

Električna provodnost i osnovna svojstva vodiča

Bjelčević, Adrian

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:187:656963>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-17**



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**

ADRIAN BJELČEVIĆ

**ELEKTRIČNA PROVODNOST I OSNOVNA SVOJSTVA
VODIČA**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**ELEKTRIČNA PROVODNOST I OSNOVNA SVOJSTVA
VODIČA
ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND BASIC PROPERTIES
OF CONDUCTORS**

**ZAVRŠNI RAD
BACHELOR THESIS**

Kolegij: Tehnologija elektrotehničkih materijala

Mentor: izv. prof. dr. sc. Jasminka Bonato

Komentor: Martina Žuškin, mag. edu. math. et inf.

Student: Adrian Bjelčević

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112083999

Rijeka, rujan 2024.

Student: Adrian Bjelčević

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112083999

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom
Električna provodnost i osnovna svojstva vodiča

izradio/la samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Jasminke Bonato
te komentorstvom Martine Žuškin mag. educ. math et inf.

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 parafrazirajući 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.

Student

A handwritten signature in black ink, reading "Bjelčević", is written over a horizontal line.

(potpis)

Ime i prezime studenta: Adrian Bjelčević

Student: Adrian Bjelčević

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112083999

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

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

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

Student – autor

A handwritten signature in cursive script, reading 'Bjelčević', is written over a horizontal line.

Ime i prezime studenta: Adrian Bjelčević

SAŽETAK

Ovaj završni rad bavi se istraživanjem električne provodnosti i osnovnim svojstvima vodiča. Električna provodnost je recipročna vrijednost električne otpornosti koja ovisi o čistoći materijala, a mijenja se i s temperaturom. Razumijevanje tog pojma je važno za razvoj i primjenu elektroničkih uređaja na kopnu i brodu. Posebna pažnja je posvećena materijalima visoke provodnosti, kao što su bakar i aluminij, te njihove legure. Istaknute su karakteristike tih materijala, važne u primjenama u elektronici i elektroenergetici, zbog male električne otpornosti.

Ključne riječi: vodiči, električna provodnost, primjene.

SUMMARY

This bachelor thesis explores electrical conductivity and basic properties of conductors. Electrical conductivity is reciprocal value to electrical resistance which depends on purity of the material and also changes with the temperature. Understanding this concept is essential for the development and application of electronic devices both on land and at sea. Special attention is given to materials with high conductivity such as copper and aluminum and their alloys. The characteristics of these materials are highlighted as important in applications in electronics and power engineering due to their low electrical resistivity.

Keywords: conductors, electrical conductivity, applications.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY.....	I
SADRŽAJ.....	II
1. UVOD	1
2. OSNOVNA SVOJSTVA VODIČA.....	2
2.1. ELEKTRONSKA STRUKTURA ATOMA	3
3. MATERIJALI S VISOKOM PROVODNOŠĆU.....	5
3.2. BAKAR	11
3.3. SLITINE BAKRA	15
3.4. ALUMINIJ.....	18
3.5.1. <i>Silumin</i>	21
3.5.2. <i>Aldrey</i>	21
4.1. RASTALNI OSIGURAČI	25
4.2. ELEKTRIČNI KONTAKTI	26
4.3. TERMOBIMETALI	28
5. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA	35
POPIS TABLICA	37
POPIS GRAFIKONA	38

1. UVOD

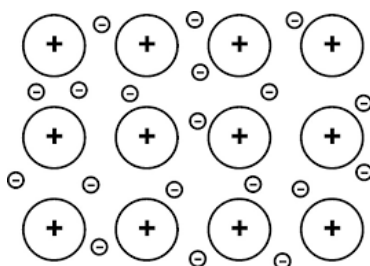
Električna nabijenost nekog tijela potječe od električne nabijenosti atoma materije od koje je to tijelo sastavljeno. Materija je sastavljena od kemijskih elemenata koji se razlikuju po svojim svojstvima i svaki kemijski element ima svoj karakterističan atom. Atom je najmanja čestica od koje se materija sastoji. Prema planetarnom modelu, svaki se atom sastoji od jezgre promjera oko 10^{-14} m, a na udaljenosti 10^{-10} m oko nje kruže elektroni. Naboj elektrona, oznaka $Q_e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C, dok je naboj protona pozitivan, $Q_p = +1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

U osnovnom stanju broj elektrona oko jezgre jednak je broju protona u jezgri i atom je kao cjelina električki neutralan u tom stanju. Elektroni su vezani privlačnom silom za jezgru atoma. Kod nekih elemenata ja ta sila relativno mala, pa se elektroni mogu slobodno gibati u međuatomskom prostoru materije. Svi materijali u čijim su atomima elektroni slabo vezani za jezgre oko kojih se kreću, spadaju u vodiče.

Rad opisuje električnu provodnost i svojstva vodiča, te primjene materijala s visokom provodnošću. Obuhvaća 4 poglavlja, zaključak, te popis slika i tablica. U uvodu su objašnjeni osnovni pojmovi vezani uz električnu provodnost, dok su u 2. poglavlju opisana svojstva vodiča. 3. poglavlje opisuje materijale visoke provodnosti, dok su u 4. poglavlju opisane primjene takvih materijala. Izrada proizvoda od materijala s visokom provodnošću ovisi o njihovoj namjeni u strujnim krugovima, što je opisano u zaključku završnog rada.

2. OSNOVNA SVOJSTVA VODIČA

Elektrotehnički materijali omogućuju ostvarivanje osnovne zadaće električnih proizvoda, a obuhvaćaju vodiče, poluvodiče i izolatore. Kod vodiča, atomi metala su poredani u kristalne rešetke, valentni elektroni slabo su vezani uz jezgru, te se slobodno gibaju po kristalu. Metalne veze stvaraju privlačne sile između pozitivnih metalnih iona i negativnih slobodnih elektrona. Ova veza omogućuje razna svojstva kao što su električna i toplinska vodljivost, plastičnost i tvrdoća [1].

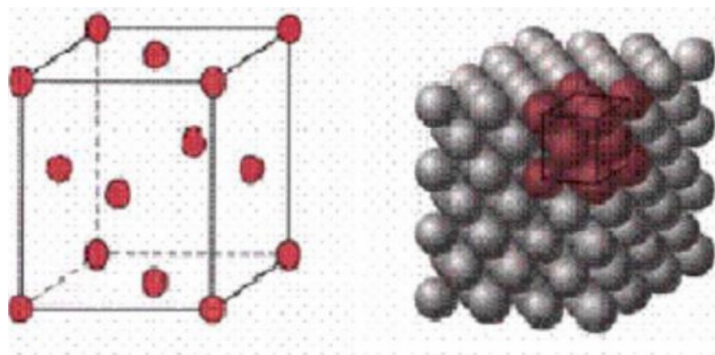


Slika 1. Metalna veza

Izvor: *Metalna veza*,

http://opstahemija.tmf.bg.ac.rs/Grujić/Opšta%20hemija%20I/Predavanja/11_Metalna%20veza.pdf

Na osnovi spoznaja o simetriji i kemijskom sastavu kristala, znanstvenici su pretpostavili neke jednostavnije kristalne strukture. Kristali sastoje se od trodimenzijskih tvorevina u kojima se isti razmještaj atoma, iona ili molekula periodično ponavlja u tri smjera u prostoru. Njihov raspored daje im karakteristična svojstva i oblik. Važnije kristalne strukture su BCC, FCC i HCP. Npr. bakar (Cu) i aluminij (Al) kristaliziraju u FCC, pa je njihova karakteristika da su lako plastično deformabilni.



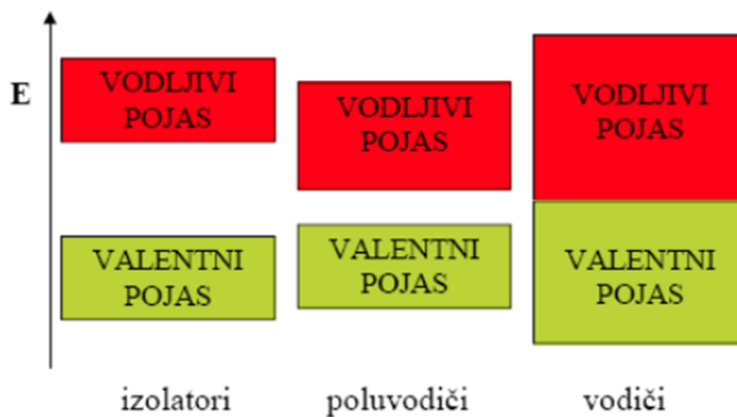
Slika 2. Shematski prikaz FCC rešetke, prostorni raspored atoma i u kristalu

Izvor: *Kubični kristalni sustav*, [https://ag2019-2020.e-](https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/76953/mod_resource/content/1/2%20Cvrste%20tvari.pdf)

[ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/76953/mod_resource/content/1/2%20Cvrste%20tvari.pdf](https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/76953/mod_resource/content/1/2%20Cvrste%20tvari.pdf)

2.1. ELEKTRONSKA STRUKTURA ATOMA

U kristalnoj rešetci čvrstih materijala elektroni zauzimaju određene nivoe koji se raspodjeljuju u energetske vrpce ili zone. Tako razlikujemo valentnu, vodljivu i zabranjenu zonu. Valentna zona sadrži energetske nivoe koji su popunjeni elektronima, dok vodljiva vrpca sadrži prazne energetske nivoe. Zabranjena zona se nalazi između ove dvije zone i u njoj nema dozvoljenih energetske stanja za elektrone. U metalima su valentna i vodljiva vrpca tako blizu da elektroni bez zapreke prelaze iz jedne u drugu. Primjeri ovakvih materijala su aluminij, zlato bakar itd. Kod poluvodiča je mali energetski razmak između valentne i vodljive vrpce (manji od 3eV), pa npr. porastom temperature neki elektron iz veze dobiva dovoljno energije za savladavanje energetske barijere i prelazi u vodljivu vrpcu. Osim o temperaturi vodljivost poluvodiča ovisi i o nazočnosti male količine drugih atoma u strukturi. Primjeri ovakvih materijala su silicij (Si), germanij (Ge) itd. Oni su osnova za izradu tranzistora, dioda i drugih komponenti. Izolatori su materijali kod kojih je energetski razmak između valentne i vodljive zone vrlo velik (preko 5 eV), pa oni ne provode elektricitet. Izolatorska svojstva imaju materijali poput stakla, plastike i gume [2].



Slika 3. Struktura energetskih vrpca

Izvor: *Uvod u poluvodiče*,
https://www.pmf.unizg.hr/download/repository/materijali_poluvodici.pdf

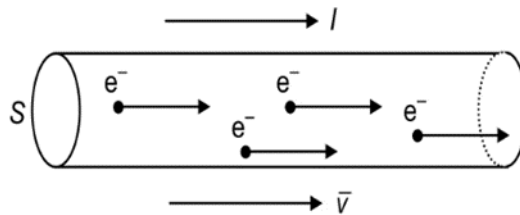
2.2. ELEKTRIČNA STRUJA U VODIČIMA

Kad se govori o provođenju električne struje u čvrstim materijalima, važni su metali, kao i njihove legure. Usmjereni gibanje električki nabijenih čestica nekim vodičem zbog djelovanja stalnog električnog polja uzduž vodiča, predstavlja električnu struju u tom vodiču.

Jakost električne struje i koja teče vodičem definirana je kao

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Ako je taj omjer isti za svaki t , onda je struja stalne jakosti i označava se s I . Električnu struju u metalima čini gibanje slobodnih elektrona, dok su u elektrolitima to ionizirani atomi ili molekule. Prolaskom struje kroz vodič dolazi do stvaranja Jouleove topline i zagrijavanja vodiča. Također dolazi do stvaranja magnetskog polja oko vodiča [3].



Slika 4. Količina naboja kroz vodič

Izvor: *Stalna struja*, <https://www.slideshare.net/slideshow/stalna-struja/42617653>

Da bi se u vodiču održala električna struja u vodiču mora postojati električno polje. Razlikujemo izmjeničnu struju gdje se smjer i jakost periodički mijenjaju u vremenu i istosmjernu gdje su oni konstantni [4].

3. MATERIJALI S VISOKOM PROVODNOŠĆU

Metali velike električne provodnosti, kao što su bakar i aluminij, koriste se u elektronici za izradu vodljivih veza u obliku žica, a važna je i njihova primjena kao vodiča električne struje.

3.1. SVOJSTVA MATERIJALA S VISOKOM PROVODNOŠĆU

Osnovna električna svojstva vodljivih materijala su električna otpornost (oznaka ρ , izražena u Ωm), temperaturni koeficijent električne otpornosti (α) i električna provodnost. Najvažnije karakteristike materijala s visokom provodnošću su prikazane u tablici 2. Materijali s visokom provodnošću imaju nisku specifičnu otpornost koja omogućava dobar protok struje. Npr. bakar (Cu) ima specifičnu otpornost od približno $1.68 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, a srebro (Ag) oko $1.59 \mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Tablica 1. Vrijednosti električnih otpornosti, kao i provodnosti za različite materijale

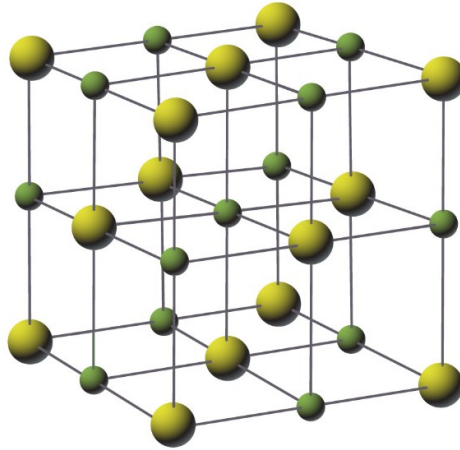
Metal	Električna otpornost ρ (Ωm)	Temperaturni koeficijent α (1/K)	Električna provodnost σ (S/m)	Toplinska provodnost K(W/m·K)
Srebro	0,0162	0,0036	6,15	453
Bakar	0,0169	0,0040	5,82	385
Zlato	0,0240	0,0037	4,09	312
Aluminij	0,0262	0,0042	3,55	209

Izvor: <https://www.slideserve.com/ros/materijali-za-elektrotehni-ke-proizvode>

3.1.1. Električna otpornost, ρ

Električna otpornost je svojstvo nekog materijala da se pruža otpor protjecanju električne struje i karakteristična je za svaki materijal. Ovisi o materijalu od kojeg je vodič napravljen, poprečnom presjeku i duljini vodiča te temperaturi. Čisti metali imaju pravilne kristalne rešetke koje pružaju vrlo mali otpor te se dodavanjem primjesa čak i u malim količinama kristali deformiraju i njihova električna otpornost se povećava. Tako je i kod legura koje formiraju čvrste otopine odnosno koje se zajednički kristaliziraju tokom skrućivanja te se atomi jednog elementa ugrađuju u kristalnu rešetku drugog.

Mehaničke deformacije poput hladne obrade pod pritiskom, valjanja, izvlačenja itd. uzrokuju izobličenja rešetke. Zbog ovih izobličenja dolazi do povećanja tvrdoće i čvrstoće materijala [5].



Slika 5. Kristalna rešetka

Izvor: *Kristalna rešetka*, https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/654159/html/7571_Elektricni_otpor.html

Električna otpornost može se izraziti iz zakona otpora:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (5)$$

gdje je:

R = električni otpor (Ω),

ρ = otpornost vodiča (Ωm),

l = duljina vodiča (m),

S = površina presjeka vodiča (m^2).

Tablica 2. Električne otpornosti različitih materijala

Materijal	Otpornost $\rho/\Omega\text{m}$
Srebro	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Bakar	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Aluminij	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Čelik	$2 \cdot 10^{-7}$
Željezo	$10 \cdot 10^{-8}$

Izvor: https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7571_Elektricni_otpor.html

Na temperaturi taljenja T_t dolazi do nagle promjene električnih otpornosti metala gdje kod većine metala električna otpornost raste. Iako kod nekih može doći i do pada otpornosti.

3.1.2. Temperaturni koeficijent električne otpornosti, α

Temperaturni koeficijent električne otpornosti je veličina koja pokazuje promjenu električne otpornosti materijala s promjenom temperature.

Može se izračunati prema izrazu: $\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta T}$ (6)

Gdje je:

ΔR = električni otpor (Ω),

ΔT = promjena temperature (K),

R_0 = električni otpor na 0°C (Ω).

Temperaturni koeficijent električne otpornosti ovisi o čistoći materijala tako čisti materijali imaju visok koeficijent dok slitine imaju manji. Temperaturni koeficijent može biti pozitivan te se otpor povećava s porastom temperature. To vrijedi za materijale kao što su aluminij, bakar,

cink, srebro, zlato itd. Materijali kao što su ugljik, silicij i germanij imaju negativan temperaturni koeficijent i njima se otpor porastom temperature smanjuje.

Električna otpornost na temperaturi T može se izračunati prema izrazu:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha_0(T - T_0)]$$

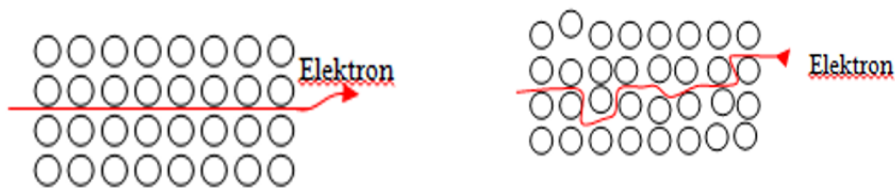
gdje je:

ρ = otpornost pri temperaturi T (Ωm),

ρ_0 = otpornost pri temperaturi T_0 (Ωm),

α = temperaturni koeficijent električne otpornosti (K^{-1}).

Povećanje temperature uzrokuje više sudara između slobodnih elektrona i atoma zbog pojačanih vibracija atoma u kristalnoj rešetki. To otežava mobilnost elektrona i povećava otpor [7].



Slika 6. Kretanje elektrona kroz idealan kristal naspram zagrijanog kristala

Izvor: <https://www.slideshare.net/slideshow/elektrinastrujapptx/254190628#6>

Temperaturni koeficijent moramo uzeti u obzir pri dizajnu električnih uređaja i sustava jer električna oprema mora biti dizajnirana da obavlja svoju funkciju unatoč promjenama otpornosti pri promjeni temperature.

Tablica 3. Temperaturni koeficijenti otpora različitih metala

MATERIJAL	$\alpha / 10^{-3}\text{K}^{-1}$
Aluminij	4,7
Bakar	4,3
Željezo	6,6
Srebro	4,1

Izvor: https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7571_Elektricni_otpor.html

3.1.3. Električna provodnost, κ

Električna provodnost je recipročna vrijednost električne otpornosti i može se izraziti sa:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

Izražava se mjernoj jedinici S/m i važna je veličina prilikom odabira materijala za izradu vodiča.

Tablica 4. Električna provodnost metala na 20 °C

Materijal	Električna provodnost (S/m)
Srebro	$6,30 \cdot 10^7$
Bakar	$5,96 \cdot 10^7$
Zlato	$4,10 \cdot 10^7$
Volfram	$1,79 \cdot 10^7$

Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektricna-provodnost>

Metali s najvećom električnom provodnošću odnosno najmanjom električnom otpornošću su bakar, aluminij, srebro i zato se najčešće koriste pri izradi vodiča. Dok metali kao što su nikal, željezo, platina itd. imaju veću električnu otpornost.

Gustoća električne struje se definira kao umnožak jakosti električnog polja, E i električne provodnosti, κ .

$$J = \kappa \cdot E \quad (2)$$

Pri tome vrijedi:

$$E = \frac{U}{l}, \quad (3)$$

U je napon između krajeva vodiča duljine l . Gustoća struje se može napisati prema definiciji kao omjer jakosti struje i presjeka vodiča:

$$J = \frac{I}{S} \quad (4)$$

Prema tome je:

$$\frac{I}{S} = \kappa \frac{U}{l} \quad (5)$$

Proizlazi da je

$$I = \kappa \frac{S}{l} U \quad (5)$$

gdje dio

$$G = \kappa \frac{S}{l} \quad (6)$$

predstavlja električnu vodljivost vodiča. Slijedi

$$I = G \cdot U \quad (7)$$

Veličina jednaka recipročnoj vrijednosti električne vodljivosti je električni otpor,

$$R = \frac{1}{G} \quad (8)$$

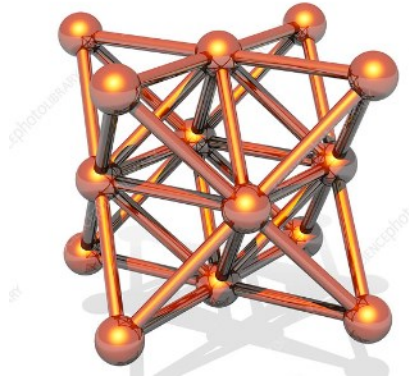
Tako se dobiva izraz

$$I = \frac{U}{R} \quad (9)$$

koji je zapravo Ohmov zakon za protjecanje električne struje vodičem.

3.2. BAKAR

Bakar (Cu^{27}) je metal koji nalazimo u prirodi, nalazimo ga u čvrstom agregatnom stanju, a karakterizira ga crvena boja. Obično se stvara u porforskim naslagama bakra koje povezujemo sa vulkanskim aktivnostima. Također ga možemo naći u spojevima kao što su halkprint (CuFeS_2), halkozin (Cu_2S), kovelin (CuS), kuprit (Cu_2O) itd.

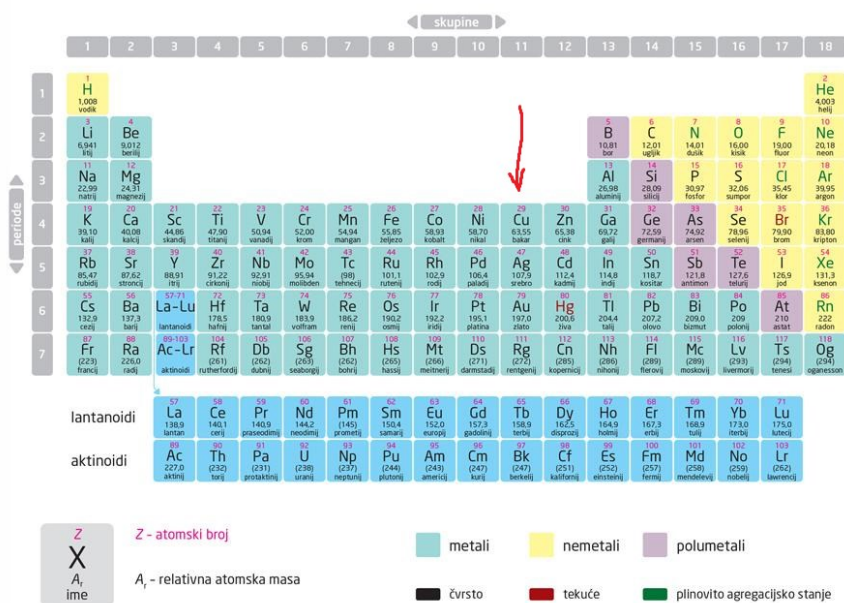


Slika 7. Kristalna struktura bakra

Izvor: Copper crystal structure, <https://www.sciencephoto.com/media/9050/view/copper-crystal-structure>

Bakar je relativno mekan metal i zbog toga se može lako oblikovati, te ima dobru mehaničku čvrstoću [8]. Zbog svoje dobre toplinske i električne provodljivosti i malene električne otpornosti dobar je u provođenju električne struje. Ljudi se koriste bakrom već tisućama godina iako je njegova prvotna uloga bila za izradu oružja i oruđa. U današnje doba koristi se u elektrotehnici za izradu vodova, kabela, namotaja elektromotora ili transformatora itd.

Periodni sustav elemenata



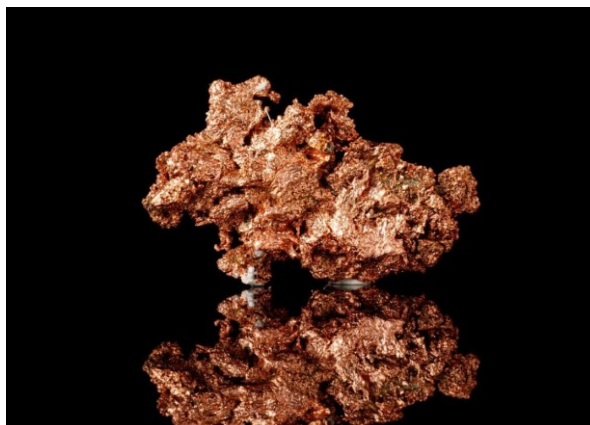
Slika 8. Položaj bakra u periodnom sustavu

Izvor: *Periodni sustav elemenata*, https://www.profil-klett.hr/sites/default/files/styles/sx_1170/public/pse_plakat.jpg?itok=BcPKBUnM

Tablica 5. Osnovna svojstva bakra

Svojstvo	
Specifična masa	8,9kg/dm ³
Atomska težina	63,57
Električna vodljivost	56-59 Sm/mm ²
Tempereturni koef. istezanja	17·10 ⁻⁶ /K
Temperatura tališta	1083 °C
Temperaturni koeficijent otpora	43·10 ⁻³ /K
Toplina taljenja	211.5 kW/s/kg

Izvor: <https://www.slideserve.com/lilah-schroeder/materijali-za-elektrotehni-ke-proizvode>



Slika 9. Grumen bakra

Izvor: **Bakar**, <https://miaminingco.com/bs/2023/12/28/bakar-je-esencijalni-metal-u-našem-svakodnevnom-životu-i-kolekcijama/>

Kada je izložen zraku bakar se prekriva zaštitnim slojem bakrovog oksida koji djeluje kao zaštitna barijera koja usporava daljnju koroziju, taj utjecaj oksidacije se povećava porastom temperature. U uvjetima gdje bi korozija mogla predstavljati problem koristi se zaštitni premaz od npr. zlata kako bi povećali otpornost na koroziju.

Ovisno o tome je li nam potrebna veća čvrstoća, tvrdoća, električna provodljivost ili istezljivost razlikujemo različite teksture bakra i to: lijevanu, gnječenu i žarenu. Lijevana tekstura nastaje kristalizacijom lijevanog bakra. Toplim gnječenjem dobivamo žarenu teksturu, a hladnim gnječenjem sitnu.

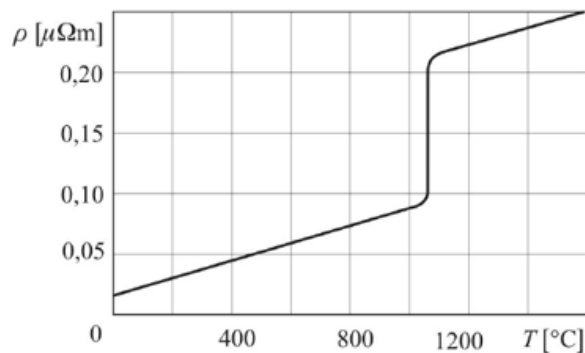
Bakar žarene teksture ima najveću električnu provodnost i istezljivost, ali pod cijenu smanjene čvrstoće i tvrdoće. Manju provodnost od njega ima bakar lijevane teksture, a najmanju ima gnječeni bakar, ali zato ima najveću čvrstoću i tvrdoću [9].



Slika 10. Stator elektromotora sa bakrenim žicama

Izvor: *Stator sa bakrenim žicama*, <https://mostarski.info/kemijski-element-bakar/>

Električna otpornost bakra ovisi o temperaturi. Zbog toga što bakar ima pozitivan temperaturni koeficijent povećanje temperature uzrokuje povećano sudaranje slobodnih elektrona unutar kristalne rešetke te se time otpor povećava.



Slika 11. Zavisnost električne otpornosti bakra o temperaturi

Izvor: <https://www.slideserve.com/ros/materijali-za-elektrotehni-ke-proizvode>

Na mjestima gdje se bakar koristi kao vodič moramo uzeti u obzir povećanje otpornosti s temperaturom kako bi osigurali ispravan rad sustava, a u mjernim uređajima promjene u otporu moramo pravilno kalibrirati ili kompenzirati [10].

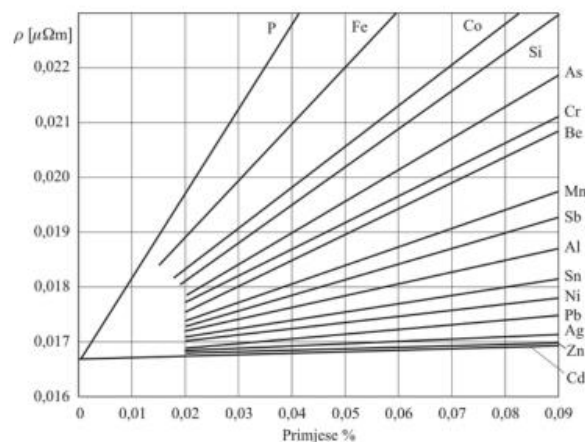
3.3. SLITINE BAKRA

Bakar je najbolji vodič električne struje nakon srebra kao i dobar vodič topline, no njegova provodnost se naglo smanjuje povećanjem primjesa, a povećava se otpornost. Njegova provodnost ovisi o postotku primjesa i nečistoća, pa se npr. provodnosti od 58 Sm/mm^2 uzima kao 100%-tna vodljivost, tako da s tom vrijednosti uspoređujemo vodljivost svih ostalih materijala.

Slitine bakra nam omogućuju postizanje željene čvrstoće, tvrdoće i ostalih mehaničkih svojstava, iako se povećanjem primjesa električna provodnost smanjuje.

Najčistijom primjesom smatramo ECu odnosno elektrolitski bakar. Materijali kao što su srebro (Ag), cink (Zn) i kadmij (Cd) ne utječu znatno na smanjenje vodljivosti no materijali kao što su fosfor (P), željezo (Fe) i silicij (Si) imaju negativan utjecaj na vodljivost.

Ako npr. želimo povećati temperature žarenja na bakru ćemo dodati primjesu srebra u iznosu od 0.08%, a ako želimo veću žilavost dodajemo kadmij [9].



Slika 12. Utjecaj primjesa na otpornost bakra

Izvor: <https://www.slideserve.com/ros/materijali-za-elektrotehni-ke-proizvode>

3.3.1. Mjed

Mjed je slitina bakra i cinka (najmanje 50% Cu i najviše 44% Zn) i najviše se primjenjuje od svih njegovih legura. Ima dobru vodljivost i mehaničku čvrstoću, električna otpornost je veća u odnosu na bakar. Također ima veliku otpornost na koroziju koja pada s povećanjem postotka cinka u primjesi, ali je osjetljiv na kiseline i lužine. Mjed u elektrotehnici služi kao konstrukcijski material za djelove koji trebaju voditi struju kao npr. električne kontakte, utikače, prekidače, releje, sabirnice itd. [11].



Slika 13. Primjena mjeda u elektrotehnici

Izvor: *Primjena mjeda u elektrotehnici*, <https://supermetalind.com/brass-wires-strips-electrical-industry/>

Tablica 6. Osnovna tehnološka svojstva mjedi

Osnovna svojstva mjedi	
Električni otpor (ρ)	$6.3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Električna provodnost (σ)	$15 \cdot 10^6 S/m$
Toplinska provodnost (κ)	$110 W/(m \cdot K)$

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Thermal-conductivity-electrical-conductivity-and-resistivity-of-metals-used_tbl2_325153687

Ove vrijednosti se mijenjaju ovisno o specifičnom omjeru bakra i cinka u leguri.

3.3.2. Bronca

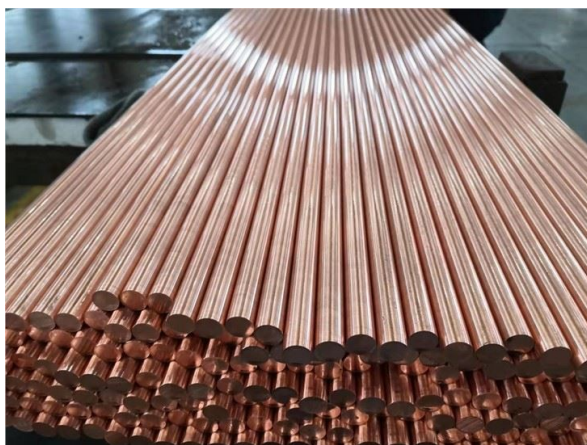
Bronca može biti dvojna ili trojna slitina bakra (najmanje 60% bakra u primjesi), a ime dobivaju prema drugom najzastupljenijem elementu kao npr. kositrena, aluminijska, olovna itd. Kada se spominje bronca obično se misli na kositrenu. Bakar u bronci povećava električnu provodnost dok drugi material mijenja mehanička svojstva. Tako se npr. kod prijenosa električne energije preko vodova koristi bronca sa 97% bakra. Koristi se i kod konektora, kontakata, na transformatorima, ležajevе elektromotora itd. Također služe za izradu četki za prijenos struje između stator i rotora. Aluminijske i kositrene legure su najkorištenije od koji razlikujemo lijevačke i gnječive. Aluminijske se koriste kada nam je potrebna veća otpornost na koroziju i povećana čvrstoća. Imamo i broncu s kadmijem i berilijem kojoj je mehanička čvrstoća povećana, ali ima smanjenu električnu provodnost.

Tablica 7. Osnovna tehnološka svojstva bronce

Osnovna svojstva bronce	
Električni otpor (ρ)	$10 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Toplinska provodnost (κ)	40 - 60 W/(m·K)
Električna provodnost (σ)	$1.25 \cdot 10^6 S/m$

Izvor: <https://www.metals4u.co.uk/blog/bronze-in-depth-guide>

Električni otpor bronce je viši od čistog bakra zbog prisutnosti drugih metala. Obično iznosi oko $10 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, ali varira od $5 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ do $20 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ovisno o leguri. Toplinska provodnost također ovisi o specifičnom sastavu legure i iznosi između 40 i 60 W/(m·K) [11].



Slika 14. Proizvod od bronce

Izvor: *Aluminijska bronca*, <https://hr.asiancopper.com/copper-alloy/aluminum-bronze.html>

3.4. ALUMINIJ

Aluminij (Al) spada u lake metale, a može se naći u zemljinoj kori ili dobiti umjetnim putem. Karakteriziraju ga visoka toplinska i električna provodnost, mala specifična masa itd. Aluminij je lagan, ima gustoću od $2,7 \text{ g/cm}^3$ i veoma je čvrst. Koristi se kada nam je težina vrlo bitan čimbenik, a zbog toga što ima nisku točku tališta ne koristi se na povišenim temperaturama [12].

Tablica 8. Osnovna tehnološka svojstva aluminija

Specifična masa	2.7 kg/dm^3
Atomska težina	26.98
Talište	$657 \text{ }^\circ\text{C}$
Električna vodljivost	$34.8 - 38 \text{ Sm/mm}^2$
Toplinska vodljivost	209.3 W/mK
Temperaturni koeficijent otpora	$4.2 \cdot 10^{-3} / \text{K}$

Izvor: http://ss-tehnicka-zupanja.skole.hr/upload/ss-tehnicka-zupanja/images/static3/1013/attachment/EMIK_i_MUE_-_skripta.pdf

Tijekom procesa dobivanja aluminija umjetnim putem potrebno je 20kWh električne energije kako bi dobili 1 kg čistog aluminija. Ovaj proces se dijeli u dvije faze: dobivanje glinice odnosno aluminijevog oksida te elektrolizom aluminija tako da kroz otopinu propustimo električnu struju te se aluminij taloži na katodi [13].

Iako se bakar češće koristi od aluminija, aluminij se u elektrotehnici često koristi pri izradi vodova, kabela, elektrolitskih kondenzatora, elektrodama itd.

Iako ima manju vodljivost naspram bakra aluminij je 3.5 puta lakši od bakra te je zbog toga našao svoju primjenu u izradi transformatora. To je bitno na brodovima gdje masa i veličina transformatora određuju njegov smještaj, iako se aluminij na brodu smije koristiti isključivo uz posebnu dozvolu klasifikacijskih društva. Također je puno jeftiniji što također utječe na njegov odabir kao materijal za izradu namotaja transformatora [11].



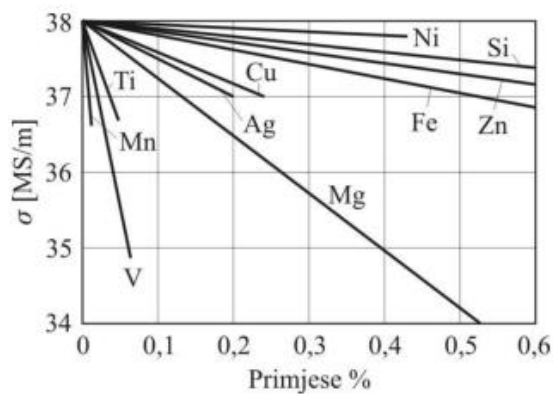
Slika 15. Aluminijski transformator

Izvor: <https://ba.aheptech.com/info/10kv-common-distribution-transformer-34967354.html>

Metal srebrnasto bijele boje i malene mehaničke čvrstoće i zbog toga je vrlo lako obradljiv. Ta čvrstoća ovisi o čistoći aluminija te s obzirom na nju dijeli se na rafinal (najčešće se koristi u kondenzatorima i prehrambenoj industriji), meki, tvrdi, polutvrđi i ekstra tvrdi. Na zraku vrlo brzo oksidira i prekirva se taknim slojem Al_2O_3 koji izolira aluminij od daljnje utjecaja zraka.

Zbog toga što je taj sloj zapravo izolator on nam može biti problem prilikom korištenja u elektrotehnici.

Također predstavlja problem prilikom lemljenja te moramo koristiti posebne postupke otklanjanja oksida npr. mehaničko, ultrazvučno ili kemijsko čišćenje. Njegova vodljivost ovisi o njegovoj čistoći te je u elektrotehnici standardizirana primjena 99,5% - tnog alumija [9].



Slika 16. Utjecaj primjesa na električnu provodnost aluminijske legure

Izvor: <https://www.slideserve.com/blaise/materijali-za-elektrotehni-ke-proizvode>

Metali kao što su titanium i mangan znatno utječu na njegovu provodnost dok silicij i željezo relativno malo.

3.5. SLITINE ALUMINIJA

Pri izradi kaveza rotora elektromotora te za konstrukciju kućišta manjih motora, najznačajnija je upotreba silumina, legura aluminija i silicija. Također se koristi i Aldrey, slitina aluminija sa magnezijem i silicijem, koja se zbog dobre električne provodnosti koristi pri izradi električnih vodova.

3.5.1. Silumin

Silumin je naziv za leguru aluminija i silicija (3 – 25 %) koja je našao svoju primjenu u elektrotehnici zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava, otpornosti na koroziju i jednostavnog lijevanja. Otporan je na koroziju, lagan je i dobro odvodi toplinu zbog čega je pogodan za primjenu u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji [14].

3.5.2. Aldrey

Aldrey je specifična legura koja se zbog svoje dobre električne provodnosti i dobrih mehaničkih svojstava koristi za izradu nadzemnih vodova. Visoka električna provodnost je ključna za prijenost na velike udaljenosti zbog smanjenih gubitaka kao i dobra mehanička čvrstoća koja omogućava savitljivost prilikom mehaničkih naprezanja. Aldrey se uglavnom sastoji od aluminija uz dodatke drugih elemenata kao što su magnezij (Mg), silicij (Si), bakar (Cu) i željezo (Fe). Ovi elementi poboljšavaju mehanička svojstva legure bez značajnog smanjenja električne vodljivosti. U usporedbi s bakrom aldrey je puno lakši i cijena mu je niža [15].



Slika 17. Vodič od Aldrey-a

Izvor: <https://mc-machine.en.made-in-china.com/product/jZPGTfugxcN/China-All-Aluminum-Alloy-Conductor-Aldrey-Conductor-AAAC.html>

3.6. OSTALI METALI

3.6.1. Srebro

Srebro (Ag) je plemeniti metal koji ima najveću toplinsku i električnu vodljivost, visoku rastezljivost, a također ne oksidira. Koristi se za slitine gdje su potrebna dobra električna i magnetska svojstva. Zbog toga što je srebro mekano dodaje mu se bakar kako bi postigli leguru veće mehaničke čvrstoće i velike električne vodljivosti. Zbog toga što ne oksidira srebro se koristi u izradi električnih kontakata gdje se koristi legura sa kadmijem i volframom kako bi postigli termičku stabilnost na višim temperaturama. Još se koristi i za izradu fotokatoda, rastalnih osigurača, u kondenzatorima itd. [11].

Tablica 9. Osnovna svojstva srebra

Osnovna svojstva srebra	
Električna vodljivost	60.6 Sm/mm ²
Toplinska vodljivost	429 W/mK
Temperaturni koeficijent otpora	3.8·10 ⁻³ / K
Temperaturni koeficijent istežanja	18·10 ⁻⁶ / K

Izvor: http://ss-tehnicka-zupanja.skole.hr/upload/ss-tehnicka-zupanja/images/static3/1013/attachment/EMIK_i_MUE_-_skripta.pdf



Slika 18. Primjena srebra

Izvor: *Primjeri korištenja srebra*, http://ss-tehnicka-zupanja.skole.hr/upload/ss-tehnicka-zupanja/images/static3/1013/attachment/EMIK_i_MUE_-_skripta.pdf

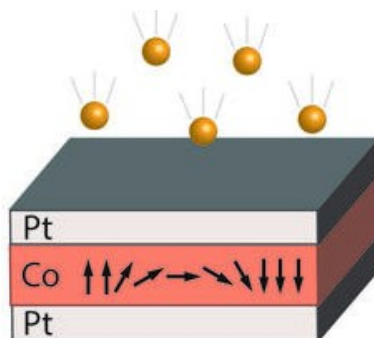
3.6.2. Platina

Platina (Pt) je plemeniti metal koji ima veliku primjenu u elektrotehnici unatoč svojoj visokoj cijeni. Lako se obrađuje te ima vrlo kvalitetna svojstva kao što je otpornost na lužine, kiseline, sumprone atmosfere, otporan na oksidaciju. Platina i platinski metali se koriste kao površinska zaštita drugim metalima čime će se povećati mehanička i kemijska svojstva npr. pri izradi električnih kontakata, a također ima veliku električnu provodnost. Još se koristi i pri izradi termoparova, elektroda, permanentnih magneta itd. [11].

Tablica 10. Osnovna tehnološka svojstva platine

Osnovna tehnološka svojstva platine	
Električna vodljivost	9.09 Sm/mm ²
Toplinska vodljivost	71.6 W/mK
Temperaturni koef. otpora	3.1 · 10 ⁻³ / K
Specifična masa	21.45 kg/dm ³

Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/platina>



Slika 19. Pt-Co magnet

Izvor: <https://www.nist.gov/news-events/news/2017/09/researchers-find-new-way-manipulate-magnetism>

3.6.3. Zlato

Zlato (Au) je plemeniti metal sjajno žute boje, vrlo dobar vodič električne struje osim srebra, bakra i aluminija, a ujedno je vrlo mekan i rastezljivi metal. Zbog toga što ne oksidira i ne korodira koristi se pri izradi električnih kontakata, fotootpornika itd. Zbog svoje visoke cijene zlato se koristi za prevlačenje kontaktnih točaka na tiskanim pločicama i mikročipovima kako bi se osigurala dobra povezanost između spojeva komponenti [11].

Tablica 11. Osnovna tehnološka svojstva zlata

Osnovna tehnološka svojstva zlata	
Specifična masa	19.3 kg/dm ³
Talište	1064.18 °C
Električna provodnost	43.478 Sm/mm ²
Toplinska vodljivost	318 W/mK
Temperaturni koef. otpora	4·10 ⁻³ / K

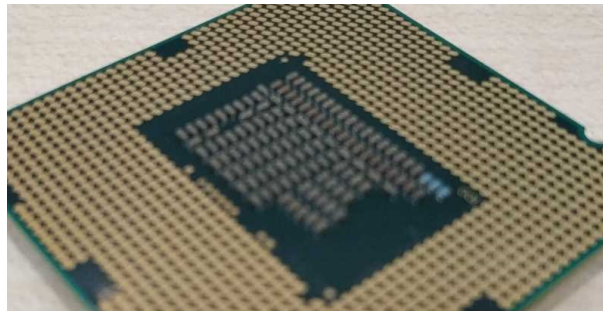
Izvor: http://ss-tehnicka-zupanja.skole.hr/upload/ss-tehnicka-zupanja/images/static3/1013/attachment/EMIK_i_MUE_-_skripta.pdf

Zato što je čisto zlato previše mekano za većinu praktičnih primjena, često se kombinira s drugim metalima kao što su srebro i bakar da bi se poboljšale njegove karakteristike. Sadržaj zlata u tim legurama mjeri se u karatima [11].



Slika 20. Fotootpornik

Izvor: *Fotootpornik*, <https://edutorij.carnet.hr/materijali/3777879>



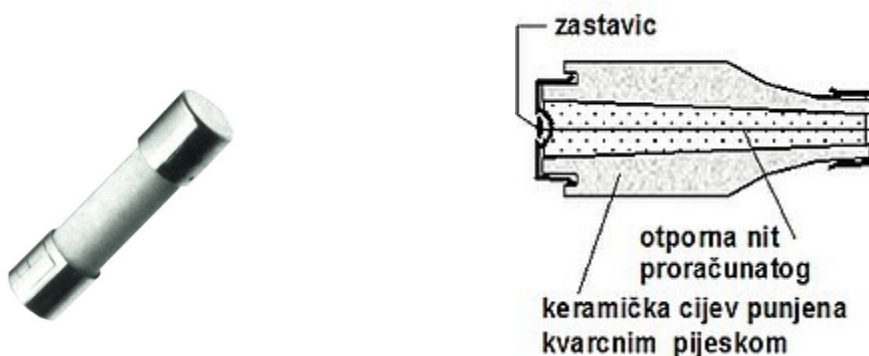
Slika 21. Pozlaćena kontaktna površina procesora

Izvor: *CPU kontakti*, <https://mostarski.info/zlato-u-elektronici/>

4. PRIMJENE MATERIJALA S VISOKOM PROVODNOŠĆU

4.1. RASTALNI OSIGURAČI

Rastalni osigurači su zaštitni uređaji koji se koriste za zaštitu sustava od preopterećenja kratkog spoja. Njihova uloga je prekinuti strujni krug prilikom povećanja električne struje iznad prihvatljive granice te da tako spriječi štetu uređaja i sustava. Rastalni osigurači u sebi sadrže tanku žicu vodljivog materijala (rastalna nit) s niskom točkom topljenja. Ta rastalna nit izgara prilikom prolaska prevelike struje i strujni krug se prekida. Razlikujemo brze koji instantno prekidaju strujni krug i spore (aluminijske) koji imaju kašnjenje pri prekidanju za npr. zaštitu uređaja s viskom početnom strujom kao što su elektromotori [9].



Slika 22. Rastalni osigurač i osigurač ispunjen kvarcnim pijeskom

Izvor: <https://probe.hr/proizvod/pribor-za-el-alate/rezervni-dijelovi/rastalni-osigurac-4a-macc/>

Odabir pravog materijala za izradu rastalnog osigurača je ključno za njegovu efikasnost i pouzdanost u zaštiti kruga. Iako je srebro pogodno za rad pri strujama svih iznosa osigurači od srebra se ne koriste zbog svoje previsoke cijene osim za struje ispod 5A. Za struje u iznosu 5 do 30 A koristi se osigurač izraden od slitina olova i kositra. Za velike struje se koriste slitine bakra i srebra, a za slabe od platine (do 10 mA). Osigurači koji se koriste za visoke struje koriste punjenje kako bi lakše ugasil električni luk koji nastaje kada se žica rastali. Koristi se npr. kvarcni pijesak koji ima dobro svojstvo brzog gašenja električnog luka i disipacije nastale topline. Primjer takvog osigurača je osigurač s rastalnom niti od cinka. Za kućište osigurača koristi se staklo ili plastika, a srebro ili mjed za kontakt.

4.2. ELEKTRIČNI KONTAKTI

Električni kontakti omogućuju prekidanje i ponovno uspostavljanje protoka struje te u prekidačima i relejima omogućavaju promjenu toka struje između različitih vodova. Pri velikim temperaturama može doći do zavarivanja kontakata, a njihov rad je ugrožen korozijom i erozijom.



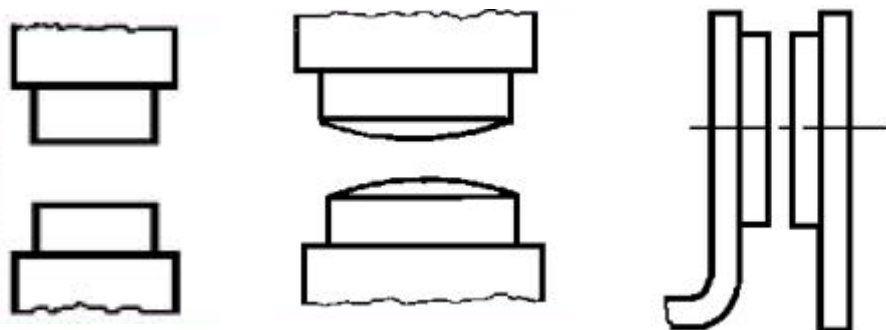
Slika 23. Vremenski relej

Izvor: *Vremenski relej*, <https://www.schrack.hr/trgovina/vremenski-relej-kasnjenje-ukl-iskl-24-240vac-dc-1-c-o-8a-zr5er011.html>

Kontakti kod malih opterećenja (struje do 1 A) rade bez pojave električnog luka što znači da će biti manje udarne struje i kontakti će biti manje izloženi trošenju. Koriste se u vremenskim relejima, mjernim preklopnocima, u instrumentima itd. Vremenski releji služe za podešavanje vremena isključivanja i uključivanja različitih uređaja, a mogu imati kašnjenje pri uključivanju i isključivanju. Za izradu ovakvih kontakata potrebna je postojana podloga pa se koriste materijali kao što su platina, paladij srebro, zlato. No zbog njihove visoke cijene samo će se vrh kontakta izraditi od plemenitog metala, dok je struktura napravljena od jeftinijeg materijala kao što je bakar. Legurama plemenitih metala možemo povećati mehanička svojstva, otpornost na teške atmosferske uvjete ili povećati preciznost mjerenja (legurom zlata i platine).

Kod srednjih opterećenja (struje do 20 A) dolazi do stvaranja električnog luka, većeg trošenja kontakta i povećane temperature. Ako želimo smanjiti utjecaj električnog luka pri većim opterećenjima možemo na vrh kontakta zavariti volframovu pločicu zbog njezine otpornosti pri stvaranju električnog luka. Za manja opterećenja koriste se kontakti od srebra, srebra i kadmija, srebra i nikla itd. Srebro se koristi i za telefonske i telegrafске releje no nije dobar u atmosferama koje sadrže sumpor [9].

Za velika opterećenja (struje iznad 20 A) kontakti se izrađuju s većim dodirnim površinama kako bi olakšali odvod nastale topline. Zbog rada na izuzetno velikim snagama dolazi do zagrijavanja i zbog toga oni moraju biti izrađeni od tvrdih materijala kako ne bi došlo do zavarivanja kontakata. Primjeri takvih metala su bakar i srebro te njihove legure ili u kombinaciji sa strukturom od bakra i kontaktom od srebra [10].

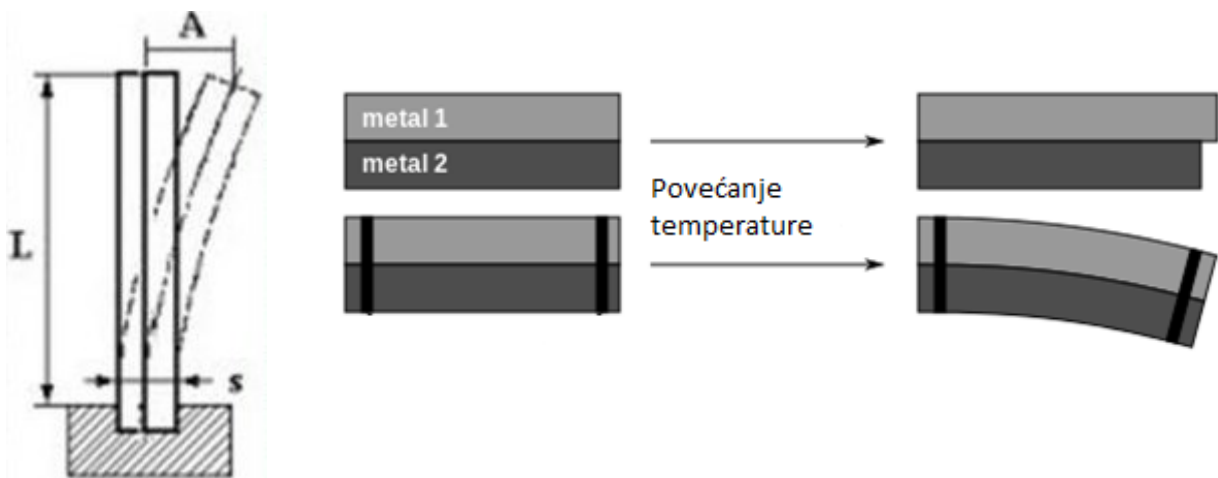


Slika 24. Kontakti za mala, srednja i velika opterećenja

Izvor: <https://www.slideserve.com/zacharee/vodljivi-materijali-neke-primjene-i-supravodljivost>

4.3. TERMOBIMETALI

Termobimetal su dva spojena metala sa različitim temperaturnim koeficijentima rastezljivosti. Bimetali rade na principu razlike u termičkoj ekspanziji između dva metala. Pri promjeni temperature metali se šire ili skupljaju zbog svojih specifičnih termičkih koeficijenata. To izaziva savijanje trake jer se jedan metal skuplja više od drugoga, a savijanje ovisi o tome koji metal ima veći koeficijent [9].



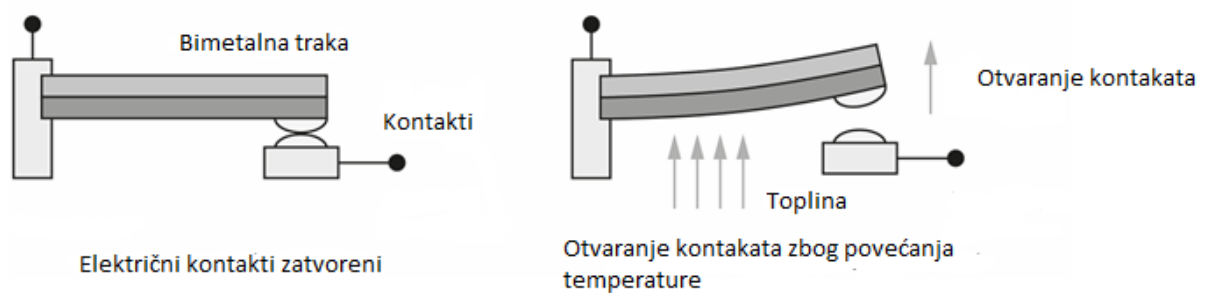
Slika 25. Termobimetal

Izvor: <https://materiability.com/portfolio/thermobimetals/> i <https://www.slideserve.com/zacharee/vodljivi-materijali-neke-primjene-i-supravodljivost>

Dva najčešća metala su invar (legura čelika i nikla) i mesing ili čelik i bakar. Invar ima mali temperaturni koeficijent ($1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) te se on većinu vremena koristi za jednu stranu bimetalne trake.

Koriste se za mjerenje i regulaciju temperature, u automatskim osiguračima kao nadstrujna zaštita, kod startera za fluorescentu rasvjetu itd. Npr. u električnim prekidačima kada struja prolazi kroz bimetal stvara toplinu i kad temperatura dostigne određenu vrijednost, metal se savija i aktivira ili deaktivira kontakt. Tako on prekida strujni krug ako struja postane prevelika i štiti ga od preopterećenja.

Bimetalni se koriste zbog svoje jednostavne izrade i pouzdanosti, a nije im potrebna električna energija za rad.

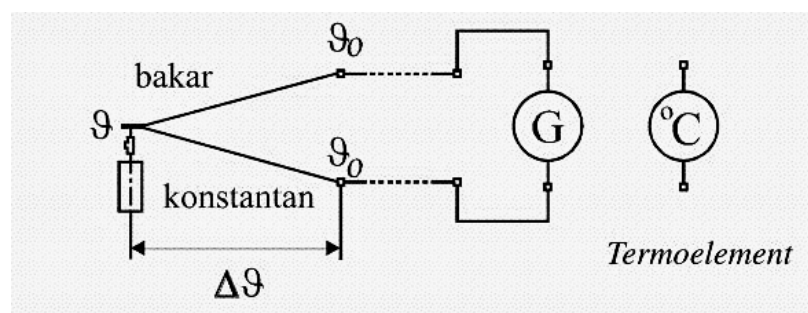


Slika 26. Termobimetal u prekidačima

Izvor: *Termobimetal*, <https://materiability.com/portfolio/thermobimetals/>

4.4. TERMOELEMENTI

Termoelement odnosno termopar je uređaj koji služi za mjerenje temperature do 1500 °C. Princip rada bazira se na Seebeckovu efektu koji opisuje generiranje električnog napona u krugu sastavljenom od dva različita metala ili legure kada se njihovi spojni krajevi nalaze na različitim temperaturama. Kada su dva različita metala spojena na dva mjesta i ta se mjesta nalaze na različitim temperaturama dolazi do stvaranja elektromotorne sile između spojeva. Jedan spoj se naziva vrući spoj (mjerni) i nalazi se na mjernom mjestu, a drugi spoj se naziva hladni (referentni) i nalazi se na poznatoj referentnoj temperaturi. Kada se vrući spoj zagrije ili ohladi razlika u temperaturama između referentnog i mjernog spoja stvara napon koji je proporcionalan razlici u temperaturama: $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$. Svaki termoelement ima karakterističnu linearnu krivulju preko koje ovaj napon pretvaramo u temperaturu, a dolazi do stvaranja nelinearnosti uslijed nečistoća [16].



Slika 27. Termoelement i simbol termoelementa

Izvor: <https://www.slideserve.com/zacharee/vodljivi-materijali-neke-primjene-i-supravodljivost>

Radna temperatura do koje termoelement pravilno radi određena je talištem materijala od kojeg je izrađen i otpornosti materijala na oksidaciju i utjecaj okoline.

Tablica 12. Najčešće kombinacije materijala za izradu termoelemenata

Materijali	Kemijska oznaka	Radna temperatura do [°C]
Bakar- konstantan	Cu - konst.	350
Željezo - konstantan	Fe – konst.	700
Nikalkrom - konstantan	NiCr – konst.	800
Nikalkrom - nikal	NiCr – Ni	1200
Platinarodij - platina	PtRh – Pt	1600

Izvor: I. Kuzmanić, R. Vlašić, I. Vujović, *Elektrotehnički materijali*, Visoka pomorska škola u Splitu, Split, 2001

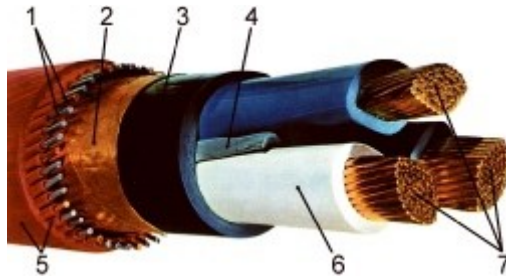


Slika 28. Termoelement

Izvor: <https://thomgas.hr/wp-content/uploads/2021/04/Page-5-Image-35-1-e1644233948209.jpg>

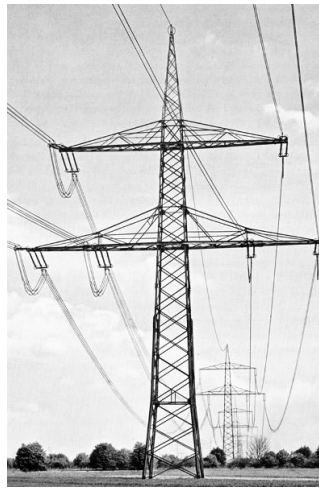
4.5. ENERGETSKI VODOVI

Energetski vodovi se izrađuju isključivo od bakra ili aluminijske (iako aluminij češće zbog manje cijene). Služe za prijenos električne energije na različite udaljenosti unutar mreže. Mogu biti nadzemni ili podzemni vodovi, a prema izvedbi dijele se na jednožilne ili višezilne. Jednožilne bi koristili ako nam je potrebna veća sigurnost od npr. kratkih spojeva ili električnih udara.



Slika 29. Električni vodovi - podzemni strujni kabel

Izvor: <https://proleksis.lzmk.hr/959/>



Slika 30. Nadzemni ili zračni vod

Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektricni-energetski-vod>

Najčešće izvedbe dalekovoda su od aluminij-čelika (Alučel) u kojem aluminijski plašt služi kao vodič struje. Jezgra je izrađena od čelika i preuzima mehanička naprezanja nastalna uslijed gibanja vodova. Za izradu vodova često se koristi i Aldrey.

Pri izboru materijala za izradu vodova treba uzeti u obzir jakost struje i specifičnu vodljivost materijala, utjecaj okoline zbog npr. zraka, vode, sumpora i ostalih agresivnih sredina. Treba uzeti u obzir i radne uvjete kao što su jaki vjetrovi koji će dovesti do mehaničkih naprezanja i deformacija. Vodovi izrađeni od aluminija moraju imati 1,6 puta veći presjek naspram bakrenog, ali zbog toga što je aluminij jeftiniji doći će do znatne uštede [17].

4.5.1. Skin effect

Skin effect se javlja kada izmjenična struja teče samo po površini vodiča umjesto da teče ravnomjerno kroz cijeli vodič. Utjecaj skin effecta je još veći na višim frekvencijama i protok struje je koncentriran u vrlo tankom sloju na površini vodiča. Taj sloj zove se dubina prodora (skin depth) i smanjuje se porastom frekvencije i ovisi o svojstvima materijala od kojeg je vodič izrađen. Izračunava se pomoću formule:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

Gdje je:

δ = dubina prodora (m)

ρ = električna otpornost materijala vodiča (Ωm)

ω = kutna frekvencija struje (rad/s)

μ = magnetska permeabilnost materijala (H/m)



Slika 31. Skin effect za: DC, niske frekvencije AC i visoke frekvencije AC

Izvor: *Skin effect*, <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-3/more-on-the-skin-effect/>

Kada izmjenična struja teče kroz vodič dolazi do stvaranja magnetskog polja oko tog vodiča i prema Faradayevom zakonu to promjenjivo magnetsko polje inducira električnu struju unutar vodiča.

Prema Lenzovom pravilu ta struja se suprotstavlja struji koja ga je uzrokovala te dolazi do pojave dodatnog otpora unutar vodiča koji nije jednak u cijelom presjeku vodiča nego je veći bliže središtu.

Na prijenosnim vodovima taj povećani otpor uzrokuje dodatne gubitke uslijed Juelove gubitaka, povećava pad napona i povećava magnetske interferencije s drugim uređajima što smanjuje pouzdanost sustava [18].

Utjecaj skin effecta možemo smanjiti korištenjem Litz žica koja se sastoji od mnogo tankih izoliranih vodiča koje su dovoljno tanke tako da struje teče kroz cijeli presjek ili upotrebom šupljih vodiča (hollow tubes). Bitan je i odabir materijala za vodič tako da materijali sa visokom magnetskom permeabilnošću što uzrokuje samnjenje induciranoog otpora unutar vodiča. Odabiremo materijale kao što su bakar ili aluminij jer imaju manji utjecaj skin effecta naspram materijala kao što je željezo, a možemo ga smanjiti i smanjenjem frekvencije [19].



Slika 32. Vodič izrađen od šupljih cijevi

Izvor: *High power inductors formed from hollow tubes*, <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-3/more-on-the-skin-effect/>

5. ZAKLJUČAK

Kod odabira i upotrebe materijala za električne i elektroničke uređaje, moramo razumjeti svojstvo električne vodljivosti, te kako se to svojstvo može mijenjati. Odabir materijala za električne komponente ovisi o specifičnoj upotrebi kako bi se postigla najbolja učinkovitost i sigurnost. Odabir materijala moramo prilagoditi okolini u kojoj će raditi. Npr. materijali koji su izloženi ekstremnim uvjetima kao što su povišena temperatura, vlaga itd. moraju biti otporni na koroziju, a primjer takvog materijala je aluminij. Ako je prisutna vrlo visoka temperatura ili zagrijavanje sustava koristit ćemo materijale s dobrim toplinskim vodljivostima kao što su aluminij ili bakar kako bi osigurali dobru disipaciju topline. S obzirom na upotrebu materijali poput bakra i aluminija imaju visoku električnu provodnost i nisku otpornost te ih biramo pri izradi električnih uređaja kako bi osigurali minimalne gubitke. Za izgradnju generatora i električnih motora gdje vodiči moraju izdržati mehanička opterećenja i dinamičke sile koristit ćemo materijale koji će omogućiti visoku mehaničku čvrstoću i savitljivost. Ako usporedimo dva materijala kao što su bakar i aluminij, električna provodnost aluminija je 1,6 puta manja od bakra, ali je zato i 3,5 puta lakši naspram bakra. Aluminij je manje čvrstoće od bakra i njegova električna provodnost manje ovisi o stupnju tvrdoće. Bakar je dvostruko skuplji od aluminija. Razumijevanje ovih svojstava ključno je za izgradnju pouzdanih i sigurnih električnih sistema koji omogućuju maksimalne performanse i dugotrajnost.

LITERATURA

- [1] Tomac, N. 2010, *Tehnički materijali i obrada*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet u Rijeci, Rijeka
- [2] *Uvod u poluvodiče*, online:
https://www.pmf.unizg.hr/download/repository/materijali_poluvodici.pdf (27.4.2024.)
- [3] Matešić, LJ. 2008, *Osnove elektrotehnike I*, Sveučilište u Splitu, Studij elektronike i elektroenergetike, Split
- [4] Jerković, Lj. 14.11.2022. *Električna struja*, online:
<https://www.slideshare.net/slideshow/elektrinastrujapptx/254190628#6> (27.4.2024.)
- [5] Galović, S., Srdelić M., Fizika 2, *Električni otpor*, online: https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7571_Elektricni_otpor.html (29.4.2024.)
- [6] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. *Hrvatska enciklopedija mrežno izdanje, Temperaturni koeficijent otpora*, online: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/temperaturni-koeficijent-otpota> (1.5.2024.)
- [7] Sikirica M. Zagreb 2020. *Mala škola kristalografije*, online: <https://prirodopolis.hr/e-kristalografija/index.html> (1.5.2024.)
- [8] Bakar, 2023. online: <https://miamiminingco.com/hr/2023/12/28/bakar-osnovni-metal-u-našem-svakodnevnom-životu-i-kolekcijama/> (3.5.2024.)
- [9] Kuzmanić I., Vlašić R., Vujović I., *Elektrotehnički materijali*, Visoka pomorska škola u Splitu, Split, 2001.
- [10] Fakultet Elektrotehnike i Računalstva, Zagreb 2012. *Materijali za električne proizvode, Podjela vodljivih materijala*, online: <https://www.slideserve.com/ros/materijali-za-elektrotehni-ke-proizvode> (3.5.2024.)
- [11] Rajaković, P., *Elektrotehnika*, online: http://ss-tehnicka-zupanja.skole.hr/upload/ss-tehnicka-zupanja/images/static3/1013/attachment/EMIK_i_MUE_-_skripta.pdf (6.5.2024.)
- [12] Lazić L., 2021. *Aluminij* online: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/aluminij> (6.5.2024.)

- [13] Fakultet Elektrotehnike i Računalstva, Zagreb 2012. *Materijali za električne proizvode, Aluminij*, online: <https://www.slideserve.com/blaise/materijali-za-elektrotehni-ke-proizvode> (6.5.2024.)
- [14] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. *Hrvatska enciklopedija mrežno izdanje, Silumin*, online: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/silumin> (10.5.2024.)
- [15] Ganiev N. I. 2022. *Aldrey*, online: https://www.researchgate.net/publication/365631244_E-ALMgSi_Aldrey_aluminum_conductive_alloy_with_the_solid_state_cadmium_oxidation_kinetics (15.5.2024.)
- [16] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. *Hrvatska enciklopedija mrežno izdanje, Termoelement*, online: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/termoelement> (18.5.2024.)
- [17] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. *Hrvatska enciklopedija mrežno izdanje, Električni energetske vodovi*, online: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektricni-energetski-vod> (21.5.2024.)
- [18] Kuphaldt Tony R., *All About Circuits, Skin effect*, online: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-3/more-on-the-skin-effect/> (1.6.2024.)
- [19] *Electrical technology*, online: <https://www.electricaltechnology.org/2022/10/skin-effect.html> (1.6.2024.)

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti električnih otpornosti, kao i provodnosti za različite materijale.....	5
Tablica 2. Električne otpornosti različitih materijala.....	7
Tablica 3. Temperaturni koeficijenti otpora različitih metala.....	8
Tablica 4. Električna provodnost metala na 20 °C.....	9
Tablica 5. Osnovna svojstva bakra.....	12
Tablica 6. Osnovna tehnološka svojstva mjedi.....	15
Tablica 7. Osnovna tehnološka svojstva bronce.....	16
Tablica 8. Osnovna tehnološka svojstva aluminiija.....	17
Tablica 9. Osnovna tehnološka svojstva srebra.....	21
Tablica 11. Osnovna tehnološka svojstva platine.....	22
Tablica 11. Osnovna tehnološka svojstva zlata.....	23
Tablica 12. Najčešće kombinacije materijala za izradu termoelemenata.....	29

POPIS GRAFIKONA

Slika 1. Metalna veza.....	2
Slika 2. Shematski prikaz FCC rešetke, prostorni raspored atoma i u kristalu.....	2
Slika 3. Struktura energetskih vrpca.....	3
Slika 4. Količina naboja kroz vodič.....	4
Slika 5. Kristalna rešetka.....	6
Slika 6. Kretanje elektrona kroz idealan kristal naspram zagrijanog kristala.....	8
Slika 7. Kristalna struktura bakra.....	11
Slika 8. Položaj bakra u periodnom sustavu.....	11
Slika 9. Grumen bakra.....	12
Slika 10. Stator elektromotora sa bakrenim žicama.....	13
Slika 11. Zavisnost električne otpornosti bakra o temperaturi.....	13
Slika 12. Utjecaj primjesa na otpornost bakra.....	14
Slika 13. Primjena mjeda u elektrotehnici.....	15
Slika 14. Proizvod od bronce.....	17
Slika 15. Aluminijski transformator.....	18
Slika 16. Utjecaj primjesa na električnu provodnost aluminija.....	19
Slika 17. Vodič od Aldrey-a.....	20
Slika 18. Primjena srebra.....	21
Slika 19. Pt-Co magnet.....	22
Slika 20. Fotootpornik.....	23
Slika 21. Pozlaćena kontaktna površina procesora.....	24
Slika 22. Rastalni osigurač i osigurač ispunjen kvarcnim pijeskom.....	24

Slika 23. Vremenski relej.....	25
Slika 24. Kontakti za mala, srednja i velika opterećenja.....	26
Slika 25. Termobimetal.....	27
Slika 26. Termobimetal u prekidačima.....	28
Slika 27. Termoelement i simbol termoelementa.....	28
Slika 28. Termoelement.....	29
Slika 29. Električni vodovi - podzemni strujni kabel.....	30
Slika 30. Nadzemni ili zračni vod.....	30
Slika 31. Skin effect.....	31
Slika 32. Vodič izrađen od šupljih cijevi.....	32