

Jakov Labor

FIZIKA 2

UDŽBENIK ZA **DRUGI RAZRED SREDNJIH ŠKOLA**
S DVOGODIŠNJIM PROGRAMOM FIZIKE



5. izdanje
Zagreb, 2024.

Nakladnik
Alfa d.d.
Zagreb, Nova Ves 23a

Za nakladnika
Ivan Petric

Urednik
dr. sc. Dragan Roša

Recenzenti
prof. dr. sc. Ivica Orlić
mr. sc. Olivera Pionić, prof. mentor

Likovna urednica
Irena Lenard

Likovno i grafičko oblikovanje
Darija Vuković

Prijelom
Natalija Mišić

Lektorica i korektorica
Kristina Ferenčina

© **Alfa d.d. Zagreb, 2024.**

Nijedan dio ove knjige ne smije se umnožavati,
fotokopirati ni na bilo koji način reproducirati
bez nakladnikova pismenog dopuštenja.

Udžbenik je uvršten u Katalog odobrenih udžbenika
rješenjem Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske:
KLASA: UP/1-602-09/14-01/00029
URBROJ: 533-26-14-0002, od 15. svibnja 2014.

CIP zapis dostupan u računalnome katalogu Nacionalne i
sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001212578.

Tisak
Denona

Jakov Labor

FIZIKA 2

UDŽBENIK ZA **DRUGI RAZRED SREDNJIH ŠKOLA**
S DVOGODIŠNJIM PROGRAMOM FIZIKE

Sadržaj

ELEKTRODINAMIKA

| | |
|---|----|
| Gibanje naboja u električnom polju | 8 |
| Električna struja | 11 |
| Ohmov zakon | 14 |
| Električni otpor | 16 |
| Rad i snaga električne struje | 19 |
| Strujni krug | 21 |
| Spajanje otpornika | 25 |
| Električni mjerni instrumenti | 29 |
| Magnetska sila na vodič kojim teče struja | 32 |
| Magnetska sila na nabijenu česticu | 35 |
| Magnetsko polje električne struje | 39 |
| Djelovanje struje na struju | 42 |
| Elektromagnetska indukcija | 44 |
| Međuindukcija i samoindukcija | 49 |
| <i>Energija magnetskog polja</i> | 52 |
| Izmjenična struja | 54 |
| <i>Transformator</i> | 58 |

MEHANIČKO TITRANJE I VALOVI

| | |
|-------------------------------------|----|
| Harmonijsko titranje | 62 |
| Matematičko njihalo | 67 |
| Prigušeno i prisilno titranje | 70 |
| Valno gibanje. Brzina vala | 73 |
| Valovi zvuka. Ultrazvuk | 77 |
| Refleksija valova. Stojni val | 81 |

ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

| | |
|--|----|
| Elektromagnetski titraji | 86 |
| Elektromagnetski val | 90 |
| Spektar elektromagnetskih valova | 94 |

OPTIKA I OPTIČKI SUSTAVI

| | |
|---|-----|
| Širenje i odbijanje (refleksija) svjetlosti | 100 |
| Sferna zrcala | 103 |
| Lom (refrakcija) svjetlosti | 110 |
| Leće | 114 |
| Disperzija svjetlosti | 120 |
| Optički sustavi | 124 |
| Interferencija i ogib svjetlosti | 129 |

ATOMI I KVANTI

| | |
|--|-----|
| Čestična svojstva elektromagnetskog zračenja | 136 |
| Valno-čestična svojstva elektromagnetskog zračenja i tvari | 142 |
| Thomsonov modela atoma | 144 |
| Rutherfordov i Bohrov model atoma | 148 |
| Kvantno-fizički model atoma | 152 |

ATOMSKA JEZGRA

| | |
|--|-----|
| Struktura atomske jezgre | 158 |
| Radioaktivnost | 161 |
| Zakon radioaktivnog raspadanja | 165 |
| Energija vezanja jezgre. Fisija i fuzija | 169 |

Predgovor

Ovaj je udžbenik napisan prema nastavnom programu fizike za srednje škole u kojima se fizika uči dvije godine. Programom je predviđena obrada sljedećih nastavnih cjelina:

1. Elektrodinamika
2. Mehaničko titranje i valovi
3. Elektromagnetsko zračenje
4. Optika i optički sustavi
5. Atomi i kvanti
6. Atomska jezgra.

Elektrodinamika je grana fizike koja istražuje gibanje električki nabijenih čestica i njihovo uzajamno djelovanje. Na gibanje električki nabijenih čestica utječu električno i magnetsko polje.

Pri **mehaničkom** se **titranju** tijelo giba po istoj putanji oko ravnotežnog položaja. Širenjem raznih oblika poremećaja, uključujući i titranje, nastaje **val**.

U elektromagnetskim sustavima titraju električno i magnetsko polje, što nazivamo elektromagnetskim titranjem. Prenošenjem titranja električnog i magnetskog polja nastaje **elektromagnetski val**. Svjetlost je dio spektra elektromagnetskih valova.

Optika je grana fizike koja proučava svjetlost. Valna optika razmatra pojave svojstvene svjetlosti kao valu, a geometrijska opisuje širenje, odbijanje i lom svjetlosti, pri čemu valove svjetlosti prikazuje zrakama ne ulazeći u njihovu prirodu. Zakonima geometrijske optike može se rastumačiti rad različitih **optičkih sustava** (uređaja).

Neka opažanja u vezi s elektromagnetskim zračenjem objašnjavamo pretpostavkom da je elektromagnetsko zračenje val. Međutim, opažaju se i pojave koje se ne mogu objasniti valnim svojstvima. Radi njihova tumačenja, elektromagnetsko zračenje zamišljamo kao roj čestica, tzv. **kvanata** energije.

Građu **atoma** ne možemo neposredno vidjeti. O izgledu i ustroju atoma zaključujemo na temelju promatranja i analiziranja različitih pojava. Zamišljen izgled i ustroj atoma nazivamo modelom atoma. Model je onoliko dobar koliko se dobro njime mogu objasniti rezultati pokusa.

Gotovo sva masa atoma sadržana je u njegovoj (**atomske**) jezgri, koja zauzima vrlo mali dio atoma. Ona se sastoji od pozitivno nabijenih protona i električki neutralnih neutrona.

Nastavno je gradivo u udžbeniku raščlanjeno na nastavne jedinice i sažeto izloženo na učenicima pristupačan način. Prošireni i izborni sadržaji tiskani su *kosim slovima*.

Unutar nastavnih jedinica nalaze se i riješeni primjeri te pitanja i zadatci iz izloženoga gradiva. Zamišljeno je da učenicima posluže kao domaća zadaća koju nastavnik pregledava na početku nastavnog sata. Odgovarajući samostalno na ponuđena pitanja, učenici mogu provjeriti koliko su obrađeno gradivo usvojili i razumjeli. Odgovori na pitanja nisu navedeni u udžbeniku, ali su sadržani u tekstu, pa time potiču učenike na pažljivije čitanje udžbenika. Rjeđa su pitanja koja zahtijevaju malo više razinu znanja i u tekstu nemaju izravnog odgovora. Imaju li poteškoća s takvim pitanjima, učenici mogu zatražiti pomoć nastavnika.

Na kraju udžbenika nalaze se rješenja zadataka kako bi učenici mogli provjeriti ispravnost vlastitih rješenja.

Autor



ELEKTRODINAMIKA

| | |
|---|----|
| Gibanje naboja u električnom polju | 8 |
| Električna struja | 11 |
| Ohmov zakon | 14 |
| Električni otpor | 16 |
| Rad i snaga električne struje | 19 |
| Strujni krug | 21 |
| Spajanje otpornika | 25 |
| Električni mjerni instrumenti | 29 |
| Magnetska sila na vodič kojim teče struja | 32 |
| Magnetska sila na nabijenu česticu | 35 |
| Magnetsko polje električne struje | 39 |
| Djelovanje struje na struju | 42 |
| Elektromagnetska indukcija | 44 |
| Međuindukcija i samoindukcija | 49 |
| <i>Energija magnetskog polja</i> | 52 |
| Izmjenična struja | 54 |
| <i>Transformator</i> | 58 |

Gibanje naboja u električnom polju

Električno polje djeluje na nabijenu česticu (ili kraće, naboj) silom:

$$F = QE,$$

gdje je Q naboj, a E jakost električnog polja. Radi li se o pozitivno nabijenoj čestici, sila djeluje u smjeru silnica, dok je sila na česticu negativnog naboja (elektron) suprotna smjeru silnica. Pod utjecajem sile čestica dobiva akceleraciju (a), pri čemu je:

$$F = ma,$$

gdje je m masa čestice. Iz navedenih jednažbi možemo izvesti izraz za akceleraciju:

$$a = \frac{QE}{m}.$$

Točke električnog polja između kojih se nabijena čestica ubrzava imaju različite potencijale, tj. između njih postoji napon. Stoga možemo reći da napon ubrzava nabijene čestice. Pritom je rad obavljen naponom jednak promjeni kinetičke energije čestice:

$$W = \Delta E_k$$

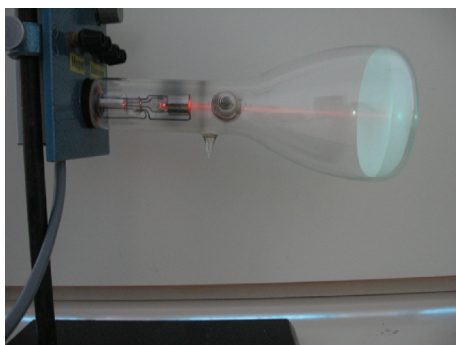
$$QU = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Ako je čestica prije ubrzavanja mirovala ($v_1 = 0$, $v_2 \rightarrow v$), vrijedi:

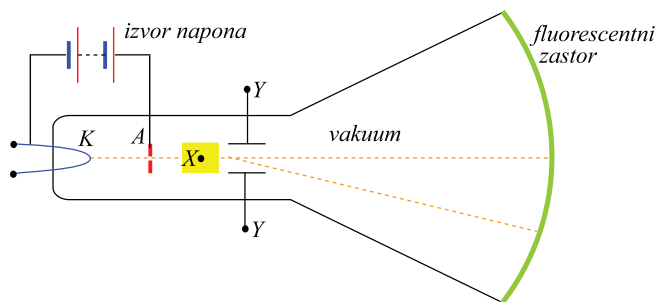
$$QU = \frac{mv^2}{2}.$$

Gibanje elektrona pod utjecajem električnog polja susrećemo u tzv. **katodnoj cijevi** koja je sastavni dio nekih elektroničnih uređaja. To je staklena cijev iz koje je isisan zrak (slika 1.1.). U cijevi je žarna nit koja se prolazom struje grije i tada emitira elektrone. Žarna je nit na negativnom polu izvora napona (slika 1.1.b) i zovemo je katodom (K). Anoda (A) priključena je na pozitivni pol i ima mali kružni otvor. Katoda i anoda dijelovi su elektronskog topa. Djelovanjem napona elektroni se gibaju ubrzano od katode prema anodi. Kada prođu kroz otvor na anodi, elektroni se gibaju jednoliko pravocrtno čineći uzak snop. Upadom na fluorescentni zastor, uski elektronski snop ostavlja točkast trag.

Dok nije bila poznata priroda pojave, elektroni što ih emitira katoda u katodnoj cijevi nazivani su **katodnim zrakama**.



a)

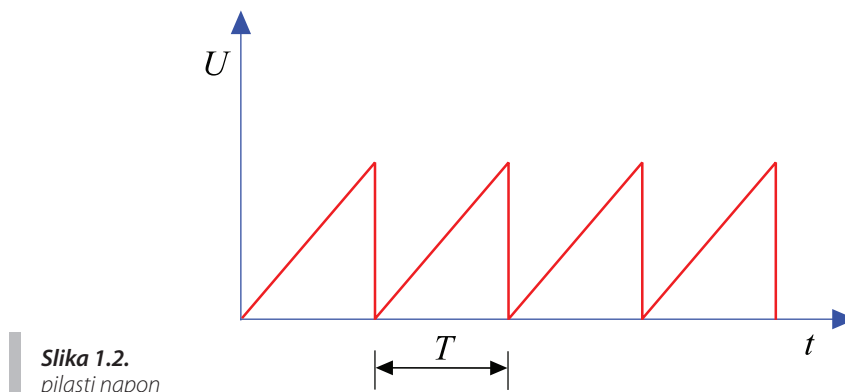


b)

Slika 1.1.
katodna cijev

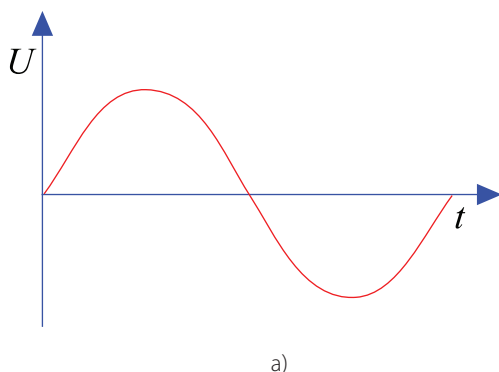
Na slici 1.1.b prikazana je katodna cijev osciloskopa. U njoj elektronski snop prolazi između dvaju parova međusobno paralelnih ploča. Ploče se mogu priključiti na napon. Jedan je par ploča u vertikalnom položaju (X-ploče) i, kada se priključe na napon, elektronski snop otklanja u horizontalnom smjeru. Drugi je par ploča (Y) horizontalan i, kad je pod naponom, otklanja snop u vertikalnom smjeru. Otklon snopa razmjernan je naponu na pločama. Priključimo li na otklonske ploče promjenjivi napon, trag elektronskog snopa na fluorescentnom zastoru slijedit će promjene napona. Kada se napon brzo mijenja, okom ne možemo pratiti uzastopne položaje točkastog traga, zbog čega na zastoru vidimo trag u obliku ravne crte.

U osciloskopu postoji izvor tzv. **pilastog napona** koji se s vremenom mijenja, kako prikazuje slika 1.2. On raste razmjerno vremenu, zatim u trenutku pada na nulu, opet raste pa pada itd. Vrijeme za koje napon naraste na maksimalnu vrijednost i padne na nulu nazivamo period pilastog napona (T). On je zapravo jednak vremenu porasta napona jer napon trenutačno pada od maksimalne vrijednosti na nulu. Pilasti napon priključen je na X-ploče. Dok on raste, elektronski se snop pomiče slijeva udesno, a trenutačnim padom napona na nulu snop se vrati u početni položaj. Kada na Y-ploče priključimo neki promjenjivi napon, elektronski će se snop pod utjecajem tog napona gibati gore-dolje i istodobno s porastom pilastog napona na X-pločama s lijeva udesno. Slika što je vidimo na zastoru prikazuje kako se napon na Y-pločama mijenja s porastom napona na X-pločama. Budući da je napon na X-pločama razmjernan vremenu (pilasti napon), na zastoru osciloskopa vidimo vremensku promjenu napona koji smo priključili na Y-ploče. Zato se pilasti napon priključen na X-ploče naziva **vremenskom bazom**.

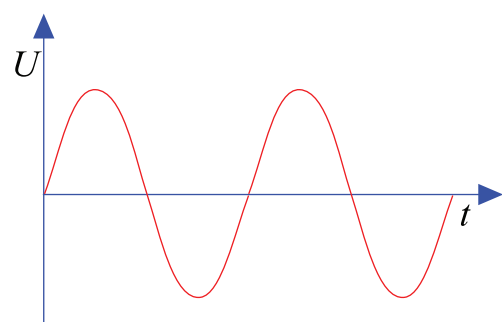


Slika 1.2.
pilasti napon

Slike 1.3.a i b prikazuju vremensku promjenu napona gradske mreže. To je izmjenični napon. On raste od nule do maksimalne vrijednosti, zatim pada na nulu pa raste u suprotnom smjeru do maksimalne negativne vrijednosti i opet se vraća na nulu. Vrijeme za koje se dogodi opisana promjena napona je period izmjeničnog napona. Na slici 1.3.a periodi su pilastog i izmjeničnog napona jednaki, a na slici 1.3.b period pilastog napona dvostruko je duži od perioda izmjeničnog napona.



a)



b)

Slika 1.3.

omjer perioda pilastog napona na horizontalnim pločama i perioda izmjeničnog napona na vertikalnim pločama osciloskopa je 1 : 1 (a) i 2 : 1 (b)

Primjer:

Elektroni se iz mirovanja ubrzavaju naponom 25 kV. Kolika im je brzina nakon ubrzavanja? Masa je elektrona $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, a naboj $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Rješenje:

$$U = 25 \text{ kV} = 25\,000 \text{ V}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$Q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$v = ?$$

$$\Delta E_k = W, \quad \frac{mv^2}{2} = eU$$

$$\frac{mv^2}{2} = eU \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 25\,000 \text{ V}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$v = 9,4 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}.$$

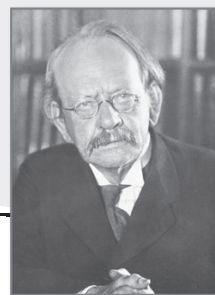
Pitanja:

1. Kako bi se iz mirovanja gibala nabijena čestica kada bi se našla u homogenom električnom polju?
2. Elektron i proton gibaju se u istom homogenom električnom polju. Usporedite iznose:
 - a) sila kojima električno polje djeluje na elektron i proton
 - b) akceleracija elektrona i protona.

Zadatci:

1. Elektron uleti u homogeno električno polje u vakuumu i giba se u smjeru silnica. Jakost polja iznosi 90 N C^{-1} .
 - a) Kolikom silom polje djeluje na elektron?
 - b) Kolika je akceleracija elektrona?
 - c) Nakon koliko će se vremena elektron zaustaviti ako je početna brzina elektrona $1\,800 \text{ km s}^{-1}$? Masa je elektrona $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.
2. Koliku razliku potencijala moramo upotrijebiti da bismo mirni elektron ubrzali do brzine $9 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$?

Joseph John Thomson (1856. – 1940.) engleski je fizičar. Proučavajući skretanje katodnih zraka u električnom i magnetskom polju, otkrio je da je riječ o česticama. One su kasnije nazvane elektronima. Istom je metodom otkrio postojanje izotopa. Dobitnik je Nobelove nagrade za fiziku 1906. godine.



osciloskop

Električna struja

Električnom strujom nazivamo usmjereno gibanje električnog naboja iste vrste. Struja može teći kroz čvrsta tijela, tekućine i plinove. U čvrstim tijelima električnu struju čini usmjereno gibanje elektrona, u tekućinama usmjereno gibanje iona, a u plinovima i elektrona i iona.

Za usmjereno gibanje električnog naboja potrebno je električno polje. U električnom se polju pozitivni naboj giba u smjeru silnica, a negativni suprotno smjeru silnica. Dogovorom je uzeto da je smjer struje u smjeru gibanja pozitivnog naboja. Prema tome, elektroni se u električnom polju gibaju suprotno dogovorenom smjeru struje.

Među čvrstim tijelima ističu se metali kao dobri vodiči električne struje. Vanjski elektroni u atomima metala slabo su vezani za atom i mogu se slobodno gibati metalom. Nazivamo ih **slobodni elektroni**. Kada nema vanjske sile, njihovo je gibanje unutar metala kaotično i slično gibanju čestica plina, stoga ih još nazivamo **elektronski plin**. Atome koji su ostali bez jednog ili više elektrona nazivamo **ionima**. Ioni su pozitivno nabijeni i unutar metala pravilno raspoređeni, a njihovo gibanje ograničeno je samo na titranje oko ravnotežnih položaja.

Jakost električne struje. Jakost električne struje (I) definiramo kao kvocijent količine naboja (Q) i vremena (t) za koje ta količina naboja prođe zamišljenom ravnom plohom okomitom na smjer gibanja naboja:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Ako se jakost struje tijekom vremena mijenja, kvocijent naboja i vremena predstavlja srednju jakost struje.

Jakost struje iskazujemo **amperima**: $A = C s^{-1}$. Amper je zapravo osnovna jedinica, a kulon je izveden iz ampera i sekunde: $C = A s$.

Jakost struje mjerimo **ampermetrom**.

U sljedećoj tablici dane su neke jakosti struje.

| | |
|---------------------------------|-------------|
| svjetlomjer | 100 μA |
| žaruljica džepne svjetiljke | oko 250 mA |
| žarulja 100 W | oko 0,45 A |
| glačalo | oko 2 A |
| tramvaj | oko 50 A |
| peći za elektrolizu aluminijske | oko 15 kA |
| munja | oko 100 kA |

Tablica 1.1. neke jakosti struje

Gustoća struje. Kvocijent jakosti električne struje i površine (S) okomite na smjer struje po kojoj je struja jednoliko raspoređena nazivamo gustoća struje (J):

$$J = \frac{I}{S}$$

Jedinica za gustoću struje jest amper po kvadratnom metru: $A m^{-2}$.

Na slici 1.4.a pojednostavljeno je prikazan dio vodiča duljine l . Između krajeva vodiča postoji napon ($U = \varphi_2 - \varphi_1$), odnosno električno polje jakosti:

$$E = \frac{U}{l}.$$

Prije negoli između krajeva vodiča uspostavimo napon, slobodni se elektroni gibaju kaotično.

Srednja brzina kaotičnoga gibanja slobodnih elektrona jednaka je u svim smjerovima. Uspostavljanjem napona između krajeva vodiča, srednja brzina gibanja slobodnih elektrona od jednog njegovoga kraja prema drugom postaje veća nego u drugim smjerovima. Gibanje slobodnih elektrona uspostavljanjem napona postaje usmjereno.

Promatramo dio slobodnih elektrona predločen tamnim točkama na slici 1.4.a. Prvi elektroni iz toga dijela upravo prolaze presjekom vodiča (S). Obilježimo li s t vrijeme za koje će svi promatrani elektroni proći tim presjekom, a s \bar{v} srednju brzinu usmjerenoga gibanja slobodnih elektrona, tada je put što ga za vrijeme t prijeđe svaki elektron $\bar{v}t$. Slobodni elektroni koji su za vrijeme t prošli presjekom S nalaze se u unutar obujma $S\bar{v}t$ (slika 1.4.b).

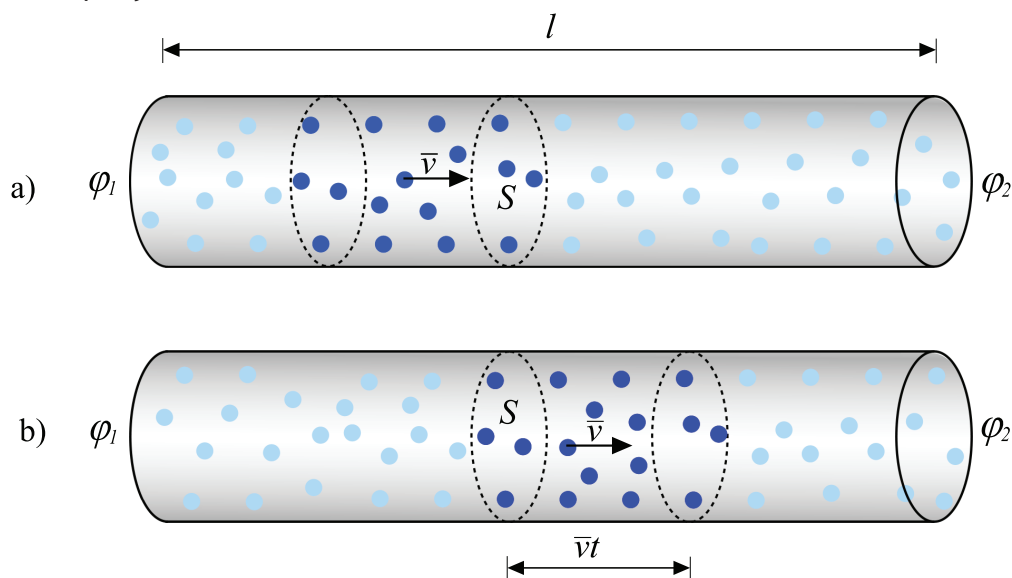
Neka je n broj slobodnih elektrona u jedinici obujma (**gustoća slobodnih elektrona** ili **brojnosna koncentracija**), tada je broj slobodnih elektrona u obujmu $S\bar{v}t$ jednak umnošku $nS\bar{v}t$. Kako svaki elektron ima naboj e , u promatranom se obujmu nalazi količina naboja $enS\bar{v}t$. Budući da je ta količina naboja prošla presjekom vodiča za vrijeme t , jakost je struje:

$$I = \frac{enS\bar{v}t}{t},$$

odnosno:

$$I = enS\bar{v}.$$

Jakost struje razmjerna je gustoći slobodnih elektrona (n), srednjoj brzini njihova usmjerenoga gibanja (\bar{v}) te površini presjeka vodiča (S).



Slika 1.4. elektroni koji su za vrijeme t prošli presjekom vodiča S brzinom nalaze se u obujmu $S\bar{v}t$

Posljednji izraz vrijedi za usmjereno gibanje bilo kojih nabijenih čestica. Ako je naboj svake čestice Q , a njihova brzina v , izraz za jakost struje općenito glasi:

$$I = QnSv.$$

Pitanja:

1. Što zovemo električnom strujom, a što njezinom jakošću i gustoćom?
2. Koje od navedenih gibanja možemo zvati električnom strujom?
 - a) Nasumično gibanje slobodnih elektrona.
 - b) Nasumično gibanje molekula.
 - c) Usmjereno gibanje neutrona.
 - d) Usmjereno gibanje protona.
3. Što čini električnu struju:
 - a) u metalima
 - b) u plinovima
 - c) u otopinama?
4. Kakav je smjer gibanja elektrona u odnosu na dogovoreni smjer struje?
5. Gibaju li se slobodni elektroni u metalnom vodiču kada vodič nije priključen na napon?
6. U nabijenom metalnom vodiču s mirnim nabojima nema električnog polja. Postoji li električno polje u vodiču kojim teče struja?
7. Nekim vodičem teče struja stalne jakosti. Prikažite grafički ovisnost jakosti struje o vremenu. Koju fizičku veličinu predočuje površina lika između grafa i apscisne osi?
8. U kojem od navedenih oblika možemo zapisati jedinicu za električni naboj?
 - a) A s
 - b) A/s
 - c) C s
 - d) C/s
9. Srednja brzina usmjerenog gibanja slobodnih elektrona kroz metalni vodič kojim teče struja **ne** ovisi:
 - a) o vrsti metala
 - b) o površini presjeka vodiča
 - c) o duljini vodiča
 - d) o jakosti struje.

Zadatci:

1. Koliko elektrona svake sekunde prođe presjekom vodiča kada njime teče struja jakosti 1 A?
2. Srebrnim vodičem površine presjeka $2,5 \text{ mm}^2$ teče stalna struja jakosti 5 A. Izračunajte srednju brzinu usmjerenog gibanja slobodnih elektrona ako je njihova gustoća u srebru $5,8 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$.
3. Bakrenim i srebrnim vodičem teku struje jednake gustoće. Gustoća je slobodnih elektrona u bakru $8 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$, a u srebru $5,8 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$. U kojem je vodiču srednja brzina usmjerenog gibanja slobodnih elektrona veća i koliko puta?

André Ampère (1775. – 1836.) francuski je fizičar i matematičar. Najznačajniji su njegovi pionirski radovi iz elektromagnetizma. Otkrio je da se dva vodiča kojima teku struje istog smjera privlače, a odbijaju se ako su struje suprotnih smjerova. Tim je otkrićem došao do spoznaje da su električne i magnetske pojave nerazdvojno povezane i tako udario temelje elektrodinamike. Po njemu je nazvana jedinica za jakost struje.



Ohmov zakon

Srednja brzina usmjerenoga gibanja slobodnih elektrona u vodiču razmjerna je jakosti električnog polja:

$$\bar{v} = \mu E.$$

Konstantu razmjernosti μ nazivamo **pokretljivost** slobodnih elektrona. Kako je jakost električnog polja:

$$E = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \frac{U}{l},$$

za jakost struje imamo:

$$I = neS\mu \frac{U}{l}.$$

Veličina $ne\mu \frac{S}{l}$ konstanta je za određeni vodič. Zovemo je **električna vodljivost** i obilježavamo s G :

$$G = ne\mu \frac{S}{l}.$$

Uz ovu je relaciju jakost struje:

$$I = GU.$$

Iz ovoga izraza izvodimo jedinicu za vodljivost koja je nazvana **simens** (S): $S = A V^{-1}$.

U izrazu za vodljivost, $G = ne\mu \frac{S}{l}$, umnožak $ne\mu$ svojstven je materijalu vodiča, a nazivamo ga **električna provodnost** (σ):

$$\sigma = ne\mu.$$

Veličinu obrnuto razmjernu vodljivosti nazivamo **električni otpor** (R):

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{ne\mu} \frac{l}{S}.$$

Sada je izraz za jakost struje:

$$I = \frac{U}{R},$$

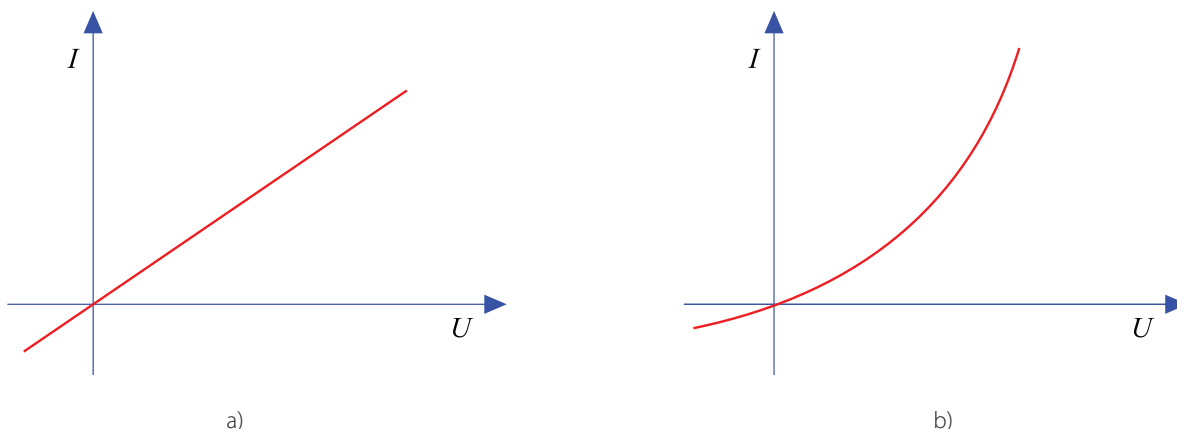
što predstavlja **Ohmov zakon**.

Prema Ohmovu zakonu, jakost struje koja teče vodičem razmjerna je naponu između krajeva vodiča, a obrnuto razmjerna otporu vodiča.

Jedinica za električni otpor jest **om** (Ω), a izvodi se iz ampera i volta prema posljednjem izrazu: $\Omega = V A^{-1}$.

Omski i neomski vodiči. Grafički prikaz ovisnosti jakosti struje o naponu nazivamo U, I -karakteristika vodiča. Ako je otpor vodiča neovisan o naponu, U, I -karakteristika dio je pravca koji prolazi ishodištem koordinatnog sustava (slika 1.5.a). Vodiče kojima vrijednost otpora ne ovisi o naponu i čija je U, I -karakteristika pravac, nazivamo **omski vodiči**.

Pokusom možemo utvrditi da se metali pri malim naponima ponašaju kao omski vodiči. Pri većim se naponima otpor metalnih vodiča mijenja promjenom napona, zbog čega U, I -karakteristika nema oblik pravca. Vodiče kod kojih se vrijednost otpora mijenja ovisno o naponu nazivamo **neomski vodiči**. Poluvodička je dioda primjer neomskog vodiča. Njezina je karakteristika prikazana na slici 1.5.b.



Slika 1.5.
 U, I -karakteristika omskih (a) i neomskih vodiča (b)

Pitanja:

1. Što je U, I -karakteristika vodiča? Kojeg je ona oblika kod omskih vodiča?
2. Napon između krajeva nekog omskog vodiča udvostručimo. Hoće li se električni otpor vodiča pritom promijeniti? Hoće li se jakost struje kroz vodič povećati ili smanjiti i koliko puta?

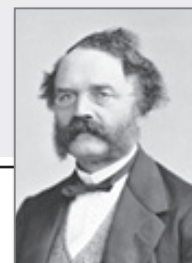
Zadatci:

1. Struja jakosti 100 mA i veće izaziva stezanje srčanog mišića, što može biti smrtonosno. Je li čovjekov život u opasnosti kada mu se tijelo nađe pod naponom 220 V ako je otpor tijela 1 000 Ω ?
2. Možemo li voltmetrom koji ima mjernu ljestvicu do 20 V izmjeriti napon na krajevima otpornika od 4,2 Ω kad njime teče struja jakosti 5,3 A?

Georg Simon Ohm (1787. – 1854.) njemački je fizičar. Istakao se radovima s područja električnosti i magnetizma. Formulirao je zakon prema kojem je jakost struje razmjerna naponu, a obrnuto razmjerna otporu (Ohmov zakon). Po njemu je nazvana jedinica za električni otpor.



Werner von Siemens (1816. – 1892.) njemački je elektrotehničar. Izumio je samouzbudni generator istosmjerne struje (dinamostroj). Bavio se pretežno telegrafskom i mjernom tehnikom. Podigao je prvu dulju telegrafsku liniju u Europi. Po njemu je nazvana jedinica za električnu vodljivost.



Električni otpor

U izrazu za električni otpor:

$$R = \frac{1}{ne\mu} \frac{l}{S}$$

veličina $\frac{1}{ne\mu}$ je recipročna vrijednost električne provodnosti. Nazivamo je **električna otpornost** i obilježavamo s ρ :

$$\rho = \frac{1}{ne\mu}$$

Ovom zamjenom izraz za električni otpor dobiva jednostavniji oblik:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Električni otpor ovisi o vrsti tvari (odnosno otpornosti, ρ), razmjeran je duljini vodiča (l), a obrnuto je razmjeran površini presjeka vodiča (S). To je **zakon električnog otpora**.

Jedinica za električnu otpornost jest $\Omega \text{ m}$, a izvodimo je iz posljednjeg izraza uvrštavajući u njega jedinice za otpor (Ω), duljinu (m) i površinu presjeka (m^2). Budući da su presjeci vodiča koje svakodnevno koristimo obično mali, zgodnije ih je iskazivati kvadratnim milimetrima (mm^2). Tada bi jedinica za otpornost bila $\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$. Pritom je:

$$\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1} = 10^{-6} \Omega \text{ m}.$$

| tvar | $\rho/10^{-6} \Omega \text{ m}$ |
|------------|---------------------------------|
| aluminij | 0,028 |
| bakar | 0,0172 |
| cekas | 1,1 |
| čelik | 0,12 |
| konstantan | 0,50 |
| manganin | 0,42 |
| mjed | 0,072 |
| nikelin | 0,4 |
| ugljen | 0,415 |
| volfram | 0,055 |
| željezo | 0,12 |
| živa | 0,958 |

Tablica 1.2. električna otpornost (ρ) nekih tvari pri 20 °C

Tumačenje električnog otpora. Gibanje slobodnih elektrona slično je gibanju kišnih kapi. One padaju stalnom brzinom jer je težina uravnotežena s otporom zraka koji je posljedica sudaranja kišnih kapi s česticama zraka. U vodiču se slobodni elektroni sudaraju s ionima. Posljedica je tih sudara električni otpor.

Ovisnost električnog otpora o temperaturi. Zagrijavamo li plamenom metalni vodič kojim teče struja, opažamo da se jakost struje kroz vodič smanjuje. Smanjenje jakosti struje znači povećanje otpora. Za svaki vodič postoji temperaturni interval u kojem je promjena otpora (ΔR) razmjerna promjeni temperature (Δt). Promjena otpora razmjerna je i njegovoj početnoj vrijednosti (R_0):

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta t .$$

S α smo obilježili **termički koeficijent otpora**. Njegova je jedinica K^{-1} ili $^{\circ}C^{-1}$. Budući da se otpor metalnih vodiča povećava s temperaturom, njihov je termički koeficijent otpora pozitivan. Postoje tvari čiji je termički koeficijent negativan, što znači da im se otpor s povećanjem temperature smanjuje. Takav je primjerice grafit.

Nakon promjene temperature otpor je:

$$R = R_0 + \Delta R = R_0 + \alpha R_0 \Delta t = R_0 (1 + \alpha \Delta t).$$

Obično se za početnu temperaturu uzima $0^{\circ}C$. U tom je slučaju promjena temperature (Δt) jednaka konačnoj temperaturi (t) pa izraz za otpor glasi:

$$R = R_0 (1 + \alpha t).$$

Povećanje otpora metalnih vodiča s porastom temperature tumačimo učestalijim sudarima slobodnih elektrona s ionima koji se pri većim temperaturama više udaljavaju od svojih ravnotežnih položaja.

| tvar | $\alpha/10^{-3} K$ |
|------------|--------------------|
| aluminij | 4,7 |
| bakar | 4,3 |
| čelik | 6 |
| konstantan | 0,02 |
| olovo | 4,1 |
| platina | 3,9 |
| srebro | 4,1 |
| ugljen | - 0,3 |
| volfram | 4,2 |
| željezo | 6,6 |

Tablica 1.3. termički koeficijent otpora (α) nekih tvari pri $0^{\circ}C$

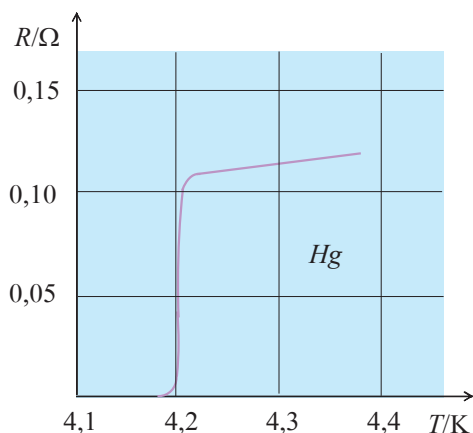
Supravodljivost. Istražujući električna svojstva žive pri vrlo niskim temperaturama, nizozemski fizičar **Onnes Kammerlingh** otkrio je 1911. godine da električni otpor njegova uzorka žive pri temperaturi 4,2 K naglo pada s $0,11 \Omega$ na nulu (slika 1.6.). Išezavanje električnog otpora pri temperaturama bliskim 0 K otkriveno je i kod nekih drugih metala. Električnu vodljivost bez električnog otpora nazivamo **supravodljivost**, a metale s tim svojstvom supravodičima.

Za održavanje stalne struje kroz vodiče u nesupravodljivom stanju potrebno je vodič priključiti na izvor napona. Energija izvora se pri protjecanju struje pretvara u unutarnju energiju vodiča, zbog čega se vodič zagrijava. Zato električni uređaji koje danas koristimo troše mnogo energije, a često ih je potrebno i hladiti, što također predstavlja utrošak energije. Da bismo smanjili gubitke energije na zagrijavanje, u električne uređaje kojima teče jača struja ugrađuju se deblji vodiči. Zbog toga su takvi električni uređaji masivni.

U supravodiču se pokrenuta električna struja održava bez izvora, stoga izvor ne mora biti stalno uključen u strujni krug. Za dobivanje jakih struja i magnetskih polja nisu potrebni debeli supravodiči i masivni uređaji, jer već supravodičem debljine oko 0,1 mm može teći struja od stotinjak ampera.

Prepreka širokoj primjeni supravodiča je skupoća održavanja niskih temperatura na kojima dolazi do supravodljivosti. U laboratoriju se za istraživačke svrhe niska temperatura postiže tekućim helijem. Već bi supravodljivost iznad 77 K imala širu primjenu, jer je tu temperaturu moguće održavati tekućim dušikom, a njegovo je dobivanje jeftino.

Znanstvenici su uspjeli sintetizirati materijale s kritičnom temperaturom iznad 77 K. To su međutim vrlo kruti i krhki keramički materijali od kojih se ne mogu praviti savitljive žice.



Slika 1.6. supravodljivo stanje žive nastupa pri temperaturi 4,2 K

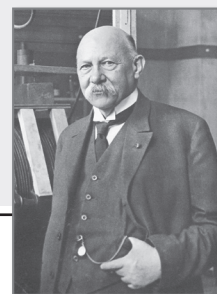
Pitanja:

1. Kako tumačimo električni otpor?
2. Nekom vodiču udvostručimo promjer. Hoće li se zbog toga njegov otpor povećati ili smanjiti i koliko puta? Što bismo morali učiniti s duljinom vodiča da otpor poprimi početnu vrijednost?
3. Zašto se električni otpor metala povećava s porastom temperature?

Zadatci:

1. Koliki je otpor bakrene žice duljine 1 km i promjera 2 mm?
2. Mjedena žica poprečnog presjeka $0,5 \text{ mm}^2$ i duljine 50 m priključena je na napon 8 V. Kolika je jakost struje kroz žicu?
3. Odredite duljinu žice od nikelina poprečnog presjeka $0,1 \text{ mm}^2$ koju treba staviti u električni grijač predviđen za napon od 220 V i struju od od 4 A.
4. Duljina volframske niti pri $0 \text{ }^\circ\text{C}$ iznosi 5 cm, a površina njezina presjeka $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$. Kolika je jakost struje kroz nit kada se ona priključi na napon od 120 V ako tada njezina temperatura iznosi $2900 \text{ }^\circ\text{C}$?
5. Pri temperaturi $25 \text{ }^\circ\text{C}$ volframovom niti električne žarulje teče struja jakosti 0,004 A uz napon 0,01 V. Koliki je otpor niti pri temperaturi $0 \text{ }^\circ\text{C}$?

Heike Kammerlingh - Onnes (1853. - 1926.) nizozemski je fizičar. Istakao se radovima na području niskih temperatura. Prvi je ukapljio helij i postigao temperaturu nižu od 1 K. Ohladivši živu do 4,2 K, otkrio je supravodljivost. Dobitnik je Nobelove nagrade za fiziku 1913. godine.



Rad i snaga električne struje

Rad. Djelujući na slobodne elektrone u vodiču kojim teče struja, električna sila za vrijeme t obavi rad:

$$W = UQ = UIt.$$

Radom električne sile slobodni elektroni dobiju energiju jednaku tom radu. Pri usmjerenom gibanju vodičem slobodni se elektroni sudaraju s ionima i predaju im energiju. Predajući energiju ionima slobodni elektroni obavljaju rad. Obavljeni rad, odnosno iznos energije predane ionima, jednak je energiji što su je slobodni elektroni dobili pod djelovanjem električne sile (UIt). Budući da usmjerenom gibanje slobodnih elektrona predstavlja električnu struju, obično kažemo da električna struja obavlja rad. Dakle, rad je električne struje:

$$W = UIt.$$

Zbog primljene energije ioni titraju intenzivnije oko svojih ravnotežnih položaja, što znači da prolazom struje vodičem raste njegova unutarnja energija, a time i temperatura.

Uvrstimo li u gornji izraz $U = IR$, odnosno $I = \frac{U}{R}$, dobivamo još dva izraza za rad električne struje:

$$W = I^2 R t \quad \text{i} \quad W = \frac{U^2}{R} t.$$

Električna energija. Slobodni elektroni u vodiču imaju električnu potencijalnu energiju i kinetičku energiju uslijed usmjerenoga gibanja. Zajednički naziv za ta dva oblika energije elektrona, ili drugih nabijenih čestica, jest **električna energija**. Njezino se postojanje očituje pri pretvorbi u druge oblike energije, kao što su primjerice mehanička (slika 1.7.a) i svjetlosna (slika 1.7.b).



a)



b)

Slika 1.7.

Električna se energija u bušilici (a) pretvara u mehaničku, a u žarulji (b) u svjetlosnu energiju.

Rad električne struje i električnu energiju obično iskazujemo **kilovatsatima** (kWh), pri čemu je:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J.}$$

Snaga. Snagu smo definirali kao kvocijent rada i vremena za koje je rad obavljen:

$$P = \frac{W}{t}.$$

Podijelimo li svaki od navedenih izraza za rad električne struje vremenom, dobit ćemo odgovarajuće izraze za njezinu snagu:

$$P = UI,$$

$$P = I^2R,$$

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

| trošilo | P/W | trošilo | P/W |
|---------------------|----------|-----------|-----------|
| ručni sat | 0,000 1 | televizor | 100 - 150 |
| džepni kalkulator | 0,05 | glačalo | 1 000 |
| tranzistorski radio | 0,1 - 10 | bojler | 2 000 |

Tablica 1.4. snage nekih trošila

Pitanja:

- Što zovemo električnom energijom?
- Naponi na koje se priključuju žarulje od 75 W i 150 W da bi normalno svijetlile jednaki su. Koja žarulja ima veći otpor?
- Grijači opora R i $4R$ griju jednakim snagama. Ako kroz grijač otpora R teče struja jakosti I , kolika je jakost struje kroz grijač otpora $4R$?
 - $2I$
 - $4I$
 - $\frac{I}{2}$
 - $\frac{I}{4}$.
- Grijač opora R priključen je na napon U_1 , a grijač otpora $4R$ na napon U_2 . Grijači će grijati jednakim snagama ako je:
 - $U_2 = 2U_1$
 - $U_2 = 4U_1$
 - $U_2 = \frac{U_1}{2}$
 - $U_2 = \frac{U_1}{4}$.

Zadatci:

- Grijalo priključeno na napon 220 V ima snagu 800 W.
 - Koliki je otpor grijala?
 - Kolika je jakost struje kroz grijalo?
- Struja jakosti 10 A prolazi bakrenom žicom duljine 1 m i površine presjeka $0,1 \text{ mm}^2$. Koliko se topline oslobodi u žici svake sekunde?
- Grijačem uronjenim u vodu teče struja jakosti 350 mA kada je priključen na napon 220 V. Koliku masu vode grijač može zagrijati od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ do $50 \text{ }^\circ\text{C}$ za 10 minuta? Specifični je toplinski kapacitet vode $4\,200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- Električna lokomotiva vozi brzinom od 36 km h^{-1} i pritom razvija silu od $4\,500 \text{ N}$. Kolika je jakost struje kroz motor ako je priključen na napon od 500 V, a djelotvornost je 90 %?