

# OSNOVI ELEKTRONIKE

Predavanja (2 časa nedeljno):

Dr Milan Ponjavić, van. Prof.

(Milan@el.etf.rs).

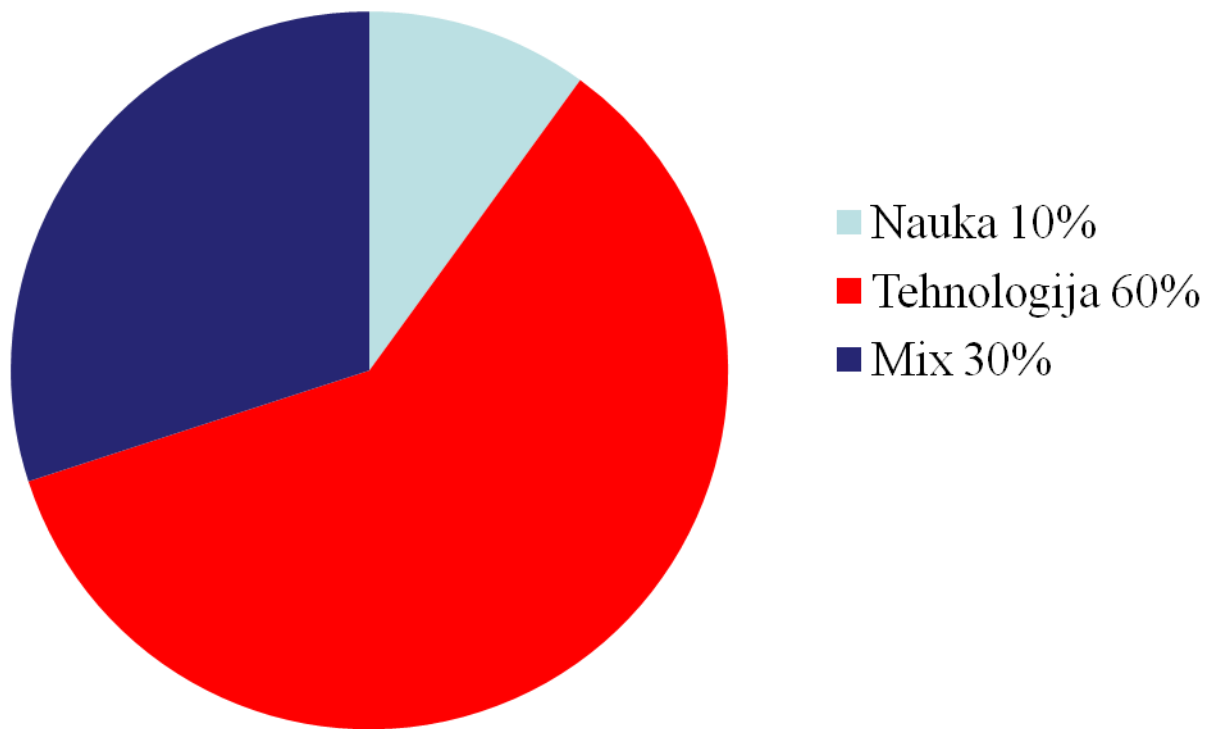
Vežbe (2 časa nedeljno): Mr Goran Savić, asistent

(Savic@el.etf.rs)

Laboratorija (12 časova računarskih i eksperimentalnih vežbi): Goran Savić sa saradnicima Katedre za elektroniku

Sajt predmeta: <http://tnt.etf.rs/~si1oe>

## Angažman u tehničkim delatnostima (IEEE Tran. On Education)



# Naučno obrazovanje

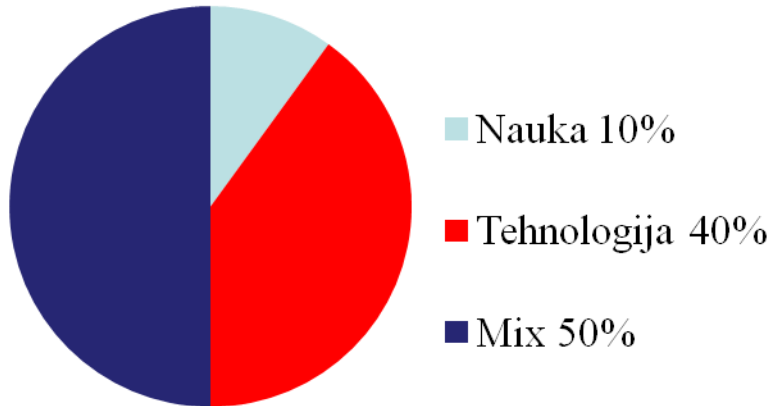
- Primarna uloga je edukacija kadrova za bavljenje naukom.
- Stečena znanja su fundamentalna, obezbeđuju širinu i sposobnost rešavanja fundamentalnih problema.
- Svrha: otkrivanje i fundiranje novih znanja.
- Primer PMF, teorijska matematika i fizika.

# Inženjersko obrazovanje

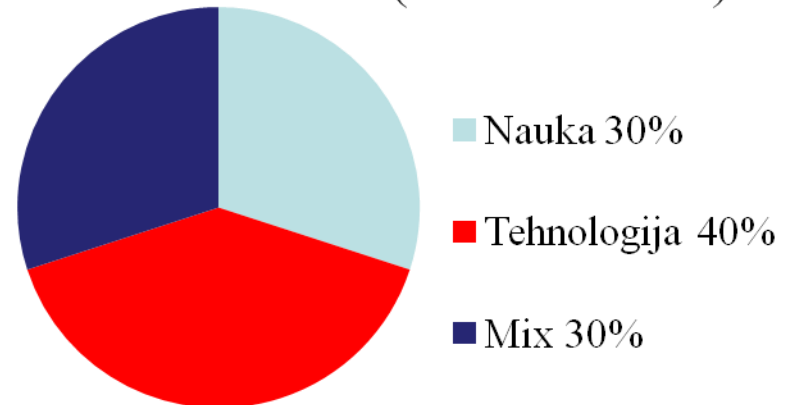
- Primarna uloga je obuka kadrova za bavljenje tehnologijom.
- Stečena znanja su praktična, obezbeđuju sposobnost rešavanja poznatih problema u poznatim i novim okolnostima.
- Primer ETF, TMF, MAS, GF
- Svrha: efikasnost dolaska do krajnjeg rezultata-proizvoda (softver hardver), povećanje efikasnosti proizvodnje, ušteda energije i drugih resursa itd... → €, \$, £

# Obrazovanje na ETF

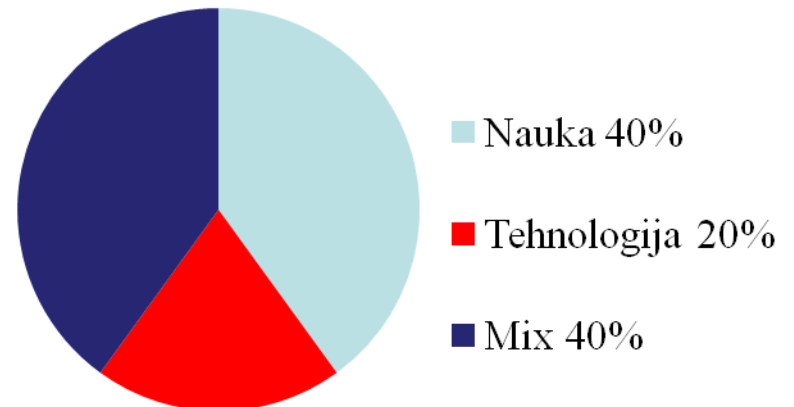
## Osnovne studije



## Master studije (MSc on ECE)



## Doktorske studije



Izbor kurseva utiče na procenete,  
najmanje na osnovnim, najviše  
na doktorskim studijama

# Inženjerske metode

- Teorijski proračuni i izvođenja
- Simboličke i numeričke simulacije
- Eksperiment

# Struke u elektrotehnici

- Elektromagnetika
- Elektroenergetika
- Fizička elektronika
- Automatika
- Komunikacije
- Elektronika
- Computer engineering
- Software engineering

Tehnologija:  
SI, RTI, EL, FE...

# Program predmeta:

1. Osnovni pojmovi o elektricitetu i elektrotehnici.
2. Kola sa jednosmernom strujom.
3. Kola sa promenljivom strujom.
4. Kola sa prostoperiodičnim strujama.
5. Vremenski i frekvencijski domen. Furijeovi redovi i Furijeova transformacija.
6. Osnovi fizike poluprovodnika. Dioda.
7. Tranzistori sa efektom polja. Pojam pojačanja, ulazne i izlazne otpornosti. Osnovne pojačavačke sprege.
8. Bipolarni tranzistori. Osnovne pojačavačke sprege.
9. Diferencijalni i operacioni pojačavač. Osnovne primene operacionih pojačavača.
10. Osnovna digitalna elektronska kola.
11. Digitalno-analogna i analogno-digitalna konverzija.
12. Napredne oblasti elektronike

# Čime se bavi elektronika?

- Proučavanje i konstrukcija komponenti kojima se kontroliše tok električnih signala (informacija) ili proizvoda (električne energije)
- Povezivanje takvih komponenti u složena kola koja ostvaruju zadatu funkciju.



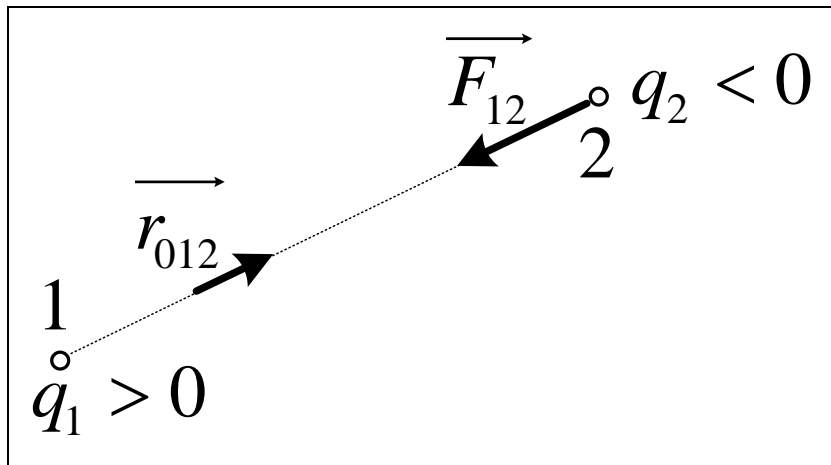
# Osnovni pojmovi o elektricitetu

- Električno opterečenje – naelektrisanje  
(naelektrisana čestica, “tačkasto naelektrisanje”)
- količina naelektrisanja
- Fundamentalno svojstvo materije
- Pozitivno i negativno naelektrisanje (elektroni, pozitroni, protoni, jezgra, joni, šupljine)
- Nepokretno naelektrisanje – statički elektricitet
- Pokretno naelektrisanje – električna struja
- Uobičajena oznaka za naelektrisanje je  $q$  ili  $Q$  a
- jedinica Kulon (C).
- Naelektrisanje elektrona je elementarno naelektrisanje  $q_e = -e = -1.602 \times 10^{-19}$  C.
- usmereno kretanje naelektrisanja – električna struja
- Referentni smer struje

- “Kulonov zakon”
- Sila između dva nepokretna naelektrisanja u vakumu

$$\overrightarrow{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \overrightarrow{r}_{012}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{c^2}{10^7} = k_0 \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{F}}$$

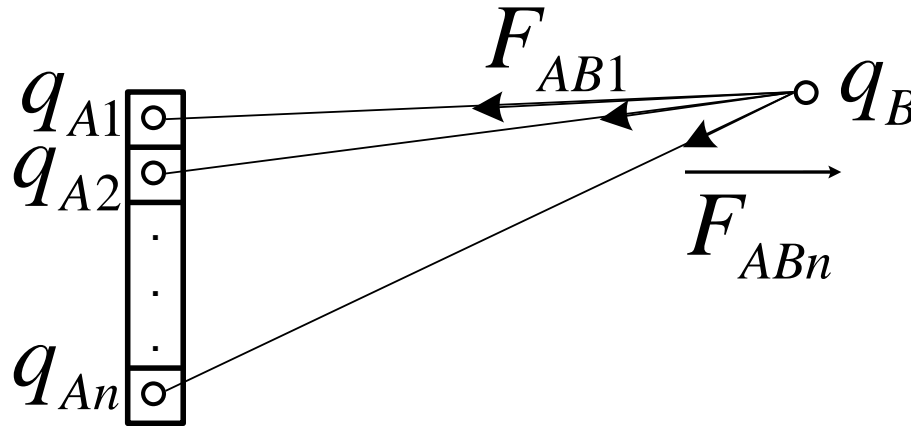


$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\overrightarrow{r}_{012} = \frac{\overrightarrow{r}_{12}}{\left| \overrightarrow{r}_{12} \right|} \Rightarrow \left| \overrightarrow{r}_{012} \right| = 1$$

- Ako nije vakum umesto  $\epsilon_0$  koristi se  $\epsilon$  ( $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ,  $k=k_0/\epsilon_r$ )
- Za vazduh i neke gasove  $\epsilon_r \sim 1 \Rightarrow \epsilon \sim \epsilon_0$

- Sila kojom naelektrisano telo deluje na tačkasto naelektrisanje - složen problem u opštem slučaju



generalno  $q_{Ai} \neq q_{Aj}$  za  $i \neq j$

$$\sum_k q_{Ak} = q_{\text{celog tela}}$$

- Sila kojom jedno naelektrisano telo deluje na drugo naelektrisano telo

# Električno polje

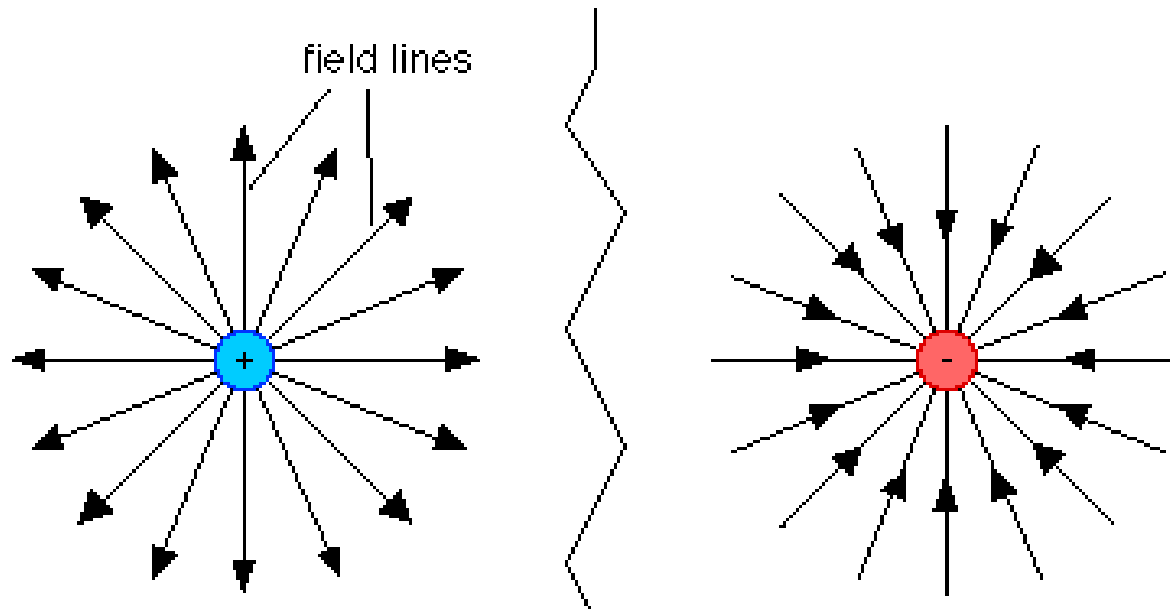
- Fizičko polje - oblik materije, pored supstancije i informacije (gravitaciono, EM, jake sile, slabe sile...)
- materijalnost prostora u okolini naelektrisanih tela koja se manifestuje u pojavi mehaničke sile koja deluje na probno naelektrisanje uneseno u polje.
- Fizička veličina - jačina električnog polja  $E$ :

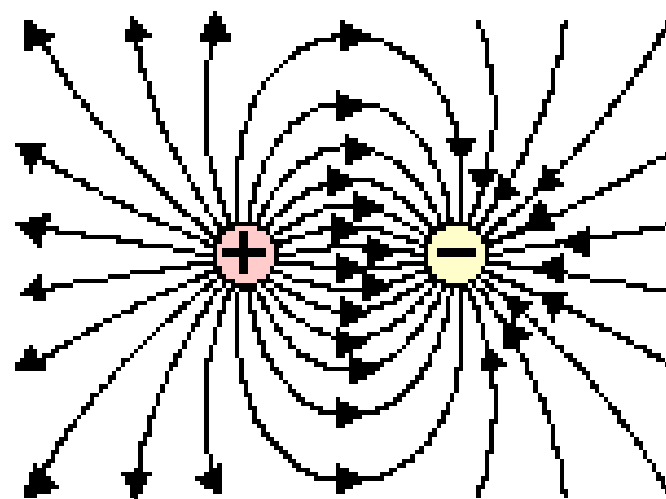
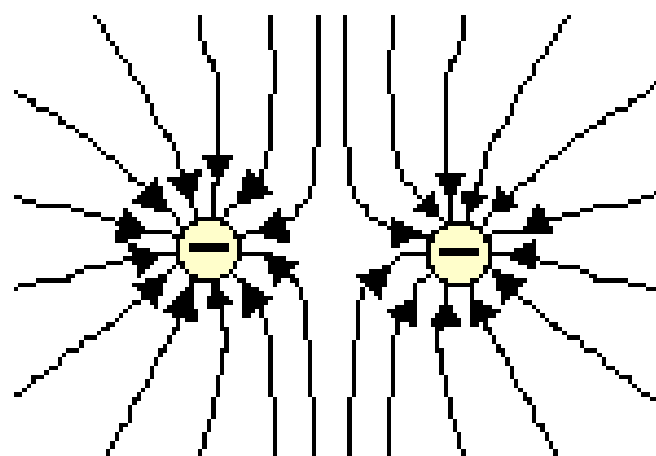
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\Delta q}}{\Delta q} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r^2} \cdot \vec{r}_{012}, \quad \vec{E} = \vec{E}(x, y, z)$$

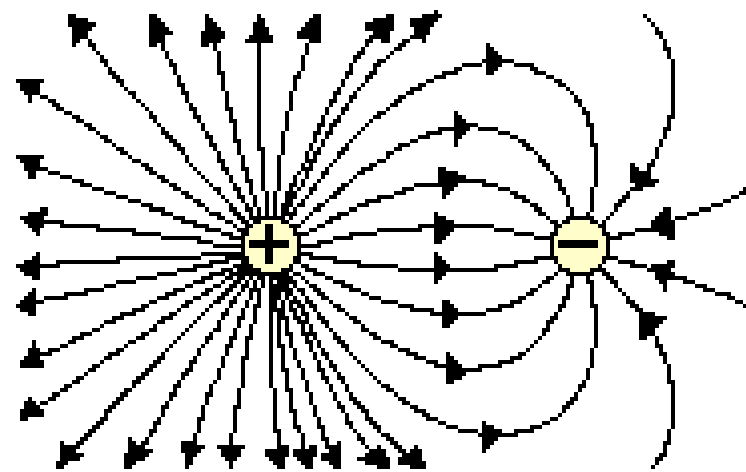
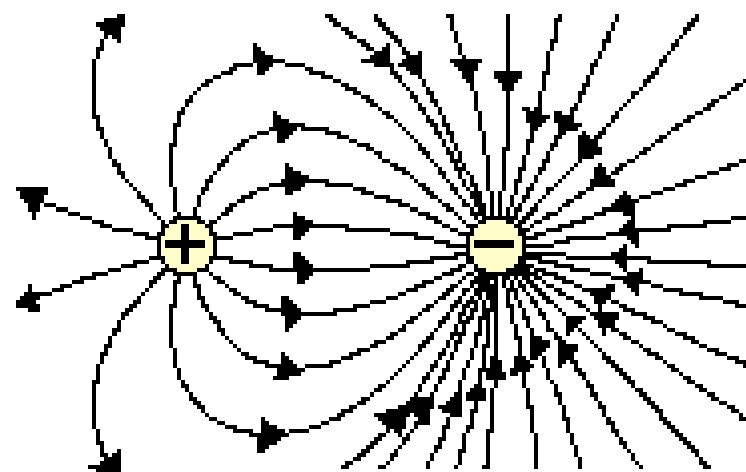
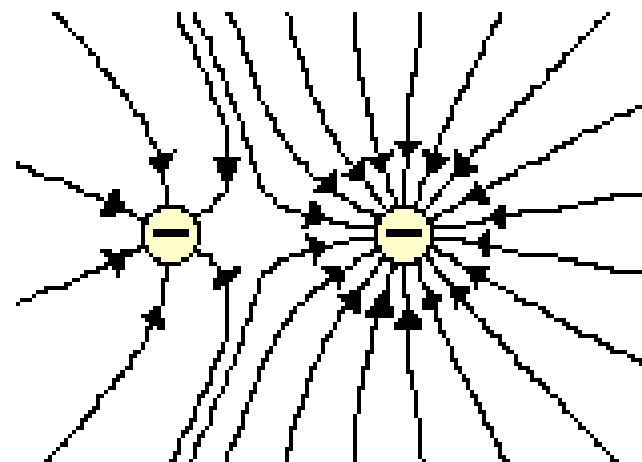
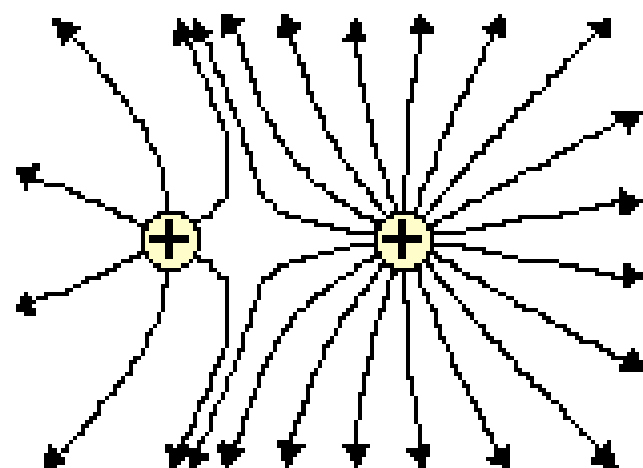
- Ako se naelektrisanja ne kreću – elektrostatičko polje
- Ako nije vakum umesto  $\epsilon_0$  koristi se  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$
- Za vazduh i neke gasove  $\epsilon_r \sim 1 \Rightarrow \epsilon \sim \epsilon_0$

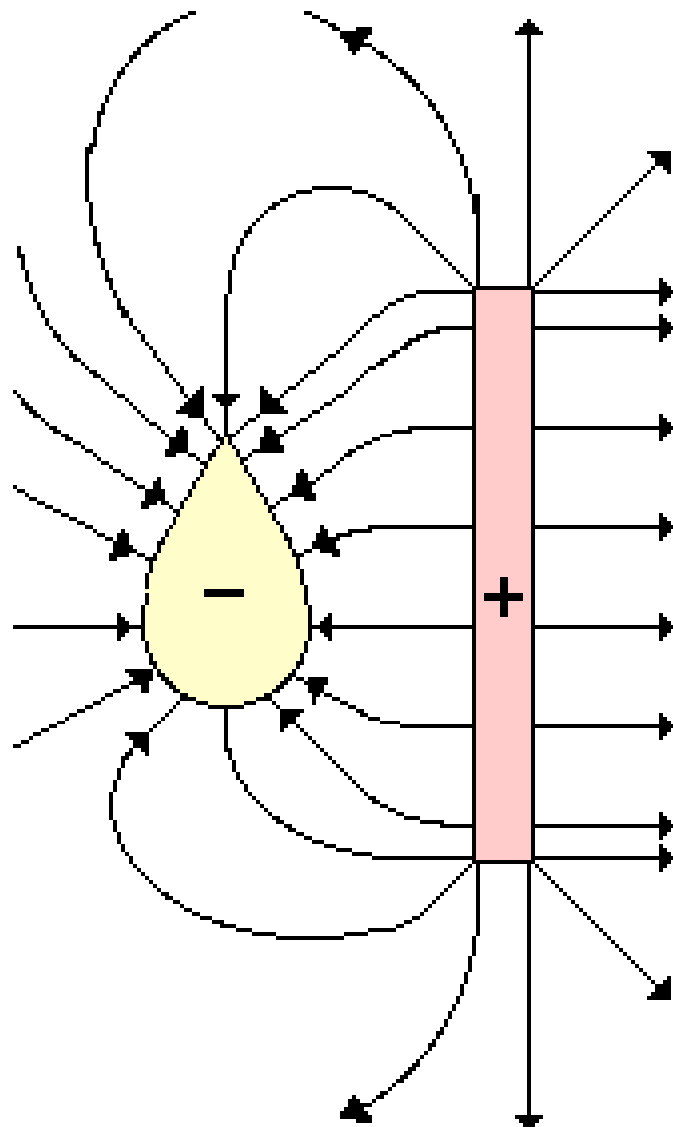
# Linije sile električnog polja

- Naelektrisana tela modifikuju prostor oko sebe
- geometrijska interpretacija – linije sile
- zamišljene krive linije na koje je vektor  $E$  uvek tangentan



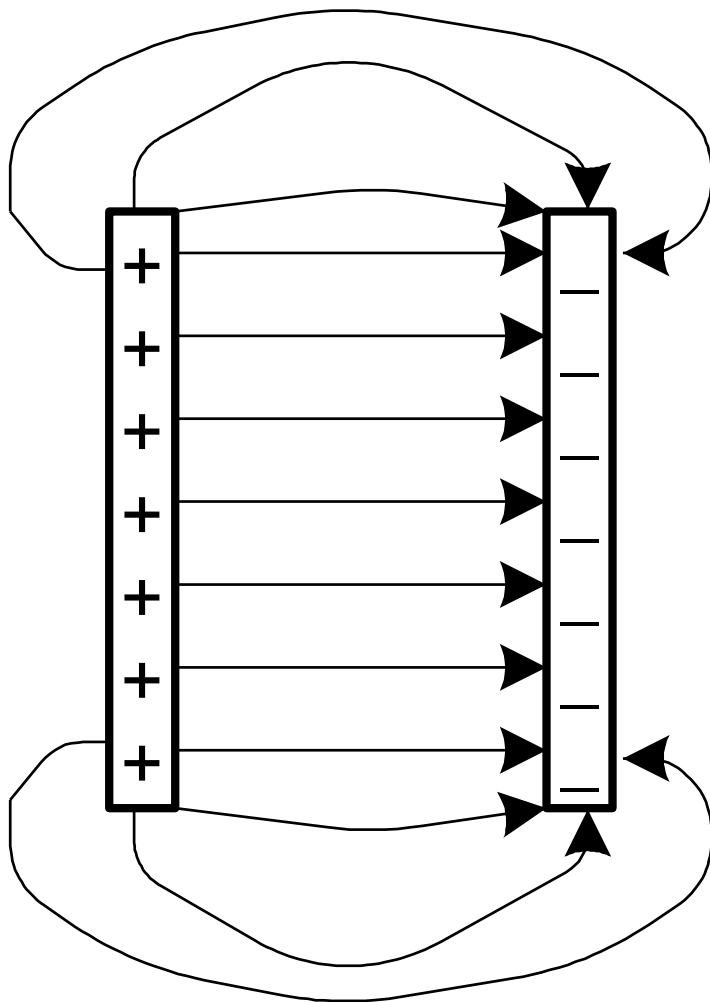








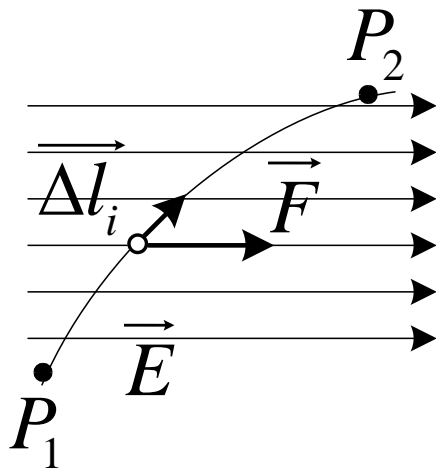
# Homogeno elektrostatičko polje



$$E = \frac{q}{\varepsilon S} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

# Rad, potencijal i napon

- Probno  $\Delta q$  naelektrisanje se kreće (sporo) duž putanje  $P_1 P_2$  unutar elektrostatičkog polja.
- elementarni rad koji se izvrši prilikom pomeranja duž pravolinijskog segmenta  $\Delta l_i$



$$\Delta A_i = \vec{F}_{na\Delta q} \cdot \vec{\Delta l_i} = \Delta q \vec{E} \cdot \vec{\Delta l_i}$$

- ukupan rad

$$A = \sum_{i=1}^n \Delta A_i = \Delta q \sum_{i=1}^n \vec{E} \cdot \vec{\Delta l_i}$$

- kada  $\Delta l_i \rightarrow 0$   $n \rightarrow \infty$

$$A = \Delta q \cdot \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\left( \vec{C} \cdot \vec{D} = C \cdot D \cdot \cos \alpha \right)$$

Rad je obavljen na račun promene potencijalne enrgije

$$\Delta W = A = \Delta q \cdot \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot \vec{dl}$$

$$\frac{\Delta W_{\text{od } P_1 \text{ do } R}}{\Delta q} = V_{P_1} = \int_{P_1}^R \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad V_R \equiv 0$$

$$U_{AB} = V_A - V_B = \int_A^R \vec{E} \cdot \vec{dl} - \int_B^R \vec{E} \cdot \vec{dl} = \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{dl}$$

$$U_{AB} = -U_{BA} \quad A_{\Delta q} = \Delta q \cdot U$$

Ukoliko je  $V_B = 0$  tada je  $U_{AB} = V_A$

## Električna struja

Struja je jedan od osnovnih pojmova u elektrotehnici i predstavlja meru količine elektriciteta koja se pomerila u jedinici vremena. Jedinica je Amper (A) i predstavlja pomeraj od 1 C/s. Uobičajena oznaka za struju je  $I$  ili  $i$ .

Pozitivna struja odgovara kretanju pozitivnog naelektrisanja.

Prosečna (srednja) struja:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Trenutna struja:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

# Elektrotehnički materijali

- Elektronska struktura
- Moguće pokretanje elektrona- formiranja struje kroz materijal
- Mere lakoće pokretanja elektrona – specifična provodnost i specifična otpornost
- Materijali sa velikom specifičnom provodnošću- provodni materijali (Ag, Au, Cu, Al, karakteristike)
- Materijali sa malom specifičnom provodnošću- neprovodni materijali (staklo, guma, plastika)
- Materijali koji pod određenim uslovima mogu da provodni ili neprovodni – poluprovodnici (Si, Ge, karakteristike)
- Efekat superprovodnosti

# Elementi električnog kola i pojam električnog kola

## Provodnik (žica, kabal)

- Fizička realizacija: bakarni ili aluminijumski kabal
- U prvoj (i najčešće jedinoj) aproksimaciji se zanemaruje specifična otpornost ( $\rho \rightarrow 0$ ,  $R \rightarrow 0$ )

## Otpornik

- Komponenta koja je definisana sa više fizičkih veličina.

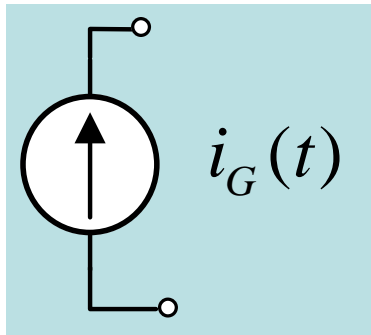
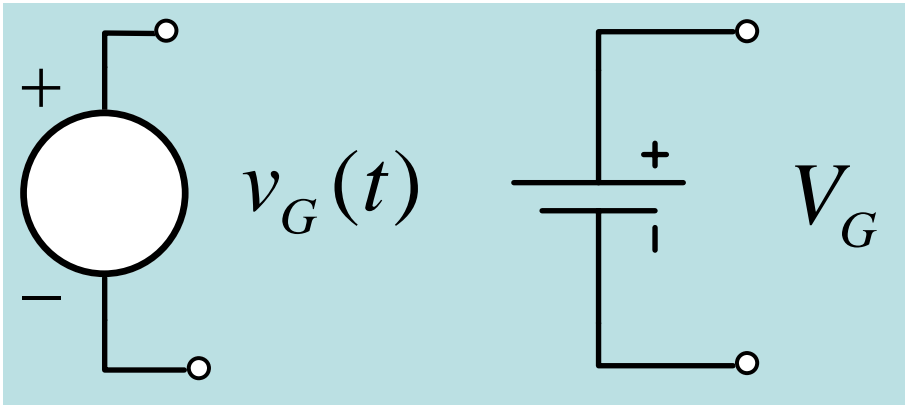
Osnovne veličine su:

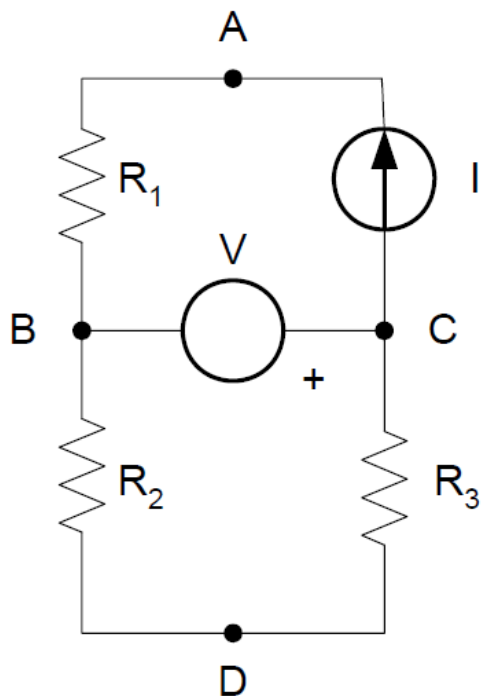
- otpornost  $R[\Omega]$
- provodnost  $G=1/R$  [S]

- Simboli: The image shows two circuit symbols side-by-side. The first is a zigzag line with small circles at each end, representing a resistor. The second is a rectangle with small circles at each end, representing a conductance.

# Električni generator

- Komponenta koja putem neelektričnih sila prouzrokuje kretanje naelektrisanja ako je povezana u kolo





- Električno kolo predstavlja interkonekciju dva ili više elemenata.
- Povezivanje elemenata se vrši provodnicima
- Crtež električnog kola se zove električna šema

### Intuitivna definicija čvorova i grana

- **čvor** je mesto gde se spajaju najmanje 3 grane
  - **grana** je veza elemenata između 2 čvora
- 
- Ako su elementi električnog kola linearni onda je kolo linearno, ako postoji bar jedan nelinearan element, onda je kolo nelinearno
  - Ako su svi naponi i struje u kolu vremenski nepromenljivi posle dovoljno vremena nakon uključenja, kaže se da je kolo jednosmerno

Koji su čvorovi i grane datog kola?  
 Koji su potencijali datog kola?  
 Koji su naponi u datom kolu?



# Fizičke veličine sa relativnom diferencijalnom metrikom

- Rastojanje po  $X$  osi u pravougaonom koordinatnom sistemu

$$x_A = 30km$$

$$x_B = 10km$$

$$x_{AB} = x_A - x_B = 20km$$

- Potencijal tačke u električnom kolu

$$v(t), V, \varphi \quad [V]$$

- Tačke se nalaze na provodnicima
- Sve tačke na istom provodniku su na istom potencijalu
- Čvor je tačka

# Potencijali električnog kola

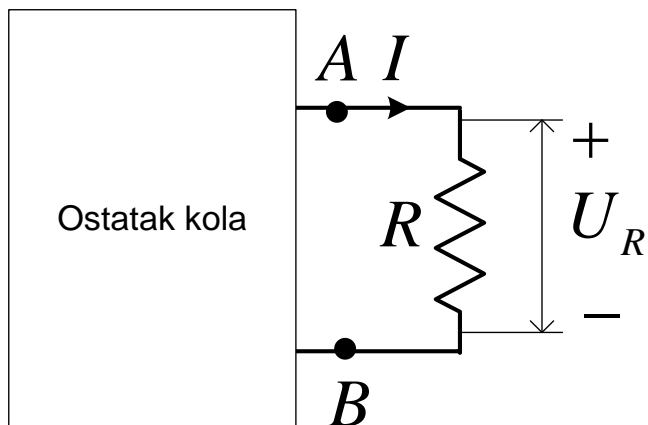
- Usvoji ce tačka nultog potencijala – *Masa*
- Uobičajeno je da se kao tačka nultog potencijala fizičkog kola smatra uzemljena tačka
- Tačka nultog potencijala se obeležava specijalnim simbolima
- Svi ostali potencijali su relativni
- Razlika potencijala između dve tačke je fizička veličina *Napon*

$$u(t), U, V \quad [\text{V}]$$

$$U_{AB} = V_A - V_B \qquad U_{AB} = -U_{BA}$$

# Omov zakon

Ako je otpornik povezan za dve različite tačke kola

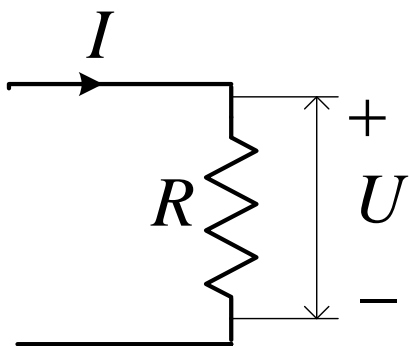


$$U_{AB} = V_A - V_B = U_R$$

$$I = U_{AB} / R = G \cdot U_{AB}$$

- Referentni smerovi napona i struje su usaglašeni
- Referentni smerovi napona i struje su relativni
- Napon na otporniku = pad napona na otporniku
- Da li dva različita provodnika u kolu mogu da budu na istom potencijalu?
- Kolika je stuja kroz otpornik koji je sa oba svoja kraja povezan na isti provodnik?
- Koliki je napon na otporniku koji je samo sa jednim svojim krajem povezan u kolo?

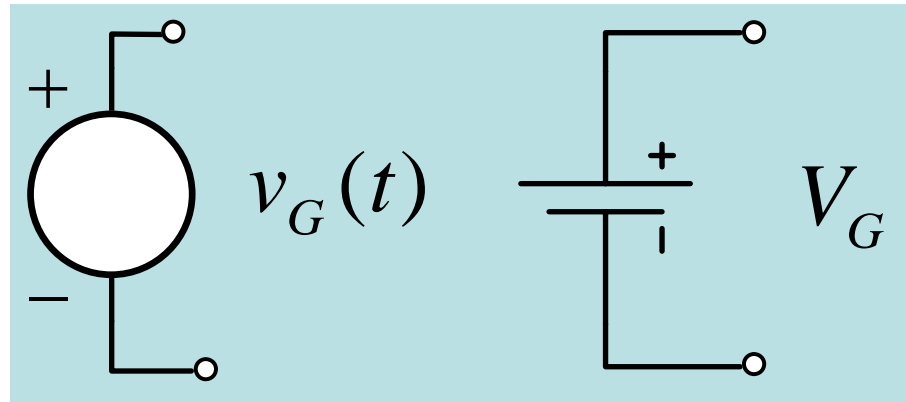
# Džulov zákon



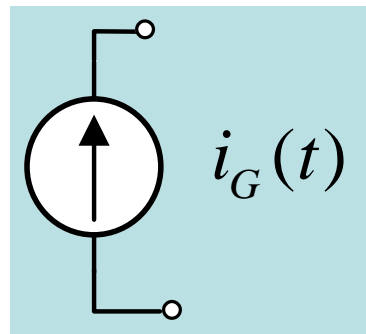
$$P = \frac{A}{\Delta t} = \frac{A}{\Delta q} \frac{\Delta q}{\Delta t} = U \cdot I = RI^2 = U^2 / R$$

# Električni generatori

Idealni nezavisni naponski izvor održava napon između pristupa nezavisno od struje kroz njega. Vrednost napona nezavisnog naponskog izvora može biti konstantna (kao kod baterije), ili neka funkcija vremena  $v(t)$ .



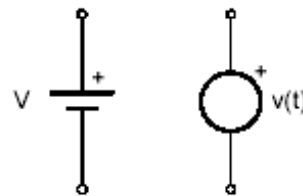
Idealni Nezavisni strujni izvor održava struju između pristupa nezavisno od napona između pristupa. Vrednost struje nezavisnog strujnog izvora može biti konstantna ili neka funkcija vremena  $i(t)$ .



Idealni nezavisni strujni izvor.

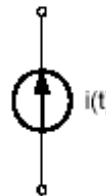
## Idealni nezavisni električni izvori

Idealni nezavisni naponski izvor održava napon između pristupa nezavisno od struje kroz njega. Vrednost napona nezavisnog naponskog izvora može biti konstantna (kao kod baterije), ili neka funkcija vremena  $v(t)$ .



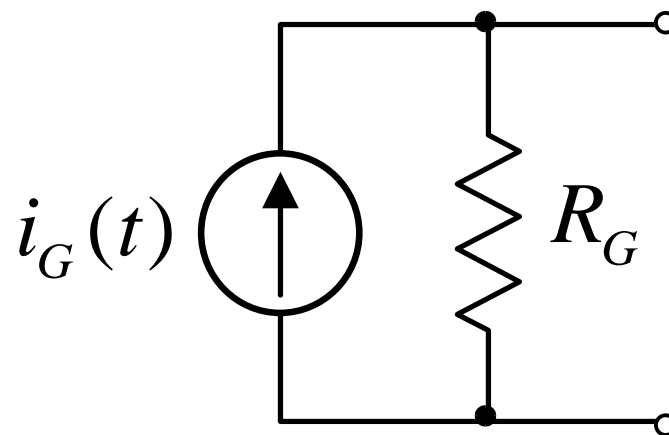
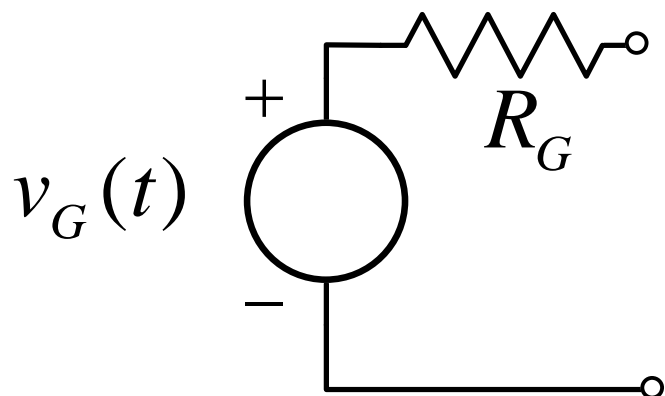
Idealni nezavisni naponski izvori.

Idealni Nezavisni strujni izvor održava struju između pristupa nezavisno od napona između pristupa. Vrednost struje nezavisnog strujnog izvora može biti konstantna ili neka funkcija vremena  $i(t)$ .

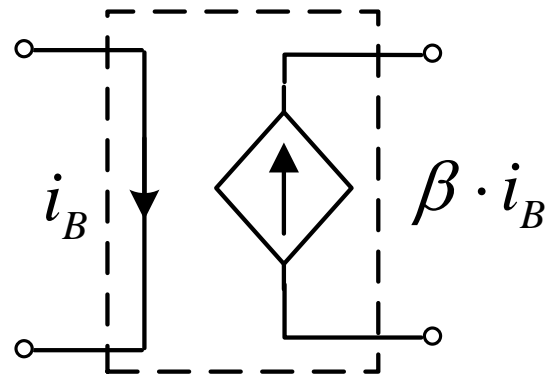
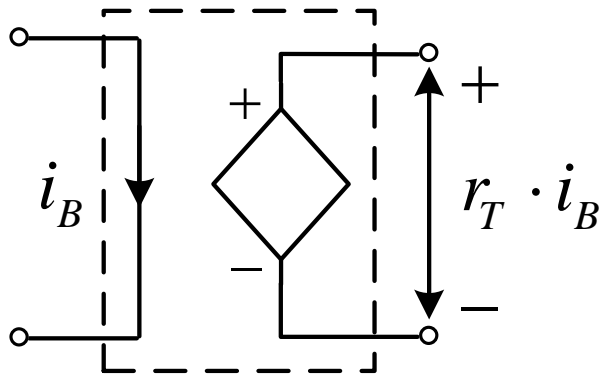
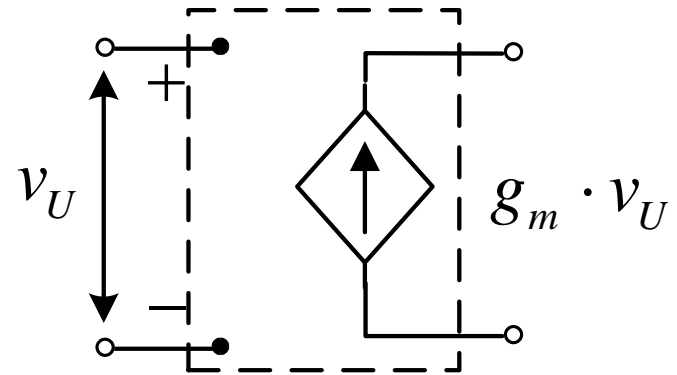
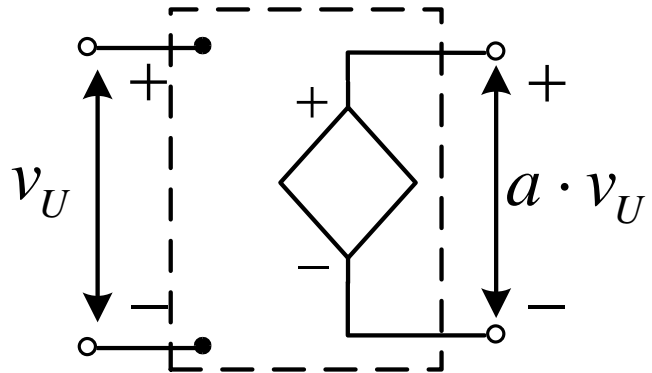


Idealni nezavisni strujni izvor.

- Realni naponski i strujni generator



# kontrolisani generatori





### 3.3 Prvi (strujni) Kirhofov zakon

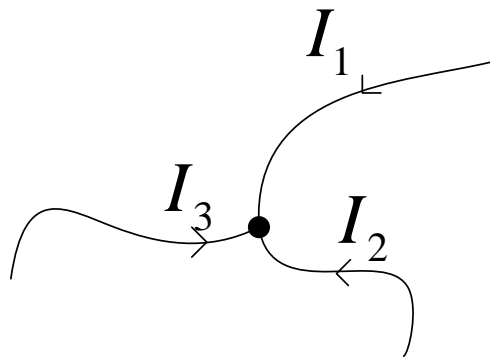
Nemački fizičar Gustav Kirhof je još sredinom 19. veka formulisao dva osnovna zakona koji opisuju ponašanje električnih kola. Prvi Kirhofov zakon se odnosi na struje u kolu i glasi: *Algebarska suma struja koje utiču u ma koji čvor kola jednaka je nuli.*

$$\sum_{j=1}^N I_j = 0 \quad (3.8)$$

gde je  $I_j$  struja  $j$ -te grane koja ulazi u čvor, dok je  $N$  broj grana koje ulaze u čvor. Po konvenciji se struje čija je referentna orijentacija ka čvoru uzimaju se sa pozitivnim predznakom, dok se struje čija je referentna orijentacija od čvora uzimaju sa negativnim predznakom.

Alternativna formulacija prvog Kirhofovog zakona glasi:

*Suma struja koje utiču u ma koji čvor kola jednaka je sumi struja koje ističu iz istog čvora.*

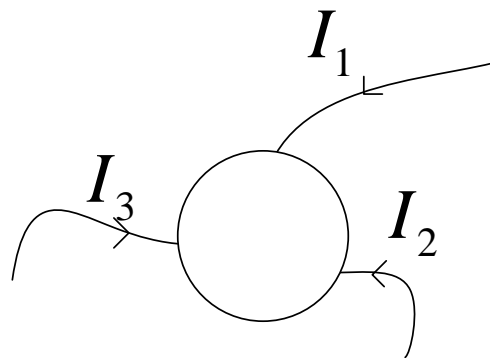


$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$I_1 = 1\text{mA}$$

$$I_2 = 3\text{mA}$$

$$I_3 = -4\text{mA}$$

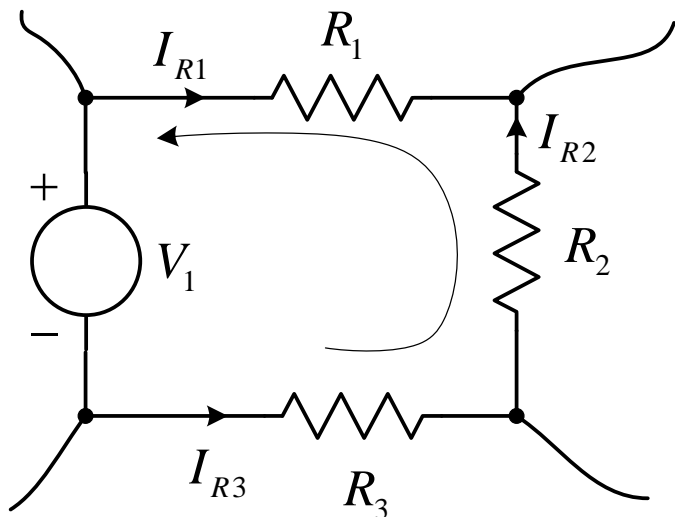


### 3.4 Drugi (naponski) Kirhofov zakon

Drugi Kirhofov zakon se odnosi na napone u kolu i glasi: *Algebarska suma napona u bilo kojoj petlji kola jednaka je nuli.*

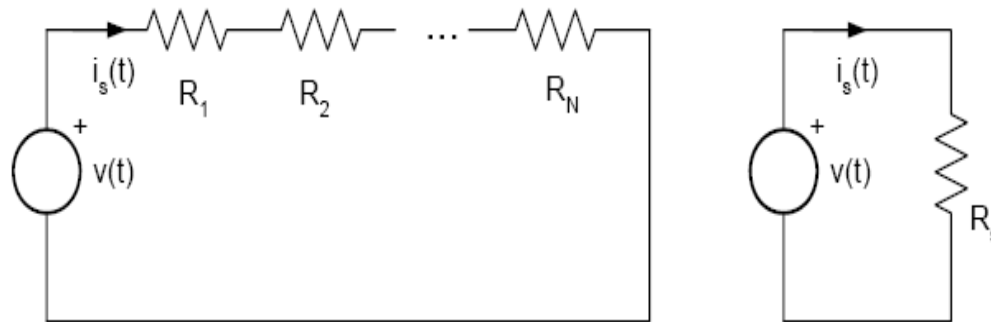
$$\sum_{j=1}^N V_j = 0 \quad (3.9)$$

gde je  $V_j$  napon na  $j$ -toj grani petlje koja ukupno ima  $N$  grana. Po konvenciji se naponi na granama čija je referentna orijentacija suprotna orijentaciji petlje uzimaju se sa pozitivnim predznakom, dok se naponi na granama čija je referentna orijentacija ista sa orijentacijom petlje uzimaju sa negativnim predznakom.



$$V_1 - R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0$$

### Serijska (redna) veza otpornika



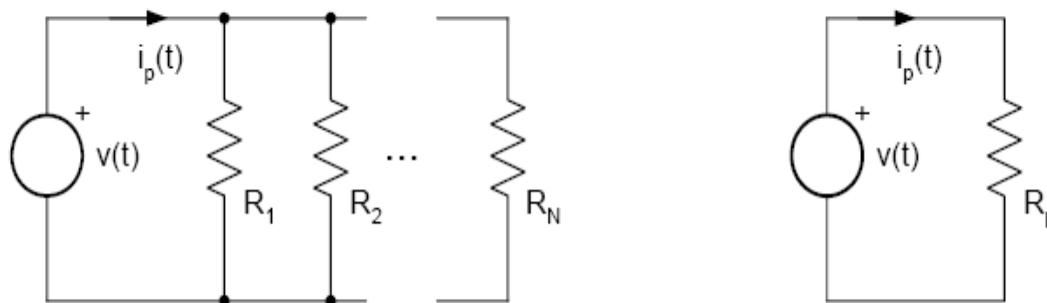
Na osnovu drugog Kirhofovog zakona dobija se:

$$R_s = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

*odnosno, ekvivalentna otpornost serijski vezanih otpornika jednaka je zbiru pojedinačnih otpornosti.*

## Paralelna i serijska veza otpornika

### Paralelna veza otpornika



Na osnovu prvog Kirhofovog zakona dobija se:

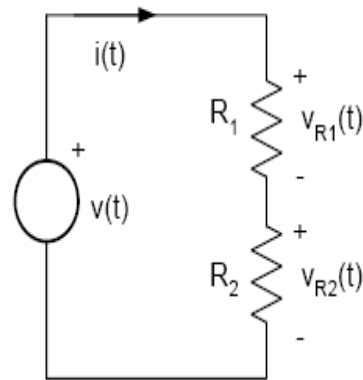
$$G_p = G_1 + G_2 + \dots + G_N$$

odnosno, *ekvivalentna provodnost paralelno vezanih otpornika jednaka je zbiru pojedinačnih provodnosti*. Alternativni oblik prethodne jednačine je:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

## Naponski i strujni delitelji

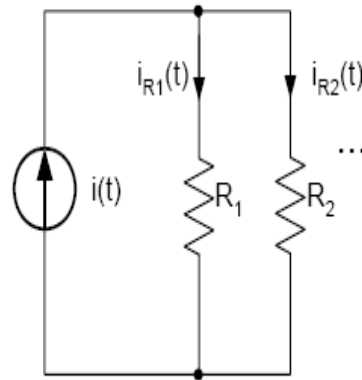
Delitelj napona:



Napon izvora  $v(t)$  deli se između otpornika  $R_1$  i  $R_2$  u direktnoj srazmeri sa njihovim otpornostima.

$$v_{R_1}(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v(t), \quad v_{R_2}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v(t)$$

## Delitelj struje



Struja izvora  $i(t)$  deli se između otpornika  $R_1$  i  $R_2$  u obrnutoj srazmeri sa njihovim otpornostima.

$$i_{R_1}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i(t), \quad i_{R_2}(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i(t)$$