

# Primjena i razvoj supravodljivih kablova

---

**Zubović, Antonio**

**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:187:824804>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-07**



**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**

**ANTONIO ZUBOVIĆ**

**PRIMJENA I RAZVOJ SUPRAVODLJIVIH KABLOVA  
ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**PRIMJENA I RAZVOJ SUPRAVODLJIVIH KABLOVA**

**APPLICATION AND DISTRIBUTION OF  
SUPERCONDUCTIVE CABLES**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Automatizacija broskog pogona

Mentor: prof. dr.sc. Vinko Tomas

Student: Antonio Zubović

Studijski program: Preddiplomski studij brodostrojarstva

JMBAG: 0112060959

---

**Rijeka, lipanj 2022.**

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**POMORSKI FAKULTET**  
51000 Rijeka, Studentska 2

Student: Antonio Zubović

Studijski program: Preddiplomski studij brodostrojanstva

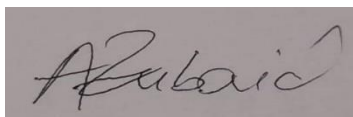
JMBAG: 0112060959

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom PRIMJENA I RAZVOJ SUPRAVODLJIVIH KABELA izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Vinka Tomasa.

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

Antonio Zubović

A rectangular box containing a handwritten signature in dark ink. The signature is written in a cursive style and appears to read 'A. Zubovic'.

Student: Antonio Zubović

Studijski program: Preddiplomski studij brodogradarstva

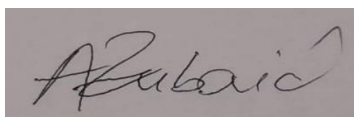
JMBAG: 0112060959

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 isključivo neimovinsko 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 <https://creativecommons.org/licenses/>

Antonio Zubović

A rectangular box containing a handwritten signature in dark ink. The signature is written in a cursive style and appears to read 'A. Zubovic'.

## SAŽETAK

Pojavom supravodljivosti otvara se razvojna era modernih supravodljivih otkrića među kojima se nalaze i supravodljivi kabeli. Zbog sve veće potražnje i potrošnje električne energije primjenjuju se supravodljivi kabeli koji imaju karakteristike velikog vođenja električne energije bez prevelikog otpora te smanjeni negativni utjecaj na okoliš. Upravo zbog navedenih karakteristika primjena supravodljivih kabela je raznolika: od vojne svrhe pa sve do tehnologije u medicini. U današnje doba supravodljivi kabeli su vrlo razvijeni praveći put za sigurniju i svjetliju budućnost električne energije.

Ključne riječi: supravodljivost, supravodljivi kabeli, pomorstvo, električna energija, otpor

## SUMMARY

The emergence of superconductivity opens the development era of modern superconducting discoveries, including superconducting cables. Due to the increasing demand and consumption of electricity, superconducting cables are used, which have the characteristics of high power conduction without excessive resistance and reduced negative impact on the environment. Precisely because of these characteristics, the application of superconducting cables is diverse: from military purposes to technology in medicine. Nowadays, superconducting cables are highly developed, paving the way for a safer and brighter future for electricity.

Keywords: superconductivity, superconducting cables, marine, electricity, resistance.

## Sadržaj

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD .....                                               | 1  |
| 1. 1. PREDMET I PROBLEM RADA .....                          | 1  |
| 1. 2. HIPOTEZA RADA .....                                   | 2  |
| 1. 3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....                    | 2  |
| 1. 4. ZNANSTVENE METODE .....                               | 2  |
| 1. 5. STRUKTURA RADA .....                                  | 3  |
| 2. TEMELJNE KARAKTERISTIKE SUPRAVODIČA.....                 | 4  |
| 2. 1. RAZVOJ SUPRAVODIČA .....                              | 4  |
| 2. 2. PRINCIP RADA SUPRAVODIČA .....                        | 7  |
| 3. SUPRAVODIČKI KABELI .....                                | 12 |
| 3. 1. PREDNOSTI SUPRAVODIČKIH KABELA .....                  | 15 |
| 3. 2. POUZDANOST SUPRAVODIČKIH KABELA .....                 | 16 |
| 3. 3. POTENCIJAL SUPRAVODLJIVIH MATERIJALA NA BAZI BIZMUTA. | 18 |
| 4. PRIMJENA SUPRAVODIČA U POMORSTVU.....                    | 23 |
| 5. ZAKLJUČAK .....                                          | 29 |
| LITERATURA .....                                            | 30 |
| POPIS SLIKA.....                                            | 32 |

# **1. UVOD**

Električna struja sastoji se od električnih naboja koji se najčešće sastoje od elektrona. Vodiči poput bakrenih žica imaju puno slabo vezanih elektrona. Kada se primjenjuje električno polje, ti elektroni teku relativno slobodno. Ali čak i dobri vodiči poput bakra imaju otpor: zagrijavaju se prilikom nošenja struje. Samo teoretsko razmatranje vodiča koji će imati gotovo nikakav otpor predstavlja veoma zanimljivo područje za fizičare ali i brojne potencijalne komercijalne primjene.

Supravodljivost je sposobnost određenih materijala da provode električnu struju s praktički nultim otporom. Ovaj kapacitet proizvodi zanimljive i potencijalno korisne učinke. Da bi se materijal ponašao kao supravodič, potrebne su niske temperature. Iz znanstvenog gledišta ali i svakodnevne primjene u prijenosu električne energije, radi se o fenomenu i fascinantnom području fizike koje se i dalje nastoji u potpunosti objasniti i istražiti te na temeljima otkrića se nastoje razviti novi modeli kabela koji će omogućiti prijenos električne energije s gotovo nepostojećim otporom. Jedna od najznačajnijih karakteristika supravodljive tvari je da na temperaturi ispod svoje kritične temperature gube svoju električnu otpornost. Istodobno, s pojavom ove izvedbe dolazi do pojave magnetskih efekata i stvaranja savršenih dijamagnetika.

## **1.1. PREDMET I PROBLEM RADA**

Predmet ovog rada su supravodički kabele i njihov razvoj. Kako se radi o najčešće primjenjivanoj tehnologiji razvoja supravodiča u praksi, supravodički kabele predstavljaju vodeći oblik primjene supravodičkih svojstava u svakodnevici.

Problem rada jest suvremeni potencijal i poteškoće u komercijalnom razvoju supravodičkih kabela i značaj razvoja supravodljivosti kao fizikalnog svojstva koje još uvijek nije do kraja istraženo te svojstva supravodljivosti kao potencijala za stvaranje materijala koji će značajno smanjiti gubitke u prijenosu energije i time smanjiti gubitke električne energije.

## **1. 2. HIPOTEZA RADA**

Temeljem predmeta i problema istraživanja u ovom radu postavljena je znanstvena hipoteza:

H1: supravodljivi kabeli predstavljaju potencijal za razvoj električne energije sa značajno smanjenim gubicima u otporu pri čemu je značajan komercijalni razvoj omogućen boljim razumijevanjem i proizvodnjom visoko-temperaturnih supravodičkih kabela (HTS kabela).

## **1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Svrha i ciljevi istraživanja proizlaze iz predmeta istraživanja i problema istraživanja u skladu s postavljenom hipotezom istraživanja. Pri tome su svrha i ciljevi istraživanja:

Prepoznati i prikazati potencijal supravodljivih kabela u suvremenoj komercijalnoj primjeni s posebnim naglaskom na pomorstvo.

Cilj istraživanja jest odgovoriti na sljedeća istraživačka pitanja:

- Koje su temeljne prednosti supravodiča u odnosu na konvencionalne vodiče?
- Koja su najvažnija ograničenja supravodiča koja otežavaju njihovu komercijalnu primjenu?
- Na koji način je razvoj HTS kabela povećao mogućnosti za svakodnevnu primjenu supravodičkih kabela?
- Koje vrste supravodiča se najviše razvijaju za proizvodnju supravodičkih komercijalnih kabela?
- Kakva je primjena supravodičkih kabela u suvremenom pomorstvu?

## **1.4. ZNANSTVENE METODE**

Prilikom pisanja rada korištene su znanstvene metode analize, sinteze, komparacije i deskripcije.

## **1.5. STRUKTURA RADA**

U uvodnom dijelu rada prikazan je predmet i problem istraživanja, radna hipoteza, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode korištene u radu te struktura rada.

Poglavlje pod naslovom „Temeljne karakteristike supravodiča“ donosi pregled najvažnijih znanstvenih spoznaja o karakteristikama supravodiča i postavlja teorijsku osnovu svojstva supravodljivosti. Pri tome se posebno analizira razvoj supravodiča i princip rada supravodiča.

Poglavlje pod naslovom „Supravodički kabeli“ analizira osobine supravodičkih kabela, prednosti koje imaju supravodički kabeli u odnosu na konvencionalne kabele te potencijal supravodičkih materijala u kabelima na bazi bizmuta koji se ponajviše pojavljuju u suvremenoj komercijalnoj primjeni.

Treće poglavlje pod naslovom „Primjena supravodiča u pomorstvu“ promatra praktičnu primjenu supravodičkih kabela i supravodiča u suvremenoj pomorskoj industriji te potencijal za daljnji razvoj.

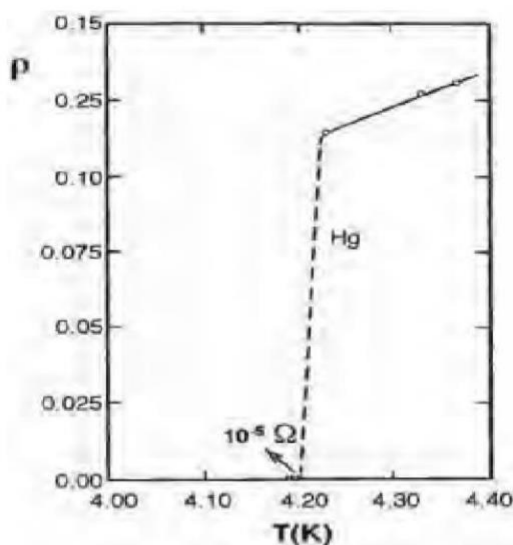
## 2. TEMELJNE KARAKTERISTIKE SUPRAVODIČA

Supravodljivost predstavlja fizikalni fenomen koji je u posljednjih nekoliko desetljeća omogućio značajan razvoj kabela i provodljivih materijala te čije istraživanje je i dalje u punom zamahu za buduće primjene. Kao najvažnije svojstvo zbog kojeg supravodiči postaju izuzetno cijenjeni materijali jest svojstvo prema kojem se supravodiči prilikom temperature koja je ispod njihove kritične temperature gube svojstvo električnog otpora. Također pri tome dolazi i do magnetskih učinaka uslijed kojih se stvara savršena dijamagnetika.

### 2. 1. RAZVOJ SUPRAVODIČA

Početkom 20. stoljeća, Heike Kamerlingh Onnes mjerio je električni otpor različitih materijala kada su ohlađeni na vrlo niske temperature. Godine 1911. primijetio je da električni otpor žive nestaje na temperaturi od 4,2 Kelvina. Budući da su se ti materijali ponašali kao superiorni vodiči, nazvao je supravodljivost. Sljedećih godina otkriveno je da mnogi materijali mogu doseći supravodljivo stanje kada se ohlade na dovoljno niske temperature. Pronađeni su novi materijali koji su postali supravodljivi na nešto višim temperaturama, ali se pokazalo da je supravodljivost ograničena na temperature ispod 30 K (Preuß, 2021).

*Slika 1: Grafički prikaz Heike Kamerlingh Onnesovog otkrića supravodljivosti*



Izvor: (Bennemann & Ketterson, 2008)

Tijekom pedesetih godina dvadesetog stoljeća, fizičari koji su proučavali kondenzaciju došli su do razumijevanja "konvencionalne" supravodljivosti, kroz par izvanrednih i važnih teorija: fenomenološku Ginzburg-Landauovu teoriju (1950. godine) i mikroskopsku BCS teoriju (1957. godine) (Bennemann & Ketterson, 2008). BCS teorija ili Bardeen-Cooper-Schriefferova teorija (nazvana po Johnu Bardeenu, Leonu Cooperu i Johnu Robertu Schriefferu) prva je mikroskopska teorija supravodljivosti od otkrića Heike Kamerlingh Onnes 1911. godine. Teorija opisuje supravodljivost kao mikroskopski učinak uzrokovan kondenzacijom Cooperovih parova. Teorija se također koristi u nuklearnoj fizici za opisivanje interakcije uparivanja između nukleona u atomskoj jezgri (Bardeen, Cooper, & Schrieffer, 1957).

Godine 1950., Landau i Ginzburg su osmislili fenomenološku Ginzburg-Landauovu teoriju supravodljivosti. Ova teorija, koja je kombinirala Landauovu teoriju faznih prijelaza drugog reda s valnom jednačbom sličnom Schrödingeru, imala je veliki uspjeh u objašnjavanju makroskopskih svojstava supravodnika. Konkretno, Abrikosov je pokazao da Ginzburg-Landauova teorija predviđa podjelu supravodnika u dvije kategorije koje se danas nazivaju Tip I i Tip II. Abrikosov i Ginzburg dobili su Nobelovu nagradu 2003. godine za svoj rad (Landau je 1962. dobio Nobelovu nagradu za druga djela, a umro je 1968. godine). Četverodimenzionalno proširenje Ginzburg-Landauove teorije, Coleman-Weinbergov model, važno je u kvantnoj teoriji polja i kozmologiji. Također 1950. godine Maxwell i Reynolds i suradnici su utvrdili da kritična temperatura supravodnika ovisi o izotopskoj masi sastavnog elementa. Ovo važno otkriće ukazalo je na interakciju elektron-fonon kao mikroskopski mehanizam odgovoran za supravodljivost. Kompletu mikroskopsku teoriju supravodljivosti konačno su 1957. godine predložili Bardeen, Cooper i Schrieffer. Ova BCS teorija objasnila je supravodljivu struju kao superfluid Cooperovih parova, parova elektrona koji međusobno djeluju razmjennom fonona. Za ovaj rad autori su dobili Nobelovu nagradu 1972. godine. Generalizacije teorije BCS-a za konvencionalne supravodiče čine osnovu za razumijevanje fenomena superfluidnosti, jer spadaju u klasu univerzalnosti lambda prijelaza. Još uvijek je kontroverzna mjera u kojoj se takve generalizacije mogu primijeniti na nekonvencionalne supravodiče (Bennemann & Ketterson, 2008).

Do značajnog novog razvoja supravodljivosti i potencijala iste dolazi 1986. godine kada su Bednorz i Müller otkrili novi tip supravodiča. Na temelju ovog otkrića, ubrzo je otkriveno

da su široki rasponi materijala supravodljivi na temperaturama u rasponu od 90 K. Ovi novi supravodiči ne mogu se u potpunosti opisati postojećim teorijama i nazivaju se visokotemperaturnim supravodičima (High temperature superconductivity - HTS) kako bi se odvratili od klasičnih, niskotemperaturnih supravodiča (Preuß, 2021).

Od otkrića visokotemperaturnih supravodiča na keramičkoj osnovi u kasnim 1980-im, obnovljen je interes za supravodljive kabele za potrebe prijenosa i distribucije energije. Razvoj visokotemperaturnih supravodljivih (HTS) kabela za prijenos energije velikog kapaciteta je započela je tijekom posljednjeg desetljeća kako bi iskoristila učinkovitost i operativne prednosti zbog korištenja tekućeg dušika za hlađenje, koji predstavlja jeftin i ekološki prihvatljiv medij (Schmidt & Allais, 2005).

Budući da je supravodljivi kabel kompaktan i može prenositi veliku količinu električne energije, može učinkovitije koristiti zagušeni podzemni prostor gdje već postoji mnogo cjevovoda i drugih jedinica. Supravodljivi kabel također čini ukupni trošak izgradnje manjim od konvencionalnog kabela. U razvoju supravodljivih žica na bazi Bi, novorazvijena metoda sinteriranja pod tlakom omogućila je masovnu proizvodnju jeftine duge žice s visokom kritičnom strujom. Kritična struja supravodljive žice prelazi 130 A po žici (4 mm x 0,2 mm), a ima povećanu vlačnu čvrstoću od 140 MPa (pri RT), što je važno mehaničko svojstvo za praktičnost kabela. Nadalje, ujednačene karakteristike mogu se dobiti za 1 km dugu žicu, čak i kada se masovno proizvodi. U međuvremenu, u razvoju supravodljivog kabela, SEI je razvijao 3-u-jedan HTS kabel bez propuštanja elektromagnetskog polja kako bi se postigao kompaktan kabel s malim gubicima prijenosa. Od 2001. do 2002. godine Sumitomo Electric Industries, Ltd. (SEI) uspješno je proveo dugotrajno ispitivanje supravodljivog kabela klase 66 kV, 1 kA, 114 MVA u suradnji s Tokyo Electric Power Company (TEPCO) i Central Research Institute of Industrija električne energije (CRIEPI) u CRIEPI-jevom laboratoriju Yokosuka, za provjeru njegove praktične izvedbe i identificiranje problema. Potaknut ovim rezultatima, SEI ima za cilj ranu komercijalizaciju praktičnog supravodljivog kabela i sudjeluje u demonstracijskom projektu supravodljivog kabela (Albany Cable Project) u Sjedinjenim Državama (Masuda, 2005).

## 2. 2. PRINCIP RADA SUPRAVODIČA

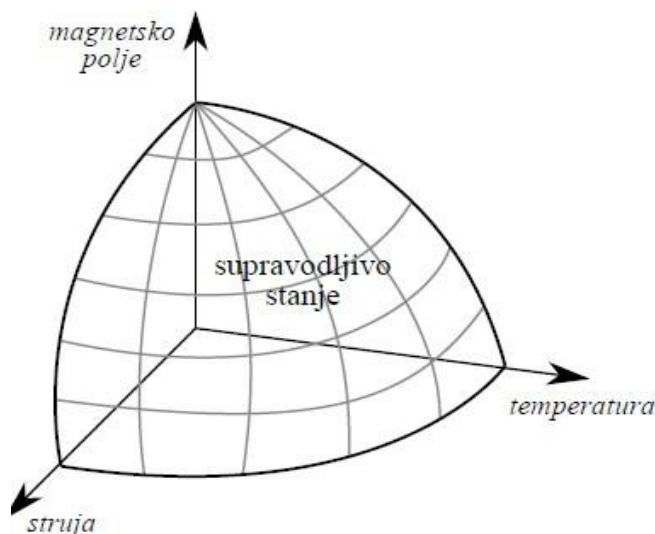
Supravodljivost, potpuni nestanak električnog otpora u različitim čvrstim tvarima kada se ohlade ispod karakteristične temperature. Ta temperatura, nazvana prijelazna temperatura, varira za različite materijale, ali općenito je ispod 20 K (-253 °C). Korištenje supravodiča u magnetima ograničeno je činjenicom da jaka magnetska polja iznad određene kritične vrijednosti, ovisno o materijalu, uzrokuju da se supravodič vrati u svoje normalno ili nesupravodljivo stanje, iako se materijal drži znatno ispod prijelaza temperatura (Ginsberg, 2018).

Supravodič ima svojstva dijamagneta do trenutka kad postiže određenu kritičnu vrijednost primjene magnetskog polja  $H_c$  uslijed čega dolazi do prijelaza u normalno stanje. U trenutku kad je razlika energije normalnog i supravodljivog stanja izjednačena s energijom magnetskog polja dolazi do kritičnog termodinamičkog magnetskog polja  $H_c$  prema formuli (Paar, 1994):

$$F_n - F_s = \frac{\mu_0 H_c^2}{2}$$

Supravodiči s takvim ponašanjem unutar magnetskog polja nazivaju se supravodičima I. vrste. Supravodiči II. vrste razlikuju se od supravodiča I. vrste po tome što imaju savršeno dijamagnetna svojstva prema vrijednosti magnetskog polja  $H_c$ . Pri tome unutar polja čija je vrijednost veća od donje kritične vrijednosti primijenjenog magnetskog polja dolazi do prodora magnetskog polja u unutrašnjost supravodiča pri čemu dolazi do stvaranja magnetskih vrtloga, no materijal samog vodiča ne mijenja svoje supravodljivo stanje. Ipak, ako magnetsko polje koje se nalazi u primjeni ima vrijednost u gornjem kritičnom polju  $H_c$ , materijal se vraća u normalno stanje. Supravodljivost je pri tome određena putem djelovanja tri glavna parametra: kritične temperature, kritičnog magnetskog polja i kritične struje koja može teći kroz vodič. Drugim riječima, supravodljivost je prisutna isključivo unutar površine određene s tri ključna faktora: temperature, magnetskog polja i gustoće struje.

Slika 2: Prikaz kritičnih parametara i površine koja obuhvaća supravodljivo stanje



Izvor: (Mrkonja, 2020)

Nekoliko fizikalnih svojstava supravodiča varira od materijala do materijala, kao što su kritična temperatura, vrijednost supravodljivog razmaka, kritično magnetsko polje i kritična gustoća struje pri kojoj se supravodljivost uništava. S druge strane, postoji klasa svojstava koja su neovisna o temeljnom materijalu. Meissnerov efekt, kvantizacija magnetskog toka ili trajne struje, odnosno stanje nulte otpornosti su najvažniji primjeri. Postojanje ovih "univerzalnih" svojstava ukorijenjeno je u prirodi narušene simetrije supravodiča i pojavi izvandijagonalnog dalekometnog reda. Supravodljivost je termodinamička faza i stoga posjeduje određena razlikovna svojstva koja su u velikoj mjeri neovisna o mikroskopskim detaljima (Preuß, 2021).

Supravodljivost je zapanjujuće odstupanje od svojstava normalnih (tj. nesupravodljivih) vodiča električne energije. U materijalima koji su električni vodiči, neki od elektrona nisu vezani za pojedinačne atome, već se mogu slobodno kretati kroz materijal; njihovo gibanje čini električnu struju. U normalnim vodičima ovi takozvani elektroni vodljivosti su raspršeni nečistoćama, dislokacijama, granicama zrna i vibracijama rešetke (fononi). U supravodiču, međutim, postoji poredak među elektronima vodljivosti koji sprječava to raspršenje. Posljedično, električna struja može teći bez ikakvog otpora. Redoslijed elektrona, nazvan Cooperovo uparivanje, uključuje impulse elektrona, a ne njihov položaj. Energija po elektronu koja je povezana s ovim redoslijedom iznimno je mala, obično oko tisućinke

količine za koju se energija po elektronu mijenja kada se dogodi kemijska reakcija. Jedan od razloga zašto je supravodljivost tako dugo ostala neobjašnjena je mala promjena energije koja prati prijelaz između normalnog i supravodljivog stanja. Poznato je da stotine materijala postaju supravodljivi na niskim temperaturama. Dvadeset i sedam kemijskih elemenata, pri čemu su svi metali, čine supravodiče u svojim uobičajenim kristalografskim oblicima pri niskim temperaturama i niskom (atmosferskom) tlaku. Među njima su opće poznati metali kao što su aluminij, kositar, olovo i živa i rjeđe kao što su renij, lantan i protaktinij. Osim toga, jedanaest kemijskih elemenata koji su metali, polumetali ili poluvodiči su supravodiči na niskim temperaturama i visokim tlakovima. Među njima su uran, cerij, silicij i selen. Bizmut i pet drugih elemenata, iako nisu supravodljivi u svom uobičajenom kristalografskom obliku, mogu se učiniti supravodljivima pripremanjem u vrlo neuređenom obliku, koji je stabilan na ekstremno niskim temperaturama. Supravodljivost ne pokazuje nijedan od magnetskih elemenata krom, mangan, željezo, kobalt ili nikal (Ginsberg, 2018).

Slika 3: Poznati elementi sa supravodljivim svojstvima u periodnom sustavu elementa

**POZNATI SUPRAVODLJIVI ELEMENTI**

|    |    |    |    |    |     |     |    |     |    |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1A |    |    |    |    |     |     |    |     |    |     |     |     |     |     |     |     | 0  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 1  | H  |    |    |    |     |     |    |     |    |     |     |     |     |     |     |     |    | 2  | He |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 3  | Li | 4  | Be |    |     |     |    |     |    |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    | 5  | B  | 6  | C  | 7  | N  | 8  | O  | 9  | F  | 10 | Ne |    |    |    |    |
| 11 | Na | 12 | Mg | 13 | Al  | 14  | Si | 15  | P  | 16  | S   | 17  | Cl  | 18  | Ar  |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 19 | K  | 20 | Ca | 21 | Sc  | 22  | Ti | 23  | V  | 24  | Cr  | 25  | Mn  | 26  | Fe  | 27  | Co | 28 | Ni | 29 | Cu | 30 | Zn | 31 | Ga | 32 | Ge | 33 | As | 34 | Se | 35 | Br | 36 | Kr |
| 37 | Rb | 38 | Sr | 39 | Y   | 40  | Zr | 41  | Nb | 42  | Mo  | 43  | Tc  | 44  | Ru  | 45  | Rh | 46 | Pd | 47 | Ag | 48 | Cd | 49 | In | 50 | Sn | 51 | Sb | 52 | Te | 53 | I  | 54 | Xe |
| 55 | Cs | 56 | Ba | 57 | *La | 72  | Hf | 73  | Ta | 74  | W   | 75  | Re  | 76  | Os  | 77  | Ir | 78 | Pt | 79 | Au | 80 | Hg | 81 | Tl | 82 | Pb | 83 | Bi | 84 | Po | 85 | At | 86 | Rn |
| 87 | Fr | 88 | Ra | 89 | +Ac | 104 | Rf | 105 | Ha | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

**SUPERCONDUCTORS.ORG**

\*

LANTANIDI

+

AKTINIDI

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68  | 69  | 70  | 71  |
| Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er  | Tm  | Yb  | Lu  |
| 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm  | Md  | No  | Lr  |

Izvor: (Mrkonja, 2020)

Najjednostavniji način mjerenja električnog otpora uzorka nekog materijala je postavljanje u električni krug u nizu s izvorom struje  $I$  i mjerenje rezultirajućeg napona  $V$  na uzorku. Otpor uzorka je dan Ohmovim zakonom kao  $R = V / I$ . Ako je napon nula, to znači da je otpor nula.

Supravodiči također mogu održavati struju bez ikakvog primijenjenog napona, što je svojstvo koje se koristi u supravodljivim elektromagnetima poput onih koji se nalaze u MRI strojevima. Eksperimenti su pokazali da struje u supravodljivim zavojnicama mogu trajati godinama bez ikakve mjerljive degradacije. Eksperimentalni dokazi upućuju na trenutni životni vijek od najmanje 100 000 godina. Teorijske procjene za životni vijek trajne struje mogu premašiti procijenjeni životni vijek svemira, ovisno o geometriji žice i temperaturi. U takvim instrumentima princip mjerenja temelji se na praćenju levitacije supravodljive niobijeve kugle mase 4 grama (Bottura, 1998).

U normalnom vodiču električna struja se može vizualizirati kao tekućina elektrona koja se kreće preko teške ionske rešetke. Elektroni se neprestano sudaraju s ionima u rešetki, a tijekom svakog sudara dio energije koju nosi struja apsorbira rešetka i pretvara u toplinu, što je u biti vibracijska kinetička energija iona rešetke. Kao rezultat toga, energija koju nosi struja neprestano se raspršuje. Ovo je fenomen električnog otpora i Jouleovog zagrijavanja (Bottura, 1998).

Toplinska svojstva supravodiča mogu se usporediti s onima istog materijala na istoj temperaturi u normalnom stanju. (Materijal se može prisiliti u normalno stanje pri niskoj temperaturi dovoljno velikim magnetskim poljem.). Kada se mala količina topline stavi u sustav, dio energije se koristi za povećanje vibracija rešetke (količina koja je ista za sustav u normalnom i supravodljivom stanju), a ostatak se koristi za povećanje energija vodljivih elektrona. Elektronska specifična toplina ( $C_e$ ) elektrona definirana je kao omjer tog dijela topline koju koriste elektroni i porasta temperature sustava. Specifična toplina elektrona u supravodiču varira s apsolutnom temperaturom ( $T$ ) u normalnom i supravodljivom stanju (kao što je prikazano na slici 1). Elektronička specifična toplina u supravodljivom stanju (označeno kao  $C_{es}$ ) manja je nego u normalnom stanju (označena kao  $C_{en}$ ) pri dovoljno niskim temperaturama, ali  $C_{es}$  postaje veća od  $C_{en}$  kako se približava prijelaznoj temperaturi  $T_c$ , u kojoj točki naglo pada na  $C_{en}$  za klasične supravodiče, iako krivulja ima oblik kvržice blizu  $T_c$  za visoko- $T_c$  supravodiče. Precizna mjerenja su pokazala da je, pri

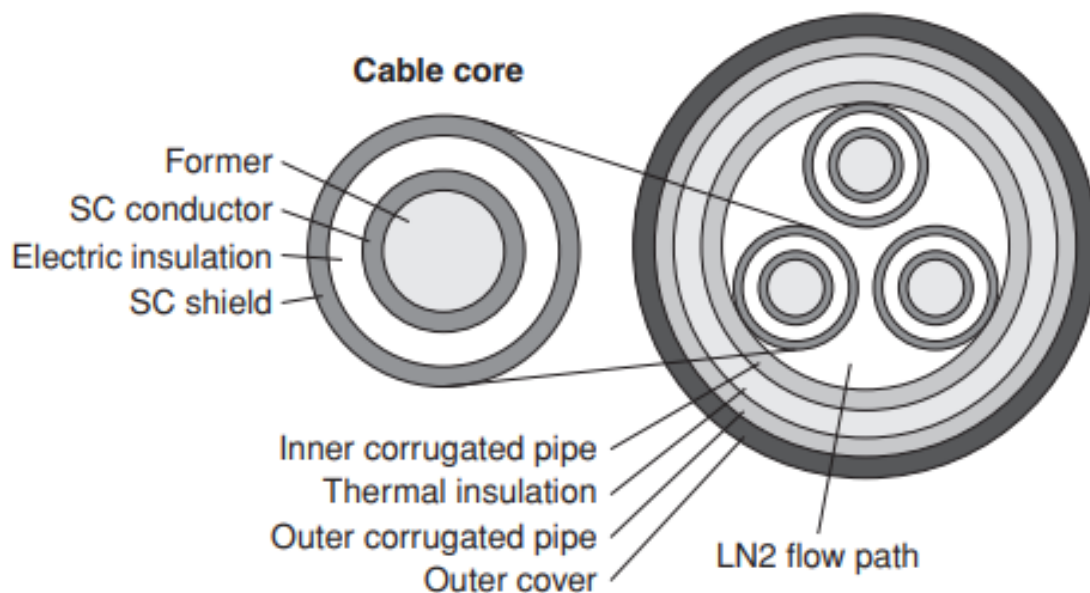
temperaturama znatno ispod prijelazne temperature, logaritam elektronske specifične topline obrnuto proporcionalan temperaturi. Ova temperaturna ovisnost, zajedno s načelima statističke mehanike, snažno sugerira da postoji jaz u distribuciji razina energije dostupnih elektronima u supravodniku, tako da je potrebna minimalna energija za pobuđivanje svakog elektrona iz stanja ispod jaza u stanje iznad jaza. Neki od visokoTc supravodiča daju dodatni doprinos specifičnoj toplini, koja je proporcionalna temperaturi. Ovo ponašanje ukazuje da postoje elektronska stanja koja leže pri niskoj energiji; dodatni dokazi o takvim stanjima dobivaju se optičkim svojstvima i tunelskim mjerenjima (Ginsberg, 2018).

Predložene upotrebe za supravodljive materijale uključuju medicinske uređaje za magnetsku sliku, magnetske sustave za pohranu energije, motore, generatore, transformatore, dijelove računala i vrlo osjetljive uređaje za mjerenje magnetskih polja, napona ili struja. Glavne prednosti uređaja izrađenih od supravodiča su mala disipacija snage, rad velike brzine i visoka osjetljivost.

### 3. SUPRAVODIČKI KABELO

Zahvaljujući svojstvima supravodljivosti moguće je napraviti suvremene supravodljive kabele koji imaju značajno veću provodljivost i otpornost nego klasični bakreni kabele. Vodiču kabele se pri tome formira polaganjem supravodljivih žica na bazi Bi u spiralu. Polipropilenski laminirani papir (PPLP) koristi se za električnu izolaciju zbog svoje dobre izolacijske čvrstoće i niskog dielektričnog gubitka pri niskim temperaturama, a tekući dušik radi kao složena izolacija uz rashladnu tekućinu. Na vanjskoj strani izolacijskog sloja, supravodljiva žica od istog materijala vodiča je spiralno namotana kako bi se formirao zaštitni sloj. Svaki zaštitni sloj svake jezgre spojen je jedan s drugim na oba kraja kabela, tako da se električna struja iste veličine kao u vodiču inducira u sloju oklopa u obrnutom smjeru, čime se smanjuje curenje elektromagnetskog polja izvan kabela na nulu. Tri jezgre su spojene zajedno, a to je smješteno unutar dvoslojnog valovitog cjevovoda. Toplinska izolacija se postavlja između unutarnjeg i vanjskog valovitog cjevovoda, gdje se održava vakuumsko stanje radi poboljšanja toplinske izolacije (Masuda, 2005).

*Slika 4: Shematski presjek supravodičkog kabela*



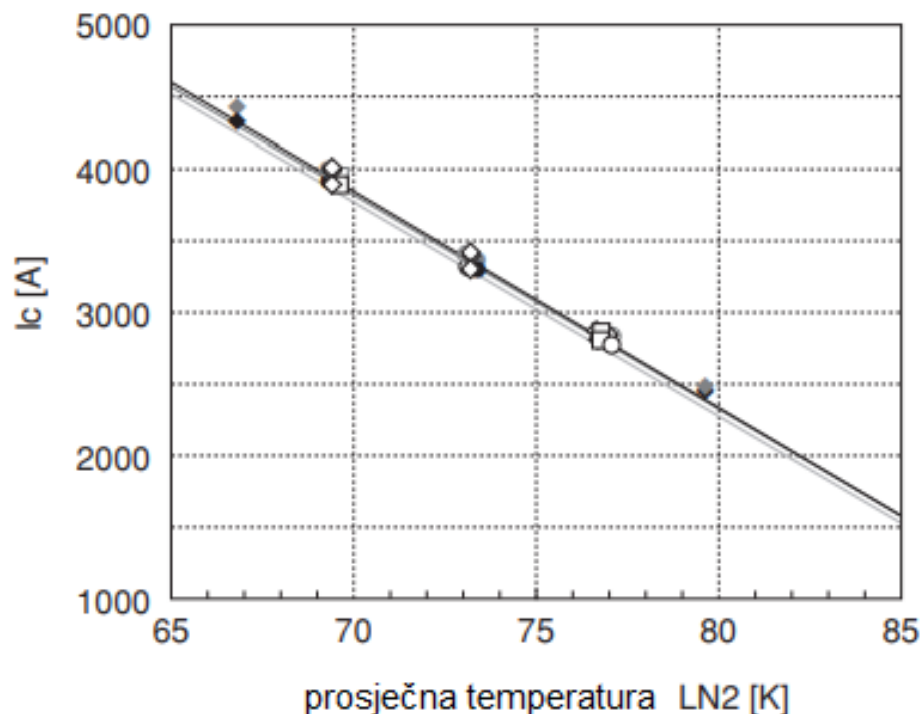
Izvor: (Masuda, 2005)

Gubici u supravodljivim kabelima imaju drugačije porijeklo od onih u konvencionalnim kabelima. Kako bi se bolje shvatio utjecaj mreže, može ih se podijeliti u dvije skupine prema njihovim učincima. Jedna skupina se odnosi na električnu vodljivost, gubitke koji se mogu detektirati mjerenjem impedancije, a druga skupina odgovara gubicima bez utjecaja na impedanciju, vezani su za vanjske izvore razmjene energije. Izolacijski gubici, induksijski gubici i magnetski gubici na oba, vodiču i oklopu, su u prvoj skupini, a druga skupina sadrži gubitke zbog toplinske izolacije, crpljenja i snage potrebne za kriogeni sustav. Gubici uvelike ovise o izvedbi kabela, ovisno o polumjeru spirale upletenih traka, broju traka i kompaktnosti supravodljivog sloja, broju slojeva te o izradi i širini traka. Utjecaj na nastale gubitke vrlo je važan i radi se na istraživanju kako bi se oni umanjili, ali u stvarnom stanju nije moguće dati univerzalni zakon za njihovo određivanje u funkciji na struju. ili faktor opterećenja. Međutim, moguće je pristupiti procjeni vrijednosti sa specifičnom svrhom usporedbe učinkovitosti s konvencionalnim kabelima na bazi vodiča (Romedenne, Granados, Casals, & Cascante, 2010).

Supravodljivi kabel koji koristi supravodljivi štit nema curenje elektromagnetskog polja i nisku reaktanciju. Ovisno o obliku kabela, reaktancija se može smanjiti na otprilike jednu trećinu od uobičajenih kabela. Ove značajke omogućuju povećanje kapaciteta kabela u polaganju nove linije paralelno s konvencionalnim kabelima i kontrolom trenutnog rasporeda s faznim regulatorom. Smatra se da se kontrola faznog regulatora može poboljšati i povećati pouzdanost cjelokupnog sustava korištenjem supravodljivog kabela u novododanoj liniji umjesto konvencionalnog kabela. Osim toga, jedna karakteristika supravodljivog materijala je da što je niža radna temperatura, to je veća količina struje koja može teći (Masuda, 2005).

Slika 4 prikazuje odnos između temperature supravodljivog kabela i kritične struje iz SEITEPCO verifikacionog testa. Kada je radna temperatura smanjena sa 77 K na 70 K, došlo je do povećanja nosivosti struje za približno 30%. Nadamo se da se ova karakteristika može koristiti kao hitna mjera kada postoji problem s drugom linijom (Masuda, 2005).

Slika 5: Odnos između kritične struje kabla i temperature u verifikacijskim ispitivanjima



Izvor: (Masuda, 2005)

Suvremeni supravodički kabeli se proizvode kao višeslojni sustav na podlozi koja je legura nikal krom. Slojevi su MgO puferski sloj koji se nanosi nagnutim taloženjem supstrata, drugi jedan MgO puferski sloj, HTS film i srebrni kontaktni sloj. Svi su nanoseni fizičkim taloženjem elektronskim snopom (EB-PVD) koji je dobro poznata i skalabilna tehnologija za proizvodnju tankih filmova u industrijskim razmjerima. Ova tehnologija nudi prednosti kao što su visoke stope isparavanja, niska temperatura podloge, fleksibilnost pri odabiru materijala za isparavanje i na kraju, visoke performanse zbog kvalitetne konzistencije duž duljine trake. HTS žice se proizvode u vrlo modernim, najsuvremenijim postrojenjima. Žice se prilagođavaju potrebama specifične primjene dodavanjem bakrene laminacije ili prevlake od bakra i rezanjem s proizvodne širine od 12 mm na manju širinu od 6, 4 i 3 mm po potrebi (Manuel & Bauer, 2008).

### 3. 1. PREDNOSTI SUPRAVODIČKIH KABELA

Supravodljivi kabel može prenositi električnu energiju efektivnom gustoćom struje od preko 100 A/mm<sup>2</sup>, što je više od 100 puta više od bakrenog kabela. To omogućuje prijenos energije velikog kapaciteta preko kabela kompaktnije veličine od konvencionalnih kabela, što omogućuje značajno smanjenje troškova izgradnje. Na primjer, s konvencionalnim kabelom, za prijenos snage za jedan krug od 66 kV, 1 kA obično su potrebna tri vodova. Kod ovih vodova, ako se potražnja za električnom energijom poveća do te mjere da je potrebno trostruko povećanje prijenosnog kapaciteta, potrebno je postaviti šest novih vodova za polaganje novog kabela. Korištenjem 3-žilnog supravodljivog kabela, međutim, 200% povećanje prijenosnog kapaciteta može se postići ugradnjom samo jednog supravodljivog kabela bez izgradnje novog vodova. Troškovi izgradnje vodova, osobito u velikim gradovima poput Tokija ili New Yorka, iznimno su visoki (Masuda, 2005).

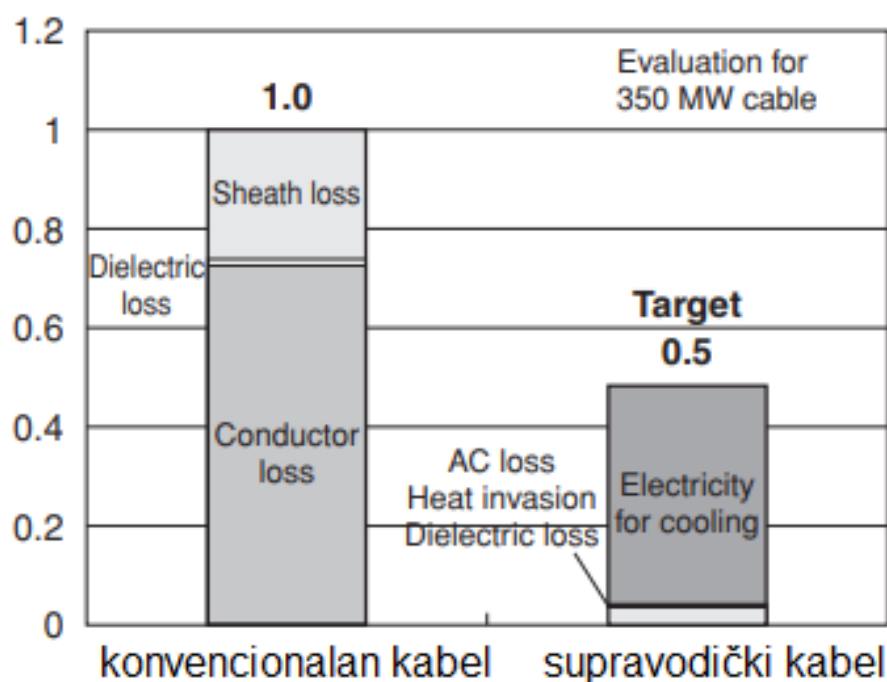
Trošak izgradnje supravodljivog kablenskog voda, izračunat uz pretpostavku da se koriste postojeće tehnike gradnje i da je sustav hlađenja na svakih 5 km, vjerojatno će biti mnogo niži od cijene izgradnje novog vodova za konvencionalni kabel. Iz gore navedenog razloga, očekuje se da će supravodljivi kabel biti cjenovno konkurentan.

U supravodljivim kabelima, električni otpor je nula na temperaturama ispod kritične temperature, pa je njihov prijenosni gubitak vrlo mali. Supravodljivi kabel ima supravodljivi štit, tako da nema curenja elektromagnetskog polja izvan kabela, što također eliminira gubitak vrtložne struje iz elektromagnetskog polja. Gubici energije u supravodljivom kabelu proizlaze iz gubitka izmjenične struje (AC) koji je usporediv s gubitkom magnetizacije samog supravodiča, dielektričnim gubitkom izolacije i prodorom topline kroz toplinsku izolacijsku cijev. Razlika u gubicima konvencionalnih kabela i supravodičkih kabela prikazana je na slici 4. (Masuda, 2005).

Za održavanje supravodljivog kabela na unaprijed određenoj temperaturi potrebno je rashladno sredstvo iz rashladne jedinice da kompenzira ovaj toplinski dobitak, a električna energija potrebna za rashladnu jedinicu, čija je učinkovitost pri temperaturi tekućeg dušika približno 0,1, mora se računati kao gubitak energije. Uspoređujući kabele klase 66 kV, 3 kA,

350 MVA, gubitak supravodljivog kabela je otprilike upola manji od običnog kabela (Bottura, 1998).

Slika 6: Grafički prikaz razlika u gubicima između tradicionalnih konvencionalnih kabela i supravodičkih kabela



Izvor: (Masuda, 2005)

Može se stoga sažeti kako supravodički kabele koji mogu osigurati električni prijenos velike snage, mogu učinkovito prenositi velike količine električne energije na velike udaljenosti i često se zamišljaju kao potencijalna zamjena za konvencionalne visokonaponske kabele kao okosnicu prijenosne mreže. Međutim, bliža primjena osigurava napajanje na kratkim udaljenostima u zakrčenim urbanim područjima gdje je postavljanje i održavanje konvencionalnih kabela otežano.

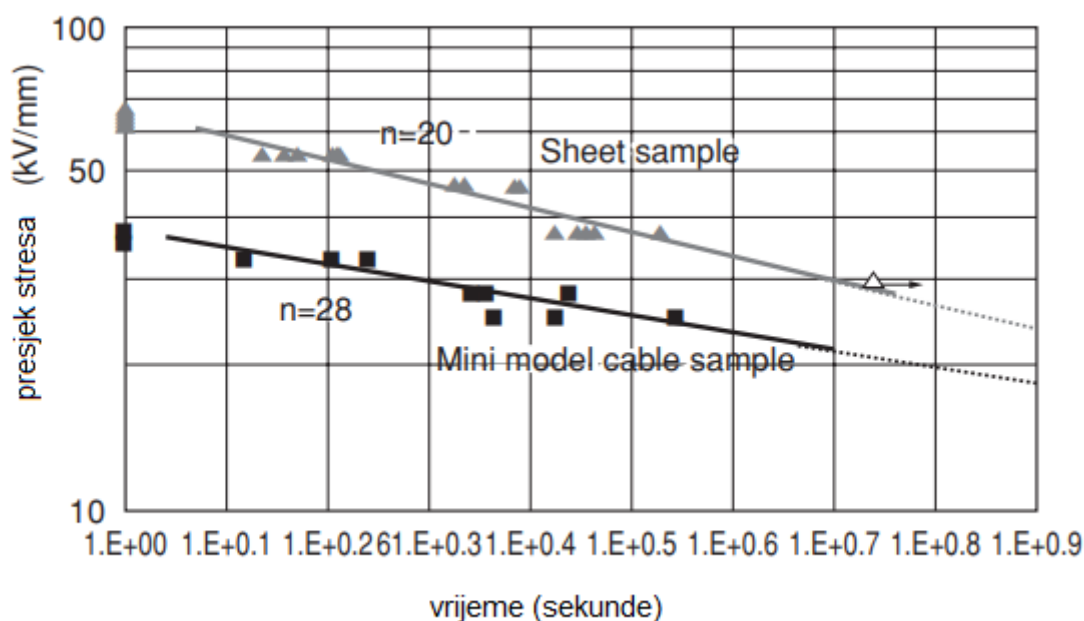
### 3. 2. POUZDANOST SUPRAVODIČKIH KABELA

Ako se ne primjenjuje vanjska sila ili ako je kabel dizajniran da izdrži vanjske sile, supravodljivi će kabele zadržati svoje karakteristike kroz veoma dugo razdoblje. Većina kabela koji su proizvedeni i nalaze u upotrebi već duži niz godina pokazuje održivost i stoga se tek treba odrediti konačan rok trajanja ovih kabela.

Budući da su promjene temperature tijekom rada kod supravodljivih kabela vrlo male, ne postoje čimbenici koji mogu dovesti do propadanja. Posljedično, očekuje se da se može postići stabilan rad. Nadalje, s obzirom na toplinsko širenje i kontrakciju kabela zbog hlađenja i zagrijavanja kabela, kabeli imaju jezgru kabela dizajniranu tako da bude labavo upletena i ostavlja potrebnu labavost da apsorbira ovo širenje i kontrakciju i na taj način smanji naprezanje koje se stvara. Tijekom verifikacijskog testa, kontinuirano ispitivanje opterećenja koje je trajalo više od 2400 sati bilo je uspješno, a tijekom verifikacijskog testa nisu pronađene nikakve promjene, poput propadanja na supravodljivom kabelu (Romedenne, Granados, Casals, & Cascante, 2010).

Za izolaciju supravodljivog kabela koristi se PPLP impregniran tekućim dušikom. PPLP je materijal koji se koristi za OF kabele, a potvrđeno je da može održavati stabilne izolacijske karakteristike pri niskim temperaturama, kao što to čini izolacijski materijal natopljen uljem na sobnoj temperaturi (Masuda, 2005). Slika 6 prikazuje rezultat testa V-t karakteristika PPLP u tekućem dušiku.

Slika 7: V-t performanse PPLP-a impregniranog LN2



Izvor: (Masuda, 2005)

Rezultat procjene vijeka trajanja supravodljivog kabela izoliranog PPLP-om, određen iz rezultata na slici 6, pokazao je da je konstantni napon od 66 kV manji od 10 kV/mm (stvarno 7,4 kV/mm), tako da je kabel procjenjuje se da ima život veći od 30 godina. Ispitivanje naponskog naprezanja pod električnim poljem koje nije dovoljno intenzivno da generira djelomično pražnjenje također je pokazalo da PPLP izolirani supravodljivi kabel nema tendenciju generiranja djelomičnog pražnjenja čak ni nakon opterećenja od više od 7000 sati, što također pruža dokaz dugog životnog vijeka. Ovi podaci također sugeriraju da se projektno naprezanje električne izolacije može povećati, čime je moguće smanjiti debljinu izolacije i učiniti kabel još kompaktnijim. Sustav hlađenja se sastoji od pumpi, rashladnih jedinica i drugih uređaja, pa je potrebno uspostaviti tehnologiju održavanja ovih uređaja. Tijekom verifikacijskog testa, rashladni sustav je radio oko 6.500 sati i nisu pronađeni nikakvi problemi. Proizvođač uređaja koji se koriste u sustavu hlađenja preporučuje održavanje ovih uređaja jednom godišnje. Međutim, potrebno je proučiti načine kako produžiti interval održavanja, razviti metodu održavanja tijekom rada i optimizirati backup sustav. S obzirom na navedeno, verifikacijskim testom ispitan je utjecaj kvara rashladnog sustava na supravodljivi kabel. Odnos između temperature rashladne tekućine i vremena proteklog nakon što su rashladne jedinice isključene (dok je kabel nastavio raditi). Vrijeme proteklo od isključivanja rashladnih jedinica do trenutka kada je kabel mogao više ne operiran je otprilike 6 sati. Proteklo vrijeme će se razlikovati ovisno o konfiguraciji sustava i radnim uvjetima, ali rezultat je pokazao da supravodljivi kabelski sustav daje dovoljno vremena za prebacivanje sustava kada rashladni sustav pokvari (Masuda, 2005).

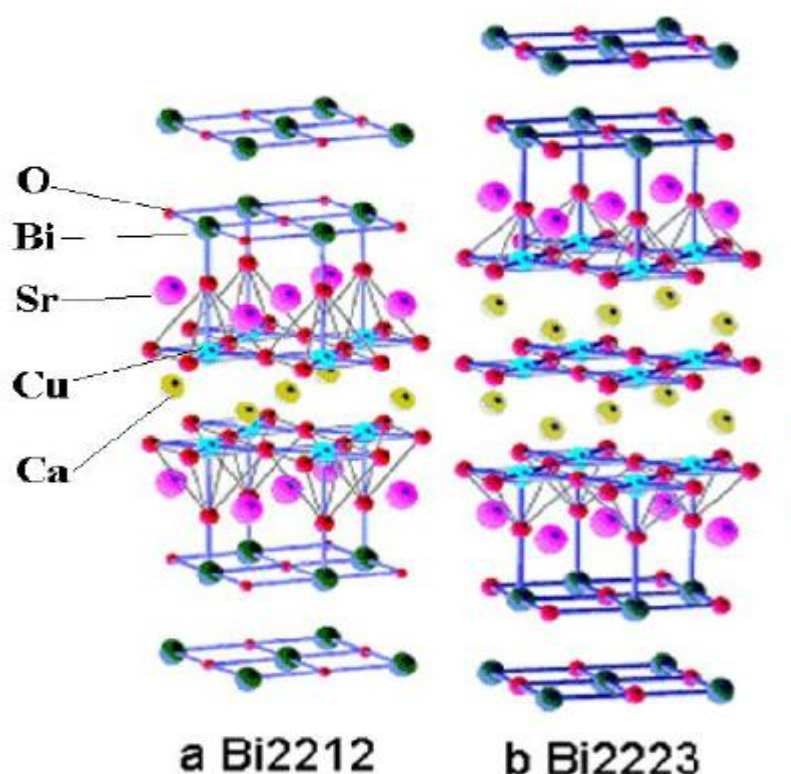
### **3. 3. POTENCIJAL SUPRAVODLJIVIH MATERIJALA NA BAZI BIZMUTA**

U području supravodiča, bizmutna supravodljiva žica naziva se supravodljiva žica prve generacije (1G), a supravodljiva žica od itrija naziva se supravodljiva žica druge generacije (2G). Zbog toga neki ljudi misle da je 2G žica novija i naprednija od 1G žice, iako to zapravo nije sasvim točno sagleda li se povijesni razvoj supravodiča. Također, novija istraživanja pokazuju kako je supravodljiva žica od bizmuta najbolji materijal za stvaranje učinkovitih supravodičkih kabela (Sato, Kobayashi, & Nakashima, 2011).

Postoje tri vrste supravodljivih materijala na bazi bizmuta:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_2\text{O}_6$  ( $T_c$  = oko 25 K),  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  ( $T_c$  = oko 80 K) i  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  ( $T_c$  = oko 110 K). Oni su nazvani  $\text{Bi}2201$ ,  $\text{Bi}2212$  i  $\text{Bi}2223$ , respektivno, prema omjeru sastavnih elemenata. U ranoj fazi

razvoja, Bi2212 je bilo lakše sintetizirati od Bi2223, a Bi2212 žice su imale veće kritične struje od Bi2223 žice pri niskim temperaturama oko temperature tekućeg helija. Međutim, budući da se Bi2212 žice ne mogu koristiti na temperaturi tekućeg dušika, a i zbog nedavnog poboljšanja Bi2223 žica i napretka aplikacija koje ih koriste, najčešća vrsta žica od bizmuta danas su žice Bi2223 (Yamada, Mogi, & Sato, 2007).

*Slika 8: Kemijski model Bi2212 i Bi2223 materijala*



Izvor: (Grima-Gallardo, 2021)

Kristalna struktura Bi2223 ima dvodimenzionalne CuO<sub>2</sub> kvadratne rešetke nalik pločama na kojima se javlja supravodljivost. CuO<sub>2</sub> ravnine imaju elektroizolirajuće blokirne slojeve iznad i ispod sebe, tvoreći slojevitost CuO<sub>2</sub> ravnina i blokirajućih slojeva koji su postavljeni jedan na drugi. Ova konkretna struktura rezultira anizotropnim transportnim svojstvom, koje omogućuje struji da teče duž CuO<sub>2</sub> ravnina, istovremeno potiskujući struju koja prelazi preko slojeva koji blokiraju. Zbog ovog svojstva postizanje visokih kritičnih struja ovisi o poravnanju CuO<sub>2</sub> ravnina duž strujnog puta u žici. Budući da su kupratni supravodiči lomljiva keramika, za razliku od duktilnih materijala kao što su bakar, aluminij i supravodljive legure Nb-Ti, ne mogu se oblikovati u žice postupkom deformacije. Stoga se

kupratne supravodljive žice izrađuju metodom koja se naziva ili "prah u cijevi" ili "srebrni omotač", a koja se sastoji od punjenja praha sirovog materijala u srebrnu cijev, deformiranja u žicu i sinteriranja u polikristalni supravodič. Bizmut kuprat ima slabo vezana područja u svojim blokirajućim slojevima koja se mogu lako odcijepiti.  $\text{CuO}_2$  ravnine u polikristalnom bizmut kupratu mogu se lako poravnati kada se oblikuju u traku postupkom u cijevi praha, uključujući valjanje i sinteriranje, zahvaljujući ovoj lakoći cijepanja (Yamada, Mogi, & Sato, 2007).

Žica Bi2223 u pravilu je debljine nešto više od 0,2 mm i širine nešto više od 4 mm. Kritična struja ( $I_c$ ) općenito se definira kao struja pri kojoj će se 1 mikrovolt po centimetru generirati pod atmosferom od 1 atm i vlastitim poljem.  $I_c$  vrijednost komercijalne BSCCO žice je oko 90-150 A, ali Sumitomo Electric je u objavljenom članku izvijestio da je njegova BSCCO žica postavila svjetski rekord s  $I_c$  od 210 A. Danas je BSCCO žica jedina visokotemperaturna supravodljiva žica koja mogu se masovno proizvoditi u dugačke žice preko 1000 m duljine (Sato, Kobayashi, & Nakashima, 2011).

Kako bi se kristali poravnali i povećala vrijednost kritične struje, usvojen je oblik trake. Čak i ako žica ima oblik trake, supravodljivi kuprat je keramički i stoga je krhak. Električni vodič BSCCO žice ima višestruku filamentarnu strukturu koja se sastoji od vrpcastih niti ugrađenih u srebrnu matricu, stoga se slabo degradira kada se savija. U slučaju supravodljive žice NbTi ili Nb<sub>3</sub>Sn nemoguće je provesti ispitivanje kritične struje duž cijele duljine jer je ispitivanje potrebno provesti u tekućem heliju. Međutim, u slučaju visokotemperaturnog supravodiča, kvaliteta se može osigurati na cijeloj dužini žice mjerenjem kritične struje za cijelu duljinu žice u tekućem dušiku (Yamada, Mogi, & Sato, 2007).

BSCCO žica, koja je postala prva praktična visokotemperaturna supravodljiva žica, imala je intrinzičan problem. Keramički supravodič imao je pore kroz koje prodiru tekući dušik, tako da kada se žica brzo zagrije nakon hlađenja tekućim dušikom, tekući dušik unutar supravodiča je bio rasplinjen i uzrokovao defekt žice nazvan "baloniranje". Neki su proizvođači odlučili zatvoriti žicu u metalni omotač kako bi se poboljšala čvrstoća žice, ali je (kritična gustoća struje za cijeli poprečni presjek žice) smanjena. S druge strane, budući da pore djeluju kao prepreka poboljšanju kritične struje, neki proizvođači i instituti razmišljali su o implementaciji temeljnog rješenja ovog problema, a to je pritisak tijekom

toplinske obrade, ali je za realizaciju takvoga potrebna napredna tehnologija. (Yamada, Mogi, & Sato, 2007).

Iako supravodič nema disipaciju energije pod istosmjernom strujom, magnetska histereza u supravodiču uzrokuje gubitak energije koji se naziva "izmjenični gubitak" s alternativnom strujom. Učinkovita metoda za smanjenje gubitka izmjenične struje je smanjiti histerezne petlje razbijanjem supravodiča na male komadiće. Međutim, ova struktura nije dovoljna jer se filamenti ponašaju kao da su jedna supravodljiva masa zbog spojne struje inducirane elektromagnetskom indukcijom. Kako bi se suzbila struja spajanja, žica se uvija tako da filamenti postaju spiralni oko središnje osi žice, a slojevi barijere visokog otpora su raspoređeni između niti. Ova struktura se također koristi u supravodičima niske temperature poput NbTi. Općenito, porast temperature dolazi lakše na niskim temperaturama jer je specifična toplota manja na niskim temperaturama. U supravodljivom uređaju koji nosi veliku struju, Jouleova toplota se stvara kada se supravodljivo stanje pogorša kao rezultat porasta temperature. To uzrokuje fenomen naglog porasta temperature koji se naziva "gašenje". Fenomen gašenja otežava praktičnu upotrebu supravodiča niske temperature u primjenama izmjenične struje unatoč dugogodišnjim istraživanjima. Specifična toplota tvari poput bakra povećava se stotruko pri 20 K i tisuću puta pri 77 K u usporedbi s onom pri 4 K. To znači da je porast temperature veći na višim temperaturama. Štoviše, učinkovitost hlađenja je bolja u područjima s višim temperaturama. Osim toga, budući da je dopuštena granica porasta temperature visokotemperaturnog supravodiča visoka zbog velike razlike između radne i kritične temperature, visokotemperaturni supravodič može stabilno raditi u AC operacijama gdje se toplota stalno stvara. Već je potvrđeno da nova supravodljiva traka proizvedena modifikacijom konvencionalne 110-A DC trake da ima užu veličinu i zavoje ima nizak gubitak izmjenične struje između jedne trećine i jedne petine u odnosu na konvencionalne vrpce koje koriste DC. Dramatičan napredak može se postići u supravodiču za korištenje izmjenične struje ako se razvije traka s malim gubicima izmjenične struje s kritičnom strujom oko 100 A korištenjem tehnologije za trake od 200 A (Sato, Kobayashi, & Nakashima, 2011).

Različitim demonstrativnim testovima u mreži, poput projekta Albany, prikupljaju se podaci o pouzdanosti i ekonomskoj učinkovitosti. Nedavno je u Japanu započeo novi projekt supravodljivih kabela pod vodstvom Ministarstva gospodarstva, trgovine i industrije (METI) i Organizacije za razvoj nove energije i industrijske tehnologije (NEDO). U ovom projektu

će se prikupiti više podataka o demonstraciji u stvarnim uvjetima rada i o pouzdanosti. U bliskoj budućnosti očekuje se i demonstracija istosmjernog supravodljivog kabela koji ima odlične performanse od supravodiča. Tehnologija istosmjernog niskonaponskog prijenosa energije primjenjiva je na prijenos obnovljivih izvora energije kao što su solarna energija i energija vjetra (Sato, Kobayashi, & Nakashima, 2011).

## 4. PRIMJENA SUPRAVODIČA U POMORSTVU

Pomorski inženjeri već neko vrijeme proučavaju električne brodove jer bi mogli ponuditi čišću, bržu i jednostavniju alternativu plovilima na dizelski pogon. Nakon više od 30 godina razvoja visokotemperaturni supravodiči (HTS) konačno su postigli stupanj tehnološke zrelosti koji ih čini prikladnima da postanu mjenjači igre u utrci za razvoj svih električnih i hibridno-električnih pomorskih pogonskih sustava. Industrija supravodiča ušla je u fazu rasta i ekonomije razmjera. Proizvodne tehnologije omogućuju serijsku i kontinuiranu proizvodnju velikih količina HTS žice, zavojnica i drugih konfiguracija specifičnih za primjenu kao što su masni magneti.

Trenutno, zbog svoje visoke učinkovitosti, većina brodskih motora je dizel. Međutim, s obzirom na gore navedeno stanje okoliša u području pomorskog prometa, budući brodski pogonski sustavi se predviđaju dosta drugačijim od sadašnjih. Električni brodski pogon korištenjem različitih dostupnih izvora energije jedna je od perspektivnih zamjena za konvencionalne brodske pogonske sustave. Kako bi se njegova upotreba proširila, potrebne su inovativne tehnologije za smanjenje gubitaka u prijenosu električne energije. Korištenje visokotemperaturne supravodljive (HTS) tehnologije ima potencijal za drastično smanjenje gubitka električne energije u prijenosu. Električni propulzivni pogon nedavno je postao popularan za velike kruzere i plovila za opskrbu platformama zbog povećane fleksibilnosti rasporeda opreme i dizajna krmenog trupa, što dovodi do boljeg manevriranja. Iz tog razloga se razvijaju HTS motori za pogon brodova (Nishijima, Eckroad, Marian, Choi, & Kim, 2013).

Nedavni razvoj tehnologije HTS kabela za prijenos snage primjenjiv je na brodski sustav deperming zavojnica s kabelom velike struje. Tehnologija kabela za izmjeničnu struju istražuje se kako bi se smanjila elektromagnetska zaštita, gubici izmjenične struje i precizna kontrola struje. Tehnologija istosmjernog HTS kabela za napajanje dostupna je za kabel za depermiranje zbog niske brzine promjene u vremenu. Električna struja ovih kabela je uglavnom 10 kA dok se za kabel za depermiranje očekuje veća struja.

Danski znanstvenici tijekom 2015. godine dizajnirali su kabel za depermiranje tako da formira ravnu zavojnicu s morskog dna, a brod za depermiranje je da zadrži svoj položaj

iznad zavojnice tijekom depermiranja. Magnetno polje za depermiranje broda postavlja se okomito na brod. Ovaj koncept ima nekoliko ključnih prednosti. Jedan je smanjeni ručni napor potreban za namotavanje kabela u slučaju tipa namotanog kabela. Druga prednost je eliminacija potrebe za točnom kontrolom vremena i položaja broda tijekom prolaska kroz tip za postavljanje zavojnice. Ovaj dizajn ograničava veličinu broda samo dubinom vode na kojoj je zavojnica postavljena, ali bez širine i visine brodova koji su ograničeni zavojnicom kaveznog tipa. Električna struja koja stvara magnetsko polje za depermiranje veća je od one potrebne za tip namotanog kabela i kavezni tip zbog udaljenosti od tražene pozicije i kratke duljine povezane linije. Nulta električna otpornost supravodiča i nedavno razvijena tehnologija visokotemperaturnog supravodiča (HTS) prikladna je za ovu primjenu kako bi se smanjila snaga napajanja (Hirota, 2020).

Primjena brodova koji se temelje na supravodljivosti mogla bi biti posebno učinkovita kada bi njihove propelere pokretali supravodljivi motori. Jedini problem je u tome što supravodiči rade na temperaturama blizu apsolutne nule ( $-256^{\circ}\text{C}$ ) i stvorenu toplinu je teško raspršiti unutar broda.

Njemački inženjerski div Siemens smatra da može zaobići takve probleme. Dizajnirao je motor koji koristi supravodiče visoke temperature koje je potrebno samo ohladiti na oko  $-140^{\circ}\text{C}$ . Motor je također smješten unutar čahure koja se nalazi neposredno ispod broda, tako da je gotovo u potpunosti okružena morskom vodom. Toplina se tada ispumpava, a okolna morska voda omogućuje joj da se daleko učinkovitije rasipa, održavajući motor na potrebnoj temperaturi (Mullins, 2007).

Prema istraživanju Hiroto iz 2020. godine koje je bilo usmjereno prema stvaranju supravodičkih kabela namijenjenih za stvaranje električnih, učinkovitih brodova, pod uvjetom da je broj linija od kojih svaka ima istu struju i istu orijentaciju skupljen u krugu, magnetsko polje koje stvaraju druge linije nameće se bilo kojoj drugoj liniji. Kako bi se stvorilo veliko magnetsko polje uz manju struju, svi vodovi su spojeni u seriju. Stoga, u tom slučaju, maksimalno magnetsko polje koje doživljava bilo koji dio ove linije ograničava ukupnu električnu struju koja prolazi. Kada se pretpostavi da je veličina poprečnog presjeka svake linije zanemariva, elektromagnetska zaštita između vodova može se zanemariti. Raspodjele linija u području kružnice su dva ekstremna slučaja: slučaj da su sve linije na

rubu kružnice i slučaj homogene raspodjele u području kružnice. Veći broj dijeljenja ukupne struje u vodove uzrokuje povećanje maksimalnog magnetskog polja, a neznatno povećanje za slučaj homogene distribucije. Generirano magnetsko polje proporcionalno je ukupnoj struji koja prolazi kroz ograničeno područje, ali induktivnost je kvadratni umnožak broja vodova, tako da je velika struja u jednoj liniji bolja za dizajn kabela koji ima aspekte koji ovise o vremenu. Budući da jednostruki vodič ima ograničeni strujni kapacitet od nekoliko stotina ampera, vod s paralelno spojenim višetračnim vodičima omogućuje provođenje potrebne količine struje, ali ne u punoj mjeri (Hirota, 2020).

Element trakastog vodiča sastoji se od ReBCO (Red-Earth-Barium-Copper-Oxide) i širine je 4 mm u prvom dizajnu zajedno s drugim komercijalno dostupnim materijalima. Visok trošak HTS materijala zahtijeva smanjenje njegove upotrijebljene količine, a također podrazumijeva veću električnu struju koju treba provesti kako bi se održao isti intenzitet polja po jedinici korištenog materijala. Preporučuje se postaviti radnu temperaturu na 20 K pri čemu je kritična struja ReBCO drastično povećana u odnosu na trenutnu razinu na višoj temperaturi. Nadalje, drugi jeftiniji HTS materijali imaju potencijal za primjenu. Na nižoj radnoj temperaturi, promjer ukupnog vodiča može biti manji, što rezultira mogućnošću postavljanja promjera kabela na morsko dno i smanjenja rashladnog sustava (Bottura, 1998).

Razvoj visokotemperaturnog supravodljivog motora megavatne klase s visokim zakretnim momentom i malom brzinom rotacije napreduje zajedničkim naporima Kawasaki Heavy Industries, Ltd, Tokyo University of Marine Science and Technology i National Maritime Research Institute od 2007. godine. Grupa je razvila prototip motora, koji je prikazan na slici 7, s projektiranom snagom od 1 MW. Grupa je pokazala da kada su dvije od šest supravodljivih zavojnica bile instalirane na svaki pol polja, snaga motora dosegla je 450 kW pri 190 o/min s izvanrednom učinkovitošću od 98% u 2010. godini. Rezultati ovih ispitivanja impliciraju da će snaga motora doseći 1 MW kada su instalirani svi HTS kabele. Ovaj motor je tipa radijalnog zazora, a zapreminska gustoća momenta motora je oko 28 kN m<sup>-3</sup>. U ovom slučaju, volumetrijska gustoća momenta je omjer nazivnog momenta i volumena (područje rezanja središta motora pomnoženo s razmakom između oba ležaja). Gustoća momenta konvencionalnog brodskog pogonskog motora je približno 5–10 kN m<sup>-3</sup>. U ovom HTS motoru supravodljivi svitci izrađeni od žice BSCCO-2223 ugrađeni su u rotor. S druge strane, u stator se ugrađuju normalne vodljive zavojnice od bakra. Strukture zračne jezgre primjenjuju se i na rotor i na stator. Radna temperatura i struja zavojnica polja su 30

K i 200 A. Uz podršku Organizacije za razvoj nove energije i industrijske tehnologije (NEDO), kontinuirano se provode istraživačke i razvojne aktivnosti za realizaciju visokotemperaturnog supravodljivog tehničkog uređaja od 3 MW. Ciljana gustoća momenta ovog motora je veća od  $40 \text{ kN m}^{-3}$ , a ciljna učinkovitost ovog motora je više od 98% s obzirom na kriogene gubitke hlađenja (Nishijima, Eckroad, Marian, Choi, & Kim, 2013).

*Slika 9: Kawasaki HTS brodski električni motor*



Izvor: (Nishijima, Eckroad, Marian, Choi, & Kim, 2013)

Za ocjenu primjenjivosti HTS motora, demonstriran je sustav propulzije za obalni kontejnerski brod. HTS motor je primijenjen na ugrađeni elektromotor pogona na krmenoj strani tandem postavljenog suprotno rotirajućeg propelera. Pogon s HTS motorom postaje elastičniji od onog s konvencionalnim motorom. Smanjenje hidrodinamičkog otpora zbog optimizacije samog pogona mahuna i modificiranje njemu prilagođenog oblika krmenog trupa procijenjeno je računskom dinamikom fluida (CFD), te ispitivanjem vučnog tanka provedenim na bazenu brodskog modela. Iz gornje numeričke simulacije i testa spremnika za vuču, procijenjeno je da postoji najmanje 16% smanjenja snage motora za pogonski sustav HTS u odnosu na konvencionalni dizelski pogonski sustav u kojem je dizelski motor spojen na propeler izravno ili putem reduktora. U ovoj procjeni uzet je u obzir električni i

mehanički gubitak prijenosa, korist od visokotemperaturne supravodljivosti i poboljšanje hidrodinamičke učinkovitosti modifikacijom oblika trupa (Nishijima, Eckroad, Marian, Choi, & Kim, 2013).

U području pomorskog prometa pooštavaju se međunarodni ekološki propisi. Protiv ovih regulacijskih promjena, HTS motor s karakteristikama visokog momenta i kompaktnosti može postati ključni uređaj za električni brodski pogonski sustav visokih performansi i niske emisije. Elektromotori postaju vrlo zanimljiva rješenja protiv konvencionalnih turbina ili uređaja s unutarnjim izgaranjem zbog veće učinkovitosti u širem rasponu brzina vrtnje eliminirajući ograničenje sve većih redukcijskih zupčanika, posebice u podmornicama. To omogućuje implementaciju manjih i tiših pogonskih sustava prijenosa od tradicionalnih podmornica na mehanički pogon

U Japanu, industrijsko-akademski konzorcij koji se sastoji od Sumitomo Electrica, Sveučilišta Fukui, IHI i drugih tvrtki razvija supravodljivi motor s aksijalnim razmakom za brodske pogonske sustave. Najistaknutija karakteristika ovog supravodljivog motora je da se motor hladi tekućim dušikom kao rezultat korištenja željezne jezgre. Konvencionalni supravodljivi magnet generira visoko magnetsko polje korištenjem velike gustoće struje supravodiča, pa je ideja o korištenju željezne jezgre čije je maksimalno magnetsko polje oko 1 T bila nezamisliva. Međutim, određivanjem optimalne lokacije za željeznu jezgru, nedostatak BSCCO supravodiča se nadoknađuje i ostvaruje se mali i lagani motor. Trenutno konzorcij radi na razvoju supravodljivog motora klase 400 kW. Očekuje se da će, ako se na brodu klase od nekoliko stotina tisuća tona, implementira porivni sustav kontrarotirajućeg propelernog tipa koji koristi dva motora od 400 kW, ispuštanje ugljičnog dioksida biti smanjeno (Sato, Kobayashi, & Nakashima, 2011).

Sve veću primjenu supravodiči imaju u vojnoj mornarici i razvoju vojnih brodova, posebice u SAD-u. Glavni razlog za korištenje HTS kabela za primjenu razmagnetiziranja je smanjenje broja vodiča (ili kabela) potrebnih za generiranje istog MMF-a. Smanjenje broja kabela rezultira ~90% smanjenjem ukupne instalirane duljine kabela za sve klase brodova mornarice. Smanjenje ugrađenog bakra rezultira značajnim smanjenjem ukupne težine sustava, 50-80%, ovisno o klasi broda. Iako se politika nabave u mornarici odnosi na umetanje tehnologije i osvježavanje tehnologije, ne postoji standardni pristup za kvantificiranje prednosti 50% smanjenja težine sustava za razmagnetavanje. Budući da se

prednost uštede na težini ne može lako kvantificirati i budući da je zajednica za nabavu dužna smanjiti troškove, fokus HTS demonstracije sustava za razmagnetanje bio je na smanjenju troškova sustava (Fitzpatrick, Golda, & Kephart, 2008).

Napredni sustav razmagnetljivanja (Advanced Degaussing System - ADG) koji se koristi u mornaričkim razaračima američke ratne mornarice sastoji se od više pojedinačnih i neovisno kontroliranih zavojnica za odmagnetiziranje raspoređenih u tri osi. Funkcija ovih zavojnica za razmagnetavanje je stvaranje magnetskih polja za suprotstavljanje magnetizaciji broda. Tri zavojnice za demagnetiziranje, poznate kao M, L i A, čine instalaciju zavojnice. Oni proizvode polja koja suprotstavljaju brodsku vertikalnu, uzdužnu i suprotnu magnetizaciju broda. Ovo smanjenje potpisa ne dolazi bez kazni, uglavnom zbog povećanja troškova i težine (Fitzpatrick, Golda, & Kephart, 2008).

*Slika 10: Konceptualni prikaz sustava AGD u američkim razaračima*



Izvor: (Fitzpatrick, Golda, & Kephart, 2008)

Iako je ovakav sustav u primjeni u ratnoj mornarici, za sada se osim u Japanu još uvijek ne razvijaju brodski motori većeg razmjera koji su utemeljeni na supravodičkim kabelima i svojstvima supraprovodljivosti u komercijalnoj upotrebi zbog prevelikih troškova izrade kabela zadovoljavajuće veličine.

## 5. ZAKLJUČAK

Supraodič je materijal koji postiže supravodljivost, a to je stanje materije koje nema električni otpor i ne dopušta prodiranje magnetskih polja. Električna struja u supravodiču može trajati beskonačno. Kada metal padne ispod kritične temperature, elektroni u metalu stvaraju veze koje se nazivaju Cooperovi parovi. Ovako zaključani, elektroni ne mogu pružiti nikakav električni otpor, a električna energija može savršeno teći kroz metal. Međutim, to radi samo na niskim temperaturama. Kada se metal previše zagrije, elektroni imaju dovoljno energije da prekinu veze Cooperovih parova i vrte se u pružanje otpora.

Usljed svojih svojstava koje omogućavaju provodljivost električne energije gotovo bez gubitaka, supravodiči su veoma zanimljivi različitim industrijama i traži se način kako pronaći učinkovitu primjenu istih za provođenje struje. Sve do posljednjih nekoliko godina primjena supravodiča ostajala je samo na teoriji ili ograničenim znanstvenim istraživanjima.

Supravodiči su podijeljeni u dvije glavne kategorije: niskotemperaturni supravodiči (LTS), također poznati kao konvencionalni supravodiči, i visokotemperaturni supravodiči (HTS), ili nekonvencionalni supravodiči. LTS se može opisati BCS teorijom kako bi se objasnilo kako elektroni formiraju Cooperove parove, dok HTS koristi druge mikroskopske metode za postizanje nulte otpornosti.

Postizanjem poboljšanja karakteristika i masovne proizvodnje HTS supravodičkih kabela, očekuje se da će u budućnosti HTS supravodički kabele imati približno istu isplativost kao bakrene žice. Za potpunu ekspanziju tržišta supravodiča neophodan je brz razvoj supravodljivih uređaja. Budući da su energetske kabele jedna od najvažnijih infrastruktura, od njih se zahtijeva vrlo visoka razina pouzdanosti tijekom dugog vremenskog razdoblja.

## LITERATURA

1. Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (1957). Microscopic theory of superconductivity. *Physical Review*.
2. Bennemann, K. H., & Ketterson, J. B. (2008). *History of superconductivity: Conventional, high-transition temperature and novel superconductors*. Berlin: Springer.
3. Bottura, L. (1998). Modelling stability in superconducting cables. *Physica C: Superconductivity*, 316-326.
4. Fitzpatrick, B. K., Golda, E. M., & Kephart, J. T. (2008). High temperature superconducting degaussing– cooling two hts coils with one cryocooler for the littoral combat ship. *AIP Conference Proceedings*.
5. Ginsberg, D. M. (18. 02 2018). *superconductivity*. Preuzeto 14. 05 2022 iz Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/superconductivity>
6. Grima-Gallardo, P. (2021). Synthesis, X-Ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy, Differential Thermal Analysis and Magnetic Susceptibility of the alloy (CuAlSe<sub>2</sub>)(TaSe)  $x$  with  $x = 0.5$ . *Ciencia en Revolution*, 37-45.
7. Hirota, M. (2020). High Temperature Superconducting (HTS) Cable Application to Ship Deperming Work. *Journal of Physics Conference Series*.
8. Manuel, L. R., & Bauer, M. (2008). Type 2G High Temperature Superconductors: Technology Trends and Challenges for Naval Applications. *Undersea Defence Technology Conference, Scottish Event Campus*.
9. Masuda, T. (2005). High-temperature superconducting cable technology and development trends. *SEI Technical Review*, 13-19.
10. Mrkonja, L. (2020). *Osnovne karakteristike i primjena supravodljivosti*. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu.

11. Mullins, J. (10. 04 2007). *Invention: Superconducting ships*. Preuzeto 23. 05 2022 iz New Scientist: <https://www.newscientist.com/article/dn12085-invention-superconducting-ships/>
12. Nishijima, S., Eckroad, S., Marian, A., Choi, K., & Kim, W. S. (2013). *Superconductivity and the environment: a Roadmap*. Osaka: IOPscience.
13. Paar, V. (1994). *Atomi, molekule, poluvodiči, supravodiči*. Zagreb: Školska knjiga.
14. Preuß, A. (2021). *Development of high-temperature superconductor cables for high direct current applications*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
15. Romedenne, O., Granados, X., Casals, P., & Cascante, S. (2010). Two examples of efficient superconducting cable applications. *Journal of Physics: Conference Series*.
16. Sato, K.-i., Kobayashi, S.-i., & Nakashima, T. (2011). Present status and future perspective of bismuth-based high-temperature superconducting wires realizing application systems. *Japanese Journal of Applied Physics*.
17. Schmidt, F., & Allais, A. (2005). *Superconducting Cables for Power Transmission Applications: A Review*. Hannover: Nexans – Superconducting Cable System.
18. Yamada, Y., Mogi, M., & Sato, K.-i. (2007). Examples and future prospects of high-temperature superconductor products. *Sei Technical Review-english Edition*.

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Grafički prikaz Heike Kamerlingh Onnesovog otkrića supravodljivosti.....                                     | 4  |
| Slika 2: Prikaz kritičnih parametara i površine koja obuhvaća supravodljivo stanje.....                               | 8  |
| Slika 3: Poznati elementi sa supravodljivim svojstvima u periodnom sustavu elementa .....                             | 9  |
| Slika 4: Shematski presjek supravodičkog kabela.....                                                                  | 12 |
| Slika 5: Odnos između kritične struje kabela i temperature u verifikacijskim ispitivanjima .....                      | 14 |
| Slika 6: Grafički prikaz razlika u gubicima između tradicionalnih koncencionalnih kabela i supravodičkih kabela ..... | 16 |
| Slika 7: V-t performanse PPLP-a impregniranog LN2 .....                                                               | 17 |
| Slika 8: Kemijski model Bi2212 i Bi2223 materijala.....                                                               | 19 |
| Slika 9: Kawasaki HTS brodski električni motor.....                                                                   | 26 |
| Slika 10: Konceptualni prikaz sustava AGD u američkim razaračima .....                                                | 28 |