

# 1. Enosmerna vezja

**Vsebina poglavja: Kirchoffova zakona, Ohmov zakon, električni viri (idealni realni, karakteristika vira, karakteristika bremena – matematično in grafično, delovna točka).**



V enosmernih vezjih ni časovnih sprememb toka ali napetosti: tok in napetost na vseh elementih vezja sta konstantna. Da je do takega stanja prišlo, je moralo predhodno priti do prehodnega pojava, npr. tedaj, ko smo na vezje priklopili vir električne energije. Med prehodnim pojavom se tok in napetost na elementih vezja časovno spreminja. Te pojave bomo obravnavali šele v zadnjem delu predmeta OE II. Pri enosmernih vezjih bomo obravnavali le vezja sestavljena iz uporov in virov. Analiza takih vezij je nekoliko bolj enostavna kot analiza vezij pri vzburjanju z izmeničnimi signali, kljub temu pa se bo kasneje (OE2) izkazalo, da lahko z določenimi dodatnimi prijemi (uporaba kompleksnega računa) znanja iz analize enosmernih vezij uporabimo tudi za analizo vezij iz drugih pasivnih elementov (kondenzatorjev, tuljav) vzbujanih z izmeničnimi viri.

Analiza vezja pomeni, da znamo določiti napetost in tok na vsakem elementu vezja. Da bomo to sposobni, bomo uporabili spoznanja iz elektrostatike in tokovnega polja. To, da je pri enosmernih vezjih vsota tokov v zaključeno površino enaka nič  $\oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0$ , da velja zakon o

potencialnosti polja, kjer je integral električne poljske jakosti po zaključeni poti enak nič  $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$  in to, da pri enosmernih vezjih obravnavamo le konduktivne toke, kjer velja

linearna zveza med gostoto toka in električno poljsko jakostjo  $\vec{J} = \gamma \vec{E}$ . Iz prve zveze bo sledil prvi Kirchoffov zakon, iz druge drugi Kirchoffov zakon in iz tretje zveze Ohmov zakon. Ti nam zadostujejo za popolno obravnavo (analizo) enosmernih vezij.

## KIRCHOFFOVA ZAKONA

### 1. Kirchoffov zakon.

Pri enosmernih vezjih ni kopičenja naboja znotraj zaključene

površine, kar matematično zapišemo  $\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{zaključena}} = 0$ , kar

hkrati pomeni, da je  $\oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0$ . Če razdelimo zaključeno

površino na  $N$  delov, lahko zapišemo  $\oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \int_{A_1} \vec{J} \cdot d\vec{A} + \int_{A_2} \vec{J} \cdot d\vec{A} + \dots + \int_{A_N} \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0$ , kar pa je

hkrati enako  $i_1 + i_2 + \dots + i_N = 0$ , kjer je  $i_1$  tok skozi površino  $A_1$  itd. Pri enosmernih vezjih so toki konstantni in jih običajno pišemo z veliko tiskano črko  $I$  ( $i(t) = I$ ).



Vsota vseh tokov: delta reke Nil.

Zaključena površina lahko predstavlja tudi majhno področje, kjer se stikajo vodniki s toki. Temu stiku rečemo spojišče (včasih smo rekli tudi vozlišče). V tem smislu lahko za tokove, ki se združujejo v spojiščih zagotovo trdimo, da je njihova vsota enaka nič, kar predstavlja prvi Kirchoffov zakon:

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0 \quad \text{1. K.Z.}$$

**Z besedami: Vsota tokov v (ali iz) spojišča je enaka nič.**

**SLIKA: Vsota tokov v zaključeno površino/spojišče je enaka nič.**

Dogovoriti se moramo le še kdaj je tok pozitiven. Kot pozitiven tok lahko označimo tistega, ki priteka v ali odteka iz spojišča. Važno je le, da smo pri obravnavi konsistentni.

**Primer:** V spojišče so povezani štiri vodniki. Po prvem priteka tok 4 A, po drugem odteka tok 2 A in v tretjem priteka tok 1A. Določimo tok v četrtem vodniku.

SLIKA.

## 2. Kirchoffov zakon.

Kot smo že omenili v elektrostaticnih razmerah in v razmerah, ko je tok konstanten velja, da je delo po zaključeni poti enako nič, iz česar sledi tudi t.i. zakon o potencialnosti polja  $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ . Zaključeno pot lahko

razdelimo na M odsekov, in veljalo bo  $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{L_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{L_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \dots + \int_{L_M} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$  ali tudi

$U_1 + U_2 + \dots + U_M = 0$ , kar predstavlja 2. Kirchoffov

zakon. Zaključeno pot si lahko poljubno izberemo, pri vezjih jo izberemo tako, da poteka preko virov, bremen in prevodnih vezi (žic), ki jih bomo pri analizi vezij poimenovali veje. Drugi Kirchoffov zakon lahko krajše zapišemo v obliki

$$\sum_{i=1}^M U_i = 0 \quad \text{2. K.Z.}$$

**Z besedami: vsota padcev napetosti v (zaključeni !) zanki je enaka nič.**



W. Kandinsky

**SLIKA: Idealni napetostni generator in vzporedno vezani dve bremeni. Po 2. Kirchoffovem zakonu mora veljati, da je vsota vseh padcev napetosti v zanki enaka nič.**

**Primer:** Na akumulator z napetostjo 12 V zaporedno priključimo dve bremeni (dva upora). Kolikšna je napetost na drugem uporu, če na prvem izmerimo padec napetosti 4 V?  
SLIKA.

### Ohmov zakon

Kot smo že omenili, pri enosmernih vezjih obravnavamo le konduktivne toke, za katere smo ugotovili, da je povprečna hitrost gibanja nabojev sorazmerna električni poljski jakosti  $\langle \vec{v} \rangle = \mu \vec{E}$ , s tem pa tudi gostota toka:  $\vec{J} = \rho \vec{v} = \gamma \vec{E}$ . Nato smo material z znano specifično prevodnostjo ( $\gamma$ ) uporabili kot prevodnik in ugotovili, da v primeru prevodnika v obliki kvadra dolžine  $l$  in preseka  $A$  skozi prevodnik, ki je priključen na vir napetosti  $U$ , teče tok  $I = JA = \gamma EA = \gamma \frac{U}{l} A = \frac{\gamma A}{l} U = GU$ .

$G$  imenujemo prevodnost (enota S – Siemens). Lahko pa gornjo enačbo zapišemo tudi v še bolj znani obliki  $U = I / G = RI$ , kar bi lahko poimenovali Ohmov zakon v integralni obliki.

Če povzamemo: za bremena, ki jih bomo obravnavali pri analizi enosmernih vezjih velja linearna zveza (sorazmerje) med tokom in napetostjo. Večja kot je napetost na bremenu, večji tok teče skozi breme. Matematično to zapišemo kot

$$U = RI \quad \text{Ohmov zakon}$$

kjer  $R$  je električna upornost. Enota za upornost je  $\Omega$  (Ohm).

Poimenovanje **Ohmov zakon** moramo upoštevati z zadržkom. Zvezo med napetostjo in tokom na določenem elementu vedno lahko poiščemo, ni pa vedno linearna. V elektrotehniki pogosto uporabljamo elemente, kot so diode in tranzistorji. Pri teh ravno izkoriščamo njihove nelinearne lastnosti med tokom in napetostjo za usmerjanje, ojačanje, ipd. Ohmov zakon v smislu linearne zveze med tokom in napetostjo je omejen na tiste elemente, kjer je princip prevajanja konduktiven.\*

### SLIKA: Simbol za upor, grafično prikazana linearna zveza med tokom in napetostjo.

**Primer:** Iz I-U karakteristike upora določite njegovo vrednost in zapišite karakteristiko v matematični obliki.  
SLIKA.

\* Omejenost Ohmovega zakona ne sme zmanjšati njegovega zgodovinskega in praktičnega pomena. Kar se tiče zgodovine elektrike se je potrebno zavedati, da so bili sprva pojmi kot so naboj, tok in napetost še popolnoma nejasni in so različni raziskovalci preizkušali različne pojme. Ohm je na tem področju razjasnil razlike med napetostjo in tokom. Poleg tega seveda zvezo med tokom in napetostjo v elektrotehniki zelo pogosto uporabljamo in je za enostavne upore pogosto upravičena linearna zveza.

**Označevanje smeri tokov in napetosti.** Tako za napetost kot za tok določimo smer. Na viru označimo smer napetosti od sponke plus proti sponki minus, na bremenu pa lahko smer toka ali napetosti določimo poljubno. Ne pa tudi obeh. Smer toka na bremenu določa tudi smer napetosti in obratno ( $U = IR$ ).

**SLIKA: Označevanje smeri tokov in napetosti na virih in bremenu.**

## ELEKTRIČNI VIRI

Ločimo dva vira tipa virov: napetostne vire in tokovne vire. Obravnavali bomo idealni tokovni in napetostni vir ter realni tokovni in napetostni vir. Ugotovili bomo, da sta realna vira ekvivalentna, če imata enaki I-U karakteristiki.

### Idealni napetostni vir

Idealni napetostni vir zagotavlja na zunanjih sponkah konstantno napetost neodvisno od obremenitve. Tej napetosti rečemo tudi napetost odprtih sponk oziroma napetost prostega teka. I-U karakteristiko idealnega napetostnega vira zapišemo kot  $U = U_0$ .

**SLIKA: Simbol za idealni napetostni vir, napetost odprtih sponk in karakteristika vira.**

Problem predstavitve (uporabe) idealnih virov je v tem, da je tok kratkega stika pri napetostnem viru neskončen (ker je notranja upornost idealnega napetostnega vira enaka nič), prav tako je neskončna napetost na odprtih sponkah idealnega tokovnega vira (notranja upornost takega vira je neskončna).

V realnih razmerah je potrebno upoštevati še notranjo upornost tako tokovnega kot napetostnega vira. Za tak vir uporabimo izraz realen vir, kljub temu, da je v realnosti lahko električna karakteristika pravega vira še bolj zapletena.

### Realni napetostni vir

Govorili smo že o idealnem napetostnem viru, za katerega smo rekli, da ima napetost na zunanjih sponkah konstantno in neodvisno od priključenega bremena. Takih virov seveda ni,

če na slab napetostni vir priključimo »preveliko« breme (v resnici je to breme z majhno notranjo upornostjo), se na zunanjih sponkah vira napetost »sesede«. Vsak vir ima namreč določeno notranjo upornost in ob priključitvi vira na breme steče tok, ki povzroči padec napetosti na bremenu, pa tudi na notranji upornosti vira. Kar tudi pomeni, da na zunanjih sponkah vira nimamo več napetosti odprtih sponk pač pa neko manjšo napetost, ki je zmanjšana za padec napetosti na notranji upornosti vira. Poglejmo si razmere matematično in grafično:

### SLIKA: realni napetostni vir.

Realni napetostni vir ponazorimo z zaporedno vezavo idealnega napetostnega vira in upora. Če na priključnih sponkah ni priključeno breme, je seveda tok enak nič in padca napetosti na upornosti vira ni. Napetost na priključnih sponkah je enaka napetosti odprtih sponk:  $U = U_g = U_o$ . Če pa priključimo breme, se napetost na priključnih sponkah zmanjša za padec napetosti na notranji upornosti generatorja:  $U = U_g - IR_g$ . To enačbo lahko prikažemo tudi grafično in ji rečemo *karakteristika vira*. Na X osi (abscisi) označimo napetost, na Y osi (ordinati) pa tok. Enačba predstavlja enačbo premice, ki jo najlažje določimo v točkah, kjer premica seka X in Y os, napetostno in tokovno os. Ko je tok enak nič, je  $U = U_o = U_g$ , to je stanje odprtih sponk, napetosti pa rečemo **napetost odprtih sponk**. Ko pa je napetost enaka nič, je tok enak  $I_k = U_g / R_g$ . To pa je stanje kratkega stika, toku rečemo **tok kratkega stika ali kratkostični tok**. Med točkama kratkega stika in napetostjo odprtih sponk mora potekati premica, ki ji rečemo **karakteristika realnega vira**.

Samo karakteristika vira še ne zadostuje za določitev napetosti na bremenu. Potrebujemo še *karakteristiko bremena*. Ta je preprosta, saj ko na priključne sponke priključimo breme, je na bremenu napetost  $U$  in velja:  $U = R_b I$ . Če narišemo še to enačbo v diagram, tudi ta predstavlja enačbo premice. Ena točka je v koordinatnem izhodišču, drugo pa določimo tako, da za določeno izbrano vrednost toka (napetosti) izračunamo vrednost napetosti (toka) in vrišemo še drugo točko ter potegnemo premico. Naklon premice predstavlja upornost. Velik naklon predstavlja majhno upornost, majhen naklon pa veliko upornost.

Premici imata presečišče, ki ga imenujemo **delovna točka**. To je namreč točka, ki ponazarja »delovno« stanje vezja. Odčitamo lahko tok in napetost delovne točke. To je tok, ki teče skozi breme, napetost pa je napetost na bremenu. Ta način določanja delovne točke imenujemo *grafičen način*.

Določimo delovno točko še matematično. To naredimo tako, da združimo enačbi bremena in vira. Dobimo  $R_b I = U_g - IR_g$ . Tok v vezju bo torej  $I = \frac{U_g}{R_g + R_b}$ , napetost na bremenu pa

$U = \frac{U_g}{R_g + R_b} R_b$ . To sta tudi tok in napetost v delovni točki, ki jih odčitamo tudi grafično.

**Primer:** Na 9 V baterijo z notranjo upornostjo  $1 \Omega$  priključimo breme z upornostjo  $5 \Omega$ . Določite napetost in tok na bremenu grafično in analitično.

Izračun: 
$$I = \frac{U_g}{R_g + R_b} = \frac{9\text{V}}{1\Omega + 5\Omega} = 1,5\text{A}, \quad U = 1,5\text{A} \cdot 5\Omega = 7,5\text{V}.$$

### Idealni tokovni vir

Idealni tokovni vir na svojih sponkah zagotavlja tok, ki je neodvisen od priključitve bremena. Matematično zapišemo karakteristiko takega vira kot  $I = I_0$ . V primeru, da sponke takega vira kratko sklenemo, bo tekel tok kratkega stika, kar predstavlja tudi nazivni tok tega vira.

**SLIKA: Simbol za idealni tokovni vir, tok kratkega stika in karakteristika vira.**

### Realni tokovni vir

Je sestavljen iz idealnega tokovnega vira s tokom  $I_g$  in vzporedno vezane upornosti  $R_g$ . Če ni priključenega bremena, je na zunanjih sponkah napetost enaka  $U = R_g I_g$ . Če je na zunanji sponki priključeno breme (upor  $R_b$ ), se tok skozi breme zmanjša za tok skozi upornost vira:  $I = I_g - U / R_g$ . Ta enačba predstavlja karakteristiko realnega tokovnega vira, ki jo prav tako lahko grafično prikažemo. Pri kratkem stiku je napetost na bremenu enaka nič, tok pa je kar tok idealnega tokovnega vira in ga imenujemo tudi tok kratkega stika:  $I(U = 0) = I_k = I_g$ , pri odprtih sponkah pa je tok  $I$  enak nič, napetost pa napetost odprtih sponk  $U_o = I_g R_g$ . Če karakteristiko narišemo kot  $U$ - $I$  diagram, dobimo zopet premico. V presečišču s karakteristiko bremena pa delovno točko.

**SLIKA: Realni tokovni vir.**

Ugotovimo lahko, da se *karakteristika realnega tokovnega vira lahko prilega karakteristiki realnega napetostnega vira. V tem smislu sta to dva ekvivalentna vira.* Če primerjamo karakteristiki ugotovimo, da bo analogija veljala tedaj, ko bo  $U_g = I_g R_g$ .

Vprašanje: Kdaj torej govorimo o napetostnem in kdaj o tokovnem viru? Ko imamo vir z zelo veliko notranjo upornostjo nam le ta zagotavlja konstanten tok (dokler je upornost bremena dosti manjša od notranje upornosti vira, če pa je notranja upornost vira zelo majhna, nam to na zunanjih sponkah zagotavlja konstantno napetost.

**Vzporedna in zaporedna vezava virov.** Enako kot upore, lahko zaporedno vežemo tudi napetostne vire in s tem dosežemo višjo skupno napetost na zunanjih sponkah. To je tudi

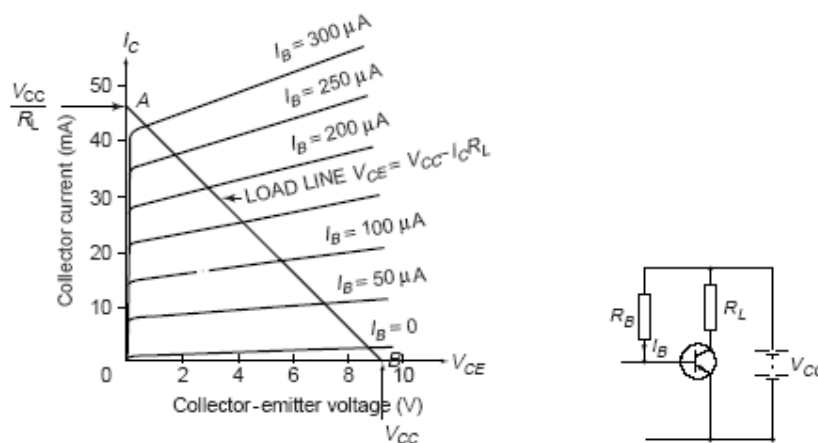
običajno narejeno pri mnogih elektronskih aparatih, kjer je na primer za delovanje naprave pri 6 V potrebno povezati zaporedno štiri 1,5 V baterije.

Podobno lahko z vzporedno vezavo tokovnih virov dosežemo vir z večjim nazivnim tokom

### SLIKA: Zaporedna vezava napetostnih virov in vzporedna vezava tokovnih virov.

**Nelinearno breme.** Grafični način je posebno primeren tedaj, ko je breme nelinearno. Ko je napetost na sponkah bremena neka nelinearna funkcija toka skozi breme. Na primer  $U = kI^2$ . Tak primer je na primer dioda, element, ki ima nizko upornost pri pozitivnih in zelo visoko pri negativnih napetostih (ali obratno, odvisno od priključitve). Pri diodi je v prevodni smeri tok eksponentno odvisen od napetosti:  $I = I_0 e^{kU}$ , v zaporni smeri pa je tok majhen, do določene napetosti, kjer pride do preboja. Ob preboju tok skozi diodo močno naraste in lahko pride do trajne poškodbe ali uničenja elementa. Delovno točko določimo grafično, tako, da določimo točko preseka nelinearne karakteristike bremena in linearne karakteristike realnega vira.

### SLIKA: Primer določanja delovne točke pri priključitvi diode na realni napetostni vir.



SLIKA: Primer določanja delovne točke pri tranzistorski vezavi. Nelinearne so karakteristike tranzistorja, ki so prikazane za različne vrednosti baznega toka. (samo informativno)

**Vprašanja za obnovo:**

- 1) Razložite 1. in 2. Kirchoffov zakon in od kod izhajata?
- 2) Razložite Ohmov zakon. Od kod izhaja? Kakšne so omejitve tega zakona?
- 3) Razložite idealni in realni napetostni vir matematično in grafično (I-U karakteristika). Kaj je to karakteristika vira, karakteristika bremena?
- 4) Kaj je delovna točka, kako jo določimo?

**Primeri kolokvijskih in izpitnih nalog**

- 1. kol. 3.12.2007, nal. 5
- 1. kol. 5.12. 2006, nal. 5