

MILAN BEDNAŘÍK, EMANUEL SVOBODA  
A KOLEKTÍV

# FYZIKA

---

PRE 2. ROČNÍK GYMNÁZIÍ

---

*ELEKTRICKÉ POLE  
ELEKTRICKÝ PRÚD*

SLOVENSKÉ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVO BRATISLAVA

Vzhľadom na úpravu učebných osnov na gymnáziu vychádza táto publikácia ako separát, ktorý sa skladá z kapitoly 8. Elektrické pole z učebnice Fyziky pre 1. ročník gymnázia a z kapitoly Elektrický prúd v látkach z učebnice Fyziky pre 2. ročník gymnázia. Zaradené sú v ňom aj príslušné cvičenia.

Autori © RNDr. Milan Bednařík, CSc., prof. RNDr. Emanuel Svoboda, CSc., RNDr. Ivan Baník, CSc., doc. RNDr. Jaroslav Kotleba, CSc., RNDr. Eva Tomanová

Lektorovali: prof. RNDr. Július Krempaský, DrSc., RNDr. Jaroslav Krejčí, doc. RNDr. Oldřich Lepil, CSc., RNDr. Arnošt Hladík, CSc., RNDr. Júliu Šoltés, JČSMF

Translation © RNDr. Eva Tomanová, Anna Nováková

Schválilo Ministerstvo školstva SSR dňa 7. 4. 1983 pod číslom 2311/1983-21 ako 1. vydanie učebnice vyučovacieho predmetu fyzika pre 1. ročník gymnázia a 26. 1. 1984 pod číslom 692/1984-21 ako prvé vydanie učebnice pre druhý ročník gymnázia.

Prvé vydanie, 1993.

Všetky práva vyhradené. Toto dielo ani žiadnu jeho časť nemožno reprodukovat' bez súhlasu majiteľa práv.

ISBN 80-08-02100-4

# OBSAH

<b>1. ELEKTRICKÉ POLE</b>	<b>/ 5</b>
1.1 Elektrický náboj a jeho vlastnosti	/ 5
1.2 Silové pôsobenie elektrických nábojov. Coulombov zákon	/ 10
1.3 Intenzita elektrického poľa	/ 13
1.4 Práca v homogénnom elektrickom poli	/ 16
1.5 Elektrický potenciál	/ 19
1.6 Elektrické napätie. Millikanov pokus	/ 21
1.7 Rozmiestenie elektrického náboja na vodiči	/ 25
1.8 Kapacita vodiča a kondenzátor	/ 26
1.9 Spájanie kondenzátorov	/ 30
Zhrnutie — Elektrické pole	/ 33
Statické silové polia	/ 35
<b>2. ELEKTRICKÝ PRÚD</b>	<b>/ 39</b>
2.1 Vodič v elektrickom poli	/ 39
2.2 Izolant v elektrickom poli	/ 42
2.3 Vznik jednosmerného prúdu	/ 44
2.4 Elektrický zdroj	/ 48
Zhrnutie — Elektrický prúd	/ 53
<b>3. ELEKTRICKÝ PRÚD V KOVOCH</b>	<b>/ 55</b>
3.1 Elektrónová vodivosť kovov	/ 56
3.2 Ohmov zákon pre časť elektrického obvodu	/ 58
3.3 Elektrický odpor	/ 60
3.4 Ohmov zákon pre uzavretý obvod	/ 62
3.5 Kirchhoffove zákony	/ 66
3.6 Praktické aplikácie Kirchhoffových zákonov	/ 71
3.7 Práca a výkon v obvode s konštantným prúdom	/ 75
Zhrnutie — Elektrický prúd v kovoch	/ 78
<b>4. ELEKTRICKÝ PRÚD V POLOVODIČOCH</b>	<b>/ 81</b>

- 4.1 Pojem polovodiča / 81
- 4.2 Vlastné polovodiče / 84
- 4.3 Nevlastné (prímesové) polovodiče / 86
- 4.4 Diódový jav a jeho technické využitie / 89
- 4.5 Tranzistorový jav a jeho technické využitie / 94
- 4.6 Prednosti a perspektívy polovodičovej techniky. Integrované obvody / 100
- Zhrnutie — Elektrický prúd v polovodičoch / 101

## **5. ELEKTRICKÝ PRÚD V ELEKTROLYTOCH / 103**

- 5.1 Elektrolytický vodič / 103
- 5.2 Závislosť prúdu v elektrolyte od napätia / 104
- 5.3 Faradayove zákony elektrolýzy / 106
- 5.4 Galvanické články / 109
- 5.5 Technické využitie elektrolýzy. Korózia kovov / 113
- Zhrnutie — Elektrický prúd v elektrolytoch / 115

## **6. ELEKTRICKÝ PRÚD V PLYNOCH A VO VÁKUU / 117**

- 6.1 Ionizácia plynov / 117
- 6.2 Voltampérová charakteristika výboja / 121
- 6.3 Katódové žiarenie / 124
- 6.4 Termoemisia elektrónov a jej praktické využitie / 127
- Zhrnutie — Elektrický prúd v plynoch a vo vákuu / 130

## **CVIČENIA Z FYZIKY / 131**

- Cvičenie 1 — Úlohy na pohyb nabitej častice v elektrickom poli / 131
- Cvičenie 2 — Meranie elektrického napätia a elektrického prúdu / 136
- Cvičenie 3 — Obvody s konštantným prúdom / 142
- Cvičenie 4 — Meranie elektrického odporu rezistora / 147
- Cvičenie 5 — Závislosť svorkového napätia zdroja od elektrického prúdu v obvo-  
de / 151
- Cvičenie 6 — Určenie charakteristiky polovodičovej diódy / 153

# 1. Elektrické pole

## 1.1 Elektrický náboj a jeho vlastnosti

Zo skúsenosti vieme, že ak trieme celuloidové pravítko vlnenou látkou, priťahuje ľahké kusy papiera, hrebeň priťahuje pri česaní suché vlasy, časti odevu zo syntetických vlákien pri vyzliekaní priľnú k nášmu telu. Pritom v niektorých prípadoch počujeme slabé praskanie a v tme vidíme drobné iskrenie.

Príčinou spomenutých javov je elektrický náboj, ktorý vzniká pri vzájomnom styku niektorých telies (napríklad pri trení) na ich povrchu. O telese, ktoré má elektrický náboj, hovoríme, že je zelektrizované, alebo že je **elektricky nabité**. Slabý praskot alebo iskrenie je dôsledkom vzájomného vybíjania zelektrizovaných telies.

Veľkosť elektrického náboja  $Q$  (veľičina elektrický náboj) sa meria v jednotkách coulomb\*, značka  $C$ .

Zo základnej školy viete, že niektoré častice látok majú elektrický náboj. Elektrický náboj je základná vlastnosť týchto častíc. Pre jednoduchšie vyjadrovanie však namiesto o časticách s nábojom, o vlastnostiach častíc s nábojom, o pohybe častíc s nábojom, o silách, ktoré pôsobia medzi časticami s nábojom, hovoríme iba o nábojoch, o pohybe nábojov, o silách pôsobiacich medzi nábojmi a pod.

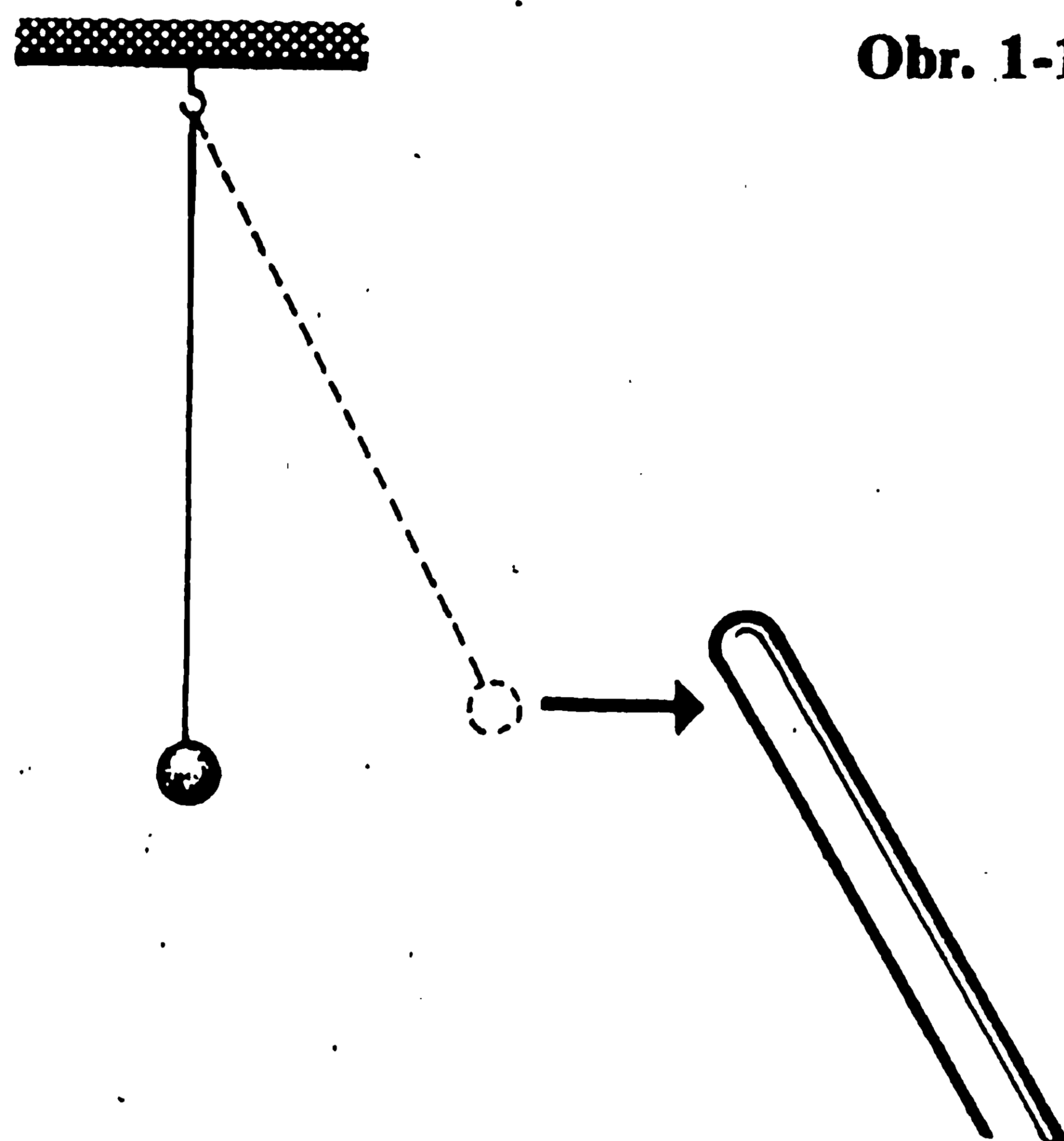
Elektrický náboj má veľa dôležitých vlastností; s niektorými z nich ste sa už oboznámili:



\* CHARLES COULOMB (čítaj šárl kúlom; 1736—1806), francúzsky fyzik.

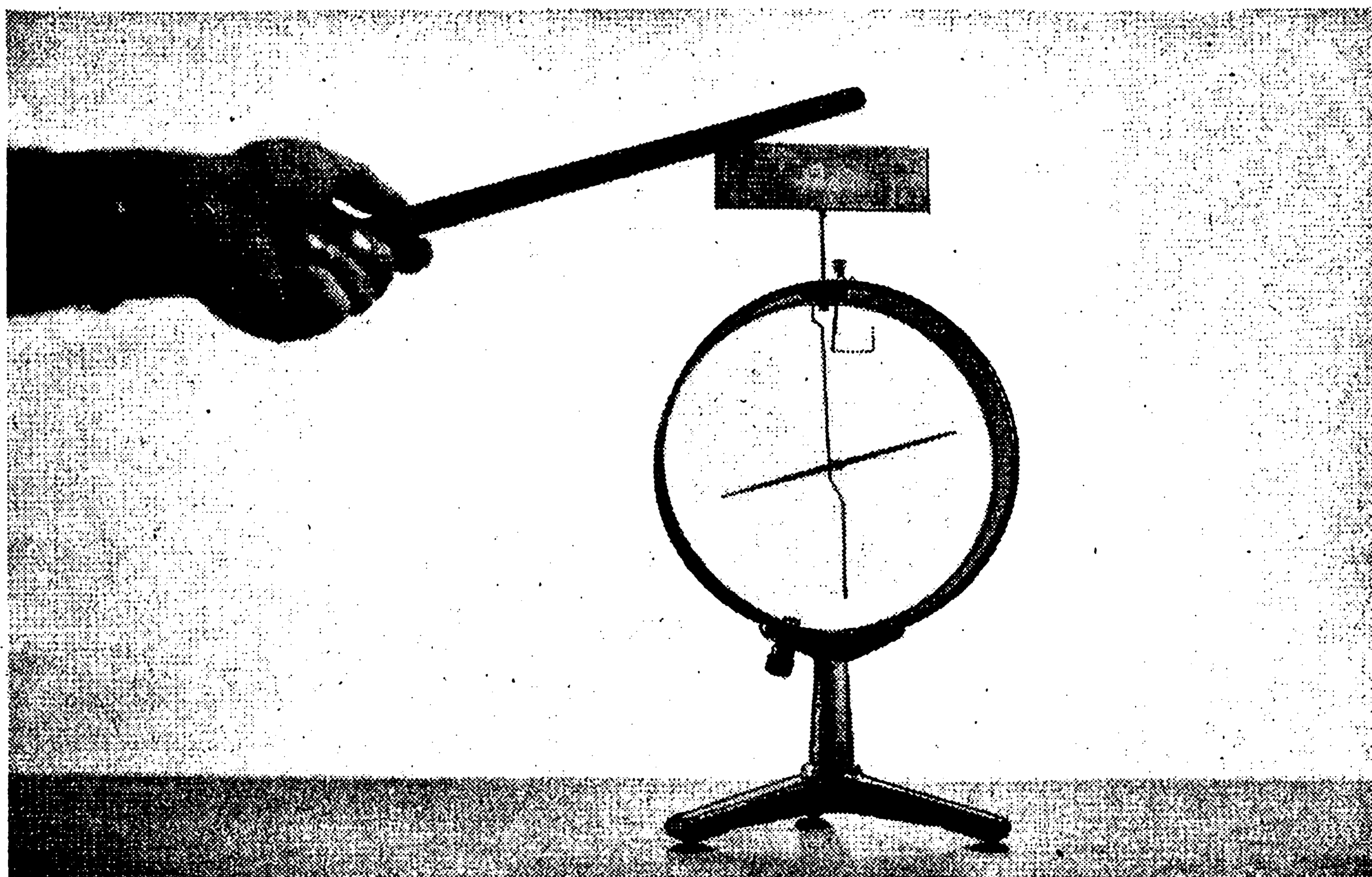
1. Elektricky nabité teleso pôsobí silou na iné telesá. Napríklad zelektrizovaná tyč z novoduru priťahuje guľôčku elektrického kyvadielka (obr. 1-1).

2. Elektrický náboj môžeme dotykom preniesť z povrchu jedného telesa na povrch iného telesa. Napríklad z elektricky nabitej tyče preniesieme náboj pomocou skúšobnej guľôčky na elektroskop (obr. 1-2) alebo na



Obr. 1-1

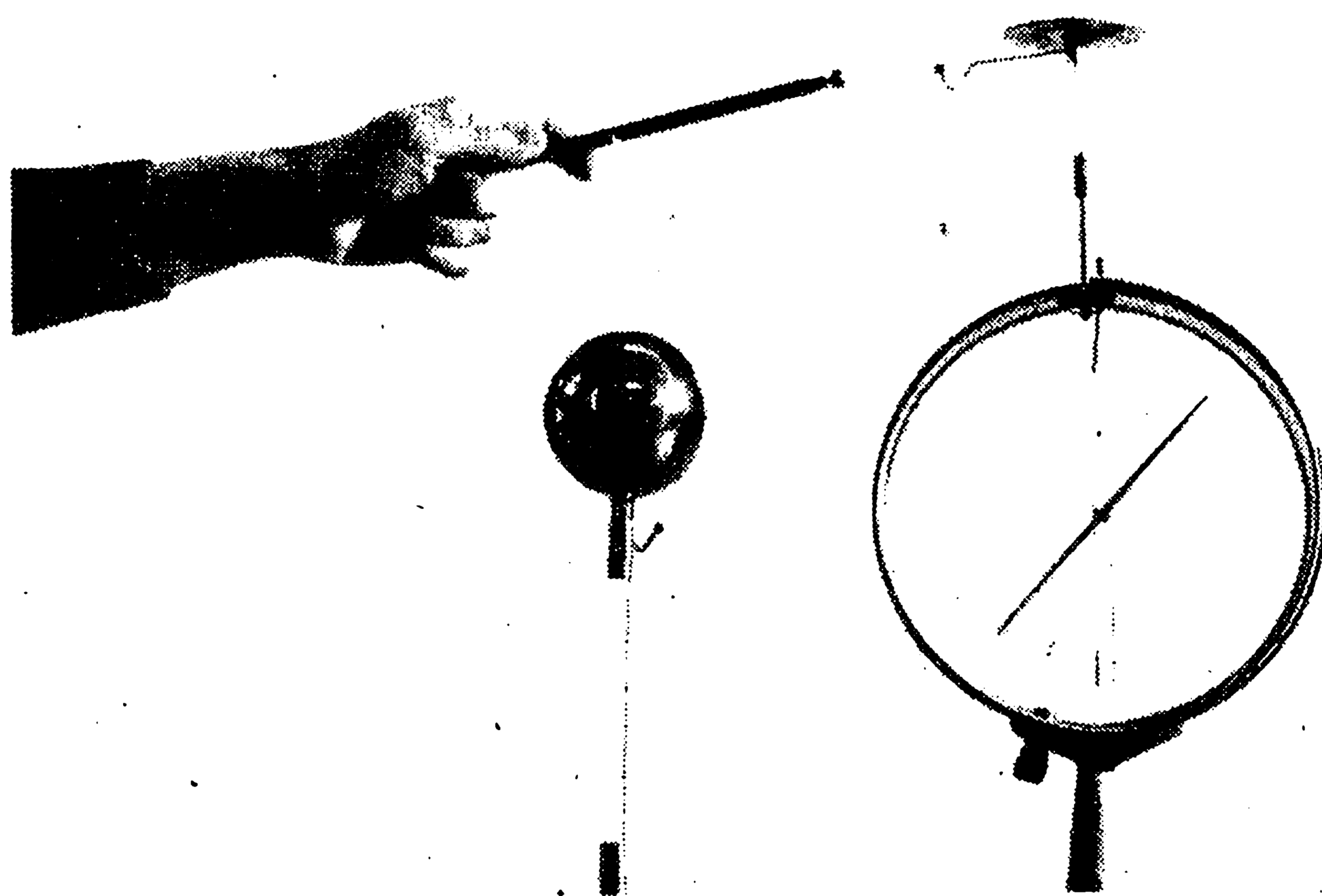
Obr. 1-2



elektrometer (obr. 1-3). Ručička prístroja sa vychýli tým viac, čím väčší náboj prenesieme na prístroj.

3. Elektrický náboj sa môže premiestovať aj v telese. Látky, v ktorých sa elektrický náboj ľahko premiestuje, volajú sa **vodiče**. Látky, v ktorých sa náboje nepremiestujú, sú **izolanty** alebo dielektriká.

Vlastnosti vodičov a izolantov ukážeme pokusom s dvoma elektroskopmi, ktoré spájame tyčami z rôznych materiálov. Jeden elektroskop nabijeme a pozorujeme, či sa premiestuje elektrický náboj na druhý elektroskop.



Obr. 1-3

4. Existujú dva **druhy elektrického náboja**. Jeden označujeme ako kladný, druhý ako záporný. Kladný elektrický náboj má napr. sklená tyč, ktorú sme trelí kožou, záporný elektrický náboj má tyč z novoduru, ktorú sme trelí srstou.

5. Dve telesá so súhlasnými elektrickými nábojmi sa navzájom odpudzujú, dve telesá s nesúhlasnými elektrickými nábojmi sa navzájom priťahujú. Keď nabijeme napríklad guľôčku elektrického kyvadielka tyčou z novoduru, guľôčka sa od nej odpudzuje, ale k zelektrizovanej sklenej tyči sa priťahuje. Na vzájomnom odpudzovaní dvoch nesúhlasných nábojov je založená funkcia elektroskopu a elektrometra.

6. Elektrický náboj je deliteľný. Nemôžeme ho deliť neomedzene, ale iba po elementárny náboj. Keď napr. prenášame skúšobnou guľôčkou

elektrický náboj na elektrometer, výchylka jeho ručičky sa po každom dotyku zväčší.

7. Nosiče elektrických nábojov v atóme sú protóny a elektróny. Elektrický náboj protónu je kladný, elektrónu záporný, pričom náboje všetkých protónov a elektrónov sú rovnako veľké. Experimentálne sa dokázalo, že sú to **elementárne náboje**, ktoré nemožno ďalej rozdeliť. Veľkosť elementárneho náboja  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

8. Každý atóm predstavuje sústavu kladných nábojov  $+e$  umiestených v jadre atómu a sústavu záporných nábojov  $-e$  rozložených v jeho elektrónovom obale. Keď sa súčet nábojov  $+e$  rovná súčtu nábojov  $-e$ , atóm je navonok elektricky neutrálny. Neutrálne je aj teleso, v ktorom sú všetky kladné elementárne náboje rovnomerne rozmiestené a kompenzované rovnakým počtom rovnomerne rozmiestенých záporných elementárnych nábojov.

9. Elektróny v elektrónovom obale atómu sú viazané elektrickými silami k jeho jadrú. Keď sa z obalu odpúta jeden alebo viac elektrónov, vzniká z pôvodne neutrálneho atómu **kladný ión**, pripojením jedného alebo viacerých elektrónov k obalu vzniká **záporný ión**.

10. V atómoch kovov elektróny najviac vzdialené od jadier atómov sa od nich ľahko odpútavajú. Vznikajú **voľné elektróny**, ktoré tvoria v štruktúre kovov **elektrónový plyn**, ktorý spôsobuje dobrú elektrickú vodivosť kovov. V nekovových látkach je oveľa menej voľných elektrónov ako v kovoch.

11. Pri trení dvoch telies (napr. novodurovej tyče srstou) nastáva premiestňovanie elektrónov z jedného telesa na druhé (napr. zo srsti na tyč). Tento jav sa nazýva **elektrizovanie telies**. Teleso s nadbytkom  $n$  voľných elektrónov má záporný náboj  $Q_1 = -n e$ , teleso, ktorému chýba  $n$  elektrónov, má kladný náboj  $Q_2 = n e$ .

12. Keď priblížime elektricky nabitú teleso k nenabitú izolovanému kovovému vodiču, vo vodiči nastáva pohyb voľných elektrónov. Na bližšej strane k nabitú telesu prevláda na izolovanom vodiči náboj opačného znamienka, na vzdialenejšej strane prevláda náboj rovnakého znamienka, ako má nabitú teleso. Rozloženie elektrických nábojov vo vodiči je také, že vnútri vodiča nie je žiadne elektrické pole. Utvorí sa ustálený stav, pri ktorom sa voľné elektróny v telese nepremiestňujú. Tento jav sa nazýva **elektrostatická indukcia**. Ak vodič uzemníme, zostane nabitý indukova-

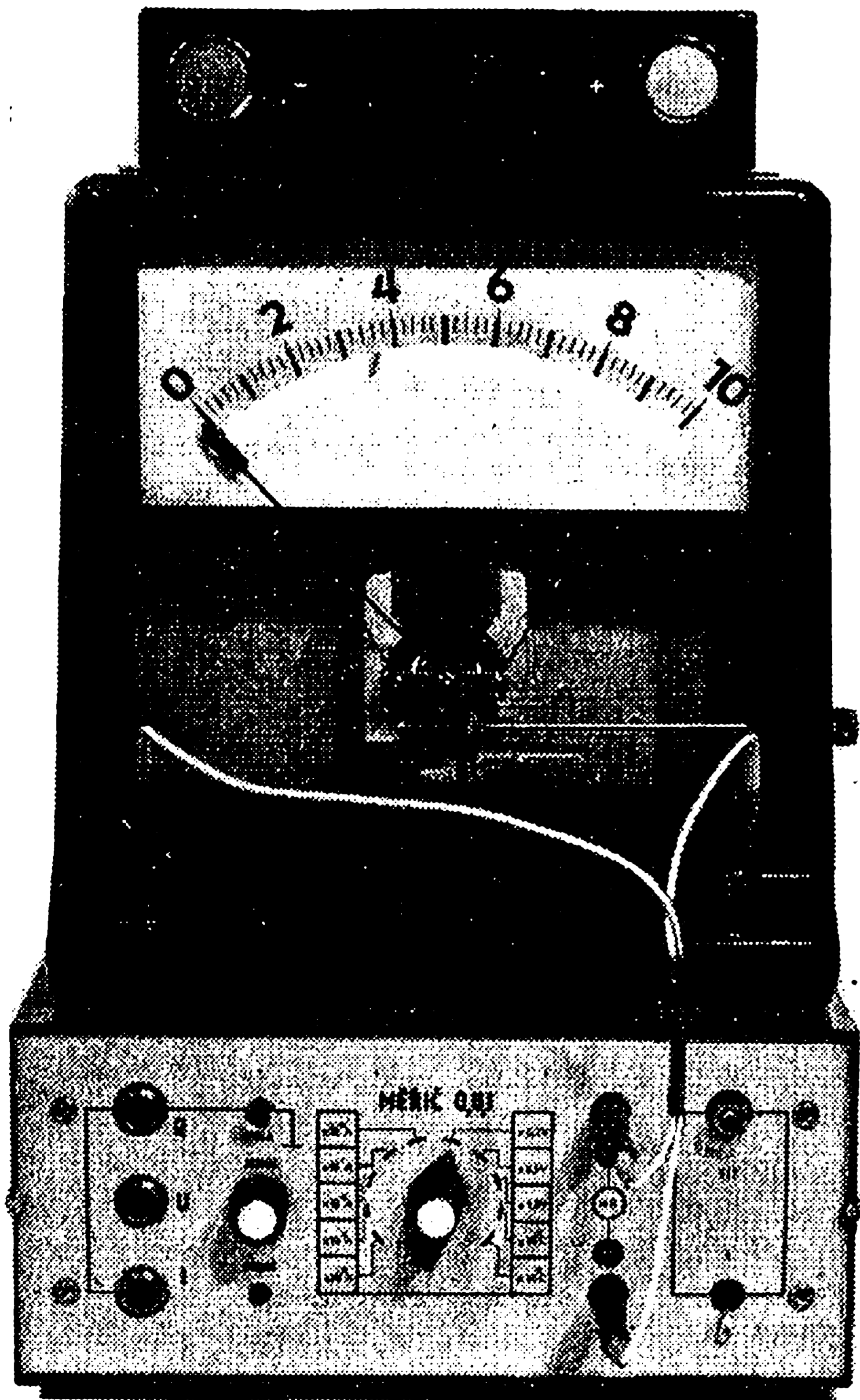


ným nábojom opačného znamienka (**viazaný náboj**), súhlasný indukovaný náboj (**voľný náboj**) sa odvedie do Zeme.

13. Elektrický náboj sa prejavuje na telese iba pri premiestení elektrických nábojov z jedného telesa na druhé alebo vnútri jedného telesa. Pri premiestovaní sa však celkový elektrický náboj na obidvoch telesách alebo na jednom telese nemení. Pre sústavu telies, ktorá si so svojim okolím nemôže vymieňať voľné nosiče náboja, platí **zákon zachovania elektrického náboja**:

V elektricky izolovanej sústave telies je celkový elektrický náboj stály. Elektrický náboj nemožno utvoriť, ani zničiť.

Na zisťovanie druhu elektrického náboja a jeho veľkosti používame merač elektrického náboja (obr. 1-4). K meraču elektrického náboja pripojíme kovovú guľu, ktorá je na izolovanom stojane. Na guľu prenáša-



Obr. 1-4

me skúšobnou guľôčkou elektrický náboj najskôr zo zelektrizovanej novodurovej, potom zo sklenej tyče. Rozličné náboje signalizuje rozsvietenie jednej z dvoch farebných žiaroviek svetelného indikátora a súčasne smer výchylky ručičky prístroja. Veľkosť náboja odčítame z veľkosti výchylky ručičky na stupnici.

V ďalšom texte písmeno  $Q$  (príp.  $Q_1$ ,  $Q_2$ ) bude označovať iba veľkosť náboja. Keď pôjde aj o znamienko náboja, výslovne sa to uvedie.

## Úlohy

1. Povedzte príklady vodičov a nevodičov.
2. Vysvetlite činnosť elektroskopu a elektrometra.
3. Pomocou elektroskopu ukážte, že ľudské telo je vodič.
4. Kovové časti automobilu sa môžu pri jazde zelektrizovať. Ako zabránime iskrovému výboju, ktorý môže nastať? Povedzte iné príklady zelektrizovania telies v technickej praxi.
5. Vyjadrite elektrický náboj 1 C počtom elementárnych nábojov. [asi  $6,24 \cdot 10^{18} e$ ]

## 1.2 Silové pôsobenie elektrických nábojov. Coulombov zákon

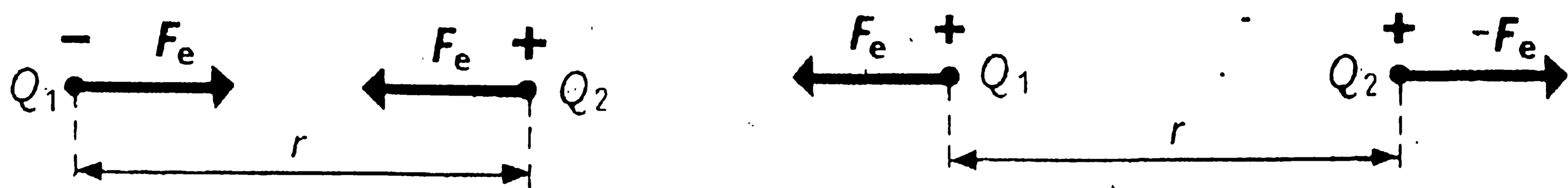
Vieme, že dve elektricky nabité telesá pôsobia na seba vzájomnými príťažlivými alebo odpudivými silami. V dôsledku elektrostatickej indukcie pôsobia na seba príťažlivými silami aj elektricky nabité a elektricky nenabité telesá. Keďže príčinou síl je elektrický náboj, nazývajú sa **elektrické sily**.

Pomocou elektrického kyvadielka (obr. 1-1) ukážeme, že elektrická sila, ktorou zelektrizovaná tyč priťahuje guľôčku, je tým väčšia, čím má tyč väčší elektrický náboj a čím menšia je vzdialenosť guľôčky od tyče.

V mechanike sme zaviedli predstavu hmotného bodu. Podobne v elektrine abstrakciou konkrétnych vlastností a rozmerov telesa, na ktorom je náboj rozložený, zavádzame pojem bodového náboja, ktorý si predstavujeme ako hmotný bod, ktorého elektrický náboj je rovnako veľký ako náboj na zelektrizovanom telese.

Pojem bodový náboj sa veľmi často používa nielen vo význame hmotný

bod s nábojom, ale aj pre samotný náboj. Pre jednoduchosť vyjadrovania budeme pojem bodový náboj používať v oboch významoch. Dva bodové náboje v pokoji sa navzájom priťahujú; alebo odpudzujú rovnako veľkými a opačne orientovanými elektrickými silami (obr. 1-5).



Obr. 1-5

Veľkosť elektrickej sily, ktorou na seba pôsobia dva bodové náboje, prvýkrát zmeral v roku 1785 Ch. Coulomb. Na základe svojich meraní vyslovil zákon, ktorý sa podľa neho volá **Coulombov zákon**:

Veľkosť  $F_e$  elektrickej sily  $F_e$  je priamo úmerná súčinu bodových nábojov  $Q_1$ ,  $Q_2$  a nepriamo úmerná druhej mocnine ich vzdialenosti  $r$ .

Ak majú náboje rovnaké znamienko, sila  $F_e$  je silou, ktorou sa náboje odpudzujú. Ak majú opačné znamienko, je sila príťažlivá. V oboch prípadoch veľkosť sily je

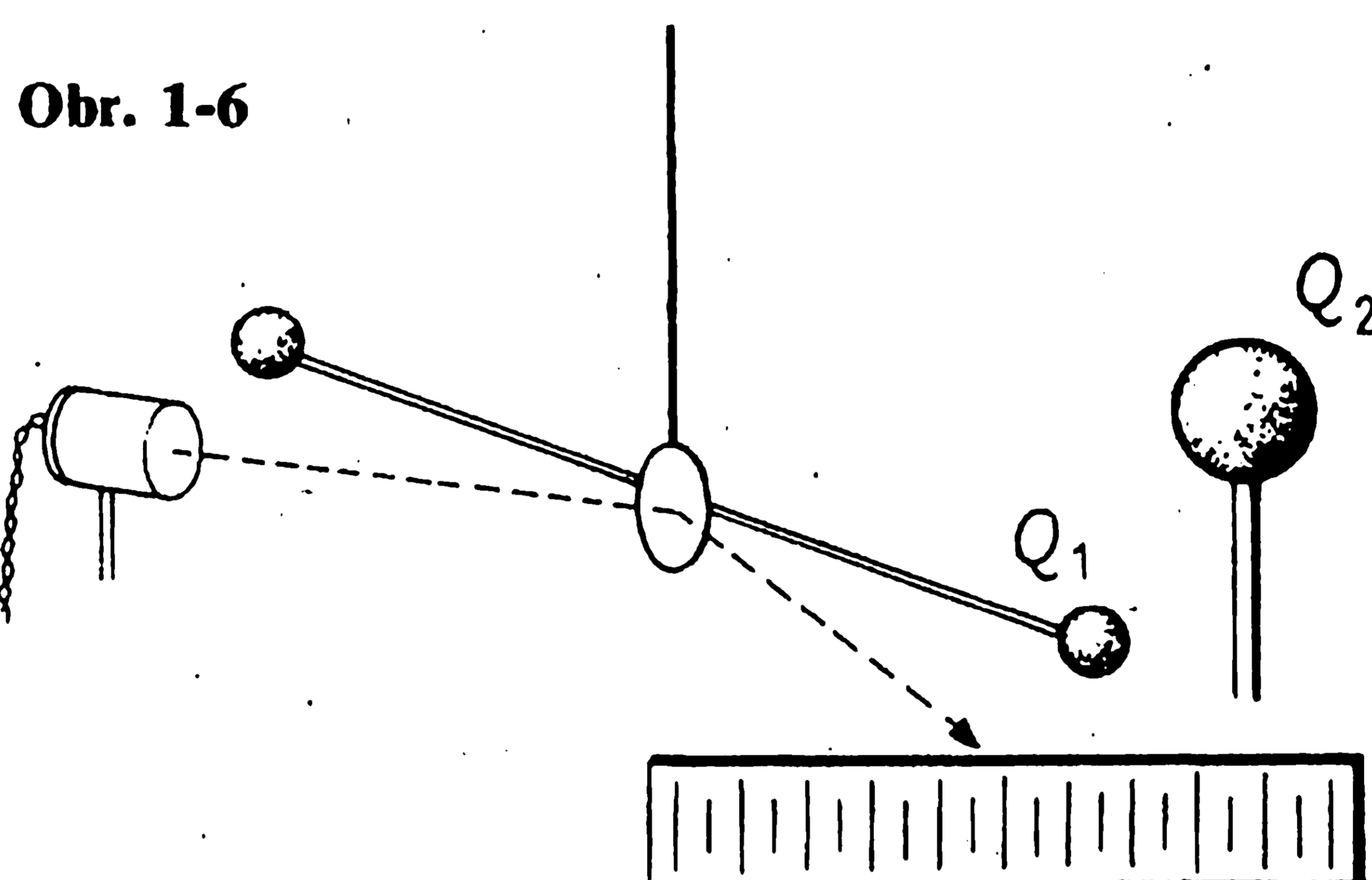
$$F_e = |\mathbf{F}_e| = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

kde  $k$  je konštanta úmernosti; jej veľkosť závisí od vlastností prostredia, v ktorom náboje na seba pôsobia. Pre vákuum (približne aj pre vzduch)  $k \doteq 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ .

Často dosadzujeme za konštantu  $k = \frac{1}{4\pi \epsilon}$ . Pre vákuum (a približne aj pre vzduch)  $\epsilon = \epsilon_0$ , kde  $\epsilon_0$  je **permitivita vákua**, ktorá má hodnotu  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Neskôr sa oboznámite s permitivitou iných prostredí.

Vzťah pre Coulombov zákon je formálne podobný Newtonovmu gravitačnému zákonu. Podstatný rozdiel je však v pôvode pôsobiacich síl a vo veľkosti konštánt  $k$  a  $\kappa$  v SI. Veľká číselná hodnota konštanty  $k$  naznačuje, že elektrické sily, ktorými na seba pôsobia jednotkové elektrické náboje, sú pomerne veľké, kým gravitačné sily medzi telesami s jednotkovými hmotnosťami pri rovnakej vzdialenosti sú nepatrné. Napríklad dva elektrické náboje rovnakého druhu  $Q_1 = Q_2 = 10^{-5}$  C, umiestené vo vákuu vo vzdialenosti  $r = 30$  cm, navzájom sa odpudzujú silou  $F_e = 10$  N.

Platnosť Coulombovho zákona overíme pomocou torzných váh (obr. 1-6). Keď prenesieme na jednu z guľôčok upevnených na otáčavom



ramene torzných váh náboj  $Q_1$ , na ďalšiu náboj  $Q_2$ , rameno váh sa pôsobením elektrickej sily vychýli z nulovej polohy a svetelná stopa na tienidle sa posunie. Vychýlenie svetelnej stopy je tým väčšie, čím väčšou elektrickou silou na seba pôsobia náboje  $Q_1$  a  $Q_2$ . Pri pokuse skúmame závislosť  $F_e \sim Q_1 Q_2$  pri nezmenenej vzdialenosti  $r$  a potom závislosť  $F_e \sim \frac{1}{r^2}$  pri nezmenených nábojoch  $Q_1$  a  $Q_2$ .

### Úlohy

1. Porovnajte vzťah pre Coulombov zákon so vzťahom pre Newtonov gravitačný zákon.
2. Odvoďte vzťah na výpočet konštanty  $k$  z Coulombovho zákona a navrhnete metódu merania tejto konštanty pomocou torzných váh.
3. Dve guľôčky zanedbateľného objemu s elektrickými nábojmi rovnakej veľkosti sa navzájom priťahujú vo vákuu elektrickou silou  $4 \cdot 10^{-3}$  N. Vzdialenosť stredov guľôčok

- je 3 cm. a) Akou veľkou silou sa budú guľôčky priťahovať pri vzdialenosti 30 cm?  
 b) Aký veľký elektrický náboj má každá guľôčka? [ $4 \cdot 10^{-5}$  N;  $2 \cdot 10^{-8}$  C]  
 4. Dva rovnaké bodové náboje  $5 \cdot 10^{-8}$  C sa odpudzujú vo vzduchu silou  $2,5 \cdot 10^{-4}$  N. Aká je vzdialenosť medzi nimi? [30 cm]

### 1.3 Intenzita elektrického poľa

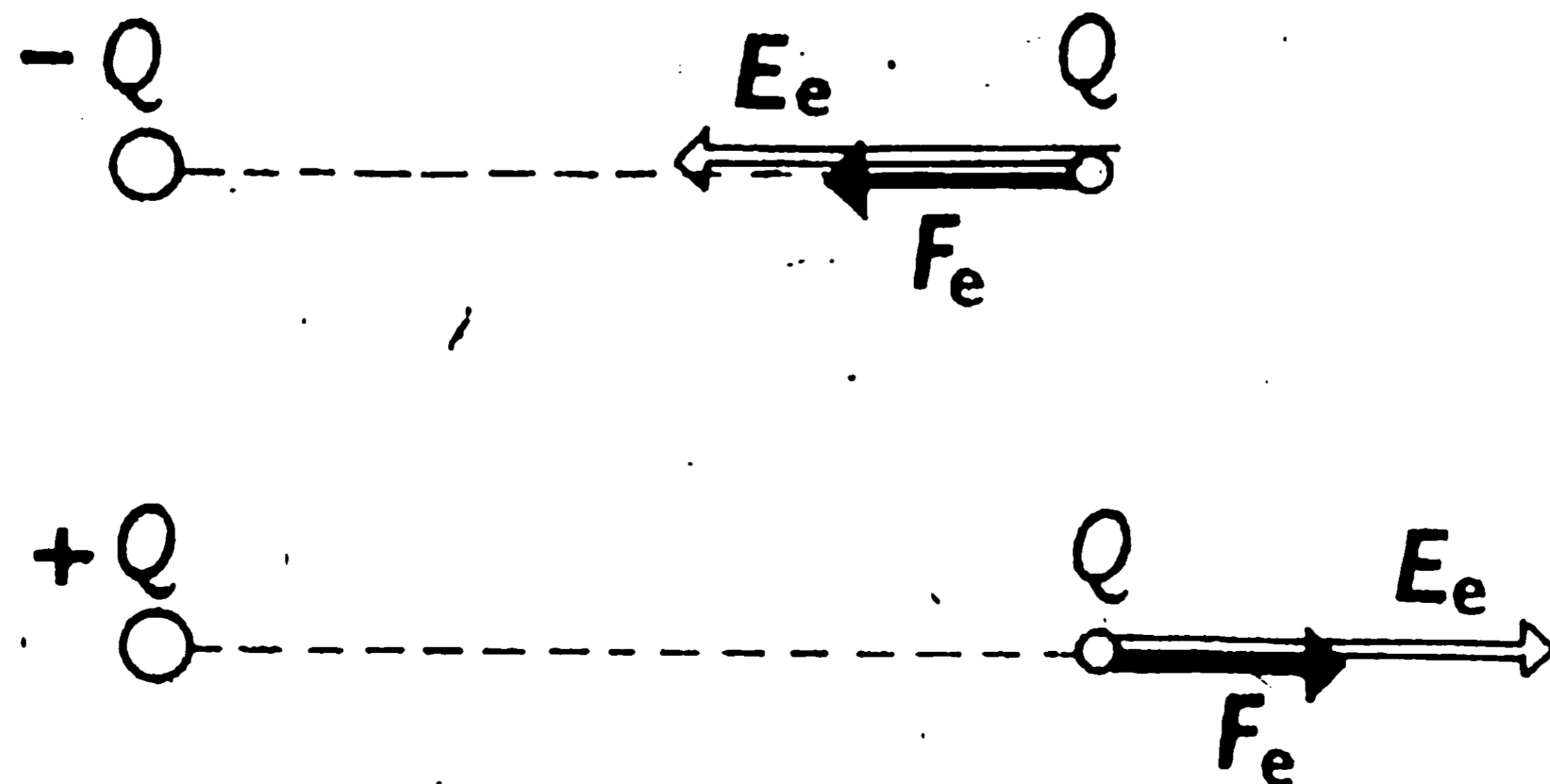
Vzájomné silové pôsobenie elektrických nábojov sa uskutočňuje prostredníctvom elektrického poľa. Elektrické pole je v okolí každého elektricky nabitého telesa a každej elektricky nabitej častice. Elektrické pole majú aj protón a elektrón. **Elektrické pole, rovnako ako gravitačné pole, je jednou zo základných foriem hmoty.**

Elektrické pole charakterizuje fyzikálna veličina — **intenzita elektrického poľa  $E$** . Keď poznáme elektrickú silu  $F_e$ , ktorou pôsobí elektrické pole v danom mieste na kladný bodový náboj  $Q'$  ( $Q' > 0$ ), potom intenzita elektrického poľa v tomto mieste je

$$E = \frac{F_e}{Q'}$$

Vo fyzike musíme niekedy označovať rôzne veličiny tým istým písmenom (veličín je oveľa viac ako písmen). Písmenom  $E$  (alebo  $E_p$  a  $E_k$ ) označujeme energiu (skalárnu veličinu). Písmenom  $E$  budeme označovať intenzitu elektrického poľa (vektorovú veličinu) a jej veľkosť budeme označovať  $|E|$ .

Intenzita elektrického poľa  $E$  je vektorová veličina rovnakého smeru ako elektrická sila  $F_e$ , ktorá v danom mieste poľa pôsobí na kladný bodový náboj  $Q'$  (obr. 1-7). Na základe definičného vzťahu jednotkou intenzity  $E$

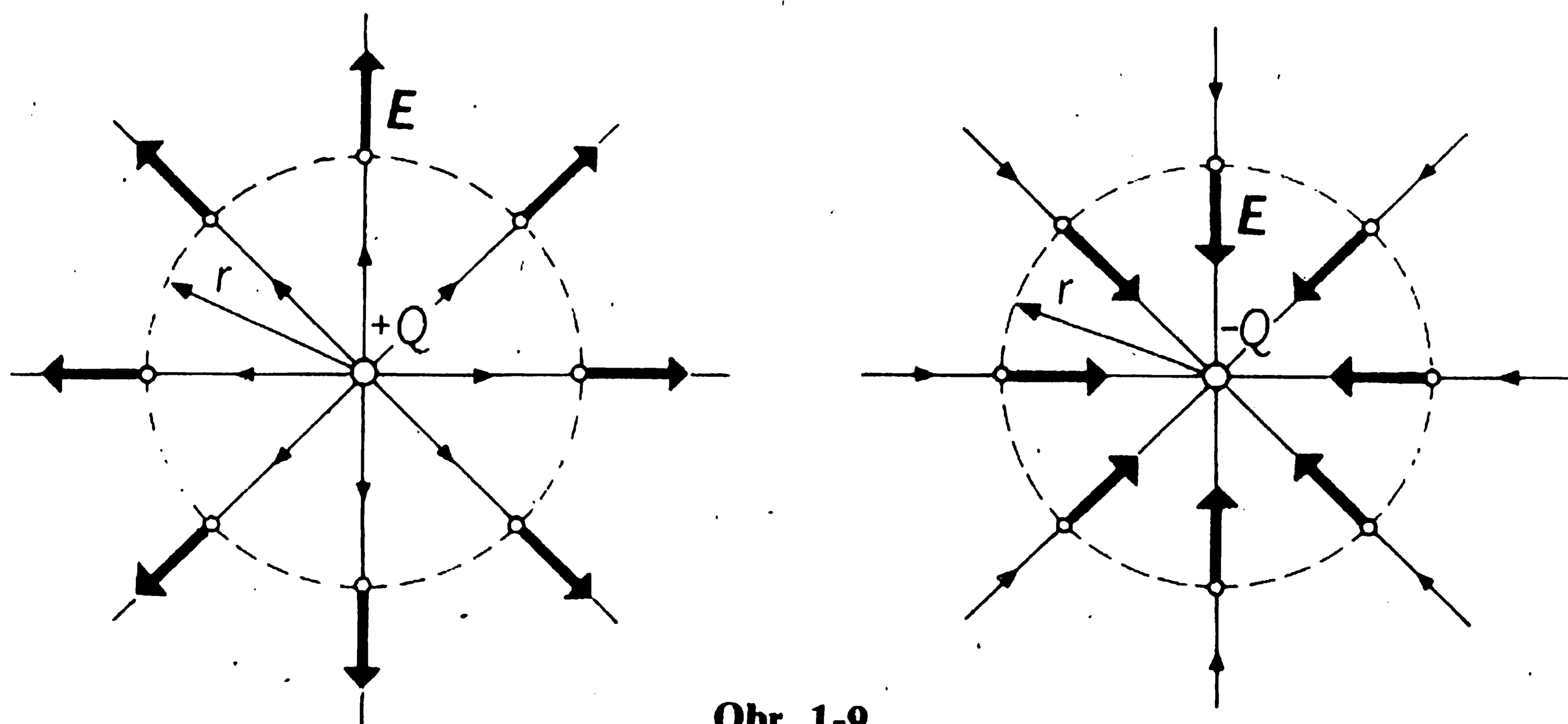
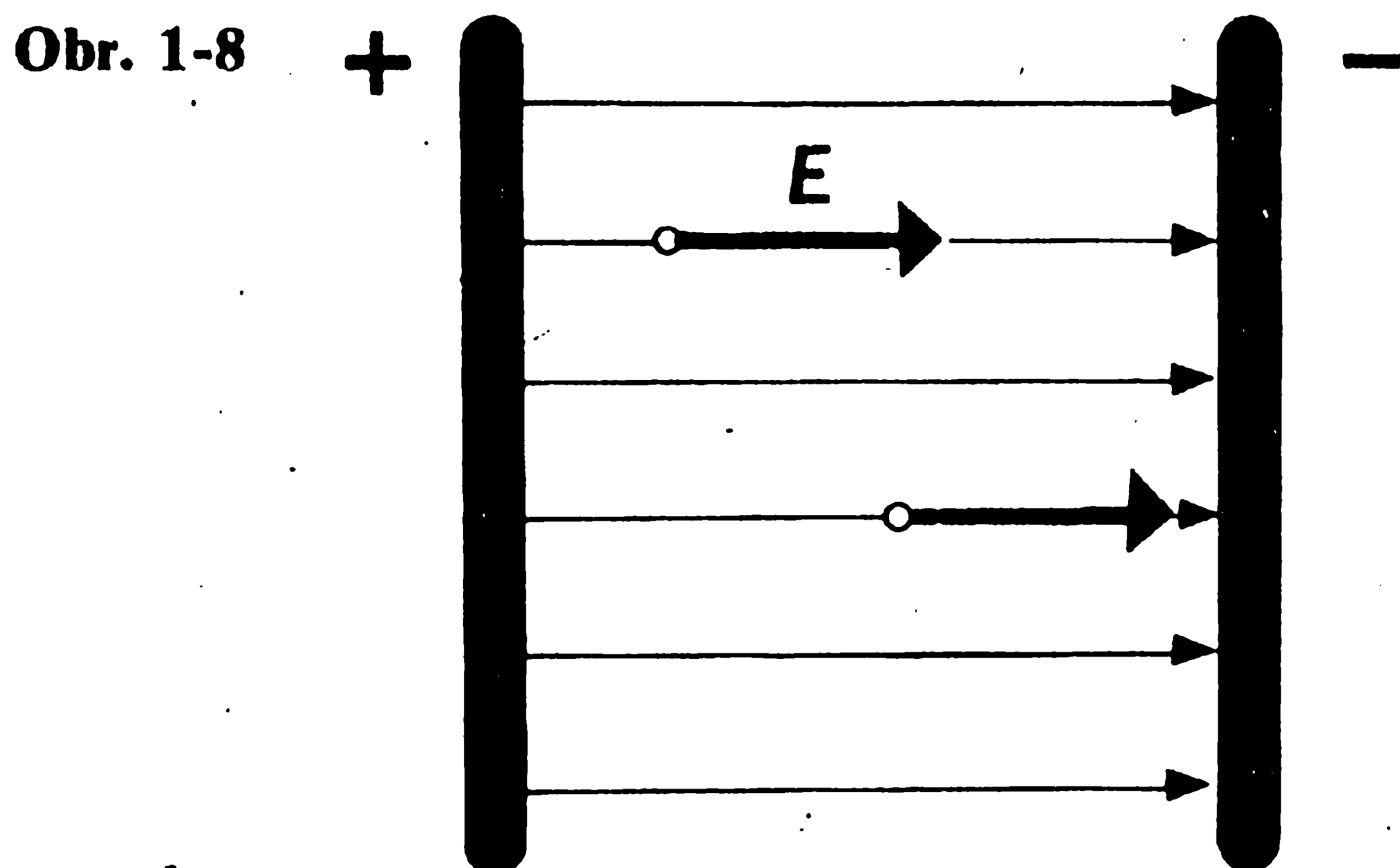


Obr. 1-7

by bol  $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$ . Z dôvodov, s ktorými sa oboznámime v stati 1-6, však používame jednotku volt na meter,  $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ , pričom  $1 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1} = 1 \text{ N}\cdot\text{C}^{-1}$ .

Keď má intenzita  $\mathbf{E}$  vo všetkých miestach poľa rovnaký smer aj veľkosť, ide o **homogénne elektrické pole**. Takéto pole je napr. medzi dvoma rovnobežnými izolovanými kovovými platňami, z ktorých jedna má kladný, druhá rovnako veľký záporný náboj (obr. 1-8).

V okolí bodového náboja (kladného alebo záporného) je **radiálne elektrické pole**. Intenzita  $\mathbf{E}$  má smer polpriamky, ktorá vychádza z náboja alebo do neho vstupuje. Smer intenzity  $\mathbf{E}$  závisí od znamienka náboja (obr. 1-9).



Veľkosť intenzity  $|\mathbf{E}|$  vo vzdialenosti  $r$  od bodového náboja veľkosti  $Q$  určíme, keď do definičného vzťahu pre intenzitu poľa dosadíme za veľkosť sily  $F_e$  z Coulombovho zákona  $F_e = k \frac{Q Q'}{r^2}$ . Dostaneme vzťah

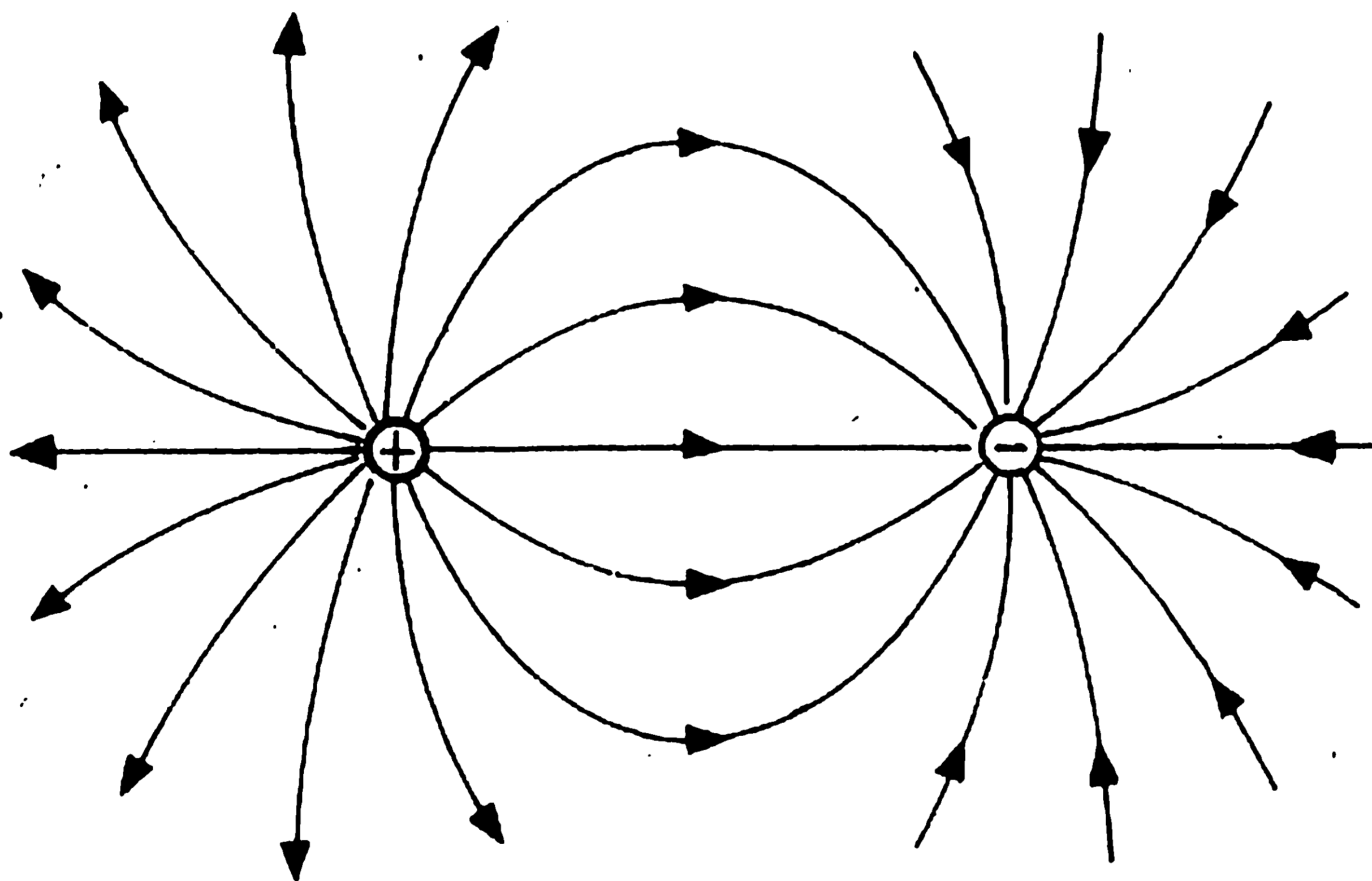
$$|\mathbf{E}| = k \frac{Q}{r^2}$$

Veľkosť intenzity elektrického poľa bodového náboja je nepriamo úmerná druhej mocnine vzdialenosti od náboja. Intenzita  $\mathbf{E}$  má teda vo všetkých bodoch vo vzdialenosti  $r$  od bodového náboja  $Q$  rovnakú veľkosť. Množina týchto bodov tvorí guľovú plochu s polomerom  $r$ .

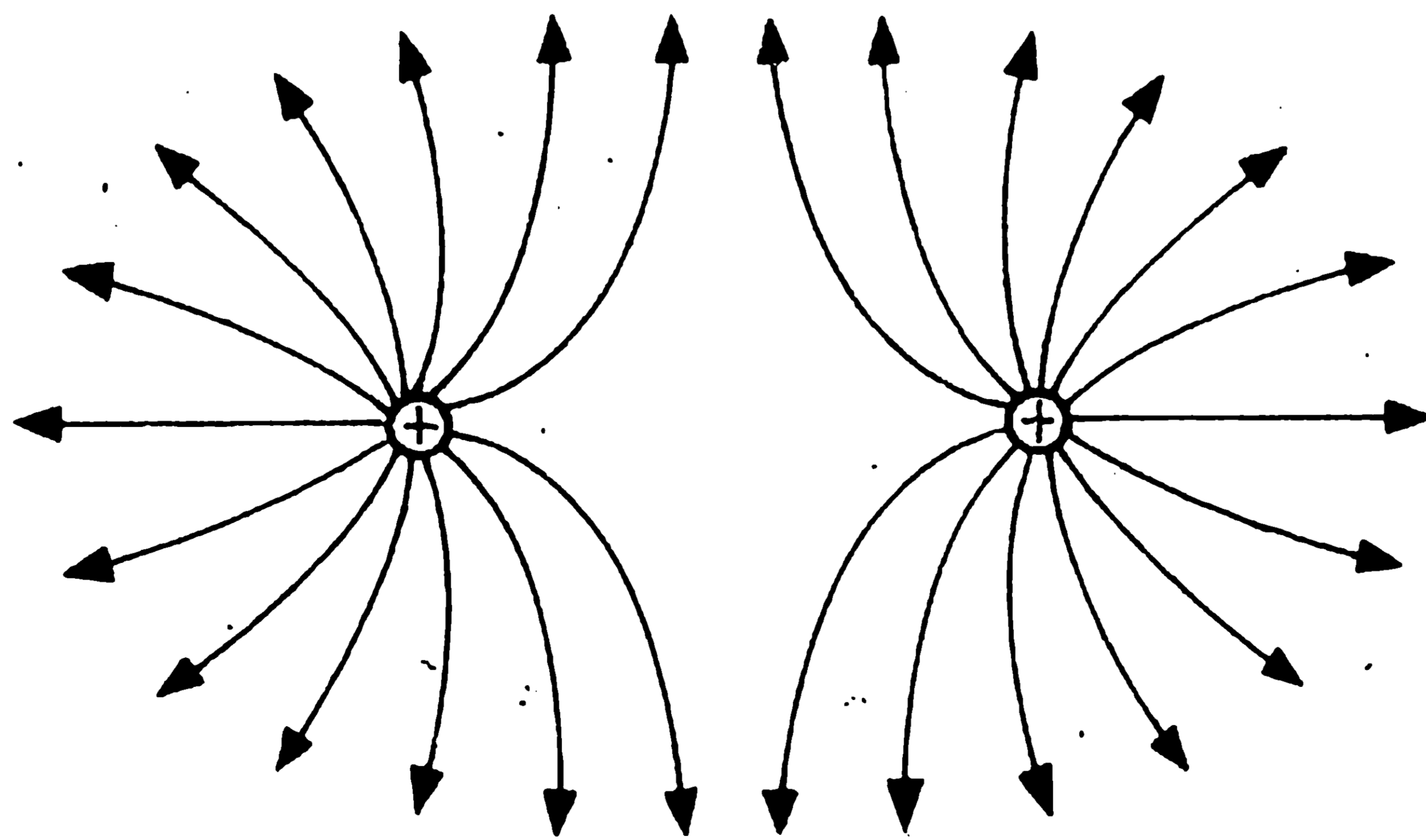
Vzťah pre intenzitu radiálneho poľa platí, aj keď náboj  $Q$  je rovnomerne rozmiestnený na vodiči tvaru gule s polomerom  $R$ , ale iba pre miesta, ktoré sú od stredu gule vo vzdialenosti  $r > R$ .

Zavedením veličiny intenzita elektrického poľa  $\mathbf{E}$  utvárame matematický model elektrického poľa, ktorým je **vektorové pole**. Vektorové polia na obr. 1-8 a 1-9 sú teda modelom homogénneho a radiálneho elektrického poľa.

Veľmi názorným modelom elektrického poľa je siločiarový model.



Obr. 1-10



Obr. 1-11

**Siločiara, ktorá prechádza istým bodom elektrického poľa, je myslená čiara, ktorej dotyčnica zostrojená v tomto bode určuje smer intenzity elektrického poľa  $E$ . Siločiary homogénneho a radiálneho poľa sú na obr. 1-8, a 8-9.**

Priebeh siločiar elektrického poľa znázorníme tak, že na dno sklenej misky nalejeme vrstvu oleja a rovnomerne ju posypeme krupicou. Do misky vkladáme rôzne tvarované vodiče, ktoré vodivo spojíme s pólmi zdroja vysokého jednosmerného napätia. Krupica utvorí refazce znázorňujúce siločiary elektrických polí. Siločiary homogénneho poľa sú rovnobežné, siločiary radiálneho poľa sa lúčovite rozbiehajú. Pri elektrickom poli dvoch nesúhlasných nábojov dostaneme sústavu siločiar znázornenú na obr. 1-10, pri poli dvoch súhlasných nábojov sústavu znázornenú na obr. 1-11.

Siločiary elektrického poľa majú tieto vlastnosti:

1. Sú spojité, začínajú sa na kladnom náboji a končia sa na zápornom; pri osamotenom náboji alebo pri dvojici nábojov s rovnakým znamienkom sa rozbiehajú do nekonečna.
2. Sú kolmé na povrch nabitého telesa.
3. Navzájom sa nepretínajú.

### Úlohy

1. Určte veľkosť intenzity elektrického poľa v mieste, kde na bodový náboj  $200 \mu\text{C}$  pôsobí sila  $1 \text{ N}$ . [ $5 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
2. Určte veľkosť intenzity elektrického poľa vo vzdialenosti  $30 \text{ cm}$  od bodového náboja  $10 \mu\text{C}$  vo vákuu. [ $10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
3. V homogénnom elektrickom poli s intenzitou  $4 \cdot 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  je umiestený náboj  $2,5 \mu\text{C}$ . Akou veľkou silou pôsobí pole na náboj? [ $1 \text{ N}$ ]

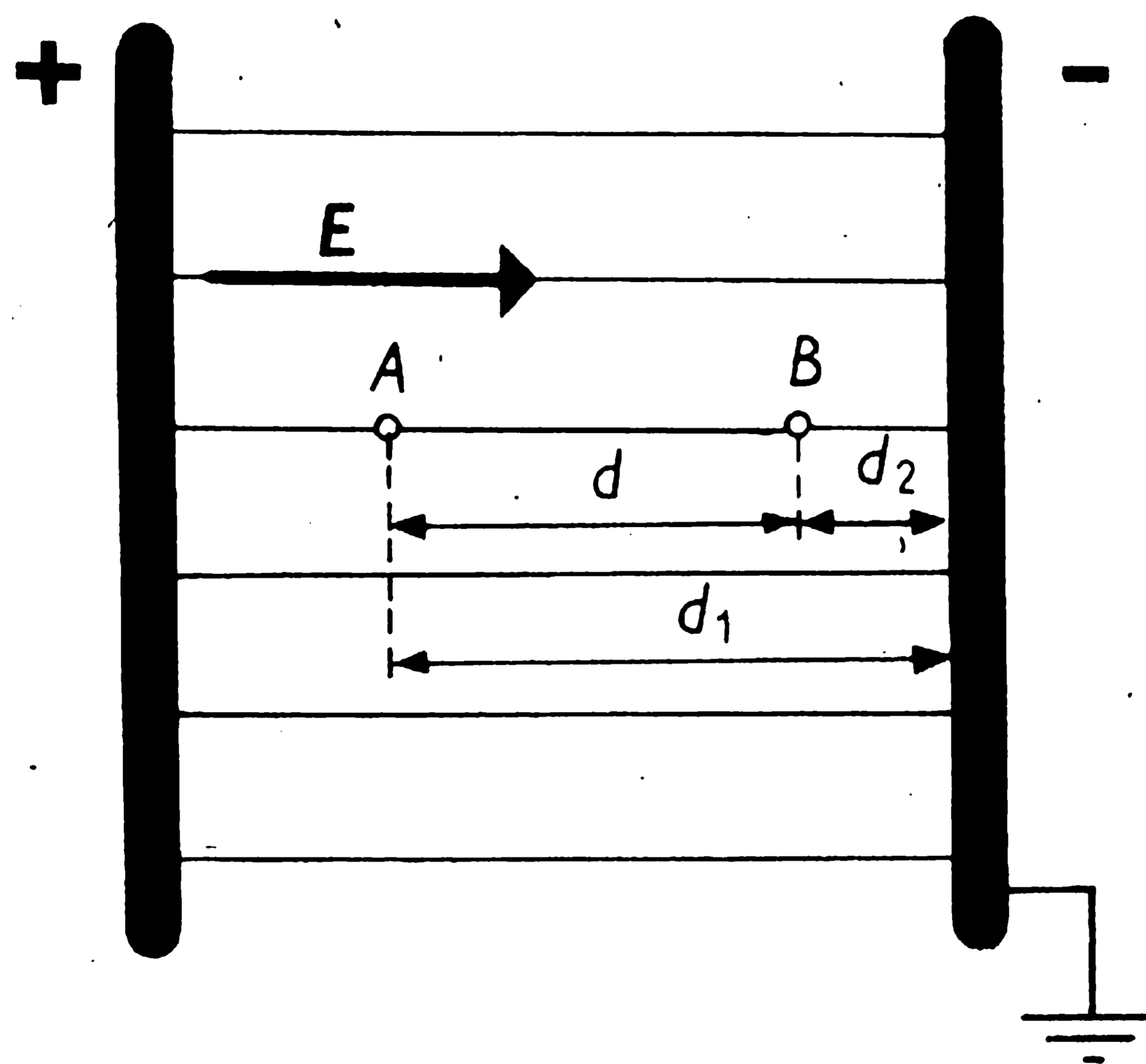
## 1.4 Práca v homogénnom elektrickom poli

Keď vložíme do istého miesta elektrického poľa s intenzitou  $E$  náboj  $Q_i$  (kladný alebo záporný), pôsobí naň elektrická sila

$$F_e = Q_i E$$



Podobne ako pre prácu v gravitačnom poli odvodíme vzťah aj pre prácu v elektrickom poli. Predpokladajme, že elektrické pole je homogénne a má intenzitu  $\mathbf{E}$ . Zo základnej školy viete, že takéto pole je utvorené dvoma izolovanými nesúhlasne nabitými vodivými platňami kondenzátora. Záporne nabitú platňu vodivo spojíme so Zemou. Keď vložíme do tohto poľa náboj  $Q_i$ , pôsobením sily  $\mathbf{F}_e = Q_i \mathbf{E}$  sa bude bodový náboj pohybovať po elektrickej siločiare (obr. 1-12a) napr. z miesta A vo



Obr. 1-12 a

vzdialenosti  $d_1$  do miesta B vo vzdialenosti  $d_2$  od platne spojenej so Zemou. Prejde dráhu  $d = d_1 - d_2$  a pôsobením síl elektrického poľa sa vykoná, alebo spotrebuje práca

$$W = F_e(d_1 - d_2) = |Q_i \mathbf{E}| d$$

Tento vzťah platí pre prácu síl v homogénnom elektrickom poli. **Podobne ako v gravitačnom poli ani v elektrickom poli nezávisí vykonaná práca od trajektórie, ale od vzájomnej vzdialenosti  $d$  miest A a B.**

Bodový náboj v elektrickom poli má istú elektrickú potenciálnu energiu. Keď konajú sily elektrického poľa prácu, nastáva zmena tejto energie.

V radiálnom poli a všeobecne v nehomogénnom poli bude výpočet

práce síl elektrického pole a teda aj potenciálnej energie náboja zložitejši (pozri napr. úlohu 3). Všeobecne však platí:

**Elektrická potenciálna energia  $E_p$  náboja  $Q_i$  v istom mieste elektrického poľa je určená prácou, ktorú vykoná elektrická sila pri premiestení náboja z daného miesta na povrch Zeme (nezávisle od trajektórie). Teda**

$$E_p = W$$

Zem alebo telesá vodivo spojené so Zemou považujeme pritom za miesta s nulovou hladinou elektrickej potenciálnej energie. Tak ako pri gravitačnej potenciálnej energii treba si uvedomiť, že elektrická potenciálna energia sa vzťahuje na systém obidvoch nábojov — náboja, ktorý utvára elektrické pole a náboja, ktorý sa v tomto poli pohybuje. Stručne hovoríme iba o potenciálnej energii prenášaného náboja.

### Úlohy

1. Akú veľkú prácu vykoná sila, ktorá premiesti časticu s kladným elektrickým nábojom  $20 \mu\text{C}$  v homogénnom poli s intenzitou  $10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  pozdĺž siločiar po dráhe  $10 \text{ cm}$ ? [0,02 J]
2. Určte veľkosť intenzity elektrického poľa medzi dvoma rovnobežnými vodivými platňami, keď náboj  $5 \mu\text{C}$  prenesený na kladne nabitú platňu má vzhľadom na uzemnenú platňu potenciálnu energiu  $1 \text{ J}$ . Vzdialenosť platní je  $20 \text{ cm}$ . [ $10^6 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
3. Pre prácu, ktorá sa vykoná pri premiestení kladného náboja  $Q'$  pozdĺž siločiar radiálneho poľa guľového vodiča s polomerom  $R$ , na ktorom je rovnomerne rozmiestnený kladný náboj  $Q$ , z miesta vo vzdialenosti  $r > R$  od guľového vodiča na jeho povrch, platí vzťah

$$W = k Q' Q \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$$

kdé  $k$  je konštanta známa zo state 1.2. Podľa uvedeného vzťahu vypočítajte, akú veľkú prácu vykonajú vonkajšie sily, ktoré premiestia náboj  $+10^{-2} \text{ C}$  z nekonečne veľkej vzdialenosti na povrch guľového vodiča s polomerom  $3 \text{ cm}$ . Guľový vodič má náboj  $+1 \mu\text{C}$ . [ $3 \cdot 10^{-3} \text{ J}$ ]

## 1.5 Elektrický potenciál

Na opis elektrického poľa zavedieme veličinu **elektrický potenciál**  $\varphi_e$  (podobne ako v gravitačnom poli gravitačný potenciál  $\varphi_g$ ).

**Elektrický potenciál v danom bode poľa definujeme ako podiel elektrickej potenciálnej energie kladného elektrického náboja  $Q'$  v tomto bode a veľkosti tohto náboja**

$$\varphi_e = \frac{E_p}{Q'}$$

Pretože  $E_p = W$ , môžeme povedať: Elektrický potenciál v danom bode poľa je určený pomerom práce, ktorú vykonajú sily elektrického poľa pri premiestení kladného náboja  $Q'$  z daného miesta na povrch Zeme a veľkosti tohto náboja

$$\varphi_e = \frac{W}{Q'}$$

Zem a telesá vodivo spojené so Zemou sú miestami s **nulovým elektrickým potenciálom**.

Jednotkou elektrického potenciálu je jeden volt (V).

$$[\varphi_e] = \frac{J}{C}, \quad V = J \cdot C^{-1}$$

Elektrické pole má v danom mieste potenciál 1 V, keď pri premiestení kladného elektrického náboja 1 C z daného miesta poľa na povrch Zeme vykonajú elektrické sily prácu 1 J.

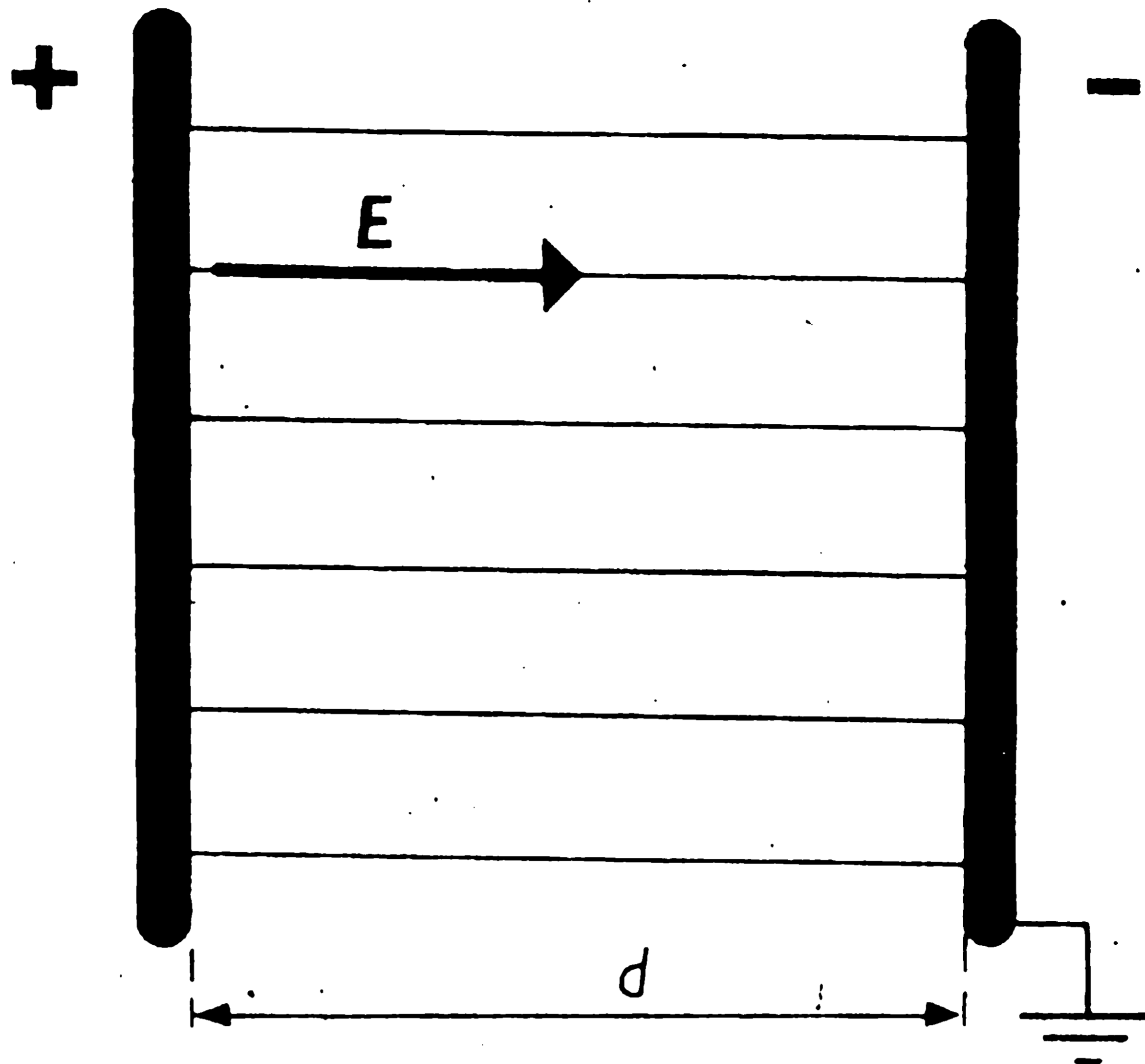
V homogénnom poli medzi dvoma rovnobežnými vodivými platňami (obr.1-12.b) má kladne nabitá platňa vzhľadom na uzemnenú platňu potenciál

$$\varphi_e = |\mathbf{E}| d$$

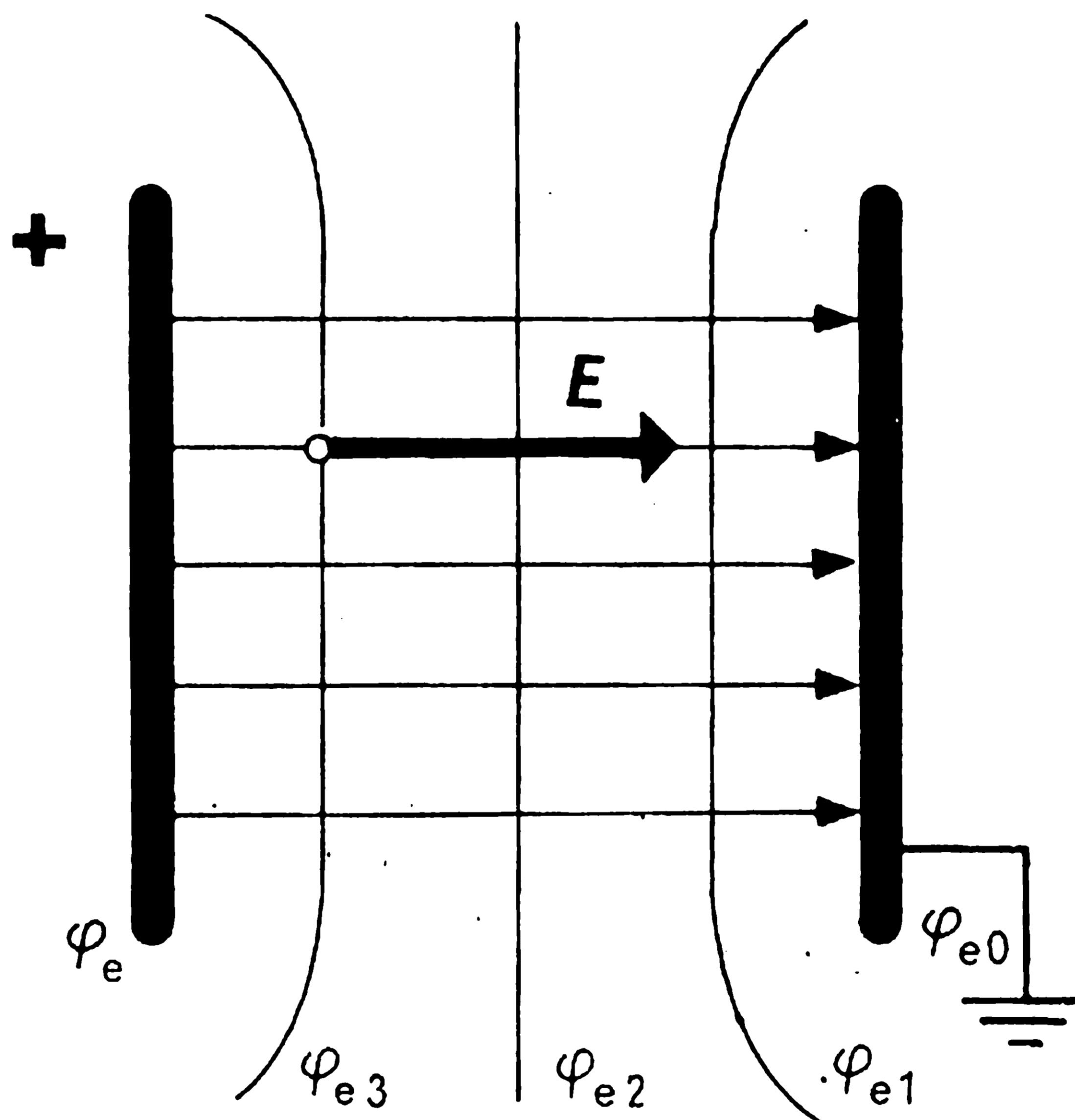
kde  $|\mathbf{E}|$  je veľkosť intenzity poľa a  $d$  vzdialenosť platní.

Elektrický potenciál podobne ako práca je skalárna veličina. Určením elektrického potenciálu každého bodu elektrického poľa utvárame skalár-

Obr. 1-12 b



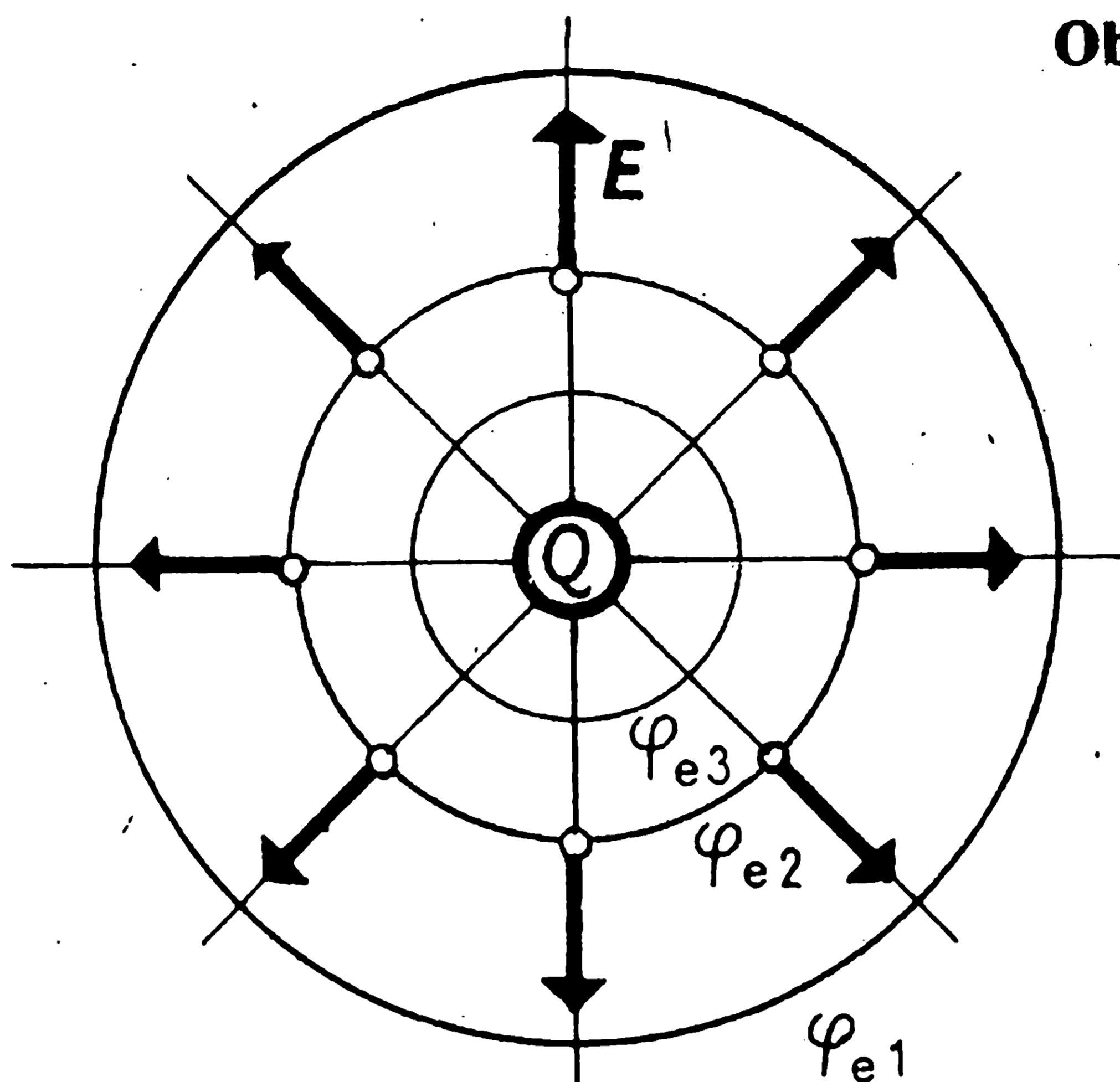
Obr. 1-13



ne póle. Skalárne pole je ďalší matematický model reálneho elektrického poľa.

Množina bodov elektrického poľa s rovnakým potenciálom tvorí **hladi-ny potenciálu** alebo **ekvipotenciálne plochy**. Ekvipotenciálne plochy homogénneho poľa medzi rovnobežnými vodivými platňami sú roviny rovnobežné s platňami (obr. 1-13). Hladinu najvyššieho potenciálu tvorí kladne nabitá platňa, hladinu nulového potenciálu uzemnená platňa.

Obr. 1-14



Ekvipotenciálne plochy radiálneho poľa bodového náboja alebo náboja rovnomerne rozmiesteneného na povrchu vodivej gule sú sústredné guľové plochy (obr. 1-14).

Z obr. 1-13 a 1-14 je zrejmý aj vzťah ekvipotenciálnych plôch a siločiar elektrického poľa. Všetky siločiar elektrického poľa sú kolmé na ekvipotenciálne plochy.

### Úlohy

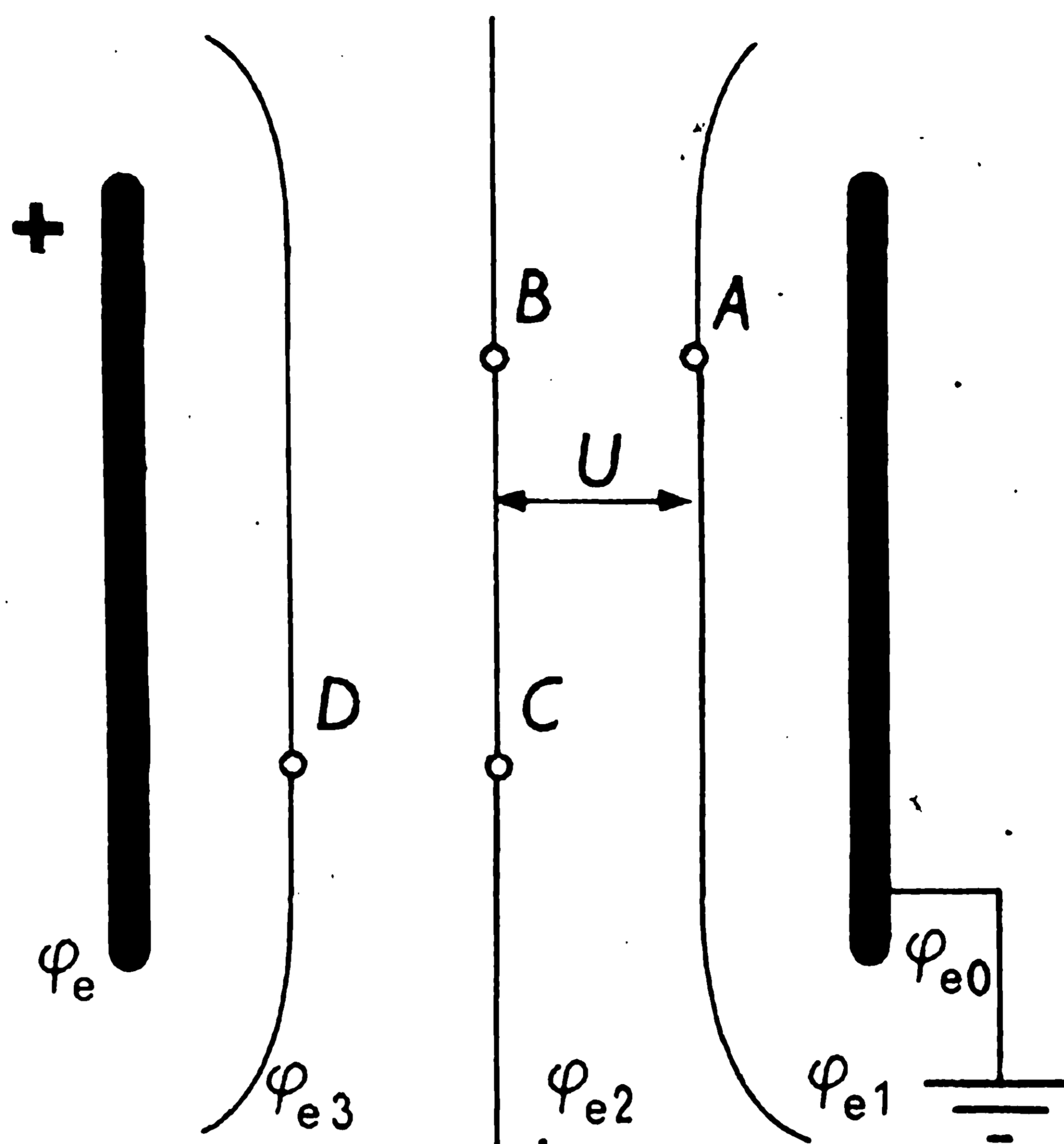
1. Aký potenciál má vodič, keď na prenesenie náboja  $50 \mu\text{C}$  z miesta nulového potenciálu na jeho povrch sa vykonala práca  $0,2 \text{ J}$ ? [ $4 \text{ kV}$ ]
2. Určte veľkosť intenzity elektrického poľa medzi dvoma rovnobežnými vodivými platňami, z ktorých jedna má vzhľadom na uzemnenú platňu potenciál  $1 \text{ kV}$ . Vzdialenosť platní je  $20 \text{ cm}$ . [ $5 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

## 1.6 Elektrické napätie. Millikanov pokus

**Absolútna hodnota rozdielu potenciálov medzi dvoma bodmi elektrického poľa je elektrické napätie.** Keď  $\varphi_1$  je potenciál bodu  $A$  a  $\varphi_2$  potenciál bodu  $B$  (obr. 1-15), potom elektrické napätie medzi bodmi  $A$  a  $B$  je

$$U = |\varphi_2 - \varphi_1|$$

Obr. 1-15



Rovnako veľké je napätie medzi bodmi A a C, lebo potenciál bodu C je rovnaký ako potenciál bodu B. Medzi bodmi A a D je iné napätie, lebo potenciál bodu D je  $\varphi_3 \neq \varphi_2$ . Medzi bodmi B a C je nulové napätie, pretože potenciál v oboch bodoch je  $\varphi_2$ .

Elektrické napätie medzi dvoma bodmi danej hladiny potenciálu je nulové. Povrch izolovaného vodiča s nábojom v pokoji tvorí hladinu potenciálu, nulové napätie je teda aj medzi ktorýmikoľvek dvoma bodmi tohto vodiča.

Rovnako ako potenciál aj elektrické napätie meriame vo voltoch V. Ako merač napätia používame voltmeter.

Keď zmeriame elektrické napätie  $U$  medzi dvoma rovnobežnými vodivými platňami (obr. 1-15), môžeme vypočítať veľkosť intenzity elektrického poľa  $|\mathbf{E}|$  medzi platňami. Keďže potenciál kladne nabitej platne je  $\varphi = |\mathbf{E}| d$ , kde  $d$  je vzdialenosť platní a potenciál uzemnenej platne  $\varphi_0$  je nulový, napätie medzi platňami je

$$U = \varphi - \varphi_0 = |\mathbf{E}| d$$

a odtiaľ veľkosť intenzity elektrického poľa

$$|\mathbf{E}| = \frac{U}{d}$$

Z tohto vzťahu vyplýva jednotka intenzity elektrického poľa volt na meter,  $V \cdot m^{-1}$ . Keď do vzťahu pre prácu v homogénnom elektrickom poli dosadíme za intenzitu predchádzajúci vzťah

$$W = |\mathbf{E}| Q d = \frac{U}{d} Q d$$

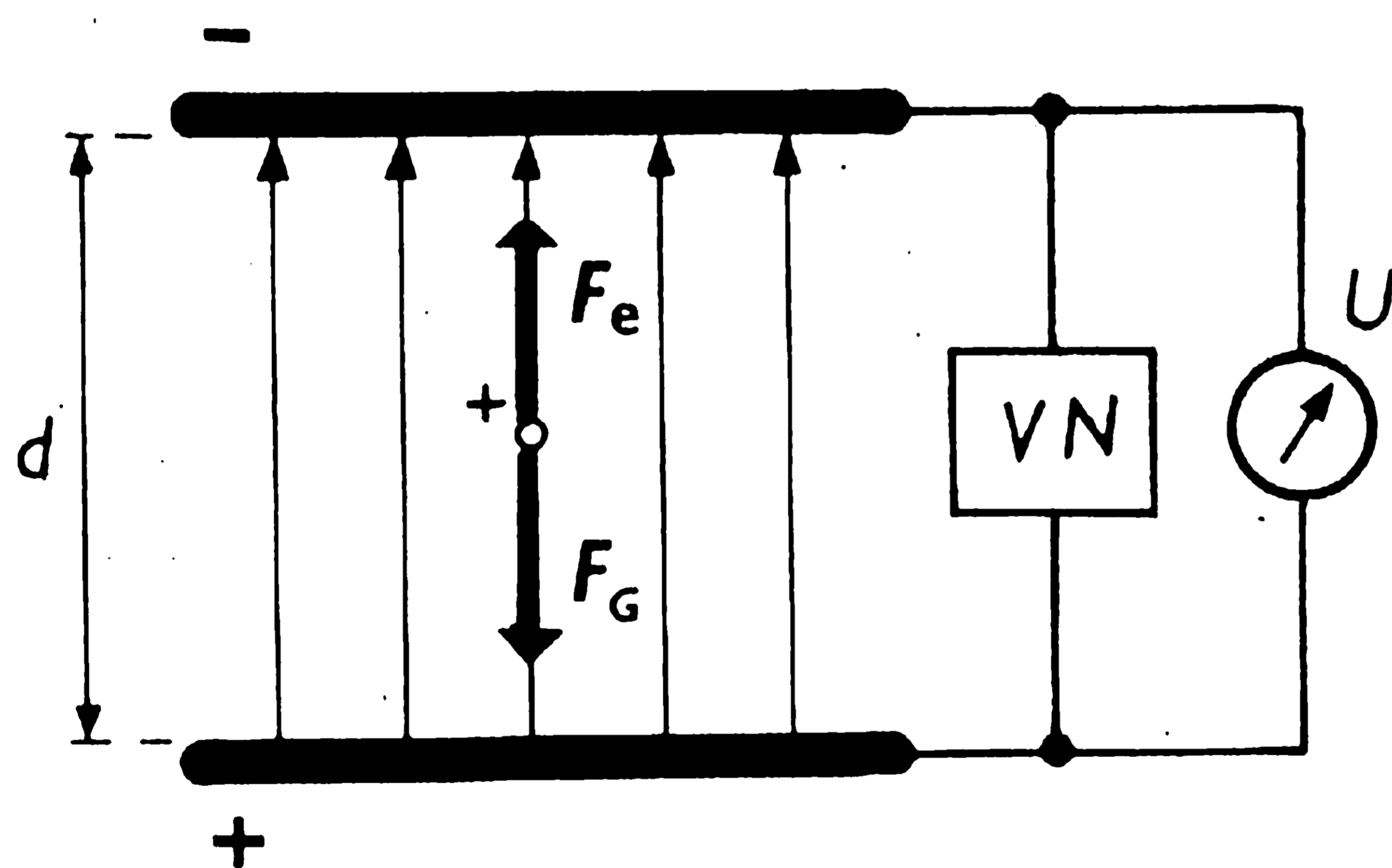
dostaneme

$$W = Q U$$

Uvedený vzťah platí všeobecne a určuje veľkosť práce vykonanej pri prenesení náboja  $Q$  medzi dvoma bodmi, medzi ktorými je napätie  $U$ .

Vzťah medzi intenzitou  $|\mathbf{E}|$  a napätím  $U$  použijeme na objasnenie historicky významného **Millikanovho pokusu**, ktorým sa prvýkrát zmerala veľkosť elementárneho náboja  $e$ .

Millikan\* pozoroval mikroskopom pohyb malých olejových kvapôčok jemne rozprášených v homogénnom elektrickom poli medzi dvoma vodorovnými vodivými platňami (obr. 1-16), z ktorých horná je nabitá



Obr. 1-16



\* ROBERT ANDREWS MILLIKAN (čítaj miliken) americký fyzik, nositeľ Nobelovej ceny za fyziku z roku 1923 za prácu o elementárnom elektrickom náboji a fotoelektrickom jave.

záporne. Na každú kvapôčku pôsobí tiažová sila  $F_G = m g$ , kde  $m$  je hmotnosť kvapôčky, a elektrická sila  $F_e = Q E_e$ , kde  $Q$  je kladný elektrický náboj, ktorý kvapôčka získala pri rozprašovaní oleja. Pri vhodnom napätí  $U$  medzi platňami možno dosiahnuť, že sily  $F_G$  a  $F_e$  budú v rovnováhe a pohyb kvapôčky (vplyvom odporu prostredia) sa na okamih zastaví.

Pre veľkosť týchto síl platí

$$m g = Q |E| = Q \frac{U}{d}$$

odkiaľ náboj kvapôčky

$$Q = \frac{m \cdot g \cdot d}{U}$$

Pozorovaním sa zistilo, že rovnosť síl sa pri danom napätí ľahko naruší a kvapôčka sa začne pohybovať buď smerom nahor, buď nadol podľa toho, ako sa zmenila veľkosť sily  $F_e$  vzhľadom na veľkosť sily  $F_G$ .

Keďže pri narušení rovnováhy síl hmotnosť kvapôčky  $m$  sa nezmenila, musela sa zmeniť pri stálom napätí  $U$  a nezmenenej vzdialenosti platní  $d$  veľkosť jej náboja  $Q$ .

Nový rovnovážny stav, pri ktorom sa kvapôčka opäť zastaví, možno dosiahnuť zmenou napätia  $U$  o určitú hodnotu. Z toho vyplýva, že náboj  $Q$  sa mení nespojite. Keď nameriame pri striedavom narušovaní a obnovovaní rovnováhy síl, ktoré pôsobia na kvapôčku, rad nespojitých hodnôt napätia  $U_i$ , môžeme podľa posledného vzťahu vypočítať rad nespojitých hodnôt náboja  $Q_i$ . Zistíme, že každá  $i$ -tá hodnota náboja  $Q_i$  je vždy celočíselným násobkom elementárneho náboja  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C.

Aby Millikan dosiahol väčšiu presnosť pri meraní, používal zložitejšiu metódu, ako je tá, ktorú sme spomenuli v našom zjednodušenom vysvetľovaní.

Millikanov pokus mal veľký význam pre ďalší rozvoj fyziky. Prvý dokázal nespojitosť elektrického náboja a existenciu elementárneho náboja, potvrdil predstavy o zložení látok z častíc.



## Úlohy

1. Medzi dvoma rovnobežnými platňami vzdialenými 12 cm sa nameralo napätie 600 V. Určte veľkosť intenzity poľa medzi platňami. [ $5\,000\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
2. V homogénnom elektrickom poli s intenzitou  $10^4\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  sa pohyboval elektrón po siločiare dĺžky 20 cm. Akú prácu vykonali sily elektrického poľa? [ $3,2\cdot 10^{-16}\text{ J}$ ]
3. Dokážte, že pri premiestňovaní náboja po tej istej ekvipotenciálnej ploche nekonáme prácu.

## 1.7 Rozmiestenie elektrického náboja na vodiči

Kovový pohár postavený na izolačnom podstavci elektricky nabijeme. Potom skúšobnou guľôčkou prenášame časť jeho náboja na izolovaný guľový vodič spojený s elektrometrom tak, že sa postupne dotýkame a) vonkajšej steny pohára, b) vnútornej steny pohára, c) horného okraja pohára.

Výsledok pokusu ukazuje, že voľný elektrický náboj sa rozmiesti na povrchu vodiča nerovnomerne. Najväčší náboj je na hornej hrane, menší náboj je na vonkajšej vypuklej časti vodiča a vnútorná dutá časť vodiča je bez náboja. Voľný elektrický náboj je teda rozmiestnený len **na vonkajšom povrchu vodiča**. Platí to pre duté aj plné vodiče.

O tom, že vnútorný povrch dutého vodiča je bez voľného náboja a jeho dutina bez elektrického poľa, presvedčíme sa pokusom. Pod drôtenú sieť Faradayovej klietky umiestime jeden elektrometer a druhý mimo klietky. Obidva elektrometre spojíme vodivo so sieťou. Keď drôtenú sieť elektricky nabijeme, ukáže výchylku iba elektrometer, ktorý je mimo klietky. Na tomto jave sa zakladá tienenie niektorých zariadení pred účinkom elektrického poľa.

Vzhľadom na rozmiestenie elektrického náboja na vodiči zavádzame **veľčinu plošná hustota elektrického náboja  $\sigma$  ako podiel veľkosti náboja  $Q$  a obsahu  $S$  tej časti plochy, na ktorej je náboj rovnomerne rozmiestnený**. Teda

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

Jednotkou plošnej hustoty elektrického náboja je  $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Podmienku rovnomerného rozmiestenia náboja spĺňa napr. povrch kovovej gule, ktorá je izolovaná od ostatných vodičov. Plošná hustota náboja na povrchu gule s polomerom  $R$  je

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}$$

Na hranách alebo hrotoch vodičov, ktoré predstavujú časti guľových plôch s veľmi malými polomerami, je plošná hustota náboja veľmi veľká.

Určíme teraz, v akom vzťahu sú veličiny plošná hustota náboja  $\sigma$  a veľkosť intenzity elektrického poľa  $|\mathbf{E}|$  pri vonkajšom povrchu vodiča vo vákuu. Pre veľkosť intenzity poľa pri vonkajšom povrchu gule s polomerom  $R$  platí

$$|\mathbf{E}| = k \frac{Q}{R^2} \quad \text{alebo} \quad |\mathbf{E}| = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{Q}{R^2}$$

Pretože plošná hustota na povrchu gule je  $\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}$ , intenzita  $|\mathbf{E}| = \frac{1}{\varepsilon_0} \sigma$ , odkiaľ

$$\sigma = \varepsilon_0 |\mathbf{E}|$$

Tento vzťah má všeobecnú platnosť pre všetky vodiče vo vákuu.

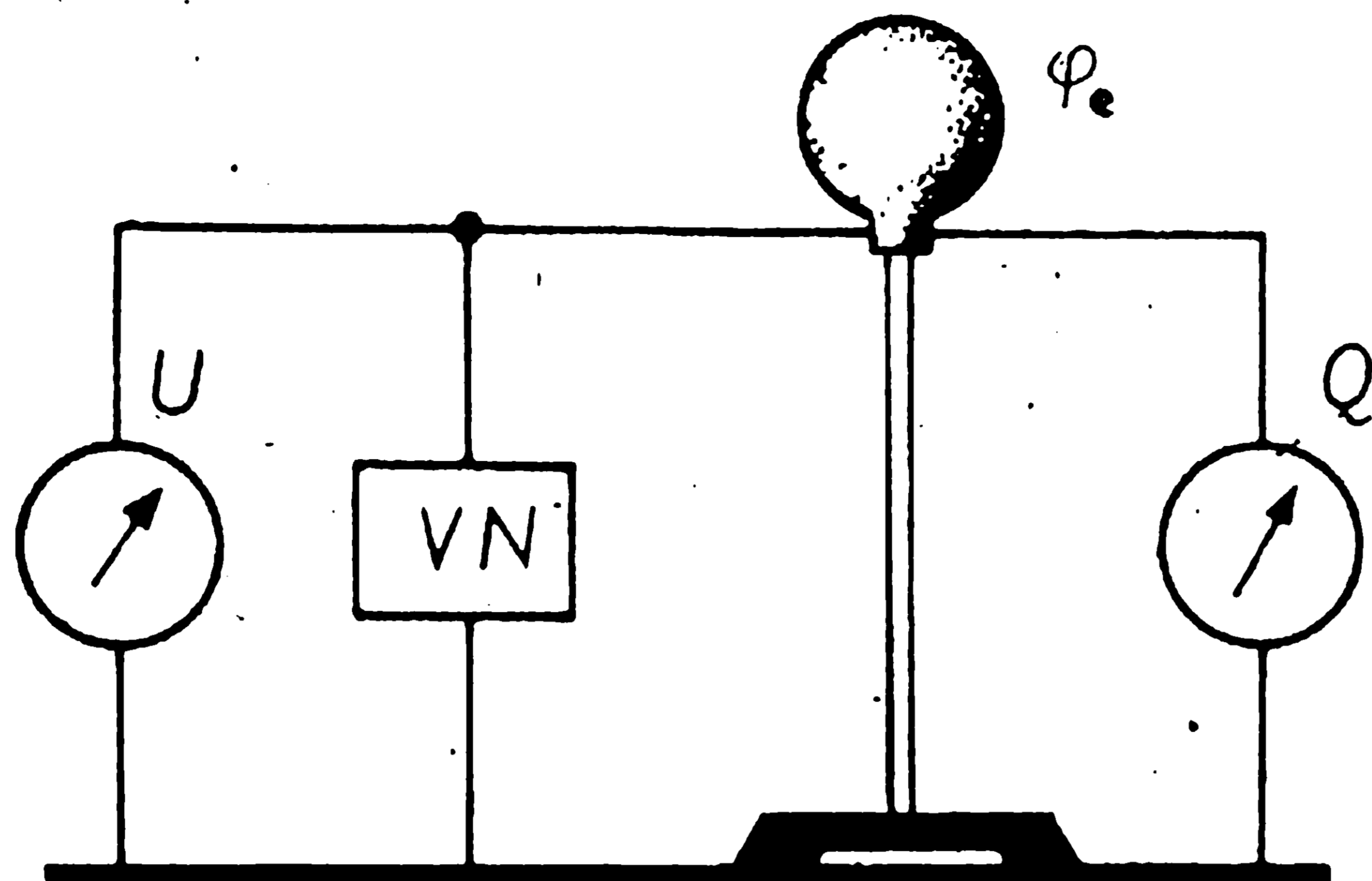
## Úlohy

1. Určte plošnú hustotu na povrchu kovovej gule s polomerom 10 cm, keď je na nej rovnomerne rozmiesteny náboj  $1 \mu\text{C}$ . [ $8 \mu\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
2. Plošná hustota elektrického náboja na povrchu guľového vodiča je  $1,0 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ . Určte veľkosť intenzity elektrického poľa pri povrchu vodiča, ktorý je vo vákuu. [ $1,1 \cdot 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

## 1.8 Kapacita vodiča a kondenzátor

Každý elektrický vodič má vzhľadom na hladinu nulového potenciálu istý potenciál. Hľadáme teraz vzťah medzi elektrickým nábojom  $Q$  izolovaného vodiča a jeho potenciálom  $\varphi_e$ .

Obr. 1-17



Kovovú izolovanú guľu spojíme vodivo s jedným pólom zdroja vysokého napätia, druhý pól zdroja je uzemnený (obr. 1-17). Guľa tým získa vzhľadom na Zem potenciál  $\varphi_e$ , ktorý sa rovná napätiu na svorkách zdroja. Meračom náboja zmeriame veľkosť náboja  $Q$  na povrchu guľe. Pokus niekoľkokrát opakujeme pre rôzne potenciály  $\varphi_e$ , teda pre rôzne napätia  $U$  použitého zdroja. Z nameraných hodnôt zistíme, že veľkosť náboja  $Q$  na kovovej guľi je priamo úmerná potenciálu  $\varphi_e$  guľe. Platí

$$Q = C \varphi_e \quad \text{alebo} \quad Q = C U$$

kde konštanta úmernosti  $C$  charakterizuje vlastnosť vodiča a nazýva sa **kapacita vodiča**.

Kapacita vodiča  $C$  je veličina definovaná podielom náboja  $Q$  izolovaného vodiča a jeho potenciálu  $\varphi_e$ , teda

$$C = \frac{Q}{\varphi_e} \quad \text{alebo} \quad C = \frac{Q}{U}$$

Jednotkou kapacity v SI je farad\*, značka F, pričom  $1 \text{ F} = 1 \text{ C} \cdot \text{V}^{-1}$ . Vodič

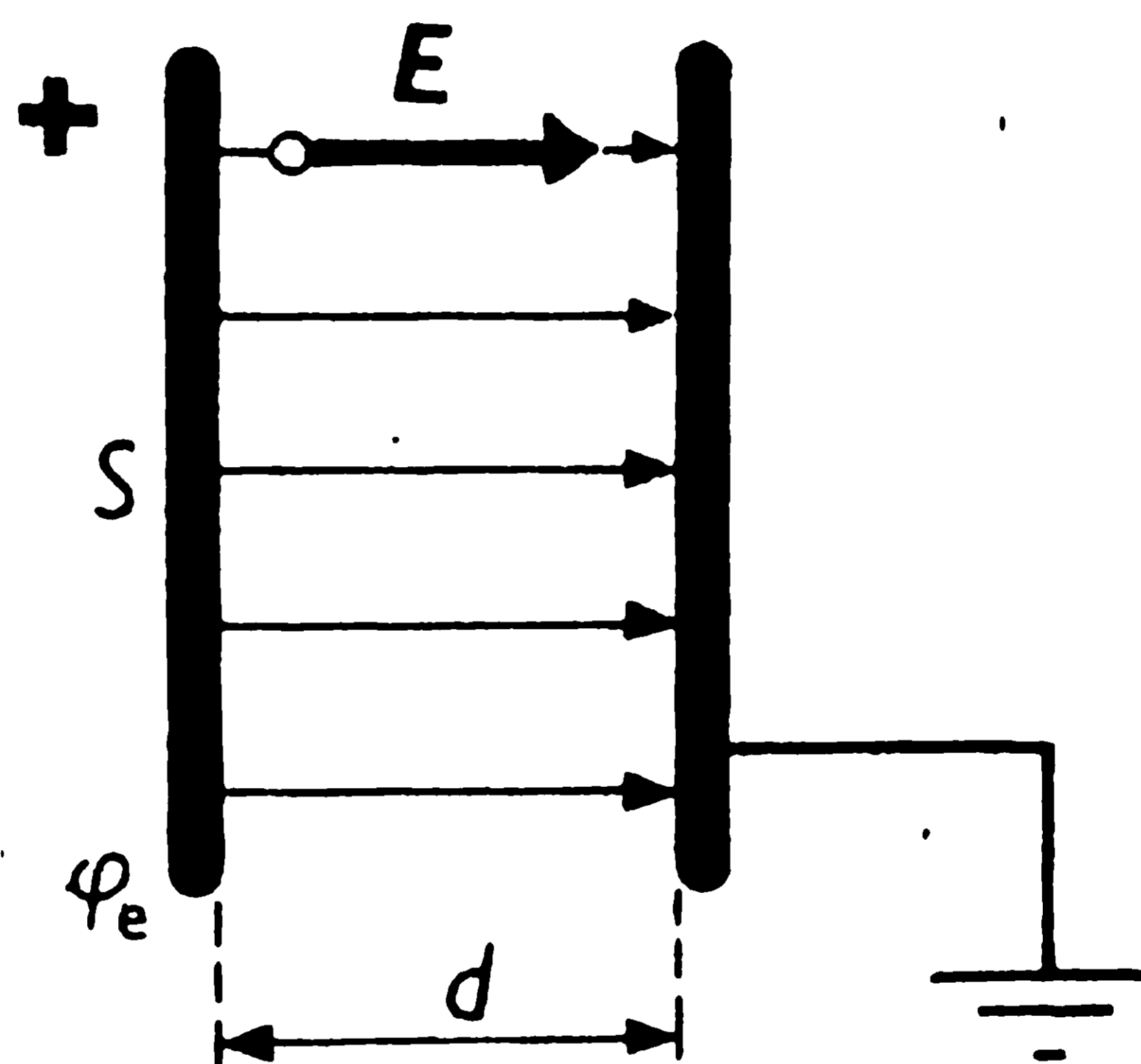


\* Jednotka kapacity je pomenovaná podľa významného anglického fyzika Faradaya. MICHAEL FARADAY (čítaj majkl feredy; 1791—1867).

má kapacitu 1 F, keď sa nabije nábojom 1 C na potenciál 1 V. V technickej praxi sa kapacita meria v menších jednotkách. Sú to  $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$ ,  $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$ ,  $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$ .

Rôzne vodiče majú rozličnú kapacitu. Závisí od tvaru vodiča a od prostredia, v ktorom je vodič. Napríklad kapacita guľového vodiča s polomerom  $R$  vo vákuu je  $C = 4\pi \varepsilon_0 R$ , kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vákuu.

Kapacita osamotených vodičov je veľmi malá. Napríklad guľový vodič s polomerom 9 cm vo vákuu má kapacitu len  $10 \text{ pF} = 10^{-11} \text{ F}$ . Väčšiu kapacitu má sústava dvoch navzájom izolovaných vodičov, ktorú nazývame kondenzátor. Najjednoduchší kondenzátor je **platňový kondenzátor**. Tvoria ho dve rovnobežné navzájom izolované vodivé platne (obr. 1-18).



Obr. 1-18.

Keď je na neuzemnenej platni kondenzátora s veľkosťou plochy  $S$  rovnomerne rozmiestnený elektrický náboj  $Q$ , platňa má plošnú hustotu elektrického náboja  $\sigma = \frac{Q}{S} = \varepsilon_0 |\mathbf{E}|$ . Keď vyjadríme veľkosť intenzity elektrického poľa medzi platňami, ktoré sú od seba vo vzdialenosti  $d$ , zo vzťahu pre potenciál  $\varphi_e = E d$ , dostaneme vzťah  $\frac{Q}{S} = \varepsilon_0 \frac{\varphi_e}{d}$ , odkiaľ pre náboj na neuzemnenej platni kondenzátora

$$Q = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \varphi_e$$

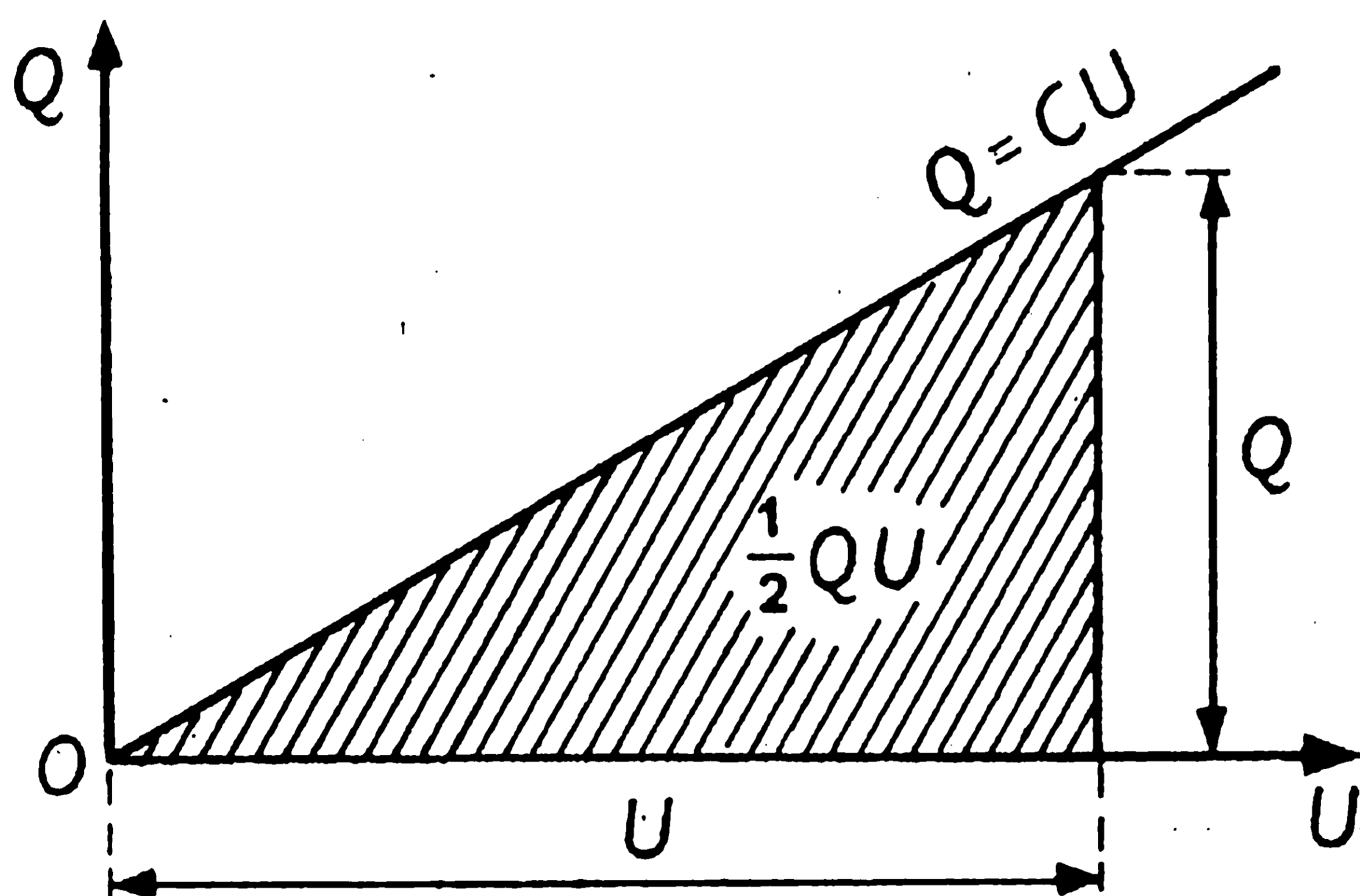
Porovnaním so vzťahom  $Q = C \varphi_e$ , dostaneme pre kapacitu platňového kondenzátora vo vákuu vzťah

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

Kapacita platňového kondenzátora je priamo úmerná obsahu účinnej plochy platní (časť povrchu vodivej platne, proti ktorej leží povrch druhej platne) a nepriamo úmerná vzdialenosti platní.

Platnosť vzťahu overíme pokusom. Keď zväčšíme obsah  $S$  účinnej plochy, alebo keď zmenšíme vzdialenosť  $d$  platní kondenzátora (bez toho, že by sa náboje medzi platňami vyrovnali), jeho kapacita sa zväčší.

Pri nabíjaní platňového kondenzátora sa koná práca. Postupným prenášaním náboja na jednu z platní kondenzátora zväčšuje sa celkový náboj  $Q$  tejto platne, čím sa zväčšuje aj napätie  $U$  medzi platňami. Pretože platí  $Q = C U$ , grafom závislosti náboja  $Q$  od napätia  $U$  je polpriamka (obr. 1-19). Ak vyjdeme zo začiatočného stavu, keď hodnoty náboja



Obr. 1-19

a napätia boli nulové, je celková práca vykonaná pri nabití kondenzátora nábojom  $Q$  na napätie  $U$  graficky znázornená obsahom trojuholníka so základňou  $U$  a výškou  $Q$ . Z toho práca

$$W = \frac{1}{2} Q U$$

alebo

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

Táto práca súčasne určuje **energiu elektrického poľa nabitého kondenzátora.**

## Úlohy

1. Meraním elektrického náboja a potenciálu na guľovom vodiči sa dostali tieto hodnoty:

$\frac{\varphi_e}{10^3 \text{ V}}$	0,8	1,2	1,6	2,4
$\frac{Q}{10^{-8} \text{ C}}$	2,4	3,6	4,8	7,2

- Určte kapacitu vodiča. [30 pF]
- Na aký potenciál sa nabije vodič s kapacitou 20 pF nábojom  $1 \mu\text{C}$ ? [ $5 \cdot 10^4 \text{ V}$ ]
  - Aká je kapacita platňového kondenzátora, ktorý má obdĺžnikové platne s rozmermi 30 cm a 20 cm vo vzdialenosti 6 mm? Permitivita vákua  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ . [88,5 pF]
  - Akú energiu má kondenzátor s kapacitou 50  $\mu\text{F}$ , ktorý nabijeme na napätie 400 V? [4 J]

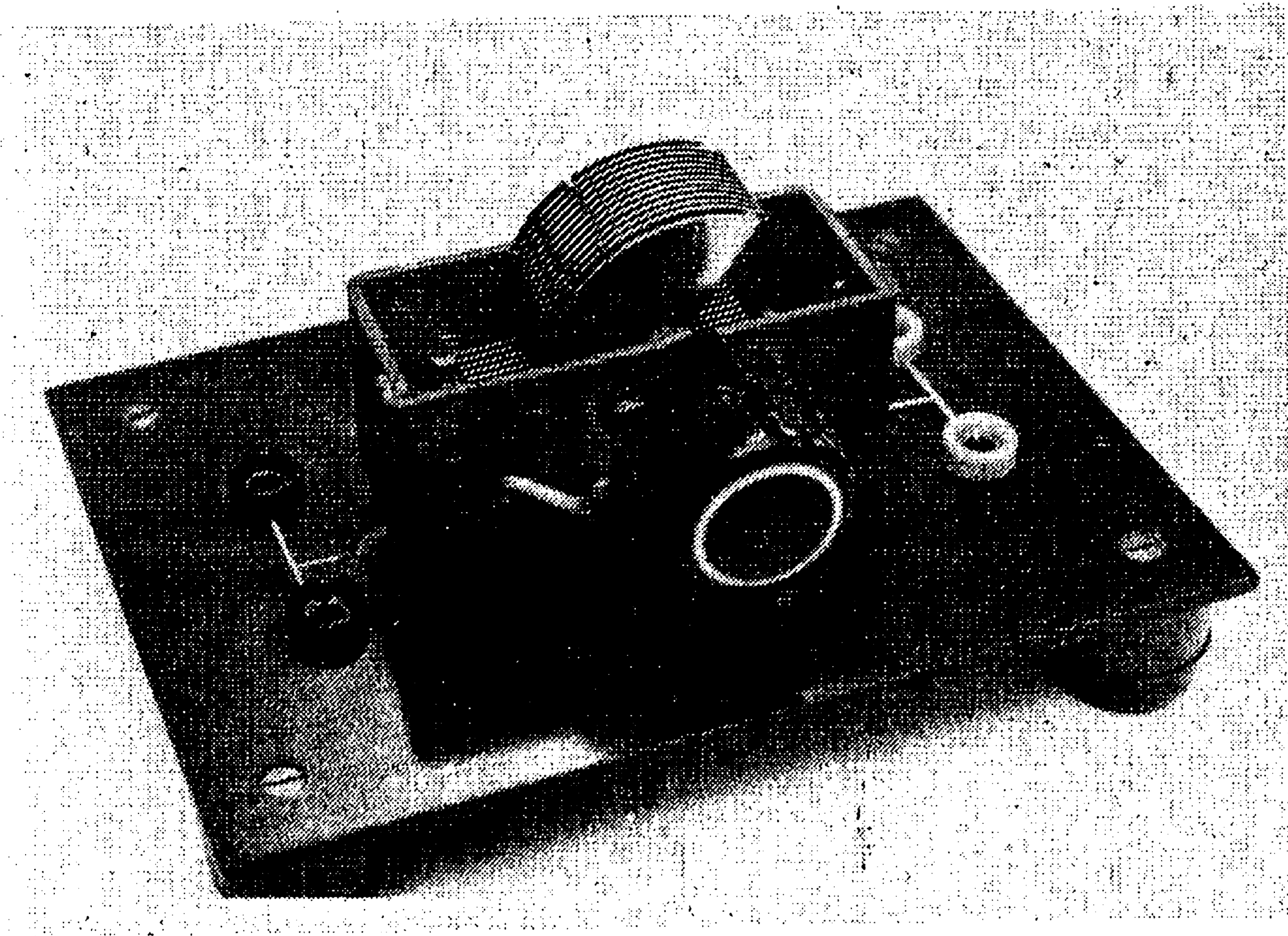
## 1.9 Spájanie kondenzátorov

Kondenzátory majú široké uplatnenie v oznamovacej a prístrojovej technike. Najznámejšie druhy kondenzátorov, ktoré používame v technickej praxi, sú zvitkový, keramický, elektrolytický a otočný kondenzátor s meniteľnou kapacitou (obr. 1-20a, b).

Väčšina kondenzátorov má hodnoty kapacít stále. Požadované hodnoty kapacít dosahujeme rôznym spájaním kondenzátorov. Najjednoduchšie prípady spojenia kondenzátorov sú paralelné spojenie (spojenie vedľa seba) a sériové spojenie (spojenie za sebou).

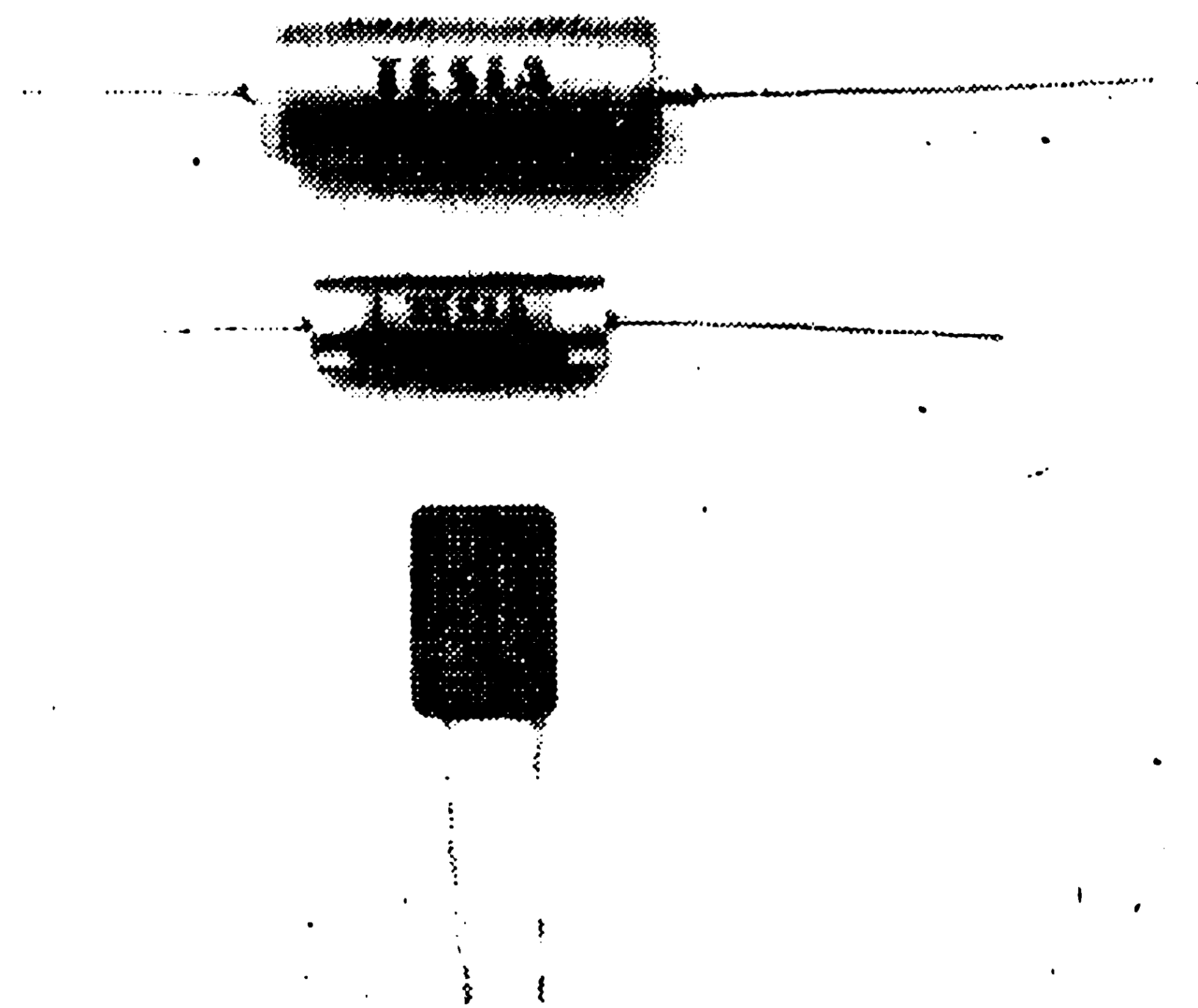
Pri **paralelnom spojení** dvoch kondenzátorov s kapacitami  $C_1$  a  $C_2$  (obr. 1-21) vzniká vlastne kondenzátor s väčšou účinnou plochou platní. Náboje súhlasného znamienka na daných kondenzátoroch sú  $Q_1 = C_1 U$  a  $Q_2 = C_2 U$ , preto celkový náboj  $Q_3 = Q_1 + Q_2$ . Napätia  $U$  medzi platňami oboch kondenzátorov sú pritom rovnaké. Zo vzťahu  $Q_3 = C U = C_1 U + C_2 U$  je zrejmé, že výsledná kapacita dvoch kondenzátorov spojených paralelne je

$$C = C_1 + C_2$$



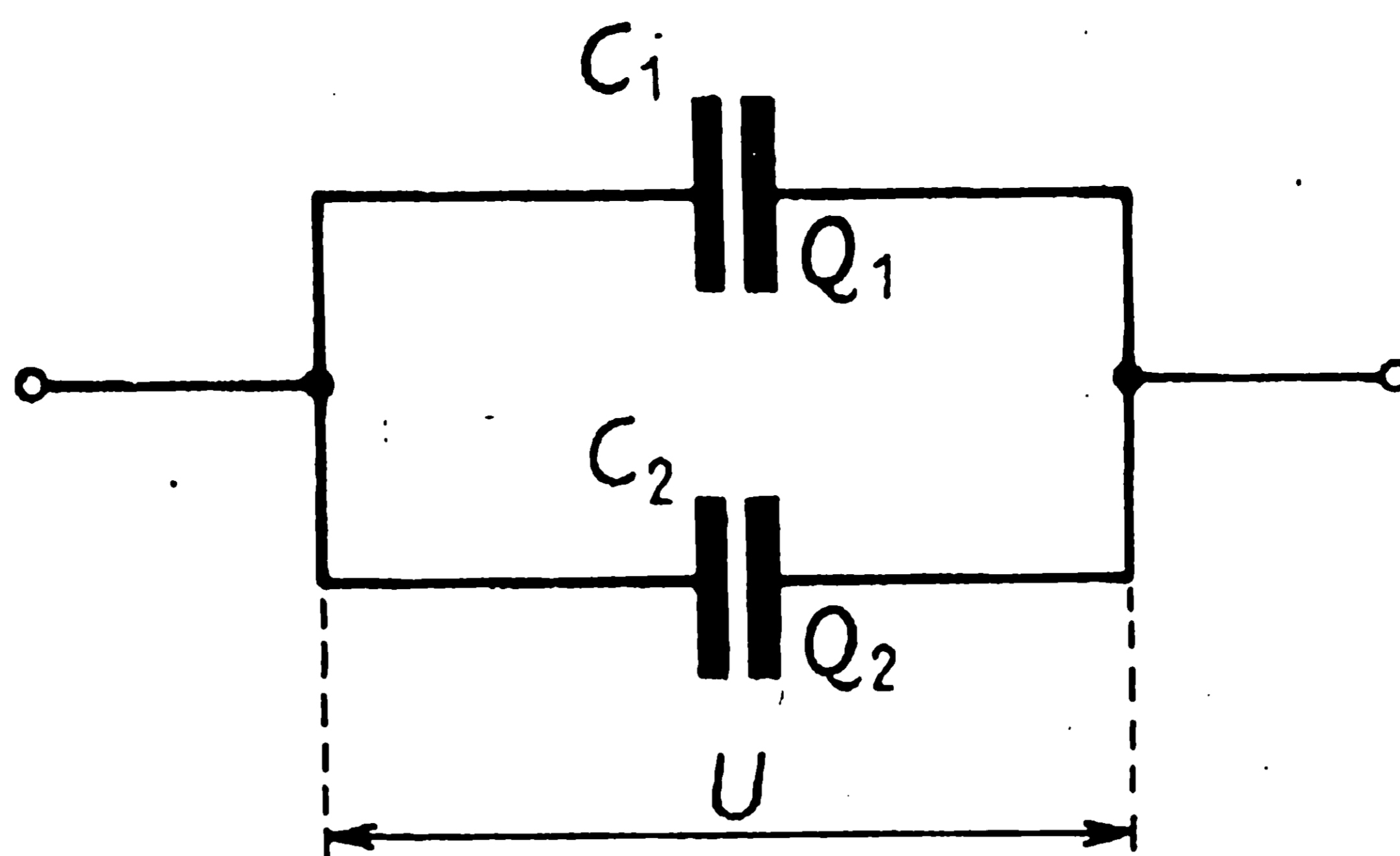
Obr. 1-20 a

Obr. 1-20 b

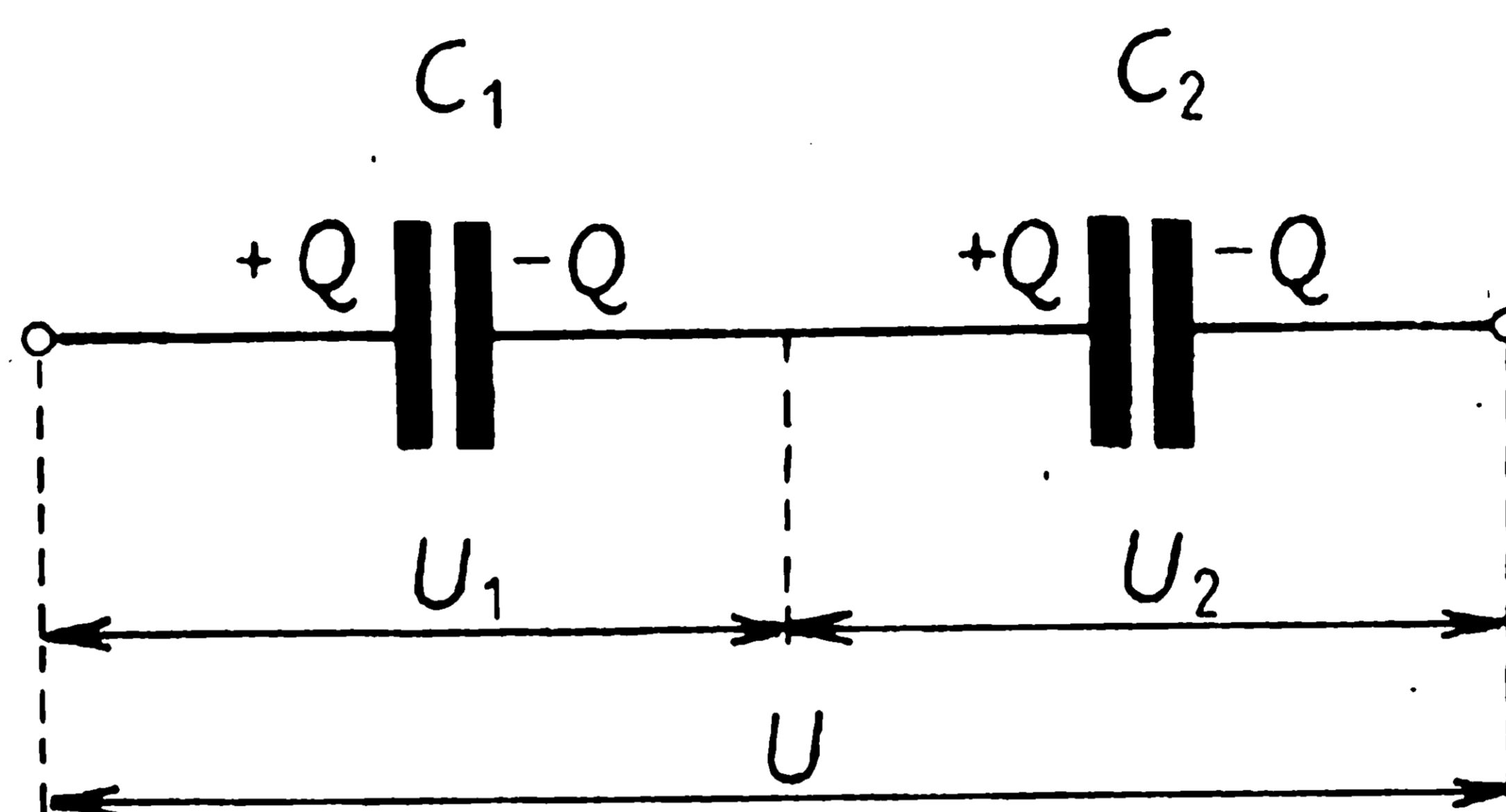


Pri sériovom spojení dvoch kondenzátorov s kapacitami  $C_1$  a  $C_2$  (obr.1-22) majú náboje na obidvoch kondenzátoroch rovnakú veľkosť  $Q = C_1 U_1 = C_2 U_2$ , kde  $U_1$  a  $U_2$  sú napätia medzi platňami kondenzátorov. Keď nabijeme platňu prvého kondenzátora nábojom  $+Q$ , indukuje sa na jeho druhej platni rovnako veľký náboj  $-Q$  a na platniach druhého

Obr. 1-21



Obr. 1-22



kondenzátora rovnako veľké náboje  $+Q$  a  $-Q$ . Pokusom možno dokázať, že pri sériovom spojení kondenzátorov celkové napätie  $U = U_1 + U_2$ . Po dosadení za jednotlivé napätia dostaneme

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

odkiaľ pre výslednú kapacitu dvoch kondenzátorov spojených sériovo

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

### Úlohy

1. Určte výslednú kapacitu troch kondenzátorov s kapacitami 20 pF, 30 pF a 50 pF spojených a) paralelne; b) sériovo. [100 pF; 9,7 pF]
2. Ku kondenzátoru s kapacitou 400 pF treba pripojiť druhý kondenzátor tak, aby výsledná kapacita bola 240 pF. Ako je pripojený druhý kondenzátor a akú má kapacitu? [sériovo; 600 pF]



## ZHRNUTIE — ELEKTRICKÉ POLE

Elektrické pôsobenie je špeciálnym prípadom všeobecnej elektromagnetickej interakcie. Jej mierou je elektrická sila, ktorá vzniká vzájomným pôsobením elektricky nabitých telies, ktoré sú vzhľadom na zvolenú vzťažnú sústavu v pokoji. Veľkosť sily, ktorou na seba pôsobia bodové náboje, vyjadruje Coulombov zákon. Vzájomné pôsobenie medzi bodovými nábojmi, ktoré sú v pokoji, je sprostredkované elektrickým poľom. Toto pole môžeme opísať (podobne ako gravitačné pole) vektorovou veličinou intenzita elektrického poľa alebo skalárnou veličinou potenciál.

Elektrické pole môžeme graficky znázorniť siločiarami alebo ekvipotenciálnymi plochami. Pri pohybe bodového elektrického náboja v elektrickom poli práca, ktorú vykoná pole, závisí iba od začiatočného a koncového bodu posunutia náboja v elektrickom poli. Nezávisí od tvaru trajektórie, od veľkosti dráhy, ani od spôsobu konania práce.

Keď vektor intenzity elektrického poľa má vo všetkých miestach poľa rovnakú veľkosť, smer a orientáciu, hovoríme, že elektrické pole je homogénne. Takéto pole je napr. medzi platňami nabitého kondenzátora. Elektrické napätie medzi dvoma bodmi elektrického poľa je určené rozdielom potenciálov medzi danými bodmi.

Elektrický náboj (kladný a záporný) je viazaný na častice látky (protóny, elektróny, ióny). Existuje elementárny elektrický náboj. Elektrický náboj nemôžeme utvoriť, ani zničiť. Platí zákon zachovania elektrického náboja v elektricky izolovanej sústave.

Na kovových vodičoch sa náboj rozmiestuje na vonkajšom povrchu a jeho hustota závisí od intenzity elektrického poľa na povrchu vodiča.

Charakteristickou vlastnosťou vodiča je jeho kapacita, ktorá závisí od tvaru vodiča a prostredia, ktoré vodič obklopuje. Sústava navzájom izolovaných vodičov sa nazýva kondenzátor. Kondenzátory môžeme spájať sériovo alebo paralelne.

Veličiny	Jednotky	Zákony	Vzťahy
náboj $Q$	coulomb C	zákon zachovania elektrického náboja	
elementárny náboj $e$ elektrická sila $F_e$	C N	Coulombov zákon	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ pre vákuum $F_e = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
permitivita vákua $\epsilon_0$	$\text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$		$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ veľkosť intenzity homogénneho poľa
intenzita elektrického poľa $E$	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$		$ \mathbf{E}  = \frac{U}{d}$ veľkosť intenzity radiálneho poľa vo vákuu $ \mathbf{E}  = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$
práca v homogénnom elektrickom poli $W$	J		$W = Q_i  \mathbf{E}  d = Q_i U = Q_i  \varphi_2 - \varphi_1 $
elektrický potenciál $\varphi_e$	V		$\varphi_e = \frac{E_p}{Q}$
elektrické napätie $U$ plošná hustota náboja $\sigma$	V $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$		$U =  \varphi_2 - \varphi_1 $ $U =  \mathbf{E}  d$ $\sigma = \frac{Q}{S}, \sigma = \epsilon_0  \mathbf{E} $
kapacita vodiča $C$	farad F $F = \text{C} \cdot \text{V}^{-1}$		$C = \frac{Q}{\varphi_e}, C = \frac{Q}{U}$ kapacita vodiča vo vákuu: guľového $C = 4\pi \epsilon_0 R$ platňového $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ energia nabitého kondenzátora $E = \frac{1}{2} Q U = \frac{1}{2} C U^2$ spojenie kondenzátorov: paralelné $C = C_1 + C_2$ sériové $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

## Statické silové polia

V 1. ročníku ste sa oboznámili s gravitačným poľom.

Gravitačné a elektrické pole sú statické silové polia. Gravitačné pole je v okolí každého telesa s hmotnosťou  $m$ , elektrické pole v okolí každého telesa s voľným elektrickým nábojom  $Q$ . Pritom predpokladáme, že teleso aj elektrický náboj sú vzhľadom na inerciálnu vzťažnú sústavu v pokoji.

Gravitačné aj elektrické pole sa vyznačujú silovým pôsobením na iné telesá. Na teleso v gravitačnom poli pôsobí gravitačná sila, na teleso s elektrickým nábojom v elektrickom poli pôsobí elektrická sila.

Existencia gravitačného poľa sa viaže na hmotnosť telesa  $m$ , existencia elektrického poľa na elektrický náboj  $Q$ . Obidve polia sú jednou z dvoch základných foriem hmoty, ktoré existujú nezávisle od nášho vedomia.

Gravitačné a elektrické pole charakterizujú dve veličiny: intenzita poľa a potenciál. Intenzita gravitačného poľa  $K$  a intenzita elektrického poľa  $E$  sú určené na základe silového pôsobenia poľa. Gravitačný potenciál  $\varphi_g$  a elektrický potenciál  $\varphi_e$  sú určené na základe práce konanej pri premiesťovaní telesa alebo elektrického náboja v silovom poli.

Intenzita poľa je vektorová veličina, potenciál skalárna veličina. Pomocou prvej konštruujeme vektorové pole, pomocou druhej skalárne pole. Vektorové a skalárne polia sú matematické modely reálnych silových polí, ktoré znázorňujú ich isté vlastnosti. Preto matematické modely nestotožňujeme so skutočnými poliami.

Na základe intenzity poľa definujeme siločiaru poľa, na základe potenciálu ekvipotenciálne plochy — hladiny potenciálu. Siločiaru a ekvipotenciálne plochy sú veľmi názorné matematické modely oboch silových polí.

Vzhľadom na spoločné vlastnosti gravitačného a elektrického poľa sú analogické i vzťahy na vyjadrenie silového pôsobenia, intenzity poľa, práce a potenciálu pre obidva druhy polí. Prehľad všetkých vzťahov je uvedený v tabuľke na s. 37.

Gravitačné a elektrické pole majú však aj vlastnosti, ktorými sa navzájom odlišujú. K takýmto vlastnostiam patrí predovšetkým:

1. Rozdielny pôvod polí. Gravitačné pole sa viaže na hmotnosť telesa, elektrické pole na elektrický náboj.

2. Rozdiel v silovom pôsobení. Gravitačné sily sú len príťažlivé, elektrické sú príťažlivé aj odpudivé, čo súvisí s dvoma druhmi elektrického náboja.
3. Rozdiel vo veľkosti silového pôsobenia. Gravitačné sily, ktoré pôsobia medzi hmotnými bodmi s jednotkovou hmotnosťou, sú pomerne malé, elektrické sily, ktoré pôsobia medzi bodovými nábojmi s jednotkovým nábojom, sú mnohonásobne väčšie.
4. Rozdiel v konštantách  $\kappa$  a  $k$ . Gravitačná konštanta nezávisí od prostredia — je to univerzálna konštanta, konštanta  $k$  závisí od vlastností prostredia.
5. Rozdiel v platnosti silového pôsobenia. Newtonov gravitačný zákon platí pre hmotné body alebo pre dve rovnorodé gule, Coulombov zákon iba pre dva bodové náboje (pri guľových vodičoch nezanedbateľných rozmerov má elektrická sila inú veľkosť).

Gravitačné a elektrické polia majú teda veľa spoločných i rozdielnych vlastností, ktoré ich charakterizujú. Spoločné vlastnosti umožňujú jednotný opis oboch polí a vyjadrenie týchto vlastností analogickými matematickými modelmi a vzťahmi.

Vo vyšších ročníkoch sa postupne oboznámime s ďalšími druhmi fyzikálnych polí. Bude to magnetické pole, ktoré je v okolí elektrického náboja pohybujúceho sa stálou rýchlosťou a elektromagnetické pole, ktoré je v okolí náboja pohybujúceho sa rýchlosťou, ktorá sa s časom mení. Dozviete sa, že elektrické a magnetické polia sú osobitným prípadom elektromagnetického poľa. Ďalším druhom poľa je pole jadrových síl, ktoré sprostredkuje silové pôsobenie častíc vnútri atómového jadra.

Gravitačné pole	Elektrické pole
Hmotnosť $m$	Elektrický náboj $Q$ Elementárny náboj $e$
Gravitačná sila $F_g = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2}$ gravitačná konštanta $\kappa$	Elektrická sila $F_e = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ konštanta $k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0}$
Intenzita gravitačného poľa $K = \frac{F_g}{m}$ homogénne pole $K = a_g$ radiálne pole $K = \kappa \frac{M}{r^2}$	Intenzita elektrického poľa $E = \frac{F_e}{Q}$ homogénne pole $ \mathbf{E}  = \frac{U}{d}$ radiálne pole $ \mathbf{E}  = k \frac{Q}{r^2}$
Práca v gravitačnom poli homogénne pole $W = m K h$	Práca v elektrickom poli homogénne pole $W = Q  \mathbf{E}  d$
Gravitačný potenciál $\varphi_g = \frac{E_p}{m}$ homogénne pole $\varphi_g = K h$	Elektrický potenciál $\varphi_e = \frac{E_p}{Q}$ homogénne pole $\varphi_e =  \mathbf{E}  d$



## 2. Elektrický prúd

Už vieme, že pri skúmaní elektrických vlastností elektrónov, protónov, atómov a látok vôbec je dôležitou fyzikálnou veličinou **elektrický náboj**. Keď v látkach za istých podmienok konajú voľné častice s nábojom (elektróny, protóny, ióny) usporiadaný pohyb, vzniká v látkach elektrický prúd.

Na pochopenie mechanizmu vzniku elektrického prúdu treba najprv preskúmať javy, ktoré nastanú, ak vodič alebo izolant vložíme do elektrického poľa. Preto sa najskôr zameriame na tieto javy.

### 2.1 Vodič v elektrickom poli

Elektrické vodiče sú látky, ktoré obsahujú veľký počet častíc s nábojom, ktoré sa v nich môžu voľne pohybovať. Tieto častice nazývame **voľné častice s nábojom**. V kovových vodičoch (napr. meď, hliník, striebro) sú to **voľné elektróny**, v kvapalinových vodičoch (v elektrolytoch, napr. roztokoch solí alebo kyselín vo vode) sú to **kladné a záporné ióny** a vo vodivých plynoch elektróny a oba druhy iónov.

Voľné častice s nábojom sa vo vodičoch ustavične a neusporiadane pohybujú. Preto je vo vodiči, ktorý nie je nabitý a nie je vo vonkajšom elektrickom poli, ich rozloženie také, že v ľubovoľnej časti vodiča je úhrnný náboj nulový. Navonok sú vodiče elektricky neutrálne.

Zmena rozloženia voľných nabitých častíc vo vodiči nastane, ak vložíme nenabitý vodič do elektrického poľa. Môžeme sa o tom presvedčiť nasledujúcim pokusom:

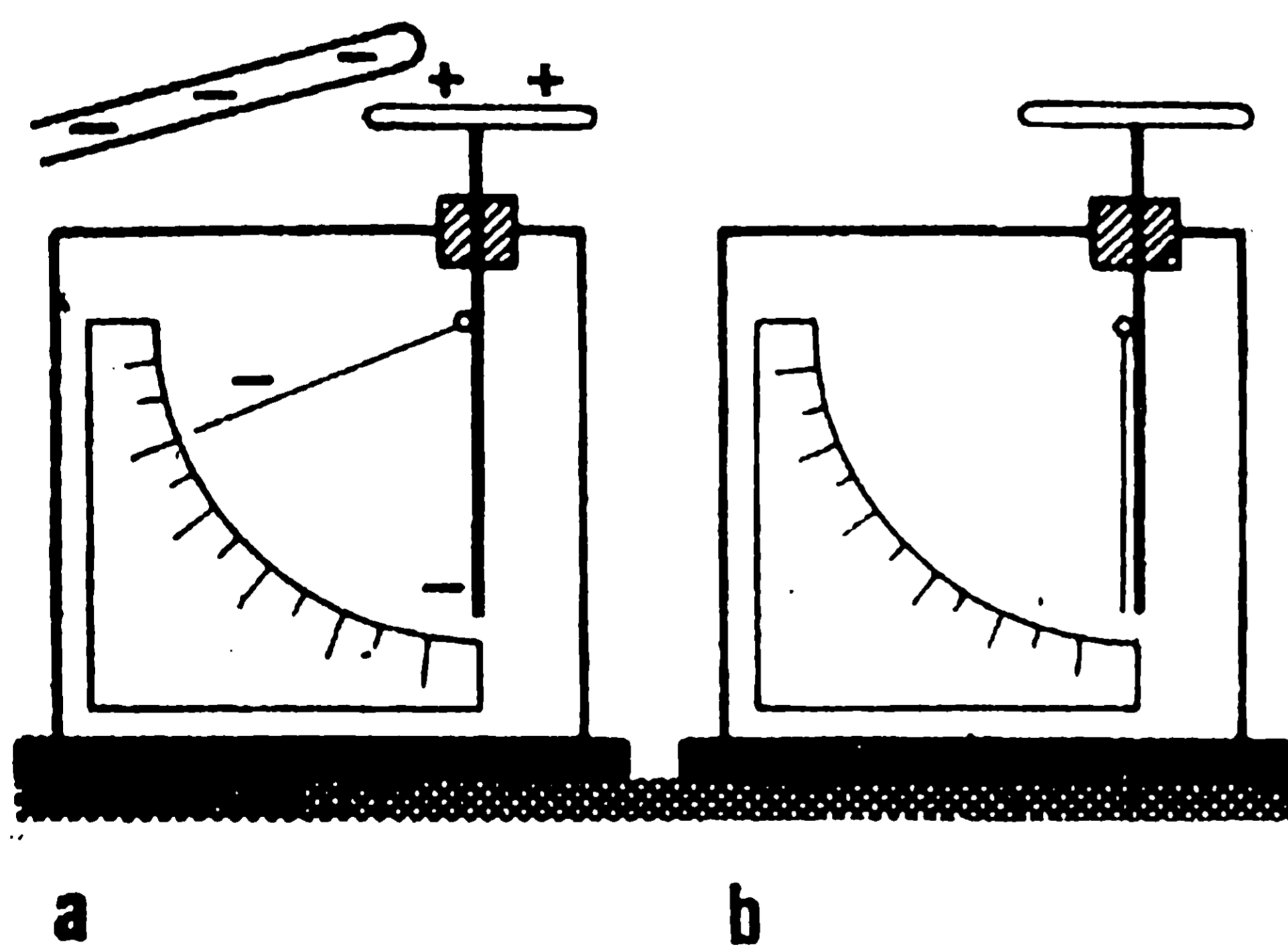
Ku kovovému kotúču elektrometra priblížime záporne zelektrozovanú tyč. Pozorujeme, že ručička elektrometra sa vychýli, hoci sme sa kotúča elektrometra tyčou nedotkli (obr. 2-1a). Keď oddialíme zelektrozovanú tyč, výchylka ručičky zmizne (obr. 2-1b).

Priblížením záporne zelektrozovanej tyče ku kotúču elektrometra spôsobí jej elektrické pole presunutie voľných elektrónov a na povrchu kotúča prevláda kladný náboj protónov (obr. 2-1a). Tento voľný pohyb elektrónov prestane, len čo sa utvorí rovnovážny stav, pri ktorom je vnútri vodiča výsledná intenzita elektrického poľa nulová. Opísaný jav nazývame elektrostatická indukcia.

**Elektrostatická indukcia je jav, pri ktorom sa protiahle časti povrchu vodiča vloženého do elektrického poľa zelektризujú nábojom s rovnakou veľkosťou, ale opačným znamienkom. Takto vzniknuté náboje častíc nazývame indukované náboje.**

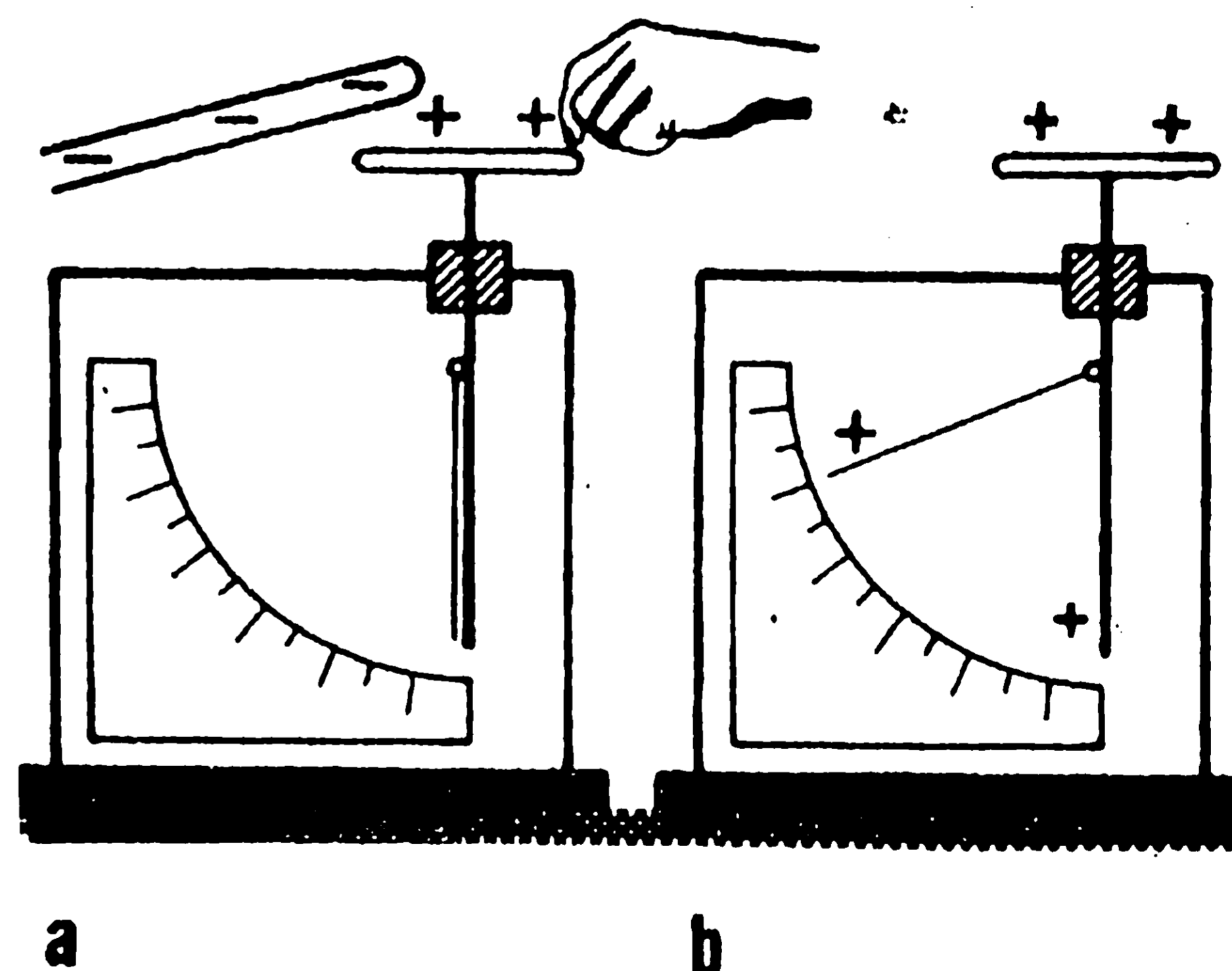
Keď vodič nabitý nesúhlasnými indukovanými nábojmi vyberieme z elektrického poľa, elektrická indukcia zanikne. Vodič sa vráti do pôvodného stavu (obr. 2-1 b).

Opísaný pokus opäť urobíme podľa obr. 2-1a. Potom sa kotúča elektrometra dotkneme rukou (obr. 2-2a), pritom však zelektrozovanú tyč neodďialíme. Pôsobením elektrického poľa



Obr. 2-1

Dočasné zelektrozovanie telesa elektrostatickou indukciou



Obr. 2-2

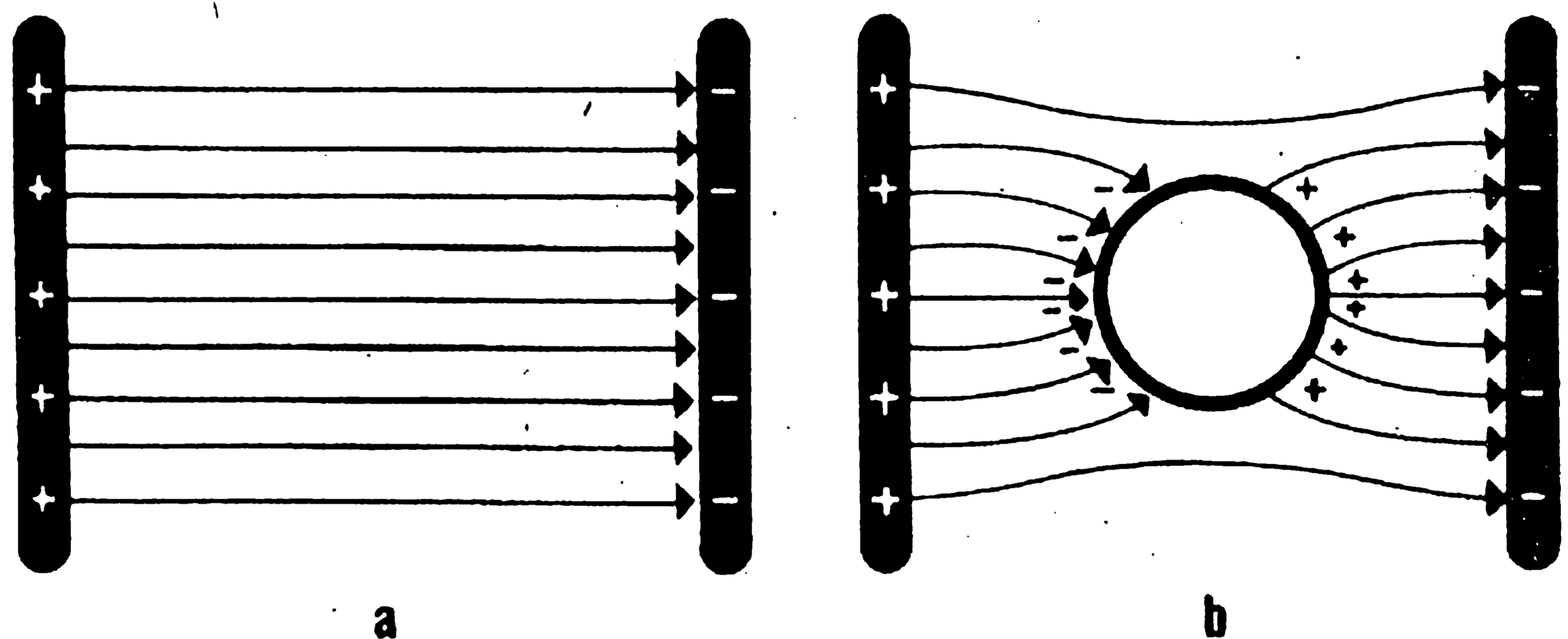
Trvalé zelektrozovanie telesa elektrostatickou indukciou



tyče sa voľné elektróny premiestia z kotúča a tyčky elektrometra na naše telo. Keď vzdialíme ruku a potom zelektrizovanú tyč, zostane elektrometer kladne zelektrizovaný (obr. 2-2b). O tom sa presvedčíme dotykom zelektrizovanou tyčou.

Vznik oboch druhov nábojov elektrostatickou indukciou možno ukázať aj pomocou dvoch elektrometrov spojených kovovou tyčkou s izolovaným držadlom. Indukované náboje možno oddeliť tak, že najskôr odstránime spojovaciu tyčku a potom indukujúce pole (nabitú tyč). Po opätovnom spojení elektrometrov vodivou tyčkou vznikne elektricky neutrálna sústava.

Vodič vložený do elektrického poľa zmení v dôsledku elektrostatickej indukcie tvar siločiar tohto poľa. Na obr. 2-3 a je schéma pokusu, ktorý znázorňuje sústavu siločiar homogénneho elektrického poľa medzi platňami nabitého kondenzátora. Keď medzi platne tohto kondenzátora vložíme napr. kovový prstenec (obr. 2-3 b), sústava siločiar sa pozmení. Siločiar sa končia na vonkajšom povrchu prstenca so zápornými indukovanými nábojmi a opäť sa začínajú na vonkajšom povrchu s kladnými indukovanými nábojmi. Vnútri prstenca nie je elektrické pole.



Obr. 2-3

Vodič v elektrickom poli zmení tvar siločiar

Jav elektrickej indukcie sa využíva na zelektrizovanie kovových vodičov a na ochranu rozličných zariadení pred vplyvom elektrického poľa, tzv. **elektrické tienenie**. Napríklad sklady s výbušnými alebo horľavými látkami sú pred účinkami blesku chránené hustou drôtenou sieťou, káble oznamovacej techniky uložené v kovových obaloch nie sú ovplyvňované vonkajším elektrickým poľom. Ak elektrické tienenie nie je uzemnené, nechráni vonkajší priestor pred účinkami nabitých telies umiestených vnútri tieneneho priestoru.

## Úlohy

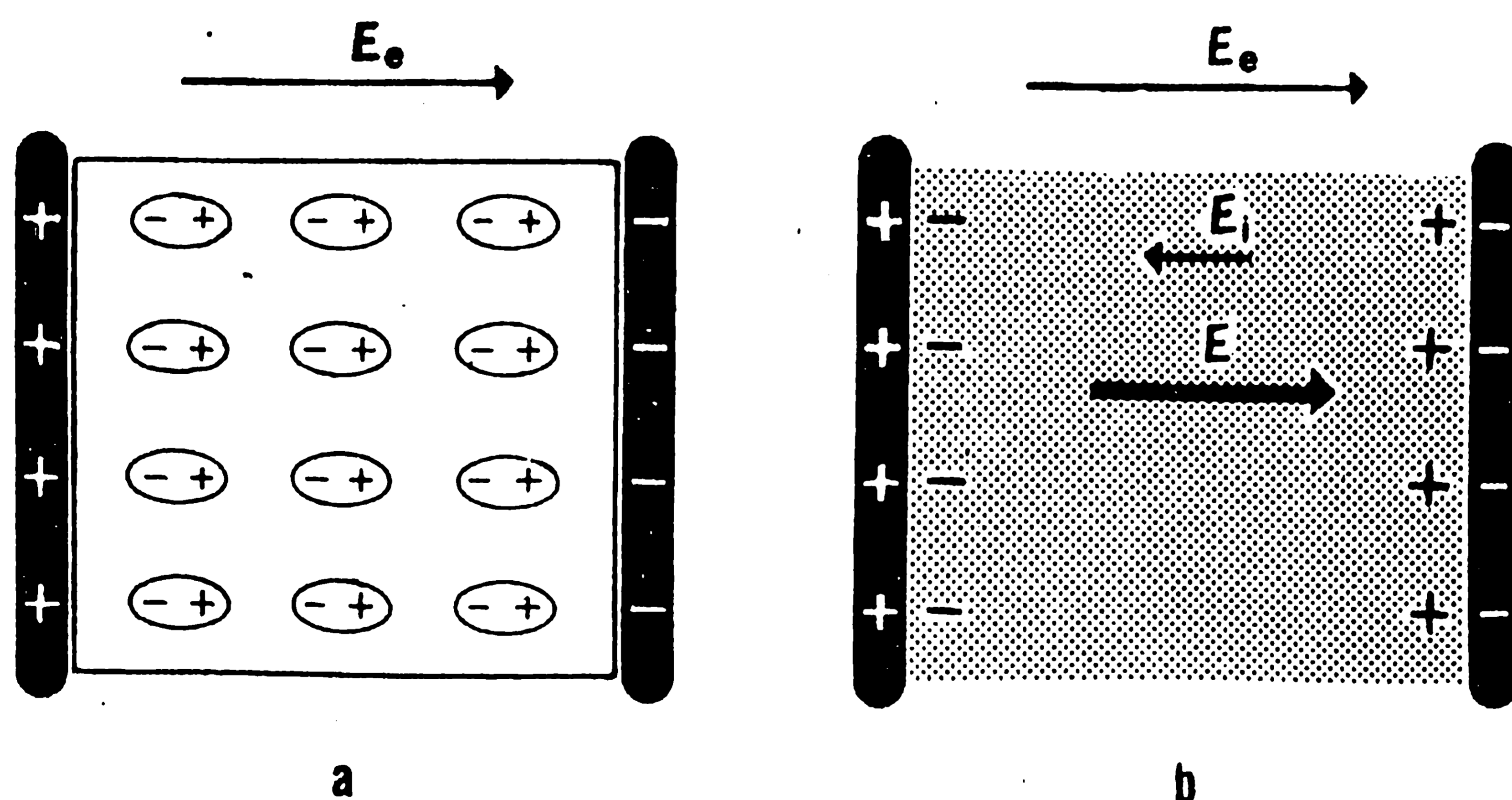
1. Vysvetlite rozdiel medzi zelektrizovaním kovového nenabitého vodiča dotykcom alebo elektrostatickou indukciou. Vysvetlenie experimentálne dokážte.
2. Pomocou dvoch rovnakých elektrometrov experimentálne dokážte, že pri elektrostatickej indukcii vznikajú indukované náboje rovnakej veľkosti, ale opačného znamienka.

## 2.2 Izolant v elektrickom poli

**Izolanty alebo dielektriká** obsahujú rovnako ako vodiče veľký počet častíc s nábojom, z ktorých sú zložené ich atómy alebo molekuly. Takmer všetky tieto nabité častice sú však v dielektrikách viazané vzájomnými silami tak, že sa nemôžu v látke voľne pohybovať. Pôsobením síl vonkajšieho elektrického poľa na izolant sa ťažisko protónov v atónoch posunie o veľmi malú vzdialenosť v smere intenzity  $E_e$  a ťažisko elektrónov v opačnom smere (obr. 2-4 a). Atómy alebo molekuly v izolante sa stávajú **elektrickými dipólmi**.

Utvorenie dipólov a ich pravidelné usporiadanie (obr. 2-4 a) sa prejaví tak, že sa na povrchu dielektrika objaví tenká vrstva s **viazanými elektrickými nábojmi** (obr. 2-4 b). Táto vrstva je zdrojom nového elektrostatického poľa. Náboje vnútri izolantu sa navzájom kompenzujú.

Opísaný jav sa nazýva **polarizácia dielektrika**. Je dôsledkom silového

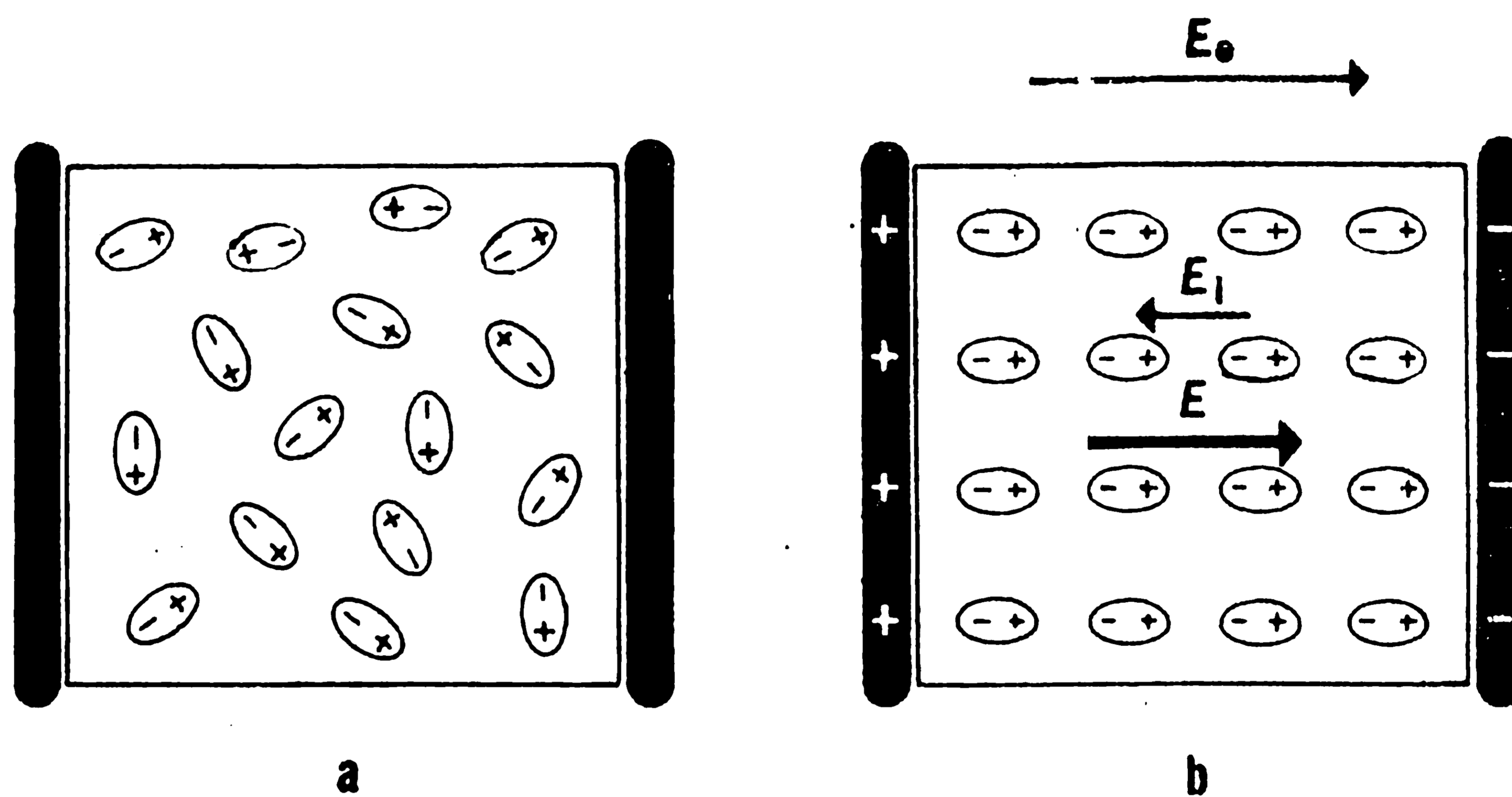


Obr. 2-4

- a) Utvorenie elektrických dipólov v izolantoch v elektrickom poli
- b) Utvorenie tenkej vrstvy s viazanými elektrickými nábojmi

pôsobenia vonkajšieho elektrického poľa na kladné a záporné častice, ktoré sú viazané v atómoch, príp. v molekulách dielektrika.

V niektorých izolantoch existujú dipóly samovoľne bez vonkajšieho elektrického poľa. Dipóly sú však neusporiadané (obr. 2-5 a), preto sa elektrický náboj navonok neprejavuje. Izolant sa polarizuje až pôsobením elektrického poľa (obr. 2-5 b). Takto sa správajú tzv. polárne dielektriká, napr. voda.



Obr. 2-5  
Model polarizácie dielektrika

Polarizácia nastáva aj pri trení rôznych látok. Výsledkom tejto polarizácie je zelektrizovanie niektorých izolantov, napr. fólie alebo tyče z PVC.

Polarizáciou dielektrika sa utvorí vnútorné elektrické pole s intenzitou  $E_i$  opačného smeru, ako je smer intenzity  $E_e$  vonkajšieho elektrického poľa. Intenzita  $E$  výsledného poľa má smer intenzity  $E_e$  a jej veľkosť je  $|E| = |E_e| - |E_i|$  (obr. 2-4b).

Intenzita výsledného poľa je vždy menšia ako intenzita poľa, ktoré polarizáciu vyvolalo. Podiel veľkostí intenzít

$$\frac{|E_e|}{|E|} = \epsilon_r.$$

sa nazýva **relatívna permitivita**. Je to látková konštanta, ktorá má pre rozličné dielektriká rozdielnu hodnotu. Napríklad pre vákuum  $\epsilon_r = 1$ , pre vzduch a ďalšie plyny  $\epsilon_r \approx 1$ , pre destilovanú vodu  $\epsilon_r \approx 82$ . Relatívna permitivita niektorých látok je v MFChT.

Keďže intenzita vonkajšieho elektrického poľa  $\vec{E}_e$  predstavuje súčasne intenzitu elektrického poľa vo vákuu, možno povedať:

**Intenzita elektrického poľa v izolante (dielektriku) je za inak rovnakých podmienok  $\epsilon_r$ -krát menšia ako intenzita elektrického poľa vo vákuu.**

Keď sú v homogénnom izotropnom dielektriku umiestené vo vzdialenosti  $r$  dva voľné bodové náboje s veľkosťou  $Q_1$  a  $Q_2$ , potom na každý z nich pôsobí elektrická sila s veľkosťou

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

kde  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  je **permitivita dielektrika**. Jednotkou permitivity je farad na meter. Veľčina  $\epsilon_0 \doteq 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  je **permitivita vákua**.

## Úlohy

1. Vysvetlite, prečo pri polarizácii dielektrika vznikajú viazané a nie voľné elektrické náboje.
2. Vysvetlite rozdiel medzi pôsobením elektrického poľa na izolovaný vodič a na izolant.
3. Veľkosť intenzity elektrického poľa nabitého platňového kondenzátora so vzduchom je  $6 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . Kondenzátor má kapacitu  $5 \text{ pF}$ . Zmení sa intenzita a kapacita tohto kondenzátora, ak priestor medzi platňami vyplníme sklom s  $\epsilon_r = 6$ ? [Intenzita sa 6-krát zmenší a kapacita 6-krát zväčší.]
4. Dokážte, že jednotkou  $\epsilon$  a  $\epsilon_0$  je  $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ .

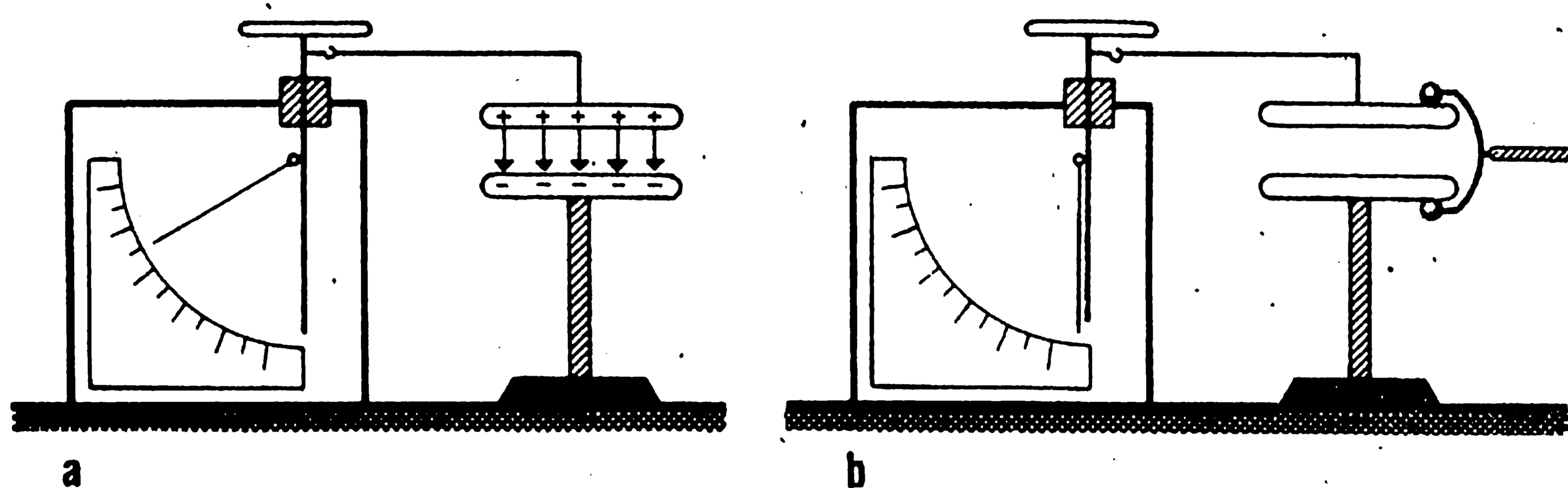
## 2.3 Vznik jednosmerného prúdu

Elektrostatická indukcia a polarizácia sú javy, pri ktorých nastáva na krátky čas usporiadanie pohybu elektricky nabitých častíc. Po utvorení rovnovážneho stavu vo vodiči alebo dielektriku (obr. 2-1a, 2-4) tento pohyb prestane.

---

Pre technickú prax má veľký význam poznatok, že niektoré kryštály (napr. kremeň  $\text{SiO}_2$ ) sa vplyvom elektrického poľa deformujú. Tento jav sa nazýva **piezoelektrický jav**. Existuje aj obrátený efekt: vplyvom deformácie ťahom alebo tlakom sa na stenách kryštálu objavia elektrické náboje, ktoré sú zdrojom elektrického poľa.

Usporiadany pohyb elektricky nabitých častíc nastane na krátky čas aj pri uskutočnení pokusu podľa obr. 2-6. K nabitému platňovému kondenzátoru pripojíme elektrometer (obr. 2-6.a). Výchylka na elektrometri svedčí o existencii elektrického napätia medzi platňami, teda aj elektrického poľa. Keď platne spojíme kovovým vodičom (obr. 2-6.b), napätie medzi platňami veľmi rýchlo klesne na nulovú hodnotu. Elektrické pole utvorené aj vnútri kovového vodiča pôsobí na voľné elektróny a dá ich do usporiadaneho pohybu. Týmto pohybom sa však vyrovnajú potenciály oboch platní a elektrické pole zanikne. Preto prestane aj usporiadany pohyb voľných elektrónov.



Obr. 2-6.

Elektrické pole utvorené medzi platňami zanikne, ak platne vodivo spojíme

**Usporiadany pohyb voľných častíc s elektrickým nábojom sa nazýva elektrický prúd. Podmienkou vzniku elektrického prúdu v látke je prítomnosť voľných častíc s elektrickým nábojom a utvorenie elektrického poľa v tejto látke.**

V predchádzajúcom pokuse bol prúd vo vodiči dočasný. Aby bol v ňom prúd trvalý, musí byť vnútri vodiča nielen utvorené, ale aj udržiavané elektrické pole. Takýto stav nastane, ak je vodič pripojený na **elektrický zdroj**.

Usporiadany pohyb elektricky nabitých častíc stáleho smeru sa nazýva **jednosmerný prúd**. Podľa dohody sa za **smer prúdu** pokladá smer usporiadaneho pohybu voľných častíc s kladným nábojom. Keď je prúd utvorený usporiadaným pohybom voľných častíc so záporným nábojom, napr. elektrónov, jeho smer je podľa tejto dohody opačný ako smer usporiadaneho pohybu týchto častíc.

Usporiadany pohyb voľných častíc s nábojom vo vodiči bezprostredne

nepozorujeme. O existencii prúdu vo vodiči sa však môžeme presvedčiť na základe jeho účinkov. V pevných vodičoch spôsobuje prúd zvýšenie ich teploty, v kvapalných vodičoch zvyčajne mení aj ich zloženie a v plynách vyvoláva často svetelné efekty. **V okolí každého vodiča s prúdom pozorujeme magnetické pole.**

Pojem elektrický prúd používame nielen pre opísaný fyzikálny jav, ale aj pre fyzikálnu veličinu. **Elektrickým prúdom  $I$**  nazývame veličinu definovanú vzťahom

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2,1)$$

kde  $\Delta Q$  je celkový náboj častíc, ktoré prejdú prierezom vodiča v jednom smere za dobu  $\Delta t$ .

Jednotkou prúdu je **ampér (A)**, ktorý je základnou jednotkou SI. Definícia ampéra (pozri MFChT) vyplýva zo vzájomného silového pôsobenia dvoch vodičov s prechádzajúcimi prúdmi prostredníctvom ich magnetických polí. Oboznámte sa s ňou v 3. ročníku. Základná jednotka SI ampér bola nazvaná na počesť francúzskeho fyzika a matematika **A. M. AMPÉRA (1775—1836, obr. 2-7)**, ktorý vybudoval základy elektromagnetizmu.



**Obr. 2-7**  
A. M. Ampère (1775—1836)

---

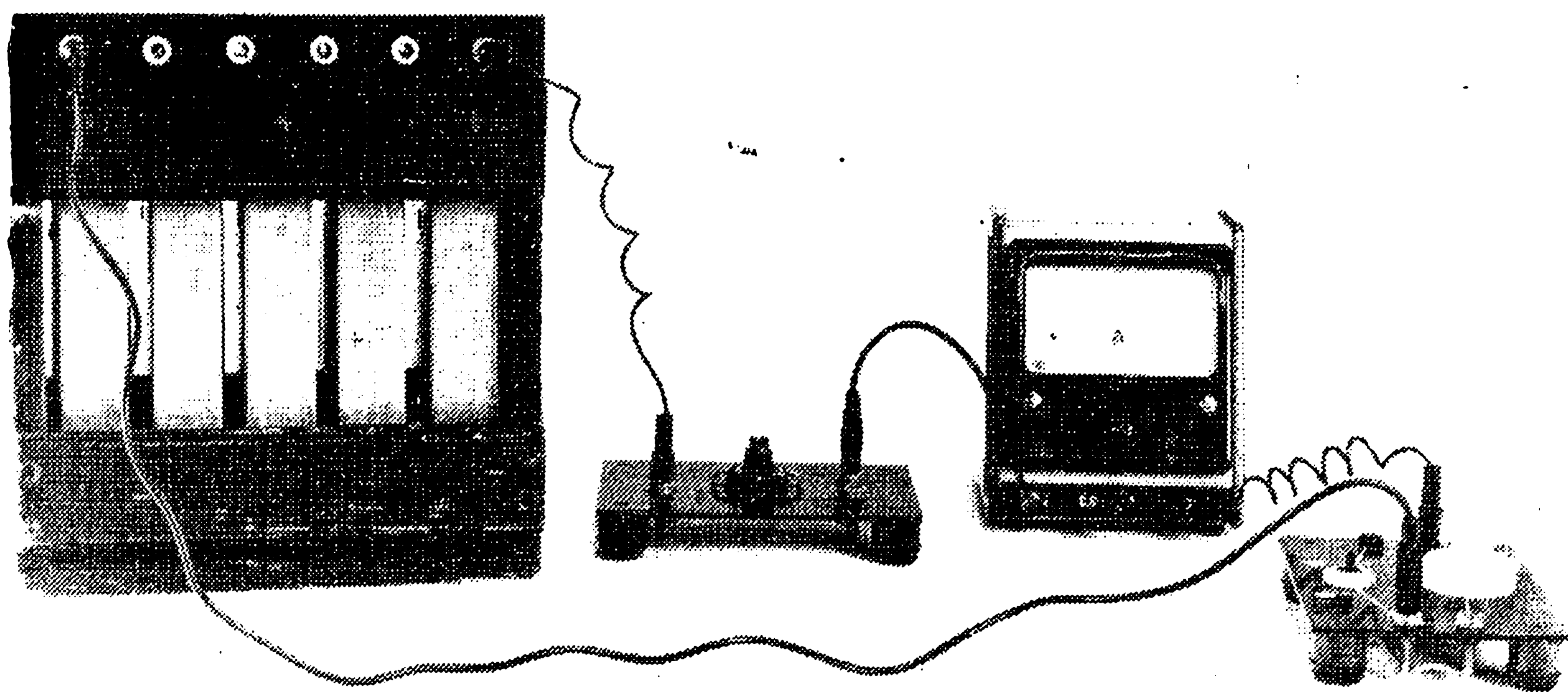
**Poznámka:** S mechanickým pohybom elektricky neutrálneho telesa je spojený aj usporiadaný pohyb elektricky nabitých častíc s veľmi veľkým celkovým nábojom (asi  $10^8$  C v telese s hmotnosťou 1 kg). Napriek tomu nehovoríme o elektrickom prúde, lebo usporiadane sa pohybuje aj rovnaký počet kladne aj záporne nabitých častíc s rovnakou strednou rýchlosťou.

**Poznámka:** Keď je elektrický prúd (jav) tvorený iba usporiadaným pohybom častíc so záporným nábojom, značí  $\Delta Q$  vo vzťahu (2.1) absolútnu hodnotu celkového náboja častíc, ktoré prejdú daným prierezom za dobu  $\Delta t$ . Keď vo vodiči prebieha súčasne usporiadaný pohyb kladných aj záporne nabitých častíc (napr. v elektrolytoch), tak  $\Delta Q$  sa rovná súčtu nábojov kladných častíc, ktoré prejdú prierezom v jednom smere a absolútnych hodnôt nábojov záporných častíc, ktoré vodičom prejdú v opačnom smere za dobu  $\Delta t$ .

Keď sa prúd  $I$  s časom nemení, potom jednosmerný prúd vo vodiči (ako jav) nazývame **konštantný prúd**. Tento stav nastane, ak sa pomocou zdroja utvorí vo vodiči elektrické pole nezávislé od času, t. j.  $E = \text{konšt.}$

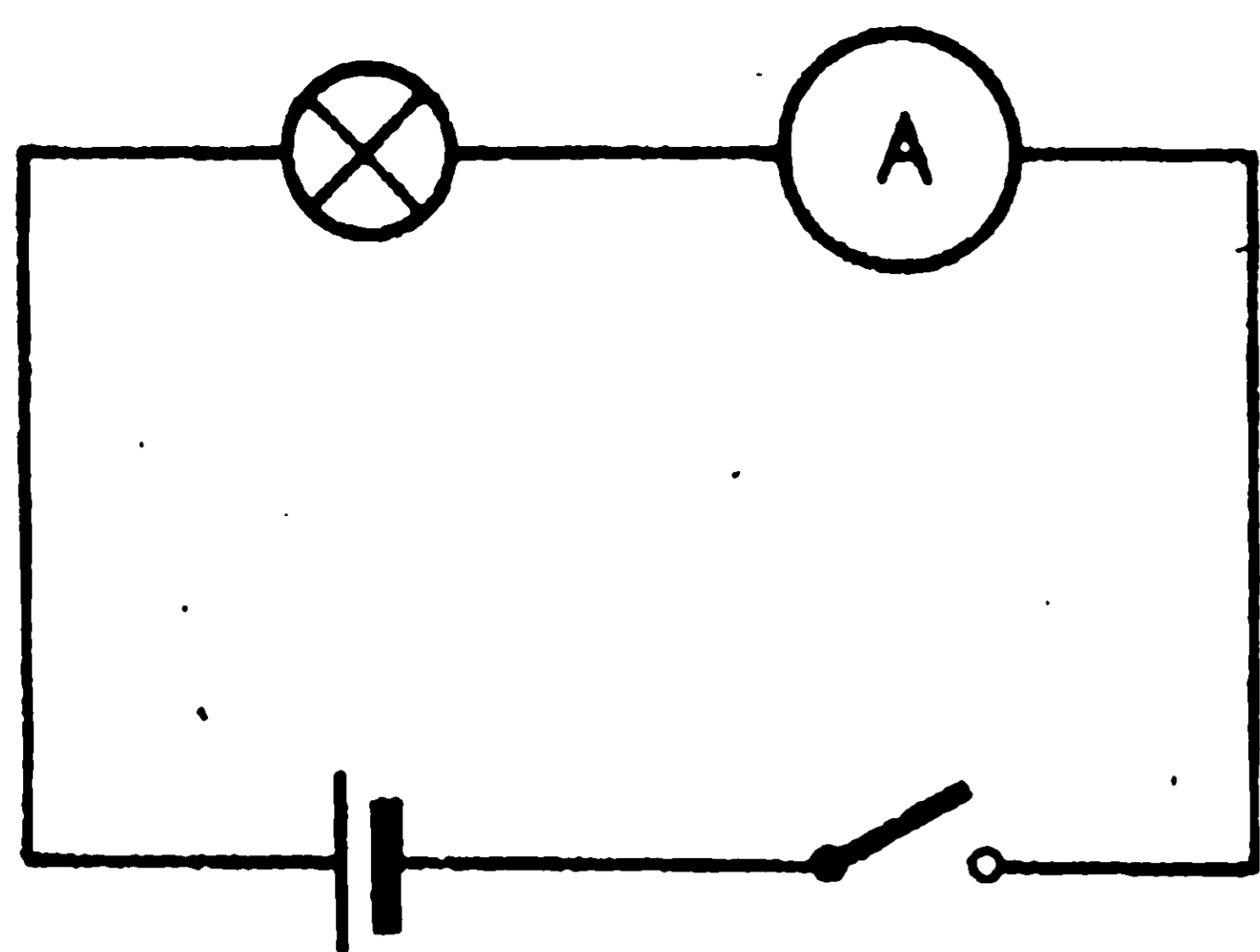
V tomto prípade vzťah (2.1) píšeme v tvare  $I = \frac{Q}{t}$ .

Elektrický prúd  $I$  meriame **ampérmetrom** (obr. 2-8a). Schéma jeho zapojenia v elektrickom obvode so spotrebičom a elektrickým zdrojom je na obr. 2-8b. Podrobnejšie sa s meraním prúdu oboznámite v laboratórnom cvičení.



Obr. 2-8a

Zapojenie ampérmetra v elektrickom obvode



Obr. 2-8b

Schéma zapojenia ampérmetra v elektrickom obvode

Na základe merania prúdu používame vetné spojenia typu „vodičom prechádza prúd  $I$ “ alebo „vodič s prúdom  $I$ “. V týchto prípadoch ide o skrátené vyjadrenie skutočnosti, že v uvažovanom vodiči je elektrický prúd (jav), charakterizovaný v ľubovoľnom priereze vodiča danou hodnotou veličiny  $I$ .

### Úlohy

1. Objasnite pojmy elektrický prúd ako fyzikálny jav a ako fyzikálnu veličinu.
2. Uvážte, či prúd prechádzajúci vodičom spájajúcim platne nabitého kondenzátora (obr. 2-6b) je konštantný prúd. Odpoveď odôvodnite.
3. Vysvetlite, prečo sa v žiadnej časti kovového vodiča s konštantným prúdom nemôžu hromadiť voľné elektróny.
4. Vodičom prechádza konštantný prúd 20 mA. Vypočítajte celkový náboj častíc, ktoré prešli prierezom vodiča za 2 h. [144 C]
5. Vypočítajte počet voľných elektrónov, ktoré prejdú prierezom kovového vodiča s prúdom 1,6 A za čas 10 s. [ $10^{20}$ ]

## 2.4 Elektrický zdroj

Už vieme, že elektrický prúd vo vodiči je vyvolaný elektrickým poľom, ktoré v ňom utvára pripojený elektrický zdroj.

**Elektrický zdroj** je každé zariadenie medzi ktorého dvoma rozličnými časťami, **pólmi**, je aj po pripojení vodiča udržiavaný rozdiel elektrických potenciálov alebo napätia. Preto elektrický zdroj nazývame tiež **zdroj napätia**. Póly vyvedené na povrch zdroja a upravené na praktické pripojenie vodiča sa volajú **svorky zdroja**.

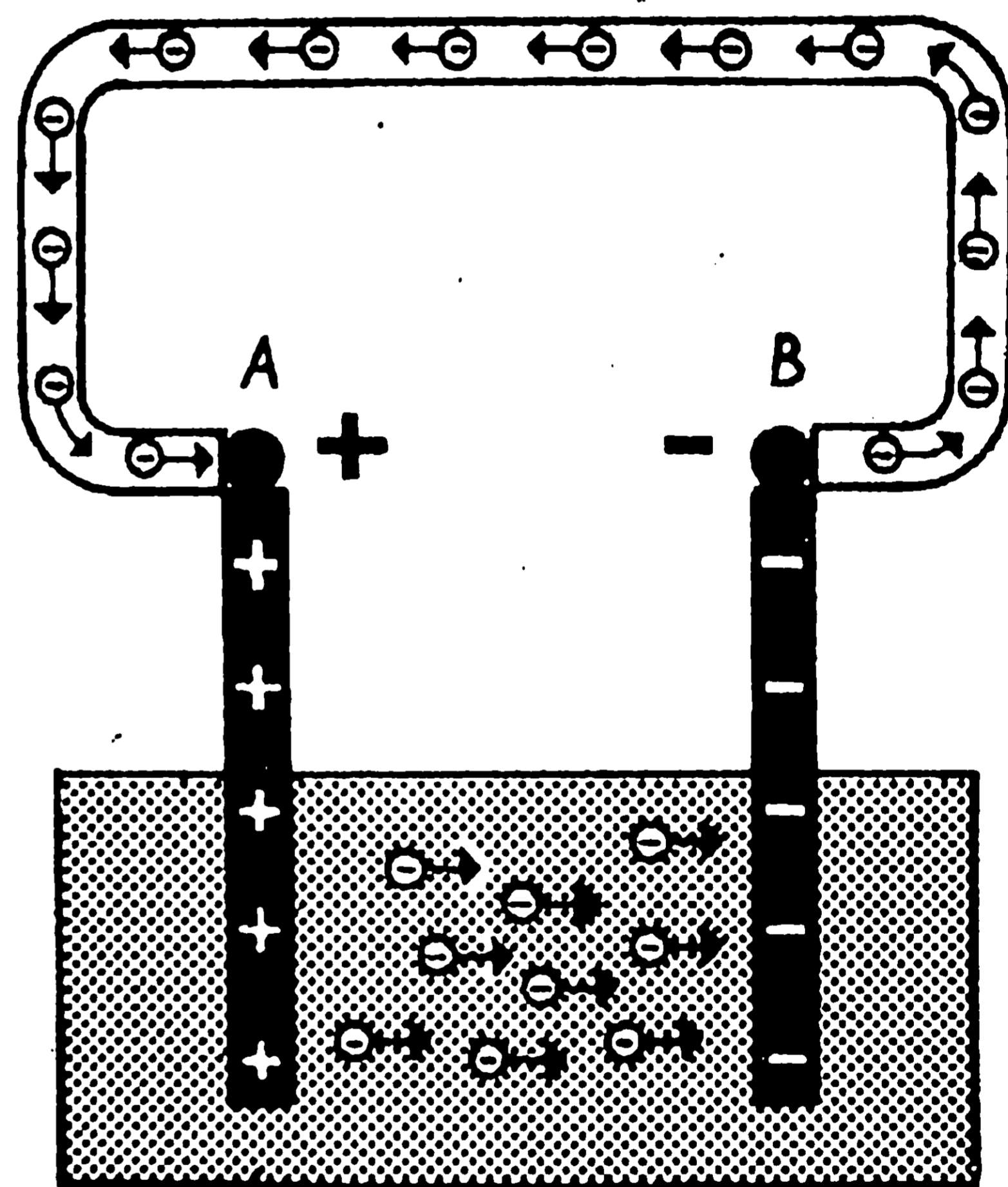
Vzniká otázka, ako možno dosiahnuť, aby medzi svorkami zdroja vzniklo napätie a bolo trvalo udržiavané, aj keď zdroj zaradíme do elektrického obvodu.



Medzi svorkami zdroja vznikne napätie, ak jedna svorka bude obsahovať menej voľných elektrónov (kladná svorka) ako druhá (záporná svorka). Preto vnútri zdroja musia pôsobiť sily, ktoré odvádzajú napr. z kladnej svorky voľné elektróny (príp. záporné ióny) alebo zo zápornej svorky kladné ióny. Tieto sily prekonávajú elektrostatické sily utvoreného elektrického poľa medzi nabitými svorkami. **Vnútri zdroja napätia musia teda pôsobiť neelektrostatické sily.**

Usporiadaný pohyb nabitých častíc vnútri zdroja (vyvolaný pôsobením neelektrostatických síl) sa skončí, ak sa veľkosti elektrostatických a neelektrostatických síl rovnajú. Zdroj (bez pripojeného obvodu) je v rovnovážnom stave a medzi jeho svorkami je trvalé napätie, ktoré sa rovná rozdielu elektrických potenciálov svoriek.

Po odpovedi na druhú časť otázky preskúmame dej, ktorý nastane, ak je zdroj súčasťou elektrického obvodu. Pre jednoduchosť uvažujeme, že kovový vodič pripojíme na svorky zdroja (obr.2-9) a nenastane skrat.



Obr. 2-9

K vysvetleniu dejov v uzavretom elektrickom obvode

Pripojením kovového vodiča na elektricky nabitú svorku A, B vzniká vo vodiči elektrické pole, ktoré spôsobuje usporiadaný pohyb voľných elektrónov vo vodiči od svorky B k svorke A. Na svorkách A a B sa začne znižovať počet prebytočných nábojov. Tým sa zoslabí elektrické pole vnútri zdroja, čiže sa poruší rovnosť veľkosti elektrostatických síl. V dôsledku toho, že na okamih prevládajú neelektrostatické sily, začne vnútri zdroja prebiehať taký pohyb voľných častíc s nábojom, ktorý

obnovuje elektrické náboje na svorkách zdroja. Tak sa v uzavretom elektrickom obvode trvalo udržiava elektrický prúd.

Neelektrostatické sily pri presune nabitých častíc s celkovým nábojom veľkosti  $Q$  konajú prácu  $W_z$ . Veľičinu  $U_e$  definovanú vzťahom

$$U_e = \frac{W_z}{Q} \quad (2.2)$$

nazývame **elektromotorické napätie zdroja**. Je jednou z charakteristík zdroja napätia. Jednotkou elektromotorického napätia je volt.

Keď elektrický obvod nie je pripojený na zdroj, zdrojom prúd neprechádza a  $U_e$  sa rovná rozdielu elektrických potenciálov medzi svorkami zdroja.

V rozličných zdrojoch napätia vznikajú rôzne druhy neelektrostatických síl. Napríklad:

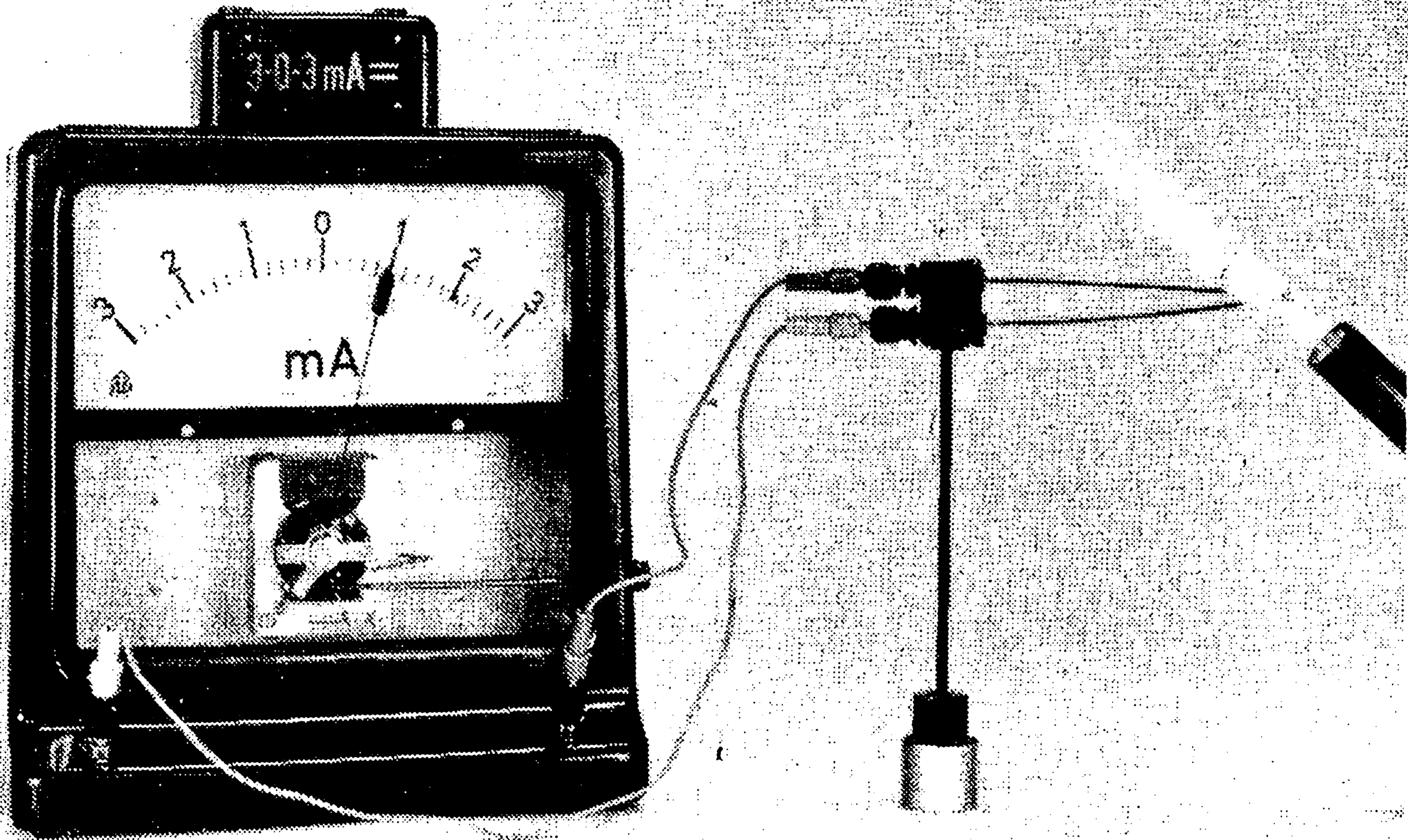
a) V **elektrochemickom zdroji** vznikajú neelektrostatické sily chemickej reakciou elektród s elektrolytom. Príkladom je **galvanický článok** alebo **akumulátor**. Podrobnejšie je o ňom v stati 5.4.

b) Vo **fotoelektrickom zdroji** vzniká napätie vzájomným pôsobením svetla s elektrónmi v kovoch alebo polovodičoch. Príkladom je **fotočlánok**, s ktorým sa podrobnejšie oboznámite v 4. ročníku. Fotočlánok je umiestený napr. v expozimetroch filmových kamier alebo niektorých fotografických prístrojov.

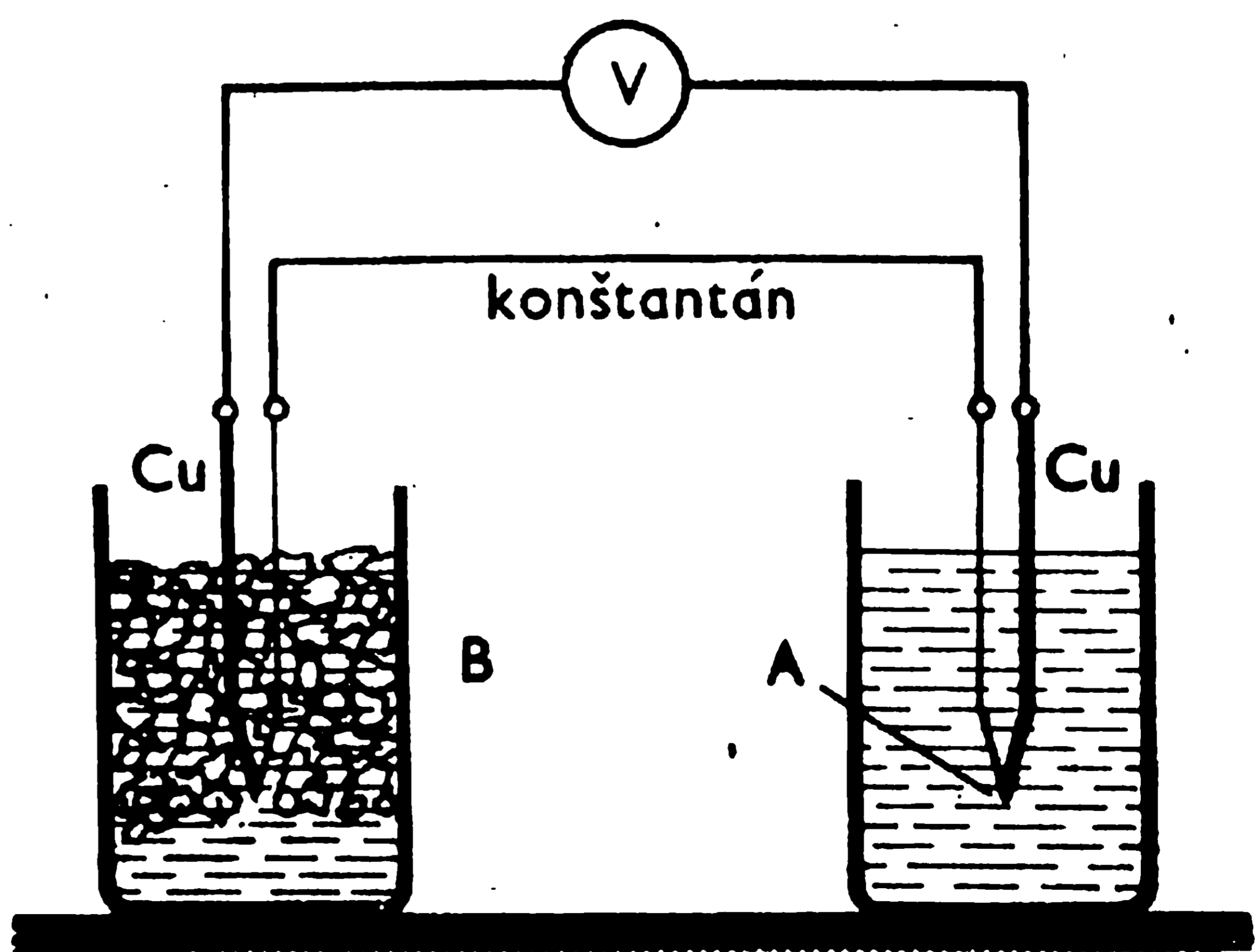
c) V **termoelektrickom zdroji** je využitý poznatok, že napätie, ktoré vzniká na spoji dvoch rozličných kovov, závisí od teploty spoja (obr. 2-10). Zdroj sa nazýva **termočlánok**. Napätie termočlánku je tým väčšie, čím väčší je teplotný rozdiel medzi zahrievaným spojom a voľnými koncami.

Na konštrukcii termočlánku sa najčastejšie používa dvojica kovov meď—železo, meď—konštantán, železo—konštantán, platina—zliatina platiny a ródia.

V technickej praxi sa termočlánky používajú najmä na meranie teploty. Na teplotný rozdiel 1 K pripadá podľa použitia dvojice kovov zmena napätia  $10 \mu\text{V}$  až  $40 \mu\text{V}$ . Pri presnom meraní teploty treba termočlánky zapojiť podľa obr. 2-11. Jeden spoj je v mieste  $A$ , kde meriame teplotu, druhý zväčša v termoske  $B$  so zmesou vody a ľadu. Vzniknuté napätie



**Obr. 2-10**  
 Termočlánok — demonštrácia vzniku elektrického prúdu



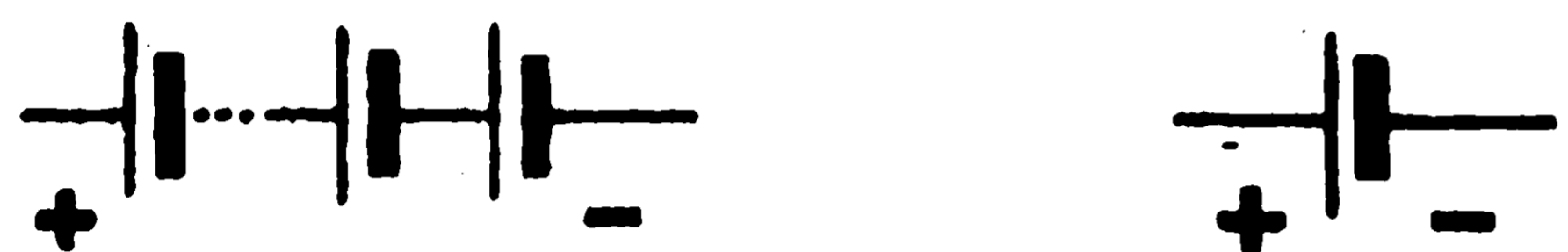
**Obr. 2-11**  
 Meranie teploty pomocou dvoch termočlánkov

meriame citlivým voltmetrom, ktorý môže byť ciachovaný priamo na odčítanie teploty v mieste A.

d) V **elektrodynamických zdrojoch** (dynamo, alternátory) vznikajú neelektrostatické sily pohybom vodiča v magnetickom poli. Jav poznáte zo základnej školy pod názvom elektromagnetická indukcia. Týmito zdrojmi napätia sa podrobnejšie budete zaoberať v 3. ročníku.

e) Medzi zdroje napätia zaraďujeme aj mechanické zdroje, akým je napr. **van de Graaffov generátor**, kde sa náboje oddeľujú trením pásu a prenášajú sa jeho pohybom.

Opísané zdroje napätia, ktoré vo vodiči vyvolávajú jednosmerný elektrický prúd, nazývame **zdroje jednosmerného napätia**. Schematicky ich označujeme značkami\* na obr. 2-12.



**Obr. 2-12**

Schematické značky zdroja jednosmerného napätia (galvanický článok alebo akumulátor; akumulátorová batéria)

## Úlohy

1. Uvážte, aké druhy energie sa premieňajú na energiu elektrického poľa spomenutých zdrojov napätia.
2. Na štítku akumulátora je údaj 40 Ah (ampérhodín), ktorý znamená, že v elektrickom obvode s týmto akumulátorom môže prechádzať napr. elektrický prúd 0,5 A za čas 80 h. Akú veličinu predstavuje údaj 40 Ah? (Pri riešení použite vzťah 2.1.) Akú prácu vykoná akumulátor pri prenose častíc s celkovým nábojom 10 kC, ak elektromotorické napätie akumulátora je 12 V? [Elektrický náboj 144 kC; 0,12 MJ]

---

\* **Poznámka:** Naše normy sú zjednotené s normami iných štátov. Došlo aj k zmenám niektorých elektrotechnických schématických značiek. Napr. pre zdroj jednosmerného napätia sa používa značka, v ktorej sú obidve zvislé čiarky rovnako hrubé.

## ZHRNUTIE — ELEKTRICKÝ PRÚD

Keď nabitý vodič vložíme do elektrického poľa, nastane **elektrostatická indukcia**. Protifašlé časti povrchu vodiča sa zelektrizujú nábojmi rovnakej veľkosti, ale opačného znamienka. Vnútri vodiča je intenzita elektrického poľa nulová.

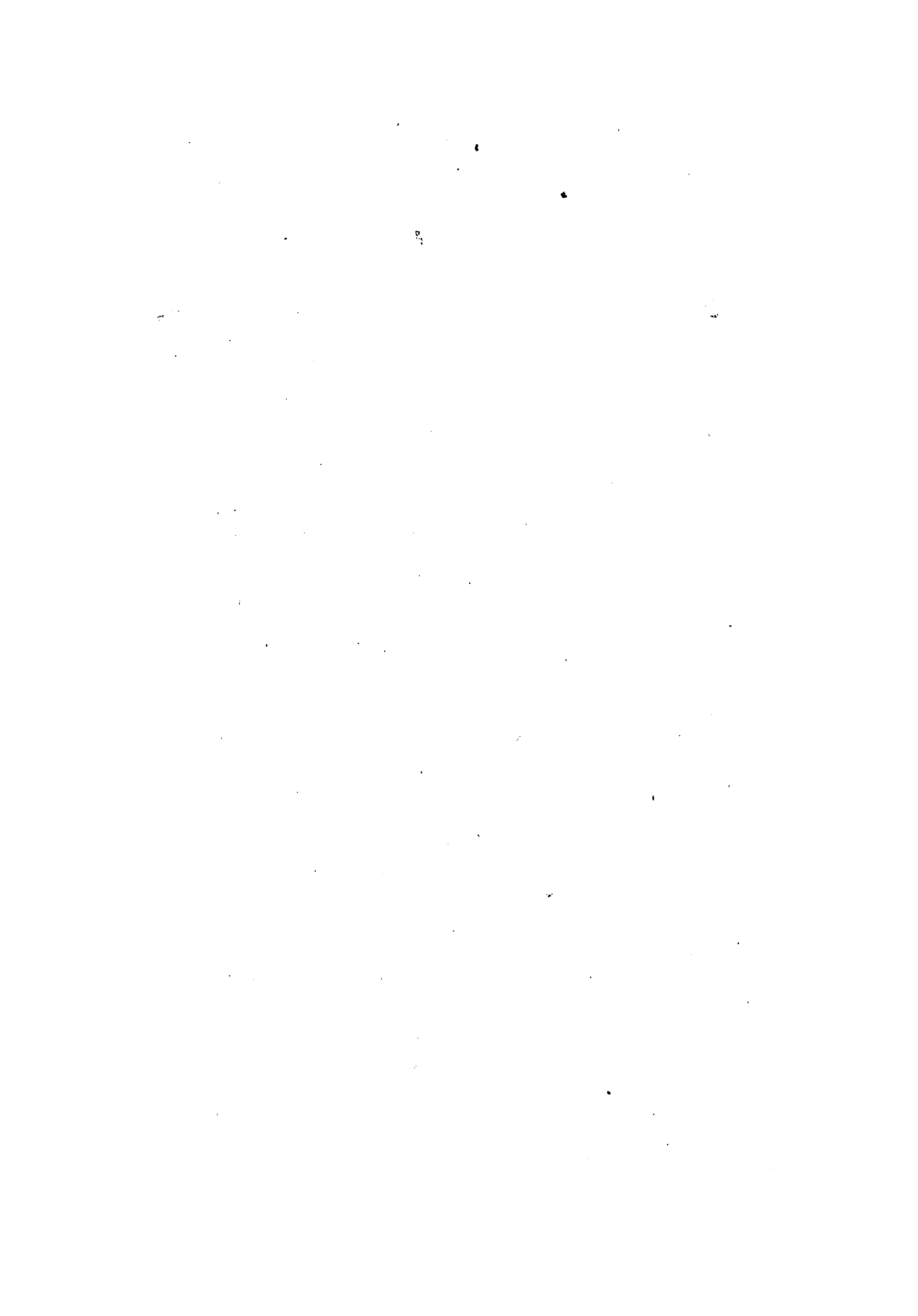
Keď do elektrického poľa vložíme izolant (dielektrikum), nastane jeho **polarizácia**. Vnútri izolantu sa utvorí elektrické pole s intenzitou  $E_i$  opačného smeru, ako je smer intenzity  $E_0$  vonkajšieho elektrického poľa. Intenzita  $E$  výsledného poľa v izolante má smer intenzity  $E_0$  a veľkosť  $|E| = |E_0| - |E_i|$ . Pomer  $\frac{|E_0|}{|E|} = \epsilon_r$  sa volá **relatívna permitivita**. Intenzita elektrického poľa v izolante (dielektriku) je za inak rovnakých podmienok  $\epsilon_r$ -krát menšia, ako intenzita elektrického poľa vo vákuu.

Usporiadany pohyb elektricky nabitých častíc sa volá **elektrický prúd (jav)**. Podmienkou vzniku elektrického prúdu vo vodiči sú voľné častice s nábojom a existencia elektrického poľa vo vodiči. Druhá podmienka sa dosiahne, ak je vodič súčasťou elektrického obvodu s elektrickým zdrojom.

**Veľčina elektrický prúd  $I$**  je definovaná vzťahom  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ , kde  $\Delta Q$  je veľkosť celkového náboja častíc, ktoré prejdú prierezom vodiča v jednom smere za dobu  $\Delta t$ . Jednotkou prúdu je **ampér**.

Keď je vo vodiči usporiadaný pohyb elektricky nabitých častíc stáleho smeru, ide o **jednosmerný prúd**. Jednosmerný prúd s  $I = \text{konšt.}$ , je konštantný prúd.

**Zdroj napätia** je zariadenie, medzi pólmi ktorého je trvalo udržiavané napätie pôsobením neelektrostatických síl vnútri zdroja. Zdroje napätia charakterizujeme veličinou **elektromotorické napätie  $U_0$** .



### 3. Elektrický prúd v kovoch

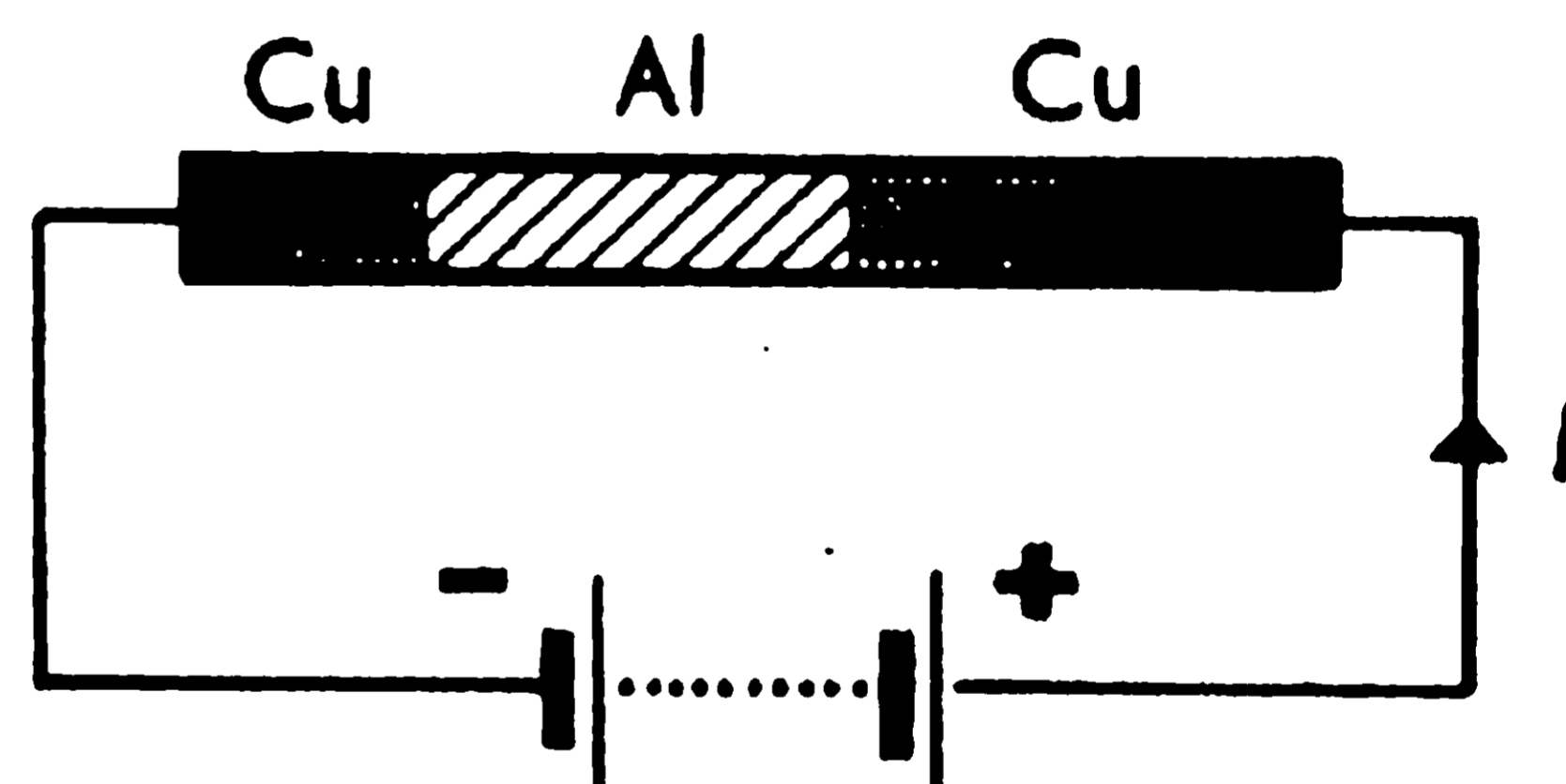
Zo štúdia štruktúry pevných látok vieme, že v kovoch (napr. Cu, Fe, Al, W) je kryštálová mriežka utvorená z kladných iónov, medzi ktorými sa neusporiadane pohybujú valenčné elektróny. Tieto elektróny sú spoločné pre všetky atómy kovu ako celku a môžu sa v ňom voľne pohybovať. Nazývajú sa **voľné elektróny**.

Mnohými experimentmi sa už na začiatku tohto storočia potvrdilo, že elektrický prúd v kovoch tvoria iba voľné elektróny.

Napríklad nemecký fyzik ERICH RIECKE zapojil za sebou niekoľko presne zabrúsených kovových valcov z rozličnej látky (obr. 3-1) a nechal nimi prechádzať prúd s vysokou hodnotou počas jedného roka. Za tento čas bol prenesený celkový náboj asi  $3,3 \cdot 10^9$  C. Vážením s veľkou presnosťou sa zistilo, že hmotnosť valcov sa v priebehu experimentu nezmenila. Nezistilo sa ani výrazné stopové znečistenie jedného kovu atómami susedného kovu, nenastalo teda ani uvoľnenie iónov z mriežok kovov.

Obr. 3-1

Schéma historického pokusu E. Rieckeho



V tejto kapitole sa budeme zaoberať, v nadväznosti na poznatky zo základnej školy, zákonitosťami vedenia elektrického prúdu v kovoch a elektrickými vlastnosťami kovových vodičov. Budeme uvažovať kovové vodiče s konštantným prúdom.

### 3.1 Elektrónová vodivosť kovov

Vlastnosť kovov viesť elektrický prúd prostredníctvom voľných elektrónov sa volá **elektrónová vodivosť kovov**. Predstavy o vedení elektrického prúdu v kovoch a ich experimentálne potvrdenie viedli k utvoreniu teórie elektrónovej vodivosti kovov.

**Teória elektrónovej vodivosti kovov** vychádza z poznatku, že elektrický prúd v kovoch tvoria iba voľné elektróny s dostatočnou energiou. Napríklad pre meď je táto energia  $1,13 \cdot 10^{-18}$  J. Elektróny, ktoré túto podmienku spĺňajú, nazývame **vodivostné elektróny**.

Vodivostné elektróny konajú v kove tepelný pohyb. Stredná rýchlosť tohto pohybu elektrónov je rádovo  $10^5$  m.s<sup>-1</sup> až  $10^6$  m.s<sup>-1</sup>. Jej zmena s teplotou je zanedbateľná. Tým sa vodivostné elektróny odlišujú od molekúl ideálneho plynu. Energia vodivostných elektrónov môže nadobudnúť iba isté hodnoty, je kvantovaná.

V dôsledku tepelného pohybu vodivostných elektrónov v kove, ktorý nie je v elektrickom poli, sa celkový náboj prenesený týmito elektrónmi ľubovoľným prierezom vodiča rovná nule, takže aj elektrický prúd je nulový. To je v súlade so skúsenosťou aj so zákonom zachovania energie — drôtom samovoľne neprechádza elektrický prúd z jedného konca na druhý.

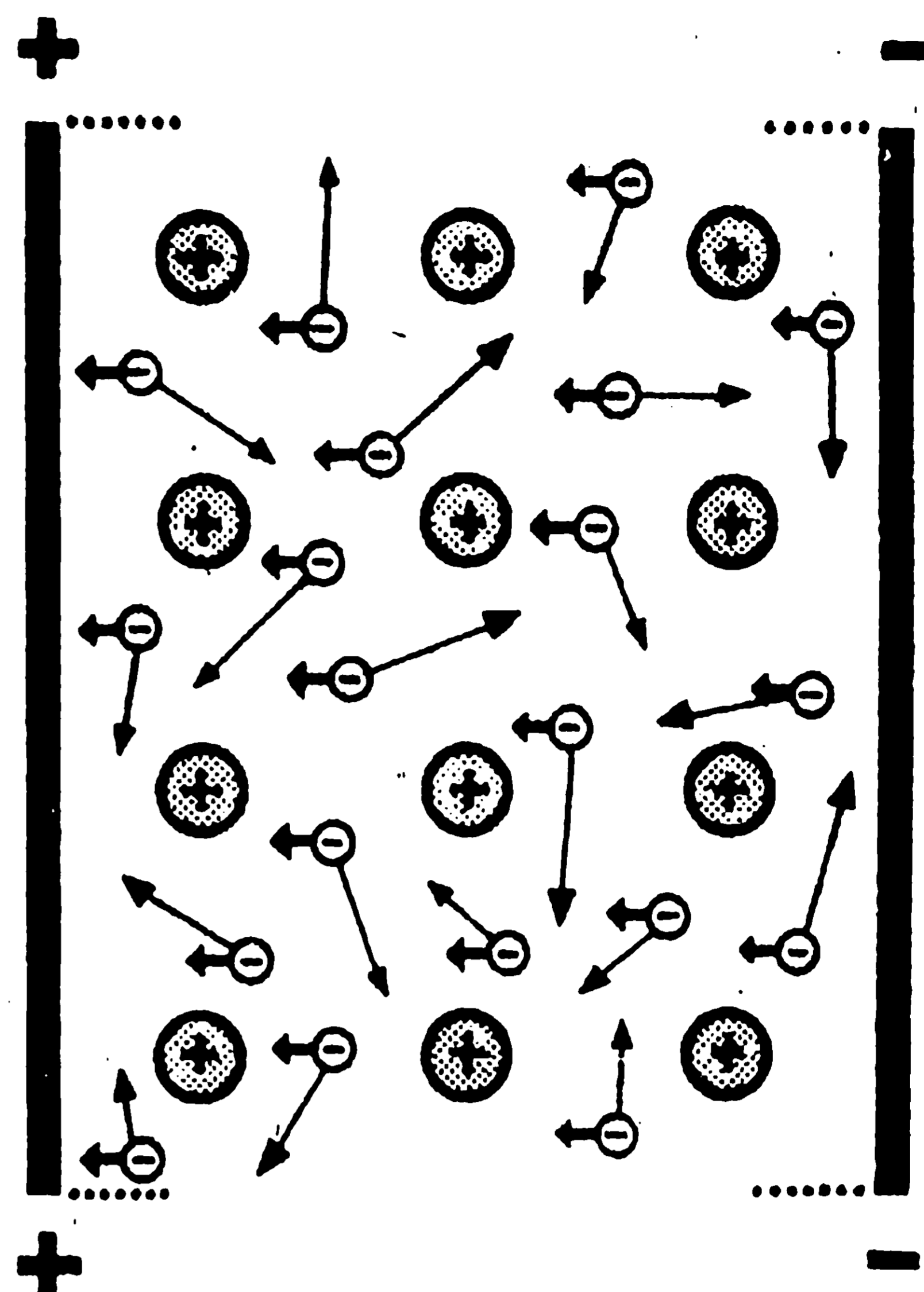
Keď kovový vodič zapojíme na zdroj jednosmerného napätia, vznikne v ňom elektrické pole s intenzitou  $\mathbf{E}$ . Na každý vodivostný elektrón pôsobí sila  $\mathbf{F}_e = -e \mathbf{E}$ , kde  $e$  je veľkosť náboja elektrónu. Pôsobením tejto sily získavajú vodivostné elektróny okrem okamžitej rýchlosti dodatočnú rýchlosť v jednom smere, ktorá sa volá **unášavá rýchlosť**. Preto vodivostné elektróny konajú okrem tepelného pohybu aj usporiadaný pohyb od zápornej svorky ku kladnej svôrke zdroja (obr. 3-2). V kovovom vodiči vznikne jednosmerný elektrický prúd.

Z výpočtov vyplýva, že unášavá rýchlosť spôsobená silami elektrického poľa zvyčajne nepresahuje hodnoty  $10^{-6}$  m.s<sup>-1</sup> až  $10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup>. V porovnaní so strednou rýchlosťou náhodného pohybu vodivostných elektrónov je teda veľmi malá. Preto je nesprávne predstavovať si elektrický prúd v kovoch (na základe definície prúdu) ako prísne usporiadaný pohyb elektrónov proti smeru intenzity elektrického poľa. Pre zjednodušenie



Obr. 3-2

Znázornenie pohybu vodivostných elektrónov v kovovom vodiči s elektrickým poľom



nákresu prenosu elektrického náboja v kovovom vodiči zapojenom na zdroj znázorňujeme iba usporiadaný pohyb vodivostných elektrónov (pozri napr. 2-8).

Ako potvrdzuje experiment, v kovovom vodiči po jeho zapojení na zdroj so stálym elektromotorickým napätím vznikne veľmi rýchlo konštantný prúd. V procese vedenia elektrického prúdu odovzdávajú vodivostné elektróny získanú hybnosť (od elektrického poľa) kryštálovej mriežke kovu. Odovzdávanie hybnosti nastáva v dôsledku rozličných porúch kryštálovej mriežky a tepelného kmitavého pohybu iónov mriežky. S tým súvisí existencia elektrického odporu kovových vodičov.

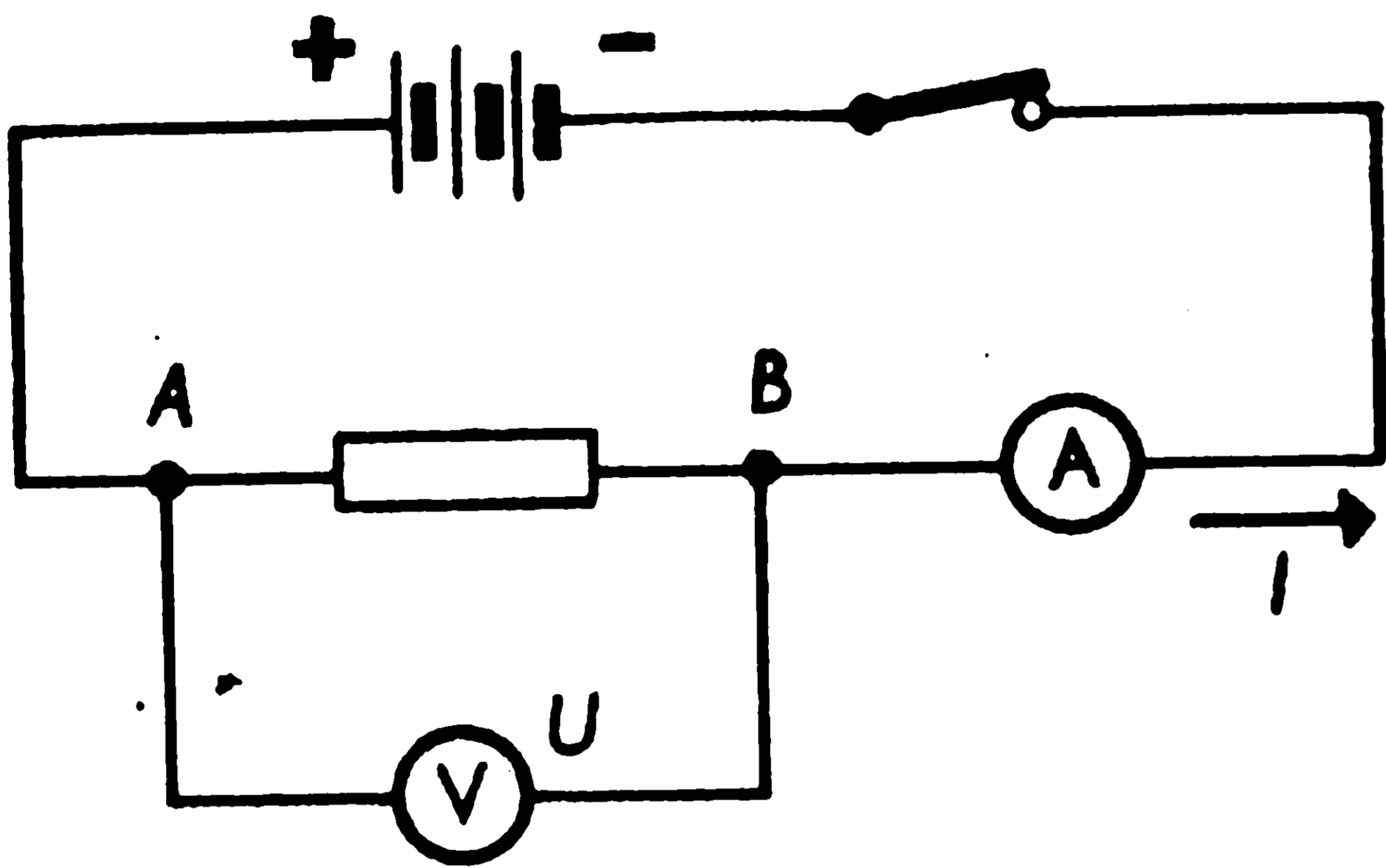
#### Historická poznámka

Klasická teória elektrónovej vodivosti kovov (voľné elektróny sa správajú ako molekuly ideálneho plynu) sa začala utvárať na prelome 19. a 20. storočia, predovšetkým prácami holandského fyzika HENDRIKA ANTOONA LORENTZA (lorenc, 1853—1928) a nemeckého fyzika P. DRUDEHO. Z tejto teórie vyplynuli niektoré dôsledky, ktoré boli v rozpore so skutočnosťou, napríklad výpočet a nameraná hodnota mernej tepelnej kapacity kovov. Rozpor klasickej teórie so skutočnosťou odstránil kvantovým modelom elektrónového plynu (model, v ktorom sa zobrala do úvahy kvantová povaha pohybu elektrónov) nemecký fyzik ARNOLD SOMMERFELD (zomrfeld, 1868—1951) v roku 1927. Ďalšie rozpory odstránil pomocou pásovej teórie vodivosti kovov začiatkom tridsiatych rokov fyzik FELIX BLOCH (blok, Američan švajčiarskeho pôvodu, nar. 1905).

Nové poznatky o štruktúre látok, hlbšie a presnejšie experimentálne skúmanie kovov, ale najmä uplatnenie poznatkov kvantovej fyziky umožnili v ďalších rokoch vypracovať modernú teóriu elektrónovej vodivosti kovov, ktorá je v zhode s experimentálnymi poznatkami.

### 3.2 Ohmov zákon pre časť elektrického obvodu

Utvorme elektrický obvod podľa obr. 3-3. Na svorkách zdroja napätia, ktorého elektrické napätie môžeme meniť, je cez spínač pripojený kovový vodič a ampérmeter. Keďže vo vodiči je elektrické pole, je medzi bodmi *A* a *B* napätie, ktoré meriame voltmetrom.



Obr. 3-3

Schéma zapojenia na demonštráciu Ohmovho zákona pre časť elektrického obvodu

Keď meníme napätie na svorkách zdroja, mení sa napätie *U* medzi koncami skúmaného vodiča (časti elektrického obvodu) a prúd *I* prechádzajúci vodičom. Ak je teplota vodiča konštantná, experimentálne zistíme, že **elektrický prúd *I* v kovovom vodiči je priamo úmerný elektrickému napätiu *U* medzi koncami vodičov**. Matematicky vyjadrené.

$$I = G U$$

kde *G* je konštanta úmernosti.

S týmto poznatkom ste sa už oboznámili na základnej škole. Volá sa **Ohmov zákon pre časť elektrického obvodu**. Tento zákon objavil v roku 1826 nemecký fyzik GEORG SIMON OHM (óm, 1787—1854; obr. 3-4), podľa ktorého je zákon pomenovaný.



Obr. 3.4 G. S. Ohm (1787—1854)

Z Ohmovho zákona vyplýva, že podiel  $\frac{U}{I}$  je pre istý vodič konštantný a nezávisí od napätia alebo prúdu vo vodiči. To umožňuje zaviesť pre každý vodič charakteristickú veličinu  $R$  definovanú vzťahom

$$\boxed{R = \frac{U}{I}} \quad (3.1)$$

ktorú nazývame **elektrický odpor**. Jednotkou tejto veličiny je **ohm** ( $\Omega$ ). Prevrátená hodnota  $R$  sa nazýva **elektrická vodivosť**  $G$ . Má jednotku siemens (S).

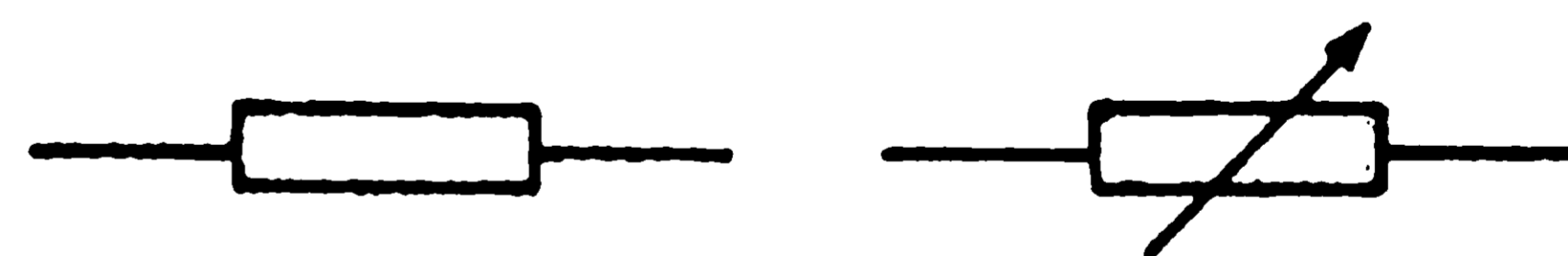
Pomocou definičného vzťahu (3.1) môžeme Ohmov zákon vyjadriť v tvare

$$\boxed{I = \frac{U}{R}} \quad \text{alebo} \quad \boxed{U = R I} \quad (3.2)$$

Vodiče, pre ktoré platí Ohmov zákon, nazývame **lineárne** (ohmické). Ostatné vodiče sú **nelineárne**. Pre tieto vodiče (napr. volfrámové vlákno žiarovky) nemožno použiť vzťahy (3.2), možno vypočítať iba ich elektrický odpor podľa (3.1), ktorý charakterizuje vodič v istom stave.

V elektrotechnike sa používajú súčiastky, ktoré majú stály elektrický odpor vyznačený na súčiastke. Nazývajú sa **rezistory**. Rezistor s posuvným kontaktom (**reostat**, **potenciometer**) sa používa na nastavenie vhodného napätia alebo prúdu v obvode. Schematická značka rezistora je na obr. 3.5.

Obr. 3-5 Schematické značky rezistora: a) so stálym odporom, b) s meniteľným odporom



## Úlohy

1. Vyjadrite slovami vzťahy (3.1) a (3.2). Definujte jednotku elektrického odporu.
2. Zostrojte graf závislosti prúdu od napätia pre lineárny vodič s elektrickým odporom  $0,5 \text{ k}\Omega$ .
3. Na päťici malej žiarovky sú údaje  $6,3 \text{ V}/0,3 \text{ A}$ , ktoré sa vzťahujú na jej vlákno, keď žiarovka svieti. Určte elektrický odpor vlákna za daného stavu (zodpovedá mu teplota vlákna asi  $2\,800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). [21  $\Omega$ ]

4. Pri napätí 3,6 V na koncoch lineárneho vodiča prechádza ním prúd 72 mA. Aké napätie je na koncoch, ak týmto vodičom prechádza prúd 1 A? Aký elektrický odpor má vodič? [50 V; 50  $\Omega$ ]
5. Priamym vodičom s dĺžkou 60 cm a elektrickým odporom 1,2 k $\Omega$  prechádza konštantný prúd 60 mA. Vypočítajte veľkosť intenzity elektrického poľa v tomto vodiči. [120 V.m<sup>-1</sup>]

### 3.3 Elektrický odpor

Podľa teórie elektrónovej vodivosti sú príčinou existencie elektrického odporu kovov zrážky vodivostných elektrónov s iónmi mriežky v dôsledku ich tepelného pohybu. Ďalšou príčinou sú bodové poruchy kryštálovej mriežky. Čím menej zrážok nastane, tým menší bude elektrický odpor. Tieto skutočnosti vystihujú dva vzťahy, ktoré vyjadrujú závislosť elektrického odporu od geometrických rozmerov vodiča, od látky, z ktorej je vodič a od jeho teploty.

Prvý vzťah zapisujeme v tvare

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.3)$$

kde  $l$  je dĺžka kovového vodiča,  $S$  obsah priečného rezu vodiča a  $\rho$  **merný elektrický odpor** látky, z ktorej je vodič. Jednotkou  $\rho$  je ohmmeter ( $\Omega \cdot m$ ). V technickej praxi sa používa jednotka  $\mu\Omega \cdot m$ . Veľičina  $\gamma = \frac{1}{\rho}$  sa nazýva **merná elektrická vodivosť**. Má jednotku siemens na meter ( $S \cdot m^{-1}$ ).

Hodnoty merného elektrického odporu niektorých látok sú v MFChT. Napríklad pre meď  $\rho = 0,0178 \mu\Omega \cdot m$  pre chrómnikel  $\rho = 1,1 \mu\Omega \cdot m$ . Látky s veľkým merným elektrickým odporom (nikelín, konštantán, chrómnikel) sa používajú na výrobu **odporových materiálov**.

Druhý vzťah vyjadrujúci závislosť elektrického odporu od teploty, má tvar

$$R \doteq R_0 (1 + \alpha \Delta t) \quad \text{resp.} \quad R \doteq R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (3.4)$$

kde  $R$  je elektrický odpor vodiča pri teplote  $t$ ,  $R_0$  elektrický odpor vodiča

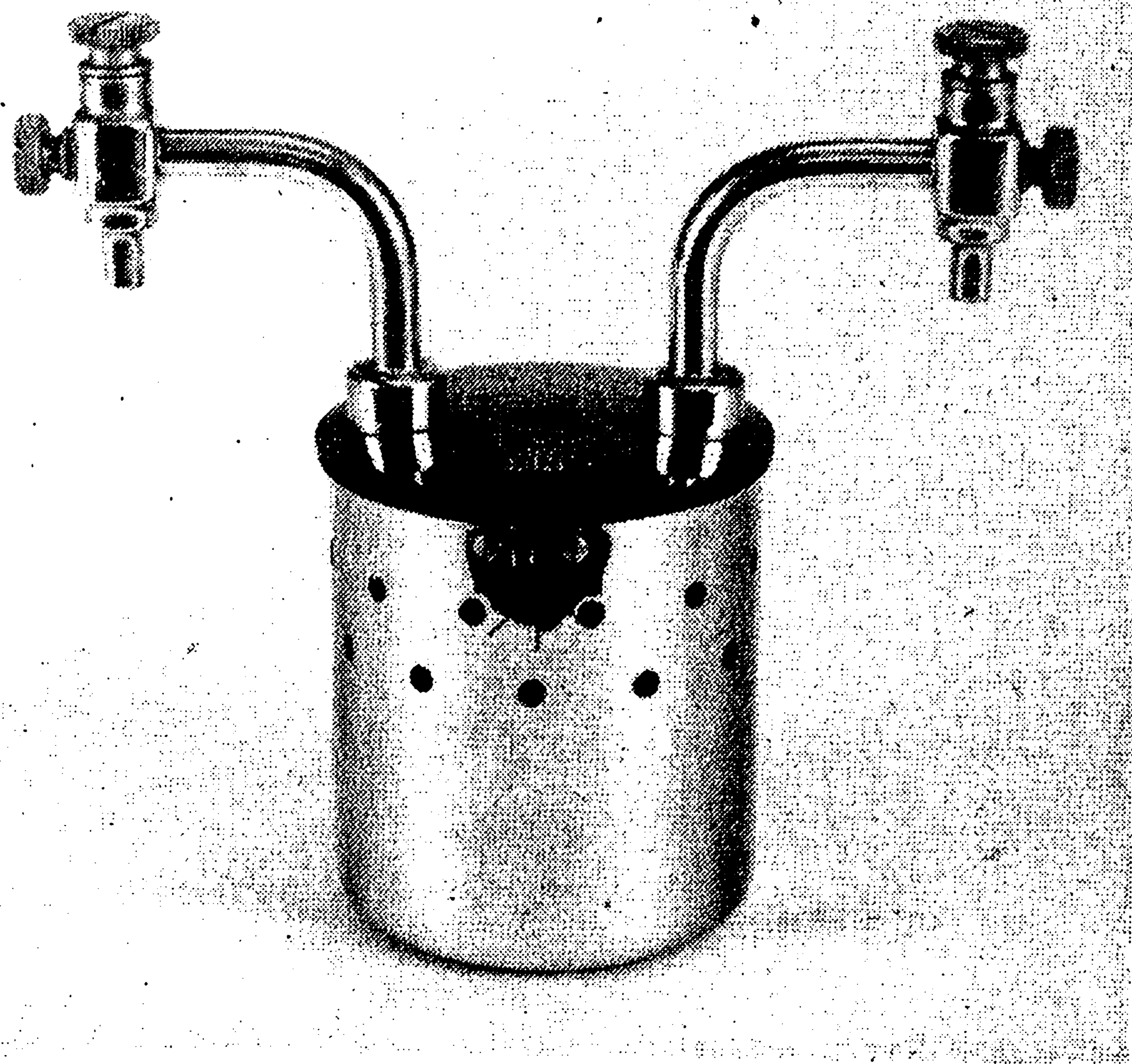
pri teplote  $t_0$ ,  $\Delta t = t - t_0$  teplotný rozdiel a  $\alpha$  teplotný súčiniteľ elektrického odporu. Jeho jednotkou je  $K^{-1}$ . Pre niektoré kovy je  $\alpha$  v MFChT. Napríklad pre meď  $\alpha \doteq 4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ , pre konštantán  $\alpha = 0,05 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ .

**Elektrický odpor kovových vodičov sa so zvyšujúcou teplotou zväčšuje** (v nie veľmi veľkých teplotných intervaloch) **približne lineárne**. Rovnaký záver platí pre merný elektrický odpor.

Z hľadiska teórie elektrónovej vodivosti kovov sa elektrický odpor zväčšuje pri zvyšovaní teploty kovového vodiča v dôsledku zväčšenia rozkmitu kmitajúcich iónov mriežky. Tým nastávajú častejšie zrážky vodivostných elektrónov s iónmi mriežky, čo sa prejaví v menšej hodnote prúdu vo vodiči (pri rovnakom napätí) alebo väčším odporom vodiča.

Závislosť odporu od teploty sa využíva pri konštrukcii **odporových teplomerov**. Ak chceme túto závislosť pri rezistoroch vylúčiť, tak použijeme termostat.

Pri konštantáne, manganíne, nikelíne a niektorých iných zliatinách je závislosť odporu od teploty veľmi malá (pozri hodnoty  $\alpha$  v MFChT). Preto sa tieto látky používajú na výrobu **odporových normálov** (obr. 3.6).



**Obr. 3-6**  
Odporový normál

V niektorých vodičoch (napr. olovo, cín, zinok) nastáva pri ochladení na veľmi nízkej teplote (pomocou tekutého hélia alebo vodíka) osobitný jav nazvaný **supravodivosť**. Keď vodič, napr. z olova, pomaly ochladzujeme, jeho merný elektrický odpor sa pozvoľna znižuje, až pri teplote okolo 7,26 K prudko klesne na nulu. Ak za tejto teploty vyvoláme vo vodiči tvaru prstenca elektrický prúd, prstenec uzavrieme, pričom zdroj napätia odpojíme, bude prstencom prechádzať prúd veľmi dlho. V železe, medi, striebre, zlate a v platine sa supravodivosť nezistila.

V súčasnosti sa **supravodivé materiály\*** používajú pri konštrukcii napr. supravodivých elektromagnetov na utváranie silných magnetických polí alebo pri výrobe supravodivých vinutí generátorov a elektromotorov (napr. na kozmický výskum). V budúcnosti budú mať supravodivé materiály veľmi dôležitý význam pri výrobe veľkorozmerových magnetov pre reaktory na termojadrovú syntézu.

## Úlohy

1. Formulujte slovne vzťah (3.3) a vysvetlite ho z hľadiska teórie elektrónovej vodivosti kovov.
2. Navrhňte a v spolupráci s vyučujúcim urobte experiment overujúci závislosti dané vzťahom (3.3) a (3.4).
3. Nikelínový drôt má dĺžku 1,25 m. Akú dĺžku by mal konštantánový drôt s rovnakým odporom a obsahom prierezu? Merný elektrický odpor nikelinu je  $0,40 \mu\Omega \cdot m$ . [1,0 m]
4. Vláknom volfrámovej žiarovky s teplotou  $28^\circ\text{C}$  prechádza pri napätí 10 V prúd 300 mA. Určte teplotu vlákna svietiacej žiarovky, ak vláknom prechádza prúd 0,5 A a napätie na koncoch vlákna je 220 V. Predpokladajte lineárnu závislosť odporu od teploty. [2 570 °C]

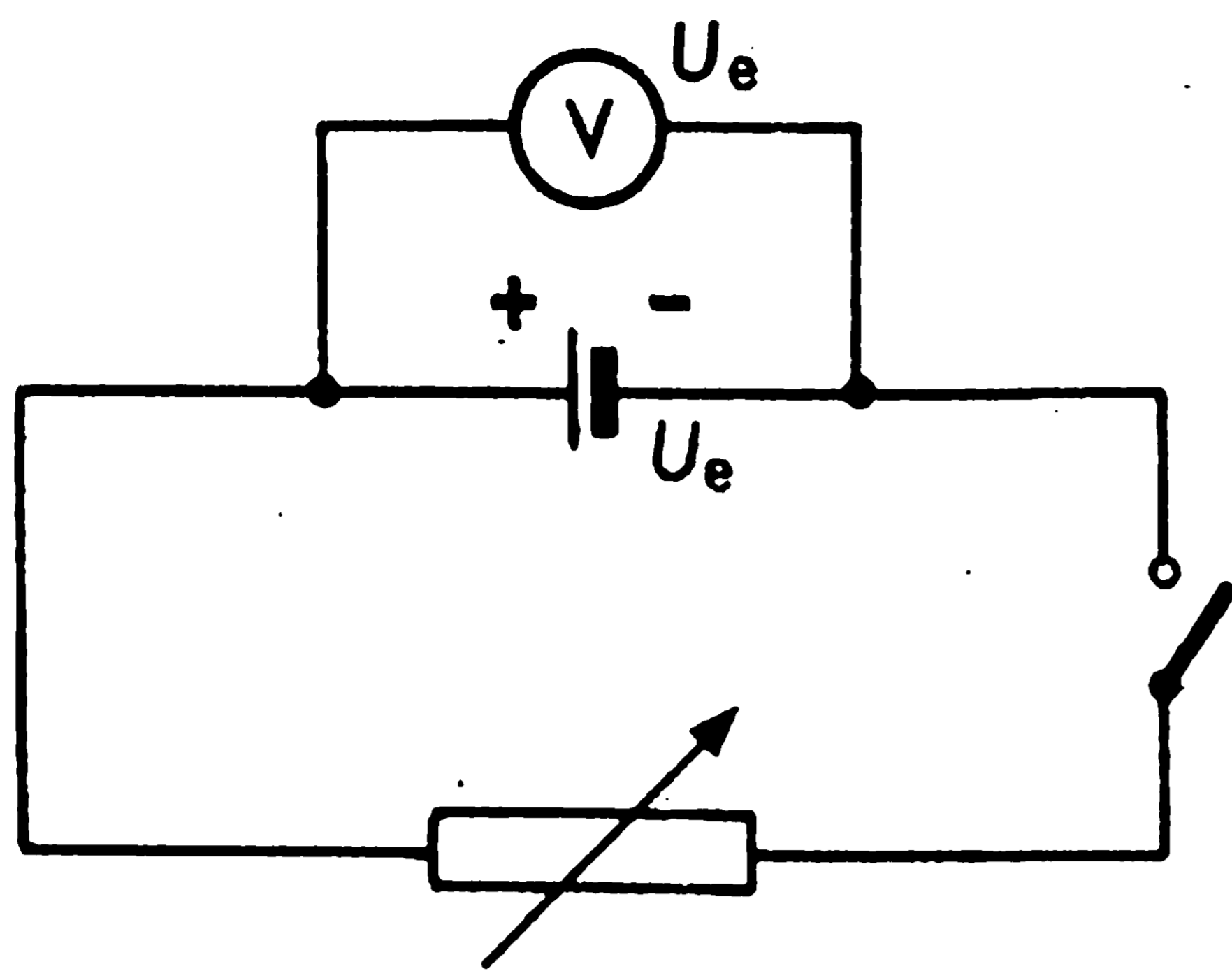
## 3.4 Ohmov zákon pre uzavretý obvod

Preskúmame, aké napätie nameriame medzi svorkami reostatu, ak ho zapojíme na zdroj napätia. Zostavíme elektrický obvod podľa obr. 3-7. Ako zdroj použijeme najprv napr. suchú batériu s elektromotorickým napätím  $U_e = 4,5 \text{ V}$ . Jazdec reostatu s celkovým odporom napr.  $10 \Omega$ , nastavíme približne do strednej polohy.

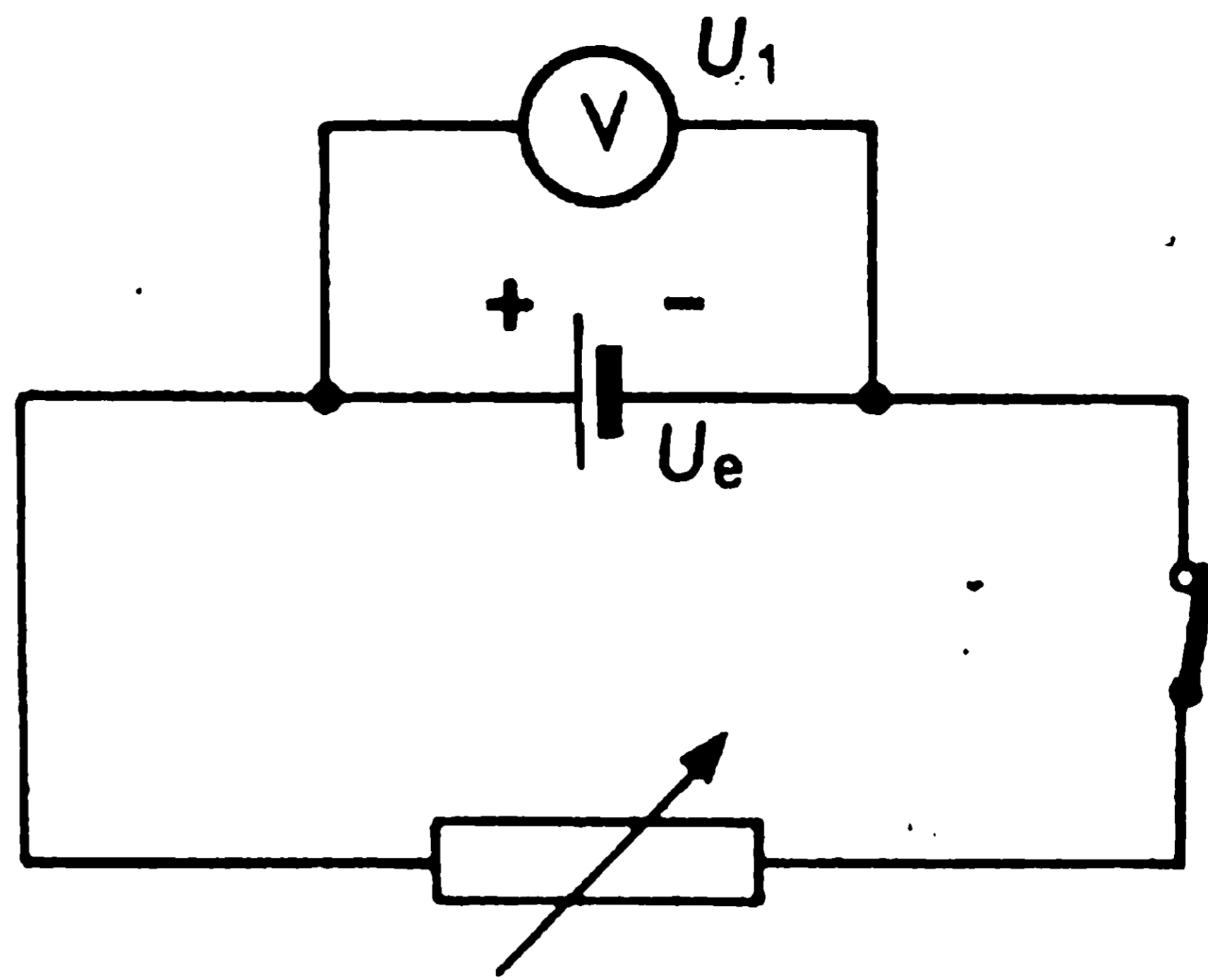
Pri rozpojenom spínači (obr. 3-7 a) meria voltmeter s veľkým elektrickým odporom približné elektromotorické napätie  $U_e$ . Keď obvod uzavrieme (obr. 3-7 b), voltmeter ukáže napätie  $U_1 < U_e$ . Pri zväčšovaní odporu

---

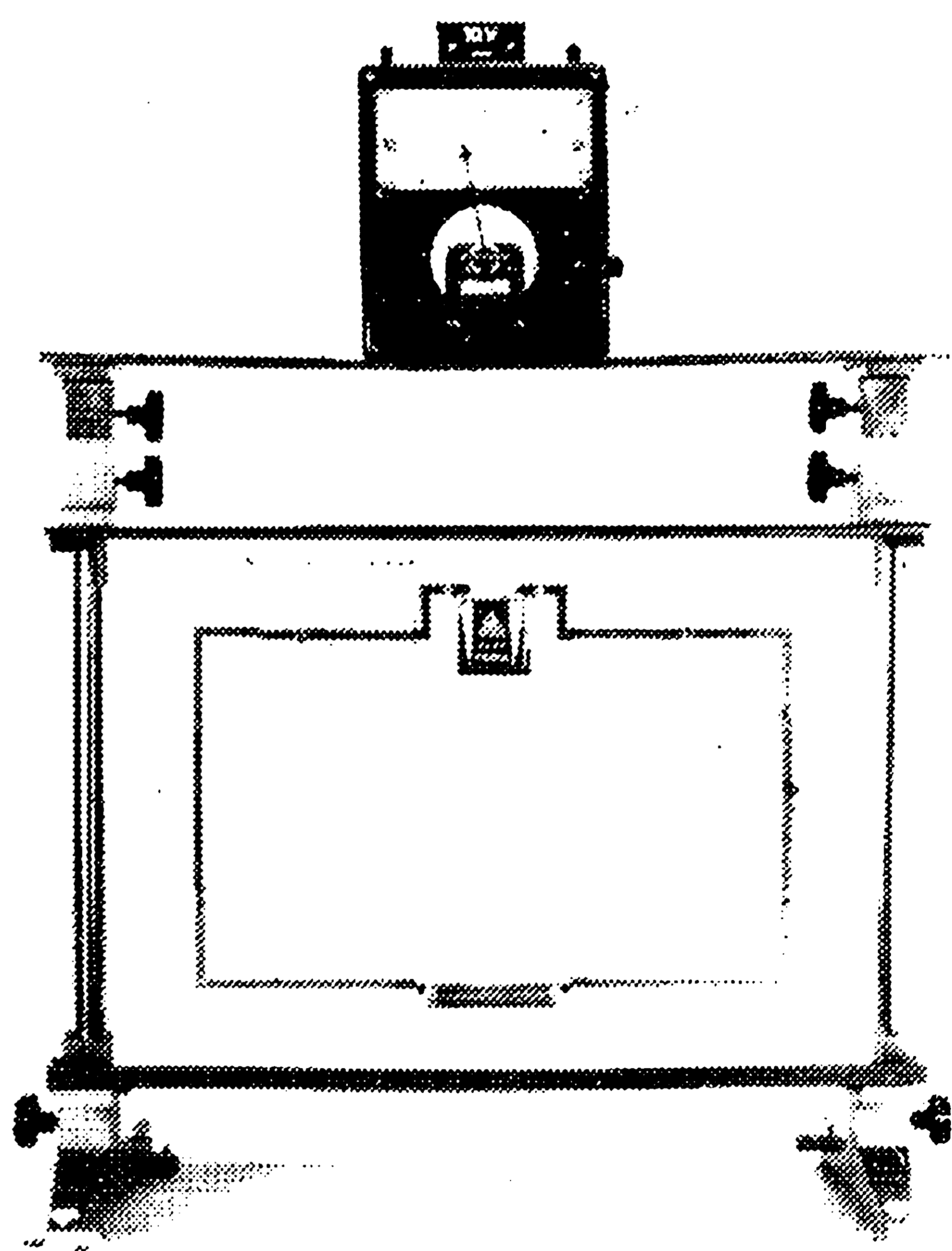
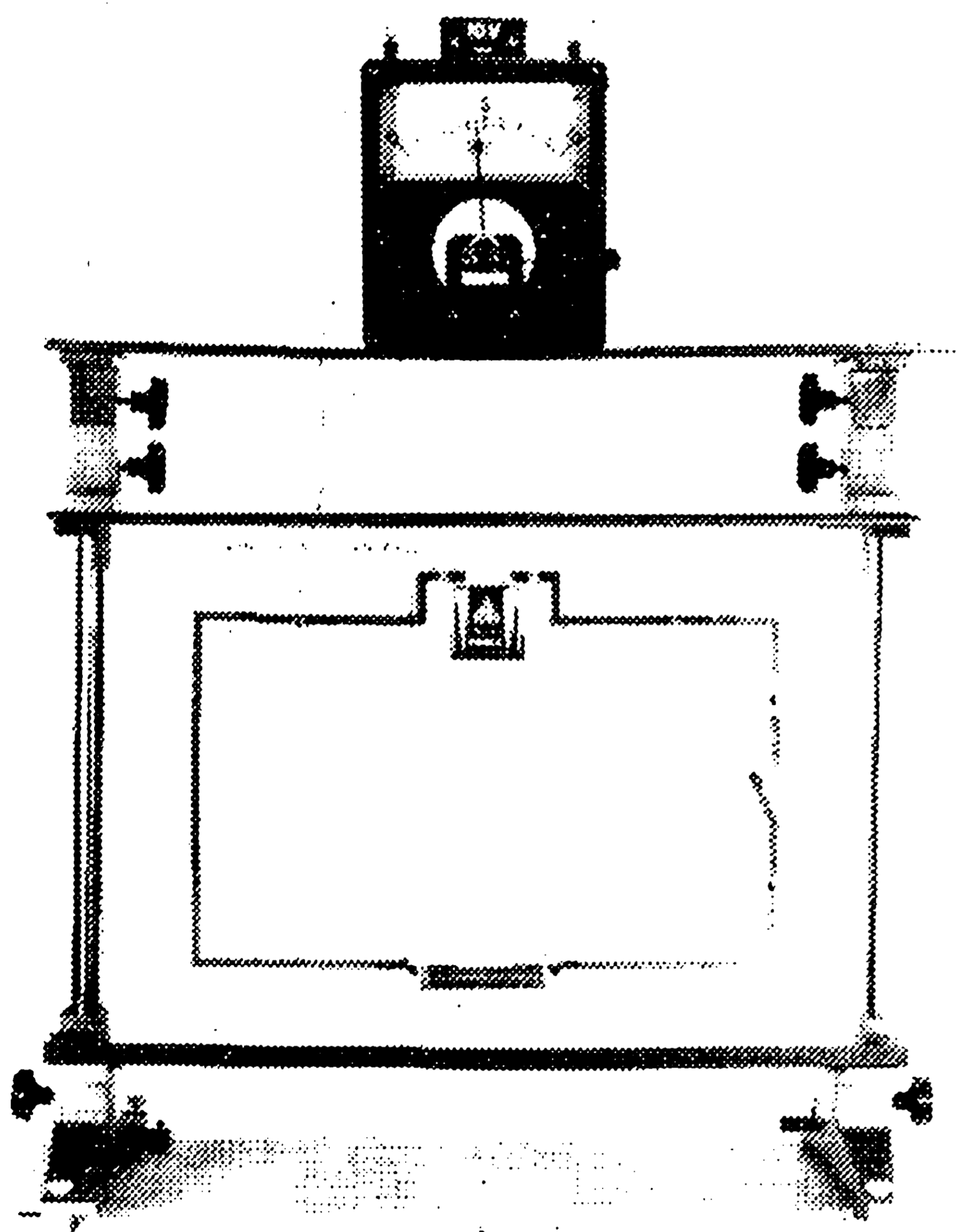
\* Supravodivosť objavil v roku 1911 holandský fyzik Kamerlingh-Onnes. Možnosť využitia tohto javu v elektrotechnickej praxi závisí od toho, či sa podarí objaviť látky, ktoré by boli supravodivé pri technicky prístupnejších teplotách.



a



b



**Obr. 3-7**

Meranie elektromotorického a svorkového napätia zdroja:

a) odpojený (nezaťažný) zdroj,

b) zapojený (zaťažný) zdroj

zapojenej časti reostatu pozorujeme, že napätie na ňom sa tiež zväčšuje, ale nedosiahne hodnotu  $U_e$  (ani keď je nastavený maximálny odpor).

Pokus opakujeme s iným zdrojom, napr. s oceloniklovým akumulátorom s elektromotorickým napätím  $U_e = 6 \text{ V}$ . Zistíme, že pri rovnakých polohách jazdca ako v predchádzajúcom prípade je napätie  $U_2$  na svorkách reostatu väčšie ako  $U_1$ ; so zväčšujúcim sa odporom reostatu sa zväčšuje, ale vždy je  $U_2 < U_e$ .

Z pokusu vyplýva, že napätie na rezistore zapojenom na zdroj napätia závisí nielen od elektromotorického napätia zdroja, ale aj od odporu rezistora. Ako teda v tomto prípade vyjadríme vzťah pre prúd prechádzajúci rezistorom?

Aby sme mohli na danú otázku odpovedať, preskúmame celý uzavretý elektrický obvod.

Ľubovoľný **uzavretý elektrický obvod** sa skladá z vonkajšej a vnútornej časti. **Vonkajšiu časť obvodu** tvoria rezistory, vodiče, spotrebiče a pod. pripojené na svorky zdroja. Tejto časti obvodu priradíme odpor  $R$  — **vonkajší odpor obvodu**. Vodivý priestor medzi pólmi vnútri zdroja tvorí **vnútornú časť obvodu**. Tejto časti priradíme **vnútorný odpor zdroja**  $R_i$ .

Keď je obvod uzavretý, prechádza elektrický prúd  $I$  nielen jeho vonkajšou časťou, ale aj vnútri zdroja. Pri premiestňovaní konajú neelektrické sily vnútri zdroja prácu  $W_z = U_e \cdot Q$ , kde  $U_e$  je elektromotorické napätie zdroja elektricky nabitých častíc s celkovým nábojom  $Q$  — pozri vzťah (2.2). Zdroj teda vydá energiu  $E_z = U_e Q$ , ktorá sa premieňa na energiu  $E$  elektrického poľa vo vonkajšej časti obvodu a energiu  $E_i$  elektrického poľa vnútri zdroja.

Keď napätie vo vonkajšej časti obvodu označíme  $U$  a analogicky napätie vo vnútornej časti obvodu  $U_i$ , potom  $E = U Q$ ,  $E_i = U_i Q$ . Zo zákona zachovania energie vyplýva, že

$$E_z = E + E_i$$

alebo

$$U_e Q = U Q + U_i Q$$

Po úprave

$$U_e = U + U_i$$

**Súčet napätí na vonkajšej a vnútornej časti obvodu sa rovná elektromotorickému napätiu zdroja.**

Keď podľa Ohmovho zákona vyjadríme pre časť obvodu

$$U = R I, \quad U_i = R_i I$$

kde  $I$  je prúd prechádzajúci uzavretým elektrickým obvodom, potom

$$U_e = R I + R_i I = I (R + R_i)$$

odkiaľ



$$I = \frac{U_e}{R + R_i} \quad (3.5)$$

Dostali sme odpoveď na danú otázku.

**Prúd v uzavretom obvode sa rovná podielu elektromotorického napätia zdroja a súčtu odporov vonkajšej a vnútornej časti obvodu.** Formulácia sa volá **Ohmov zákon pre uzavretý obvod** a jeho matematickým vyjadrením je vzťah (3.5).

Zo vzťahu (3.5) vyplýva, že prúd v obvode závisí od troch veličín. Dve z nich ( $U_e$  a  $R_i$ ) charakterizujú zdroj napätia, tretia ( $R$ ) vonkajšiu časť obvodu. Výraz  $R + R_i$  je **celkový odpor obvodu**.

Vzťah (3.5) prepíšeme do tvaru

$$U_e = R I + R_i I$$

Veličinu  $U = R I$  nazývame **svorkové napätia zdroja** a rovná sa napätiu vo vonkajšej časti obvodu,  $U_i = R_i I$  **úbytok napätia na zdroji** (jeho vnútornej časti). Pre svorkové napätie teda dostaneme vzťah

$$U = U_e - R_i I$$

Keď je vonkajší odpor  $R$  obvodu oveľa väčší ako vnútorný odpor  $R_i$  zdroja ( $R \gg R_i$ ), potom  $R_i I$  možno vzhľadom na  $U$  zanedbať, lebo

$$U_e \doteq U = R I$$

Z tohto vyplýva, že ak meriame napätia zdroja voltmetrom, ktorého odpor  $R_v \gg R_i$  a obvod je rozpojený (obr. 3-7a), môžeme nameranú hodnotu považovať s dostatočnou presnosťou za elektromotorické napätie zdroja. Pri zapojenom obvode (obr. 3-7b) voltmeter ukazuje svorkové napätie zdroja, lebo  $R_i$  nemožno vzhľadom na vonkajší odpor  $R$  obvodu zvyčajne zanedbať.

Keď spojíme svorky zdroja vodivým drôtom, nastane **spojenie nakrátko** (skrat), vonkajší odpor je takmer nulový, preto  $U \doteq 0$  V, a prúd v obvode dosiahne najväčšiu možnú hodnotu  $I_{\max} \doteq \frac{U_e}{R_i}$ .

Odber veľkých prúdov poškodzuje každý zdroj. Na túto okolnosť sa upozorňuje v bezpečnostných predpisoch. Preto ich každý výrobca aj

používateľ elektrických zdrojov musí dodržiavať. Do elektrických obvodov sa zaraďujú rozličné ističe a poistky, ktoré zdroj odpoja, ak je prúd v obvode väčší ako povolená hodnota. Tým sa súčasne chráni aj spotrebič.

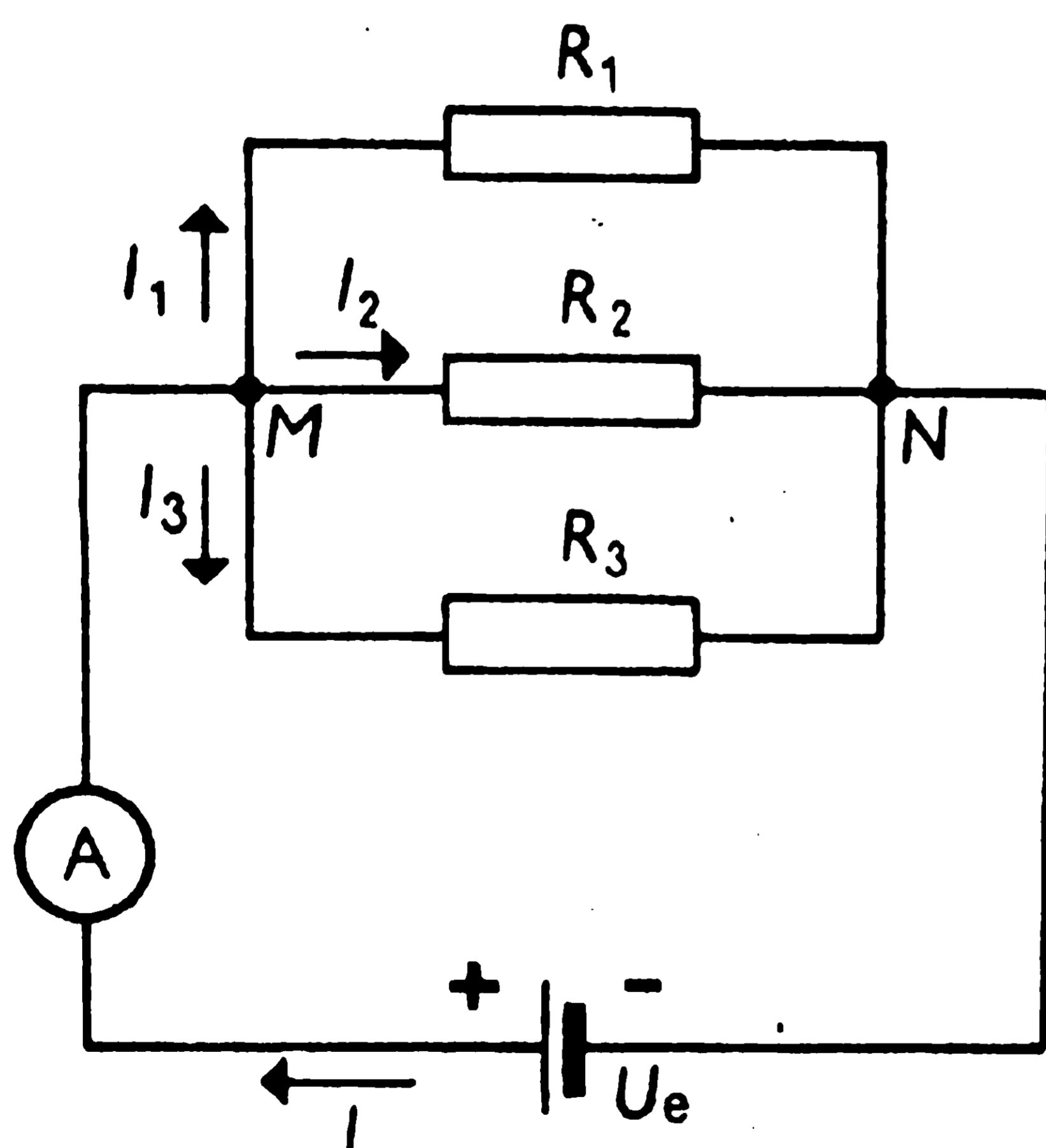
### Úlohy

1. V uzavretom obvode je zdroj elektrického napätia s  $U_e = 12,0 \text{ V}$  a vnútorným odporom  $R_i = 0,2 \Omega$ . Vonkajší odpor je  $R = 19,8 \Omega$ . Určte prúd a svorkové napätie. [0,60 A; 11,9 V]
2. Vonkajší obvod s odporom  $3,8 \Omega$  je zapojený na zdroj elektrického napätia s  $U_e = 12,0 \text{ V}$ . Obvodom prechádza prúd  $3,0 \text{ A}$ . Určte: a) svorkové napätie zdroja; b) vnútorný odpor zdroja; c) maximálny prúd pri skrate. [11,4 V;  $0,2 \Omega$ ; 60 A]
3. Elektrický obvod tvorí pružina z odporového drôtu s dĺžkou  $1,5 \text{ m}$  a priemerom  $0,2 \text{ mm}$  (merný elektrický odpor pri teplote  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  je  $4 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$  a teplotný súčiniteľ elektrického odporu je  $11 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ), zdroj s  $U_e = 12 \text{ V}$  a vnútorným odporom  $R_i = 0,2 \Omega$ . Aký prúd prechádza drôtom, ktorého teplota sa zvýšila na  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Zmenu dĺžky drôtu s teplotou zanedbáme. [0,62 A]

### 3.5 Kirchhoffove zákony

Elektrické obvody s rezistormi a zdrojmi elektromotorického napätia môžu byť jednoduché alebo rozvetvené (zložené). V rozvetvených obvodoch býva zvyčajne viac zdrojov a rezistory sú navzájom spojené rozličným spôsobom. Takéto usporiadanie tvorí **elektrickú sieť**.

Miesto v rozvetvenom obvode, kde sa stýkajú najmenej tri vodiče, nazýva sa **uzol elektrického obvodu**. Časť obvodu medzi dvoma uzlami je **vetva elektrického obvodu**.



Obr. 3-8a

Schéma elektrickej siete so 4 vetvami a 2 uzlami

Na obr. 3-8a je schéma elektrickej siete, v ktorej sú dva uzly  $M$ ,  $N$  a štyri vetvy. Keď ampérmeter postupne zapojíme do všetkých vetví a odmeriame prúdy  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , zistíme, že prúd  $I$  sa rovná súčtu prúdov v ďalších troch vetvách. Na všetkých vetvách je rovnaké napätie  $U = \varphi_M - \varphi_N$ .

Nemecký fyzik G. R. KIRCHHOFF (1824—1877; obr. 3-8b) zovšeobecnil Ohmov zákon na rozvetvené elektrické obvody. Získané experimentálne poznatky formuloval ako zákony, ktoré sú všeobecným návodom na výpočet elektrických prúdov vo vetvách elektrickej siete, ak sú známe odpory a elektromotorické napätia zdrojov (alebo na výpočet iných neznámych parametrov zapojených prvkov, ak sú ostatné parametre známe).



Obr. 3-8b  
G. R. Kirchhoff (1824-1887)

**1. Kirchhoffov zákon (pre uzol jednosmerného obvodu):** Algebraický súčet prúdov v uzle sa rovná nule. Zákon vyjadruje princíp zachovania náboja, t.j., že pri konštantnom prúde sa v žiadnom mieste vodiča, a teda ani v uzle, nehromadia častice s nábojom.

Na obr. 3-8a sú šípkami vyznačené smery prúdov vo vetvách. Pri zostavovaní rovnice 1. zákona použijeme jednoduchý predpoklad: prúdy, ktoré do uzla vstupujú, označíme kladným znamienkom, prúdy s opačným smerom označíme záporným znamienkom. Potom pre uzol  $M$  na obr. 3-8a platí

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0 \text{ A} \quad (3.6)$$

Všeobecne pre  $n$  vodičov zbíhajúcich sa v uzle platí

$$\boxed{\sum_{k=1}^n I_k = 0 \text{ A}} \quad (3.7)$$

Vzťah je matematickým vyjadrením 1. Kirchhoffovho zákona.

1. Kirchhoffov zákon využijeme na výpočet výsledného odporu **paralelne spojených rezistorov s odpormi  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$** , obr. 3-8a. Pri tomto zapojení je na každom rezistore rovnaké napätie  $U$ .

Podľa (3.6)  $I = I_1 + I_2 + I_3$  a z Ohmovho zákona pre jednotlivé prúdy dostaneme

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

Paralelnú kombináciu môžeme považovať za samostatný elektrický prvok obvodu s odporom  $R$ , ktorým prechádza prúd  $I = \frac{U}{R}$ . Po dosadení do pôvodnej rovnice dostaneme

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

a po úprave

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Všeobecne pre  $n$  paralelne spojených rezistorov platí

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (3.8)$$

Pri paralelnom spojení rezistorov sa **prevrátená hodnota celkového odporu rovná súčtu prevrátených hodnôt jednotlivých odporov rezistorov.**

Keď sú rezistory s odpormi  $R_1, R_2, \dots, R_n$  spojené sériovo, potom sa celkový odpor  $R$  rovná súčtu odporov jednotlivých rezistorov

$$\boxed{R = R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad (3.9)$$

**2. Kirchhoffov zákon platí pre jednoduché uzavreté obvody**, ktoré môžeme zo siete ľubovoľne vyčleniť. Možno dokázať, že je zovšeobecnením Ohmovho zákona pre uzavretý obvod.

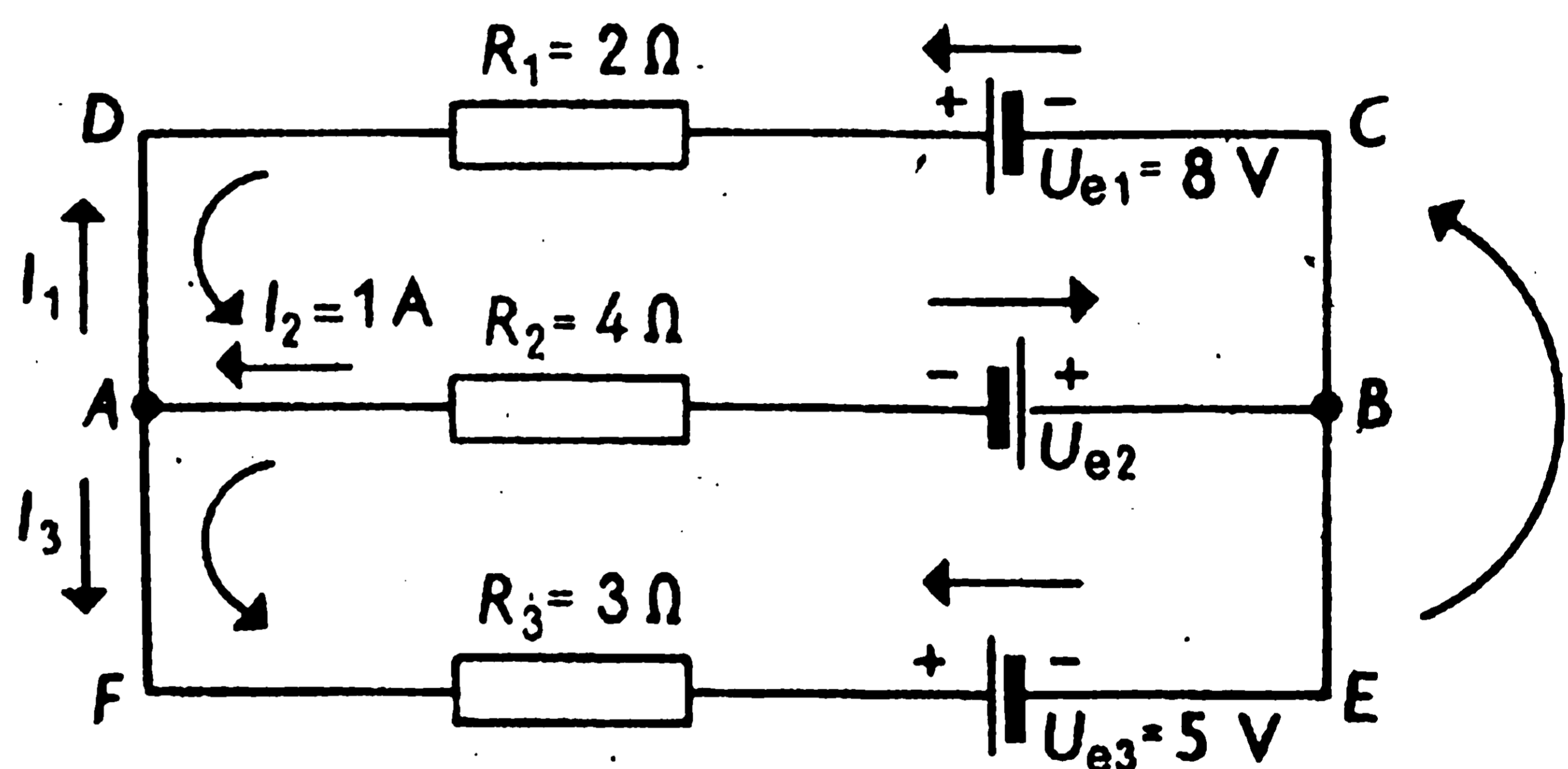
Zákon znie: **V jednoduchom uzavretom obvode sa súčet elektromotorných napätí  $U_{ei}$  zaradených zdrojov rovná súčtu úbytkov napätí  $R_k I_k$ .** Matematické vyjadrenie

$$\sum_{i=1}^m = U_{ei} = \sum_{k=1}^n R_k I_k \quad (3.10)$$

Pritom môže byť  $U_{ei} \leq 0$ ,  $I_k \leq 0$ .

Rovnicu (3.10) môžeme napísať pre každý jednoduchý uzavretý obvod. Nezávislými rovnicami budú iba tie, ktoré boli zostavené pre jednoduché obvody, v ktorých sa aspoň jedna vetva neopakuje.

Zásady a postup výpočtu zložitej siete ukážeme na zjednodušenom príklade podľa obr. 3-9, na ktorom je schéma elektrickej siete s týmito údajmi:  $R_1 = 2 \Omega$ ,  $R_2 = 4 \Omega$ ,  $R_3 = 3 \Omega$ ,  $U_{e1} = 8 \text{ V}$ ,  $U_{e3} = 5 \text{ V}$ . Vetvou AB prechádza prúd  $I_2 = 1 \text{ A}$ . Vypočítajte prúdy  $I_1$ ,  $I_3$  a elektromotorické napätie  $U_{e2}$ . Vnútorne odpory zdrojov zanedbávame (v schéme nie sú znázornené).



**Obr. 3-9**  
Schéma elektrickej siete s vyznačenými smermi prúdu, smery zdrojov napätia a smery obehu

Budeme postupovať takto: Do schémy vyznačíme ľubovoľné smery prúdov  $I_1$ ,  $I_3$  (smer známeho prúdu je daný) a smery zdrojov od záporného pólu ku kladnému (smer zväčšovania potenciálu). Potom vedľa schémy aj vnútri vyznačíme smer obiehania (jednu z dvoch možností). Tam, kde smer obiehania súhlasí s vyznačeným smerom prúdu alebo so smerom od záporného pólu ku kladnému pólu zdroja uvedieme sčítance vo vzťahu (3.10) so znamienkom plus; pri nesúlhlase znamienkom mínus.

Podľa vzťahu (3.7) pre uzol A platí

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0 \text{ A} \quad (1)$$

Vzťah pre uzol B je ekvivalentný s rovnicou (1), preto ho pri výpočte netreba uvádzať.

Ďalšie vzťahy pre zvolené jednoduché uzavreté obvody zostavíme dosadením do vzťahu (3.10):

Obvod *ABCD*:

$$U_{e1} + U_{e2} = -R_1 I_1 - R_2 I_2 \quad (2)$$

Obvod *AFEB*:

$$-U_{e2} - U_{e3} = +R_2 I_2 + R_3 I_3 \quad (3)$$

Tretiu rovnicu pre jednoduchý obvod *CDFE* netreba písať, lebo nie je nezávislá. Obvod obsahuje iba opakujúce sa vetvy. Mohla by sa použiť na kontrolu súčtom predchádzajúcich rovníc.

Po dosadení číselných hodnôt daných veličín do (1), (2) a (3) dostaneme sústavu číselných rovníc s tromi neznámymi  $\{I_1\}$ ,  $\{I_3\}$  a  $\{U_{e2}\}$ .

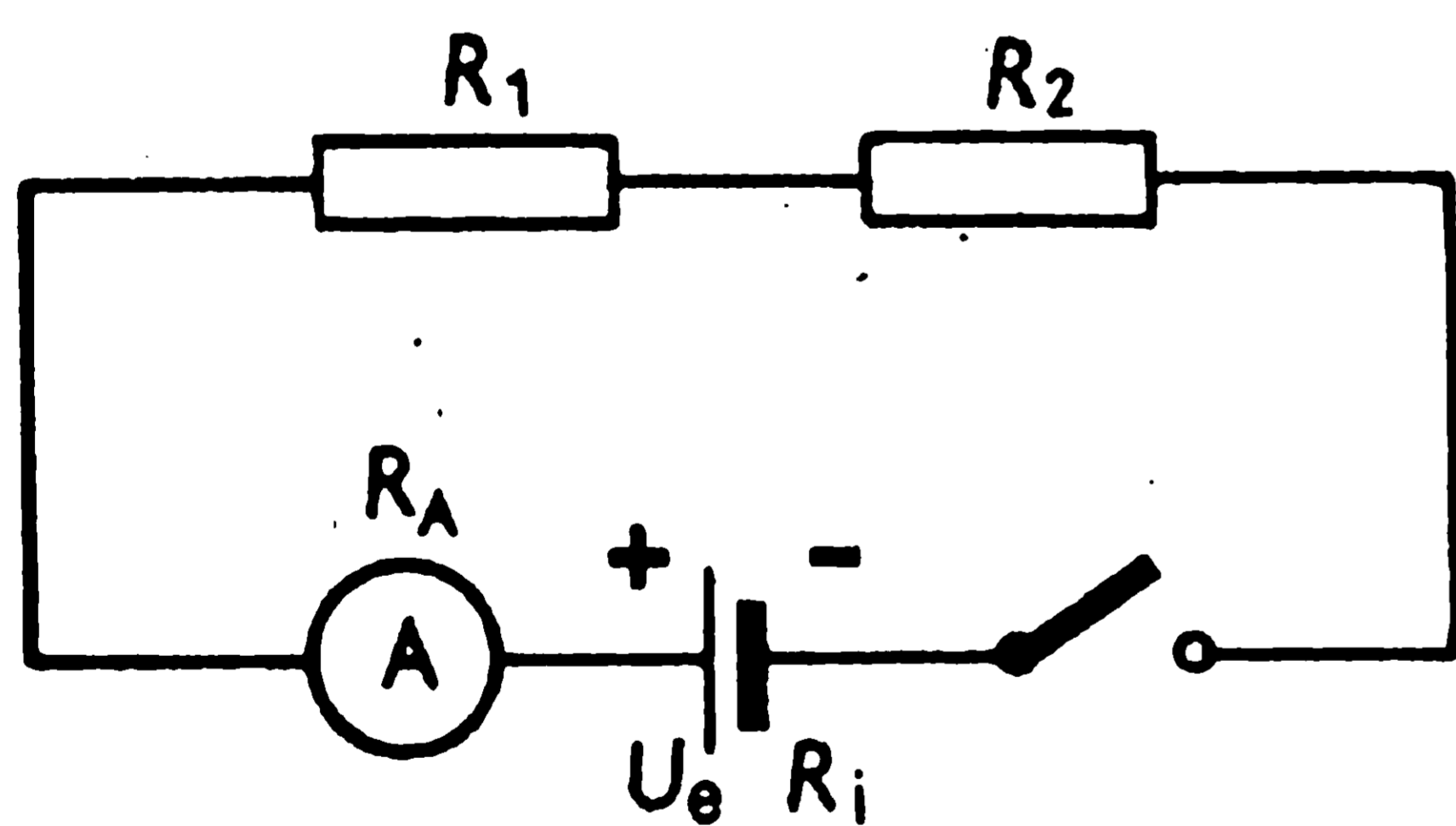
$$\begin{aligned} 0 &= -\{I_1\} + 1 - \{I_3\} \\ 8 + \{U_{e2}\} &= -2\{I_1\} - 4 \\ -5 - \{U_{e2}\} &= 4 + 3\{I_3\}^* \end{aligned}$$

Riešením dostaneme  $\{I_1\} = 0$ ,  $\{I_3\} = 1$ ,  $\{U_{e2}\} = -12$ .

Ak vetvou *AB* má prechádzať požadovaný prúd  $I_2 = 1$  A v naznačenom smere, treba zdroj s  $U_{e2}$  zapojiť obrátene ako je vyznačené v schéme. Číselná hodnota prúdu  $I_3$  je kladná, preto jeho smer je vyznačený správne. Vetvou *CD* prúd neprechádza.

## Úlohy

1. Vypočítajte vnútorný odpor zdroja  $R_i$  v schéme na obr. 3-10, ak viete, že obvodom prechádza prúd  $I = 0,40$  A, odpor ampérmetra je  $R_A = 0,05 \Omega$  a  $R_1 = 9,70 \Omega$ ,  $R_2 = 19,75 \Omega$  a  $U_e = 12,0$  V. [0,50  $\Omega$ ]



Obr. 3-10

Schéma elektrického obvodu k úlohe 1

2. Akumulátor dodáva prúd do dvoch paralelne spojených spotrebičov. V prvej vetve s odporom  $24 \Omega$  prechádza prúd  $0,5$  A, druhá vetva má odpor  $30 \Omega$ . Aké je napätie na

---

\* Sústava číselných rovníc, ktorú dostaneme pri výpočte zložitejšej siete, má komplikovaný zápis použitím symbolu  $\{ \}$ . Preto pri vlastnom matematickom riešení môžeme túto symboliku vynechať.

každej vetve? Aký je celkový prúd v obvode? Vnútorňý odpor akumulátora zanedbajte.  
[12 V; 0,4 A; 0,9 A]

3. Homogénny drôt má elektrický odpor  $18 \Omega$ . Na koľko rovnakých častí ho treba rozdeliť, aby pri ich paralelnom spojení bol výsledný odpor  $0,5 \Omega$ ? [na 6]

### 3.6 Praktické aplikácie Kirchhoffových zákonov

#### 1. Zväčšenie rozsahu ampérmetra

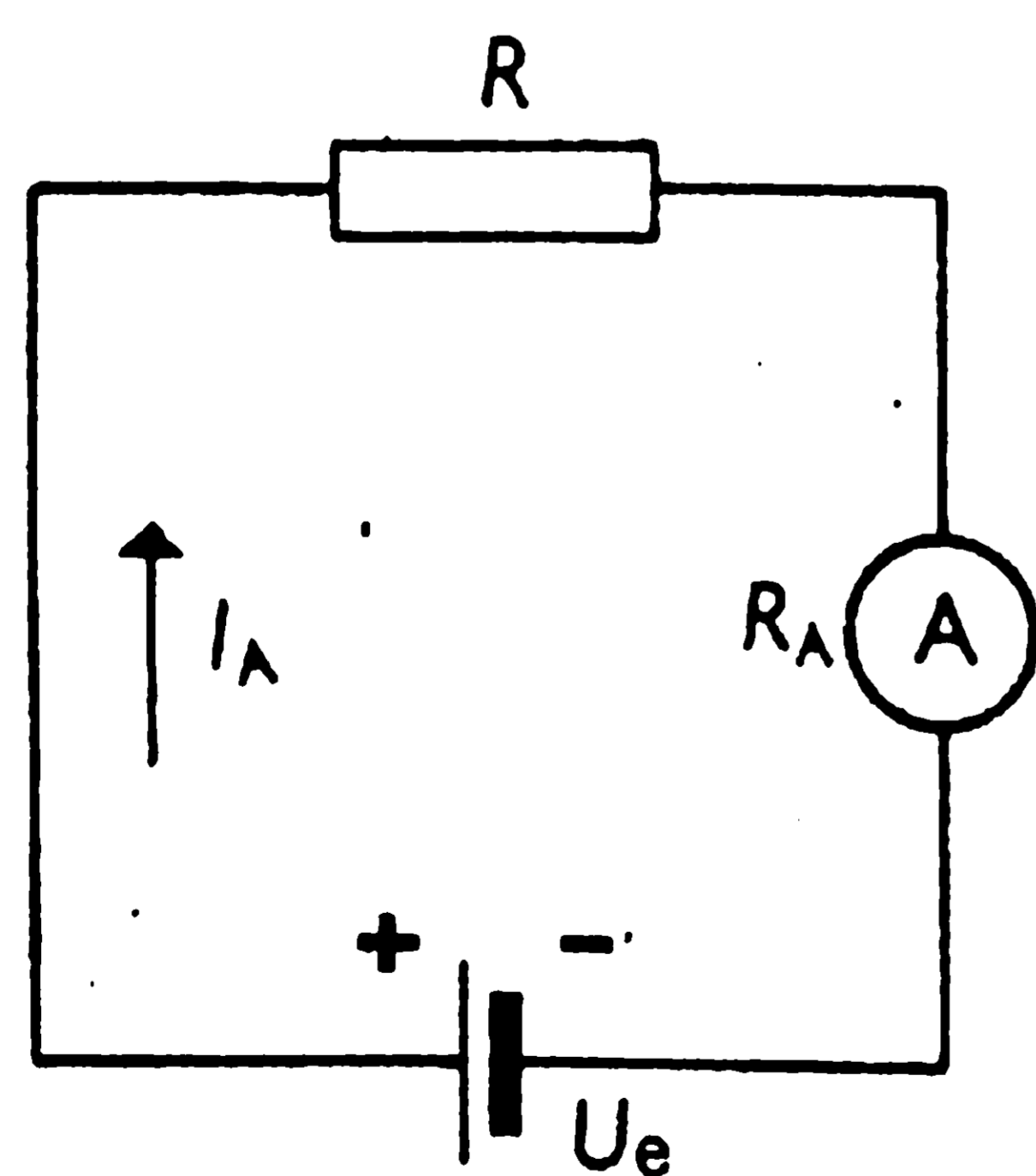
Elektrický prúd meriame **ampérmetrom**, ktorý spájame sériovo so spotrebičom (obr. 3-11 a). Odpor  $R_A$  ampérmetra musí byť veľmi malý, aby čo najmenej ovplyvnil prúdové a napätové pomery v obvode. Ampérmetrom môže prechádzať nanajvyš istý maximálny prúd  $I_A$ .

Pri meraní prúdov  $n$ -krát väčších, ako je prúd  $I_A$  postupujeme tak, že k jeho cievke pripojíme paralelne rezistor s odporom  $R_b$ , tzv. **bočník** (obr. 3-11b). Odpor  $R_b$  vypočítame pomocou Kirchhoffových zákonov z rovníc

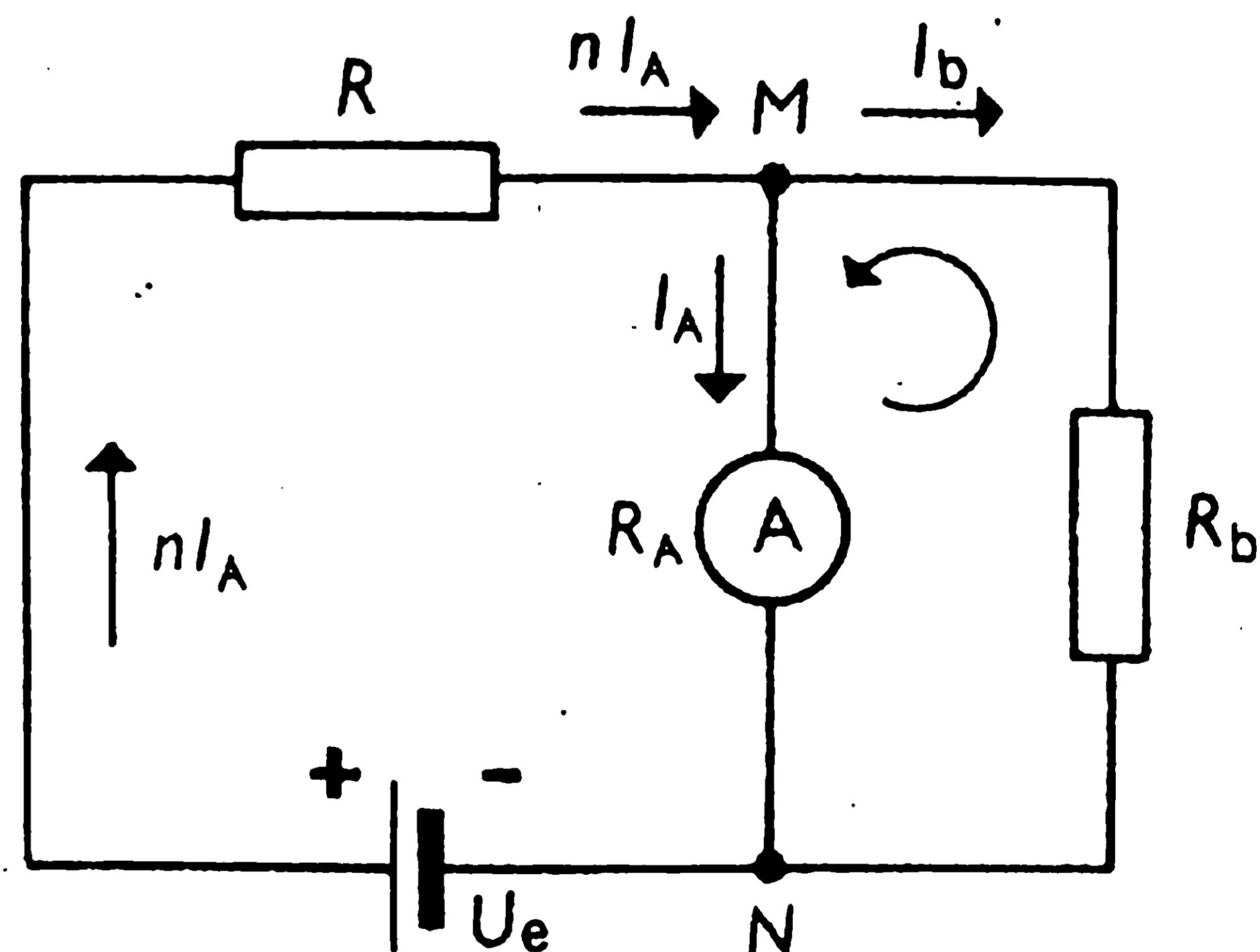
$$\begin{aligned} n I_A - I_A - I_B &= 0 \text{ A} \\ R_A I_A - R_b I_b &= 0 \text{ A} \end{aligned}$$

odkiaľ pre odpor bočníka dostaneme

$$R_b = \frac{1}{n-1} R_A$$



a



b

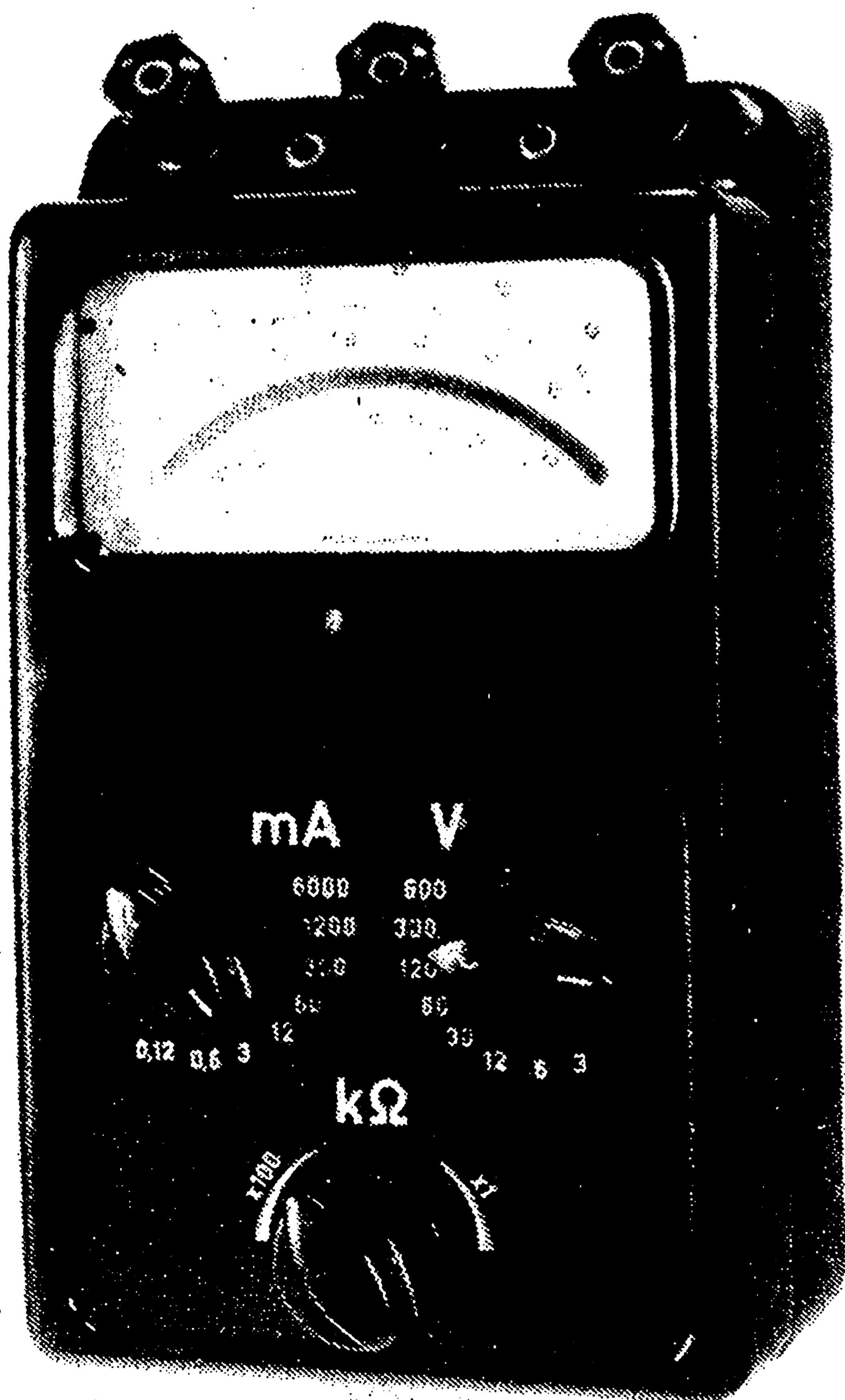
**Obr. 3-11**

Schéma elektrického obvodu:

- a) s ampérmetrom bez bočníka,  
b) s ampérmetrom a bočníkom s odporom  $R_b$ ,

Keď je napr. meraný prúd 5-krát väčší ako  $I_A$  ( $n=5$ ), pripojíme k ampérmetru paralelne bočník s odporom  $R_b = \frac{R_A}{4}$ .

V univerzálnom prístroji DU-10 (obr. 3-12) sú bočníky zabudované vnútri a zaraďujeme ich ľavým prepínačom, čím sa mení rozsah prístroja. Pri meraní neznámych hodnôt prúdov zapojíme najväčší prúdový rozsah a až potom znižovaním rozsahu zvyšujeme citlivosť prístroja.

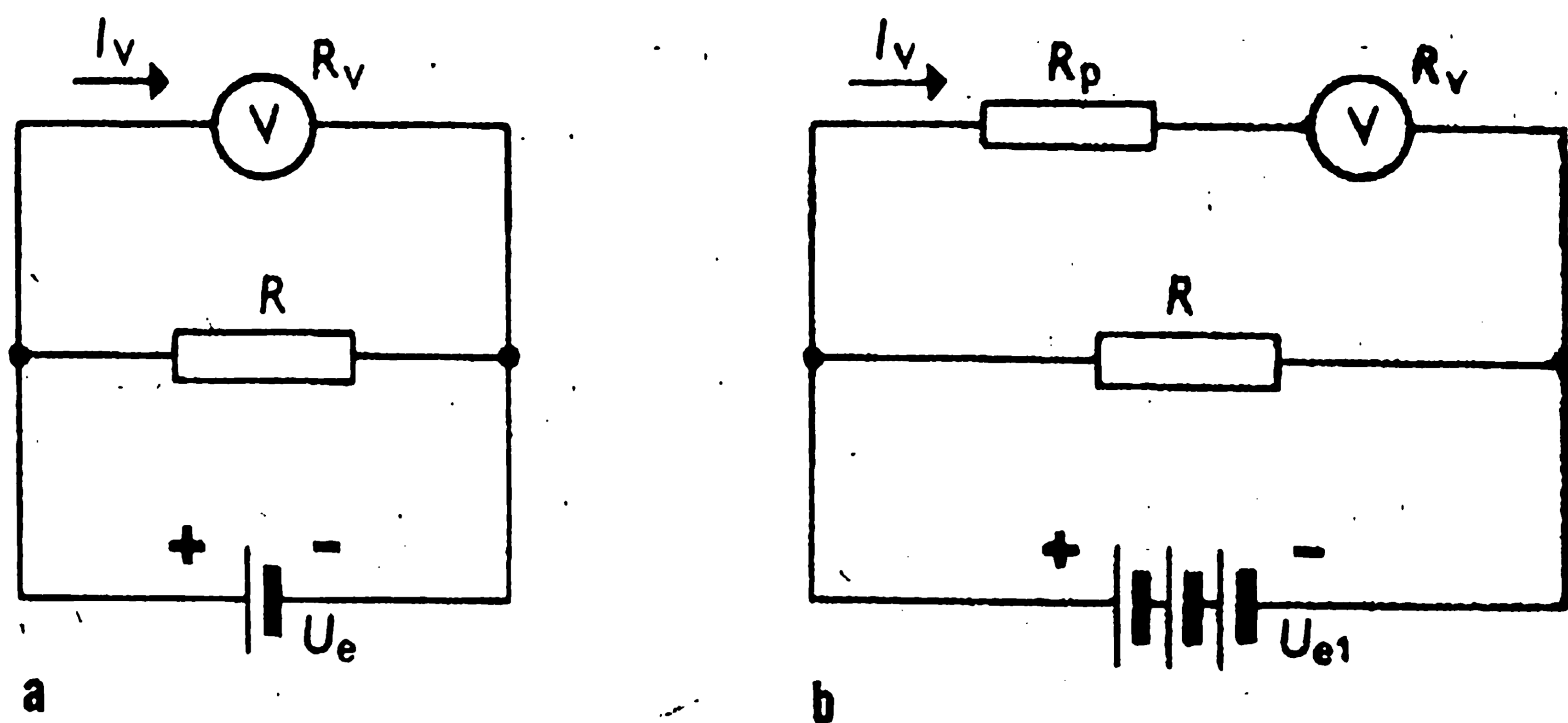


**Obr. 3-12**  
Univerzálny merací prístroj  
DU-10

## 2. Zväčšenie rozsahu voltmetra

**Voltmeter** je prístroj na meranie elektrického napätia, ktorý sa konštrukčne neodlišuje od ampérmetra. Voltmeter spájame paralelne s meranou časťou obvodu (obr. 3-13a). Vieme, že pri paralelnom spojení





**Obr. 3-13**

Schéma elektrického obvodu:

a) s voltmetrom bez predradného rezistora,

b) s voltmetrom a predradným rezistorom s odporom  $R_p$

sa prúd rozdeľuje do jednotlivých vetví a odpor paralelnej kombinácie sa pozmení. Zapojený voltmeter prúdovo zaťažuje zdroj a zmerané napätie na meranom úseku je o niečo menšie ako pred zapojením voltmetra. Odpor voltmetra má byť teda veľký, aby sa nezaťažila sieť (má ním prechádzať minimálny prúd), a aby sa prúdové pomery veľmi nezmenili. Na toto treba dávať pozor pri veľmi presných meraniach napätia.

Každý voltmeter je konštruovaný na isté maximálne napätie  $U_v$ , dané maximálnym prúdom  $I_v$ , ktorý môže prechádzať cievkou voltmetra s odporom  $R_v$ ,  $U_v = R_v I_v$ . Keď je merané napätie  $n$ -krát väčšie ako napätie  $U_v$ , t. j.  $U = n U_v$ , prepínačom na prístroji spojíme sériovo s cievkou voltmetra tzv. **predradný rezistor** s odporom  $R_p$ . Tým sa utvorí delič napätia, ktorého časťami (prvkami) prechádza rovnaký prúd (obr. 3-13b).

Pomocou Kirchhoffových zákonov dostaneme (odvoďte sami)

$$R_p = (n - 1) R_v$$

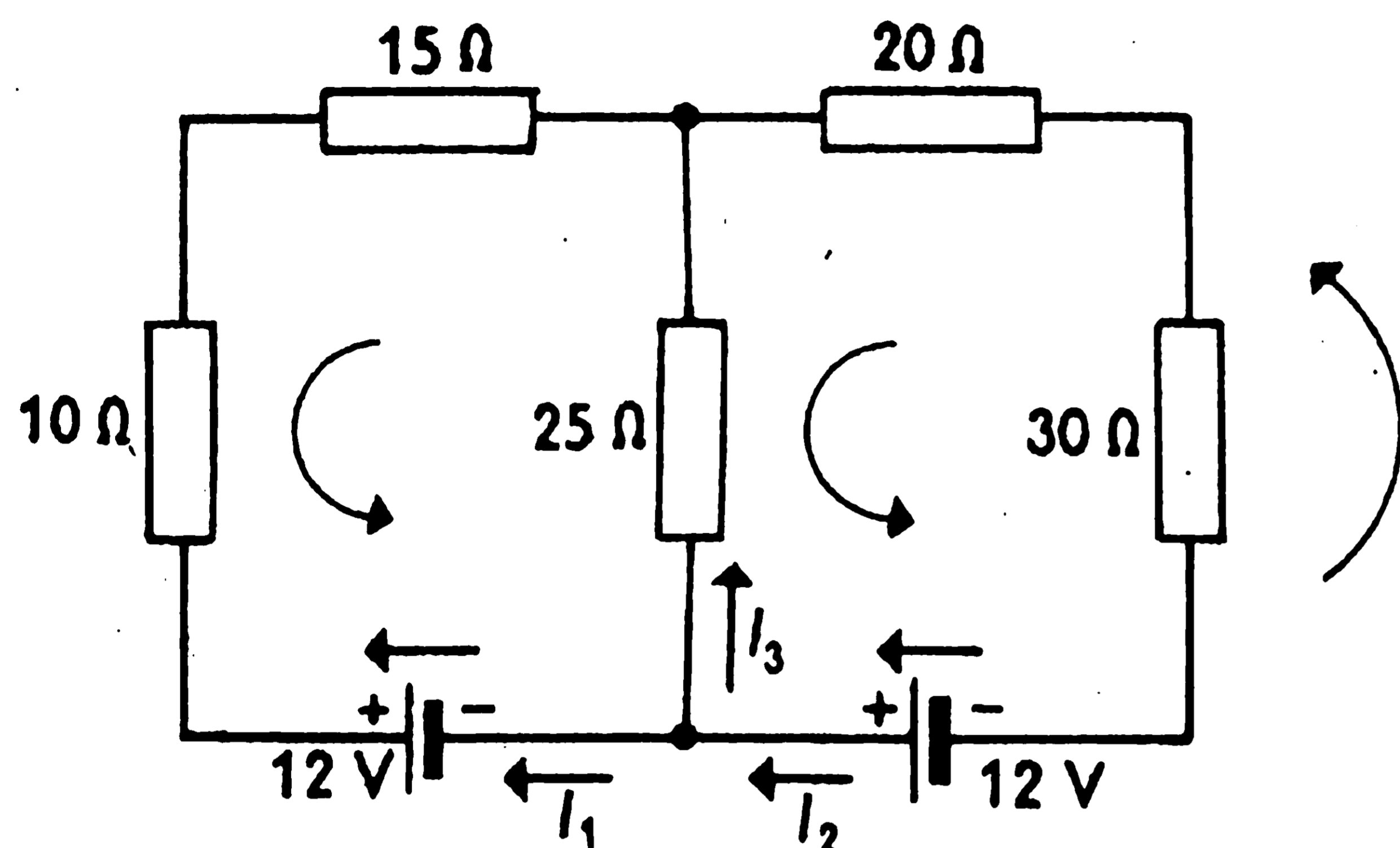
Keď je napr. voltmeter konštruovaný na maximálne napätie 10 V a chceme merať napätie do 100 V, pričom  $R_v = 20 \text{ k}\Omega$ , zaradíme rezistor s odporom  $R_p = 0,18 \text{ M}\Omega$ .

Odpor voltmetra  $R_v$  určíme podľa údajov na prístroji (pri DU-10 je na zadnej strane prístroja), ktorý nás informuje, aký odpor pripadá na napätie jeden volt. Tento údaj vynásobíme nastaveným rozsahom

a dostaneme  $R_v$ . Napríklad: údaj na voltmetri je  $50 \text{ k}\Omega \cdot \text{V}^{-1}$  a máme zaradený rozsah  $12 \text{ V}$ . Potom  $R_v = 50 \text{ k}\Omega \cdot \text{V}^{-1} \cdot 12 \text{ V} = 600 \text{ k}\Omega$ .

### 3. Výpočet parametrov prvkov elektrickej siete

Na obr. 3-14 je znázornená elektrická sieť, v ktorej sú zapojené dva zdroje a päť rezistorov. Vnútorne odpory zdrojov zanedbáme. Aké prúdy prechádzajú jednotlivými vetvami?



Obr. 3-14

Schéma elektrickej siete s dvoma zdrojmi napätia a piatimi rezistormi

Pri riešení tejto úlohy označíme prúdy  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a ich smery, smery pri zdrojoch a smery obiehania. Potom zostavíme číselné rovnice podľa vzťahov (3-7) a (3.10):

$$\begin{aligned} \{I_1\} + \{I_2\} - \{I_3\} &= 0 \\ -12 &= 25\{I_3\} - 15\{I_1\} - 10\{I_1\} \\ -12 &= -30\{I_2\} - 20\{I_2\} - 25\{I_3\} \end{aligned}$$

Riešením tejto sústavy rovníc dostaneme  $\{I_1\} = 0,384$ ;  $\{I_2\} = 0,288$ ;  $\{I_3\} = -0,096$ .

Číselné hodnoty prúdov  $I_1$  a  $I_2$  sú kladné, preto ich smery sú v schéme označené správne. Číselná hodnota prúdu  $I_3$  je záporná, preto v schéme bude jeho smer opačný.

Jednotlivými vetvami prechádzajú prúdy  $I_1 \doteq 0,38 \text{ A}$ ,  $I_2 \doteq 0,29 \text{ A}$  (oboma smermi ako na obr. 3-14),  $I_3 \doteq 0,09 \text{ A}$  (opačného smeru, ako je označené na obr. 3-14).

### 3.7 Práca a výkon v obvode s konštantným prúdom

Vieme, že usmerný pohyb voľných častíc s nábojmi v uzavretom obvode súvisí s konaním práce neelektrostatických síl vnútri zdroja a elektrostatických síl vo vonkajšej časti obvodu.

Keď sa z jednej svorky premiestia častice s celkovým nábojom  $Q$  vonkajšej časti obvodu na druhú svorku zdroja, vykonajú sily elektrického poľa prácu

$$W = U Q$$

kde  $U$  je svorkové napätie zdroja. Keď obvodom prechádza konštantný prúd  $I$  za čas  $t$ , potom  $Q = I t$ , takže

$$W = U I t \quad (3.11)$$

Táto práca sa volá **práca vo vonkajšej časti obvodu**.

Keď vonkajšia časť obvodu má celkový odpor  $R$ , môžeme vzťah (3.11) prepísať do tvarov

$$W = R I^2 t = \frac{U^2}{R} t \quad (3.12)$$

Jednotkou elektrickej práce je **joule (J)**.

Práca spojená s prenosom častíc vo vonkajšej časti obvodu sa prejaví zahriatím vodiča, jeho pohybom alebo inou zmenou. Za predpokladu, že vodič je v relatívnom pokoji, pozorujeme iba teplotné zmeny. Kinetická energia usmerného pohybu častíc s nábojom sa pri zrážkach odovzdáva kmitajúcim časticiam kryštálovej mriežky, preto sa vnútorná energia vodiča zväčšuje. Mierou zmeny tejto vnútornej energie je **Joulovo teplo**, ktoré vypočítame zo vzťahov

$$Q = W = U I t = R I^2 t = \frac{U^2}{R} t$$

Joulovo teplo sa v praxi často využíva, napr. pri konštrukcii meracích prístrojov, prerušovačov svetiel, tavných poistiek, elektrických pecok,

žehličiek, infražiaričov. Kde je Joulovo teplo nežiadúce, tam sa používa účinné chladenie.

Pri premiestení častíc s celkovým nábojom  $Q$  vnútri zdroja vykonajú neelektrostatické sily prácu

$$W_z = U_e Q$$

kdé  $U_e$  je elektromotorické napätie zdroja. Táto práca je mierou energie, ktorú dodá zdroj do uzavretého obvodu. Keď použijeme vzťah (3.5), dostaneme pre prácu síl zdroja vzťahy

$$W_z = U_e Q = U_e I t = \frac{U_e^2 t}{R + R_i} \quad (3.13)$$

**Výkon zdroja  $P_z$**  vypočítame zo vzťahov

$$P_z = \frac{W_z}{t} = U_e I = \frac{U_e^2}{R + R_i} = (R + R_i) I^2 \quad (3.14)$$

Analogicky vyjadríme **výkon konštantného prúdu  $I$**  vo vodiči (spotrebiči), medzi ktorého koncami je napätie  $U$

$$\boxed{P = \frac{W}{t} = U I = \frac{U^2}{R} = R I^2} \quad (3.15)$$

Tento výkon sa nazýva tiež **príkon spotrebiča**. Jednotkou výkonu je watt (W).

Vzťahy (3.14) a (3.15) umožňujú vypočítať prácu zdroja  $W_z$  a prácu  $W$  pomocou  $P_z$ , príp.  $P$ . Potom jednotkou práce je **wattsekunda**,  $1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ J}$ . V praxi používame násobné jednotky, napr.  $\text{W} \cdot \text{h}$ ,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ .

**Účinnosť zdroja** je daná vzťahom

$$\boxed{\eta_z = \frac{W}{W_z} = \frac{P}{P_z}}$$

Došadením za  $W$  a  $W_z$ , príp.  $P$  a  $P_z$  z predchádzajúcich vzťahov dostaneme

$$\eta_z = \frac{U I t}{U_e I t} = \frac{R}{R + R_i}$$

Z výsledku je vidieť, že účinnosť zdroja bude tým väčšia, čím väčší bude odpor  $R$  vonkajšej časti obvodu v porovnaní s vnútorným odporom  $R_i$  zdroja. Pre  $R = R_i$  je účinnosť zdroja 0,5. Potom je pri danom elektromotorickom napätí a vnútornom odpore zdroja výkon prúdu vo vodiči maximálny.

## Úlohy

1. Dve žiarovky s príkonmi 45 W a 5 W sú paralelne zapojené na zdroj napätia, ktorým prechádza prúd 3 A. Určte prúdy, ktoré prechádzajú žiarovkami. [2,7 A; 0,3 A]
2. Ponorným varičom s príkonom 625 W sa zohrieva voda s objemom 0,4 l. Do varu sa uvedie za 4 min. Vypočítajte pôvodnú teplotu vody, ak je účinnosť variča 95,2 %. Koľko zaplatíte za spotrebu elektrickej energie, ak sa za jednu kW.h platí 1,05 Kčs? Hustota vody je  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , merná tepelná kapacita vody  $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . [15 °C; 0,05 Kčs]
3. Ukážte, že pri danom  $U_c$  a  $R_i$  zdroja je maximálny výkon prúdu daný vzťahom

$$P_{\max} = \frac{U_c^2}{4 R_i} = \frac{U_c^2}{4 R}, \text{ kde } R \text{ je odpor vonkajšej časti obvodu. (Využite predpoklad } R = R_i.)$$

## ZHRNUTIE — ELEKTRICKÝ PRÚD V KOVOCH

Kovy sú výbornými vodičmi elektrického prúdu. Elektrický prúd v kovoch je usmernený pohyb vodivostných elektrónov.

Závislosť elektrického prúdu  $I$  od elektrického napätia  $U$  za predpokladu konštantnej teploty vyjadruje **Ohmov zákon**.

**Ohmov zákon pre časť obvodu:**  $I = \frac{U}{R}$  kde  $R$  je elektrický odpor vodiča. Jeho jednotkou je ohm.

**Ohmov zákon pre uzavretý obvod:**  $I = \frac{U_0}{R_1 + R}$  kde  $U_0$  je elektromotorické napätie zdroja,  $R_1$  vnútorný odpor zdroja a  $R$  odpor vonkajšej časti obvodu. Veličina  $R_0 = R_1 + R$  je **celkový odpor obvodu**. Elektrické napätie  $U$  sa nazýva **svorkové napätie zdroja**;  $U = I R$ .

Závislosť elektrického odporu kovového vodiča od jeho geometrických rozmerov, teploty a od látky, z ktorej je vodič, vyjadrujú vzťahy

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad R = R_0 (1 + \alpha \Delta t), \quad \text{resp.} \quad R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

kde  $\rho$  je **merný elektrický odpor** (jednotka  $\Omega \cdot m$ ) a  $\alpha$  teplotný súčiniteľ elektrického odporu (jednotka  $K^{-1}$ ).

**Pri sériovom spojení rezistorov** sa celkový odpor rovná súčtu odporov jednotlivých rezistorov:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

**Pri paralelnom spojení rezistorov** sa prevrátená hodnota celkového odporu rovná súčtu prevrátených hodnôt odporov jednotlivých rezistorov:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

**Prvý Kirchhoffov zákon** (pre uzol rovnomerného obvodu): Pri konštantnom prúde sa algebrický súčet prúdov pre daný uzol rovná nule.

**Druhý Kirchhoffov zákon** (pre slučku rovnomerného obvodu): V uzavretom obvode s konštantným prúdom sa súčet elektromotorických napätí zaradených zdrojov rovná súčtu úbytkov napätí.

**Prácu  $W$**  vo vonkajšej časti obvodu s konštantným prúdom vypočítame zo vzťahu  $W = U I t = R I^2 t$ .

**Prácu elektrického zdroja vypočítame zo vzťahu  $W_z = U_0 I t$ .**

**Výkon konštantného prúdu vo vonkajšom obvode je daný vzťahom  $P = R I^2$ .**

**Výkon zdroja v uzavretom obvode:  $P_z = U_0 I = (R + R_i) I^2$ . Teplo  $Q$ , ktoré prijme vodič s prechádzajúcim prúdom sa rovná práci, t. j.  $Q = U I t$ .**

**Účinnosť zdroja  $\eta_z$  možno vyjadriť vzťahmi**

$$\eta_z = \frac{W}{W_z} = \frac{P}{P_z} = \frac{R}{R_i + R}$$





## 4. Elektrický prúd v polovodičoch

Polovodiče sú látky, ktoré v posledných desaťročiach veľmi ovplyvnili technický rozvoj spoločnosti. Ich široké využívanie v technickej praxi úzko súvisí s výraznou závislosťou ich elektrických vlastností napr. od teploty, prítomnosti prímiesí, dopadajúceho žiarenia, elektrického poľa.

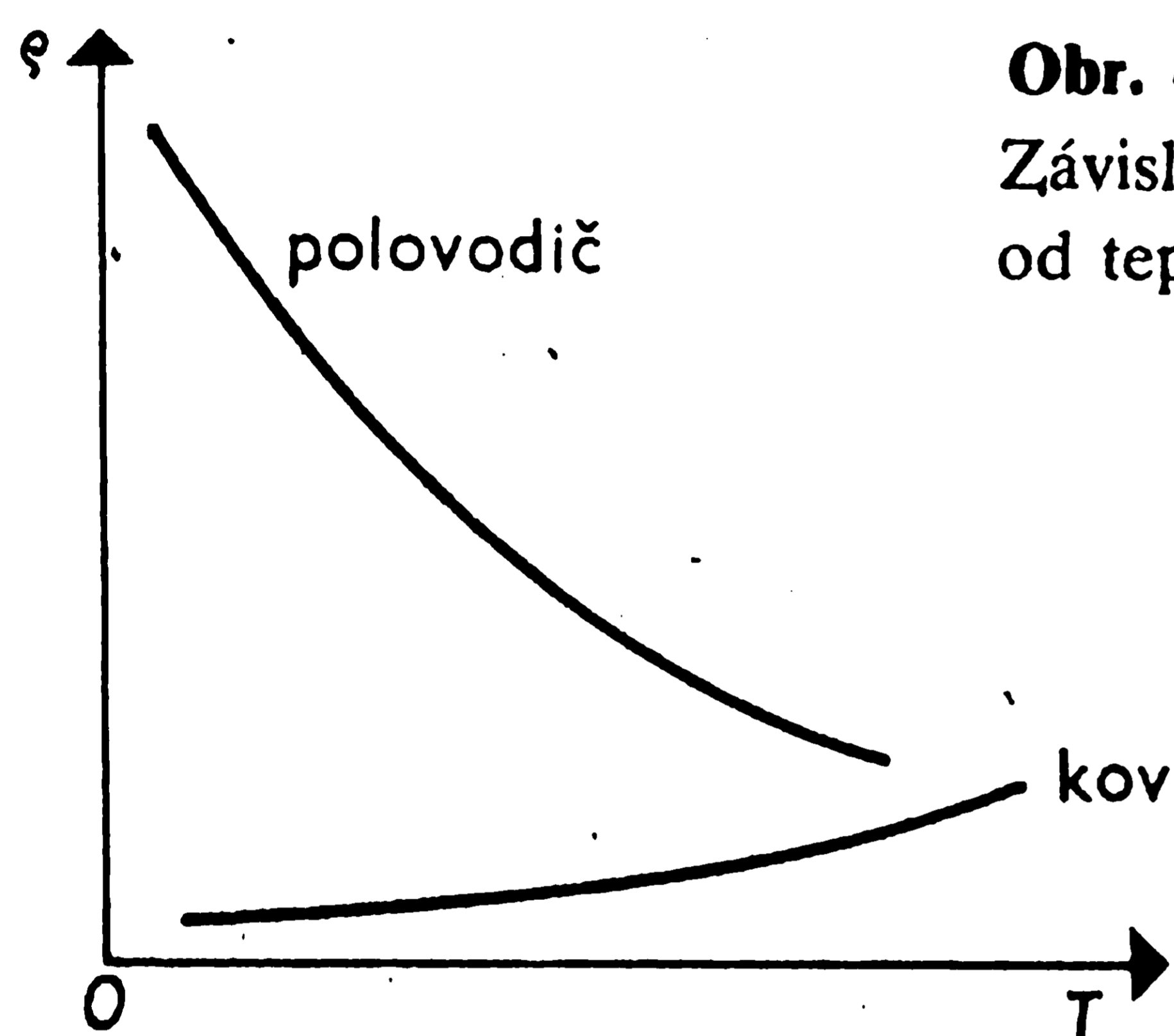
Aby sme pochopili javy, ktoré v polovodičoch prebiehajú, musíme poznať štruktúru týchto látok a mechanizmus vedenia prúdu v nich. To nám umožní pochopiť činnosť polovodičových diód, tranzistorov, termistorov a iných polovodičových prvkov, ktoré sa v súčasnosti bežne používajú.

### 4.1 Pojem polovodiča

Z hľadiska vedenia elektrického prúdu rozdeľujeme látky na **vodiče**, **polovodiče** a **izolanty**. Za porovnávaciu veličinu môžeme zvoliť napr. merný elektrický odpor  $\rho$ . Kovové **vodiče**, napr. striebro, meď, hliník, majú veľmi malý merný elektrický odpor, rádovo  $10^{-7}$  až  $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . Pre vodivé roztoky (elektrolyty), napr. vodný roztok kuchynskej soli, je rádovo  $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ . **Izolanty** (dielektriká), napr. bakelit a sklo, charakterizuje naopak veľký merný elektrický odpor, rádovo väčší ako  $10^9 \Omega \cdot \text{m}$ . **Polovodiče** sú látky, ktoré majú merný elektrický odpor rádovo v intervale hodnôt  $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$  až  $10^9 \Omega \cdot \text{m}$ . Za veľmi nízkych teplôt sa stávajú izolantmi.

Medzi polovodiče patria niektoré chemické prvky, napr. kremík Si, germánium Ge, uhlík C (grafit), selén Se, telúr Te a niektoré chemické zlúčeniny napr. sulfid olovnatý PbS, sulfid kademnatý CdS. Aj niektoré organické látky, ako hemoglobín — najdôležitejšia zložka krvi alebo chlorofyl v listoch rastlín, sú polovodiče.

Typickým znakom polovodičov je, že **merný elektrický odpor polovodičov  $\rho$  so zvyšujúcou teplotou sa rýchlo znižuje**. V kovy sa naopak  $\rho$  so zvyšujúcou teplotou mierne zväčšuje. Situácia je graficky znázornená na obr. 4-1. Ako možno tento rozdiel vysvetliť? Keďže merný elektrický odpor pevnej látky je tým väčší, čím menšia je hustota voľných elektrónov a čím menšia je ich stredná unášavá rýchlosť udelená elektrickým poľom s jednotkovou intenzitou (tzv. pohyblivosť), musíme rozdiel objasniť z týchto hľadísk.

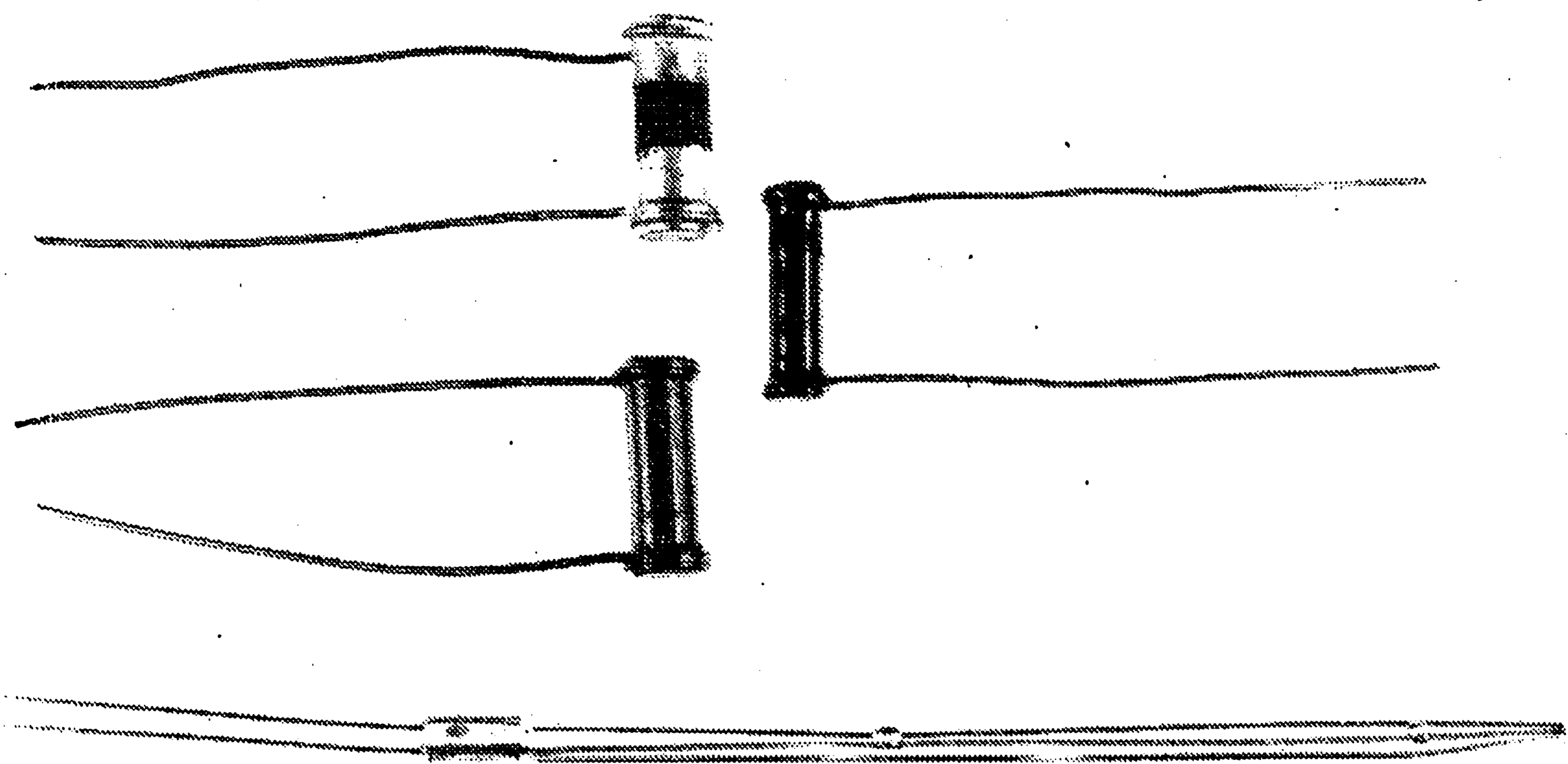


**Obr. 4-1**

Závislosť merného elektrického odporu polovodiča a kovu od teploty

Hustota voľných elektrónov v kovy od teploty takmer nezávisí. So zvyšujúcou teplotou kmitajúce častice mriežky čoraz viac prekážajú pohybu vodivostných elektrónov. Preto sa merný elektrický odpor kovov so zvyšujúcou teplotou mierne zväčšuje. Z toho istého dôvodu sa aj v polovodičoch, ak má polovodič vyššiu teplotu, každý voľný elektrón pohybuje o niečo ťažšie. Priebeh grafu  $\rho = \rho(T)$  polovodiča na obr. 4-1. znázorňuje najmä prudké zväčšenie hustoty voľných elektrónov so zvyšujúcou teplotou. Napríklad v čistom kremíku sa pri zmene teploty z 300 K na 600 K zväčší hustota voľných elektrónov viac ako  $10^5$ -krát. Počet voľných elektrónov sa zväčšuje v dôsledku ich uvoľňovania z väzieb medzi časticami.

Veľká teplotná závislosť odporu polovodiča sa v praxi využíva pri **termistoroch**. Termistor je jednoduchá polovodičová súčiastka, ktorá sa skladá z kúska polovodiča (napr. z oxidov  $\text{UO}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  alebo ich zmesi) a dvoch elektrických prívodov (obr. 4-2). Meraním odporu termistora môžeme nepriamo merať teplotu danej látky s presnosťou až na  $10^{-3}$  K.



**Obr. 4-2**  
Termistory

**Pokus:** Do elektrického obvodu tvoreného zdrojom, ampérmetrom a vhodným rezistorom zaradíme termistor. Pri zohrievaní termistora rukou alebo plameňom sviečky pozorujeme, že prúd, ktorý prechádza obvodom, sa rýchlo zväčšuje. Je to dôsledok veľkej závislosti elektrického odporu termistora od teploty.

Pomocou termistorov môžeme merať napr. aj rýchlosť prúdenia tekutín. Umožňuje to skutočnosť, že vonkajšie ochladzovanie termistora, ktorým prechádza elektrický prúd, závisí od rýchlosti prúdenia tekutiny, ktorá obteká termistor. Termistory majú veľké uplatnenie aj pri automatizácii výroby. V elektrických prístrojoch (napr. v televíznych prijímačoch) sa termistory používajú na ochranu niektorých súčiastok (elektrónok) pri zapnutí prístroja. Pritom sa využíva skutočnosť, že elektrický odpor termistora zaradeného sériovo so spotrebičom, sa s jeho zohrievaním znižuje v dôsledku prechodu prúdu. Napätie na spotrebiči sa zväčšuje pomalšie, čím sa zamedzí poškodeniu spotrebiča.

Termistory majú rozličné tvary a veľkosti. Najčastejšie sa používajú termistory tyčkové, platničkové a perličkové (obr. 4.2!). Najmenšie rozmery má perličkový termistor, ktorý tvoria dva tenké prívodné drôtičky s guľôčkou z polovodičovej látky. Guľôčka môže mať rozmery menšie ako špendlíková hlavička. Tento typ termistora je vhodný na sledovanie rýchlych teplotných zmien, lebo rýchlo reaguje na zmenu teploty. Vzhľadom na malé

rozmery a veľkú citlivosť možno týmito termistormi merať teplotu aj v miestach, v ktorých by to nebolo inak možné, napr. v žile pacienta. Pomocou termistora sa pozorovalo aj rozloženie teploty v listoch stromu.

V súčasnosti sa využívajú zväčša monokryštalické polovodičové prvky, z ktorých najdôležitejšie sú kremík a germánium. Sú základným materiálom pri výrobe polovodičových diód, tranzistorov, integrovaných obvodov a väčšiny polovodičových súčiastok. Výskum sa zameriava aj na amorfné polovodiče\*.

## Úlohy

1. Povedzte príklady vodičov, izolantov a polovodičov, ktoré sa vyskytujú v technickej praxi a v každodennom živote. Stručne opíšte ich využitie.
2. Vysvetlite, prečo možno termistor použiť na meranie teploty. Ako by ste postupovali pri kalibrácii tohto teplomeru?
3. Objasnite, či pre termistor platí Ohmov zákon.

## 4.2 Vlastné polovodiče

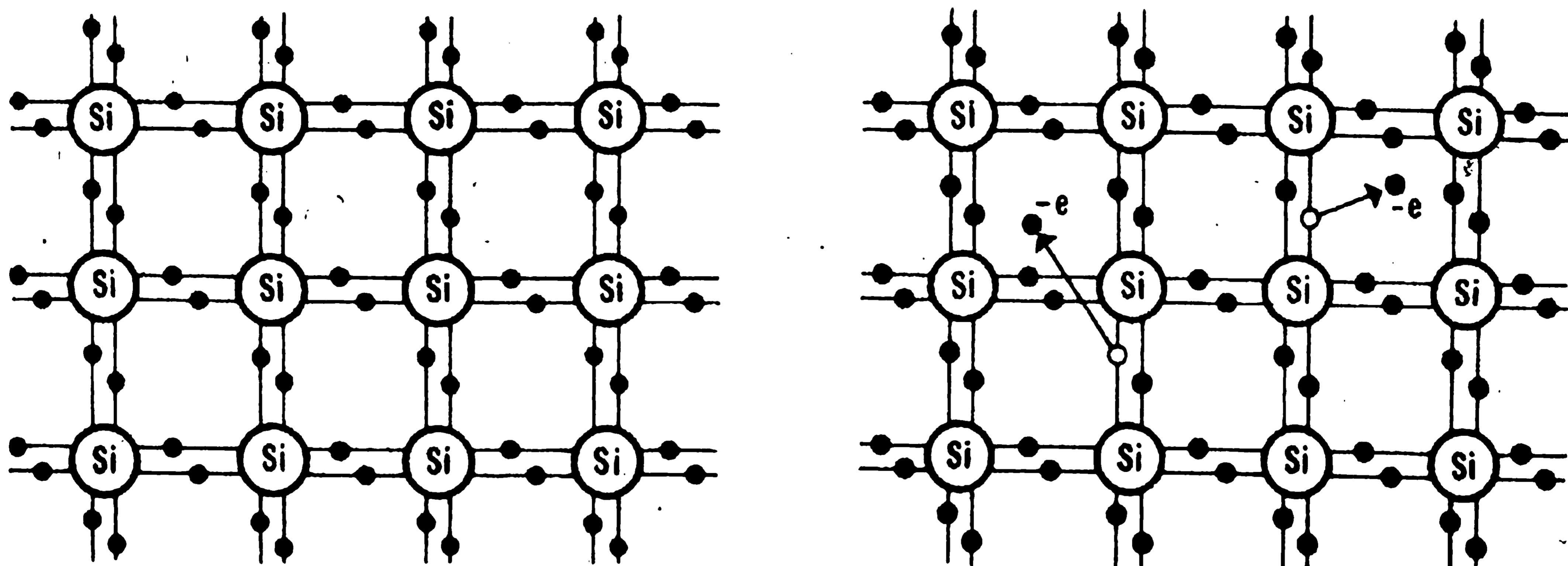
V stati 5.2 učebnice F 2 sme sa zaoberali kryštálovou mriežkou kremíka Si. Každý atóm Si je v tejto mriežke chemicky viazaný so štyrmi susednými atómami (obr. 5-9) pomocou štyroch vlastných valenčných elektrónov a štyroch valenčných elektrónov, z ktorých každý patrí jednému zo štyroch susedných atómov.

Zjednodušený rovinný model kryštálovej mriežky kremíka je na obr. 4-3a. Z modelu vyplýva, že v kryštáli čistého kremíka nie sú voľné elektróny a že kremík musí byť izolant.

Kremík sa pri teplotách približujúcich 0 K skutočne správa ako izolant. Pri vyšších teplotách však kmity atómov mriežky môžu vyvolať porušenie väzieb medzi atómami. Zrušením niektorých väzieb vznikajú súčasne dva typy voľných častíc s nábojom, a to priamo v pároch. Sú to **voľné elektróny** a tzv. **diery** (častice s kladným elektrickým nábojom). Hovoríme teda

---

\* Elektrický odpor polovodiča je možné zmeniť nielen zmenou teploty, ale aj osvetlením svetlom dostatočne veľkej frekvencie. Osvetlenie zväčšuje elektrickú vodivosť polovodiča; tento jav označujeme ako **fotoelektrická vodivosť**. Jav má veľký praktický význam.



Obr. 4-3

- a) Zjednodušený rovinný model kryštálovej mriežky kremíka  
 b) Schéma vzniku páru voľný elektrón — diera

o vzniku, čiže **generácií** párov voľný elektrón — diera. Vznik párov voľný elektrón — diera je znázornený na obr. 4-3b.

Podrobnejšie vysvetlíme pojem „diera“. Týmto pojmom charakterizujeme situáciu, keď uvoľnený valenčný elektrón chýba vo väzbe medzi atómami. Kladný náboj získa diera z prebytku kladných nábojov atómového jadra, ktoré bolo pred uvoľnením valenčného elektrónu so všetkými elektrónmi prislúchajúcimi tomu istému atómu v rovnovážnom stave. Diera teda nepredstavuje skutočnú časticu s nábojom, akou je napr. protón.

V čistom kremíku sa hustota dier rovná hustote voľných elektrónov. Táto hustota sa napr. pri bežnej teplote rovná  $6,8 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ . Pri „stretnutí“ voľného elektrónu s dierou obsadí voľný elektrón prázdne miesto v chemickej väzbe, čím nastane zánik páru voľný elektrón — diera. Z voľného elektrónu sa stane opäť valenčný (väzbový) elektrón. Zánik párov voľný elektrón — diera sa nazýva **rekombinácia**.

Bez prítomnosti elektrického poľa v polovodičoch, t. j. bez zapojenia vzorky polovodiča do elektrického obvodu so zdrojom napätia, je pohyb voľných elektrónov a dier chaotický. Aby sme získali správnu predstavu o pohybe dier, treba zdôrazniť, že nikdy nejde o premiestovanie kladných iónov v kryštálovej mriežke. Pohyb diery si predstavujeme tak, že niektorý z valenčných elektrónov susedných väzieb (v danom okamihu ešte neporušených) preskočí na miesto väzby porušenej. Tým obnoví pôvodne porušenú väzbu, čiže vykompenzuje prebytok kladného náboja

iónov a spôsobí tak zánik diery. Súčasne sa však objaví diera na inom mieste, takže diery „putujú“ po kryštáli polovodiča.

Keď je v polovodiči elektrické pole, potom sa voľné elektróny pohybujú proti smeru a diery v smere vektora intenzity tohto poľa. V polovodiči vznikne elektrický prúd (jav). Keďže oba druhy častíc majú opačné náboje a pohybujú sa v opačných smeroch, veličina **výsledný elektrický prúd  $I$  v polovodiči** sa rovná súčtu elektrónového prúdu  $I_e$  a dierového prúdu  $I_d$ :

$$I = I_e + I_d$$

Opísaný typ elektrickej vodivosti polovodičov sa nazýva **vlastná vodivosť**, lebo je umožnená vlastnými elektrónmi atómov polovodičov. Látky s touto vodivosťou tvoria **vlastné polovodiče**.

Z predchádzajúceho vysvetlenia vyplýva, že so zvyšujúcou teplotou zvyšuje sa hustota voľných elektrónov a dier. Tým sa znižuje elektrický odpor polovodiča a pre závislosť medzi napätím a prúdom Ohmov zákon neplatí. Platí iba pri malých prechádzajúcich prúdoch.

V technickej praxi sa s praktickou aplikáciou vlastných polovodičov stretávame veľmi málo, lebo veľká teplotná závislosť merného odporu je zväčša nevýhodná. Oveľa častejšie sa používajú tzv. nevlastné polovodiče, o podstate ktorých budeme hovoriť v ďalšej stati.

## Úlohy

1. Vysvetlite, prečo sa v čistom kremíku hustota dier rovná hustote voľných elektrónov. Objasnite pojmy generácia a rekombinácia párov voľný elektrón — diera.
2. Vysvetlite podstatu elektrickej vodivosti vlastných polovodičov.

## 4.3 Nevlastné (prímesové) polovodiče

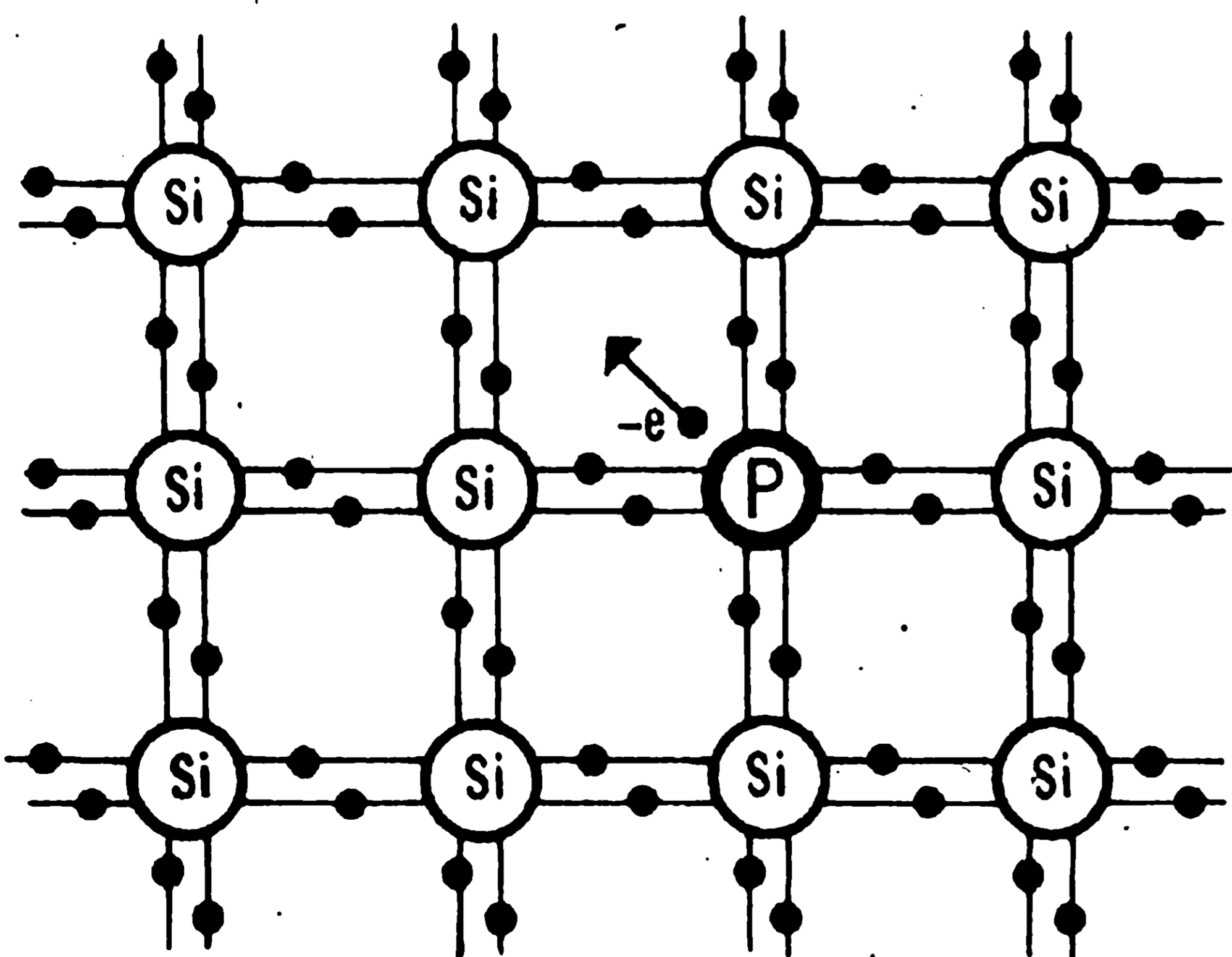
Z hľadiska technického využitia polovodičov je mimoriadne dôležité, že elektrické vlastnosti polovodičov výrazne závisia od niektorých prímiesí. Už veľmi malé hustoty vhodných prímiesí v kryštáli kremíka môžu vyvolať výrazné zmeny jeho elektrických vlastností (stačí napr., aby kremík bol znečistený tak, že na sto miliónov jeho atómov pripadá jediný atóm prímiesi).

Vhodným výberom prímеси možno dosiahnuť, aby v polovodiči prevažovala elektrónová alebo dierová vodivosť.

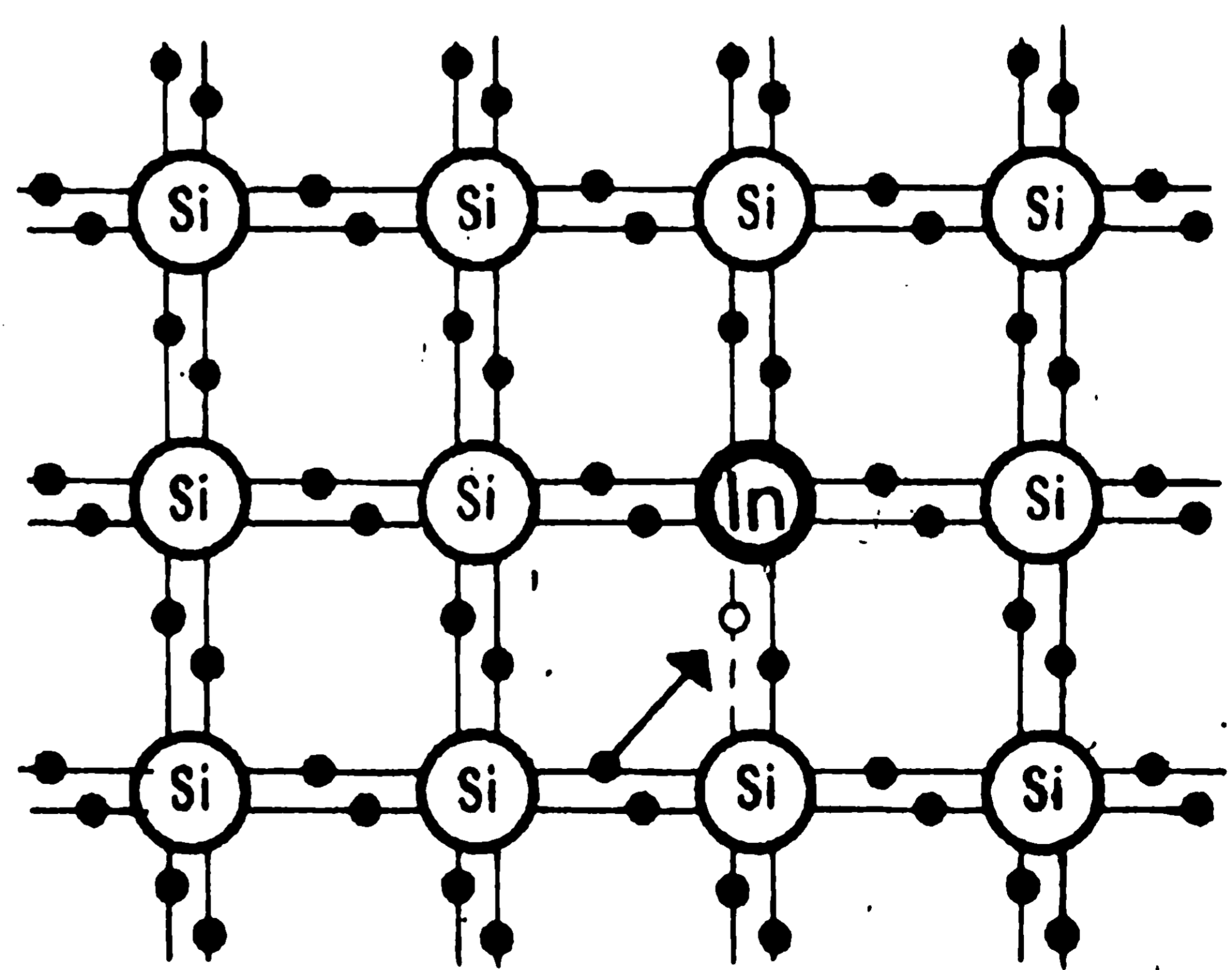
Všimnime si, čo sa stane, ak v kryštáli kremíka (obr. 4-4) nahradíme niektorý atóm štvormocného kremíka päťmocným atómom fosforu (substitučný atóm). Fosfor má päť valenčných elektrónov. Pri jeho zabudovaní do kryštálovej mriežky sa štyri z nich zúčastnia kovalentnej väzby, čím zastúpia štyri elektróny chýbajúceho atómu kremíka. Piaty elektrón sa však už v chemickej väzbe nemôže uplatniť. Zostáva veľmi slabo viazaný na pôvodný atóm fosforu, takže už pri pomerne nízkej teplote sa od neho odpúta a stane sa voľným elektrónom. Nevznikne však diera, preto v kremíku znečistenom fosforom je nadbytok voľných elektrónov. Takýto polovodič sa nazýva **polovodič s elektrónovou vodivosťou** alebo tiež **polovodič typu N**. Niekedy sa používa aj názov vodivosť typu N (od latinského slova negativ — záporný).

Možno vyrobiť aj **polovodič s dierovou vodivosťou** alebo **polovodič typu P**. Keď sa do kryštálu mriežky kremíka zabuduje atóm trojmocného prvku, napr. india In (obr. 4-5), chýba mu na plné obsadenie kovalentnej väzby so štyrmi atómami Si jeden valenčný elektrón. Vznikne diera bez vzniku voľného elektrónu. Vodivosť spôsobená dierami sa volá **dierová vodivosť polovodiča** alebo vodivosť typu P (od latinského slova positiv — kladný).

Prímesové atómy, ktoré z polovodičovej látky tvoria polovodič typu N, nazývajú sa **donory** (od slova donor — darca). Donory teda poskytujú kryštálu voľné elektróny. Pre kremík a germánium sú doňormi napr.



Obr. 4-4  
Kremík znečistený prímесou fosforu P



Obr. 4-5  
Kremík znečistený prímесou india In

fosfor P, dusík N, arzén As, antimón Sb a bizmut Bi. Keďže prímiesové atómy spôsobujú vznik polovodiča typu *P*, nazývajú sa **akceptory** (od slova akceptor — príjemca). Akceptory sú schopné zo svojho okolia prijať jeden väzbový elektrón, čím vznikajú diery. Pre kremík a germánium sú akceptormi napr. indium In, bór B, hliník Al, gálium Ga.

Vložením polovodiča obsahujúceho aktívne prímiesy zväčša jedného alebo druhého druhu do elektrického poľa, vzniká buď elektrónový alebo dierový prúd. Elektrickú vodivosť tohto druhu nazývame **nevlastná vodivosť**, lebo je spôsobená prítomnosťou cudzích, nie vlastných atómov. Polovodiče s týmto mechanizmom elektrickej vodivosti sa volajú **nevlastné (prímiesové) polovodiče**.

V nevlastných polovodičoch teda sprostredkuje elektrický prúd zväčša iba jeden typ voľných častíc s nábojom (voľné elektróny alebo diery). Tieto prevažujúce voľné častice s nábojmi nazývame **väčšinové** (majoritné). To však neznamená, že v danom nevlastnom polovodiči nie sú v menšom počte aj voľné častice s opačným nábojom, tzv. **menšinové** (minoritné).

Z vysvetlenia vyplýva, že v nevlastnom polovodiči je hustota voľných častíc s nábojom daná iba hustotou elektricky aktívnych prímiesí. Táto hustota je stála a nezávisí od teploty. Pre istý druh prímiesí v určitom teplotnom intervale býva mechanizmus nevlastnej elektrickej vodivosti málo závislý od teploty, takže v tomto odbore sú nevlastné polovodiče vhodné na praktické použitie.

## Úlohy

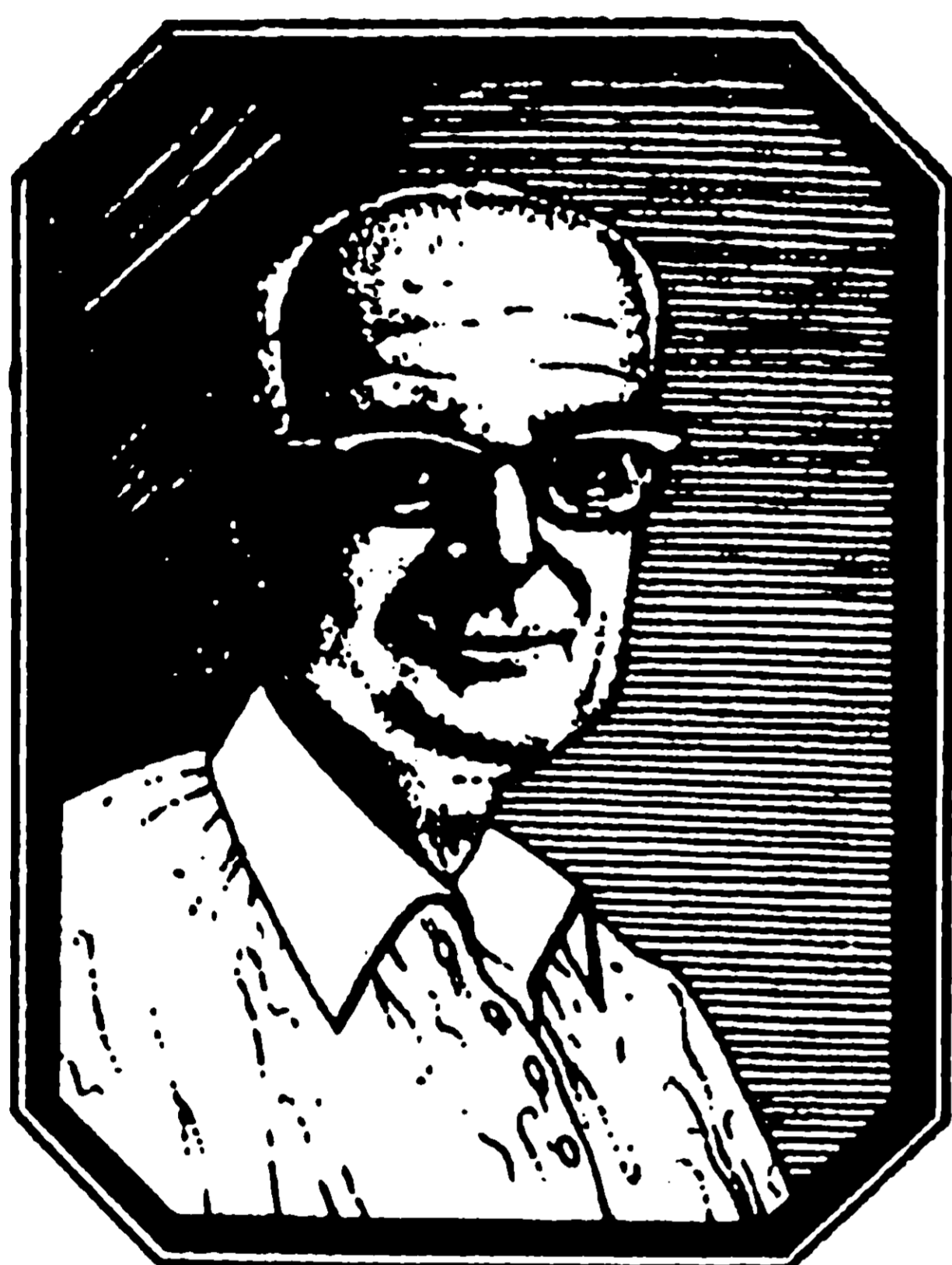
1. Vysvetlite rozdiel medzi vlastným a nevlastným polovodičom.
2. Ktoré voľné častice v polovodičoch typu *P* sú väčšinové a ktoré menšinové? Ako je to pri polovodičoch typu *N*?
3. Na utvorenie páru voľný elektrón — diera v čistom kremíku je potrebná energia asi  $2 \cdot 10^{-19}$  J, kým na uvoľnenie elektrónu prímiesového atómu donoru iba asi  $10^{-21}$  J. Porovnajte hodnoty týchto energií. Ako je možné, že v nevlastných polovodičoch prevláda pri bežnej teplote zvyčajne nevlastná vodivosť, kým pri teplotách oveľa vyšších vlastná vodivosť?
4. Koľkokrát sa zväčší hustota voľných elektrónov v kremíku, ak sa nepatrne znečistí prímiesami päťmocného prvku tak, že na 100 miliónov atómov Si pripadá priemerne jeden atóm prímiesí? Uvažujte o bežnej teplote, pri ktorej sú všetky elektróny donorov už uvoľnené. Hustota voľných elektrónov v čistom kremíku je pri bežnej teplote  $N_e = 6,8 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ . V kremíku s objemom  $1 \text{ m}^3$  je  $5,0 \cdot 10^{28}$  atómov. [Asi  $7,4 \cdot 10^2$ -krát]



## 4.4 Diódový jav a jeho technické využitie

Medzi najdôležitejšie javy v polovodičoch, ktoré sa v praxi veľa využívajú, patria javy prebiehajúce na rozhraní dvoch polovodičov s rozličným typom vodivosti. V mieste rozhrania vzniká prechod *PN*, ktorý sa vyznačuje tým, že má schopnosť usmerňovať — prepúšťa elektrický prúd iba jedným smerom.

Podrobnú teóriu prechodu *PN* vytvoril v roku 1949 americký fyzik W. B. SHOCKLEY (šokly, nar. 1910; obr. 4-6). V tomto období bol realizovaný prechod *PN* v kryštáli germánia a experimentálne bola potvrdená schopnosť usmerňovania.



Obr. 4-6

V. B. Shockley (nar. 1910)

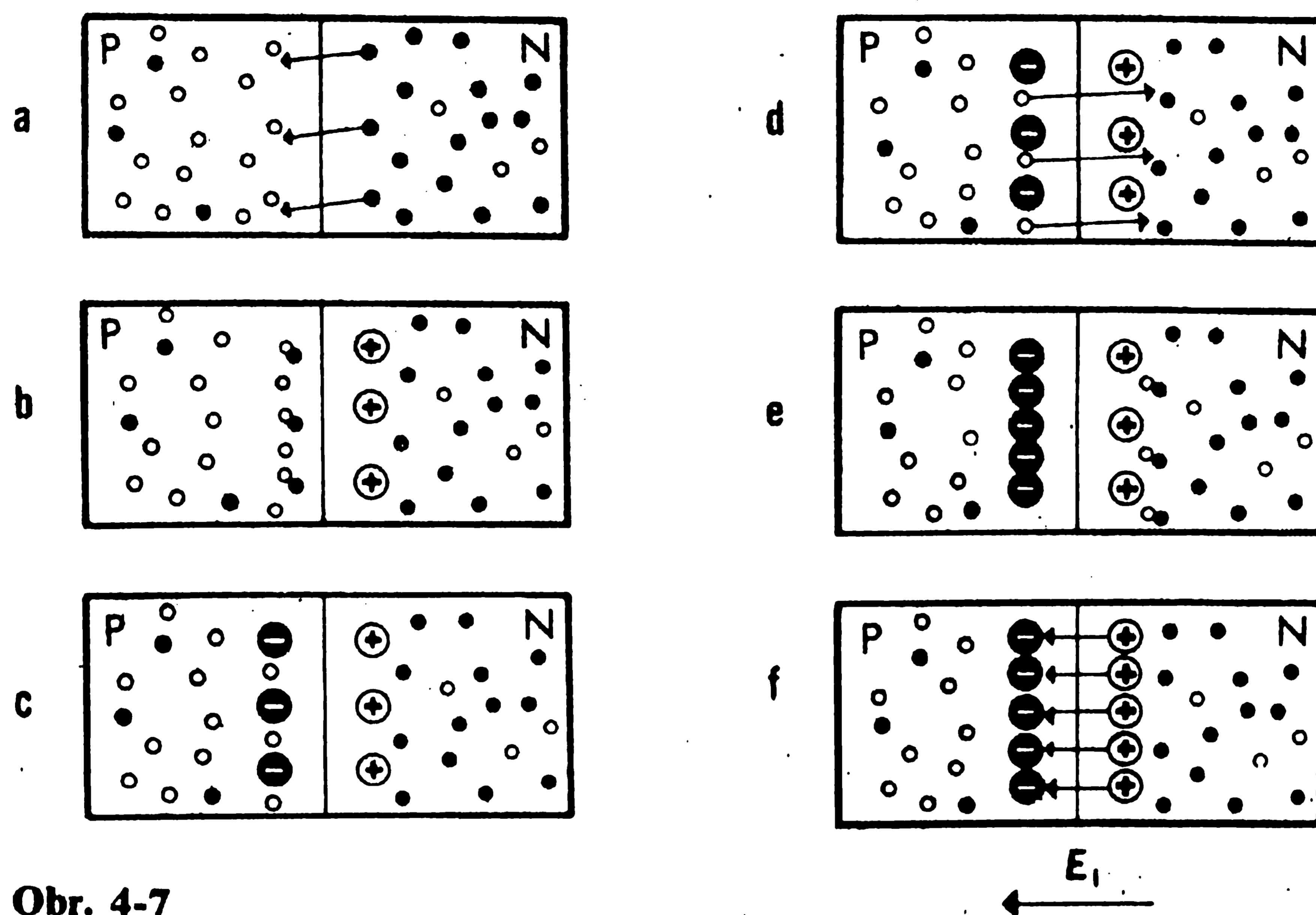
Preskúmame správanie prechodu *PN*, aby sme vysvetlili fyzikálnu podstatu usmerňovania nerovnorodého polovodiča v obvode elektrického prúdu.

Prechod *PN* sa v praxi tvorí v jednom kúsku polovodiča. Pre názornosť si však môžeme predstaviť, že prechod *PN* utvoríme mechanickým stykom polovodiča typu *P* a polovodiča typu *N*, ako je to znázornené na obr. 4-7. Pre prehľadnosť sú v obrázku zakreslené iba voľné elektróny a diery.

Hustota voľných elektrónov a dier je v oboch častiach polovodiča taká rozmanitá, že nutne vzniká difúzia\* voľných elektrónov z polovodiča typu *N* do polovodiča typu *P* a naopak difúzia dier z polovodiča typu *P* do polovodiča typu *N*.

---

\* **Poznámka:** Pre ľahšie vyjadrovanie budeme zjednodušene hovoriť „difúzia voľných častíc z *P* do *N*, z *N* do *P*“, alebo „časť *N*, časť *P*“.



Obr. 4-7

Deje prebiehajúce na prechode *PN*

Pri difúzii voľných elektrónov z *N* do *P* (obr. 4-7a) zostanú v časti *N* v okolí rozhrania nevykompenzované kladné ióny donorov (obr. 4-7b). V časti *P* voľné elektróny rýchlo rekombinujú s dierami, takže v blízkosti rozhrania sa v tejto časti utvoria nevykompenzované záporné ióny akceptorov (obr. 4-7c).

Analogicky prebieha opísaný dej pri difúzii dier z *P* do *N* (obr. 4-7d), takže v okolí rozhrania zostávajú v časti *P* nevykompenzované záporné ióny akceptorov (obr. 4-7e) a v časti *N* nevykompenzované ióny donorov (obr. 4-7f).

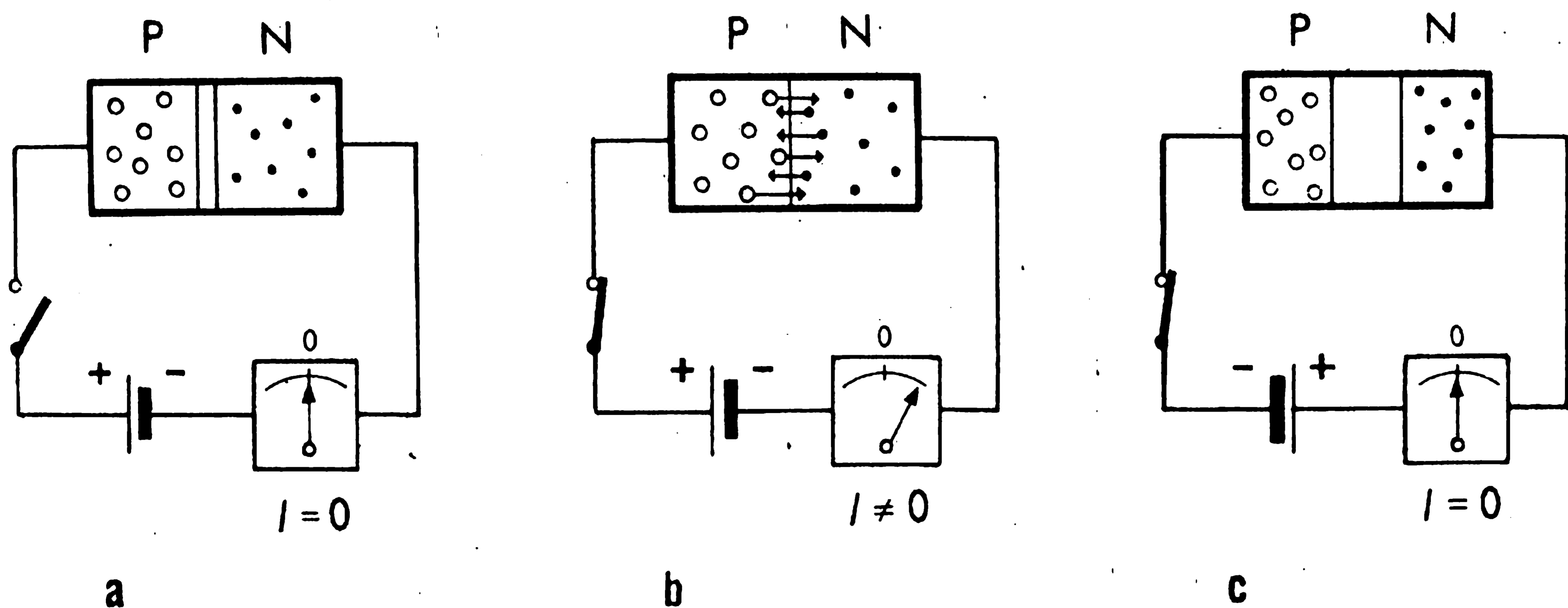
V dôsledku opísaných dejov sa v priestore okolo rozhrania utvára prechod *PN* ako elektrická dvojvrstva s iónmi opačnej polarizácie. Vzniknuté elektrické pole v prechode *PN* zabraňuje ďalšej difúzii väčšinových voľných častíc s nábojom. Pri istej veľkosti elektrickej intenzity tohto poľa (napr. rádovo  $10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ) sa utvorí rovnovážny stav. Oblasť prechodu *PN* je takmer bez voľných nabitých častíc. Preto má veľký elektrický odpor, ktorý rozhoduje o celkovom elektrickom odpore polovodiča.

Okrem väčšinových voľných častíc však existujú v každej časti aj menšinové voľné častice: diery v časti *N* a voľné elektróny v časti *P*. Preto elektrické pole prechodu *PN* spôsobuje prenos týchto menšinových častíc do susednej oblasti. V rovnovážnom stave na prechode *PN* je počet

voľných elektrónov, ktoré prejdú sprava doľava difúziou rovnako ako počet voľných elektrónov, ktoré prejdú zľava doprava vplyvom elektrického poľa. To isté platí pre prenos dier. Preto sa výsledný elektrický prúd na prechode  $PN$  rovná nule.

Zostavme elektrický obvod podľa schémy na obr. 4-8a. Keď kladnú svorku zdroja pripojíme k polovodiču typu  $P$  a zápornú svorku k polovodiču typu  $N$  (obr. 4-8b), potom elektrické pole prechodu  $PN$  je zoslabené elektrickým poľom zdroja napätia. V dôsledku porušenia rovnovážneho stavu difundujú do oblasti prechodu diery zo vzdialenejších miest časti  $P$  a voľné elektróny zo vzdialenejších miest časti  $N$ . To sa prejavuje ako zmenšenie odporu prechodu  $PN$ . Elektrickým obvodom prechádza elektrický prúd, čo dokazuje výchylka ukazovateľa ampérmetra zapojeného v obvode (obr. 4-8b). Hovoríme, že prechod  $PN$  je zapojený v **priepustnom smere** a že ním prechádza **priepustný prúd**.

Keď zameníme polaritu vonkajšieho zdroja napätia (obr. 4-8c), zväčší sa intenzita elektrického poľa prechodu  $PN$ . To vyvolá pohyb väčšinových voľných častíc smerom od rozhrania, takže sa oblasť ochudobnená o voľné častice s nábojom ešte viac rozšíri. Elektrický odpor prechodu  $PN$  sa podstatne zväčší, preto prechodom  $PN$  prechádza veľmi malý prúd vyvolaný iba menšinovými voľnými časticami. O tom sa presvedčíme, keď ampérmeter v zapojení podľa obr. 4-8c nahradíme mikroampérmetrom. V tomto prípade hovoríme, že prechod  $PN$  je zapojený v **závernom smere** a že ním prechádza **záverný prúd**.



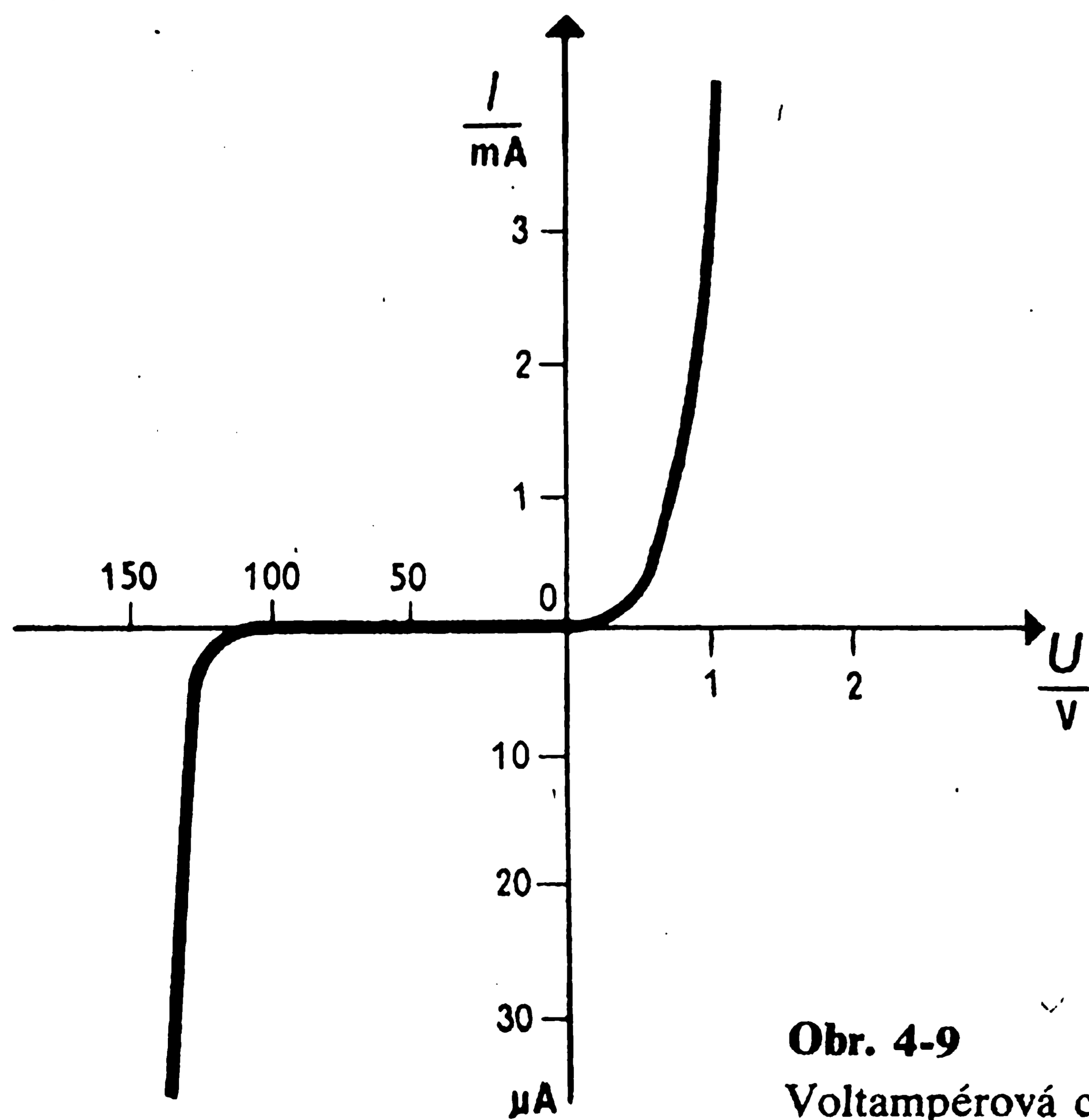
Obr. 4-8

Deje prebiehajúce v polovodičovej dióde pri zapojení rovnomerného zdroja napätia

Pre úplnosť treba doplniť, že ak vonkajšie napätie prekročí istú kritickú hodnotu, danú kvalitou prechodu  $PN$ , nastane lavínovité tvorenie voľných častíc s nábojom. To má za následok prudký pokles elektrického odporu prechodu  $PN$  a tým veľké zväčšenie elektrického prúdu. Tento jav môže spôsobiť prehriatie a tým aj poškodenie prechodu  $PN$ .

Opísaný jav závislosti elektrického odporu polovodiča s prechodom  $PN$  od polarity vonkajšieho zdroja napätia pripojeného k polovodiču, nazýva sa **diódový jav**. Polovodič s prechodom  $PN$  nazývame **polovodičová dióda**.

Praktické využitie polovodičových diód je veľmi rozsiahle. S niektorými príkladmi sa oboznámime v učive o usmerňovaní striedavého prúdu v 3. ročníku. V praxi sa zväčša využíva **nelineárna závislosť prúdu od napätia** v obvode s polovodičovou diódou. Graf závislosti elektrického prúdu prechádzajúceho polovodičovou diódou od napätia na dióde sa nazýva **voltampérová charakteristika polovodičovej diódy** (obr. 4-9). Zvyšovaním napätia na dióde zapojenej v priepustnom smere sa prúd veľmi rýchlo zväčšuje (pozri prvý kvadrant grafu). Dióda sa však môže veľkým prúdom prehriať a poškodiť. Preto sa na diódach označuje maximálna prípustná hodnota priepustného prúdu. Pri zapojení diódy v závernom smere prechádza diódou malý záverný prúd. V grafoch sa často znázorňuje v inej mierke ako priepustný prúd (pozri tretí kvadrant



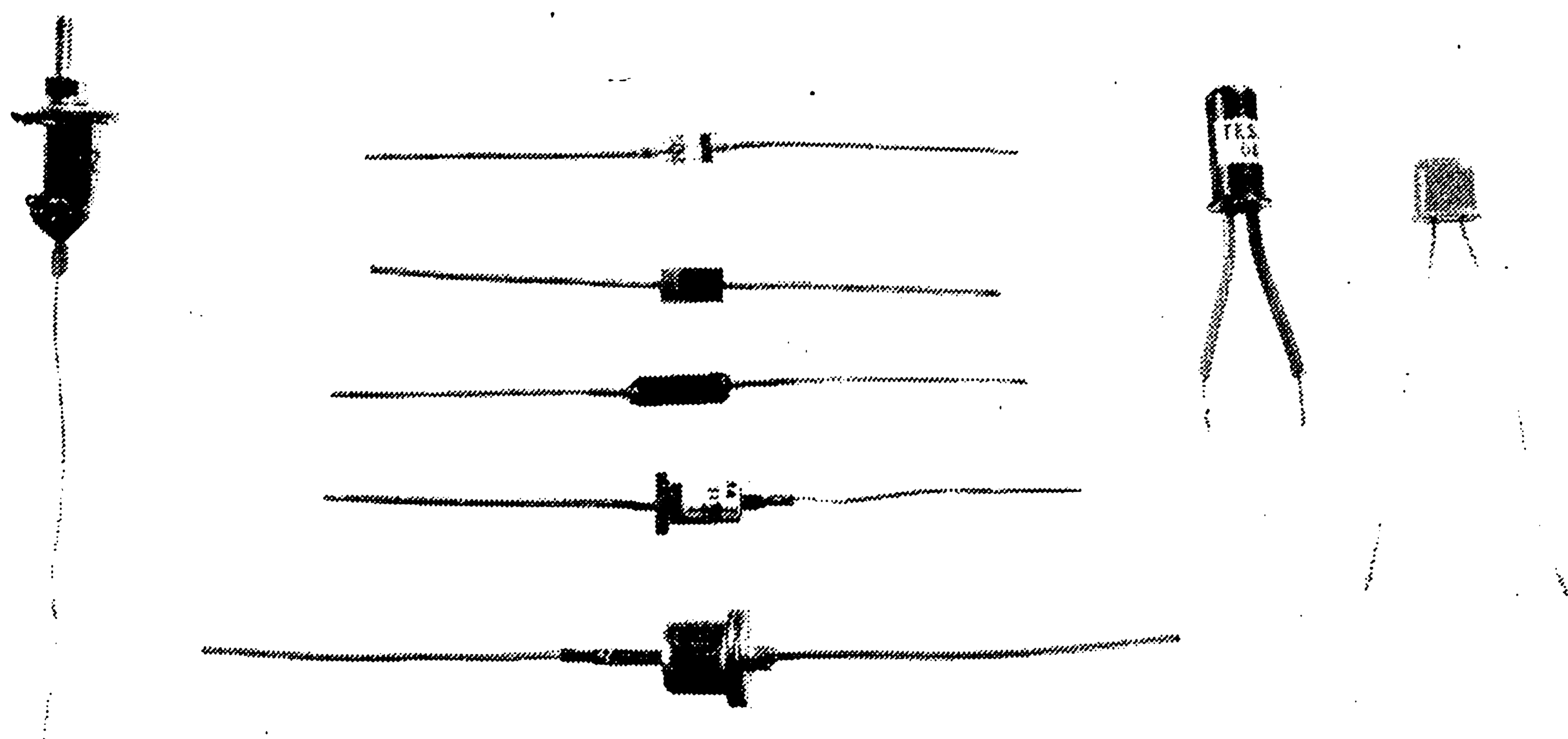
**Obr. 4-9**

Voltampérová charakteristika polovodičovej diódy

grafu). S určením voltampérovej charakteristiky polovodičovej diódy sa podrobnejšie oboznámime v laboratórnom cvičení.

Podstatu diódového javu sme vysvetlili na príklade **plošnej diódy** (obr. 4-10a vľavo a uprostred dole) s plošným prechodom  $PN$ . Práve tieto diódy sa v elektrotechnike najčastejšie používajú. Na usmernenie striedavých prúdov s veľkými hodnotami sa používajú plošné diódy s veľkým obsahom prierezu prechodu  $PN^*$  a musia sa chladiť. Plošné diódy s veľkým výkonom sa používajú napr. na usmerňovanie striedavého prúdu v elektrických lokomotívach. Tým sa značne znižujú prevádzkové náklady, lebo netreba stavať meniarne (v ktorých sa mení striedavý prúd na jednosmerný).

V schémach sa polovodičová dióda zakresľuje značkou na obr. 4-10b. Priepustný smer je označený hrotom trojuholníka.



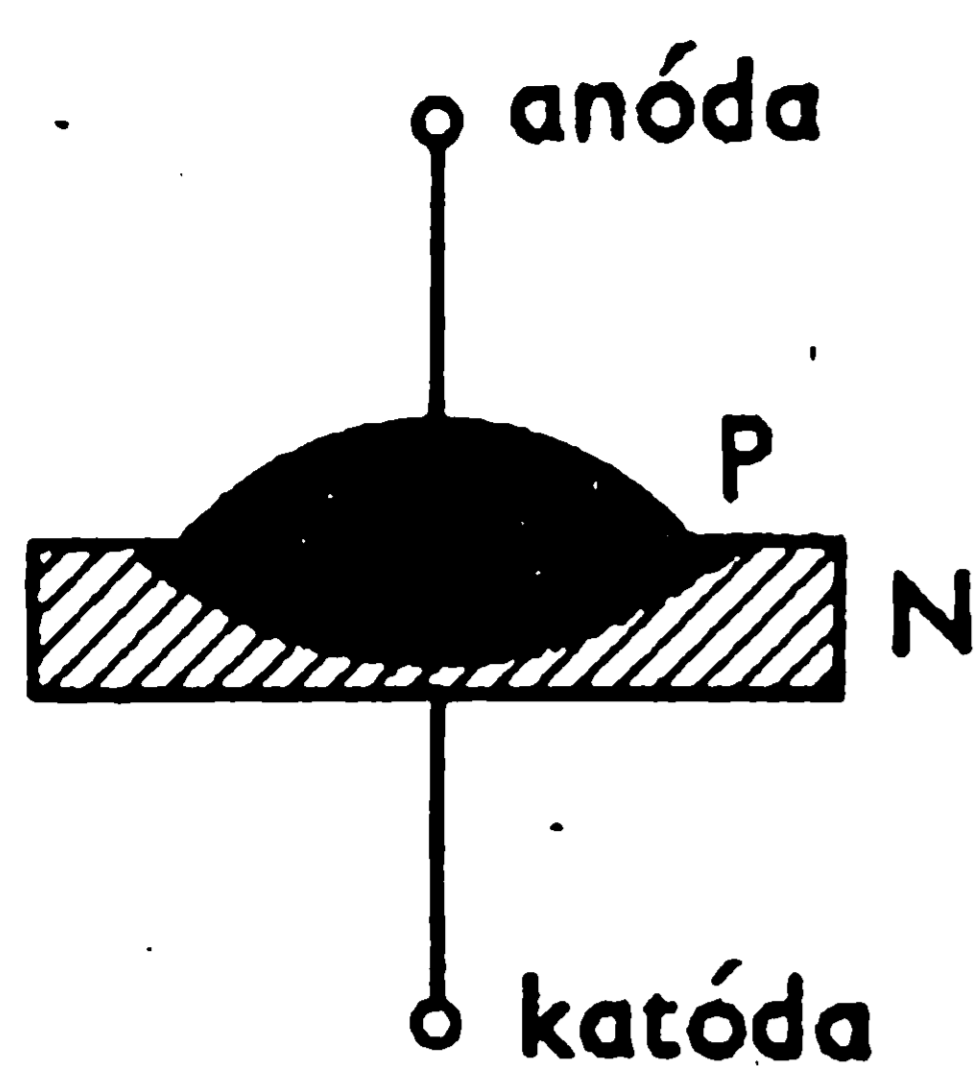
**Obr. 4-10**

a) Rozličné typy polovodičových diód

b) Schematická značka polovodičovej diódy

Existuje niekoľko rozličných technologických postupov výroby plošných prechodov  $PN$ . Napríklad na platničku kremíka (obr. 4-11) s vodivosťou typu  $N$  a hrúbkou asi 0,3 mm sa položí kúsok hliníka. Hliník prenikne do tenkej vrstvy doštičky, kde vyvolá zmenu typu elektrickej vodivosti. Utvorí sa oblasť typu  $P$ . Tak sa v jedinom kryštáli kremíka okrem časti

\* Aj prechod  $PN$  sa dá použiť ako zdroj elektromotorického napätia. Ak prechod  $PN$  osvetlíme svetlom vhodnej frekvencie, tak vznikne elektrický prúd v smere  $N \rightarrow P$ . Jav sa využíva vo fotoelektrických článkoch.



Obr. 4-11  
Polovodičová dióda — prierez

s pôvodnou elektrónovou vodivosťou získa časť s dierovou vodivosťou. Prechod  $PN$  medzi týmito časťami sa utvorí v tých miestach kryštálu kremíka, kde bola hranica medzi kvapalnou a pevnou fázou. Katódový vývod diódy sa pripája ku kryštálu s vodivosťou typu  $N$ , anódový vývod do kryštálu s vodivosťou typu  $P$ .

V praxi sa používajú aj iné typy polovodičových diód, napr. **hrotové diódy** (obr. 4-10 vpravo) s prechodom  $PN$  utvoreným v mieste styku kovového hrotu s polovodičovou platničkou. Hrotové diódy sa používajú zväčša na rádiatechnické a rádiolokačné účely — na premenu vysokofrekvenčných signálov na nízkofrekvenčné alebo rovnomerné signály.

## Úlohy

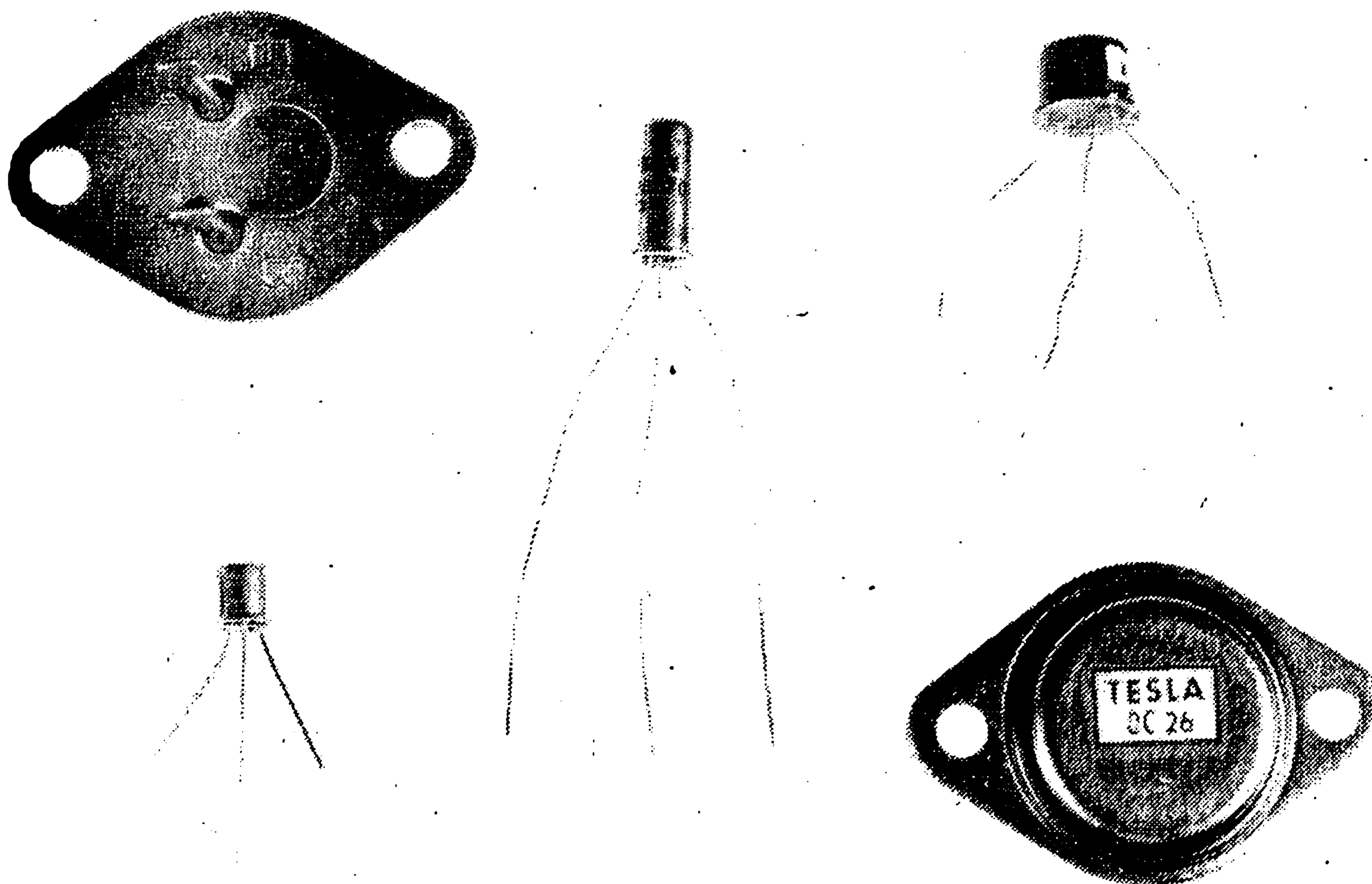
1. Objasnite vznik prechodu  $PN$  a vysvetlite, prečo elektrický odpor prechodu  $PN$  závisí od polaroty pripojeného zdroja rovnomerného napätia.
2. Prečo nie je správny názov nepriepustný smer prechodu  $PN$ ?
3. Ako sa zmení záverný prúd polovodičovou diódou pri jej zahriatí — zvýši sa alebo sa zníži? Odôvodnite svoje tvrdenie.

## 4.5 Tranzistorový jav a jeho technické využitie

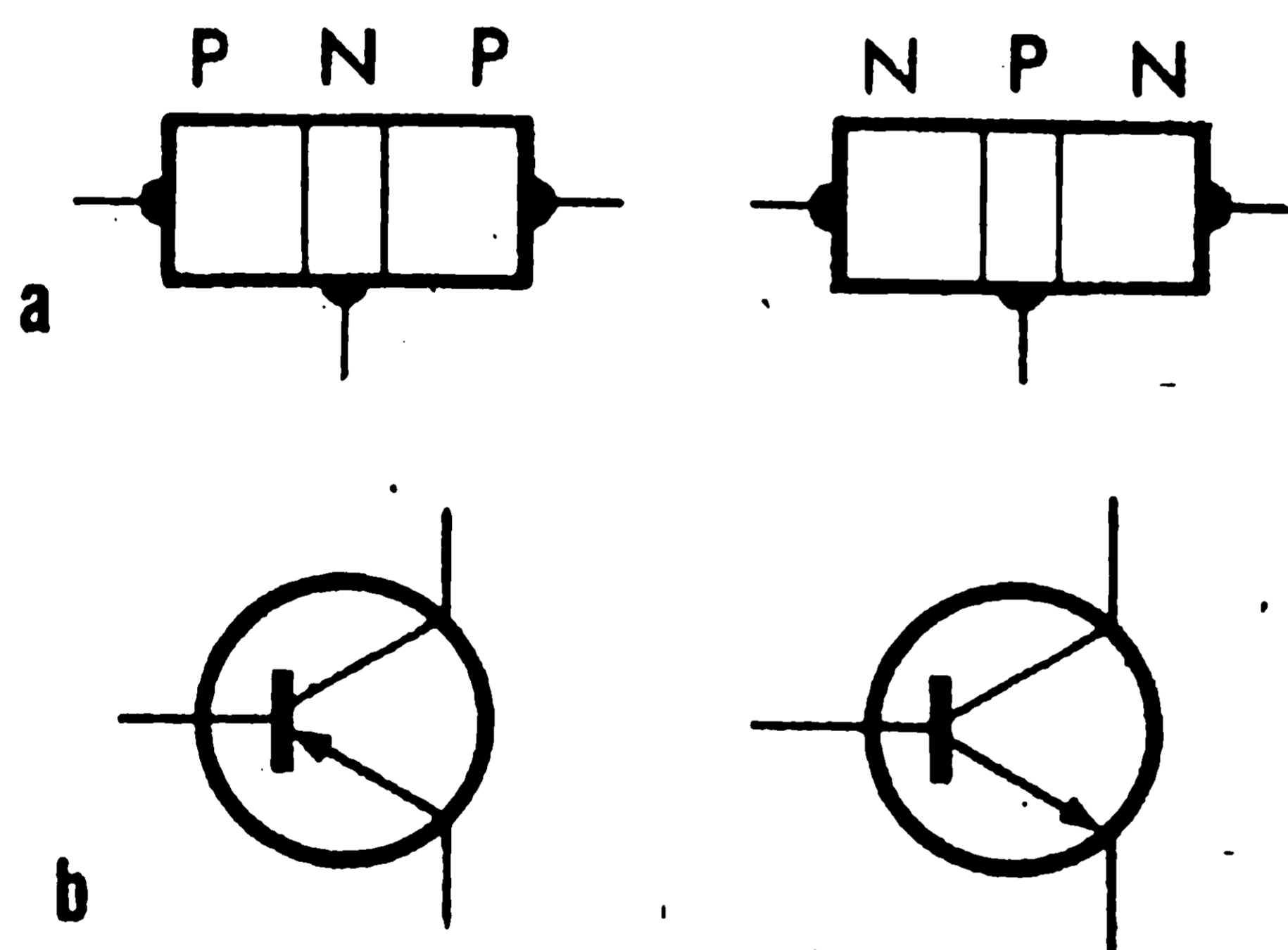
Pre prax má veľký význam ďalšia polovodičová súčiastka — **tranzistor** (obr. 4-12). Je to elektrotechnický prvok, ktorý obsahuje dva prechody  $PN$ . Fyzikálne usporiadanie častí tranzistora a jeho schematická značka sú na obr. 4-13.

V súčasnosti sa používajú zväčša **plošné tranzistory**. Vyrábajú sa tak, že na protiľahlých stenách základnej polovodičovej platničky, napr. z kremíka s vodivosťou typu  $N$  (obr. 4-14), sa utvoria dve oblasti s vodivosťou typu  $P$ . Tak vzniknú v jednom kúsku polovodiča dva prechody  $PN$ .

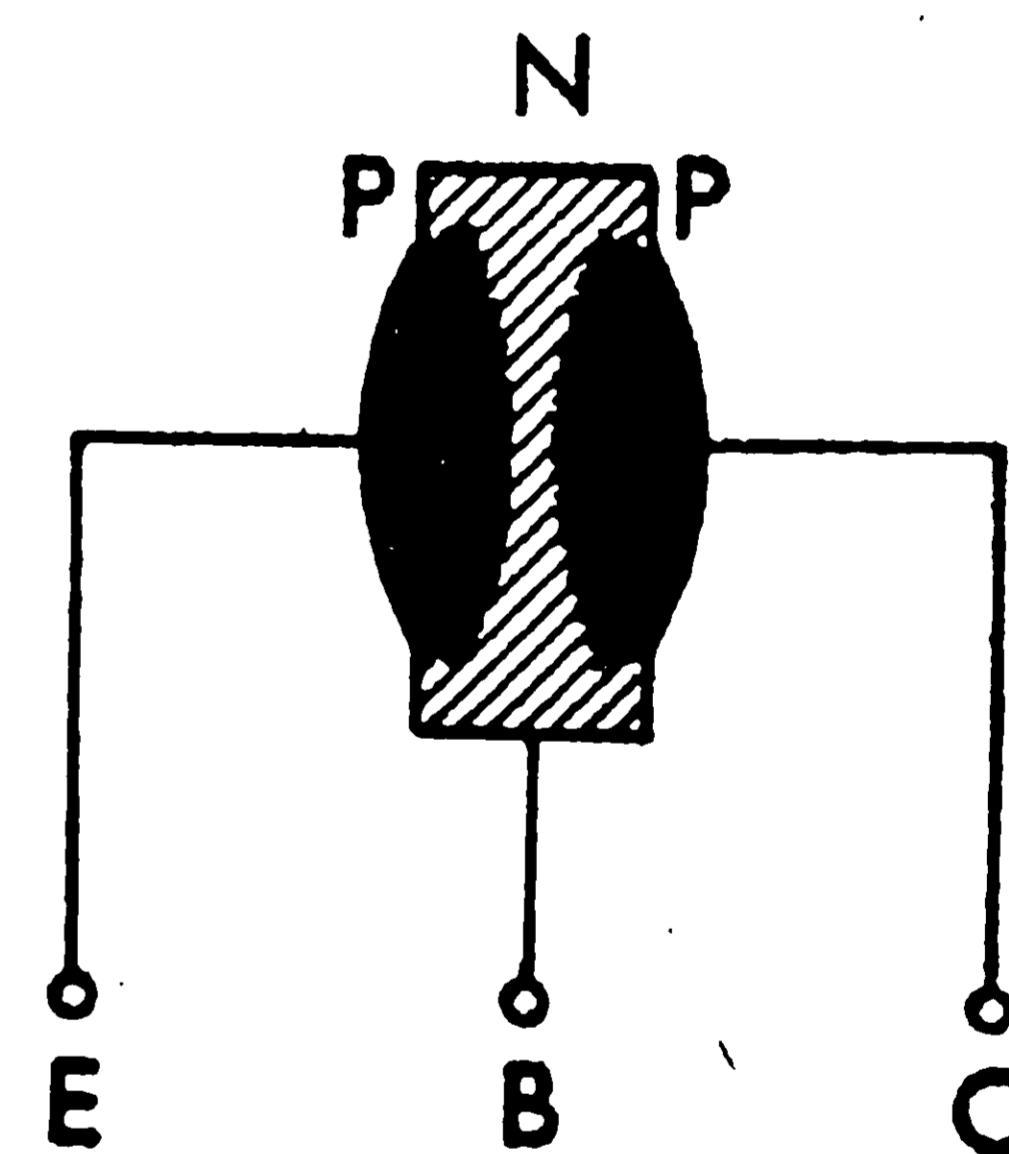
Z fyzikálneho hľadiska je teda tranzistor tvorený kryštálom polovodiča s tromi oblasťami s vodivosťou typu  $P$ ,  $N$  a  $P$ , príp.  $N$ ,  $P$  a  $N$ . Podľa toho hovoríme o tranzistore  $PNP$  alebo  $NPN$  (obr. 4-13). Základná platnička



Obr. 4-12  
Tranzistory

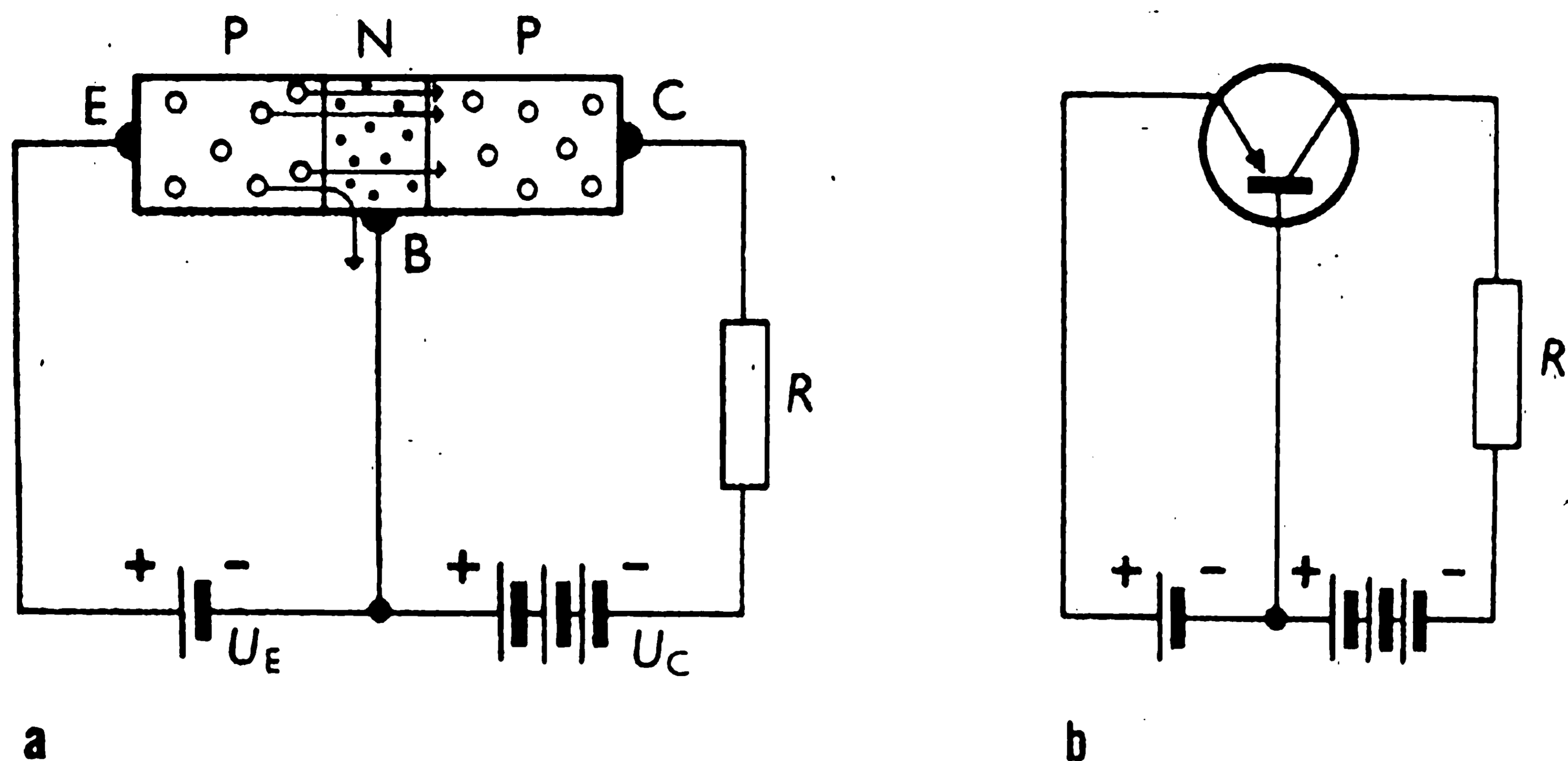


Obr. 4-13  
a) Fyzikálna podstata tranzistora,  
b) schematická značka tranzistora



Obr. 4-14  
Tranzistor — prierez

a teda aj stredná oblasť polovodiča medzi dvoma prechodmi  $PN$  sa nazýva **báza**  $B$  (obr. 4-14 a 4-13), ďalšie dve oblasti **kolektor**  $C$  a **emitor**  $E$ . Báza je v oblasti medzi prechodmi  $PN$  veľmi tenká ( $1-10\mu\text{m}$ ). Rovnakými názvami označujeme prívody, ktorými sa oblasti zapájajú do elektrického obvodu.



Obr. 4-15

Obvody tranzistora (zapojenie so spoločnou bázou)

Jedno z možných zapojení tranzistora (napr. typu PNP), nazvané **zapojenie so spoločnou bázou**, je na obr. 4-15. Má **emitorový a kolektorový obvod**.

Zdroje napätia sú zapojené do obvodu tak, že prechod *PN* medzi emitorom *E* a bázou *B* je zapojený v priepustnom smere, kým prechod medzi bázou *B* a kolektorom *C* v závernom smere. Pri tomto zapojení prechádza emitorom pomerne veľký prúd (napr. niekoľko mA), kým kolektorom by mal prechádzať iba nepatrný záverný prúd (napr.  $10 \mu\text{A}$ ). V skutočnosti je však kolektorový prúd takmer rovnako veľký ako emitorový prúd. Je to tak preto, že oba prechody *PN* sú veľmi blízko pri sebe, takže väčšina dier vstupujúcich z emitora do bázy (v nej sa stávajú menšinovými časticami) difunduje až do blízkosti prechodu *PN* báza — kolektor, kde sú priťahované kolektorom. Takmer všetok emitorový prúd sa tak dostane tenkou bázou do kolektora. Zmena emitorového prúdu vyvolá podobnú zmenu kolektorového prúdu. Kolektorový prúd je teda ovládaný emitorovým prúdom.

Kolektorový prúd býva o niečo menší ako emitorový, lebo niektoré diery, ktoré prechádzajú z emitora do bázy, sa do kolektora nedostanú. V báze rekombinujú, čím prispievajú k prúdu prechádzajúceho prívodom bázy. Prúd bázy je pritom oveľa menší ako kolektorový a emitorový prúd.

Opísané vlastnosti tranzistora, ktoré sú podstatou **tranzistorového javu**, využívajú sa v elektronike na zosilňovanie. Emitorový a rovnako kolektorový prúd možno ovládať nepatrným napätím zdroja zapojeným medzi emitor a bázu. (Napríklad pre kremíkové tranzistory je potrebné napätie

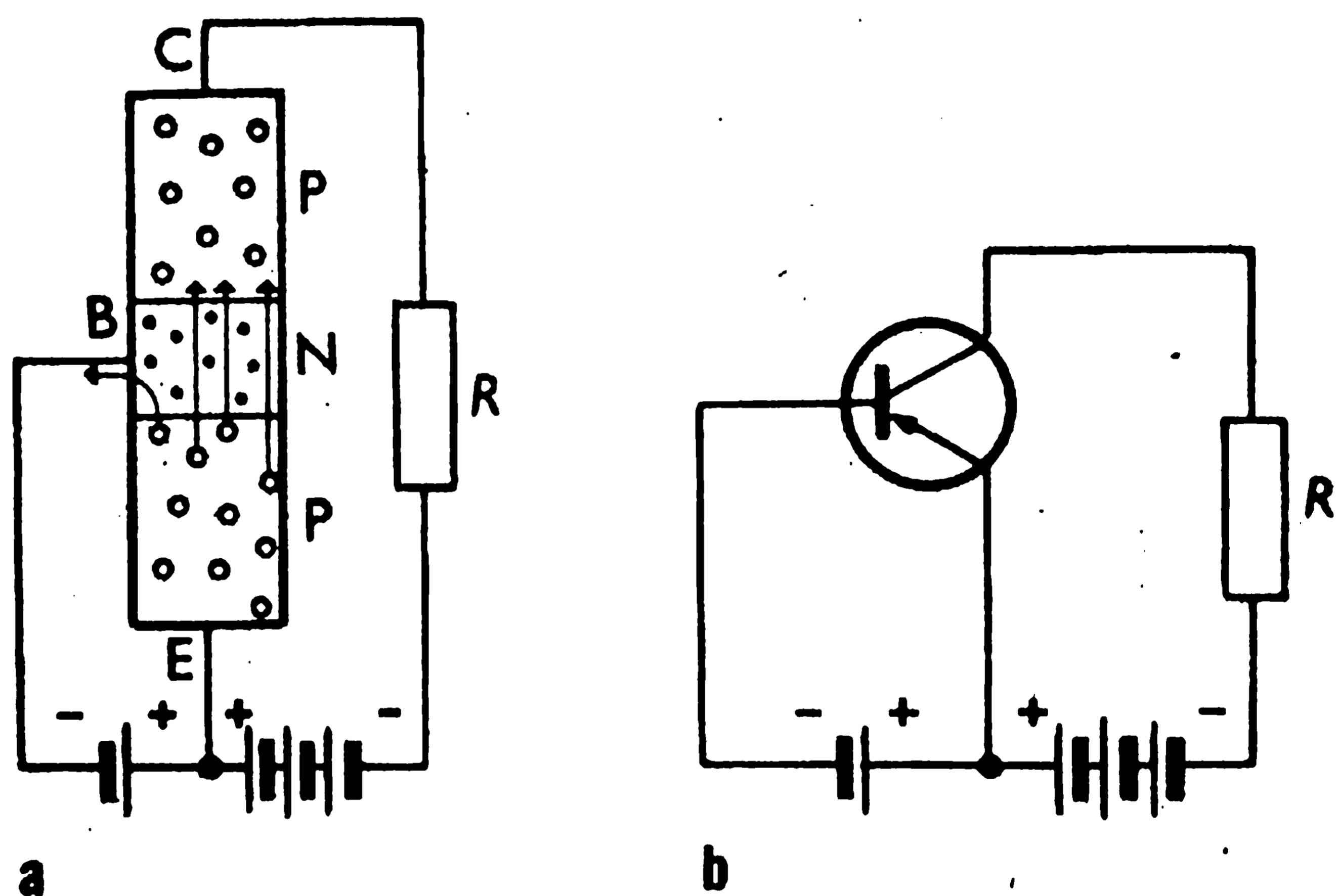


minimálne 0,6 V—0,7 V.) To preto, že prechod *PN* medzi emitorom a bázou je zapojený v priepustnom smere, tak že jeho odpor je malý. Napätie medzi bázou a emitorom býva v praxi premenlivé. Reprezentuje vlastne do tranzistora vstupujúci zosilňovaný signál (napr. z mikrofónu), ktorým sa ovláda kolektorový prúd. Zdroj v kolektorovom obvode máva oveľa vyššie napätie (napr. 10 V), ako je napätie zosilňovaného signálu. Prechod medzi bázou a kolektorom predstavuje vrstvu s veľkým elektrickým odporom. Keď do kolektorového obvodu zaradíme vhodný zaťažovací rezistor s odporom *R* (t. j. s odporom porovnateľným s odporom prechodu *PN*), vznikajú na ňom pri zmenách kolektorového prúdu oveľa väčšie zmeny napätia, ako sú zmeny napätia zosilňovaného signálu. Nastáva zosilnenie napätia.

V elektrotechnických zariadeniach sa tranzistory využívajú zväčša **v zapojení so spoločným emitorom** (obr. 4-16), ktoré je výhodnejšie pri spájaní tranzistorov (napr. pri viacstupňovom zosilňovači). Fyzikálne deje, ktoré prebiehajú v tranzistore pri tomto zapojení, sú analogické ako

Obr. 4-16

Obvody tranzistora (zapojenie so spoločným emitorom)



pri zapojení so spoločnou bázou. Emitorový vstup (prívod) je pre obidva okruhy spoločný. Malým bázovým prúdom  $I_B$  ovládame veľký kolektorový prúd  $I_C$ .

Dôležitým parametrom tranzistora je **prúdový zosilňovací činiteľ  $\beta$**  definovaný vzťahom

$$\beta = \left( \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{U_{CE} = \text{konšt.}}$$

kde  $\Delta I_C$  je zmena kolektorového prúdu a  $\Delta I_B$  zmena bázového prúdu (ktorý zmenu  $\Delta I_C$  vyvolal) pri konštantnom napätí  $U_{CE}$  medzi kolektorom a emitorom. Parameter  $\beta$  dosahuje v praxi hodnotu okolo 100.

Vlastnosti tranzistora však nemožno celkom vyjadriť jedným parametrom, dokonca ani niekoľkými parametrami. Preto sa na opis vlastností tranzistora používajú **charakteristiky tranzistorov**. Jednou charakteristikou pri zapojení tranzistora so spoločným emitorom je napr. závislosť kolektorového prúdu  $I_C$  od bázového prúdu  $I_B$  pri konštantnom napätí  $U_{CE}$  medzi kolektorom a emitorom. To je tzv. **prevodová charakteristika tranzistora**. S charakteristikami tranzistorov sa podrobnejšie budete zaoberať v 3. ročníku.

Tretím používaným zapojením tranzistora, je zapojenie so spoločným kolektorom.

### Historická poznámka

Zosilňovací jav v polovodičoch alebo tranzistorový jav objavili roku 1948 americkí vedci JOHN BARDEEN (bardýn, nar. 1908) a W. H. BRATTAIN (bretejn, nar. 1902), keď skúmali vlastnosti povrchu germániových kryštálov pomocou hrotov. Zistili, že prúd v hrotovom usmerňovači možno ovplyvniť pomocou druhého blízkeho hrotu, ak ním prechádza prúd v priepustnom smere. Tak vznikol hrotový tranzistor — prvý typ tranzistora vôbec.

Objav tranzistora spôsobil veľký záujem o pevné látky. Vznikol samostatný odbor fyziky — fyzika pevných látok.

Diódový jav bol známy dávno pred objavením tranzistora. Využíval sa už pri najjednoduchšom rádioprijímači — kryštálke. V tomto rádioprijímači mal polovodičový kryštál (preto názov kryštálka) a kovový hrot funkciu detektora (v podstate usmerňovača). Jeho fyzikálna podstata však vtedy ešte nebola známa.

## Úlohy

1. Prečo býva báza tranzistora tenká?
2. Prečo treba dbať na to, aby sa prevádzková teplota tranzistora v elektronických prístrojoch príliš nemenila?
3. Tranzistory majú na zosilňovanie väčších výkonov chladiace platničky, na ktoré je tranzistor pripevnený. Vysvetlite ich význam a funkciu a navrhnete vhodný materiál.
4. Bázový prúd tranzistora zapojeného so spoločným emitorom je  $I_B = 30 \mu\text{A}$ , kolektorový prúd  $I_C = 2,0 \text{ mA}$ . Určte kolektorový prúd  $I_C$  pri bázovom prúde  $100 \mu\text{A}$ , ak prúdový zosilňovací činiteľ tranzistora v danej oblasti prúdov má hodnotu 60. Aký bude v tomto prípade emitorový prúd? [ $I_C = 6,2 \text{ mA}$ ;  $I_E = I_C + I_B = 6,3 \text{ mA}$ ]
5. Tranzistorom, ktorý pracuje v zapojení so spoločným emitorom, prechádzajú prúdy: bázový  $20 \mu\text{A}$ , kolektorový  $2,0 \text{ mA}$ . Napätie medzi bázou a emitorom je  $0,7 \text{ V}$ , napätie medzi kolektorom a emitorom je  $20 \text{ V}$ . Vypočítajte výkony zdrojov v oboch obvodoch a porovnajte ich. [ $14 \mu\text{W}$ ;  $40 \text{ mW}$ ;  $2,9 \cdot 10^3$ -krát]



**Obr. 4-17**  
Obsluha kontaktovacieho zariadenia na zapájanie integrovaného  
nízkofrekvenčného zosilňovača

## 4.6 Prednosti a perspektívy polovodičovej techniky. Integrované obvody

Vzhľadom na to, že polovodičové súčiastky v porovnaní s elektrónkami majú veľmi veľa výhod, ich využitie v technickej praxi sa ustavične zvyšuje. Elektrónky vo veľkej miere nahradili polovodičové diódy a tranzistory. Sú spoľahlivejšie, mechanicky odolnejšie, majú menšie rozmery a z hľadiska materiálu aj energie sú úspornejšie. Na rozdiel od elektrónok nepotrebujú žeravenie. Ich veľkou výhodou je aj to, že môžu pracovať pri nižších napätiach, čo je dôležité najmä pri prenosových zariadeniach. Elektrónky sú zatiaľ nenahraditeľné iba v niektorých špeciálnych prípadoch, napr. ako výkonové vysielacie alebo obrazové elektrónky.

Utvorením polovodičových diód a tranzistorov sa vývoj polovodičových prvkov nezastavil. V polovodičovej technike sa prišlo k ďalšej miniaturizácii. Od individuálnych prvkov sa prichádza k **integrovaným obvodom** (pozri úvodnú fotografiu a obr. 4.-17). V jednom kúsku polovodiča (zvyčajne kremíka) s objemom niekoľko  $\text{mm}^3$  sa zložitou technológiou utvorí veľký počet navzájom spojených elektrotechnických prvkov, ktoré spolu tvoria samostatný elektronický systém. Môže to byť napr. niekoľkostupňový zosilňovač alebo samostatný elektronický systém pre počítač. Z celého integrovaného obvodu sa vyvedú von iba vstupy a výstupy. Na platničke kremíka sa utvoria jednak pasívne prvky, akými sú napr. rezistory, kondenzátory, vodivé spoje, jednak aktívne prvky, ako sú polovodičové diódy a tranzistory.

Všetky súčiastky daného integrovaného obvodu sú v jednom pevnom bloku, čo značne zvyšuje spoľahlivosť zariadenia, znižuje sa poruchovosť a zmenšujú rozmery. To je dôležité najmä pri počítačoch obsahujúcich obrovský počet elektronických prvkov. S miniaturizáciou úzko súvisia aj úspory materiálu a energie.

Súčasná úroveň miniaturizácie je pomerne vysoká. Na polovodič s objemom  $1 \text{ mm}^3$  pripadá niekoľko desiatok až sto elektronických súčiastok. Táto hranica však vôbec nie je prekonaná. Dokazujú to nepriamo živé organizmy, u ktorých je miniaturizácia kybernetických systémov (napr. mozgu) ešte výraznejšia. Elektronické prvky utvorené človekom sú však v porovnaní s biologickými oveľa rýchlejšie.

Mimoriadnou náročnosťou sa vyznačuje najmä technológia integrovaných obvodov, v ktorých je hustota elektronických prvkov veľmi veľká. Používajú sa tzv. masky, ktoré sa zhotovujú zmenšením väčšej predlohy. Pomocou masiek sa optickou cestou tvoria malé „okienka“ do krycích vrstiev nanesených na kremík a cez ne sa uskutočňuje difúzia prímiesi do polovodiča. Podobne sa robia aj vodivé spoje a izolačné vrstvy, a to naparovaním tenkých vrstiev. Pri výrobe integrovaných obvodov sa musí použiť viac masiek. Na jednej kremíkovej kruhovej platničke s priemerom asi 2 cm až 3 cm a hrúbkou asi 1 mm sa utvára súčasne niekoľko sto až tisíc integrovaných obvodov. Náročnosť takejto technológie je mimoriadne veľká.

Integrované obvody výrazne zefektívňujú výrobu elektronických zariadení. Predstavujú novú etapu polovodičovej techniky. Preto sa im u nás aj vo svete venuje veľká pozornosť.

## ZHRNUTIE — ELEKTRICKÝ PRÚD V POLOVODIČOCH

Typickým znakom polovodičov je, že ich merný elektrický odpor so zvyšovaním teploty rýchlo klesá. Je to dôsledok veľkého zväčšovania hustoty voľných elektrónov so zvyšujúcou sa teplotou.

Polovodiče rozdeľujeme na **vlastné** a **nevlastné** (prímesové) **polovodiče**. Vo vlastných polovodičoch je elektrická vodivosť sprostredkovaná jednak voľnými elektrónmi, jednak dierami. Nevlastné polovodiče sa rozdeľujú na **polovodiče typu N** s elektrónovou vodivosťou a **polovodiče typu P** s dierovou vodivosťou. Pri nevlastných polovodičoch sprostredkúva elektrický prúd väčšinou iba jeden typ voľných nabitých častíc.

Na rozhraní dvoch polovodičov s rozličným typom vodivosti sa utvára **prechod PN**, ktorý má usmerňujúce vlastnosti. To sa využíva pri **polovodičovej dióde**, ktorá môže byť zapojená v **prlepustnom** alebo **závernom smere**.

Graf závislosti elektrického prúdu prechádzajúceho polovodičovou diódou od napätia na dióde sa nazýva **voltampérová charakteristika polovodičovej diódy**.

**Tranzistor** je polovodičová súčiastka s dvoma prechodmi **PN** spojenými za sebou. Môže byť typu **PNP** alebo **NPN**. Skladá sa z **bázy**, **emitora** a **kolektora**. Tranzistor sa používa na zosilňovanie. Zvyčajne sa **zapája so spoločným emitorom**.

Dôležitým parametrom tranzistora je **prúdový zosilňovací činiteľ**

$$\beta = \left( \frac{\Delta I_c}{\Delta I_B} \right)_{U_{CE} = \text{konšt.}}$$

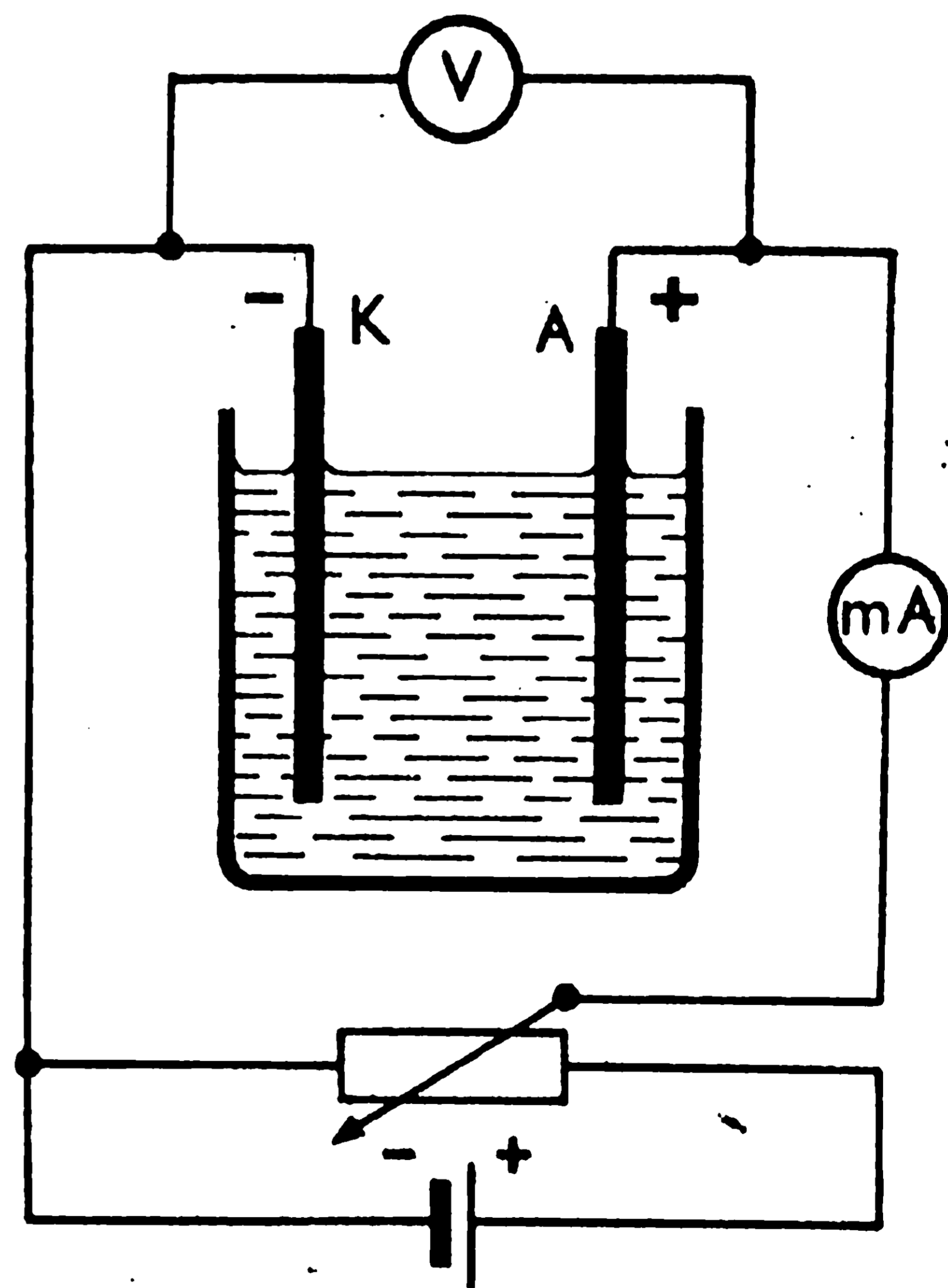


## 5. Elektrický prúd v elektrolytoch

Z predchádzajúcich statí vieme, že elektrický prúd v kovoch je sprostredkovaný vodivostnými elektrónmi a v polovodičoch voľnými elektrónmi a dierami. Ďalej sa v nadväznosti na poznatky zo základnej školy zameriame na elektrickú vodivosť kvapalín a ich praktické využitie.

### 5.1 Elektrolytický vodič

Urobme pokus podľa obr. 5-1. Do nádoby s destilovanou vodou sú vložené dve elektródy a zapojené na zdroj jednosmerného napätia. Miliampérmeter neukazuje žiadnu výchylku. Destilovaná voda nevedie elektrický prúd. Po pridaní kuchynskej soli do vody miliampérmeter ukáže výchylku. Vodným roztokom chloridu sodného prechádza elektrický prúd, lebo tento roztok obsahuje voľné častice s nábojom — kladné ióny  $\text{Na}^+$  a záporné ióny  $\text{Cl}^-$ .



Obr. 5-1

Schéma zapojenia elektrického obvodu pre elektrolýzu

V kvapalinách sprostredkujú elektrický prúd voľne pohyblivé kladné a záporné ióny (katióny a anióny). Vznik voľných iónov rozpadom rozpustenej látky v rozpúšťadle nazývame **elektrolytická disociácia**.

Vodivé roztoky nazývame **elektrolyty**. Všeobecne vznikajú rozpúšťaním iónovej zlúčeniny v nejakom rozpúšťadle. Elektrolytmi sú napr. vodné roztoky solí (napr. NaCl, KCl), kyselín (napr. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>) a zásad (napr. KOH, NaOH). Ióny spolu s molekulami rozpúšťadla vykonávajú ustavičný neusporiadaný pohyb.

Keď do elektrolytu vložíme dve elektródy a zapojíme ich na svorky zdroja jednosmerného napätia, vznikne medzi elektródami vnútri elektrolytu elektrické pole, ktoré vyvolá usmernený pohyb iónov v roztoku. Katióny sa začnú pohybovať ku **katóde** (elektróde zapojenej na zápornú svorku zdroja) a anióny k **anóde** (elektróde zapojenej na kladnú svorku zdroja). S prenosom náboja nastáva aj prenos látky.

Usporiadaný pohyb iónov v elektrickom poli medzi elektródami tvorí elektrický prúd v elektrolyte. Podľa dohody je smer prúdu určený smerom pohybu kladných iónov.

## Úlohy

1. Prečo v kovových vodičoch pri prechode elektrického prúdu nepozorujeme prenos látky, kým v kvapalinách áno?
2. Vysvetlite vedenie elektrického prúdu v elektrickom obvode, ktorý obsahuje elektrolyt a kovové časti obvodu.
3. Ako vo vodnom roztoku disociuje: kyselina sírová, chlorid amonný, hydroxid draselný, síran meďnatý?

## 5.2 Závislosť prúdu v elektrolyte od napätia

Pri pokusoch s elektrickým prúdom v elektrolytoch použijeme zapojenie podľa schémy na obr. 5-1. V nádobe je slabý roztok kyseliny sírovej, elektródy sú platinové. Prúd meriame miliampérmetrom. Len čo na elektródy zapojíme malé napätie, miliampérmeter zaznamená malý prúd, ktorý rýchlo zanikne. Pri pomalom zvyšovaní napätia sa jav vždy opakuje, t. j. začiatkový prúd vždy zanikne. Trvalý prúd vzniká, keď prekročíme isté medzné napätie  $U_r$  nazvané **rozkladné napätie**. Potom sa prúd s napätím lineárne zväčšuje.

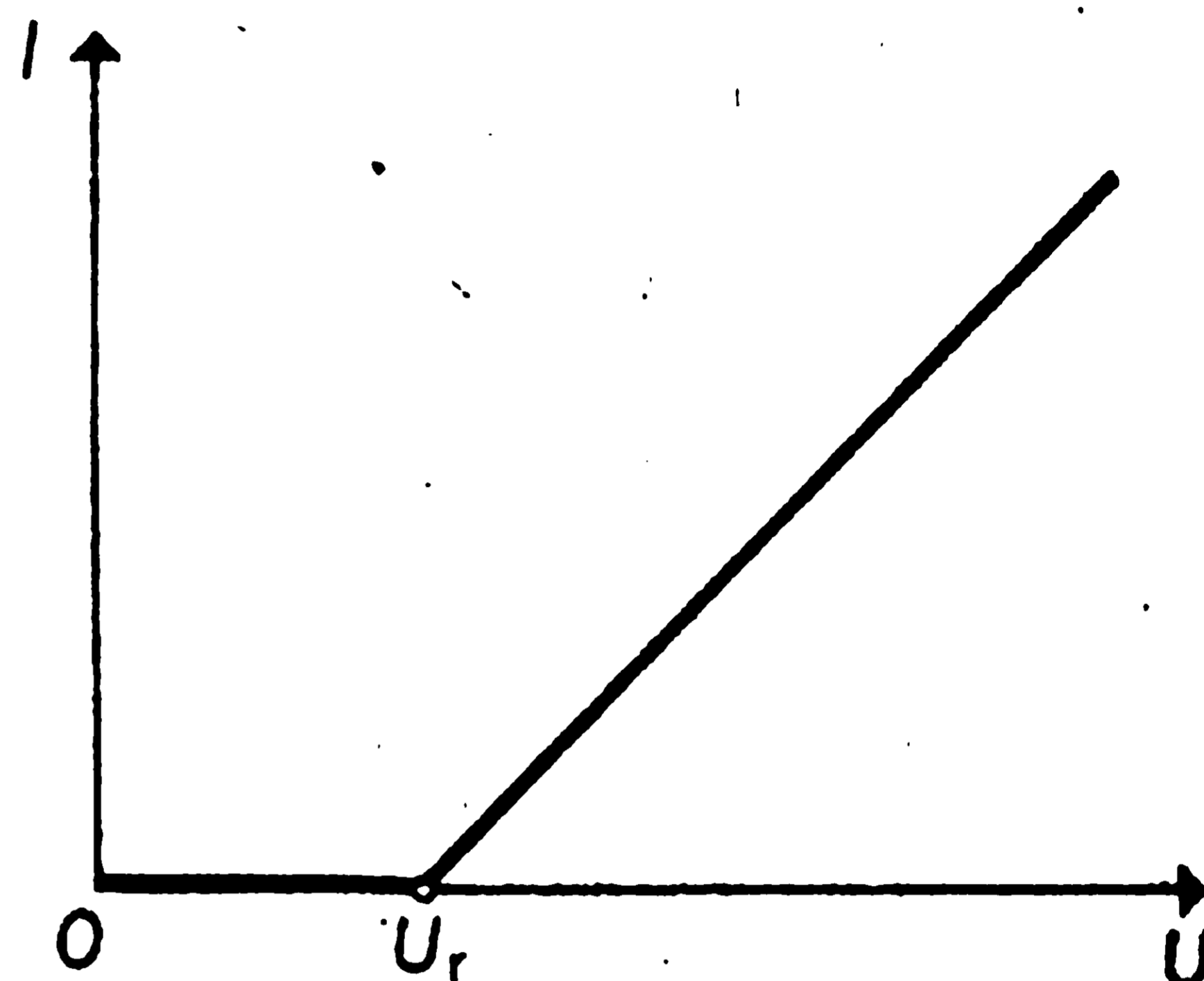


Priebeh prúdu  $I$  v závislosti od napätia  $U$  je graficky znázornený na obr. 5-2. Pre napätie  $U$  od 0 V do  $U_r$  platí  $I = 0$  A. Pre  $U$  väčšie ako  $U_r$  je prúd lineárnou funkciou napätia, takže platí

$$I = \frac{U - U_r}{R} \quad (5.1)$$

**Obr. 5-2**

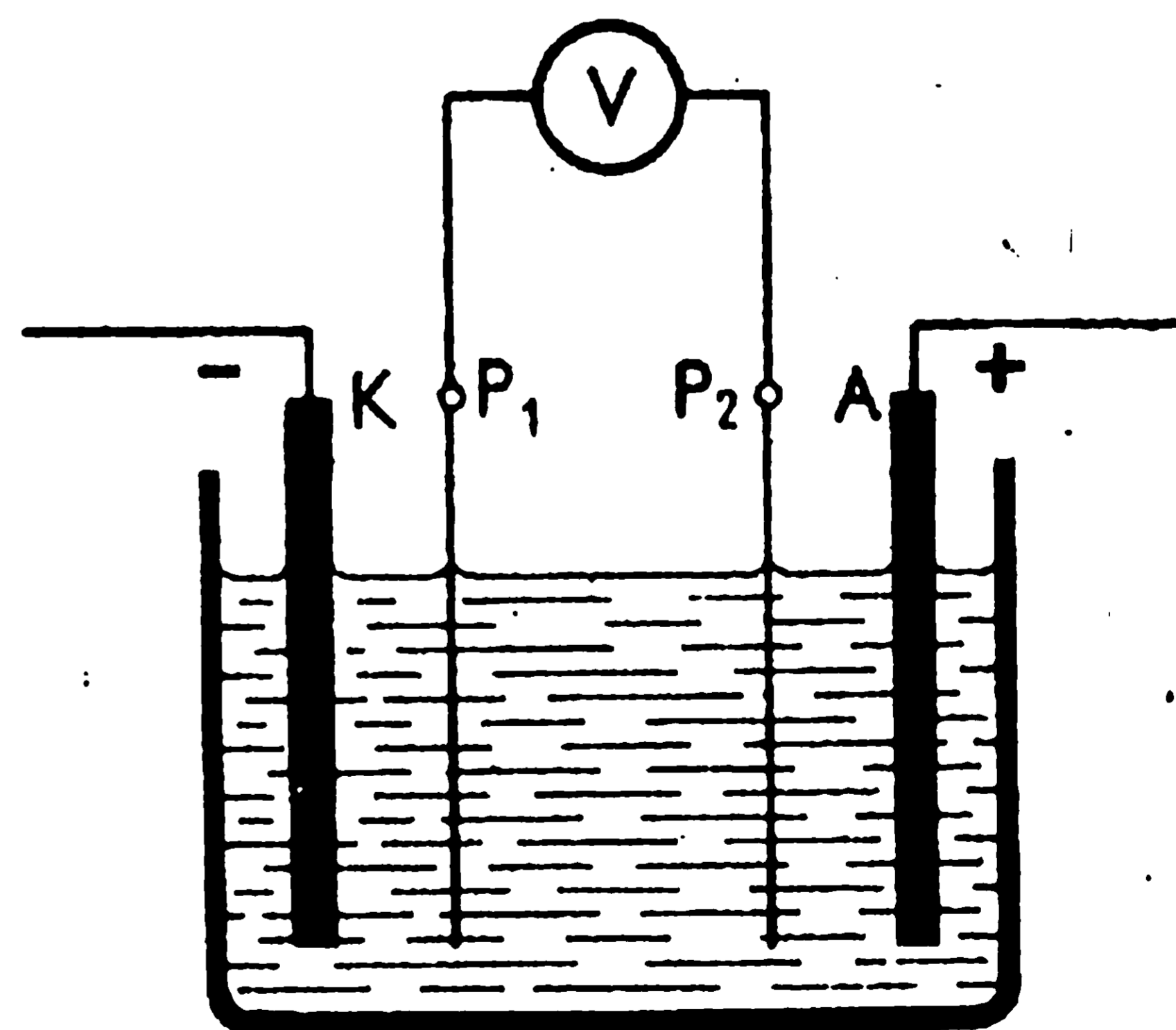
Graf závislosti elektrického prúdu od elektrického napätia pre elektrolyt



kde  $R$  je za stálej teploty konštanta a nazýva sa **odpor elektrolytu**. So zvyšovaním teploty klesá viskozita rozpúšťadla, čím sa znižujú sily, ktoré brzdia pohyb iónov. Ióny sa v elektrickom poli pohybujú rýchlejšie, preto je elektrický prúd (pri rovnakom napätí medzi elektródami) väčší.

Vzťah (5.1) sa odlišuje od Ohmovho zákona pre kovy členom  $U_r$ . No za istých podmienok platí aj pre elektrolyty Ohmov zákon v tvare  $U = R I$ . Presvedčíme sa o tom pokusom:

Do roztoku v nádobe (podľa obr. 5-1) ponoríme medzi anódu a katódu dve pomocné elektródy  $P_1$  a  $P_2$  (obr. 5-3) z rovnakého materiálu (napr. platinové drôtičky). Pripojený citlivý voltmeter ukáže napätie až vtedy, keď elektrolytom prechádza prúd. Napätie medzi



**Obr. 5-3**

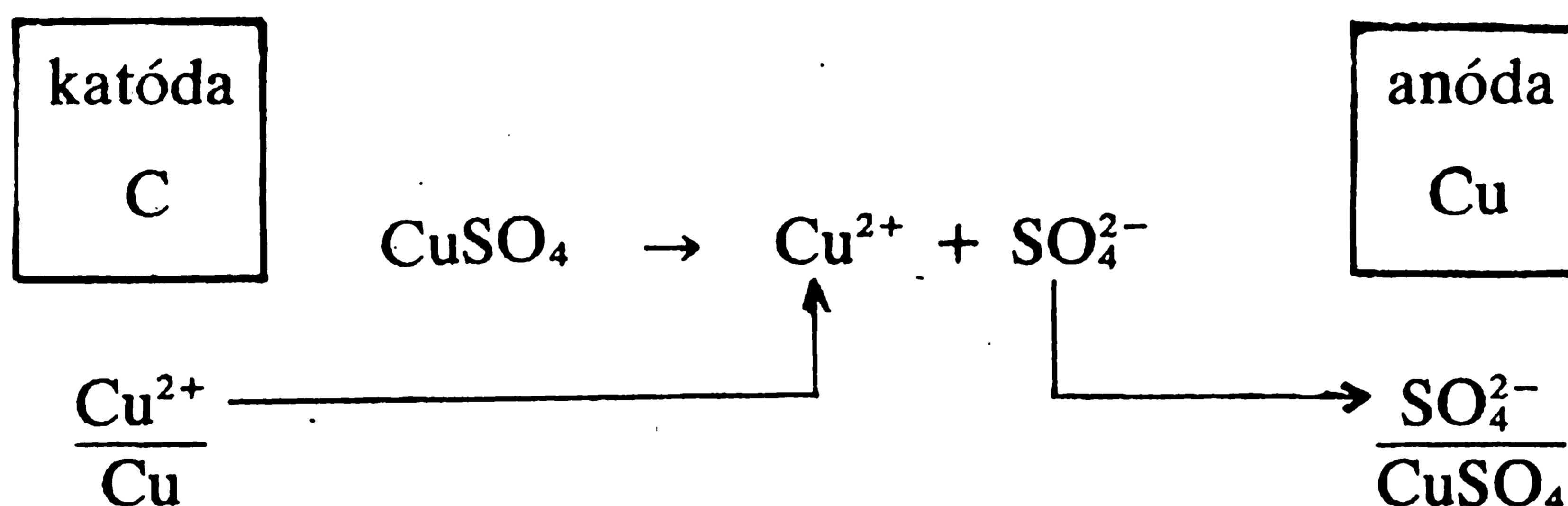
Schéma demonštrácie platnosti Ohmovho zákona pre elektrolyty

pomocnými elektródami sa zväčšuje priamo úmerne s prúdom, čo dokazuje platnosť vzťahu  $U = R I$ .

Pôvod člena  $U_r$  vo vzťahu (5-1) súvisí s chemickými dejmi, ktoré prebiehajú na elektródach (ako spoznáme v stati 5-4).

### 5.3 Faradayove zákony elektrolýzy

**Pokus 1:** Do vodného roztoku modrej skalice ( $\text{CuSO}_4$ ) ponoríme medenú anódu a uhlíkovú katódu. Roztokom necháme prechádzať elektrický prúd. Proces, ktorý prebehne je znázornený na nasledujúcej schéme:



Katióny medi  $\text{Cu}^{2+}$  sa prijímajú na katóde, elektróny sa vylučujú ako atómy medi a tvoria na katóde medený povlak. Anióny  $\text{SO}_4^{2-}$  reagujú s materiálom anódy a tvoria nové molekuly  $\text{CuSO}_4$ . Na anóde sa teda z roztoku nič nevylučuje, naopak meď z anódy prechádza do roztoku.

**Pokus 2:** Opakujme pokus 1, ale s použitím platinových elektród. Aj v tomto prípade sa na katóde vylučuje meď. Anióny  $\text{SO}_4^{2-}$  reagujú s vodou za vzniku kyseliny sírovej  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Na anóde sa vylučuje plynný kyslík.

**Pokus 3:** Pri treťom pokuse použijeme roztok  $\text{HCl}$  a platinové elektródy. Na katóde sa vylúči vodík, na anóde chlór, ktorý reaguje s vodou a vylúči sa kyslík.

Z výsledkov pokusov vyplýva: Usporiadáný pohyb iónov v elektrolyte sa končí na elektródach, kde ióny odovzdávajú náboje a vylučujú sa na povrchu elektród ako atómy alebo molekuly, alebo chemicky reagujú s materiálom elektródy, alebo s elektrolytom. Dej, pri ktorom prechodom elektrického prúdu elektrolytom nastávajú látkové zmeny, nazýva sa **elektrolýza**.

**Pri elektrolýze sa na katóde vždy vylučuje vodík alebo kov. Výsledky elektrolýzy daného roztoku závisia od materiálu, z ktorého sú elektródy.**

**Obr. 5-4**

M. Faraday (1791—1867)



Vedenie elektrického prúdu v elektrolytoch študoval anglický fyzik M. FARADAY (feredi, 1791—1867; obr. 5-4). Na základe pokusov zistil, že **hmotnosti látok vylúčených na elektródach sú priamo úmerné celkovému elektrickému náboju, ktorý preniesli pri elektrolýze ióny (1. Faradayov zákon)**. Tento experimentálne získaný poznatok vyjadríme pre každú látku vzťahom

$$m = A Q = A I \Delta t \quad (5.2)$$

Veličina  $A$  sa nazýva **elektrochemický ekvivalent látky**; pre danú látku je to charakteristická konštanta; jej jednotkou je kilogram na coulomb ( $\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$ ),  $\Delta t$  je doba, za ktorú elektrolytom prechádzal prúd  $I$ .

Fyzikálny význam elektrochemického ekvivalentu látky objasníme z hľadiska vedenia prúdu v elektrolytoch touto úvahou:

Keď  $N_v$  je hustota príslušného druhu iónov v elektrolyte,  $v_p$  ich priemerná unášavá rýchlosť a  $m_0$  hmotnosť každého iónu, potom plochou  $S$  prejde za dobu  $\Delta t$  celkom  $N$  iónov, pričom

$$N = N_v V = N_v S v_p \Delta t$$

Celková hmotnosť iónov je

$$m = m_0 N = m_0 N_v S v_p \Delta t \quad (1)$$

Označme  $Q_1 = ze$  hodnotu náboja iónu, kde  $z$  je nábojové číslo elementárneho náboja. Potom celkový prenesený náboj  $Q$  má hodnotu

$$Q = N Q_1 = N z e = N_v S v_p e z \Delta t \quad (2)$$

Delením rovníc (1) a (2) dostaneme

$$\frac{m}{Q} = \frac{m_0}{ze} = \text{konšt.} = A$$

Získaný vzťah je teoretickým potvrdením poznatku, ktorý experimentálne zistil Faraday. Rozšírením vzťahu Avogadrovou konštantnou  $N_A$  dostaneme

$$A = \frac{m_0 N_A}{ze N_A} = \frac{M_m}{zF}$$

kde  $M_m$  je mólová hmotnosť a  $F = e N_A$  tzv. **Faradayova konštanta**;  $F \doteq 9,65 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Možno teda písať

$$A = \frac{1}{F} \frac{M_m}{z} \quad (5.3)$$

Napríklad pre meď ( $z = 2$ ,  $M_m = 63,54 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) je  $A = 0,329 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$ , pre atómový vodík ( $z = 1$ ,  $M_m = 1,008 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) je  $A = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$ . Pre niektoré ďalšie látky sú hodnoty  $A$  v MFChT.

Dosadením vzťahu (5.3) do vzťahu (5.2) dostaneme

$$\boxed{m = \frac{M_m}{Fz} Q} \quad (5.4)$$

Získaný vzťah dáva niekoľko informácií:

- Je v ňom obsiahnutý matematický zápis 1. Faradayovho zákona,  $m \sim Q$ .
- Umožňuje nájsť fyzikálny význam Faradayovej konštanty. Keď číselná hodnota hmotnosti vylúčenej látky je  $\{m\} = \left\{ \frac{M_m}{z} \right\}$ , potom  $\{F\} = \{Q\}$ .
- Keď elektrolýza prebehne s rozličnými elektrolytmi, pričom celkový prenesený náboj  $Q$  bude vždy rovnaký, potom  $\frac{Q}{F} = \text{konšt.}$  a  $m \sim \frac{M_m}{z}$ .

**Hmotnosti rozličných prvkov (alebo radikálov) vylúčených pri elektrolyze tým istým nábojom sú chemicky ekvivalentné (2. Faradayov zákon).**

d) Umožňuje experimentálne určiť Faradayovu konštantu.

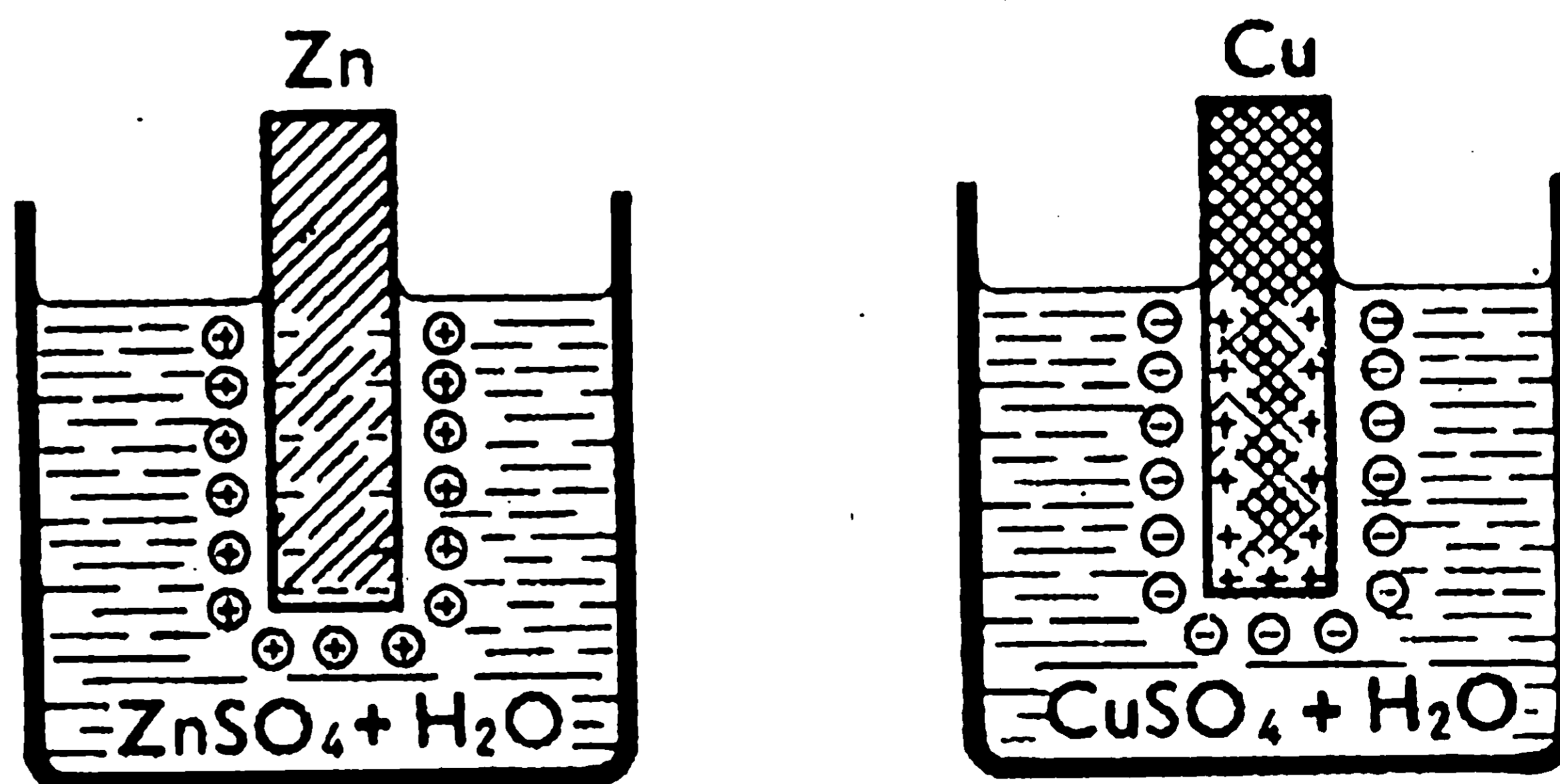
Keďže aj Avogadrovu konštantu možno zistiť experimentálne, môžeme zo vzťahu  $F = e N_A$  vypočítať hodnotu elementárneho náboja. Takto získaná hodnota súhlasí s hodnotou elementárneho náboja zistenou iným spôsobom, napr. z Millikanovho pokusu, ako viete z 1. ročníka.

### Úlohy

1. Znázornite schému pokusov, ktoré prebehnú pri pokusoch 2 a 3.
2. Vypočítajte hmotnosť hliníka ( $z = 3$ ), ktorý sa vylúči pri elektrolyze na elektróde za 24 h prúdom 10 kA. [80 kg]
3. Pomocou vzťahu (5.2) vysvetlite fyzikálny význam elektrochemického ekvivalentu a pomocou vzťahu (5.4) fyzikálny význam Faradayovej konštanty.

## 5.4 Galvanické články

Keď kovovú elektródu ponoríme do vodného roztoku soli toho istého kovu, prebehne redoxný chemický dej, pri ktorom buď do roztoku vstupujú z kovu ďalšie ióny, buď sa z neho na kov vylučujú. Tým sa roztok nabíja v prvom prípade kladne a kov súčasne záporne (napr. zinková elektróda ponorená do vodného roztoku  $ZnSO_4$ ; obr. 5-5a), v druhom prípade je to opačne (napr. medená elektróda vo vodnom roztoku  $CuSO_4$ ; obr. 5-5b). V oboch prípadoch na rozhraní kovu a roztoku vznikne tenká dvojvrstva kladných a záporných iónov, ktorú nazývame **elektrická dvojvrstva**. V nej utvorené elektrické



Obr. 5-5

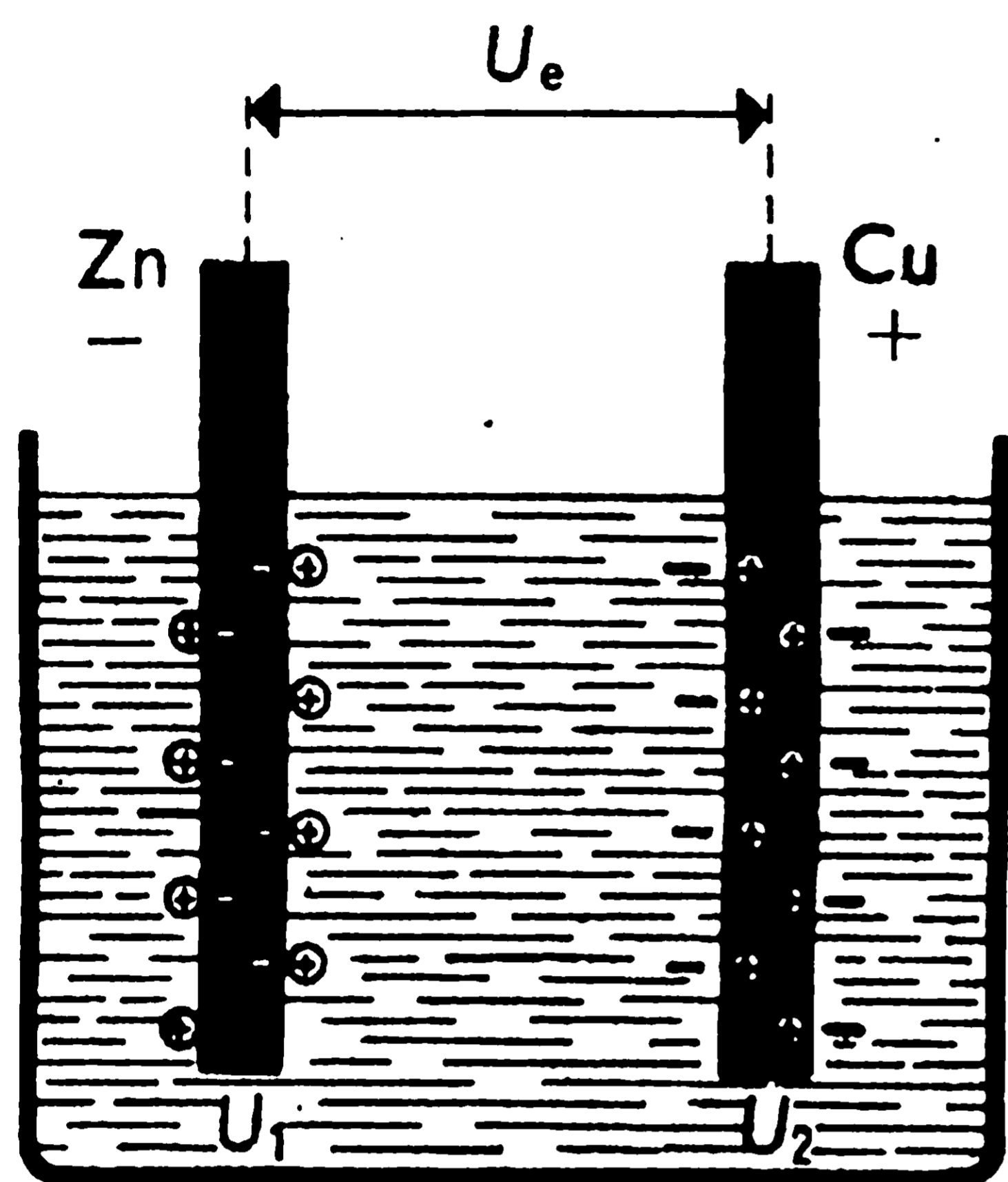
Vznik elektrickej dvojvrstvy

a

b

pole bráni prechodu ďalších iónov z kovu do roztoku (alebo obrátene) a preto sa utvorí rovnovážny stav.

Elektrickej dvojvrstve prislúcha napätie, ktorého hodnota je rozličná pre rôzne kovy a ich vodné roztoky. (Závisí rovnako od teploty a tlaku.)



Obr. 5-6

Galvanický článok – schéma Daniellovho článku

Na elektródach z rovnakého materiálu sú v danom elektrolyte napätia na dvojvrstvách rovnaké, preto sa napätie medzi elektródami rovná nule. Ak sú elektródy z chemicky rozličných materiálov, tak po ponorení do elektrolytu je medzi nimi nenulové napätie, ktoré sa volá **elektromotorické napätie** a opísaná sústava tvorí galvanický článok (obr. 5-6).

**Galvanický článok je zdroj jednosmerného napätia, ktorý sa skladá z elektrolytu a dvoch chemicky odlišných elektród.**

Príkladom opísaného galvanického článku je **Daniellov článok**. Skladá sa zo zinkovej elektródy ponorenej do vodného roztoku  $ZnSO_4$  a medenej elektródy ponorenej do vodného roztoku  $CuSO_4$ . Oba roztoky sú od seba oddelené pórovitou stenou, ktorá zabraňuje zmiešaniu roztokov, ale umožňuje prechod iónov. Elektromotorické napätie tohto článku  $U_e \approx 1,1 \text{ V}$ .

Uvažujme o prípade, keď do elektrolytu ponoríme dve elektródy z rovnakého kovu a k elektródam pripojíme vonkajší zdroj napätia (obr. 5-1). V dôsledku elektrolýzy vzniknú v článku rozkladné produkty, ktoré zmenia povrch elektród. Tak sa pri pokuse 3 v stati 5.3 na platinových elektródach vylučoval na katóde vodík a na anóde kyslík. Na novo vzniknutých dvojvrstvách je iné napätie ako pred pripojením zdroja a napätie medzi elektródami po odpojení vonkajšieho zdroja je nenulové. Elektródy sa **polarizovali**. Presvedčíme sa o tom, ak zdroj

vonkajšieho napätia odpojíme a elektródy necháme vodivo spojené (obr. 5-1) cez potenciometer a miliampérmeter. Ten ukáže prúd opačného smeru, ako bol predtým.

Elektromotorické napätie, ktoré vzniklo polarizáciou elektród, tzv. **polarizačné napätie**, má opačnú polaritu, ako napätie zdroja pôvodne zapojeného na elektródy. Za krátky čas prechodu prúdu dosahuje hodnotu napätia vonkajšieho zdroja, preto prúd zo začiatkovej nenulovej hodnoty veľmi rýchlo klesne na nulu. Polarizačné napätie má hornú hranicu — **rozkladné napätie**  $U_r$ , preto väčším vonkajším napätím možno v obvode udržiavať trvalý prúd. Tým sú objasnené javy opísané v stati 5.2 a vzťah (5.1).

Polarizácia elektród môže tiež nastať, ak vodivo spojíme elektródy galvanického článku. Takýto prípad nastane napr. vo **Voltovom článku**  $Zn(H_2SO_4 + H_2O)Cu^+$  s elektromotorickým napätím asi 1 V. Elektrolýzou, ktorá prebieha vnútri článku, medená elektróda sa pokrýva vodíkovými bublinami a vzniká **polarizovaný článok**  $+Zn(H_2SO_4 + H_2O)H_2^-$  s opačným elektromotorickým napätím. Napätie Voltovho článku postupne klesá, článok je nestály.

Praktický význam majú dosiaľ **suché články**, ktoré sa používajú napr. na napájanie tranzistorových rádioprijímačov. Kladnou elektródou suchého článku je uhlíková tyčka s mosadznou čiapočkou. Je obalená zmesou burelu  $MnO_2$  a koksu, ktorá pôsobí ako depolarizátor. Takto upravená elektróda je ponorená do salmiaku  $NH_4Cl$  zahusteným škrobovým mazom a inými prísadami. Všetko je uložené v zinkovej nádobke tvaru valčeka. Valček je súčasne zápornou elektródou. Zhora je článok zaliaty asfaltom. Tri články spojené za sebou tvoria **plochú batériu**.

Osobitným druhom galvanického článku je **akumulátor**. Je to polarizačný článok, ktorý sa stáva zdrojom elektromotorického napätia po predchádzajúcom prechode elektrického prúdu elektrolytom akumulátora alebo **nabíjaním**.

Najvýznamnejší je **olovený akumulátor**, v ktorom sa nabíjaním utvorí článok  $+PbO_2(H_2SO_4 + H_2O)Pb^-$ .

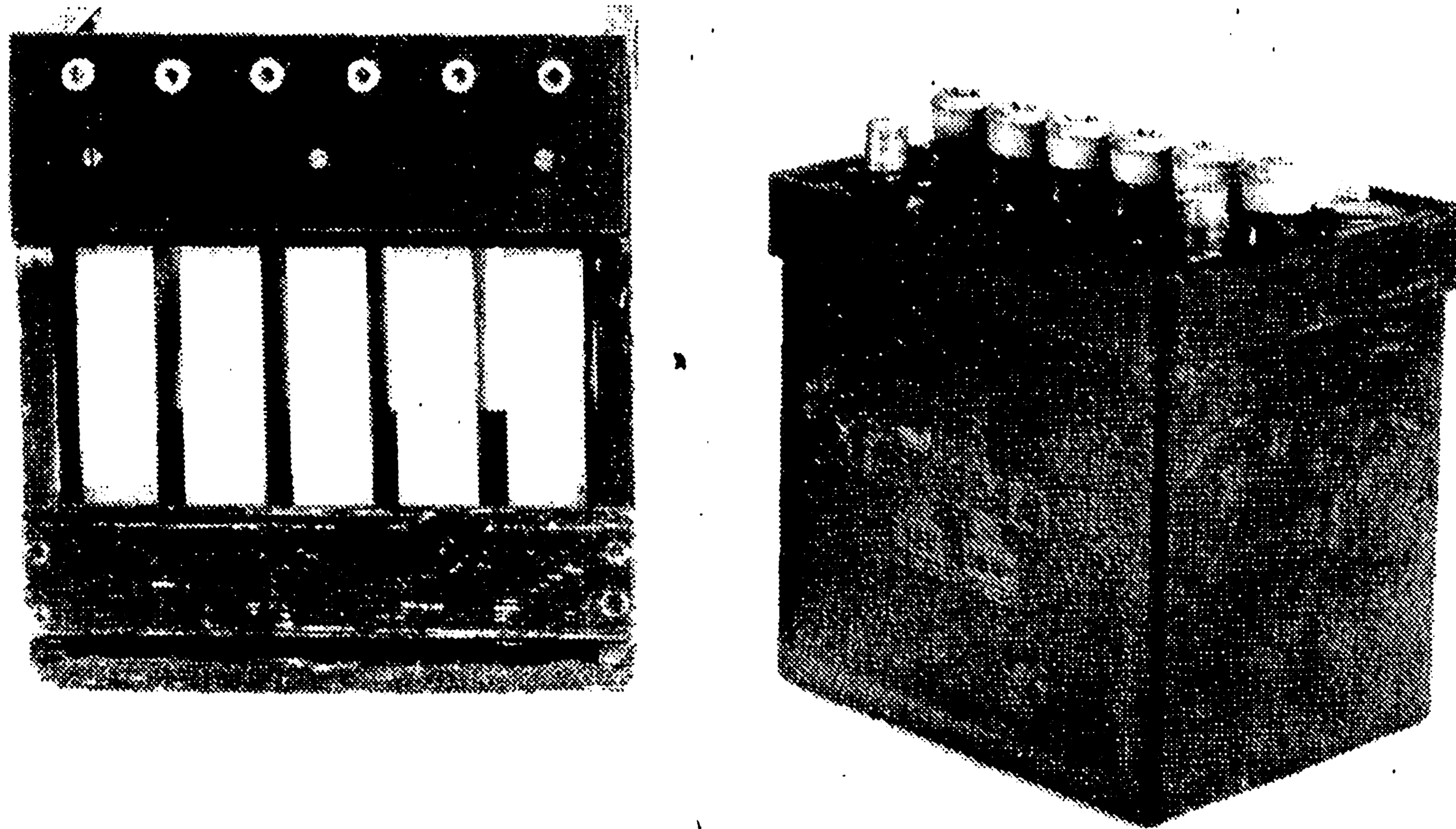
Pri **vybíjaní** akumulátora, t. j. pri použití akumulátora ako zdroja napätia, prebiehajú v ňom tieto deje:

1. Záporná olovená elektróda uvoľňuje ióny  $Pb^{2+}$ , ktoré reagujú s kyselinou sírovou. Vzniká  $PbSO_4$ , ktorá sa usadzuje na tejto elektróde.

2. Na kladnej elektróde sa  $\text{PbO}_2$  redukuje na ióny  $\text{Pb}^{2+}$ , ktoré reagujú s  $\text{H}_2\text{SO}_4$  za vzniku nerozpusteného síranu olovnateho. Ten sa usadzuje na tejto elektróde. V elektrolyte sa pritom znižuje koncentrácia  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , elektromotorické napätie postupne klesá. Pri hodnote 1,8 V treba akumulátor znova nabiť. Pri nabíjaní prebiehajú opačné procesy.

**Kapacita akumulátora** sa určuje celkovým nábojom, ktorý je akumulátor schopný vydať pri vybíjaní. Meria sa v coulomboch, v praxi tiež v ampérhodinách ( $1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3600 \text{ C}$ ).

Akumulátory spojené za sebou tvoria **akumulátorové batérie** (najčastejšie na elektromotorické napätie 6 V a 12 V, obr. 5-7), ktoré sa používajú v motorových vozidlách, železničných vozňoch, lietadlách, v svietidlách pre baníkov a pod. Malé akumulátory s kadmiovými alebo striebornými elektródami sa používajú v rozličných tranzistorových elektronických zariadeniach\*.



**Obr. 5-7**

**Akumulátorová batéria: a) oceloniklová (NiFe), b) olovená**

---

\* Okrem olovených akumulátorov sa používajú aj tzv. **oceloniklové (NiFe)**. Katódou je ocelová elektróda, anódou hydroxid niklitý. Elektrolytom je vodný roztok KOH. Elektromotorické napätie tohto akumulátora je 1,45 V.



## Úlohy

1. V elektrolytickom zariadení s kombináciou  $\text{Cu}(\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O})\text{Zn}$  zapojíme kladnú svorku vonkajšieho zdroja napätia na zinkovú elektródu. Ktoré deje pri elektrolýze prebiehajú? Prečo sa elektródy polarizujú? Prečo pri prerušení prúdu v obvode vzniká sekundárny elektrochemický zdroj napätia? Určte jeho kladný a záporný pól.
2. Olovený akumulátor má kapacitu 40 A · h. Použijeme ho ako zdroj napätia pre elektrický obvod s dvoma žiarovkami spojenými paralelne. Každou z nich prechádza prúd 0,20 A. Určte čas, za ktorý môžeme akumulátor použiť bez nabíjania. [asi 100 h]

## 5.5 Technické využitie elektrolýzy. Korózia kovov

Chemické zmeny, ktoré prebiehajú na elektródach, možno v praxi využiť rozličným spôsobom.

**Vylučovanie kovov na katóde**, t. j. proces, pri ktorom voľbou vhodného napätia možno dosiahnuť vylúčenie požadovaných iónov z roztoku, využíva sa v **elektrometalurgii**, **galvanostégii** (galvanickom pokovovaní), **galvanoplastike** (vytváraní odliatkov, matric na výrobu gramofónových platní; pozri úvodnú fotografiu).

Veľké využitie má **elektrolytický kondenzátor**. V hliníkovej nádobke je elektrolyt (napr. vodný roztok bóraxu a kyseliny boritej), do ktorej je ponorená hliníková elektróda. Keď túto sústavu zapojíme na zdroj rovnosmerného napätia tak, aby hliníková elektróda bola anódou, utvorí sa na nej prechodom prúdu tenká vrstva oxidu hlinitého. Vrstva hrubá asi  $10^{-4}$  mm tvorí medzi anódou a elektrolytom dielektrikum, preto prúd klesne na nulu. Vznikol kondenzátor, v ktorom je hliníková elektróda jedným a elektrolyt s nádobkou druhým vodičom. Pri malej hrúbke dielektrika je kapacita elektrolytického kondenzátora aj pri malých rozmeroch kondenzátora (napr.  $10^3 \mu\text{F}$ ) pomerne veľká.

**Koróziou** nazývame porušenie povrchu kovu chemickým alebo elektrochemickým pôsobením. Najčastejším typom korózie je oxidácia kovov účinkom vzdušného kyslíka a vlhkosti vzduchu. Materiál úžitkových predmetov obsahuje primiešané kovy a pri styku s vodou sa tvoria **mikročlánky**, ktoré sú zdrojom prúdov spôsobujúcich elektrolýzu; kov, ktorý tvorí anódu, sa naleptáva.

Ročná strata kovov koróziou sa odhaduje na polovicu svetovej produkcie. Preto kovy treba pred koróziou chrániť. Voda v parných kotloch sa zbavuje iónov (para prechádza železnými, niklovými alebo horčíkovými pilinami). Na ochranu kovov, ktoré sú trvalo v styku s vodným prostredím, využíva sa tzv. katódová ochrana. Chránený kov sa zapojí na záporný pól osobitného zdroja napätia a prebieha na ňom iba katódový dej (vylučovanie vodíka).

Povrch kovu možno chrániť aj prísadou, ktorá znižuje elektromotorické napätie mikročlánkov. Pomerne jednoduchou ochranou je nanesenie oxidových ochranných vrstiev, lakov, náterov a pod.

## ZHRNUTIE — ELEKTRICKÝ PRÚD V ELEKTROLYTOCH

V kvapalinách je vedenie elektrického prúdu sprostredkované voľnými iónmi — kationmi a aniónmi. Proces ich vzniku rozpadom molekúl rozpustenej látky sa volá **elektrolytická disociácia**. Vodivé roztoky voláme **elektrolyty**. Keď do elektrolytu vložíme dve elektródy a pripojíme ich na svorky zdroja napätia, vznikne medzi elektródami elektrické pole, ktoré vyvolá usporiadaný pohyb iónov v elektrolyte — elektrický prúd.

Dej, pri ktorom prechodom elektrického prúdu elektrolytom nastávajú látkové zmeny, nazýva sa **elektrolýza**. Pri elektrolýze sa na **katóde vždy vylučuje vodík alebo kov**. Faraday zistil, že **hmotnosti vylúčených látok na elektródach sú priamo úmerné celkovému elektrickému náboju ktorý preniesli ióny pri elektrolýze**. Platí

$$m = A Q = A I \Delta t$$

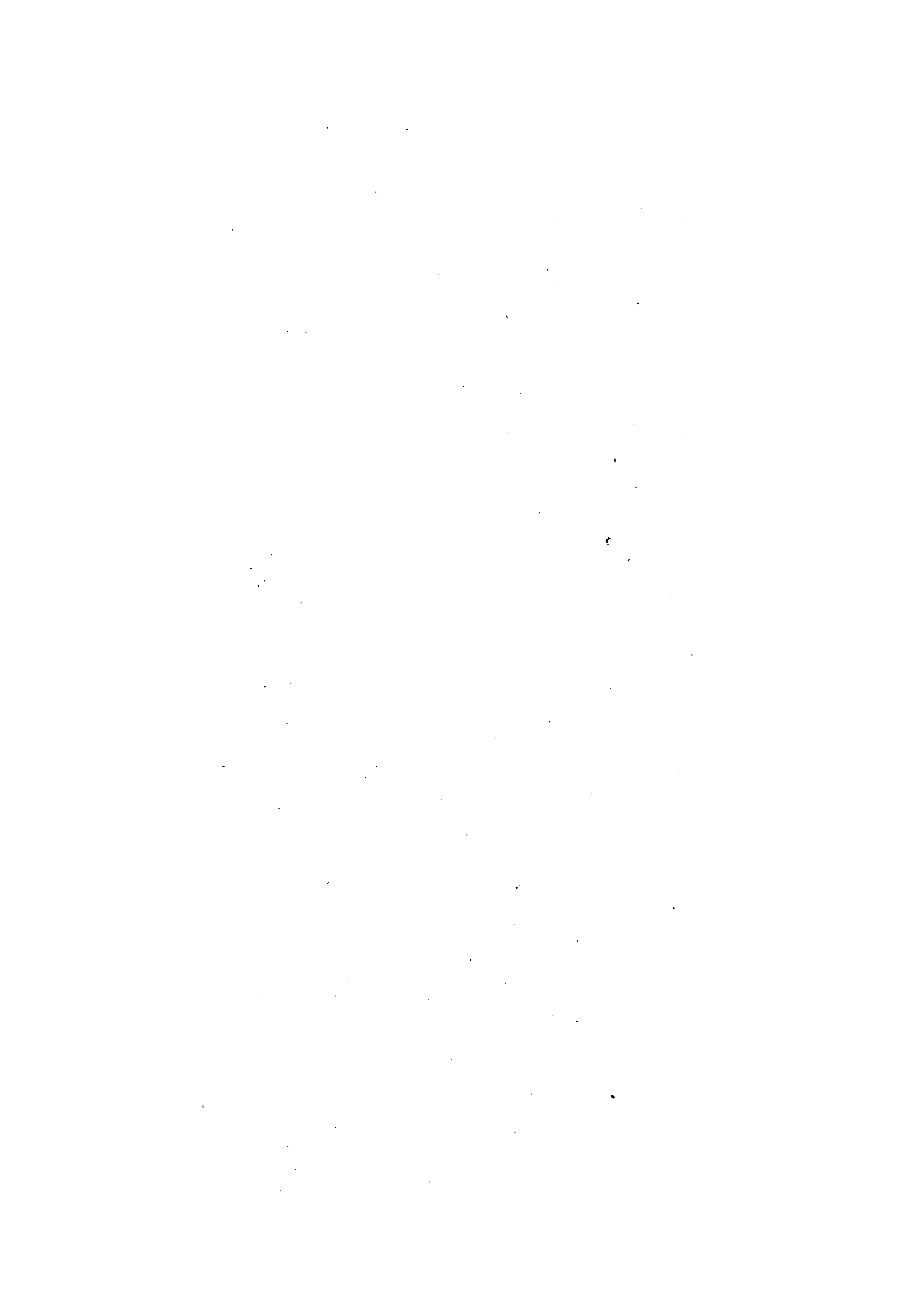
Konštanta  $A$  sa nazýva **elektrochemický ekvivalent látky**. Elektrochemické ekvivalenty rozličných prvkov sú dané vzťahom

$$A = \frac{1}{F} \frac{M_m}{z}$$

Faradayova konštanta  $F \doteq 9,65 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

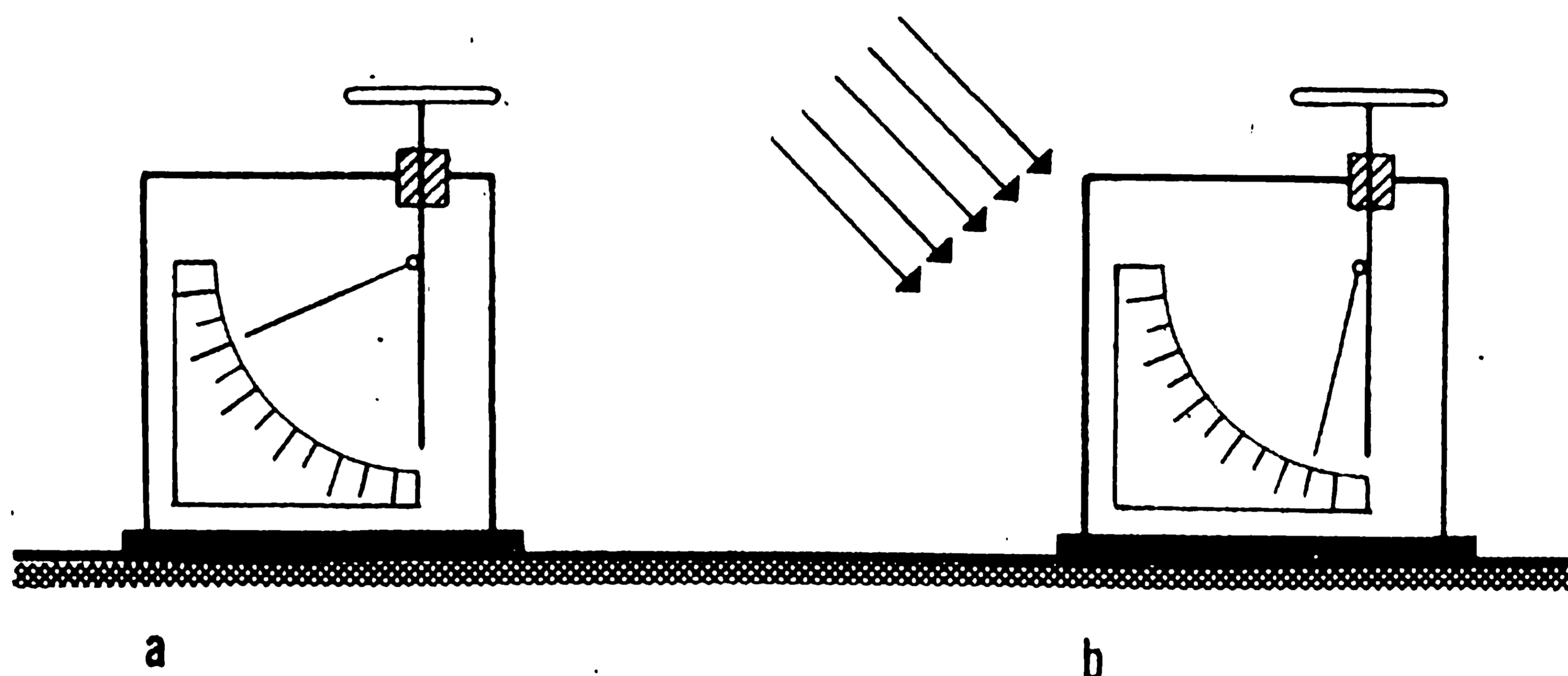
Sústava elektrolytu a dvoch chemicky rozličných elektród tvorí **galvanický článok**. Osobitným druhom galvanického článku je **akumulátor**. Galvanické články a akumulátory sú chemické zdroje elektrickej energie, v ktorých sa mení chemická energia na elektrickú.

Porušenie povrchu kovu chemickým alebo elektrochemickým pôsobením nazývame **korózia**.



## 6. Elektrický prúd v plynoch a vo vákuu

Plyny nevedú elektrický prúd, o čom sa môžeme presvedčiť pokusom s nabitým elektroskopom (obr. 6-1a). Jeho výchylka zostane dlho nezmenená. Vybíjanie sa urýchli zmenou fyzikálnych podmienok plynného prostredia (vzduchu), napr. zohriatím na vysokú teplotu, ožiarením intenzívnymi ultrafialovými, röntgenovými a rádioaktívnymi lúčmi (obr. 6-1b). Tieto energetické zdroje zmenia vnútornú energiu plynov a tvoria v nich voľné častice s nábojom. Plyny sa tak stanú elektrickým vodičom.



Obr. 6-1

Schéma demonštrácie na elektrickú vodivosť plynov pomocou vybíjania elektroskopu ožiareného ultrafialovými lúčmi

Podľa predchádzajúcich úvah o vedení prúdu v kovoch a v kvapalinách dostaneme dôležitý záver: **Elektrický prúd môžu viesť aj plyny za predpokladu, že budú obsahovať voľné častice s nábojom.**

### 6.1 Ionizácia plynov

Plyny sú zložené z elektricky neutrálnych atómov a molekúl a za normálnych podmienok sú takmer nevodivé. Elektricky vodivými sa stanú **ionizáciou**. Je to dej, pri ktorom sa vonkajším zásahom odtrhávajú

z atómov neutrálnych molekúl **elektróny**. Zvyšky molekúl sú **kladné ióny**.

Okrem dvojice **elektrón — kladný ión** sa môžu utvoriť aj **záporné ióny** pripojením uvoľnených elektrónov k iným neutrálnym molekulám. Túto schopnosť majú najmä elektronegatívne prvky.

Prostriedky, ktorými sa vyvoláva ionizácia plynu, nazývajú sa **ionizátory**. Ionizátorom je každý zdroj energie, ktorý poskytuje elektrónom v atómoch (molekulách) energiu potrebnú na ich uvoľnenie.

Plyn s dostatočne vysokou teplotou obsahuje molekuly s rýchlosťami oveľa väčšími, ako je stredná kvadratická rýchlosť (pozri 3.2 z F 2) a ich kinetické energie sú dostatočne veľké na to, aby nastala ionizácia vzájomnými zrážkami molekúl. Rovnaký účinok majú aj veľmi rýchle a nabité častice korpuskulárneho žiarenia alebo ionizované molekuly plynu urýchlené elektrickým poľom. Táto ionizácia sa nazýva **ionizácia nárazom**.

Najdôležitejším ionizátorom pri ionizácii nárazom sú elektróny, lebo v porovnaní s iónmi majú pri rovnakej energii väčšiu rýchlosť a za rovnaký čas prebehnú väčšiu trajektóriu, čím sa pravdepodobnosť zrážky s molekulami plynu zväčšuje.

Pri ionizácii atómu plynu (molekuly) konajú vonkajšie sily (sily, ktoré súvisia s ionizátormi) ionizačnú prácu proti silám vzájomného pôsobenia medzi uvoľneným elektrónom a ostatnými časťami atómu (molekuly). Najmenšia energia potrebná na uvoľnenie elektrónu sa nazýva **ionizačná energia**. Vyjadruje sa zvyčajne v elektrónvoltoch (eV), pričom  $1 \text{ eV} \doteq 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Ionizačná energia závisí od atómu prvku a energetického stavu uvoľňovaných elektrónov. V nasledujúcej tabuľke sú ionizačné energie niektorých prvkov plynného skupenstva:

Prvok	Ionizačná energia (eV)	Prvok	Ionizačná energia (eV)
vodík	13,6	sodík	5,1
dusík	14,5	draslík	4,3
kyslík	13,6	céziu	3,9
neón	21,6	ortuť	10,4

Ionizujúce elektróny, resp. ióny získajú potrebnú energiu najmä v elektrickom poli, ktoré je medzi elektródami výbojovej trubice. Tieto

častice sú medzi zrážkami neustále urýchľované a pri zrážkach odovzdávajú časť svojej energie na ionizáciu molekúl.

Kinetická energia nabitej častice s nábojom  $e$ , hmotnosťou  $m$  a rýchlosťou  $v$  sa meria prácou síl homogénneho elektrického poľa s intenzitou veľkosti  $|\mathbf{E}|$  potrebnou na jej urýchlenie z pokoja po dráhe  $l$ . Platí

$$\frac{1}{2} m v^2 = e |\mathbf{E}| l$$

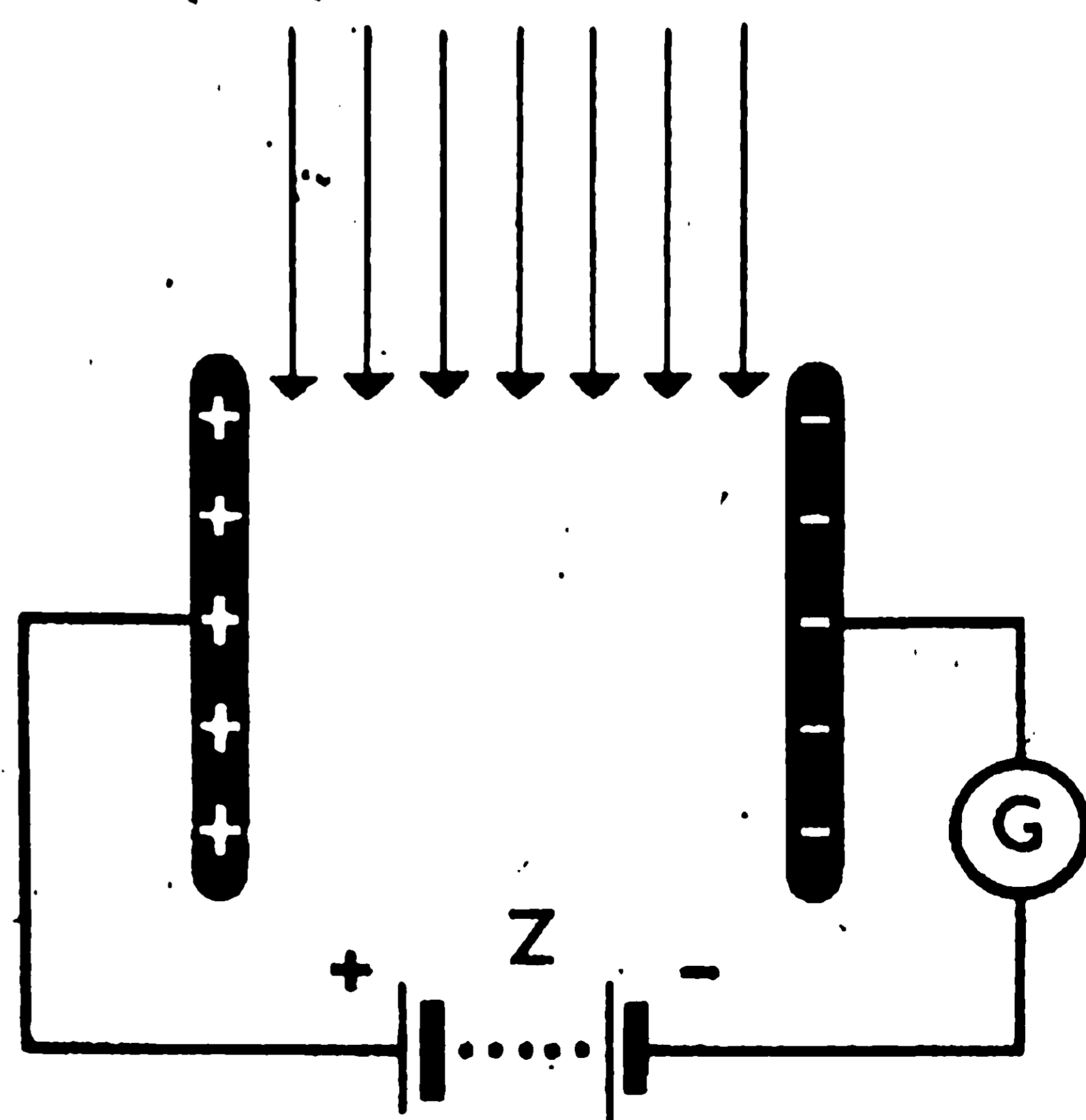
Za predpokladu, že častica sa pohybuje v smere siločiar a pri zrážke odovzdá molekule všetku kinetickú energiu rovnajúcu sa ionizačnej energii  $E_i$ , bude  $l = \lambda$  (stredná voľná dráha častice). Potom najmenšiu rýchlosť, ktorú musí mať častica, aby pri zrážke s molekulou nastala ionizácia, vypočítame zo vzťahu

$$\frac{1}{2} m v^2 = e |\mathbf{E}| \lambda = E_i \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_i}{m}}$$

Ionizáciou utvorené voľné elektróny a ióny majú obmedzenú dobu trvania, lebo sa navzájom priťahujú a ich počet sa rýchlo znižuje. Dvojice opačne nabitých častíc sa spájajú do neutrálnych molekúl. Tento dej sa nazýva **rekombinácia**.

Ionizácia a rekombinácia prebiehajú súčasne, všeobecne môže jeden z dejov prevládať. Podľa toho sa mení aj hustota voľne nabitých častíc. Keď prevláda ionizácia, zväčšuje sa počet ionizovaných molekúl aj vodivosť plynu. V opačnom prípade plyn stráca elektrickú vodivosť.

Pomocou obrázka 6-2 si ďalej vysvetlíme mechanizmus vedenia prúdu



Obr. 6-2

Schéma demonštrácie na elektrickú vodivosť plynov pomocou vybíjania kondenzátora ionizátorom

v plynoch. Uvažujme o obvode, v ktorom je elektrický zdroj  $Z$ , galvanometer (alebo citlivý ampérmeter) a platňový kondenzátor so vzduchovým dielektrikom. Účinkom ionizátora sa vzduch ionizuje. V elektrickom poli kondenzátora pôsobí na elektróny a ióny elektrostatická sila, preto sa v neusporiadanom pohybe týchto častíc objaví prevládajúci smer pohybu. Kladné ióny sa pohybujú k záporne nabitej platni, kde priberajú elektróny a stávajú sa elektricky neutrálnymi časticami. Záporné ióny a elektróny sa pohybujú ku kladnej platni, kde odovzdávajú elektróny a vznikajú tiež neutrálne častice. Elektróny sa potom zúčastňujú na vedení elektrického prúdu v kovových vodičoch obvodu. **Elektrický prúd v plynoch je spôsobený usporiadaným pohybom voľných elektrónov a iónov. Nazýva sa výboj.**

Treba si zapamätať, že **elektrický prúd vedie iba ionizovaný plyn**. Keď totiž odstránime ionizátor, ióny rýchlo zanikajú rekombináciou v priestore medzi platňami kondenzátora a zachytením na platniach. Prúd sa udržuje iba počas pôsobenia ionizátora, preto hovoríme o **nesamostatnom výboji**.

Elektrické pole môže vodivosť plynu veľmi ovplyvniť tým, že urýchľuje utvorené ióny a elektróny na ich voľnej trajektórii, takže získavajú dostatočnú energiu na ionizáciu nárazom ďalších molekúl. Počet iónov pri iste veľkosti intenzity poľa sa lavínovito zväčšuje, ionizácia prevláda nad rekombináciou. Plyn sa ionizuje vlastnými iónmi, ale najmä elektrónmi a preto zväčšuje svoju vodivosť. Keďže výboj pokračuje aj po odstránení ionizátora, hovoríme o **samostatnom výboji**. Elektrické napätie, pri ktorom vzniká samostatný výboj, nazýva sa **zápalné napätie**.

Vodivý plyn môže teda byť súčasťou elektrického obvodu ako ktorýkoľvek elektrický vodič. V praxi však musí byť uzavretý v banke (rúrke), lebo by na miesto výboja vnikali plyny zvonka, a tak by bránili výboju. Vodivý spoj s obvodom sa realizuje pomocou elektród, ktoré sú zatavené v banke (rúrke).

### Úlohy

1. Medzi najdôležitejšie ionizátory pri ionizácii nárazom patria elektróny. Ako to vysvetlíte?
2. Platňový kondenzátor s kapacitou 50 pF a vzduchovým dielektrikom je nabitý na elektrické napätie 250 V. Zvýšením teploty vzduchu sa jeho napätie zníži na 50 V za čas 50 s. Vypočítajte priemerný vybíjací prúd.  $[2 \cdot 10^{-10} \text{ A}]$
3. Paru vodíka ionizujeme žiarením  $\beta$ . Akú najmenšiu rýchlosť by mali mať ionizujúce elektróny? Pri výpočte použite tabuľku ionizačných energií. Hmotnosť elektrónu  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .  $[\text{asi } 1,34 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$



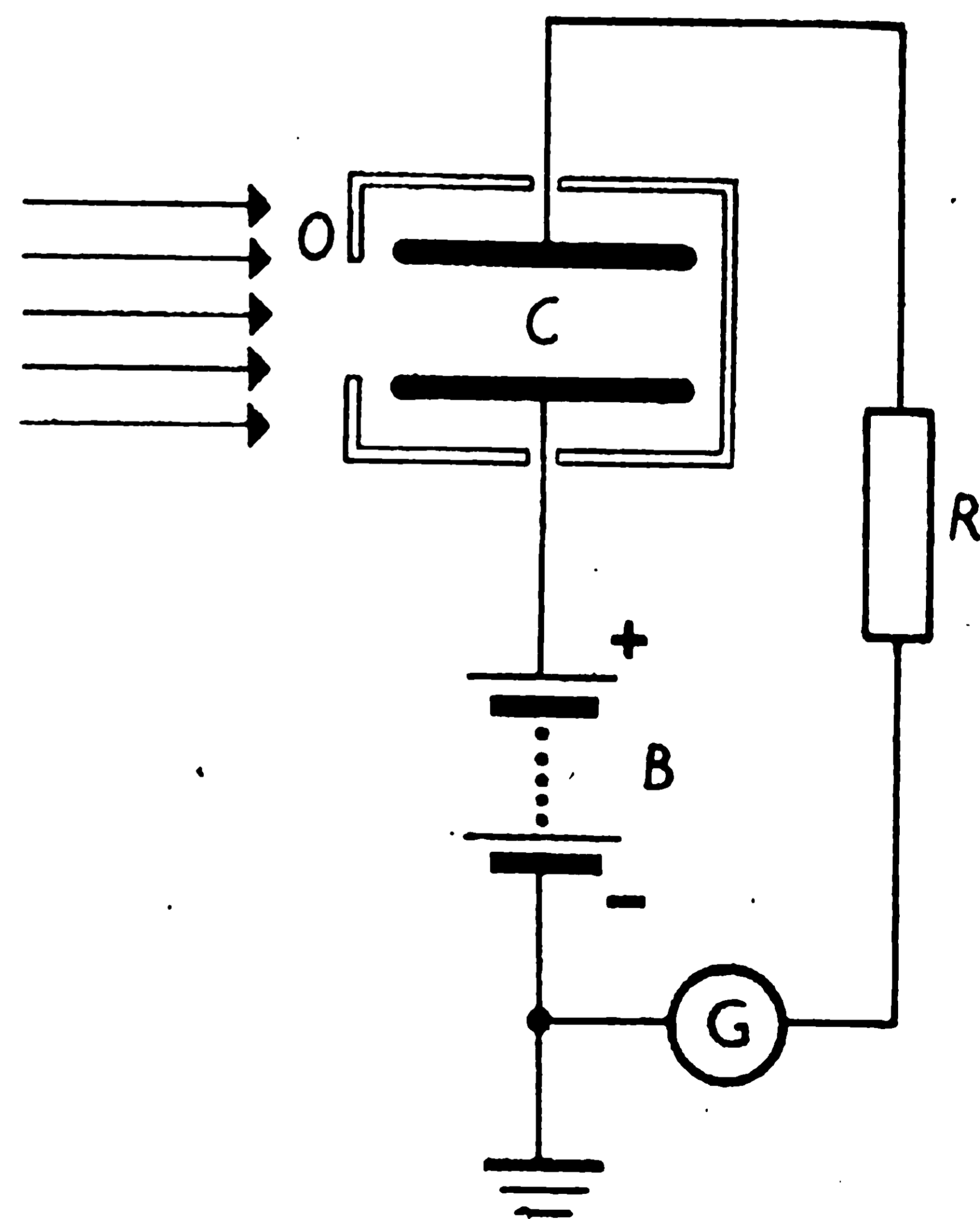
4. Medzi platňami kondenzátora so vzduchovým dielektrikom, ktoré sú od seba vzdialené 5,0 cm, je elektrické napätie 10,0 kV. Akú rýchlosť má elektrón v okamihu zrážky s molekulou kyslíka, ktorú ionizoval? Aká je stredná dráha elektrónu? Predpokladajte, že elektrón sa medzi zrážkami pohyboval rovnobežne so siločiarami poľa a pri zrážke odovzdal všetku energiu. Použite tabuľky ionizačných energií zo s. 118. [ $2,2 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $68 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ]

## 6.2 Voltampérová charakteristika výboja

Vedenie prúdu v plynoch je podmienené prítomnosťou voľných nabitých častíc a elektrickým poľom. To znamená, že možno očakávať istú závislosť prúdu od napätia, na základe ktorej by bolo možné usudzovať na sprievodné fyzikálne deje elektrického výboja.

Pri skúmaní výboja použijeme **ionizačnú komoru** (obr. 6-3). Je to v podstate platňový kondenzátor  $C$ , ktorý je izolovane umiestnený v kovovej škatuli s okienkom  $O$  pre pôsobiaci ionizátor a pripojený cez galvanometer  $G$  a ochranný rezistor na zdroj napätia  $B$ .

So zväčšovaním napätia na platniach kondenzátora zväčšuje sa aj prúd. Pri malých napätiach prevláda rekombinácia a iba malé percento iónov sa dostane na platne kondenzátora. Keď sa napätie zväčšuje, elektrické pole urýchli ióny a elektróny tak, že nestačia rekombinovať, ale čoraz vo väčšom počte zanikajú zachytením sa na platničkách. Prúd sa stáva



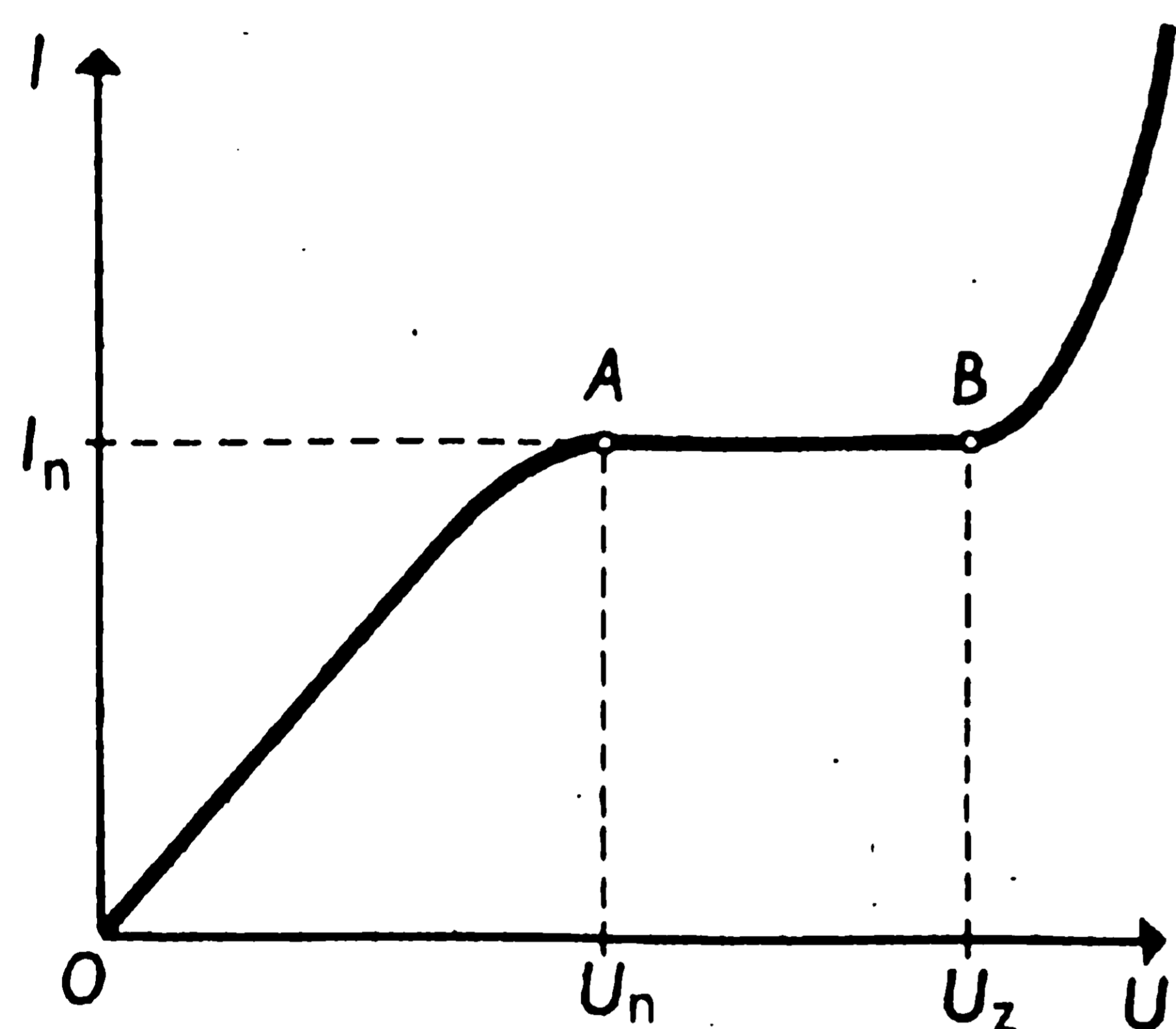
**Obr. 6-3**  
Ionizačná komora — schéma zapojenia  
na skúmanie výboja

nasýteným pri napätí  $U_n$ , keď sú všetky ióny utvorené ionizátorom zachytené platňami. Prúd dosiahne hodnotu  $I_n$ , čo je tzv. **nasýtený prúd**.

Ďalšie pozvoľné zvyšovanie napätia nespôsobuje zvyšovanie prúdu. Samostatný výboj nastáva pri oveľa vyššom napätí, t. j. pri **zápalnom napätí**  $U_z$ . Prechod z nesamostatného na samostatný výboj nazývame **elektrický prieraz plynu**. Pri pokračujúcom zvyšovaní napätia sa prúd veľmi rýchlo zväčšuje.

**Graf závislosti prúdu  $I$  elektrického výboja od napätia  $U$  medzi elektródami sa nazýva voltampérová charakteristika výboja.**

Na obr. 6-4 je graficky znázornená závislosť  $I$  od  $U$  získaná pri experimente s ionizačnou komorou. Z obrázka vidieť, že pri malých napätiach platí Ohmov zákon (priamková časť krivky  $OA$ ), ale pre nasýtený prúd (úsek  $AB$ ) a samostatný výboj neplatí.



**Obr. 6-4**  
Voltampérová charakteristika výboja

Charakter samostatného výboja v plynch závisí od chemického zloženia plynu, jeho teploty, tlaku, kvality elektród, od ich vzdialenosti, od stupňa ionizácie a parametrov obvodu, v ktorom je vodivý plyn zapojený. Elektrický výboj býva väčšinou sprevádzaný svetelnými a zvukovými efektmi.

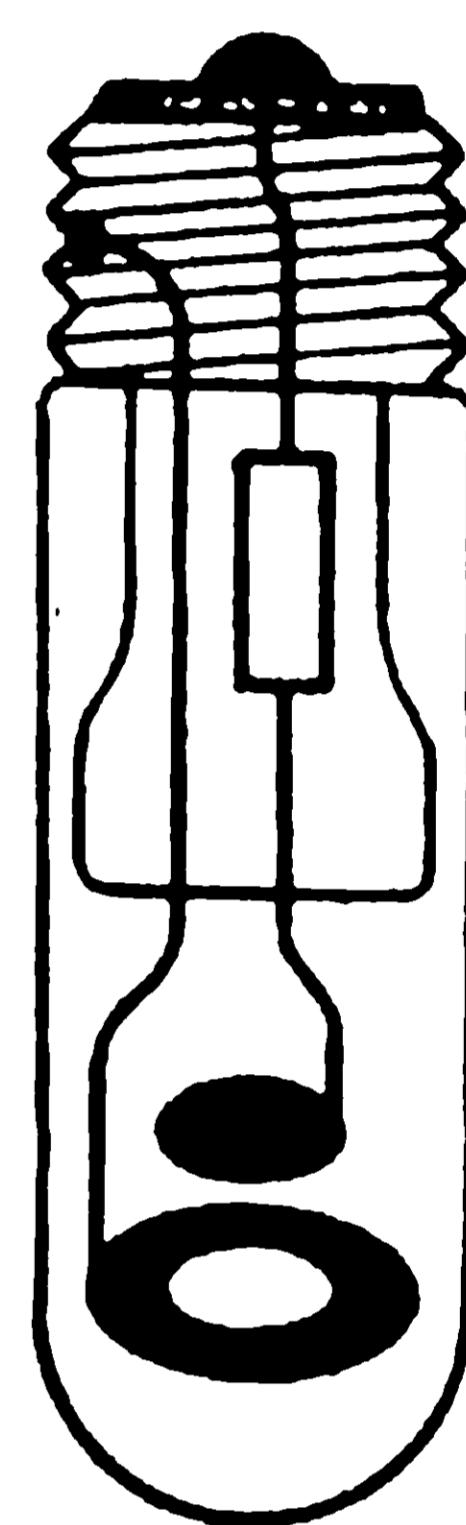
Samostatný výboj prebieha odlišne v závislosti od hodnoty prúdu. Pri malej hodnote prúdu pozorujeme slabé svetielkovanie plynu; to je **tlejivý elektrický výboj**. Pri väčších hodnotách prúdu sa odovzdávanie energie veľkého počtu iónov dopadajúcich na elektródy prejaví rozžeravením elektród, ktoré sa tak stávajú ionizátormi (tepelná ionizácia). Teplota plynu sa prudko zvyšuje až na hodnotu 6 000 K. Napätie medzi elektródami klesá. To je **oblúkový výboj** (elektrický oblúk).

Najintenzívnejšie výboje sú krátkodobé, ktoré prebiehajú ako **iskrový výboj** (elektrická iskra). Tvorí ho elektrónové a iónové lavíny v iskrových kanálikoch, v ktorých sa tlak zvyšuje na desiatky MPa a teplota na  $10^5$  K.

Ďalšou formou samostatného výboja je **koróna**. Vzniká v blízkosti vodičov vo vzduchu, ktoré sú pod vysokým napätím a dostatočne od seba vzdialené. Ionizácia vzduchu prebieha na miestach veľkej zmeny elektrického potenciálu (zakrivené miesta a hroty vodičov), teda v blízkosti vodiča. Vysoko ionizovaný vzduch slabo svieti, objaví sa koróna. Koróna spôsobuje veľké energetické straty. Preto sa povrchy vodičov s veľmi vysokým napätím robia hladké a zväčšujú sa polomery krivosti.

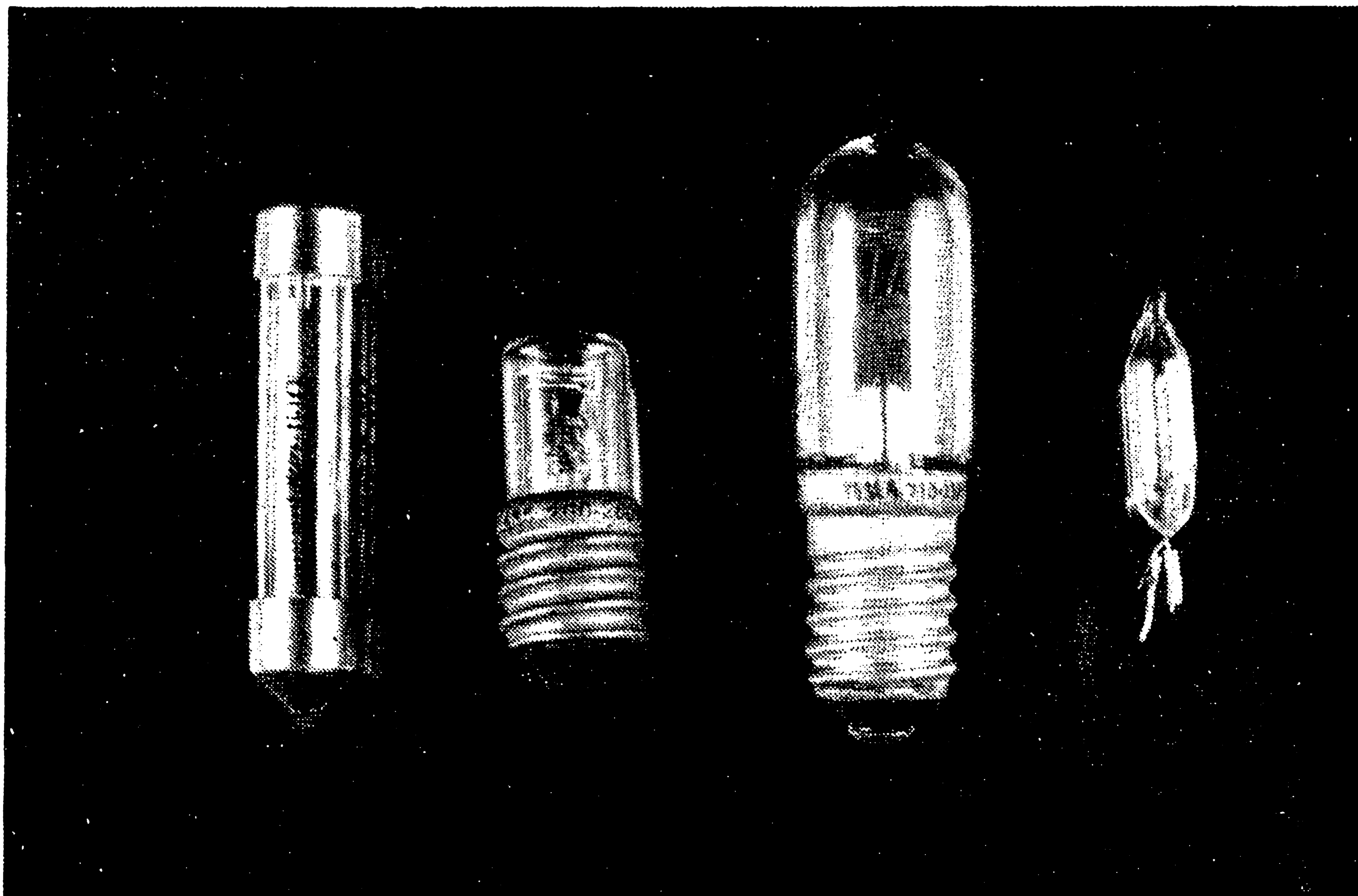
Spomenieme príklady praktického využitia samostatného výboja:

Tlejivý elektrický výboj sa využíva pri konštrukcii tlejiviek a žiaroviek. **Tlejivka** (obr. 6-5 a, b) má dve elektródy, ktoré majú tvar krúžka a klobúčika alebo dvoch rovnobežne vinutých špirál. Plnená je vzácnym



**Obr. 6-5**

- a) Schéma tlejivky,
- b) rozličné typy tlejiviek



plynom (napr. neónom) pri tlaku 3 kPa a v päťici má umiestený zvyčajne rezistor. Tlejivý výboj sa objaví na katóde pri zápalnom napätí vtedy, keď použijeme jednosmerný zdroj napätia. Preto možno tlejivky použiť ako indikátor polarít svoriek zdroja jednosmerného napätia. Používajú sa tiež ako kontrolné svetlá a indikátory napätia.

Oblúkový výboj sa používa napr. pri oblúkovom zváraní a v osvetľovacích výbojkách. **Osvetľovacie výbojky** sa používajú na pouličné osvetlenie. Veľmi rozšírené sú najmä ortuťové a sodíkové výbojky. Energeticky výhodnejšie sú sodíkové výbojky, ktoré svietia príjemným žltým svetlom. Výbojom v parách ortuti vzniká ultrafialové žiarenie, ktoré vyvoláva svietelkovanie látok nanesených na vnútornej stene sklenej výbojkovej trubice. Tak svietia napr. **žiarivky**, ktorých svetelná účinnosť je asi štyrikrát väčšia v porovnaní so žiarovkami s rovnakým príkonom.

Vlastnosť iskrového výboja sa využíva napr. pri iskrovom obrábaní kovov.

## Úlohy

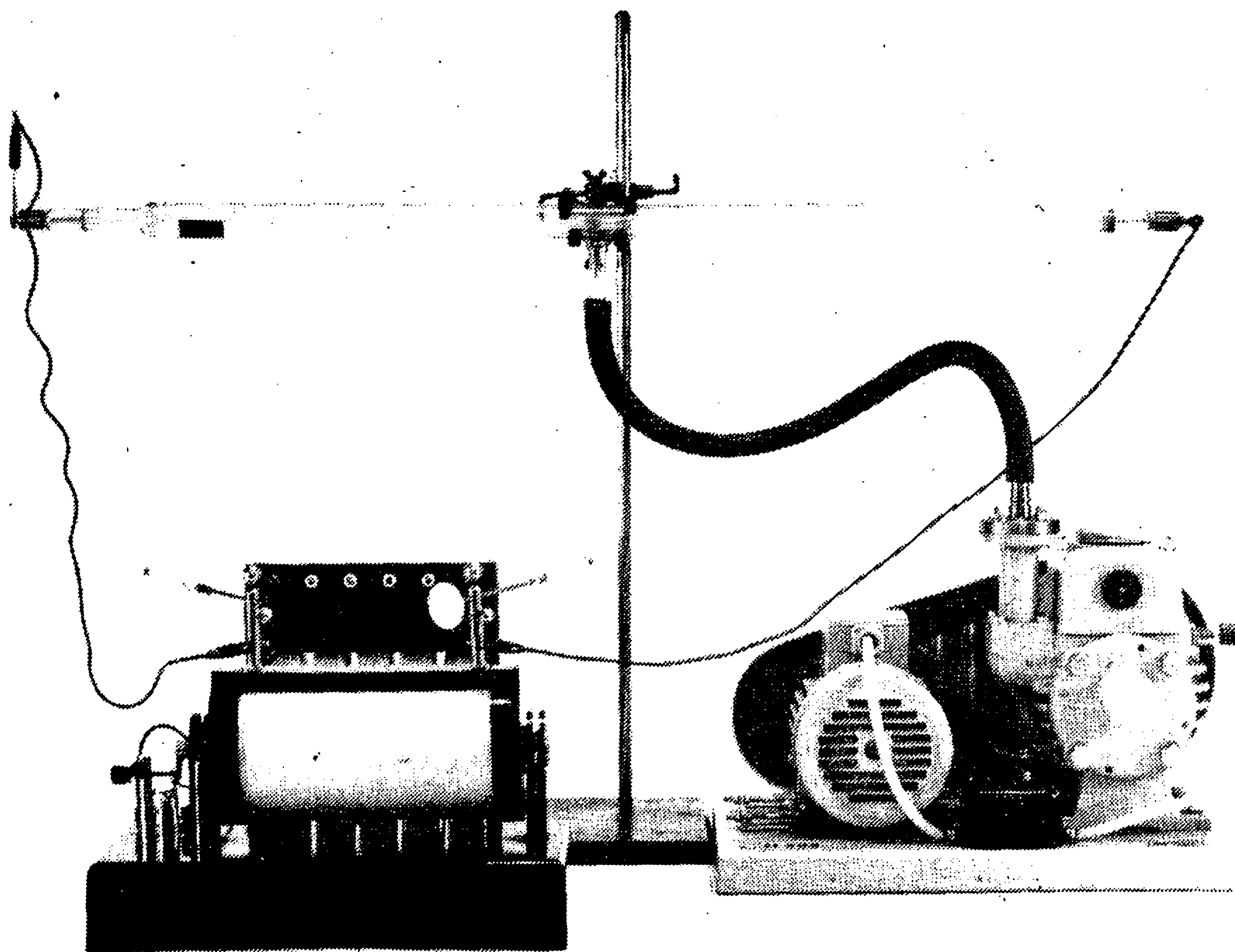
1. Opíšte vznik oblúkového výboja za normálneho tlaku a povedzte príklady technického využitia na základe poznatkov zo základnej školy.
2. Medzi aké druhy výboja by ste zaradili blesk?
3. Ako zistíme pomocou tlejivky kladnú svorku zdroja?

## 6.3 Katódové žiarenie

Vývoj elektrického výboja pri pozvoľnom zriedňovaní vzduchu môžeme pozorovať vo výbojovej trubici podľa obr. 6-6, ktorá je pripojená k výveve, aby sa mohol tlak spojite meniť. Na stabilizáciu výboja spájame sériovo s výbojkou rezistor s veľkým odporom (20 k $\Omega$  až 50 k $\Omega$ ).

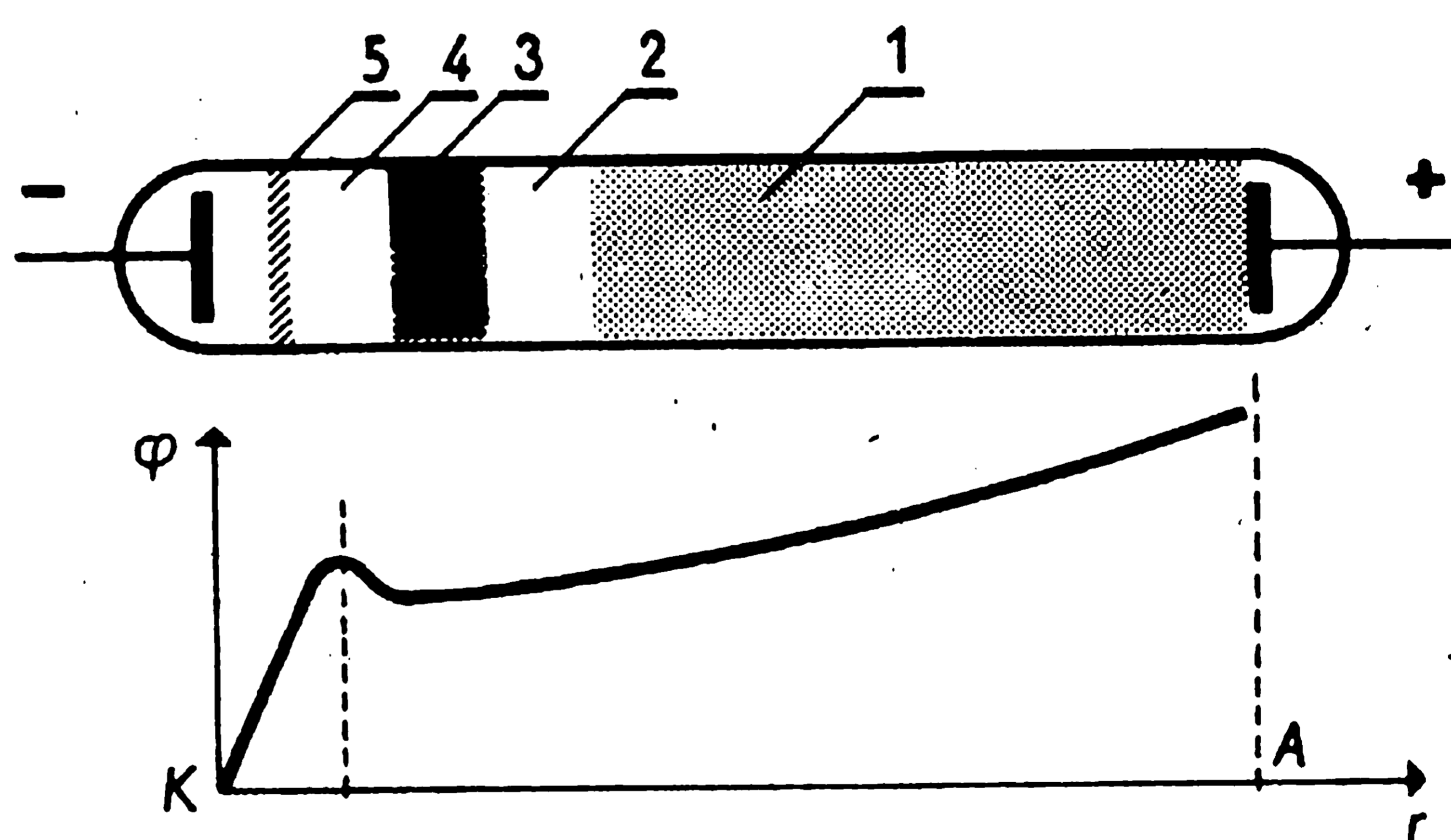
Pri dosiahnutí tlaku asi 670 Pa sa v trubici objaví tlejivý výboj s charakteristickými znakmi (obr. 6-7): Takmer celá trubica je zaplnená svietiacim plynom červenej farby (1) tzv. **anódovým svetlom**, ktoré je od modrastého **katódového svetla** (3) oddelené tmavým priestorom (2). V tesnej blízkosti katódy je tenká svietiaci vrstva (5) a pred ňou slabo svietiaci vrstva (4), ktorá sa kontrastne javí ako tmavá.

Výboje sa tvoria v oblasti katódy, kde je prudká zmena elektrického potenciálu. Tým sa kladné ióny veľmi urýchľujú a dopadom na katódu vyvolávajú uvoľnenie elektrónov z kovu katódy. Elektróny postupujú k anóde a ionizujú molekuly zriedeného plynu, čím sa tvoria nové elektróny a kladné ióny. Počet voľných elektrónov sa vzdialenosťou od katódy k anóde zväčšuje (elektrónová lavína).



**Obr. 6-6**

Demonštrácia závislosti výboja od tlaku plynu vo výbojovej trubici



**Obr. 6-7**

Tlejivý výboj v zriedenom plyne — charakteristické znaky: znázornenie zmeny elektrického potenciálu pozdĺž trubice

Anódové svetlo vzniká pôsobením voľných elektrónov na atómy plynu. Jeho farba závisí od použitého plynu a jeho tlaku v trubici. Výbojové trubice (uprostred vhodne zúžené) s anódovým svetlom sú vhodnými

zdrojmi svetla na spektrálne účely. Rovnako sa používajú na reklamu, lebo anódové svetlo sleduje všetky zakrivenia trubice.

Pri ďalšom zriedovaní vzduchu v trubici sa tmavé priestory rozširujú, intenzita svetla sa znižuje, až pri tlaku asi 2,5 Pa anódové svetlo zmizne. Aj tak trubicou prechádza elektrický prúd, ktorý sprostredkujú elektróny. Tieto elektróny vyletujú kolmo z katódy účinkom elektrického poľa a takmer bez zrážok doletia do priestoru anódy, kde spôsobia žltozelené svetielkovanie sklenej trubice. Ich dopadom sa anóda zahrieva. **Tok elektrónov z katódy vo vyčerpanej trubici nazývame katódové žiarenie.**

Energia katódového žiarenia (kinetická energia letiacich elektrónov) sa pri interakcii žiarenia s látkami mení na iné formy: mechanickú, vnútornú, svetelnú alebo energiu iného žiarenia.

V praxi sa zo súboru letiacich elektrónov vymedzuje úzky zväzok, ktorý sa nazýva **elektrónový lúč** (bez ohľadu na to, akým spôsobom nastalo uvoľnenie elektrónov).

S elektrónovými lúčmi sa pracuje takmer výlučne vo vákuu. Majú špecifické vlastnosti a mnohostranné praktické využitie:

1. **Ionizujú vzduch a ostatné plyny.** To sa využíva na získavanie iónov pre urýchľovače, v ktorých ióny získavajú veľké energie.

2. **Miesto dopadu sa zahrieva.** Prakticky sa to využíva pri tavení kovov a zvaraní elektrónovým lúčom.

3. **Prenikajú veľmi tenkými materiálmi a rozptyľujú sa.** Časť elektrónov sa pritom odrazí aj od povrchu, preto možno elektrónový lúč využiť na výskum povrchu pevných látok.

4. **Spôsobujú svetielkovanie látok.** Na tejto vlastnosti sú založené prístroje s obrazovkou, napr. televízny prijímač, osciloskop, rádiolokátor. Majú aj **chemické účinky** — pôsobia na fotografický materiál.

5. **Vyvolávajú neviditeľné röntgenové žiarenia**, ak dopadajú na kovové materiály s veľkou relatívnou atómovou hmotnosťou. Pomocou röntgenového žiarenia sa robia diagnostické vyšetrenia rozličných častí ľudského tela, zisťuje sa štruktúra kryštálov a defekty (trhliny) v materiáloch.

6. **Vychyľujú sa v elektrickom a magnetickom poli.** Táto vlastnosť sa využíva v prístrojoch s obrazovkou na záznam dynamických procesov.

S ďalšími vlastnosťami elektrónových lúčov a ich praktickými aplikáciami sa oboznámite vo vyšších ročníkoch.

## Úlohy

1. Možno predpokladať, že katódové žiarenia má aj mechanický účinok?
2. Vyjadrite silu, ktorou konštantné elektrické pole pôsobí na letiaci elektrón.
3. Akú rýchlosť získa elektrón pri dopade na anódu vo vyčerpanej trubici, ak potenciálny rozdiel medzi elektródami je 3 000 V a začiatočná rýchlosť elektrónu vzhľadom na povrch katódy je nulová? Hmotnosť elektrónu považujte za konštantu.  $[3,25 \cdot 10^{-31} \text{ kg}]$

## 6.4. Termoemisija elektrónov a jej praktické využitie

Voľné elektróny nemôžu opustiť kov, lebo sú priťahované kladnými iónmi. Ich potenciálna energia je vnútri kovu menšia ako na jeho povrchu. Keď však voľné elektróny získajú dostatočnú kinetickú energiu, napr. tepelnou výmenou alebo ožiarením, môžu kov opustiť.

**Uvoľňovanie elektrónov z povrchu pevných alebo kvapalných telies pri vysokej teplote nazývame termoemisija.**

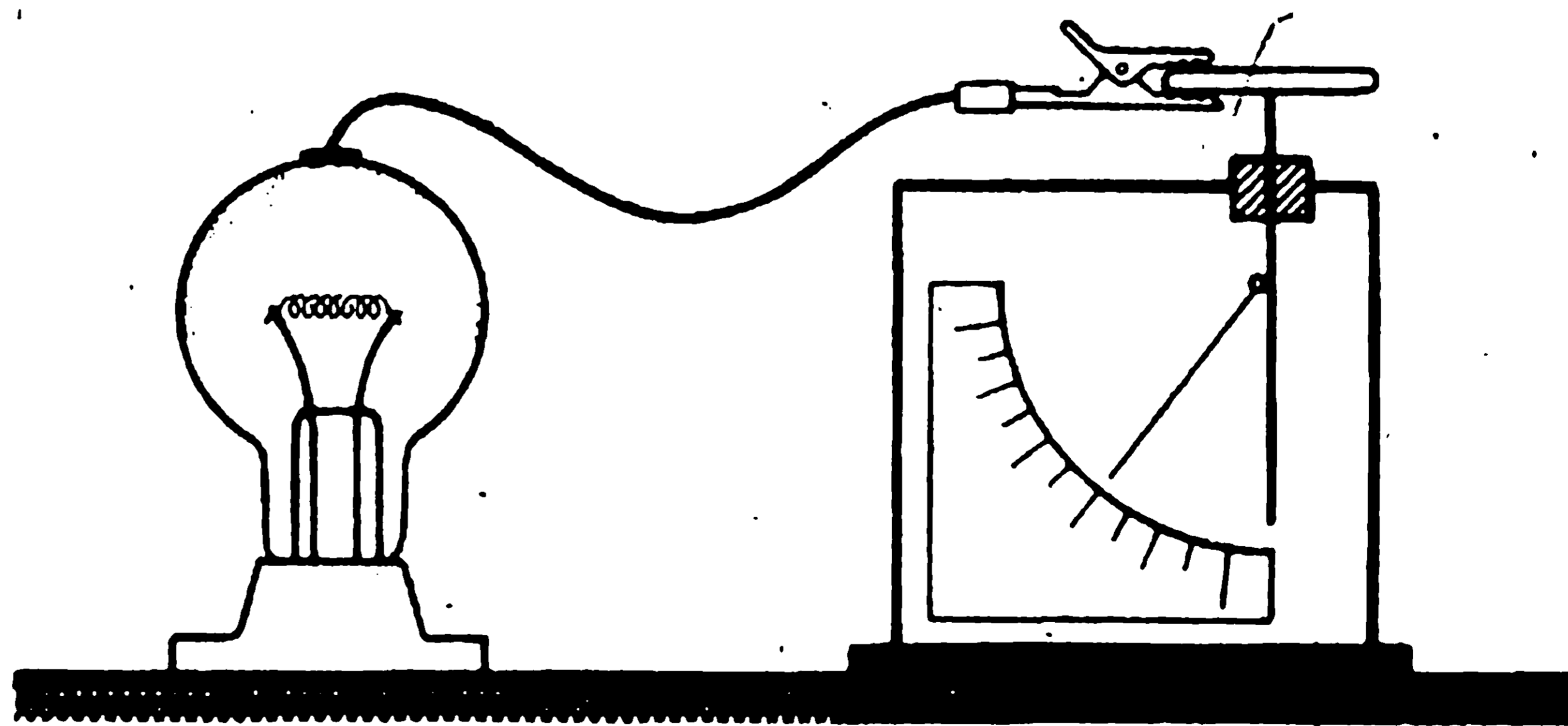
Mierou najmenej energie potrebnej na uvoľnenie elektrónu z kovu je **výstupná práca  $W$** . Hodnota tejto veličiny závisí od druhu kovu, čistoty jeho povrchu a môže ju ovplyvniť aj elektrické pole, v ktorom je kov. Napríklad v elektrickom poli s intenzitou veľkosti asi  $10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  vo vákuu je pre čistý volfrám  $W = 4,53 \text{ eV}$ . Keď sa povrch pokryje oxidom barnatým, bude  $W = 1,5 \text{ eV}$ .

Termoemisiu elektrónov môžeme demonštrovať napr. pomocou žiarovky s kovovým vláknom (obr. 6--8). Sklenú banku žiarovky zabalíme do staniolu tak, aby sa nedotýkal objímky, nabijeme ho kladným nábojom a vodivo spojíme s elektroskopom. Pri rozsvietení žiarovky pozorujeme, že výchylka elektroskopu klesne.

Termoemisija elektrónov sa prakticky využíva pri činnosti elektrónok. V nich sa priamo alebo nepriamo žeraví katóda a prúd elektrónov

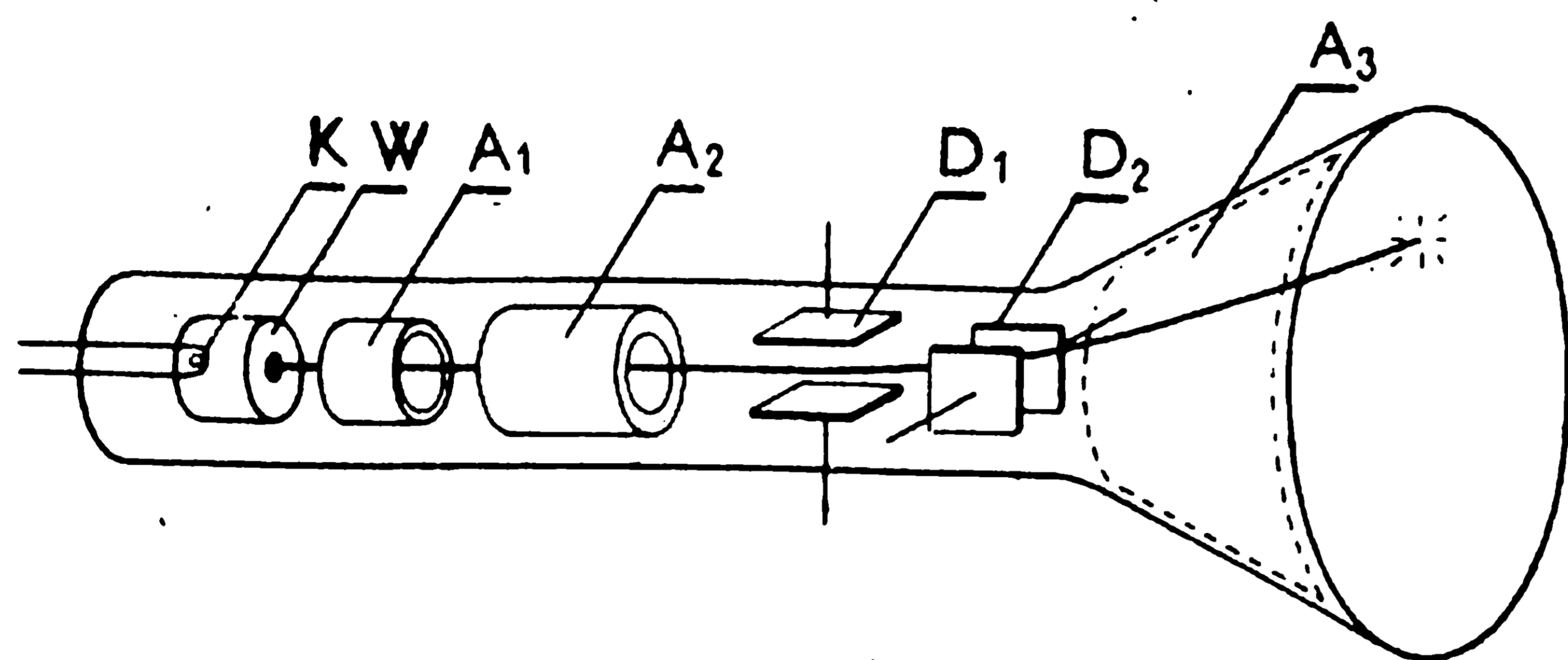
**Obr. 6-8**

Demonštrácia termoemisie elektrónov z rozžeraveného kovového vlákna žiarovky



od katódy k anóde v elektrickom poli sa riadi mriežkami. Mriežkami sú elektródy, ktoré sa vkladajú medzi anódu a katódu.

Najvýznamnejšou vákuovou elektrónkou je **obrazová elektrónka**, stručne **obrazovka** (obr. 6-9). Je to dokonale vyčerpaná sklenená trubica, ktorá má prednú stenu zvnútra pokrytú vrstvou ZnS s nepatrným množstvom Ag. Je to **tienidlo obrazovky**.

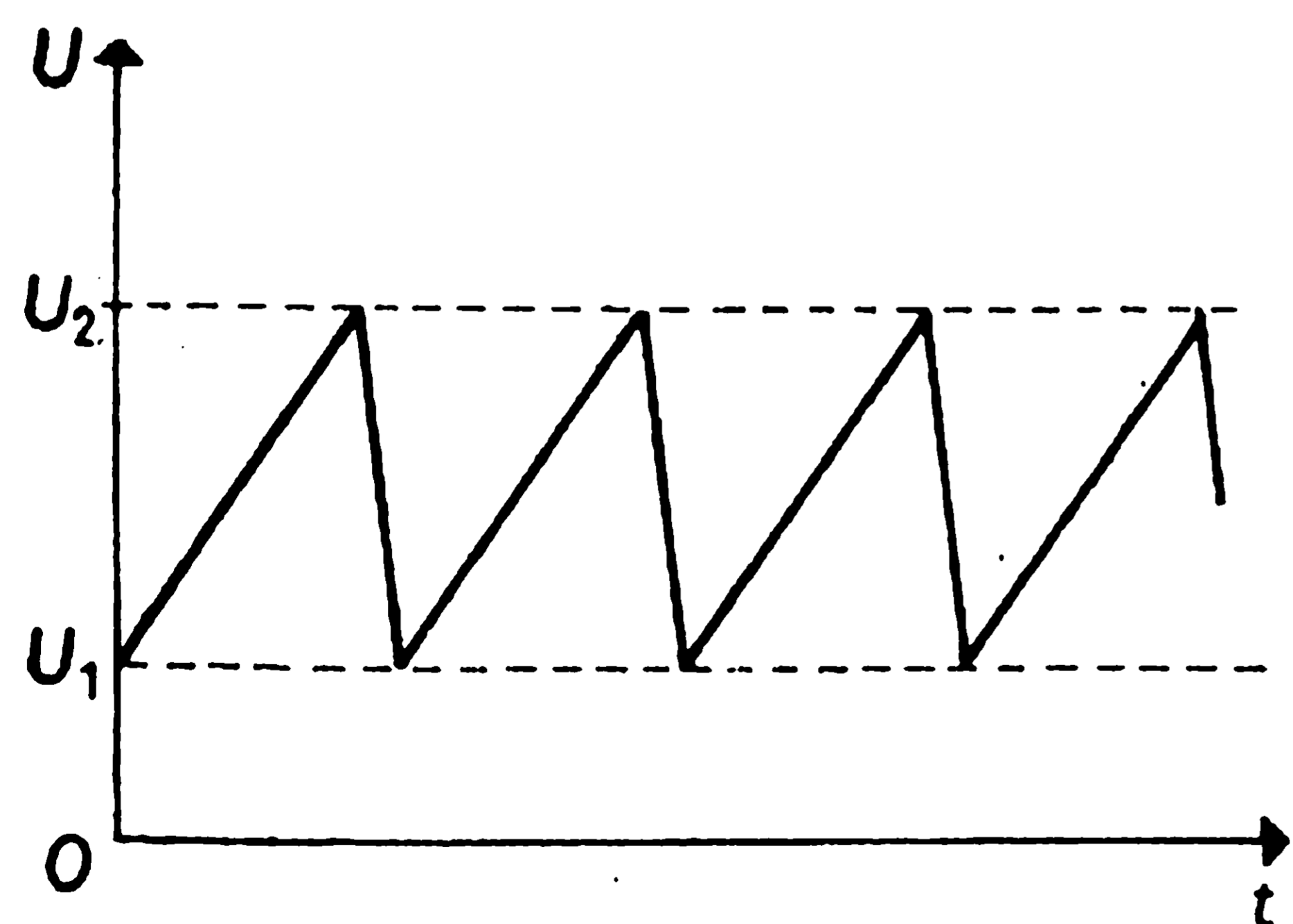


**Obr. 6-9**

Obrazová elektrónka —  
obrazovka

Zdrojom elektrónov je rozžeravené vlákno **katódy K** obklopené **radiacou elektródou obrazovky W** (tzv. Wehneltov valec) s malým kruhovým otvorom. Ním vyletujú elektróny v podobe elektrónového lúča a sú urýchľované elektrickým poľom, ktoré je medzi katódou a dvoma anódami  $A_1$ ,  $A_2$ . Potom sa elektrónový lúč dostáva do priestoru **vychyľovacieho systému obrazovky**. Sú to dva páry vychyľovacích doštičiek, ktoré postupne svojím elektrickým poľom vychyľujú elektrónový lúč do zvislého smeru  $D_1$  a vodorovného smeru  $D_2$ . Takto upravený elektrónový lúč sa ešte urýchľuje **urýchľovacou anódou  $A_3$**  a dopadá na tienidlo obrazovky, kde vyvolá svetielkovanie zasiahnutého miesta.

Na zvislé vychyľovacie platničky  $D_2$  privádzame tzv. **pílové napätie**, ktorého priebeh je na obr. 6-10. Každý elektrón je vychyľovaný vo vodorovnom smere s rovnakou frekvenciou s akou sa mení pílové napätie.



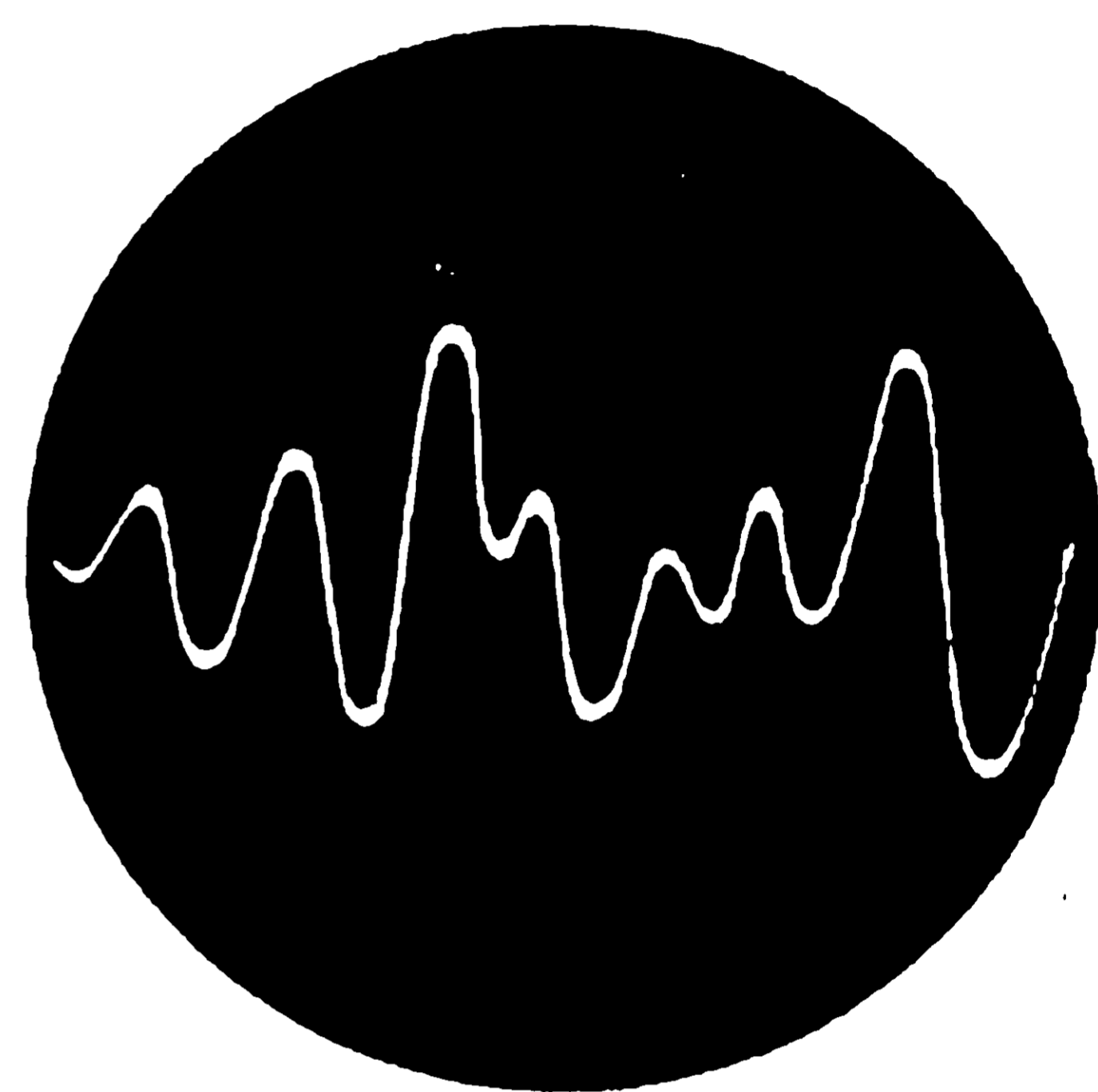
**Obr. 6-10**

Pílové kmity



Preto stopa elektrónového lúča utvorí na tienidle vodorovnú úsečku. Keď na vodorovné platničky  $D_1$  potom vložíme akékoľvek časovo premenné napätie, dostaneme na tienidle (pri vhodnej frekvencii pílového napätia) jeho časový priebeh.

Osciloskopické obrazovky sa využívajú na vizuálne pozorovanie časových priebehov elektrických signálov, ktoré sa získavajú pomocou rozličných snímačov. Snímače premieňajú zmeny neelektrických veličín na zmeny elektrického napätia. Záznam takmer nemá zotrvačnosť. Na obr. 6-11 je obrazovkou zachytený priebeh zvuku pri vyslovení samohlásky a.



**Obr. 6-11**

Prekreslený záznam z obrazovky pri vyslovení samohlásky „a“

Opísaná obrazovka sa odlišuje od televíznej obrazovky, v ktorej je elektrónový lúč vychyľovaný magnetickým poľom.

Obrazovka pracuje v súčinnosti s ďalšími elektronickými prvkami, ako sú napr. elektrónky, termistory, tranzistory, výbojky a pod. Podstatné je, že činnosť všetkých týchto prvkov je spojená s existenciou elektrónu. Preto časť fyziky, ktorá využíva poznatky o vlastnostiach elektrónu a jeho pohyboch v elektrickom a magnetickom poli, dostala priliehavý názov **elektronika**.

### Úlohy

1. Aký jav by sme pozorovali, keby sme v pokuse podľa obr. 6-8 nabili staniolový obal záporne alebo by sme obal vôbec nenabíli?
2. Elektrón má v kove kinetickú energiu  $12,8 \cdot 10^{-19}$  J a po termoemisii  $4,8 \cdot 10^{-19}$  J. Vypočítajte výstupnú prácu za predpokladu, že nenastala zrážka. [ $8 \cdot 10^{-19}$  J]
3. Elektrón s hmotnosťou  $m_e$  a nábojom  $e$  vletel medzi horizontálne vychyľovacie platničky rýchlosťou  $v$ . Za predpokladu, že medzi platničkami je homogénne elektrické pole s intenzitou veľkosti  $E$  a že zanedbáme vplyv tiažového poľa, určte: a) tvar trajektórie elektrónu medzi platňami; b) smer a veľkosť zrýchlenia elektrónu v elektrickom poli.

$$\left[ \text{Paraloba; smer ku kladnej platničke; } a = \frac{e E}{m_e} \right]$$

## ZHRNUTIE — ELEKTRICKÝ PRÚD V PLYNOCH A VO VÁKU

**Elektrický prúd v plynoch** je usporiadaný pohyb voľných iónov a elektrónov. Nazýva sa **výboj**. Elektrický prúd vedie iba **ionizovaný plyn**. Prostriedky, ktoré vyvolajú **ionizáciu**, sú **ionizátory**.

Pri ionizácii molekuly konajú vonkajšie sily **ionizačnú prácu**. Najmenšia energia potrebná na túto prácu je **ionizačná energia**.

Výboj v plynoch je buď **samostatný** alebo **nesamostatný**. Nesamostatný výboj sa udržiava iba počas pôsobenia ionizátora, samostatný výboj pokračuje aj po odstránení ionizátora. Elektrické napätie, pri ktorom vznikne samostatný výboj, je **zápalné napätie**.

Graf závislosti prúdu od napätia, ktoré je na elektródach vložených do plynu, nazýva sa **voltampérová charakteristika výboja**.

Samostatný výboj rozdeľujeme na **tlejivý, oblúkový, iskrový a korónu**.

Tok elektrónov z katódy vo vyčerpanej trubici nazývame **katódové žiarenie**. Prúdiace elektróny predstavujú elektrický prúd. Tok prúdiacich elektrónov sústredených do úzkeho zväzku sa nazýva **elektrónový lúč**.

Katódové žiarenie a elektrónové lúče majú zhodné vlastnosti: ionizujú plyny, môžu prenikať veľmi tenkými materiálmi a rozptyľovať sa, majú tepelné, mechanické a chemické účinky, spôsobujú svetielkovanie látok. Pri dopade na kovové materiály s veľkou relatívnou atómovou hmotnosťou vyvolávajú **röntgenové žiarenie**. Katódové žiarenie a elektrónové lúče sa vychylujú v elektrickom a magnetickom poli.

**Termoemisiou** nazývame uvoľňovanie elektrónov z povrchu pevných alebo kvapalných telies pri vysokej teplote. Mierou najmenej energie potrebnej na uvoľnenie elektrónu je **výstupná práca**. Termoemisia sa využíva v elektrónkach. Najvýznamnejšou vákuovou elektrónkou je **obrazovka**.

# CVIČENIA Z FYZIKY

## Cvičenie 1 (1. teoretické)

### Úlohy na pohyb nabitej častice v elektrickom poli

Pri riešení úloh predpokladajte pohyb elektricky nabitej častice vo vákuu a počítajte s približnými hodnotami pre elementárny náboj  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  a hmotnosť  $m_e = 9,10^{-31} \text{ kg}$ .

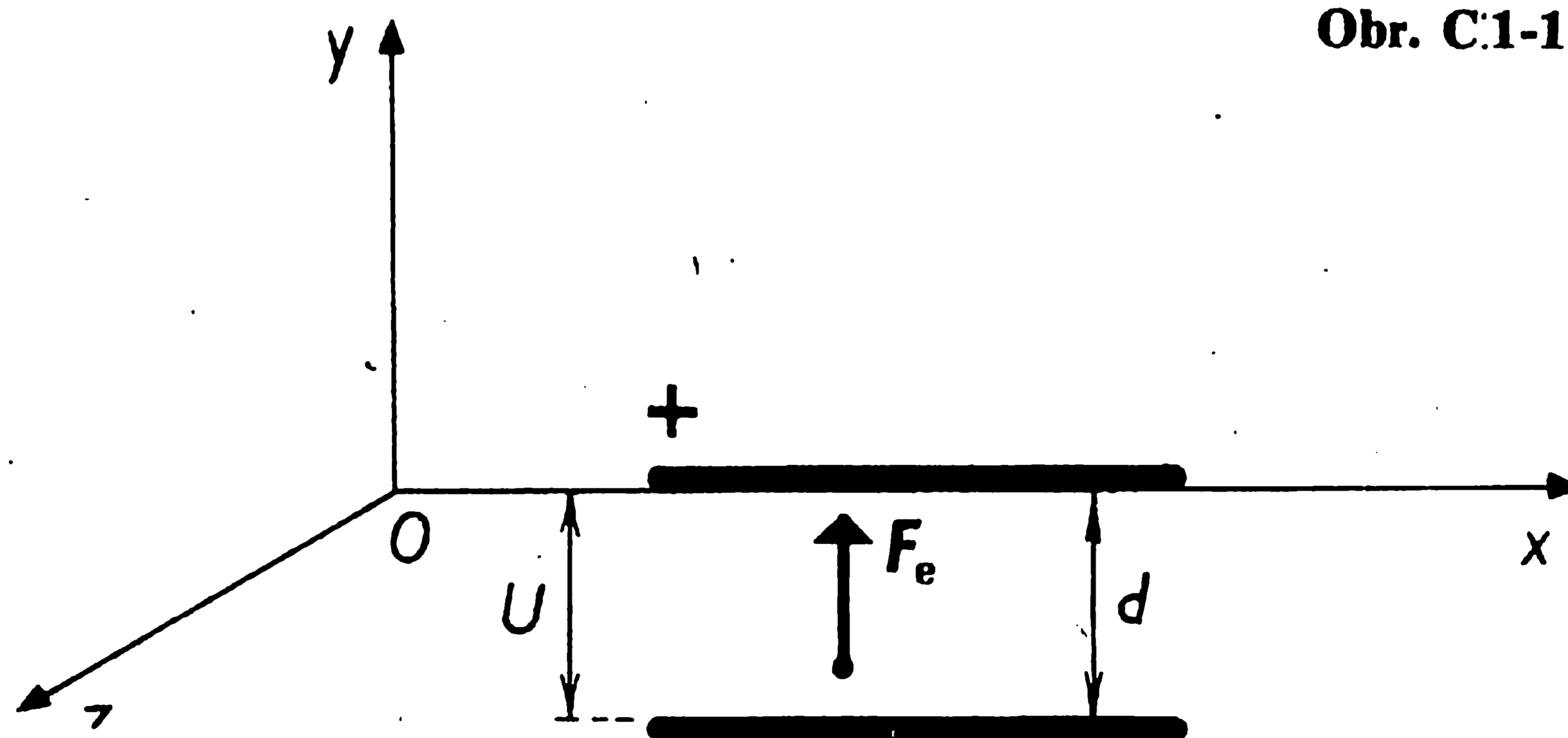
#### Príklad 1

Medzi dvoma rovnobežnými kovovými platňami, z ktorých jedna je nabitá kladne, druhá záporne, je elektrické napätie 100 V. Vzďialenosť platní je 5,0 cm. V istom okamihu vystúpi zo záporne nabitej platne elektrón s nulovou začiatočnou rýchlosťou a začne sa silovým pôsobením homogénneho elektrického poľa pohybovať ku kladnej platni. Určte: a) veľkosť rýchlosti dopadu elektrónu na kladne nabitú platňu; b) čas pohybu elektrónu elektrickým polom.

#### Riešenie

$$U = 100 \text{ V}, d = 5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}, v = ?, t = ?$$

Zvolíme vzťažnú sústavu  $Oxyz$  spojenú s kondenzátorom podľa obr. C 1-1. V homogénnom elektrickom poli pôsobí na elektrón konštantná elektrická sila  $F_e$  s veľkosťou  $F_e = e |\mathbf{E}| = e \frac{U}{d}$ , kde  $|\mathbf{E}|$  je veľkosť intenzity



Obr. C:1-1

elektrického poľa. Pôsobením konštantnej sily  $F_e$  koná elektrón rovnomerne zrýchlený pohyb so zrýchlením, ktoré má veľkosť  $a = \frac{F_e}{m} = \frac{e U}{m d}$ , kde  $m$  je hmotnosť elektrónu.

Za čas  $t$  prejde elektrón dráhu  $d = \frac{1}{2} a t^2$  a dosiahne rýchlosť  $v = a t$ .

Z rovníc pre dráhu a rýchlosť určíme hľadané veličiny.

a) Veľkosť rýchlosti elektrónu pri dopade na kladnú platňu

$$v = \sqrt{2 a d} = \sqrt{\frac{2 e U}{m}} = \sqrt{\frac{2 e}{m}} \sqrt{U}$$

Pretože výraz  $\sqrt{\frac{2 e}{m}}$  je konštantný, vidíme, že veľkosť rýchlosti dopadu elektrónu je iba funkciou napätia  $U$ , ktorým je elektrón v elektrickom poli urýchľovaný.

b) Čas pohybu elektrónu v elektrickom poli

$$t = \sqrt{\frac{2 d}{a}} = \sqrt{\frac{2 m d^2}{e U}} = \sqrt{\frac{2 m}{e}} \cdot \frac{d}{\sqrt{U}}$$

Čas pohybu elektrónu je funkciou napätia  $U$  a vzdialenosti platní  $d$ . Pre dané hodnoty napätia  $U$  a vzdialenosti platní  $d$  dostaneme rýchlosť dopadu  $v = 5,9 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a čas  $t = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ .

## Príklad 2

Elektrón sa pohybuje v homogénnom elektrickom poli z hladiny potenciálu 200 V na hladinu potenciálu 300 V. Začiatočná rýchlosť elektrónu je nulová. Určte: a) prírastok kinetickej energie elektrónu pri jeho prechode medzi oboma hladinami potenciálu; b) veľkosť rýchlosti elektrónu na hladine potenciálu 300 V.

### Riešenie

$$\underline{\varphi_1 = 200 \text{ V}, \varphi_2 = 300 \text{ V}, v_0 = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta E_k = ?, v = ?}$$

Elektrón zväčší svoju kinetickú energiu tým, že sily elektrického poľa vykonajú pri premiestení elektrónu z hladiny potenciálu  $\varphi_1$  na hladinu potenciálu  $\varphi_2$  prácu

$$W = e |\varphi_2 - \varphi_1| = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

Táto práca predstavuje prírastok kinetickej energie

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2) = \frac{1}{2} m v^2 = e |\varphi_2 - \varphi_1|$$

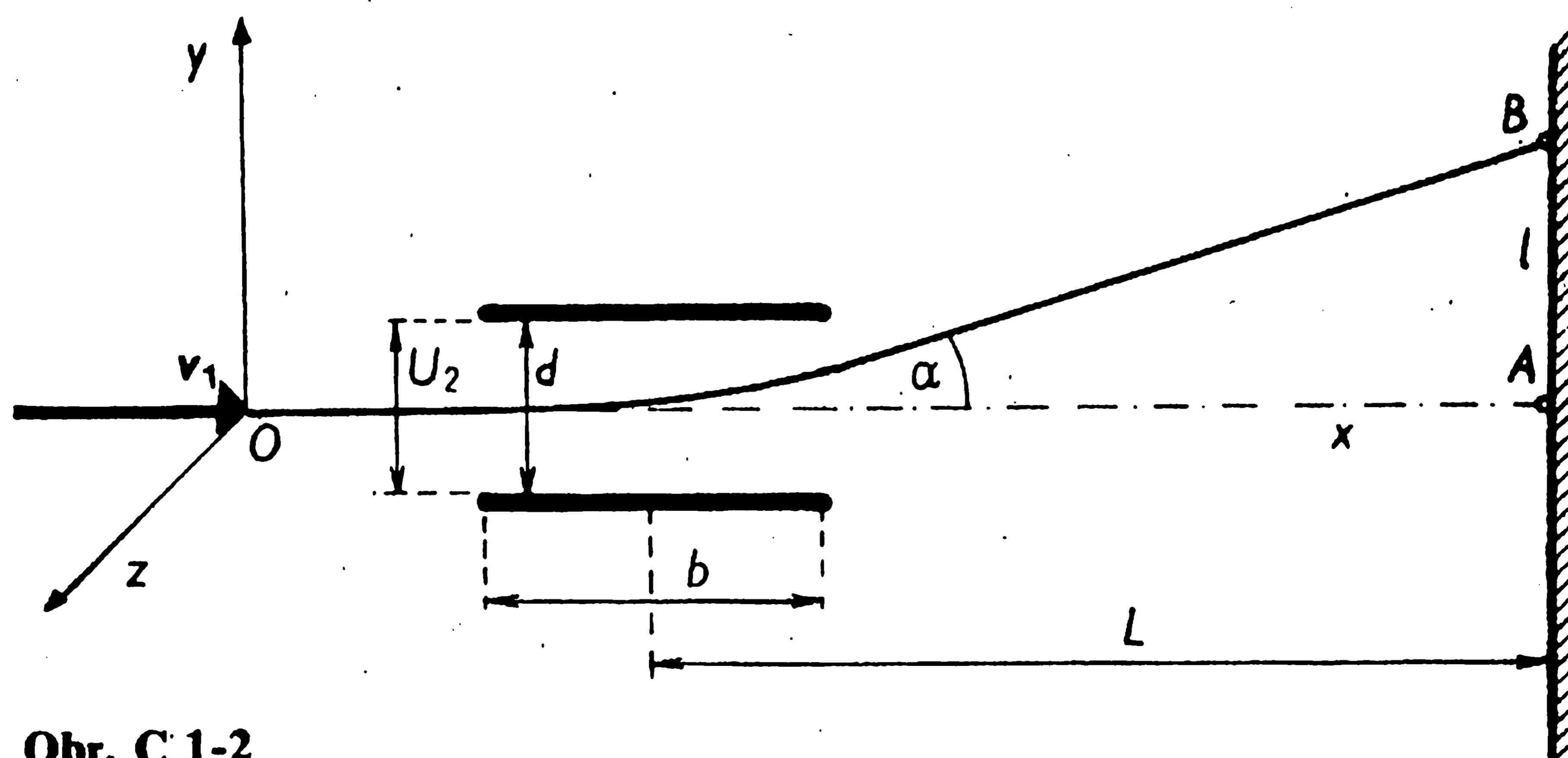
kde  $m$  je hmotnosť elektrónu. Z toho veľkosť jeho konečnej rýchlosti

$$v = \sqrt{\frac{2e |\varphi_2 - \varphi_1|}{m}} \doteq 6 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kinetická energia elektrónu sa pri prechode medzi dvoma potenciálnymi hladinami zvýšila o  $1,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ . Elektrón pritom nadobudol rýchlosť  $6 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Príklad 3.

Do homogénneho elektrického poľa medzi dvoma vodorovnými vodičnými platňami vletí elektrón v rovnobežnom smere s rovinami platní (obr. C 1-2). V elektrickom poli sa zakriví trajektória elektrónu tak, že sa po jeho dopade na tienidlo objaví stopa B vo vzdialenosti  $l$  od stopy A priamej trajektórie elektrónu nevychýleného elektrickým poľom. Určte



Obr. C 1-2

vzdialenosť  $l$ , ak je dané napätie  $U_1$ , ktorým sa elektrón pred vstupom do vychyľovacieho poľa urýchľuje, napätie  $U_2$  medzi platňami, vzdialenosť  $d$  platní, dĺžka  $b$  vychyľovacieho poľa a vzdialenosť  $L$  tienidla od stredu vychyľovacieho poľa.

### Riešenie

Zvolíme vzťažnú sústavu  $Oxyz$  spojenú s platňami podľa obr. C 1-2. Elektrón vstupuje do homogénneho poľa medzi platňami rýchlosťou  $v_1$ , na ktorú sa najprv urýchlil napätím  $U_1$ . Veľkosť rýchlosti  $v_1$  je podľa vzťahu z príkladu 1

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 e U_1}{m}}$$

Pri prelete vychyľovacím poľom získa elektrón v kolmom smere rýchlosť  $v_2$ . Pre veľkosť tejto rýchlosti platí  $v_2 = a t$ , kde  $a$  je zrýchlenie, ktoré udáva elektrónu elektrická sila  $F_e$  a  $t$  je čas jeho preletu vychyľovacím poľom. Veľkosť zrýchlenia je podľa ďalšieho vzťahu z príkladu 1

$$a = \frac{e U_2}{m d}$$

kde  $U_2$  je napätie medzi platňami a  $d$  vzdialenosť platní. Vzhľadom na to, že sa elektrón pohybuje vychyľovacím poľom dĺžky  $b$  v smere osi  $x$  rovnomerne, je čas jeho preletu poľom  $t = \frac{b}{v_1}$ . Po dosadení zrýchlenia  $a$  a času  $t$  do vzťahu  $v_2 = a t$  dostaneme

$$v_2 = \frac{a U_2 b}{m d v_1}$$

Možno dokázať, že v homogénnom poli medzi platňami sa trajektória elektrónu odchyli od vodorovného smeru o uhol  $\alpha$ , pre ktorý platí

$\text{tg } \alpha = \frac{v_2}{v_1}$ . Po dosadení za rýchlosti  $v_1$  a  $v_2$

$$\text{tg } \alpha = \frac{b U_2}{2 d U_1}$$

Vidíme, že elektrón sa v homogénnom poli vychýľuje v závislosti od rozmerov vychýľovacej sústavy (od dĺžky  $b$  vychýľovacieho poľa a od vzdialenosti platní  $d$ ) a v závislosti od napätia  $U_1$  a  $U_2$ . Pretože vo vzťahu pre  $\text{tg } \alpha$  sa nevyskytujú veličiny  $e$  a  $m$ , vychýľujú sa v elektrickom poli akékoľvek nabité častice o rovnaký uhol.

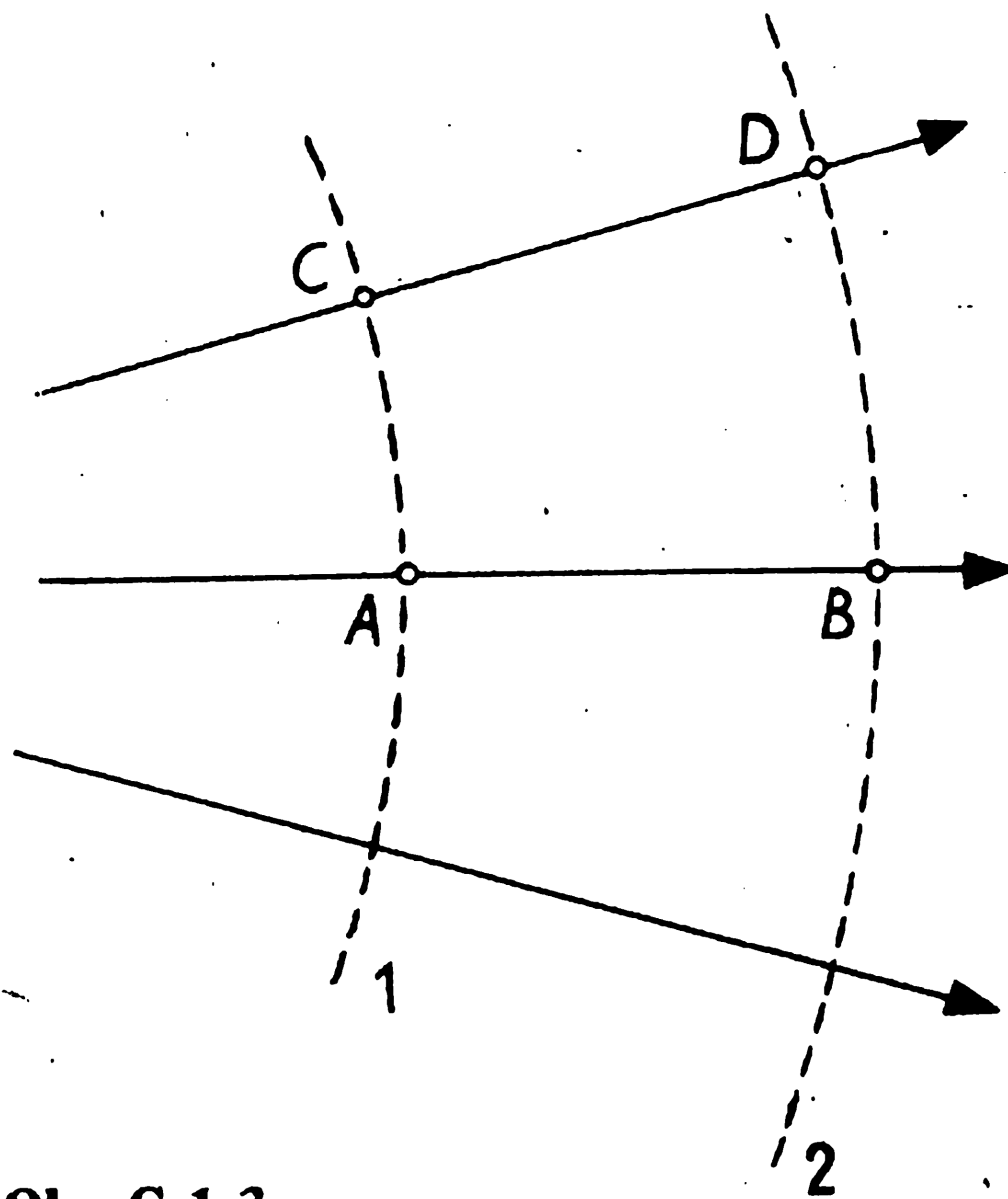
Z obr. C 1-2 vyplýva, že  $\text{tg } \alpha = \frac{l}{L}$ . Z toho hľadaná vzdialenosť  $l = L \text{ tg } \alpha$  a po dosadení odvodeného vzťahu pre  $\text{tg } \alpha$

$$l = \frac{b L U_2}{2 d U_1}$$

Uvedený príklad patrí k základným úlohám elektrónovej balistiky, ktorá skúma pohyby elektrónov alebo iných nabitých častíc v silových poliach. Poznatky elektrónovej balistiky sú významné pre konštrukciu obrazoviek televízorov a osciloskopov.

## Úlohy

1. Častica  $\alpha$  s hmotnosťou  $6,7 \cdot 10^{-27}$  kg a s elektrickým nábojom  $3,2 \cdot 10^{-19}$  C vletela do homogénneho elektrického poľa rýchlosťou  $v_0$  opačného smeru, ako je intenzita poľa  $E$ . Častica sa zastavila po preletení dráhy 2,0 m. Veľkosť začiatkovej rýchlosti je  $v_0 = 2 \cdot 10^6$  m.s<sup>-1</sup>. Určte: a) aký veľký potenciálny rozdiel častica prekonala; b) akú veľkosť má intenzita elektrického poľa. [ $4,2 \cdot 10^4$  V;  $2,1 \cdot 10^4$  V.m<sup>-1</sup>]
2. V homogénnom elektrickom poli, ktorého intenzita má veľkosť  $1$  kV.m<sup>-1</sup>, premiesti sa voľná častica s nábojom  $25 \cdot 10^{-9}$  C po dráhe 2,0 m. Určte: a) prácu, ktorú vykonajú sily elektrického poľa pri premiestení častice; b) elektrické napätie medzi začiatočným a koncovým bodom jej dráhy. [ $5 \cdot 10^{-5}$  J; 2 kV]
3. Akú veľkú prácu vykonajú sily elektrického poľa pri premiestení častice s kladným elektrickým nábojom  $20 \mu\text{C}$  z hladiny potenciálu 700 V na hladinu potenciálu 100 V? [ $12 \cdot 10^{-3}$  J]
4. Na obr. C 1-3 sú zakreslené siločiarly elektrického poľa a ekvipotenciálne plochy 1, 2. a) Ktorá plocha má väčší potenciál? b) V ktorom z bodov A a B je intenzita poľa väčšia? Odpovede zdôvodnite.



Obr. C. 1-3

5. V elektrickom poli na obr. C. 1-3 premiestime časticu s kladným nábojom z bodu *B* postupne do každého z bodov *A*, *C*, *D*. Porovnajme práce vykonané pri jednotlivých premiesteniach.

## Cvičenie 2 (1. laboratórne)

### Meranie elektrického napätia a elektrického prúdu

*Pomôcky:* univerzálny merací prístroj (Avomet alebo Metra DU 10), zdroj jednosmerného napätia (napr. akumulátor, plochá batéria, rozvodná doska), žiarovka na malé napätie, spojovacie vodiče, spínač.

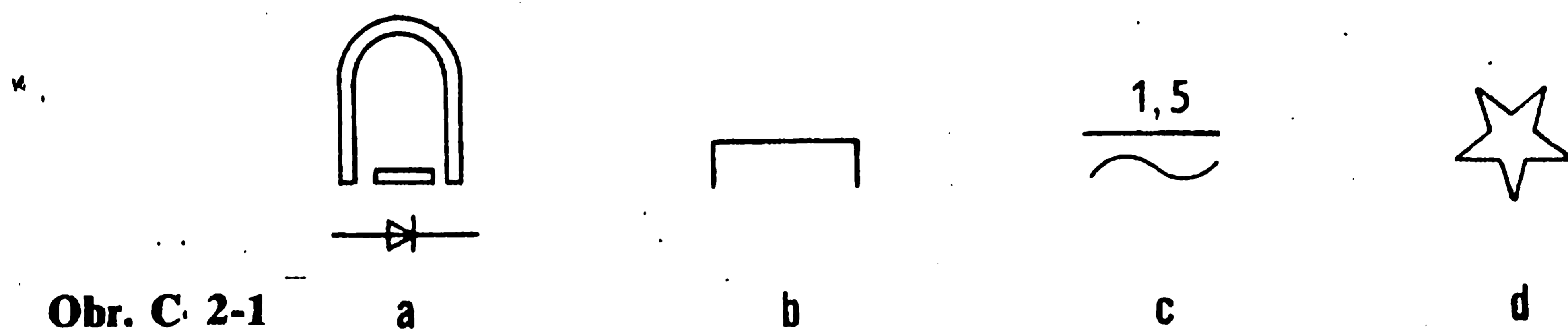
*Teoretická príprava úlohy:* Pri meraní elektrických veličín, napr. napätia, prúdu, odporu musíme dodržiavať niekoľko všeobecne platných zásad pri zostavovaní elektrických obvodov a pri vlastnej práci s meracími prístrojmi.

Základnými prístrojmi na meranie elektrických veličín sú ampérmeter na meranie prúdu a voltmeter na meranie napätia. Univerzálne prístroje



(napr. Avomet, DU 10) sú konštrukčne vyhotovené tak, že ich možno použiť ako ampérmeter aj voltmeter. Nameranú hodnotu ukazuje na stupnici ručička s nožovým ukončením. Aby odčítanie nameranej hodnoty nebolo zafaržené chybou z úkosu (paralaxou), ktorá vzniká, keď sa nedívame na stupnicu kolmo, má stupnica po celej dĺžke zrkadlo. Potom sa pri odčítaní musíme pozerať na stupnicu tak, aby sa ručička kryla so svojím obrazom v zrkadle.

Na stupnici meradla sú okrem vlastnej stupnice aj značky výrobcu a znaky meranej jednotky, značky obsahujúce informácie o meracej sústave, polohe prístroja pri meraní, použití prístroja, triede presnosti, skúšobnom napätí a pod. Najčastejšie značky sú na obr. C-2-1. Tieto značky obsahujú v skratke návod na použitie prístroja a musíme im venovať patričnú pozornosť pri výbere prístroja a pri práci s ním. Na obr. C-2-1 jednotlivé značky znamenajú: a) systém s otočnou cievkou



a usmerňovačom; b) vodorovná poloha stupnice pri meraní; c) trieda presnosti 1,5; možno merať striedavé aj jednosmerné napätie (prúd); d) skúšobné napätia 500 V.

Podmienkou správneho merania v elektrickom obvode je kvalitné elektrické spojenie všetkých prvkov v obvode. Preto venujeme pozornosť spojovacím vodičom, ktoré pred zapojením prekontrolujeme na skúšobnom paneli. Obvod treba zapájať opatrne, aby sa konce vodiča (banániky) nedeformovali a nepoškodili pružný dotyk zabezpečujúci kvalitné spojenie v zdierke. Výhodné je použiť farebné vodiče, aby sa rozlíšili jednotlivé obvody.

Kým začneme merať, musíme preštudovať návod k úlohe, nakresliť schému zapojenia, zhromaždiť potrebné prístroje a spojovacie vodiče. Prístroje aj ostatné zariadenie rozmiestime na pracovnom stole tak, aby zapojenie bolo prehľadné. Časti obvodu, s ktorými pri meraní nebudeme manipulovať, umiestime ďalej od seba, spínače, regulačné rezistory musia

byť naopak ľahko dosiahnuteľné. Meracie prístroje rozložíme tak, aby sme mohli pohodlne a správne čítať výchylky ukazovateľov meradiel.

Obvod zapájame podľa nakreslenej schémy. Vychádzame vždy od jednej svorky zdroja, postupne zostavíme základný obvod, až potom pripájame paralelné obvody (napr. voltmeter). Na regulačnom rezistore nastavíme najväčší odpor, na meracích prístrojoch nastavíme najväčší rozsah (na voltmetri rozsah, ktorý zodpovedá napätiu zdroja). Zostavený obvod nikdy nepripojíme hneď na zdroj, ale ho skontrolujeme najprv sami, potom vyučujúci. Obvod uzavrieme spínačom. Keď sú výchylky meracích prístrojov (najmä ampérmetrov) veľmi veľké, ihneď zdroj odpojme a prekontrolujeme spojenie.

Keď namerané hodnoty napätia a prúdu zodpovedajú vopred odhadnutým hodnotám, upravíme rozsah meracích prístrojov. Rozsah volíme tak, aby výchylky ručičiek boli dostatočne veľké a aby bolo možné čítať v druhej polovici stupnice (okrem meraní, pri ktorých hodnotu meranej veličiny zväčšujeme od nuly do maximálnej výchylky). Namerané hodnoty zapisujeme do protokolu o meraní.

Pri práci s elektrickým obvodom dbáme na pravidlá o bezpečnosti pri práci. Nedotýkame sa odizolovaných častí obvodu, pracujeme iba s dovoleným bezpečnostným napätím a prúdom. Akékoľvek úpravy v elektrickom obvode robíme iba pri odpojenom zdroji a po každej zmene a úprave obvodu požiadame vyučujúceho, aby zapojenie skontroloval.

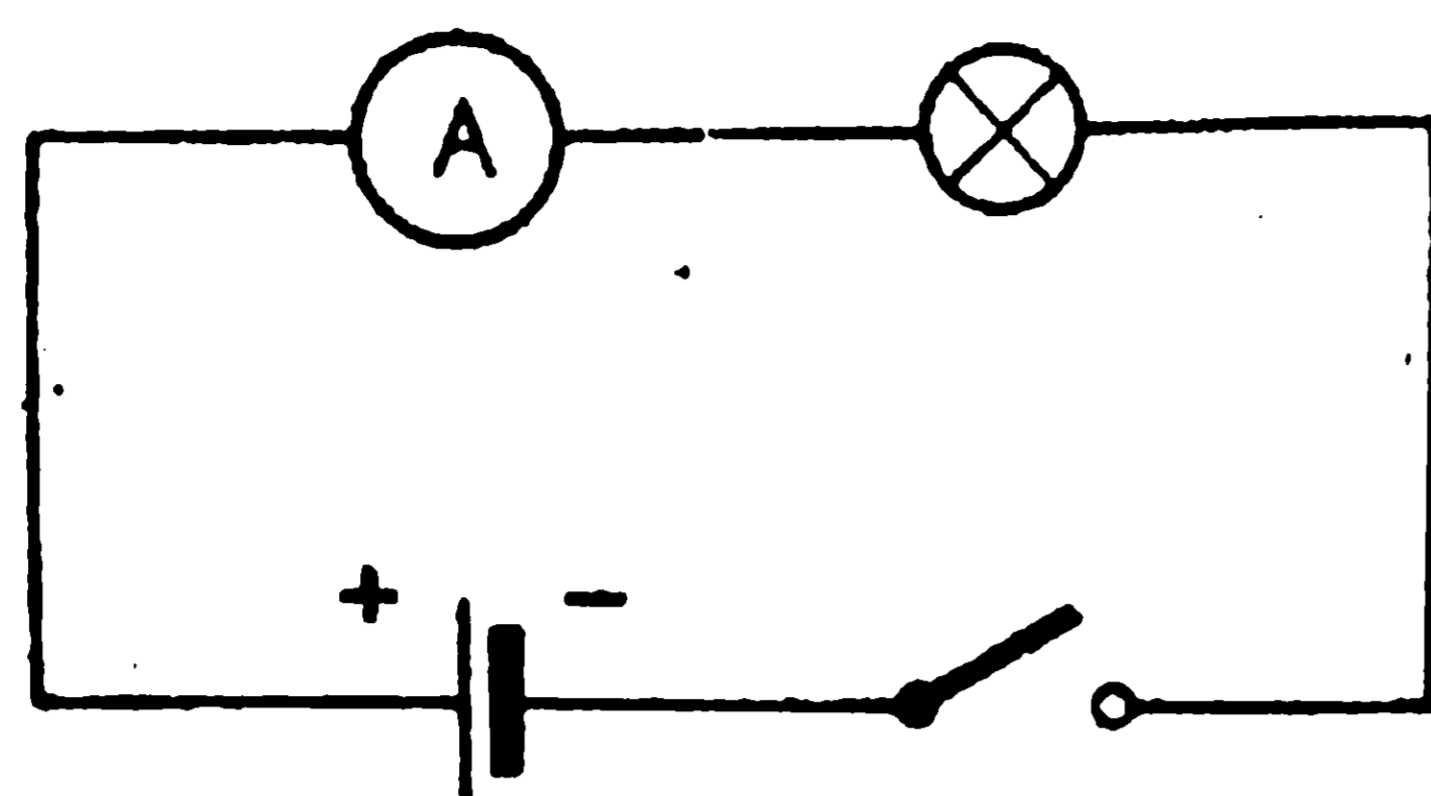
Po skončení merania vyučujúci musí prekontrolovať namerané hodnoty a dať súhlas na rozobratie obvodu. Na pracovisku urobíme poriadok, urovnáme spojovacie vodiče, na meracích prístrojoch nastavíme najväčší rozsah.

### **Meranie napätia a prúdu**

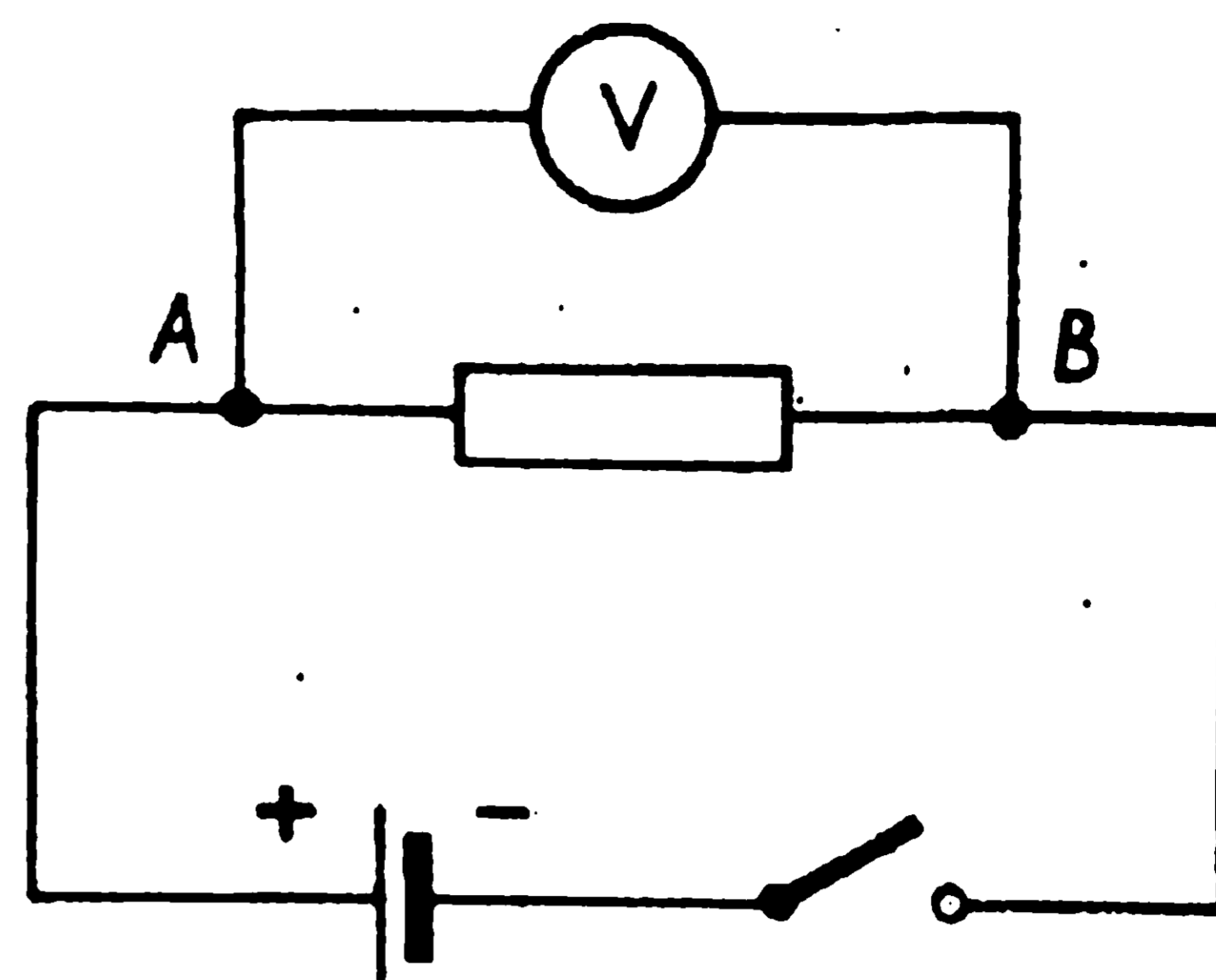
Elektrický prúd meriame ampérmetrom pri základnom zapojení podľa obr. C2-2a. Keďže vnútorný odpor ampérmetra je veľmi malý, nesmieme ho nikdy pripojiť bez spotrebiča priamo na zdroj. Pri meraní jednosmerného prúdu musíme dbať, aby sme dodržali správnu polaritu prístroja vzhľadom na zdroj napätia. Rozsah ampérmetra možno zväčšiť sústavou paralelne spojených bočníkov priamo v prístroji.

Elektrické napätie meriame voltmetrom pripojeným k miestam, v ktorých meriame rozdiel potenciálov (obr. C2-2b). Voltmeter má mať čo

Obr. C2-2



a



b

najväčší vnútorný odpor, aby ním prechádzal minimálny prúd, ktorý významne nezmení prúdové pomery v danej vetve obvodu. Rozsah voltmetra možno rozšíriť predradnými rezistormi spojenými sériovo s meracou sústavou prístroja. Aj tieto rezistory sú priamo v prístroji.

### *Chyby pri meraní napätia a prúdu*

Pri meraní napätia a prúdu vznikajú chyby merania, ktoré sa skladajú z chyby metódy, chyby prístroja a chyby pri odčítaní.

**Chyba metódy** je spôsobená tým, že meracie prístroje majú vplyv na merané hodnoty napätia a prúdu. Zaradenie ampérmetra do obvodu spôsobuje zmenšenie prúdu, ktorý sme chceli merať. Keď má byť táto chyba zanedbateľná, musí byť odpor ampérmetra oveľa menší, ako je súčet odporov vonkajšej časti obvodu a vnútorného odporu zdroja. Podobne paralelným spojením voltmetra s daným spotrebičom sa mení prúd odoberaný zo zdroja, čím sa mení aj merané napätie. Ak má byť táto chyba zanedbateľná, musí byť odpor voltmetra oveľa väčší ako odpor spotrebiča.

**Chyba prístroja** závisí iba od konštrukcie a stavu daného prístroja. Táto chyba je podmienená mnohými čiastkovými chybami, napr. chybou vyvolanou trením, nesprávnym vyvážením otočnej časti prístroja, nesprávnym delením alebo umiestením stupnice zvyškovou deformáciou pružín a pod. Tieto okolnosti prístroja sa hodnotia už vo výrobe a prístroj sa zaradí do istej triedy presnosti, ktorá vyjadruje jeho presnosť.

**Trieda presnosti** vyjadruje v percentách pomer dovolenej chyby prístroja (t. j. šírky intervalu, v ktorom leží správna hodnota meranej veličiny pri zachovaní všetkých pravidiel merania) a jeho menovitej hodnoty (t. j.

najväčšej hodnoty, ktorú možno odčítať na stupnici prístroja). To značí, že trieda presnosti vlastne vyjadruje relatívnu odchýlku merania spôsobenú prístrojom. Neurčuje teda presnosť jednotlivých meraní, ale iba dáva dosiahnuteľný stupeň presnosti pri zachovaní všetkých pravidiel merania. Výrobca meracieho prístroja zaručuje, že relatívna odchýlka spôsobená prístrojom neprekročí istú dovolenú hranicu.

Keď označíme  $U$  nameranú hodnotu napätia,  $U_j$  menovitú hodnotu napätia,  $\Delta U$  odchýlku merania napätia,  $\delta U$  relatívnu odchýlku merania napätia a  $\delta_p$  triedu presnosti prístroja, potom

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U} 100 \%, \quad \delta_p = \frac{\Delta U}{U_j} 100 \%$$

Rozšírením relatívnej odchýlky výrazom  $\frac{U_j}{U_j}$  dostaneme

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U} \cdot \frac{U_j}{U_j} 100 \% = \frac{\Delta U}{U_j} \cdot 100 \cdot \frac{U_j}{U} \%$$

alebo

$$\delta U = \delta_p \frac{U_j}{U} \%$$

Analogicky pre prúd  $\delta I = \delta_p \frac{I_j}{I} \%$ .

Podľa týchto vzťahov potom určujeme relatívnu odchýlku merania napätia a prúdu.

#### Príklad

Na voltmetri triedy presnosti  $\delta_p = 2,5$  a s menovitou hodnotou  $U_j = 60$  V odčítame napätie  $U = 45$  V. Relatívna odchýlka merania napätia je

$$\delta U = 2,5 \frac{60}{45} \% = 3,3 \%$$

Odchýlka merania napätia je

$$\Delta U = \frac{\delta U \cdot U}{100} = \frac{3,3 \cdot 45}{100} \text{ V} \doteq 1,5 \text{ V}$$

## Výsledné napätie

$$U = (45 \pm 1,5) \text{ V}$$

Keďže relatívna odchýlka meranej veličiny spôsobená prístrojom závisí nepriamo úmerne od veľkosti výchylky, usilujeme sa ručičkovým meracím prístrojom merať tak, aby jeho ručička ukazovala čo možno najväčšiu výchylku.

**Chyba pri odčítaní** závisí najmä od vhodnej stupnice a ručičky prístroja. Pri dobrých laboratórnych prístrojoch je chyba pri odčítaní vždy menšia ako chyba prístroja. Chyba pri odčítaní závisí aj od experimentálnej skúsenosti toho, kto meria. Pri školských laboratórnych prácach odhadujeme zvyčajne polovicu jedného dielika stupnice (t. j. polovicu konštanty rozsahu).

Chyba pri odčítaní môže byť spôsobená tiež rozličnými rušivými vplyvmi. Vplyv týchto tzv. náhodných chýb možno obmedziť opakovaným meraním danej veličiny.

**Celková odchýlka merania** napätia alebo prúdu je daná súčtom odchýlok merania vyplývajúcich z uvedených chýb. Niektoré z týchto odchýlok bývajú často malé a možno ich vzhľadom na ostatné zanedbať. Pri použití Avometov alebo DU 10 stačí uvažovať iba o chybe prístroja, príp. o chybe metódy.

### *Program riešenia úlohy*

1. Oboznámte sa so všetkými údajmi, ktoré o použítom prístroji poskytujú značky na prístroji.

2. Odmerajte napätie na svorkách zdroja (akumulátora, batérie, monočlánku, v zásuvke pracovného stola a pod.). To isté napätie merajte pri voľbe rozličných rozsahov meracieho prístroja. Pri každom meraní vypočítajte zo známej triedy presnosti prístroja odchýlku a relatívnu odchýlku odmeraného napätia a podľa veľkosti vypočítaných odchýlok získané výsledky správne zaokrúhlite. Porovnajte relatívne odchýlky jednotlivých meraní a vysvetlite, pri ktorom rozsahu prístroja bolo meranie napätia najpresnejšie.

3. Zapojte obvod podľa schémy na obr. C2-2a. Ako spotrebič použite žiarovku. Zistite prúd, ktorý prechádza žiarovkou. Zo známej triedy presnosti prístroja vypočítajte odchýlku a relatívnu odchýlku merania prúdu a nameranú hodnotu prúdu správne zaokrúhlite.

## Dopĺňajúca úloha

Zistite odpor vlákna žiarovky pri daných prevádzkových podmienkach a vypočítajte odchýlku a relatívnu odchýlku merania odporu.

## Cvičenie 3 (2. teoretické)

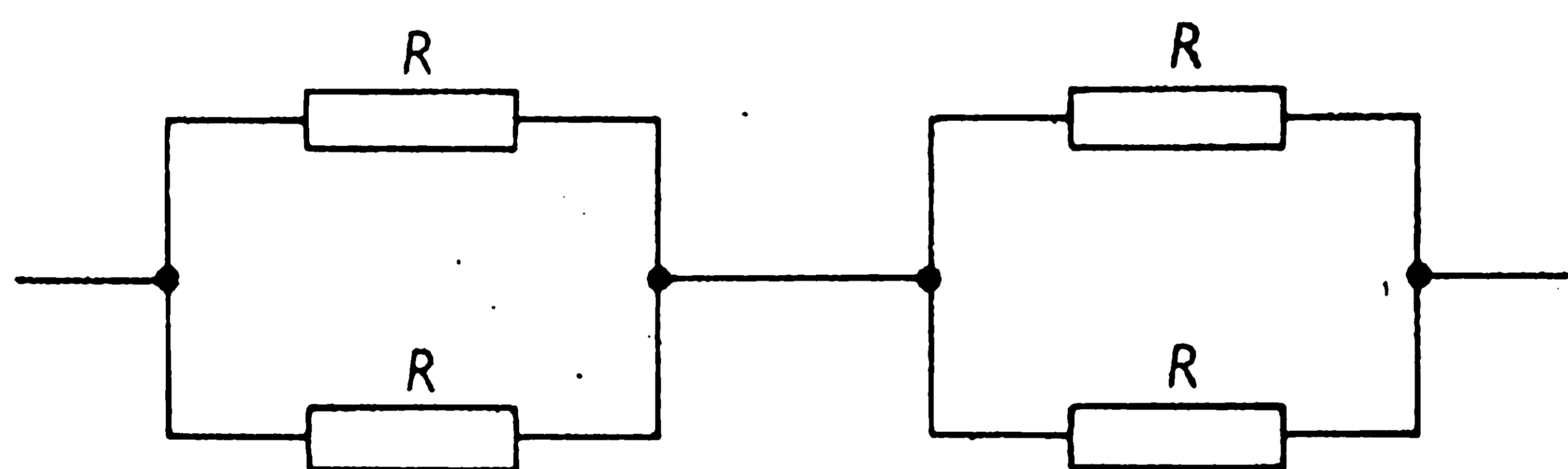
### Obvody s konštantným prúdom

Prvé tri úlohy riešte samostatne v dvoch skupinách A a B. Po dokončení práce oboch skupín premietnite zápis riešenia týchto úloh spätným projektorom a v spolupráci so všetkými žiakmi triedy urobte ich rozbor a opravu prípadných chýb.

Odpory spojovacích vodičov v jednotlivých obvodoch pri riešení zanedbajte.

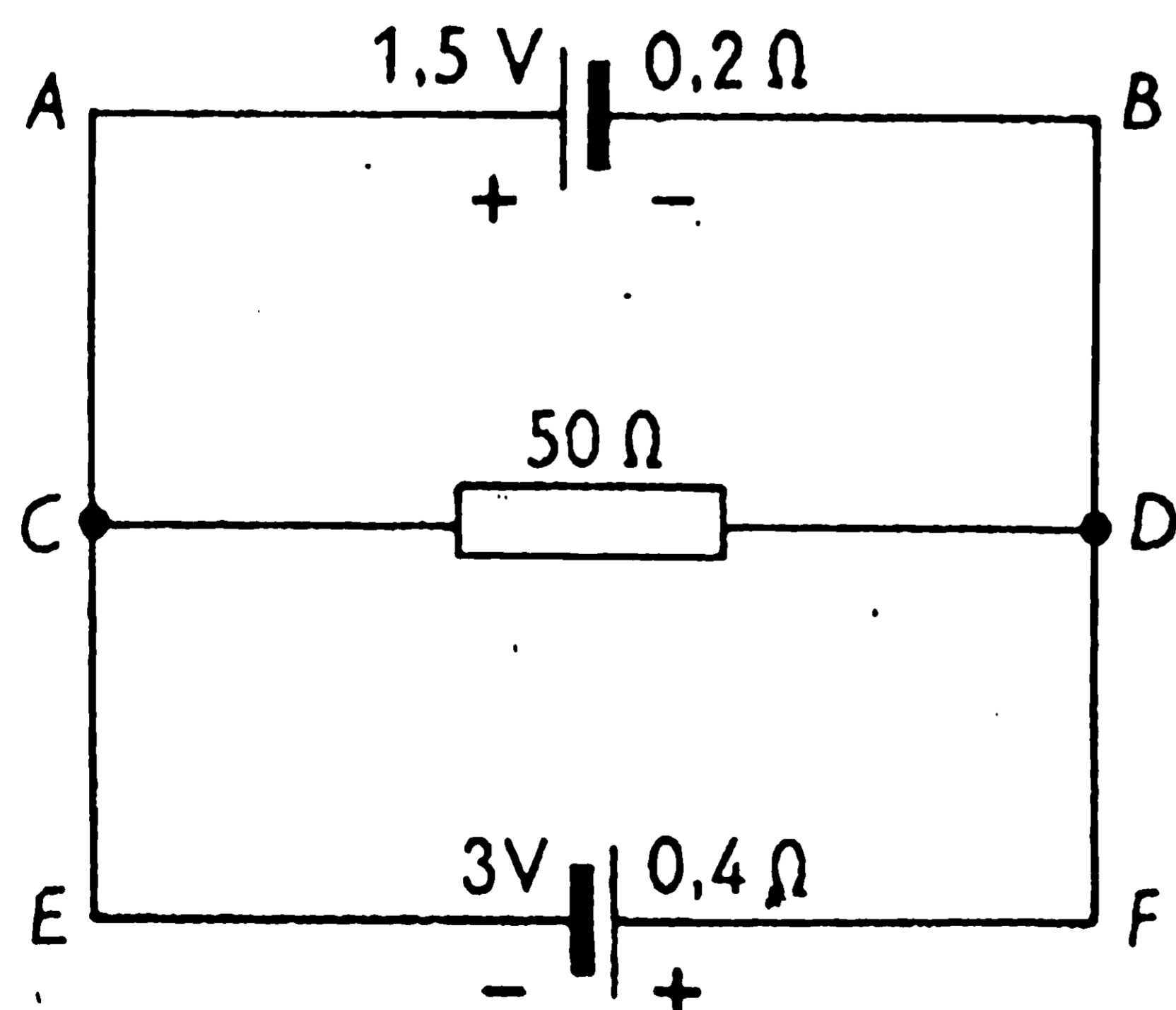
### Skupina A

1. úloha. Na obr. C.3-1. sú zapojené štyri rezistory s rovnakým elektrickým odporom  $R$ . Vypočítajte výsledný elektrický odpor zapojenia rezistorov. Riešte najskôr všeobecne, potom pre  $R = 10 \Omega$ . [ $R_c = R = 10 \Omega$ ]



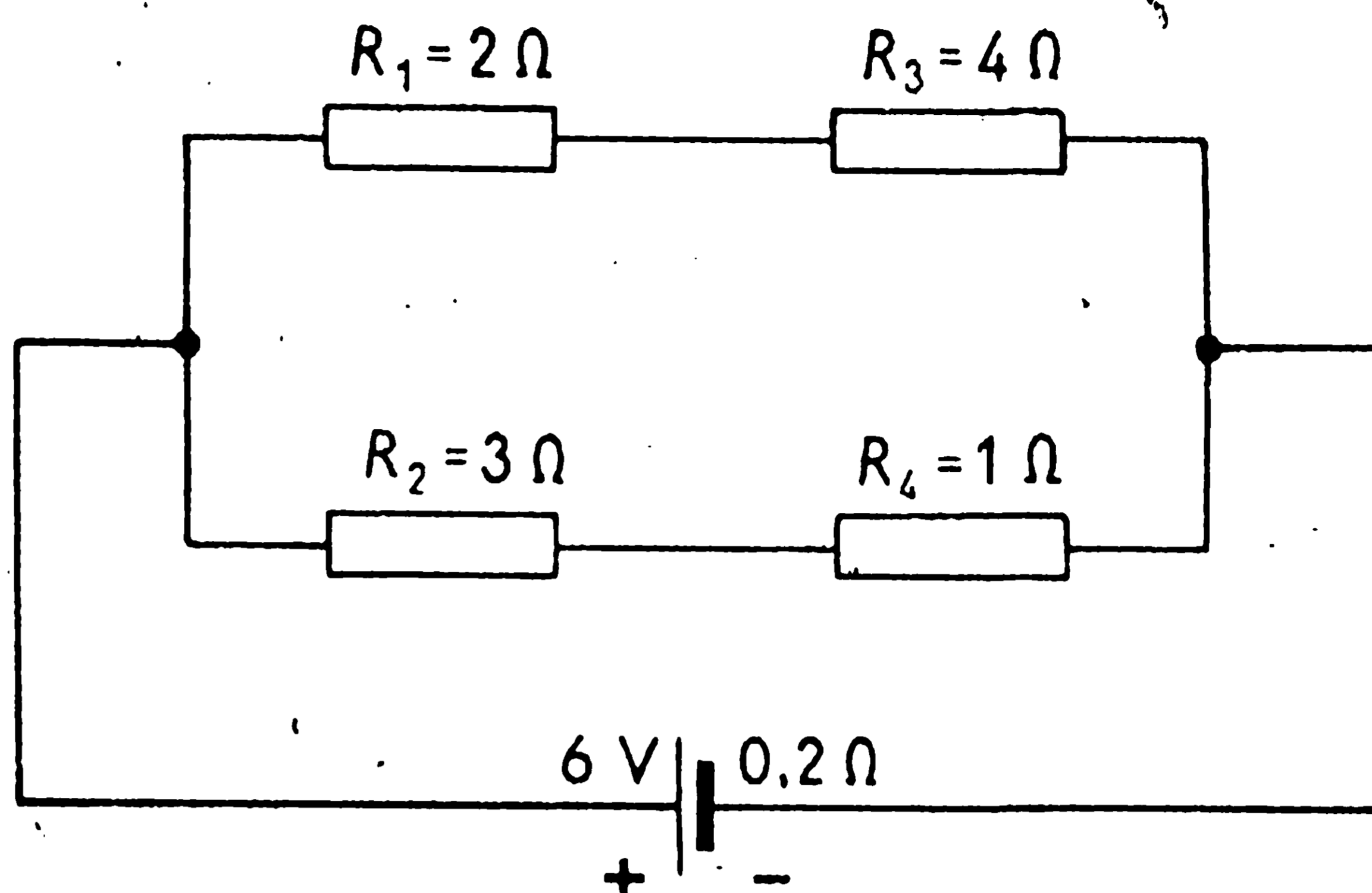
Obr. C.3-1

2. úloha. Na obr. C.3-2 je schéma zapojenia dvoch zdrojov napätia



Obr. C3-2

a rezistora. Vetvou  $AB$  prechádza prúd  $I_1$ , vetvou  $CD$  prúd  $I_2$  a vetvou  $EF$  prúd  $I_3$ . Určte hodnoty týchto prúdov.  $[I_1 = I_3 = 7,5 \text{ A}, I_2 = 0 \text{ A}]$

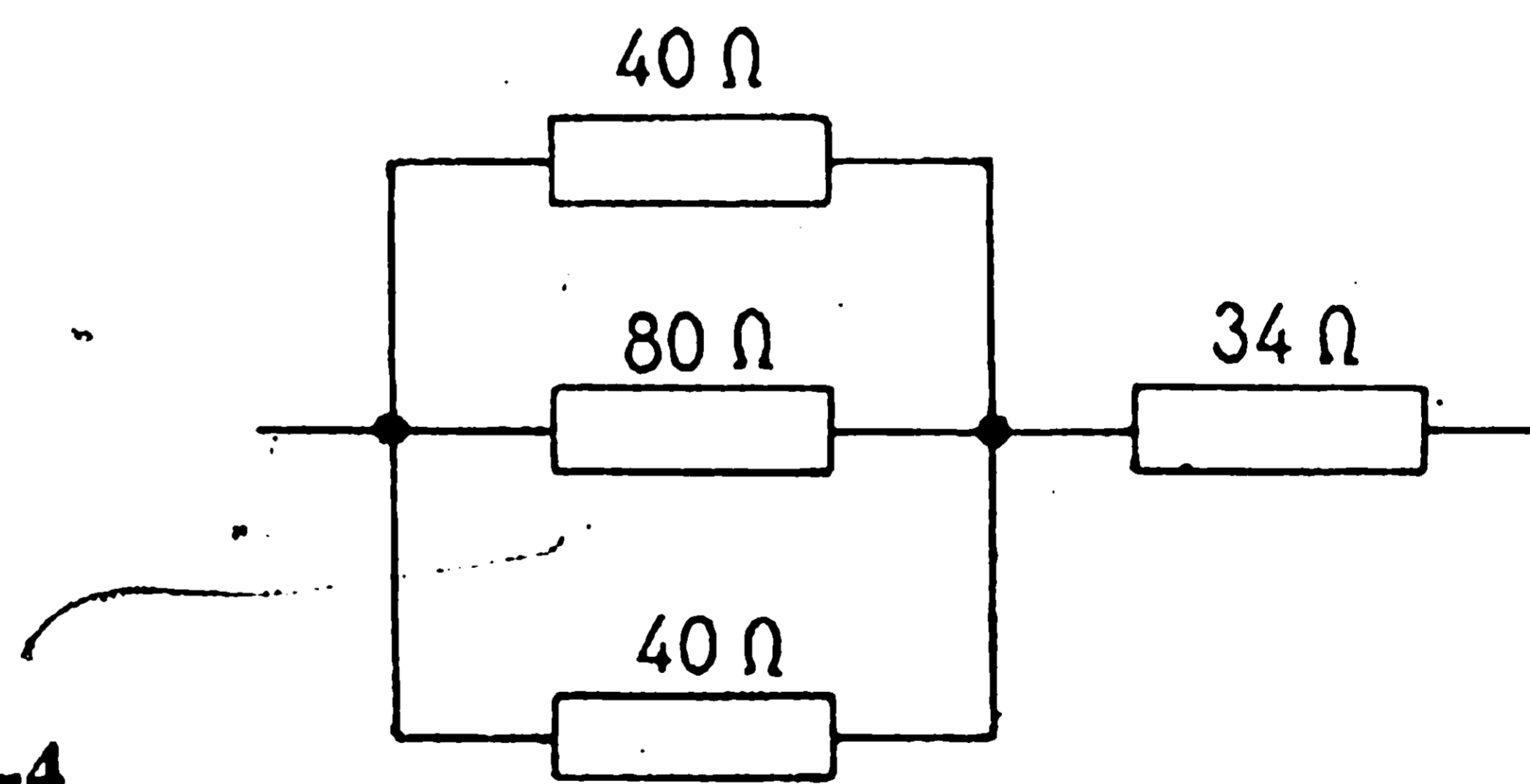


Obr. C 3-3

3. úloha. Štyri rezistory s elektrickými odpormi  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_4$  sú zapojené na zdroj napätia podľa schémy na obr. C 3-3. Aký je celkový elektrický odpor zapojených rezistorov? Aké prúdy prechádzajú jednotlivými vetvami?  $[2,6 \text{ } \Omega; I = 2,30 \text{ A}; I_{13} = 0,92 \text{ A}; I_{24} = 1,38 \text{ A}]$

### Skupina B

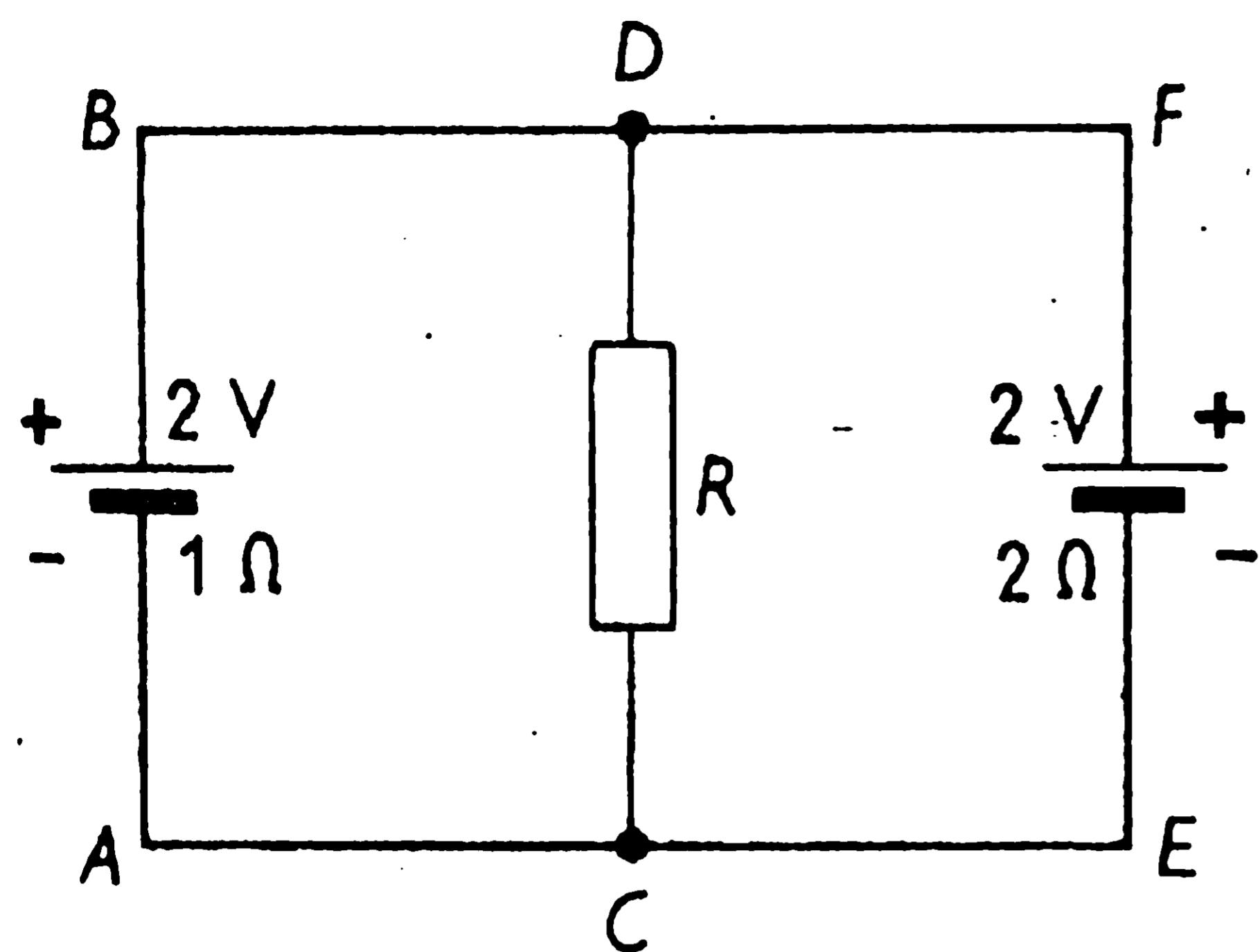
1. úloha. Na obr. C 3-4 sú zapojené štyri rezistory. Vypočítajte výsledný elektrický odpor zapojených rezistorov.  $[50 \text{ } \Omega]$



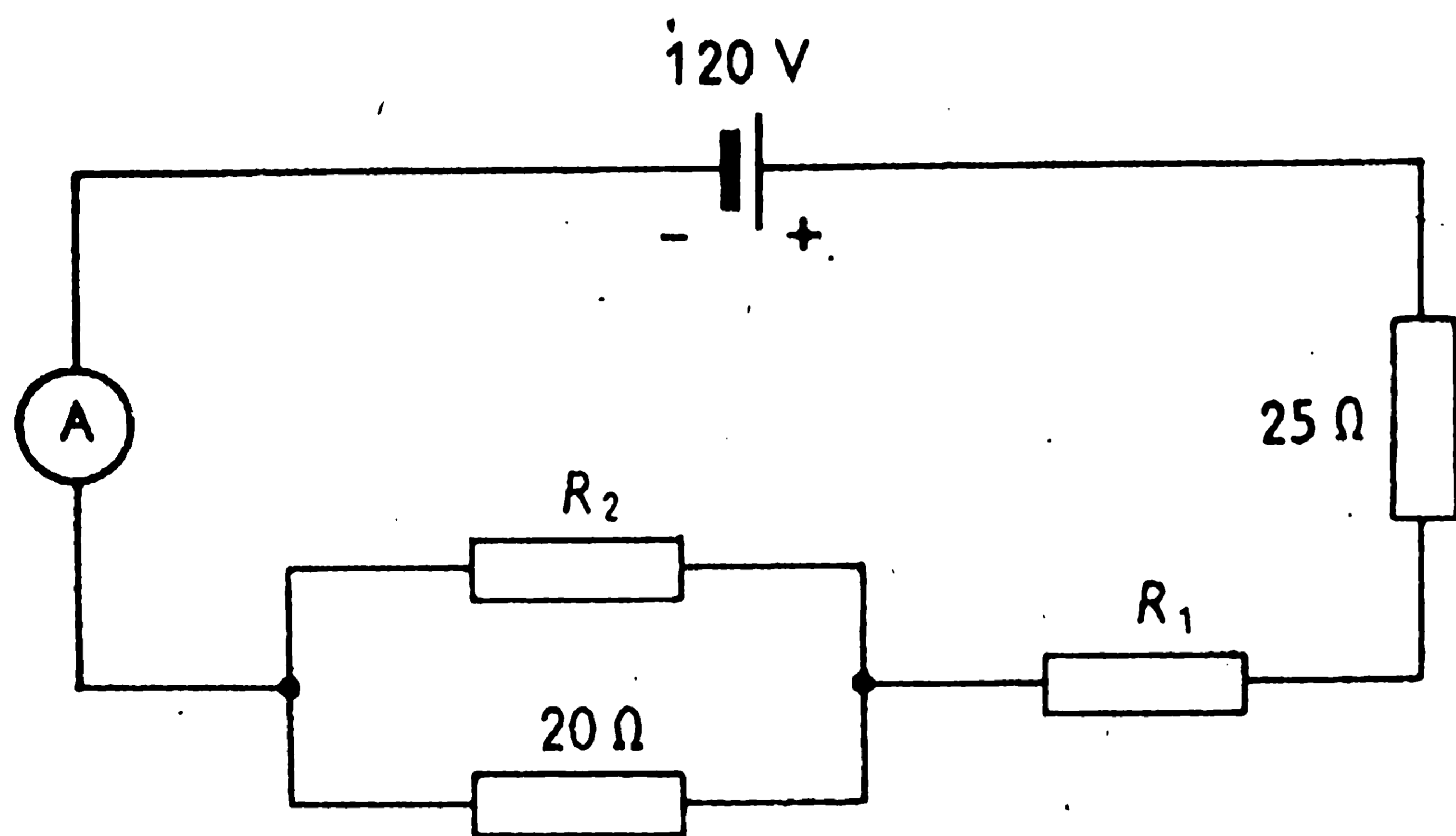
Obr. C3-4

2. úloha. Na obr. C 3-5 je schéma zapojenia dvoch zdrojov napätia a rezistora. Vypočítajte: a) Elektrický odpor rezistora, ak vetvou  $AB$  prechádza prúd 1 A. b) Prúd  $I_1$  prechádzajúci vetvou  $CD$  a prúd  $I_2$  vetvou  $EF$ . Určte smery týchto prúdov.  $[\frac{2}{3} \text{ } \Omega; I_1 = 1,5 \text{ A}; I_2 = 0,5 \text{ A}]$

Obr. C3-5



3. úloha. Štyri rezistory, zdroj napätia a ampérmetr tvoria obvod podľa schémy na obr. C 3-6. Napätie na rezistore s elektrickým odporom  $R_1$  je 40 V a ampérmetrom prechádza prúd 2 A. Určte elektrický odpor  $R_1$ ,  $R_2$  a prúd prechádzajúci rezistorom s odporom  $R_2$ . Vnútorňý odpor zdroja a ampérmetra zanedbajte. [ $R_1 = 20 \Omega$ ;  $R_2 = 60 \Omega$ ;  $I_2 = 0,5 \text{ A}$ ]



Obr. C 3-6

4. úloha. Tri monočlánky, každý s elektromotorickým napätím 1,5 V a vnútorným odporom  $0,3 \Omega$ , sú spojené sériovo. K takto utvorenej batérii pripojíme žiarovku s elektrickým odporom  $12 \Omega$ . Vypočítajte elektromotorické a svorkové napätie zdroja a elektrický prúd v obvode.

Riešenie

$$U_{e1} = U_{e2} = U_{e3} = 1,5 \text{ V}, R_{i1} = R_{i2} = R_{i3} = 0,3 \Omega, R = 12 \Omega; U_e = ? \\ U = ? I = ?$$

Elektromotorické napätie batérie sa rovná  $U_e = U_{e1} + U_{e2} + U_{e3} = 4,5 \text{ V}$ .



Prúd v obvode vypočítame pomocou vzťahu (9.5):

$$I = \frac{U_e}{R + R_i} = \frac{4,5 \text{ V}}{(3 \cdot 0,3 + 12) \Omega} = 0,35 \text{ A}$$

Svorkové napätie zdroja vypočítame zo vzťahu

$$U = R I = 12 \cdot 0,35 \text{ V} = 4,2 \text{ V}$$

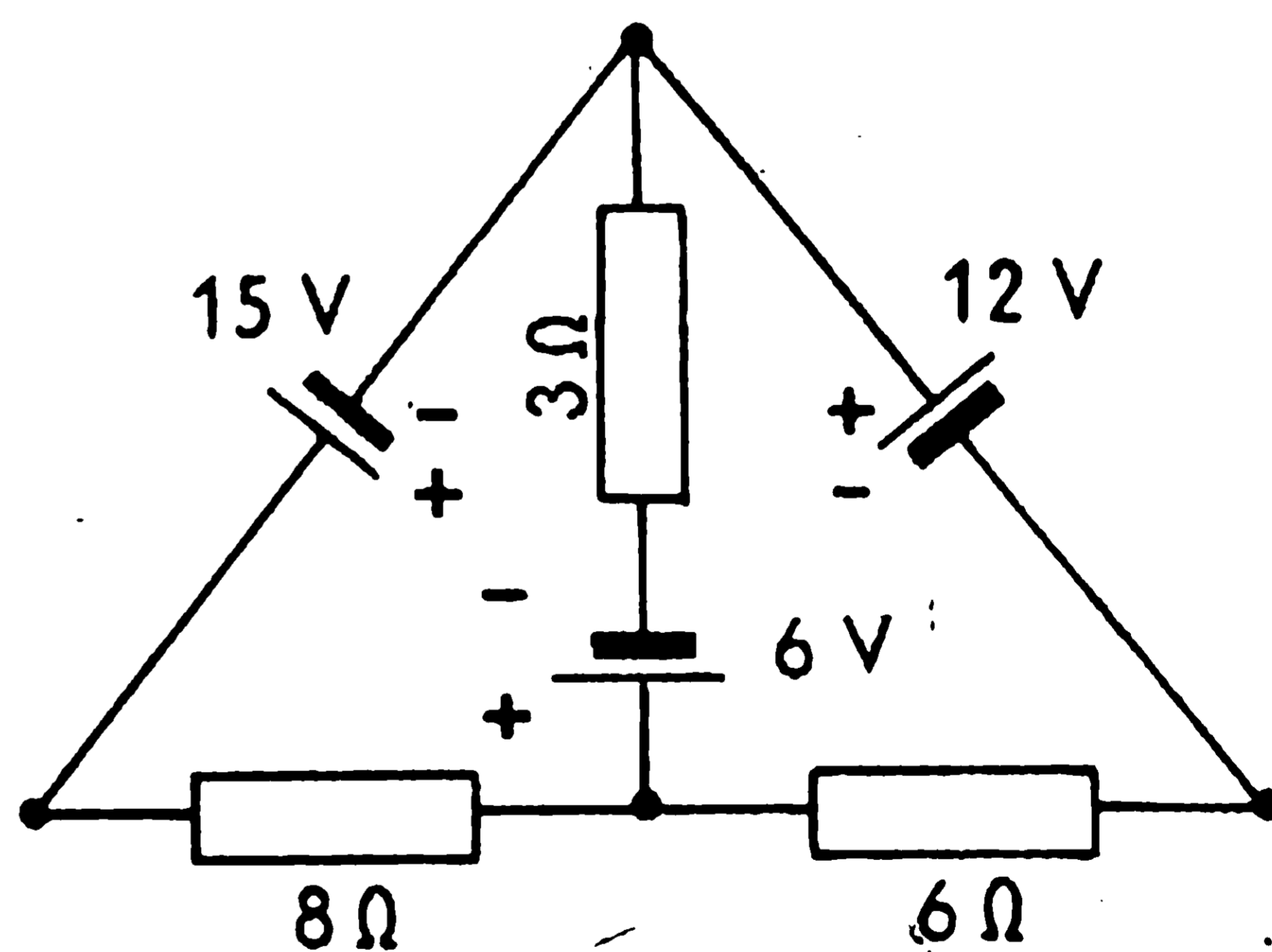
Batéria má elektromotorické napätie 4,5 V, obvodom prechádza prúd asi 0,35 A a svorkové napätie zdroja je približne 4,2 V.

*\*5. úloha.* Poistka automobilu je zhotovená z kovového pliešku dlhého 15 mm. Plocha pričného rezu má tvar obdĺžnika s rozmermi 0,1 mm a 1,5 mm. Zliatina, z ktorej je zhotovený pliešok, má teplotu topenia 300 °C, merný elektrický odpor pri 0 °C je  $4,0 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$  a teplotný súčiniteľ odporu je  $18,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Akumulátor v automobíle má  $U_e = 12 \text{ V}$ ,  $R_i = 0,2 \Omega$ . Aký prúd bude prechádzať pri skrate v okamihu, keď sa poistka taví? [Asi 50 A.]

Nasledujúce úlohy riešte opäť v skupinách A a B.

### Skupina A

*6. úloha.* Určte prúdy prechádzajúce jednotlivými vetvami v zapojení podľa schémy na obr. C.3-7. Vnútorne odpory zdrojov napätia zanedbajte. [1,5 A; 1 A; 2,5 A]



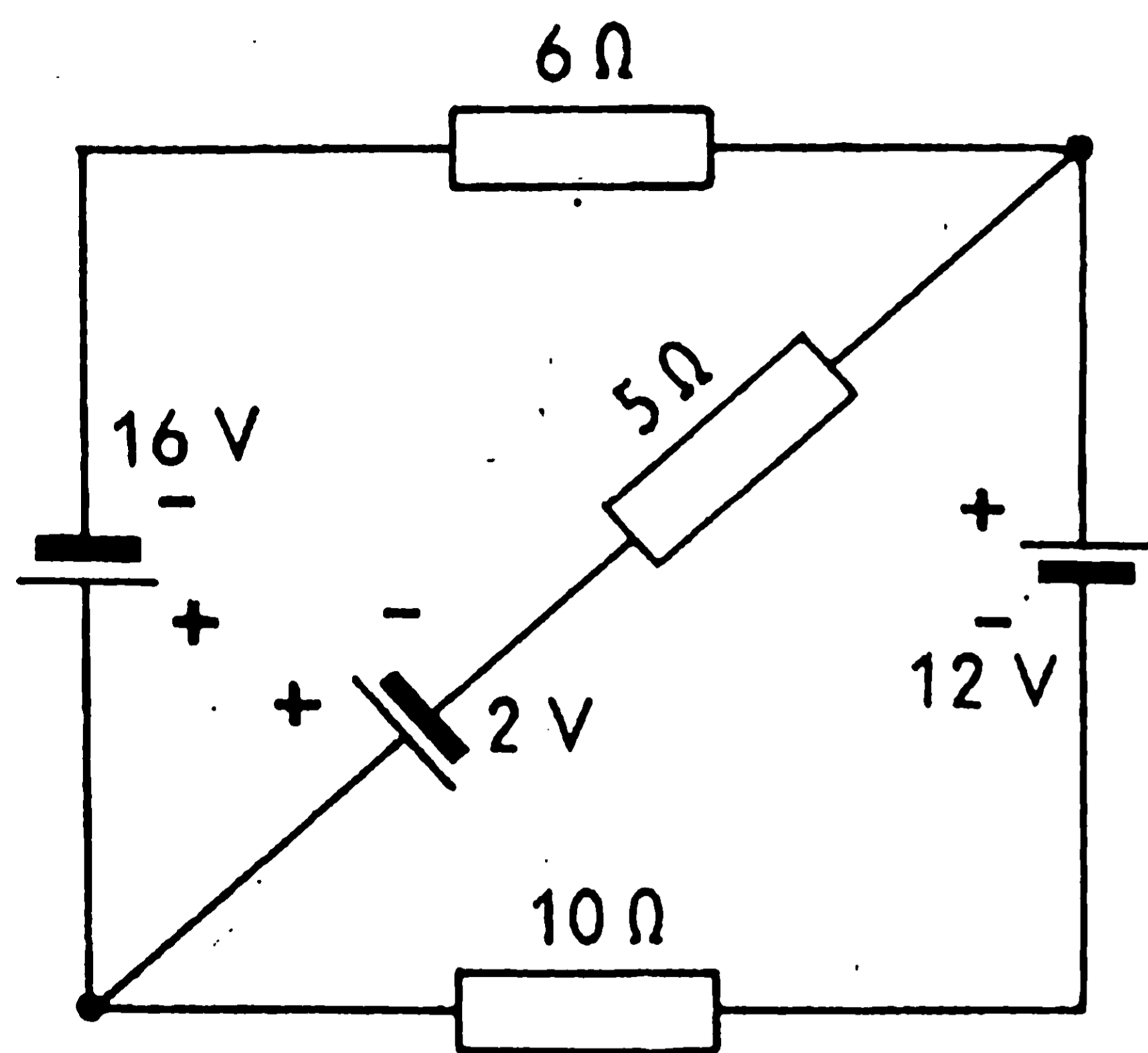
Obr. C.3-7.

*7. úloha.* Na elektrický zdroj s elektromotorickým napätím 240 V a vnútorným odporom 1,0 Ω je zapojený spotrebič s elektrickým odporom 23 Ω. Určte výkon, účinnosť zdroja a elektrický príkon spotrebiča. [2,4 kW; 2,3 kW; 96 %]

\*8. úloha. So zdrojom napätia sú sériovo spojené medená a oceľová tyč s rovnakou dĺžkou a rovnakým obsahom prierezu. Určte pomer Joulových tepiel a pomer napätí na tyčiach.  $\left[ \frac{Q_m}{Q_0} = 0,17; \frac{U_m}{U_0} = 0,17 \right]$

### Skupina B

6. úloha. Určte prúdy prechádzajúce jednotlivými vetvami v zapojení podľa schémy na obr. C 3-8. Vnútorne odpory zdrojov napätia zanedbajte.  $[2 \text{ A}; 0,4 \text{ A}; 1,6 \text{ A}]$



Obr. C 3-8

7. úloha. Keď na daný zdroj napätia zapojíme spotrebič s elektrickým odporom  $5,0 \Omega$ , je elektrický príkon spotrebiča rovnaký, ako elektrický príkon spotrebiča s elektrickým odporom  $0,2 \Omega$  zapojeného na ten istý zdroj. Určte vnútorný odpor takeého zdroja a pre každý prípad vypočítajte jeho účinnosť.  $[1 \Omega; 83,3 \%; 16,7 \%]$

\*8. úloha. So zdrojom napätia sú paralelne spojené medená a oceľová tyč s rovnakou dĺžkou a rovnakým obsahom prierezu. Určte pomer Joulových tepiel a pomer napätí na tyčiach.  $\left[ \frac{Q_m}{Q_0} = 5,9; \frac{U_m}{U_0} = 1 \right]$

## Cvičenie 4 (2. laboratórne)

### Meranie elektrického odporu rezistora

**Pomôcky:** ampérmeter, voltmeter, ohmmeter, potenciometer, 2 miniatúrne rezistory (jeden s malým a jeden s veľkým odporom), elektrický zdroj jednosmerného napätia, spínač, spojovacie vodiče.

**Teoretická príprava úlohy:** Elektrický odpor rezistora možno merať viacerými metódami, čo súvisí s rozsahom hodnôt  $R$  a požadovanou presnosťou merania.

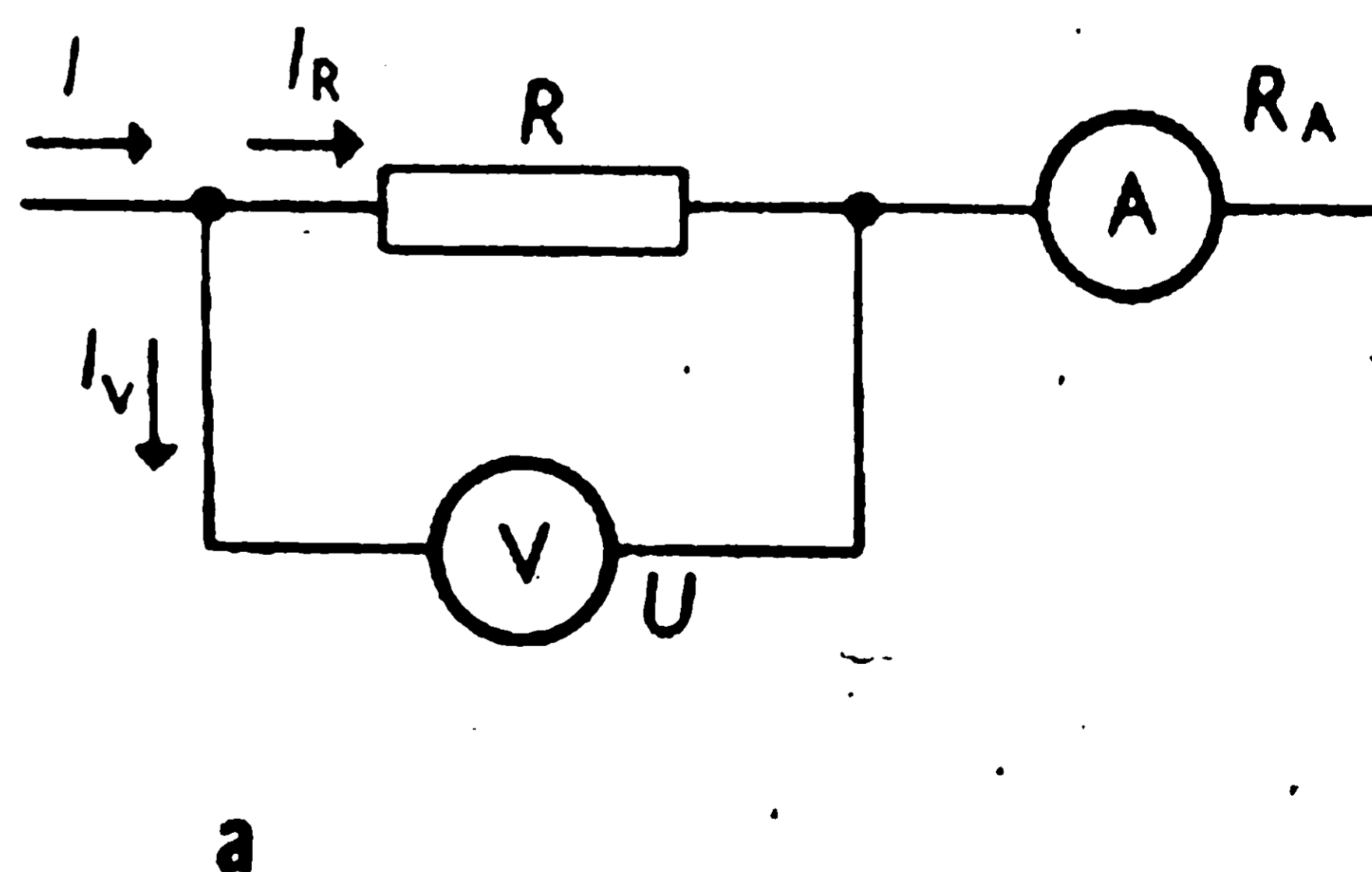
a) **Priama metóda** je založená na definícii elektrického odporu. Ampérmeterom odmeriame prúd  $I$ , ktorý prechádza rezistorom s odporom  $R$  a voltmetrom napätie medzi jeho koncami. Podľa vzťahu (3.1)  $R = \frac{U}{I}$ .

Výsledok je približný, lebo zaradením oboch meracích prístrojov sa pomery v obvode zmenia tak, že na rezistore nemožno priamo odmerať súčasne napätie aj prúd, ktorý ním prechádza. Preto používame dva spôsoby zapojení prístrojov.

Keď je ampérmeter zapojený podľa obr. C.4-1., potom podľa 1. Kirchhoffovho zákona platí

$$I = I_R + I_V = \frac{U}{R_V} + \frac{U}{R}, \text{ odkiaľ } R = \frac{U}{U - \frac{U}{R_V}}$$

Obr. C 4-1



Pre správnosť určenia hodnoty  $R$  treba odčítať od odmeranej hodnoty prúdu  $I$  prúd  $\frac{U}{R_V}$ , ktorý prechádza voltmetrom. Pri malých hodnotách  $R$

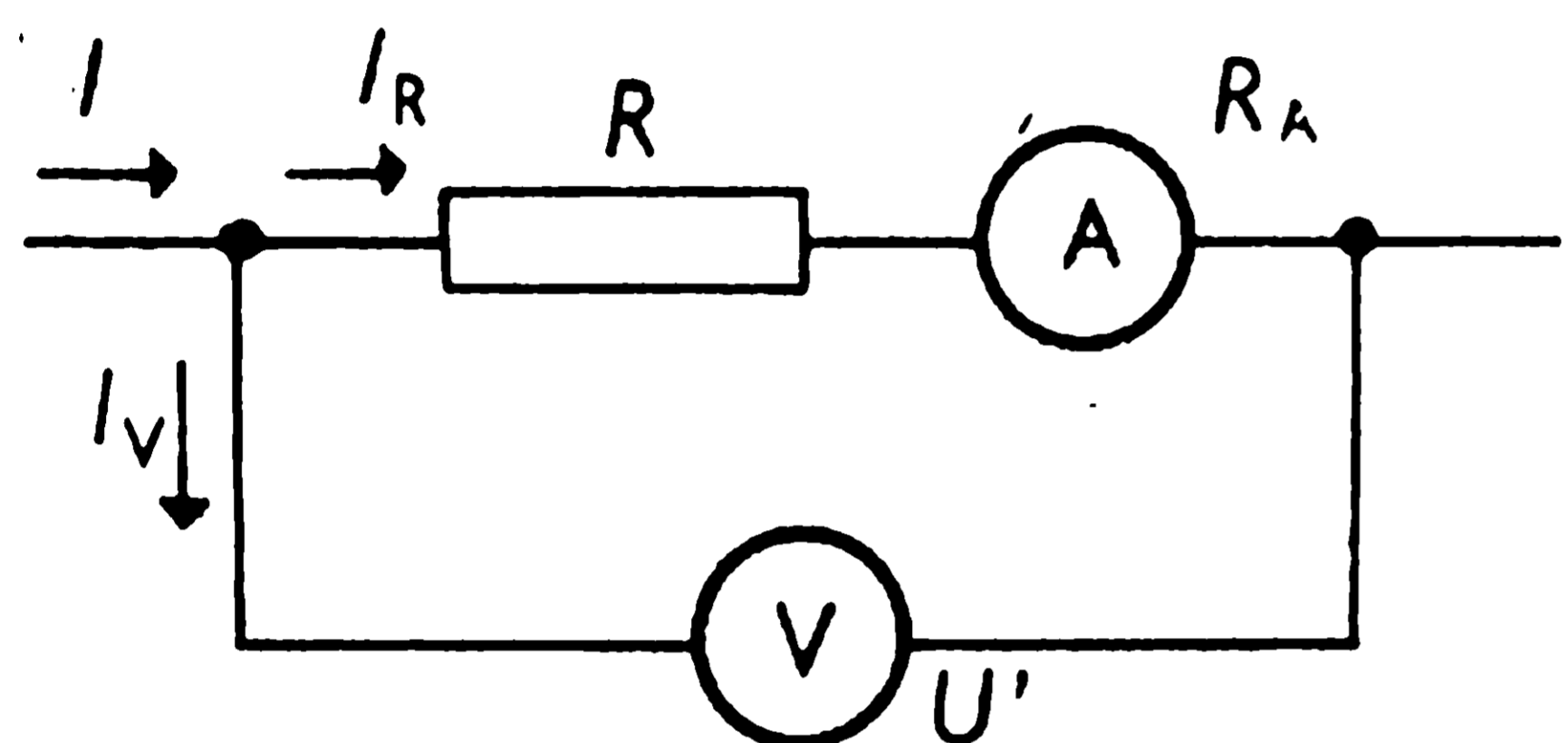
vzhľadom na hodnotu  $R_v$ , t. j. pri  $R \ll R_v$ , je napätie  $U$  malé a člen  $\frac{U}{R_v}$  možno vzhľadom na hodnotu  $I$  zanedbať.

Platí  $R \doteq \frac{U}{I}$ .

Keď sú meracie prístroje zapojené podľa schémy na obr. C. 4-2, je merané napätie  $U' > U$ , lebo  $U' = U + U_A = R I_R + R_A I_R$ . Úpravou tohto vzťahu dostaneme

$$R = \frac{U'}{I_R} - R_A$$

kde  $U'$  a  $I_R$  sú hodnoty namerané prístrojmi.



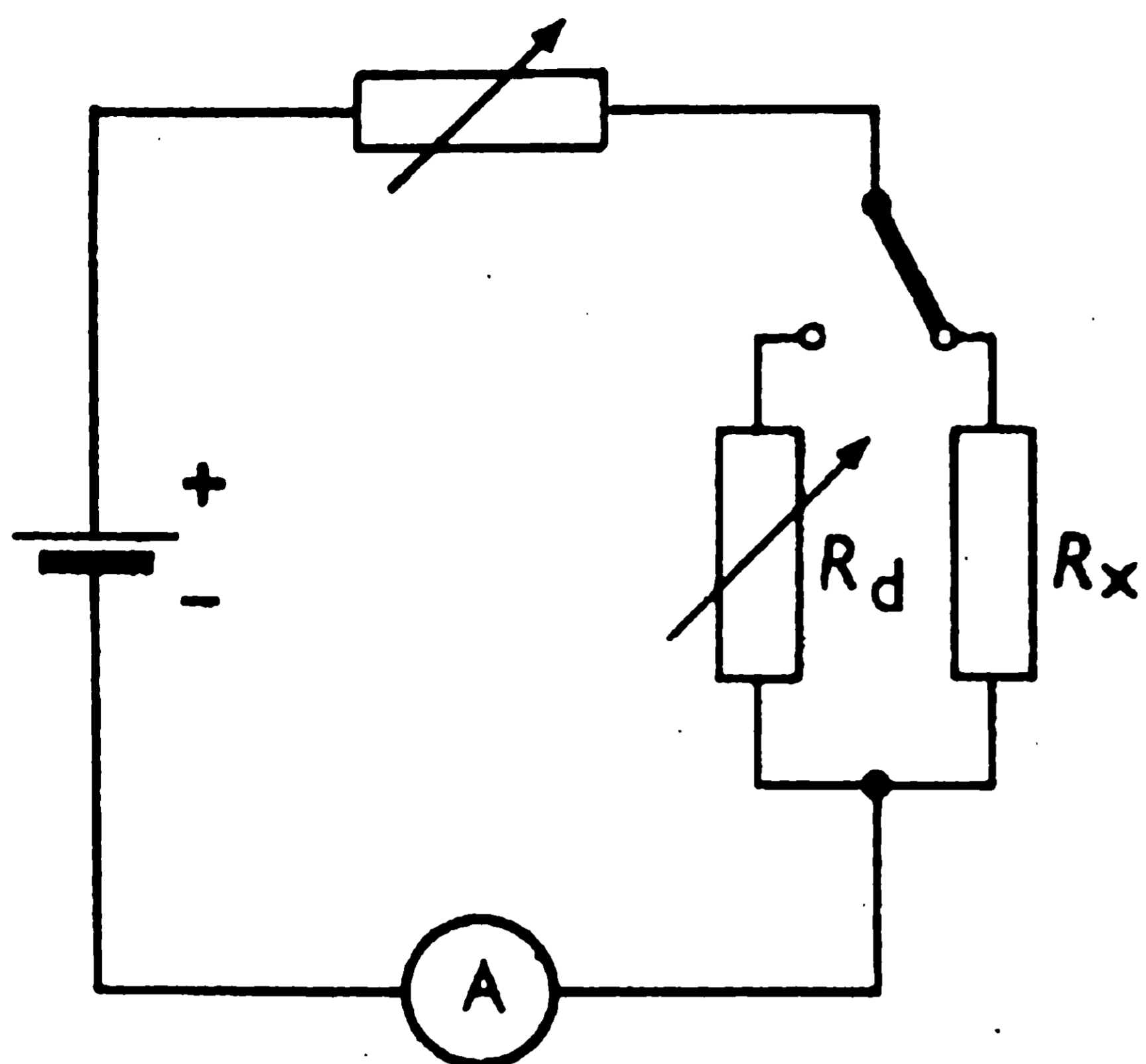
Obr. C. 4-2

b

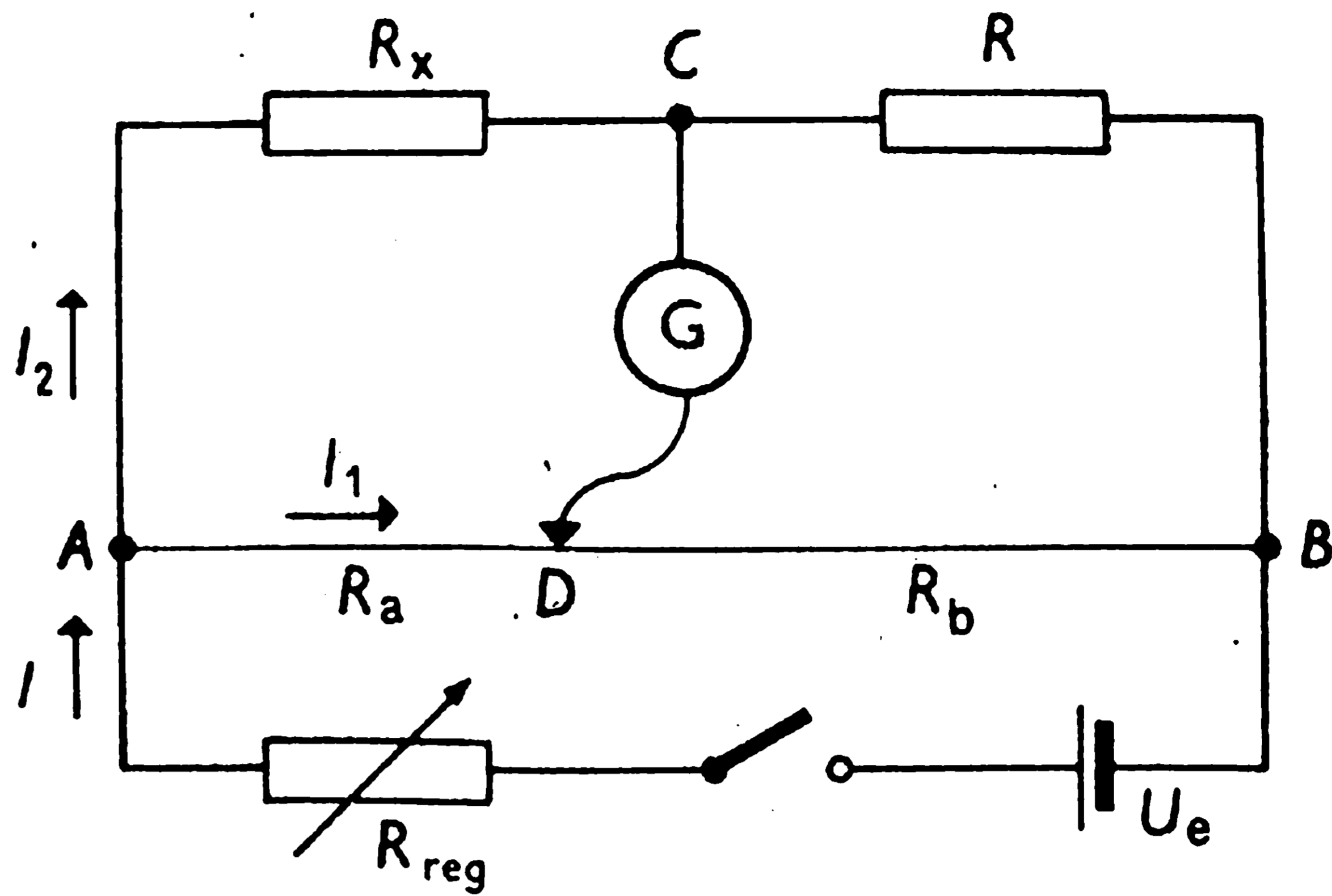
Za predpokladu veľkých hodnôt  $R$  vzhľadom na hodnotu  $R_A$ , t. j.  $R \gg R_A$ , je napätie na ampérmetri menšie ako chyba merania napätia voltmetrom. Potom o druhom sčítanci vo vzťahu pre  $R$  netreba uvažovať a platí  $R \doteq \frac{U'}{I_R}$ .

b) **Substitučná metóda.** Do elektrického obvodu zaradíme rezistor s neznámym elektrickým odporom a zistíme výchylku na ampérmetri. Potom namiesto neznámeho rezistora zaradíme rezistory s kalibrovanými premennými odpormi, tzv. **odporovú dekádu** a meníme na nej odpor od najvyšších hodnôt po najnižšie do okamihu, keď ampérmeter ukáže rovnakú výchylku. Hodnota neznámeho odporu sa potom rovná hodnote odporu z dekády. Meriame v zapojení podľa schémy na obr. C. 4-3.

c) **Mostíková metóda.** Touto metódou sa získavajú najpresnejšie



Obr. C. 4-3



Obr. C. 4-4

výsledky. Princíp zapojenia pri meraní je na obr. C-4-4. Po drôte medzi uzlami  $A$ ,  $B$  mostíka sa pohybuje posuvný kontakt do okamihu, až galvanometrom  $G$  prestane prechádzať prúd. To znamená, že body  $D$ ,  $C$  majú rovnaký elektrický potenciál a napätia na rezistoroch s odpormi  $R_x$  (neznámy odpor) a  $R_a$  sú rovnaké, teda  $R_x I_2 = R_a I_1$ . Podobne sa rovnajú napätia na rezistore s neznámym odporom  $R$  a časti  $R_b$ , t. j.  $R I_2 = R_b I_1$ . Riešením týchto rovníc dostaneme

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_a}{R_b}, \text{ odkiaľ } R_x = R \frac{R_a}{R_b}$$

Odpory  $R_a$  a  $R_b$  možno vyjadriť vzťahmi

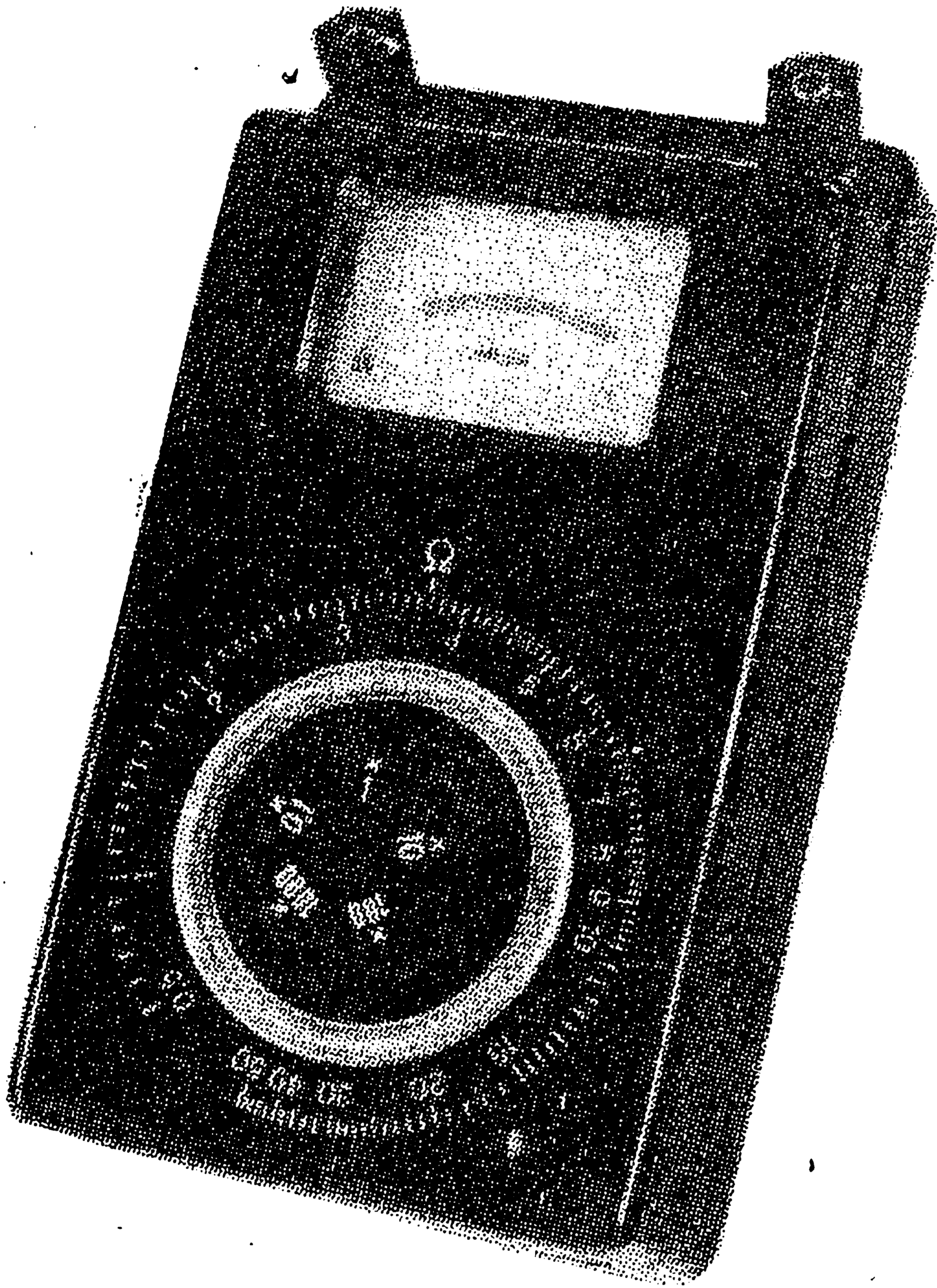
$$R_a = \rho \frac{a}{S} \quad R_b = \rho \frac{b}{S}$$

kde  $a$ ,  $b$  sú dĺžky úsekov na odporovom drôte s merným elektrickým odporom  $\rho$ . Potom po úprave dostaneme

$$R_x = R \frac{a}{b}$$

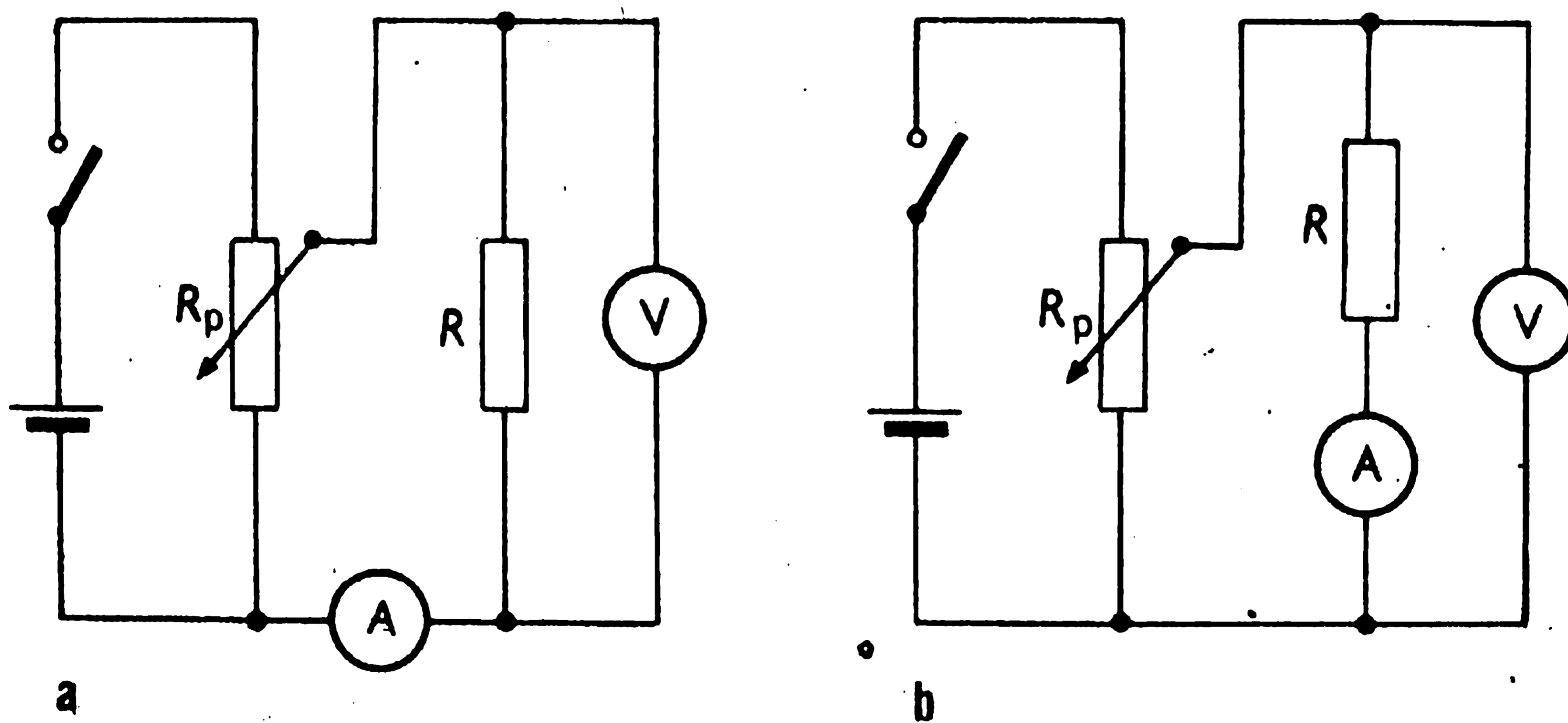
Na princípe mostíkovej metódy sa zakladajú prístroje špeciálne konštruované na priame meranie elektrických odporov v technickej praxi. Nazývajú sa **ohmmetre**. Najrozšírenejším ohmmetrom v školách je ohmmeter Omega (obr. C4-5).

Obr. C4-5



*Program riešenia úlohy*

Elektrický odpor rezistora  $R$  určíme priamou metódou a postupne oboma spôsobmi zapojenia meracích prístrojov, ako je to znázornené v schémach na obr. C4-6 a, b. Orientačné meranie urobíme ohmmetrom.



Obr. C4-6

## Úlohy

1. Odmerajte napätie a prúd dvoch rezistorov oboma spôsobmi. V oboch prípadoch merajte aspoň tri razy. Vhodné napätie alebo prúd nastavte potenciometrom  $R_b$ .
2. Zostavte tabuľku nameraných hodnôt  $U$  a  $I$ .
3. Vypočítajte odpor rezistorov použitím približného vzťahu.
4. Vypočítajte aritmetický priemer, odchýlku a relatívnu odchýlku merania odporu.
5. Porovnajte výsledky oboch spôsobov merania a odchýlku, ktorá vznikla použitím približného vzťahu.
6. Rozhodnite, ktorý spôsob zapojenia meracích prístrojov je vhodný pre malé hodnoty  $R$  a ktorý pre veľké hodnoty  $R$ .
7. Odmerajte odpory rezistorov ohmmetrom.

## Cvičenie 5 (3. laboratórne)

### Závislosť svorkového napätia zdroja od elektrického prúdu v obvode

*Pomôcky:* jednosmerný zdroj napätia (plochá batéria 4,5 V), ampérmerter, voltmeter, reostat (asi 200  $\Omega$ ), spínač, spojovacie vodiče.

*Teoretická príprava úlohy:* Napätie namerané na svorkách zdroja (svorkové napätie  $U$ ) závisí od zaťaženia zdroja, t. j. od hodnoty prúdu  $I$ , ktorý zdrojom prechádza. So zväčšujúcim sa prúdom svorkové napätie klesá.

Pre svorkové napätie  $U = R I$  môžeme písať vzťah

$$U = U_e - R_i I$$

kde  $R$  je elektrický odpor vonkajšej časti obvodu,  $U_e$  elektromotorické napätie zdroja a  $R_i$  vnútorný odpor. Svorkové napätie je lineárnou funkciou prúdu.

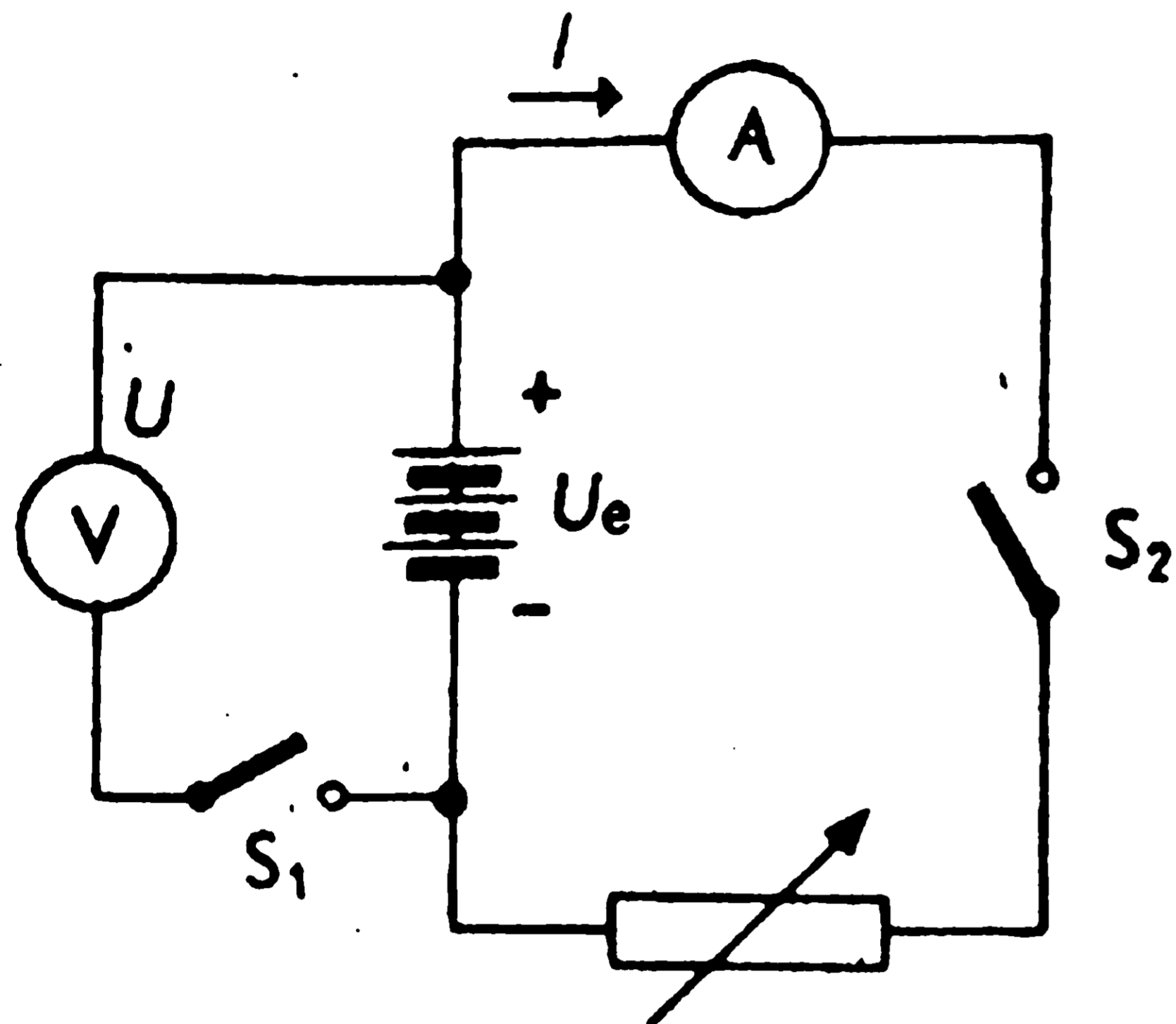
Z nameranej funkčnej závislosti  $U(I)$  možno určiť vnútorný odpor zdroja. Z predchádzajúceho vzťahu dostaneme

$$R_i = \frac{|\Delta U|}{\Delta I}$$

Hodnoty  $\Delta U$  a  $\Delta I$  zistíme z grafu funkcie  $U(I)$ .

### Program riešenia úlohy

1. Zostavte elektrický obvod podľa schémy na obr. C5-1. Oba spínače  $S_1$  a  $S_2$  nechajte rozpojené.



Obr. C5-1

2. Na ampérmetri a voltmetri nastavte maximálne rozsahy, na reostate maximálny odpor.

3. Po kontrole zapojenia zapnite oba spínače. Prispôbte rozsahy meracích prístrojov hodnotám prúdu a napätia.

4. Pri rozopnutom spínači  $S_2$  odčítajte na voltmetri napätie nezaťaženeho zdroja a spínač  $S_2$  opäť zapnite.

5. Postupne znižujte odpor reostatu a po každom nastavení posuvného kontaktu reostatu odčítajte hodnoty prúdu a napätia. Pri meraní by prúd nemal prekročiť hodnotu 0,3 A. Namerané hodnoty zapíšte do tabuľky. Celkovo merajte napr. 10 ráz.

6. Reostatom znižujte prúd na minimum, vypnite spínače a odpojte zdroj napätia.

**Poznámka:** V záujme šetrenia batérie, ktorá má byť za normálnych okolností zaťažená prúdom do 50 mA, merajte tak, že pri vyšších prúdoch obvod uzavriete iba na čas potrebný na získanie údajov.

### Úlohy

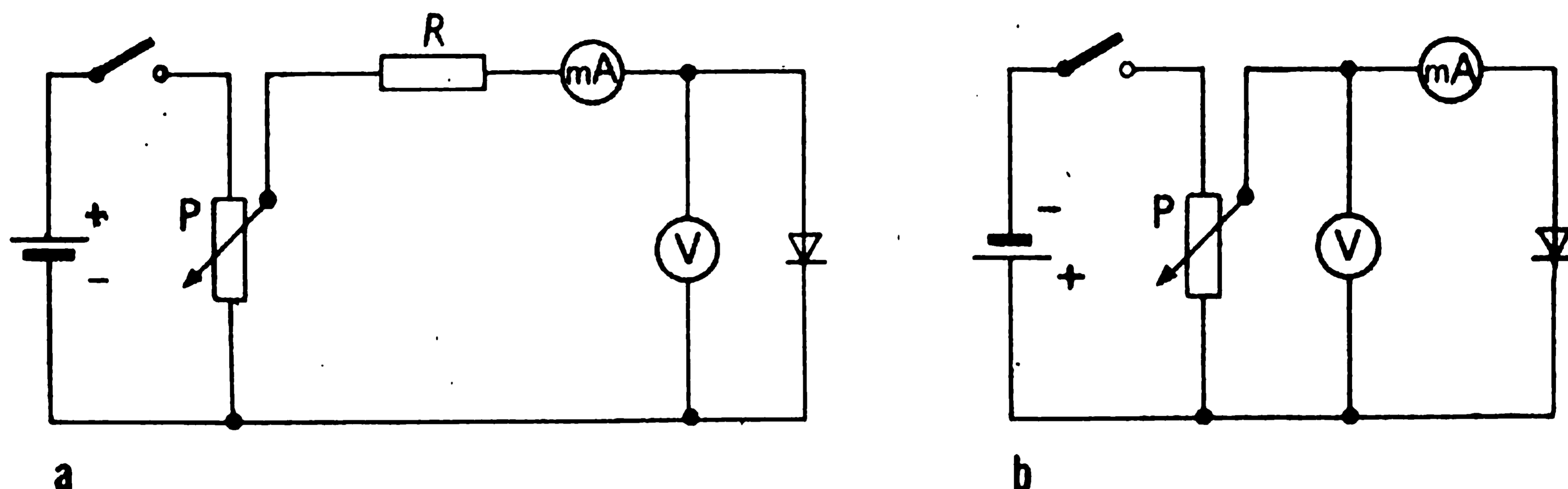
1. Zostavte tabuľku nameraných hodnôt.
2. Zostrojte graf závislosti  $U = f(I)$ .
3. Určte vnútorný odpor zdroja.
4. Vysvetlite, prečo neležia všetky body zistené meraním na jednej priamke. Vymenujte možné príčiny chýb pri meraní.



## Dopĺňajúca úloha

Vypočítajte, aký prúd by prechádzal zdrojom pri skrate.

Výsledok orientačne overte krátkodobým skratovaním reostatu podľa schémy na obr. C.5-1 pomocou vodiča na čas 1 s až 2 s. Nezabudnite však vopred nastaviť vhodný rozsah ampérmetra. Všimnite si, ako sa pri skrate správa voltmeter.



Obr. C.6-1

## Cvičenie 6 (4. laboratórne)

### Určenie charakteristiky polovodičovej diódy

*Pomôcky:* polovodičová dióda (najlepšie germániová), zdroj jednosmerného napätia, miliampérmetr, voltmeter, potenciometer, spínač, ochranný rezistor (napr.  $100 \Omega$ ), spojovacie vodiče.

*Teoretická príprava úlohy:* Usmerňovací účinok polovodičovej diódy najlepšie vystihuje voltampérová charakteristika diódy. Túto charakteristiku určujeme v zapojení podľa obr. C.6-1. Napätie  $U$  na dióde meníme pomocou potenciometra  $P$  a meriame voltmetrom. Prúd  $I$ , ktorý prechádza diódou, meriame miliampérmetrom. Namerané hodnoty  $U$  a  $I$  zapisujeme do tabuľky. Nanesením nameraných hodnôt do grafu získame voltampérovú charakteristiku diódy.

Meriame v dvoch etapách. Najprv odmeriame časť charakteristiky zodpovedajúcej priepustnému smeru a potom časť zodpovedajúcu závernému smeru. V prvej etape nesmieme prekročiť dovolený maximálny

prúd, v druhej etape maximálne dovolené napätie. Tieto hodnoty bývajú pri rozličných typoch diód rôzne. Bývajú v sprievodnom liste diódy. Pri prekročení uvedených medzných hodnôt sa môže dióda zničiť. Ochranný rezistor s elektrickým odporom  $R$  má zabrániť prípadnému poškodeniu diódy.

### *Program riešenia úlohy*

#### **Určenie charakteristiky diódy v priepustnom smere**

1. Zostavte elektrický obvod podľa schémy na obr. C6-1a. Spínač nechajte nezopnutý.
2. Posuvný kontakt potenciometra nastavte do polohy zodpovedajúcej nulovému napätiu na dióde. Na miliampérmetri nastavte maximálny rozsah, rozsah voltmetra prispôbte napätiu zdroja.
3. Po kontrole zapojenia zapnite spínač a prispôbte rozsahy prístrojov meraným hodnotám prúdu a napätia.
4. Posuvným kontaktom potenciometra zvyšujte postupne prúd prechádzajúci diódou a pri každej polohe kontaktu potenciometra odčítajte údaje meracích prístrojov a zapíšte ich do tabuľky. Merajte asi 10 ráz. Neprekročte maximálny dovolený prúd!
5. Potenciometrom zmenšite napätie na dióde, vypnite spínač a odpojte zdroj napätia.

#### **Určenie charakteristiky diódy v závernom smere**

1. Zostavte obvod podľa schémy na obr. C6-1b. Pozor, polarita zdroja vzhľadom na diódu je teraz opačná. Spínač nechajte nezapnutý.
2. Nastavte maximálny rozsah miliampérmetra. Rozsah voltmetra prispôbte dovolenému napätiu na dióde. Posuvný kontakt potenciometra nastavte do polohy zodpovedajúcej nulovému napätiu na dióde.
3. Zapnite spínač a posuvným kontaktom potenciometra opatrne nastavte napätie na dióde. Rozsahy meracích prístrojov prispôbte meraným hodnotám prúdu a napätia.
4. Potenciometrom zvyšujte postupne napätie na dióde a pri každej polohe posuvného kontaktu potenciometra odčítajte údaje na meracích prístrojoch a zapíšte ich do tabuľky. Neprekročte maximálne dovolené záverné napätie diódy!

5. Potenciometrom znížte napätie na dióde, vypnite spínač a odpojte zdroj napätia.

**Poznámka:** Pri kremíkových diódach býva záverný prúd veľmi malý, preto ho bežnými meracími prístrojmi možno ťažko merať. Preto je na meranie charakteristiky vhodnejšia germániová dióda, ktorá má väčší záverný prúd. Hrotové diódy Tesla sú zapojené v priepustnom smere vtedy, keď je farebne označená elektróda zapojená na zápornú svorku zdroja napätia.

Minimálnu hodnotu ochranného odporu môžeme odhadnúť zo vzťahu  $R = \frac{U_e}{I_{\max}}$ , kde  $U_e$  je elektromotorické napätie zdroja a  $I_{\max}$  maximálny dovolený prúd diódy v priepustnom smere.

### Úlohy

1. Zostavte tabuľku nameraných hodnôt.
2. Zostrojte charakteristiku polovodičovej diódy.
3. Vysvetlite výsledky meraní. Povedzte možnosti praktického využitia polovodičovej diódy.
4. Z priamkovej časti charakteristiky určte odpor polovodičovej diódy v priepustnom smere.

### Dopĺňajúca úloha

Overte závislosť prúdu od napätia, ak v obvode bude namiesto polovodičovej diódy žiarovka.



MILAN BEDNAŘÍK, EMANUEL SVOBODA A KOLEKTÍV

# FYZIKA

## PRE 2. ROČNÍK GYMNÁZIÍ

*ELEKTRICKÉ POLE*  
*ELEKTRICKÝ PRÚD*

Zodpovedná redaktorka RNDr. Valéria Jablonská  
Technická redaktorka Ľubica Rybánska  
Výtvarná redaktorka Marta Pavlíková

Vydalo Slovenské pedagogické nakladateľstvo, Sasinkova 5, 815 60 Bratislava

Vytlačili Nitrianske tlačiarne, š. p., Nitra

ISBN 80-08-02100-4