.3: Uređaj za magnetsku rezonancu [10]

### 4.3 Električni strojevi (motori i generatori)

Električni strojevi su vrlo raširen pojam s kojim se svakodnevno susrećemo u raznim varijantama. Općenito strojeve dijelimo prema njihovom režimu rada, a to su motorni i generatorski režim rada. Motorni režim karakterizira to da stator dovodi energiju s višefazne mreže, a rotor tu električnu energiju pretvara u mehaničku energiju. Generator ima obrnuti princip rada, odnosno kod njega je rotor spojen na izvor mehaničke energije, a na statoru se inducira napon i mehanička energija se pretvara u električnu.

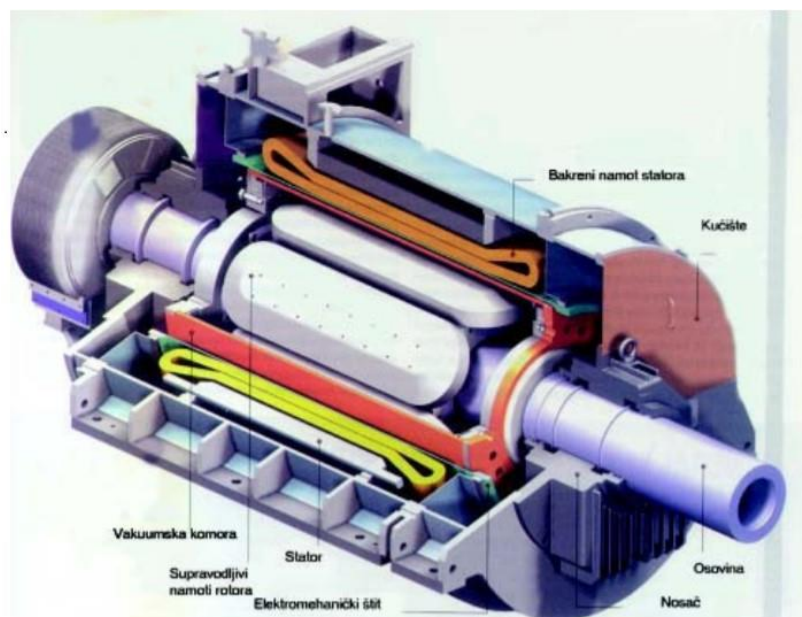
Snaga električnog stroja proporcionalna je vrijednosti magnetske indukcije kao i jakosti struje u namotima, a to se vidi iz relacije 4.1.

$$P = U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I \quad (4-1)$$

Gdje je: "B"- magnetska indukcija, "l"- duljina vodiča, "v"- brzina kretanja elektrona, "I"- struja.



Upotrebom supravodljivih materijala umjesto običnih vodiča povećava se magnetska indukcija i gustoća odnosno jakost struje. Povećanje magnetske indukcije omogućava povećanje snage uz jednaku veličinu motora i smanjenu masu jer supravodljivi magnet nema željeznu jezgru [11]. Supravodljivi dio u električnim strojevima je različit ovisno o vrsti stroja, kod istosmjernih motora stator je supravodljivi dio motora dok je rotor konvencionalan, to jest ima bakrene vodiče. Istosmjerni strojevi nisu široko primjenjivi te se zbog toga počinje proizvoditi i koristiti sinkroni supravodljivi stroj. Prvi sinkroni supravodljivi motori su bili s rotorom koji ima niskotemperaturne supravodiče koji se hlade pomoću tekućeg helija. Za široku primjenu ovi motori su vrlo skupi te se počinju koristiti strojevi koji imaju visokotemperaturne supravodiče u rotoru, a statori su im s bakrenim vodičima. Ovakvi strojevi hlade svoje rotore pomoću dušika te su ekonomski isplativiji. Na slici 4.4 prikazan je poprečni presjek supravodljivog sinkronog motora iz kojeg su vidljivi njegovi dijelovi, bakreni namoti statora i supravodljivi namoti rotora.



**Slika 4.4:** Prikaz dijelova supravodljivog sinkronog motora [12]

Visokotemperaturni supravodljivi sinkroni motori imaju mnoge prednosti u odnosu na konvencionalne sinkrone motore, a neke od njih su:

- Smanjenje mase nekog pogona i do 50% jer je masa motora smanjena
- Veće su snage nego konvencionalni strojevi
- S obzirom da supravodiči nemaju otpor, učinkovitost im je povećana

- Učinkovitost im je visoka pri svim opterećenjima
- Stvaraju malu buku
- Manje su zahtjevni za tehnološko održavanje
- Nisu osjetljivi na temperaturu

Ovakvi motori često se primjenjuju u brodovima jer za manji volumen i manju masu imaju veću snagu.

Sinkroni supravodljivi generatori imaju slična svojstva kao i supravodljivi motori, ali imaju jednu veliku razliku. Kod sinkronog generatora uzbuda se nalazi na statoru i njezini namoti su od supravodiča, a armatura je na rotoru. U današnjim elektranama nalaze se generatori velikih snaga, ali i velikih proporcija i masa što počinje predstavljati probleme oko transporta generatora. Također se pretpostavlja da će snage konvencionalnih generatora biti premale za određene velike elektrane, posebno fuzijske, zbog toga će se sve više razvijati i primjenjivati supravodljivi generator i njegove prednosti u omjeru snage, veličine i korisnosti.

#### **4.4 Primjena magneti u znanosti**

U mnogim znanstvenim istraživanjima veliku ulogu imaju jaka magnetska polja koja postignuta konvencionalnim magnetima imaju dosta velike energetske gubitke i ekonomski su neučinkoviti te se zbog toga koriste supravodljivi magneti koji mogu stvoriti još jača magnetska polja. Supravodljivi elektromagneti koriste se za istraživanja u visokoenergetskoj fizici gdje su potrebni za proučavanje elementarnih čestica, također su vrlo važni za velike akceleratori čestica kao što je Veliki hadronski sudarivač ili supersudarivač, engl. Large Hadron Collider ili kraće LHC.

LHC je najveći svjetski akcelerator čestica koji je dio CERN-a, točnije izgradio ga je CERN u svom kompleksu 100 metara ispod zemlje (CERN = Europsko vijeće za nuklearna istraživanja koji se nalazi u Švicarskoj). Njegova zadaća je da ubrzava protone ili ione čak do brzine svjetlosti koja iznosi 299 792 458 m/s ili približno 300 000 km/s te tada zrake čestica dođu do svojih najvećih energija koje su bitne za sudare. U njemu se proučavaju sudari čestica velikih energija koji su planirani i izazvani od strane čovjeka u istraživačke svrhe, da bi došlo do gibanja čestica u određenim smjerovima potrebno je jako magnetsko polje. Veliki hadronski sudarivač je najveća primjena supravodljivosti na jednome mjestu u svijetu, opseg njegovog kružnog tunela iznosi 27 kilometara, a od toga je 23 kilometra supravodljivih magneti. Sastoji se od 1232 dipola koji zakreću i savijaju putanje čestica u kretanju i 474 četveropolna magneti koji usmjeravaju čestice

do mjesta sudara. Elektromagneti koriste jako velike struje za proizvodnju polja, a supravodljiva zavojnica omogućava protok struje bez gubitaka energije. Cijeli sustav magneta drži se na 1,9 K što je  $-271,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a hladi se helijem. LHC je u svoja istraživanja krenuo sa supravodljivim magnetom u kojemu se nalazi supravodič druge vrste niobij-titan (*NbTi*), svojim tehnološkim napretkom počeli su koristiti i *Nb<sub>3</sub>Sn* supravodljivi magnet. Smatra se da bi se u skorijoj budućnosti mogao početi koristiti i visokotemperaturni supravodič *Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>* opće formule BSCCO, ali za njegovu upotrebu se mora još napredovati i istraživati. Još uvijek se najviše koristi *NbTi* jer *Nb<sub>3</sub>Sn* je krhka keramika koja je puno fizikalno zahtjevnija.

Na slici 4.5 prikazan je Veliki hadronski sudarač na kojemu nedostaje dio tunela za ubrzanje. Slika je nastala 2019. godine kada je bila rekonstrukcija tunela, mijenjali su nekolicinu magneta koji su imali nedostatke u radu.

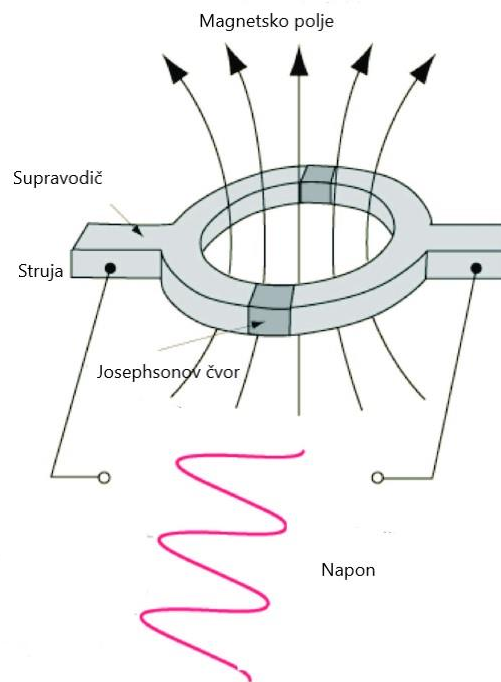


**Slika 4.5:** LHC tunel [13]

Također jedan od primjera primjene je SQUID, supravodljiva kvantna interferencija, jako osjetljivi magnetometar koji se koristi za mjerenje vrlo malih magnetskih polja. Temelji se na supravodljivoj petlji s jednim ili više Josephsonovih čvorova te mjeri promjene magnetskog polja između dvije točke. Mjeri polja čak i do veličine od  $5 \cdot 10^{-18}\text{ T}$ , što je vrlo malo, a osjetljiv je i na promjene magnetskog toka.

Supravodljivi materijali koji se koriste od kada je uređaj izumljen je niobij i slitina olova, a hlade se pomoću tekućeg helija. Visokotemperaturni senzori izrađeni su većinom od YBCO vodiča koji

se hlade s dušikom te su oni puno manje osjetljivi nego klasični SQUID-ovi s niobijem, zato se više koriste klasični supravodiči. Na slici 4.6 vidljivo je da se SQUID magnetometar sastoji od supravodiča kojim teče struja i na kojemu se nalaze Josephsonovi čvorovi te se između čvorova mjeri jakost magnetskog polja.



**Slika 4.6:** Primjer SQUID magnetometra

Zbog svoje preciznosti SQUID se koristi u mnogim medicinskim snimanjima kao što su magnetoencefalografija i magnetogastrografija.

## 5. NAJNOVIJI NAPREDAK U RAZVOJU I PRIMJENI

Razvoj supravodiča u budućnosti bit će značajan jer znanstvenici imaju još puno prostora za otkrivanje novih i usavršavanje već poznatih supravodiča i njihove primjene. Napredak se može očekivati od novih elektrana, dalekovoda, velikih elektromagnetskih postrojenja pa možda sve do supravodljivih auta koji lebde nad autocestom, ali gdje će razvoj ići to će se vidjeti tek za desetke godina.

### 5.1. Razvoj supravodiča na sobnoj temperaturi

Praktična primjena supravodljivosti konstantno se poboljšava, ali nedostatak je što se materijali moraju hladiti na vrlo niske temperature da postanu supravodljivi. Na primjer, supravodljive materijale često se hlade helijem ako im je kritična temperatura niska pa se ne može koristiti dušik u tome slučaju, a helij je skup i njegove rezerve nisu velike jer se dosta koristi. Visokotemperaturni vodiči svojim otkrićem pomogli su u primjeni jer ih je lakše ohladiti, ali otkriće supravodiča na sobnoj temperaturi bi olakšalo cijeli proces primjene. Još 2011. postojale su tvrdnje o sintezi supravodiča na sobnoj temperaturi od 28 °C ili 301 K, spoj koji su sintetizirali bio je  $Ti_5Pb_2Ba_2Mg_2Cu_9O_{18+}$ , ali znanstvena zajednica taj spoj nije priznala kao supravodič. Novo otkriće bilo je 2016. godine kada su otkrili  $Pb_3MgO_5$  koji u sebi ima samo devet atoma. Njegovu kritičnu temperaturu naveli su kao 34 °C, ali ni ovaj pokušaj nije prihvaćen od strane znanstvene zajednice. Bilo je još pokušaja otkrivanja supravodljivih materijala na sobnoj temperaturi, ali su znanstvenici morali koristiti jako visoke tlakove da bi sintetizirali te materijale. Takve pokušaje u visokotlačnim prostorima se ne razmatra za supravodiče na sobnoj temperaturi jer nam treba vodič na sobnoj temperaturi i pri atmosferskom tlaku. Niti jedan od pokušaja otkrivanja za sada nije uspio, točnije niti jedan još nije službeno priznat, ali znanstvenici svakodnevno rade na otkrivanju takvog materijala koji će biti supravodljiv na sobnoj temperaturi i koji će se moći koristiti kao i svi ostali supravodiči samo pri puno lakšim uvjetima. U budućnosti se očekuje da će takav materijal biti otkriven i da će se pomoću njega doći do mnogih tehnoloških napredaka, tada bi se supravodiči mogli koristiti za većinu električnih uređaja (od mobitela pa sve do velikih motora u postrojenjima) i bio bi lakši način povezivanja i prijenosa energije bez gubitaka od elektrana na obnovljivi izvor energije pa sve do nekog udaljenog grada.

## 5.2 Mreža za prijenos električne energije

Iako se energija između proizvođača i potrošača prenosi visokonaponskim vodovima da bi gubici bili što manji, još uvijek su gubici dosta prisutni i ovise o daljini na koju se energija prenosi, odnosno gubici su veći što je daljina između dvije točke ili duljina voda veća. Zbog toga stručnjaci smatraju da je potrebna modernizacija svjetskog elektroenergetskog sustava. Moderniji sustav vide tako što bi standardne dalekovode zamijenili supravodljivim dalekovodima jer bi oni omogućili da električna energija od elektrane do potrošača ide bez gubitaka i neovisno o međusobnoj udaljenosti. Takvi vodovi bili bi puno manje veličine, a prenosili bi veću energiju, imali bi bolju učinkovitost i koristili bi manje naponske razine te bi se zbog jednostavnosti hlađenja i vizualnosti nalazili pod zemljom. Teoretski gledano, cijela visokonaponska mreža bi se primjenom supravodiča mogla svesti na srednjenaponsku pa sve do niskonaponske mreže.

Supravodljivi kabeli podijeljeni su na niskotemperaturne (LTS) i visokotemperaturne (HTS) supravodiče. Niskotemperaturni kabel je lakši za proizvesti jer se većinom sastoji od metala, na primjer *NbTi* kojemu je kritična temperatura na 9,2 K, ali oni nisu ekonomski prihvatljivi zbog preniske temperature do koje dolazimo pomoću helija. Zato su prihvatljiviji visokotemperaturni kabeli, kao na primjer *YBCO* itrij-barij-bakarov oksid koji ima kritičnu temperaturu na 92 K, oni imaju manje zahtjevan sustav za hlađenje i potencijalni su temelj modernizacije sustava. HTS ima manu što čvrstoća vodiča velike duljine nije dobra i još nisu otkrili kako da kabeli uopće nemaju gubitaka. Veća je složenost ovakvih dalekovoda nego standardnih i problem su velike udaljenosti koje ti vodovi trebaju povezivati te se supravodiči u tom smjeru moraju još razvijati.

Već postoji nekoliko projekata primjene supravodiča za prijenos električne energije, to su projekt LIPA u Sjedinjenim Američkim Državama te projekt u Essenu u Njemačkoj. U oba projekta je duljina kabela bila nekoliko stotina metara, na niskim naponima (u Essenu čak na 10 kV) i sa relativno niskim kapacitetima voda, što nije obećavajuće.

Supravodiči jako su dobra opcija zamijene konvencionalnih vodova, ali treba još istraživanja i razvoja kako bi se omogućilo da se postepeno uvode u svakodnevnu primjenu. U slučaju otkrivanja supravodiča na sobnoj temperaturi to bi bio samo još jedan dodatan plus u razvijanju modernog i ekonomičnog prijenosnog sustava.

### 5.3 Zanimljivosti u istraživanjima supravodljivosti

- 2018. godine znanstvenici su otkrili male količine prirodnih supravodljivih materijala u dva meteora koja su pala na Zemlju, jedan od njih je Mundrabill koji je pao u Australiji. A malo zrno supravodljivog materijala je od legure olova, kositra i indija.
- Početkom 2019. godine njemački znanstvenici postigli su novi rekord kod visokotemperaturnih supravodiča. U istraživanjima su koristili lantanov hidrid te su otkrili da je njegova kritična temperatura 215 K ili -58,15 °C, ali pri povišenom tlaku.
- Istraživači iz Nacionalnog laboratorija za visoko magnetsko polje na Floridi nakratko su postigli magnetsko polje od čak 45,5 T, što je do sada najveća vrijednost magnetskog polja postignuta u laboratoriju.
- Ove godine započelo je sastavljanje stroja pomoću kojega će se proučavati fuzija. Planira se dokazati da će se dobivati veliku količinu energije bez otpada i onečišćenja. Reaktor za fuziju sastojati će se od velikih supravodljivih magneta.
- Velika istraživanja i unaprjeđivanja odvijaju se u smjeru kvantnih računala. Kvantna računala za rješavanje problema koriste superpoziciju stanja i kvantno sprezanje. Takva računala su vrlo brza i efikasna, više nego standardna računala. Do kvantnih svojstava dolazi se pomoću supravodiča, na primjer niobija na njegovoj kritičnoj temperaturi. Smatra se da će u skorijoj budućnosti ovakva računala biti dostupna.
- Znanstvenici se nadaju da će se u budućnosti dovoljno razviti supravodiči i primjena njihovih svojstava kako bismo mogli proizvoditi supravodljive elektromotore za zrakoplove.
- Na Zagrebačkom Prirodoslovno-matematičkom fakultetu grupa znanstvenika, točnije fizičara bavi se proučavanjem i istraživanjem supravodljivosti i njezinih svojstava.

## 6. ZAKLJUČAK

Supravodljivost je fenomen koji je još relativno mlad. U tih 110 godina postojanja supravodljivosti došlo se do puno novih saznanja, ali isto tako ima još dosta prostora za napredovanje ove pojave kako u istraživanju novih vodiča i njihovih svojstava tako i u samoj primjeni supravodljivih materijala. Kao najvažnije svojstvo supravodiča smatra se nestajanje električnog otpora što omogućuje protok struje bez gubitaka.

Fizičari su postepeno utvrđivali svojstva supravodiča te su od najjednostavnijih supravodljivih materijala temeljenih na čistim elementima došli do složenijih materijala koji su nastali spajanjem više elemenata. S tim napretkom došlo je do otkrića visokotemperaturnih supravodiča koji su kritičnu temperaturu imali na nešto višoj temperaturi. To su keramički materijali koji su bazirani na bakru ili željezu, a njihovim otkrićem znanstvenici su omogućili širu primjenu supravodljivih materijala. S obzirom da ova pojava još uvijek nije toliko opće poznata svima, rijetko kome bi palo na pamet da se ona može pronaći i u ljudima bliskoj okolini. Jedan od najbitnijih dijagnostičkih medicinskih uređaja koji otkriva mnoge bolesti i oštećenja organa radi uz pomoć supravodljivosti i bez ove pojave snimanje pomoću magnetske rezonance bilo bi vrlo teško. Možda i najpoznatiji primjer korištenja supravodljivosti je levitacijski vlak koji zbog supravodljivih materijala i načina izgradnje dostiže nevjerojatno velike brzine i velike udaljenosti prelazi u puno kraćem roku nego što bi to prešao konvencionalan vlak na standardnoj željezničkoj pruzi. Također ove materijale moguće je pronaći u elektromotorima te u skorijoj budućnosti u prijenosnoj mreži, odnosno u dalekovodima. Iako je supravodič dosta skup s obzirom da mu se treba omogućiti hlađenje tekućim dušikom ili helijem, na duži period oni su itekako isplativi. U nekim postrojenjima s velikim motorima ako se i uloži više sredstava na početku dugoročno će to biti bolje jer takvi motori imaju manje gubitke, veću učinkovitost i manje su zahtjevni za održavanje. U skorije vrijeme očekuje se da će rasprostranjenost primjene supravodljivih materijala biti još veća jer znanstvenici svojim istraživanjima stalno dolaze do novih spoznaja i malo po malo uvode supravodljive materijale u elektroenergetski sustav.



## LITERATURA

- [1] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fkit:116/preview> (pristup: svibanj 2020.)
- [2] P. Krčum, Materijali u elektrotehnici, Sveučilište u Splitu , Split 2007., str. 46-56
- [3] <https://dc.edu.au/wp-content/uploads/cooper-pair-phonon.png> , (pristup: rujan 2020.)
- [4] Research Gate 2008. , [https://www.researchgate.net/figure/Periodic-table-with-the-distribution-and-T-c-K-of-the-chemical-elements-for-which\\_fig1\\_316187999](https://www.researchgate.net/figure/Periodic-table-with-the-distribution-and-T-c-K-of-the-chemical-elements-for-which_fig1_316187999) , ( pristup: lipanj 2020.)
- [5] V. Knapp, Tehnička enciklopedija, str. 441-450  
<https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/supravodljivost.pdf> (pristup: svibanj 2020.)
- [6] Research Gate 2008. , [https://www.researchgate.net/figure/Triax-HTS-Cable-installed-at-AEP-in-Columbus-OH\\_fig1\\_283737384](https://www.researchgate.net/figure/Triax-HTS-Cable-installed-at-AEP-in-Columbus-OH_fig1_283737384) , (pristup: rujan, 2020.)
- [7] S. Kasap, P. Capper, Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, 2017.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48933-9\\_50](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48933-9_50), (pristup: kolovoz 2020.)
- [8] Hrvatska enciklopedija mrežno izdanje,  
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=56166> , (pristup: kolovoz 2020.)
- [9] [http://eskola.hfd.hr/fiz\\_sva\\_stva/maglev/4040\\_vodilica.html](http://eskola.hfd.hr/fiz_sva_stva/maglev/4040_vodilica.html) , (pristup: srpanj 2020.)
- [10] <http://radiologijazabolesnike.blogspot.com/2015/07/magnetska-rezonancija-mr.html>,  
(pristup: kolovoz 2020.)
- [11] A. Gabovich, Superconductors-materials, properties and applications, InTech- Rijeka 2012.
- [12] Časopis hrvatske elektroprivrede, Zagreb 2005., str.11
- [13] CERN, <https://home.cern/news/news/accelerators/waltz-lhc-magnets-has-begun>, (pristup: kolovoz 2020.)
- [14] Science Direct, "High Temperature Superconductors"  
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/high-temperature-superconductors>,  
(pristup: kolovoz 2020.)

- [15] North American Maglev Transport Institute 2011. , "Maglev Technology Explained" , [https://web.archive.org/web/20110727110924/http://namti.org/?page\\_id=9](https://web.archive.org/web/20110727110924/http://namti.org/?page_id=9), (pristup: srpanj 2020.)
- [16] Hrvatska enciklopedija, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=6445>, (pristup: svibanj 2020.)
- [17] European Patent Office, " Method for producing superconducting material", <https://patents.google.com/patent/EP0302308A2/en> , (pristup: kolovoz 2020.)
- [18] J. Eck, Superconductors 1999., <http://www.superconductors.org/> , (pristup: lipanj 2020.)
- [19] HowStuffWorks, "How MRI Works", <https://science.howstuffworks.com/mri1.htm> , (pristup: kolovoz 2020.)
- [20] A. Foley, Renewable and Sustainable Energy Reviews, ožujak 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501120X> (pristup: kolovoz 2020.)
- [21] Phys.org 2003., "Magnets in prticle accelerators", <https://phys.org/news/2020-03-power-magnets-particle.html> , (pristup: kolovoz 2020.)

## **SAŽETAK**

Nizozemski fizičar 1911. otkrio je novu pojavu nazvanu supravodljivost koja ima svojstvo nestajanja otpora pri vrlo niskim temperaturama koje su blizu apsolutne nule. U povijesnom pregledu prikazano je kako su znanstvenici mnogim istraživanjima došli do vodiča koji u stanje supravodljivosti prelaze pri višim kritičnim temperaturama te su opisani vodiči prve i druge vrste i njihova svojstva. Na nekoliko primjera opisano je tehnološka primjena supravodljivih materijala u uređajima i opremi koji se koriste u znanosti, medicini i energetici te je prikazan smjer u kojemu ide razvoj ovih materijala.

Ključne riječi: kritična temperatura, otpor, primjena, supravodljivi materijali

## **ABSTRACT**

In 1911, a Dutch physicist discovered a new phenomenon called superconductivity which has the property of disappearing a resistance at very low temperatures. The historical review shows how scientists came to conductors that has a higher critical temperature, and conductors of the first and second type and their properties are described. Technological application of superconducting materials in devices and equipment that is used in science, medicine and power engineering are described on a few examples. Also, direction of the development of superconducting materials is shown.

Key words: critical temperature, resistance, application, superconducting materials

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 12.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Iris Ćurić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4361, 24.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	93448120329
<b>Mentor:</b>	Doc. dr. sc. Goran Rozing
<b>Sumentor:</b>	Doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Razvoj i primjena supravodljivih materijala
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	12.09.2020.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	23.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 23.09.2020.

**Ime i prezime studenta:**

Iris Ćurić

**Studij:**

Prediplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4361, 24.09.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Razvoj i primjena supravodljivih materijala**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora Doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta: