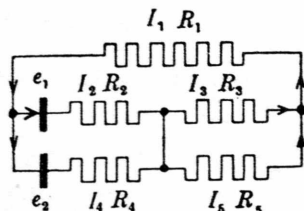


2.4. Kirchhoffove zákony. Zdrojom elektrického prúdu môže byť akékoľvek zariadenie, na ktorého dvoch svorkách sa aj pri odbere prúdu udržuje potenciálový rozdiel, ktorý sa nazýva *svorkové napätie*. Zo zdrojov elektrického prúdu a vodičov možno zostaviť *sieť* (obr. 2.7) s jedným alebo väčším počtom *okruhov*. Miesta, v ktorých sa vodiče rozvetvujú, nazývajú sa *uzly*. Jednotlivé uzly spájajúce cesty sa nazývajú *vetvy*.

Majme na mysli sieť zloženú z vodičov s nie veľmi malými odporami a z elektricky nabitých kondenzátorov s nie veľmi malými kapacitami, aby sa prúdy vo vetvách siete nemenili s časom príliš rýchle. Ako už vieme (čl. 2.1) na to, aby prúd vo vetve siete bol jednoznačne určený, musí byť vetva orientovaná.



Obr. 2.7.

Kirchhoffove zákony, ktoré — ako uvidíme — sú jednoduchými dôsledkami Ohmovho zákona a zákonov elektrických polí, umožňujú vypočítať tieto prúdy. Pre ich formuláciu treba však vopred povedať aj to, čo sa bude nazývať napätím u na kondenzátore, lebo o sebe aj táto veličina je dvojznačná. Je všeobecným zvykom, ktorého sa aj my budeme pridriavať, nazývať napätím na kondenzátore, ktorý sa nachádza vo vetvi elektrickej siete, rozdiel

potenciálov vstupnej a výstupnej svorky kondenzátora s ohľadom na ľubovoľne, avšak pre pripravovaný výpočet pevne zvolené obiehanie príslušného okruhu siete. Elektromotorickou silou (*ems*) nabitého kondenzátora sa nazýva potom rozdiel týchže potenciálov, avšak v opačnom poradí, t. j. rozdiel potenciálov výstupnej a vstupnej svorky kondenzátora, takže $ems = -u$. Do okruhu siete vradené kondenzátory, ak to bude potrebné, budeme na obrázkoch vyznačovať dvoma vzájomne rovnobežnými a rovnako dlhými úsečkami, avšak nerovnako hrubými. Keď k tomuto znaku bude pripísané písmeno e , bude značiť rozdiel potenciálov zodpovedajúcich slabo a hrubo vytiahnutej úsečke v tomto poradí. Podľa obiehania okruhu bude potom elektromotorická sila kondenzátora $+e$ alebo $-e$.

Po zavedení týchto pojmov a označení možno Kirchhoffove zákony vysloviť vetami:

1. Algebraický súčet prúdov do toho istého uzla pritekajúcich alebo od toho istého uzla odtekajúcich sa rovná nule,

$$\sum I_i = 0 \quad (1)$$

Ináč by sa v uzle hromadil náboj, čo však nie je možné, lebo elektrická kapacita uzla siete je veľmi malá.

2. V každom okruhu siete súčet elektromotorických síl udržiavajúcich elek-

trický prúd vo zvolenom smere sa rovná súčtu napätí na jednotlivých vodičoch, daných Ohmovým zákonom v tvare súčtov IR ,

$$\sum ems_i = \sum I_k R_k, \quad (2)$$

lebo pozdĺž každého okruhu súčet vzostupov elektrického potenciálu sa rovná súčtu jeho poklesov.

Poznámka: Počet rovníc, ktoré možno pre danú sieť napísať pomocou Kirchhoffových zákonov, je obyčajne väčší, ako počet vetiev siete. Na prvý pohľad to teda vyzerať tak, ako keby prúdy v týchto rovnicách pri daných odporoch vetiev a elektromotorických silách v okruhoch boli preurčené. V skutočnosti tieto rovnice nie sú všetky od seba nezávislé. Možno dokázať, že počet od seba nezávislých rovníc, ktoré pre danú sieť možno napísať pomocou Kirchhoffových zákonov, rovná sa práve počtu vetiev siete. Počet od seba nezávislých rovníc, ktoré možno napísať pomocou prvého Kirchhoffovho zákona, rovná sa počtu v sieti prítomných od seba nezávislých uzlov, a počet od seba nezávislých rovníc, ktoré možno napísať pomocou druhého Kirchhoffovho zákona, rovná sa počtu v sieti prítomných od seba nezávislých okruhov. Pritom každý ďalší uzol je od uzlov už zvolených nezávislý, keď sa v ňom začína alebo končí aspoň jedna vetva, ktorá sa nezačína ani nekončí ani v jednom uzle, ktoré už boli za nezávislé zvolené. To isté platí aj pre nezávislé okruhy.

V dôsledku vzťahu medzi napätím a elektromotorickou silou do vetvy okruhu siete vradeného kondenzátora $ems = -u$ 2. Kirchhoffov zákon možno vysloviť aj vetou: Súčet napätí na úsekoch okruhu siete sa rovná nule, $\sum u_i = 0$.

Pretože galvanický článok (čl. 3.5) možno považovať za dvojicu kondenzátorov, tvorených dvojrivrstvami na povrchu elektród v sériovom zapojení, Kirchhoffove zákony, ako sme ich formulovali, možno v nezmenenom znení použiť aj na výpočet prúdov v sieti s galvanickými článkami. Treba pritom mať na zreteli len okolnosť, že elektromotorickou silou galvanického článku sa obyčajne nazýva rozdiel potenciálov kladného a záporného pólu nepracujúceho článku, takže túto pri písaní rovníc podľa 2. Kirchhoffovho zákona treba preto brať so znamienkom kladným alebo záporným podľa toho, či kladný pól článku s ohľadom na zvolené obiehajúce okruhu je jeho výstupnou alebo vstupnou svorkou. V sieti znázornenej na obr. 2.7 podľa prvého Kirchhoffovho zákona platí:

$$I = I_2 + I_4, \quad I_2 + I_4 = I_3 + I_5$$

a podľa druhého

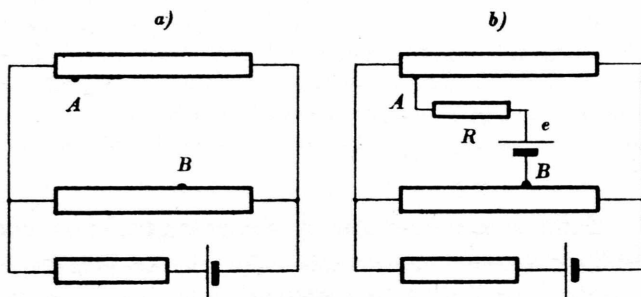
$$-e_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3$$

$$e_1 - e_2 = I_4 R_4 - I_2 R_2, \quad I_3 R_3 = I_5 R_5$$

Neskoršie sa presvedčíme aj o tom, že Kirchhoffove zákony sú použiteľné aj pre výpočet prúdov v sieti, v ktorej sú aj zdroje striedavého prúdu, indukčné cievky a transformátory.

Príklad 1. Majme na mysli ľubovoľnú sieť jednosmerného prúdu, v ktorej je aspoň jeden zdroj prúdu, najlepšie galvanický článok. Jej nahodile zvolené dva body, napr. A a B siete podľa obr. 2.8a, keďže rozdiel ich potenciálov vo všeobecnosti sa nerovná nule, môžeme považovať za svorky upraveného zdroja prúdu.

Našou úlohou nech je vypočítať prúd I vo vodivom spojení bodov A a B , v ktorom v sériovom zapojení nech je odpor R a napríklad ešte galvanický článok s elektromotorickou silou e , zapojený podľa obr. 2.8b.



Obr. 2.8.

Podľa Kirchhoffových zákonov prúd v ľubovoľnej vetve siete je homogénnou lineárnou funkciou všetkých ems. Pre prúd I vo vodivom spojení bodov A a B môžeme preto písať $I = \sum G_i e_i + Ge$, kde e_i je i -tá ems. siete a G_i a G sú tzv. vodivostné koeficienty.

Medzi bodmi A a B siete podľa obr. 2.8a je tzv. napätie na prázdno u_0 . Keď zvolíme $e = u_0$, bude $I = 0$. To značí, že je $\sum G_i e_i = -Gu_0$, takže pre prúd I môžeme písať

$$I = G(e - u_0) \quad (\text{a})$$

Keď vyradíme zo siete všetky pôvodné ems. e_i a ponecháme len ems. e vo vodivom spojení bodov A a B , bude $u_0 = 0$ a teda $I = Ge$. Tento prúd možno však vypočítať aj priamo podľa Ohmovho zákona, $I = \frac{e}{R + R_v}$, kde R_v je tzv. vnútorný odpor siete medzi jej bodmi A a B . Z porovnania obi-

dvoch vyjadrení prúdu I dostávame $G = \frac{1}{R + R_v}$, takže prúd vo vodivom spojení bodov A a B , podľa vzorca (a), je vo všeobecnosti

$$I = \frac{u_0 - e}{R + R_v} \quad (b)$$

Vnútrotný odpor siete R_v môžeme určiť tak, že volíme $e = 0$, $R = 0$, takže je $R_v = u_0/I_0$, kde I_0 je tzv. *prúd na krátko*.

2.5. Elektrónová a dierová vodivosť polovodičov. Pevné látky možno podľa ich elektrickej vodivosti rozdeliť do troch skupín: na *vodiče*, *nevodiče* a *polovodiče*. Merná elektrická vodivosť pevných vodičov, medzi ktoré patria kovy a elektricky vodivé modifikácie uhlíka, pohybuje sa okolo 10^6 až 10^7 ohm⁻¹ m⁻¹. Merná vodivosť dobrých nevodičov (izolátorov) býva 10^{-8} až 10^{-13} ohm⁻¹ m⁻¹. Merná elektrická vodivosť polovodičov sa pohybuje v širokých hraniciach asi od 10^{-8} ohm⁻¹ m⁻¹ až do 10^6 ohm⁻¹ m⁻¹. V dnešnej elektrotechnickej a fyzikálnej praxi z polovodičov sa používajú najmä prvky germánium, kremík a selén a okrem toho rôzne kyslíčniky a sírniky kovov.

Polovodiče a niektoré ich vlastnosti boli známe a používané už aj v minulom storočí, napríklad závislosť elektrickej vodivosti selénu od osvetlenia sa využívala na konštrukciu prístrojov na meranie intenzity osvetlenia. Sústavný výskum polovodičov nastal však až v dvadsiatich rokoch nášho storočia, keď sa zistilo, že niektoré polovodiče možno použiť na konštrukciu veľmi citlivých usmerňovačov striedavých prúdov aj veľmi vysokej frekvencie (kryštálové detektory modulovaných rozhlasových elektromagnetických vln), iné na konštrukciu veľmi účinných usmerňovačov aj veľmi silných striedavých prúdov. Záujem o polovodiče sa ešte zvýšil r. 1948, keď bol zostrojený prvý *tranzistor*, čím sa rozumie z polovodičov zhotovené a preto veľmi úsporne pracujúce zariadenie nahradzujúce jednomriežkovú vákuovú elektrónku so žeravenou katódou.

Polovodiče sa od vodičov a nevodičov nelíšia len veľkosťou svojej elektrickej vodivosti, ale aj jej závislosťou od teploty a mechanizmom tejto vodivosti. Zatiaľ čo elektrická vodivosť kovov sa s rastúcou teplotou znižuje, elektrická vodivosť polovodičov, podobne ako vodivosť nevodičov, napríklad skla a iónových kryštálov, sa s rastúcou teplotou zväčšuje. Závislosťou svojej elektrickej vodivosti od teploty sa teda polovodiče podobajú nevodičom.

Najvýznamnejšou vlastnosťou polovodičov je, že ich elektrická vodivosť môže byť dvojaká: *elektrónová* (typu n , negatívna) a *dierová* (typu p , pozitívna). Vysvetlíme vec na príkladoch. Atómy chemicky štvormocného prvku germánia, ktorý sa svojimi chemickými vlastnosťami podobá kremíku, majú po 4 valenč-