10 Balistični galvanometer

NALOGA

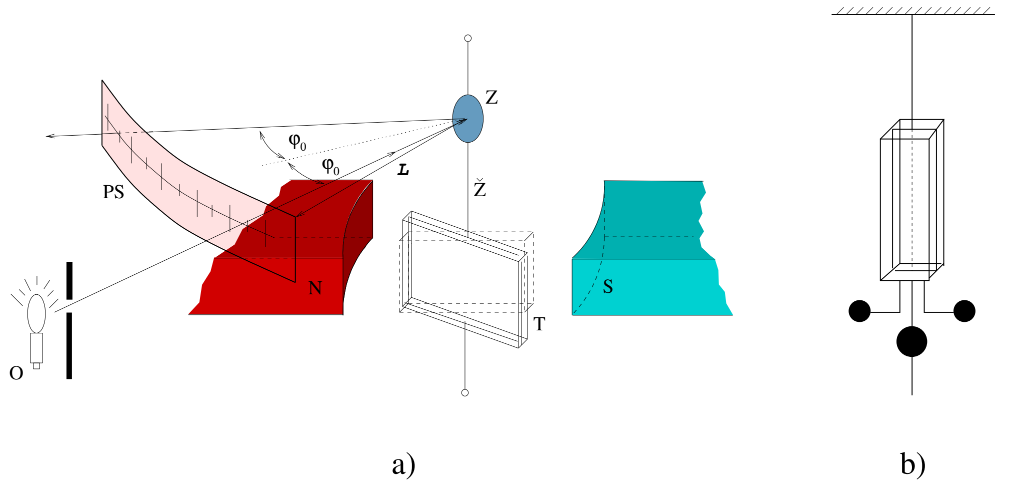
Umeri balistični galvanometer.

RAZLAGA

Z balističnimi galvanometri merimo električne naboje. Po izvedbi so to zrcalni galvanometri, pri katerih odziv inštrumenta merimo z zasukom zrcala, na katerega posvetimo s svetilom (glej sliko 10.1 a). Osrednji del takega galvanometra predstavlja tuljava, ki ji z dodatnimi masami povečamo vztrajnostni moment, vse skupaj pa obesimo na prožno žico (slika 10.1 b). Na ta način dobimo torzijsko nihalo, katerega nihajni čas je:

$$t_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D}}, \tag{10.1}$$

pri čemer je J vztrajnostni moment tuljave z dodatnimi masami, D pa torzijski koeficient žice.
Poglejmo si osnove delovanja takega galvanometra. V času Δt, ki je znatno krajši od nihajnega časa t_0, definiranega v enačbi (10.1), naj teče skozi tuljavo balističnega galvanometra električni tok I. Zaradi toka delujejo v magnetnem polju trajnega magneta na tuljavo zunanje sile. Navor teh sil, M, skuša tuljavo zavrteti



Slika 10.1: a) Shematski prikaz zrcalnega galvanometra. Označeni deli so: Z - zrcalo; Ž - prožna žica; PS - prozorna skala; T - tuljava; N, S - severni in južni pol trajnega magneta; O - svetilo; b) Povečan prikaz tuljave z dodatnimi masami, obešene na prožni žici.

okoli njene osi. Električni tok in navor se v splošnem sicer spreminjata s časom, $I = I(t)$, $M = M(t)$, vendar pa sta ves čas med sabo sorazmerna: $M(t) \propto I(t)$. Ker nas zanima celotni naboj q_G, ki steče skozi galvanometer, skušamo v resnici izmeriti tokovni sunek:

$$q_G = \int_0^{\Delta t} I(t)\, dt\,, \tag{10.2}$$

ta pa je sorazmeren sunku navora zunanjih magnetnih sil:

$$\int_0^{\Delta t} I(t)\, dt \propto \int_0^{\Delta t} M(t)\, dt\,. \tag{10.3}$$

Sunek navora zunanjih sil lahko povežemo s spremembo vrtilne količine tuljave galvanometra:

$$\begin{aligned} \int_0^{\Delta t} M(t) dt = \Delta\Gamma = \Gamma(\Delta t) - \Gamma(0) = \\ = J\omega \quad - \quad 0 = J\omega\,. \end{aligned} \tag{10.4}$$

Tuljava se torej po času Δt začne vrteti s kotno hitrostjo ω, tako da njena kinetična energija takrat znaša:

$$W_{kin} = \frac{1}{2} J\omega^2\,. \tag{10.5}$$

Tuljava prične nato zvijati žico in se po določenem času $t_0/4$, ko se je zasukala za kot φ_0, ustavi. V tistem trenutku se je začetna kinetična energija (10.5) spremenila v prožnostno energijo žice, tako da velja:

$$W_{kin} = W_{prož} \Rightarrow \frac{1}{2} J\omega^2 = \frac{1}{2} D\varphi_0^2\,. \tag{10.6}$$

Odtod lahko izluščimo zvezo med kotno hitrostjo ω in zasukom φ_0:

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{J}}\,\varphi_0\,. \tag{10.7}$$

Ko združimo enačbe (10.2), (10.3), (10.4) in (10.7), ugotovimo, da za naboj q_G, ki steče skozi galvanometer, velja:

$$q_G = \int_0^{\Delta t} I(t)\, dt \propto \int_0^{\Delta t} M(t)\, dt \propto \omega \propto \varphi_0\,. \tag{10.8}$$

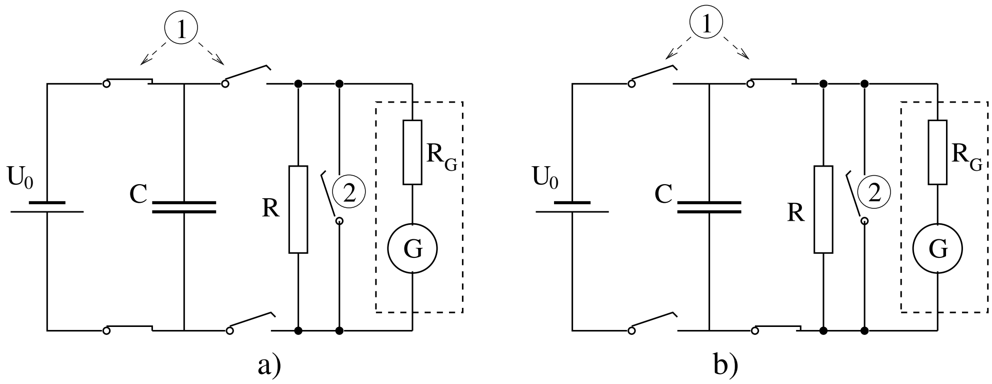
Če je torej izpolnjen pogoj $\Delta t \ll t_0$, je naboj q_G sorazmeren z največjim zasukom tuljave φ_0:

$$q_G = C_q \, \varphi_0 \, . \tag{10.9}$$

Sorazmernostni koeficient C_q v zgornji zvezi imenujemo balistična konstanta galvanometra in jo moramo za dani galvanometer izmeriti. Ko konstanto C_q določimo, pravimo, da smo galvanometer umerili, saj lahko iz največjega zasuka φ_0 izračunamo naboj q_G, ki je stekel skozi galvanometer.

NAVODILO

Za umeritev balističnega galvanometra imaš pripravljen stik v plastični škatlici. Shemo stika prikazuje slika 10.2. Priključi galvanometer na priključka na škatlici, nato pa postavi stikalo 1 v položaj „baterija", stikalo 2 pa v položaj „praznjenje" (slika 10.2 a). S tem nabiješ kondenzator in priključka galvanometra pripraviš za naslednji korak. Stikalo 1 nato preklopi v položaj „kondenzator". S tem si sklenil tokokrog kondenzator – tuljava balističnega galvanometra (glej sliko 10.2 b). Na merilu odčitaj največji odklon X_0 svetlobnega zajčka. Meritev ponovi desetkrat: petkrat naj se svetlobna pika odkloni v eno smer, petkrat pa v drugo (odklon v drugo smer dosežeš tako, da zamenjaš priključka galvanometra).

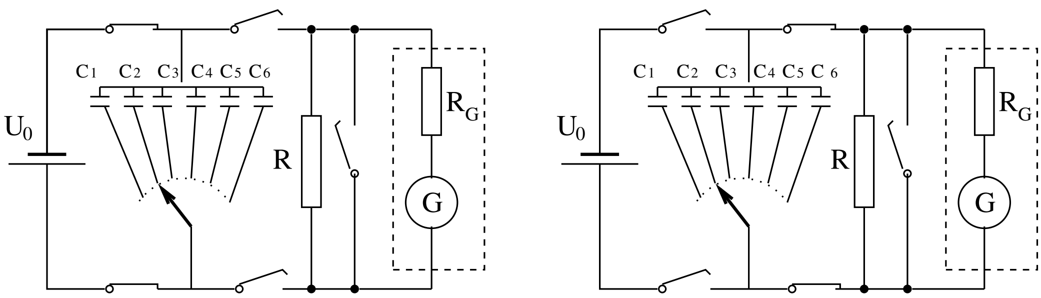


Slika 10.2: Shema vezja, namenjenega umeritvi balističnega galvanometra G. Položaj stikal ① in ② pri: a) polnjenju kondenzatorja; b) praznjenju kondenzatorja skozi upornik in galvanometer.

Iz izmerjenega največjega odklona zajčka, X_0, izračunaj najprej ustrezni največji zasuk:

$$\varphi_0 = \frac{X_0}{L} \, , \tag{10.10}$$

kjer je L razdalja med zrcalcem galvanometra in sredino merila. Poišči povprečno vrednost $\langle \varphi_0 \rangle$ in oceni napako. Balistično konstanto galvanometra izraziš iz zveze



Slika 10.3: Shema na sliki 10.2 prikazuje umeritveno vezje z enim kondenzatorjem s kapaciteto C. V vezju, ki ga imaš na voljo, pa lahko v resnici izbiraš med šestimi različnimi kondenzatorji.

(10.9), če naboj q_G, ki steče skozi galvanometer, izračunaš iz podatkov za upor R, notranji upor galvanometra R_G, kapacitete kondenzatorja C in gonilne napetosti baterije U_0:

$$q_G = \frac{R}{R + R_G}\, CU_0\,. \qquad (10.11)$$

Pri meritvi lahko izbiraš med šestimi različnimi vrednostmi kapacitet (glej sliko 10.3 in tabelo 10.1) kondenzatorja. Za vsako od teh vrednosti določi q_G in povprečni največji odklon galvanometra $\langle\varphi_0\rangle$. Na graf nariši q_G kot funkcijo $\langle\varphi_0\rangle$. Naklon premice, ki jo potegneš skozi dobljene točke, je enak balistični konstanti galvanometra. Iz napake pri risanju premice oceni tudi napako balistične konstante.

L	$27\ \mathrm{cm} \pm 1\ \mathrm{mm}$
1 oznaka	$0,965\ \mathrm{mm}$
R_G	$1410\ \Omega$
U_0	$3,2\ \mathrm{V}$
R	$197\ \Omega$
C_1	$0,505\ \mu\mathrm{F}$
C_2	$1,02\ \mu\mathrm{F}$
C_3	$2,23\ \mu\mathrm{F}$
C_4	$3,45\ \mu\mathrm{F}$
C_5	$4,47\ \mu\mathrm{F}$
C_6	$5,52\ \mu\mathrm{F}$

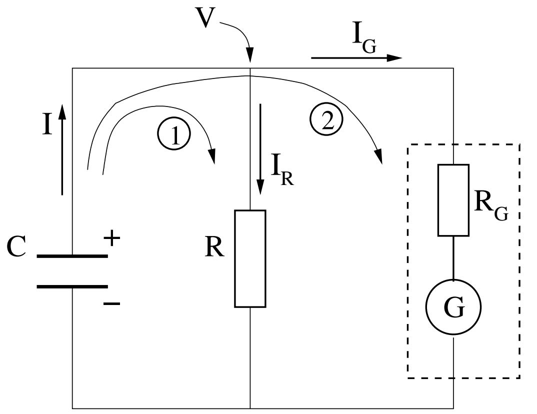
Tabela 10.1: Podatki o galvanometru ter elementih vezja.

OPOZORILO

Ko je stikalo 2 v položaju „galvanometer”, je tuljava galvanometra kratko sklenjena, s čimer varujemo občutljivi sistem galvanometra pred nihanji, ki jih povzročajo zunanje motnje. V ta položaj prestavi stikalo 2 na plastični škatli, ko zaključiš z vajo!

DODATEK

Poglejmo, kako pridemo do zveze (10.11). Ko si sklenil tokokrog, se prične kondenzator prazniti preko uporov R in R_G (glej sliko 10.4, ki ustreza sliki 10.2 b). Z uporabo Kirchhoffovih izrekov pridemo do naslednjih enačb za tokove in padce



Slika 10.4: Vezava pri praznjenju kondenzatorja. Označeni so vsi tokovi, ki tečejo skozi vozlišče V, ter obhoda ① in ②, za katera zapišemo padce napetosti.

napetosti:

$$V : \quad I - I_R - I_G = 0\,, \tag{10.12}$$

$$① : \quad U - R\, I_R = 0\,, \tag{10.13}$$

$$② : \quad U - R_G\, I_G = 0\,, \tag{10.14}$$

kjer je U napetost na kondenzatorju. Ko iz enačb (10.13) in (10.14) izrazimo I_R in I_G ter upoštevamo, da je celotni tok posledica odtekanja naboja s kondenzatorja:

$$I = -\frac{dq_C}{dt} = -\frac{d(CU)}{dt} = -C\frac{dU}{dt}\,, \tag{10.15}$$

lahko zvezo (10.12) predelamo v diferencialno enačbo za napetost na kondenzatorju:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{U}{\tau} = 0\,, \tag{10.16}$$

če vpeljemo časovno konstanto τ:

$$\tau = \frac{RR_G}{R + R_G}\, C\,. \tag{10.17}$$

Z rešitvijo diferencialne enačbe (10.16) ugotovimo, da napetost na kondenzatorju in celotni tok eksponentno padata s časom:

$$U(t) = U_0\, \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{in} \quad I(t) = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d(CU)}{dt} = I_0\, \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\,. \tag{10.18}$$

Začetni vrednosti celotnega toka in napetosti na kondenzatorju sta seveda povezani:

$$I_0 = \frac{CU_0}{\tau}\,. \tag{10.19}$$

Celotni naboj, ki steče skozi galvanometer, izračunamo z integralom toka:

$$\begin{aligned} q_G = \int_0^\infty I_G(t)\, dt &= \int_0^\infty \frac{U(t)}{R_G}\, dt \\ &= \frac{U_0}{R_G} \int_0^\infty \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\, dt = \frac{U_0}{R_G}\, \tau\,. \end{aligned} \tag{10.20}$$

Ko upoštevamo še definicijo časovne konstante τ (10.17), dobimo za celotni naboj, ki steče skozi galvanometer, naslednji izraz:

$$q_G = \frac{R}{R + R_G}\, CU_0\,,$$

ki smo ga uporabili v enačbi (10.11).