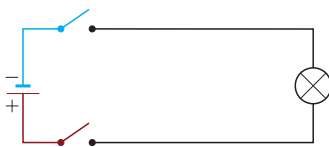




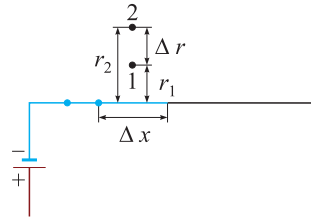
Brzina strujnog vala

Jakov Labor¹

Na slici 1 prikazan je otvoreni strujni krug sa žaruljicom. Da bi ona svijetlila, njezina žarna nit mora biti na naponu izvora. Tada krajevi vodiča priključeni na žarnu nit imaju potencijale jednake potencijalima polova izvora. Neposredno nakon zatvaranja sklopke potencijale jednake potencijalima polova imaju samo krajevi vodiča priključeni na sklopke. Krajevi vodiča na žarnoj niti žaruljice te će potencijale poprimiti tek nakon nekog vremena. Pitanje je kolikom se brzinom potencijal prenosi vodičem.



Slika 1



Slika 2

Razmotrimo prenošenje potencijala gornjim vodičem. Nakon zatvaranja sklopke (slika 2), elektroni će ulaziti u vodič iza sklopke. Ulazeći u vodič, oni djeluju na slobodne elektrone u njemu i pomiču ih udesno. Djelovanje se prenosi među slobodnim elektronima i za vrijeme ulaska određenog broja elektrona u vodič (Δt) prenese se na udaljenost Δx . Taj dio vodiča ima višak slobodnih elektrona jednak broju elektrona koji su ušli u vodič. Zbog naboja (ΔQ) tih elektrona, dio vodiča duljine Δx je na određenom potencijalu, dok je preostali dio vodiča do žaruljice na nultom potencijalu. Usmjereno gibanje elektrona je struja, koja je tijekom vremena Δt doprla do udaljenosti Δx .

Napredovanje (širenje) potencijala i struje duž vodiča slično je napredovanju (širenju) longitudinalnog vala (zvuka) u plinu, pa možemo upotrebljavati termin val potencijala, odnosno strujni val.

Struja (I) koja prolazi dijelom vodiča Δx stvara magnetsko polje

$$B = \mu \frac{I}{2\pi r},$$

gdje je r udaljenost od vodiča, $\mu = \mu_0 \mu_r$, a $\mu_0 (= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1})$ permeabilnost vakuuma i μ_r relativna permeabilnost sredstva u kojem se vodič nalazi.

Napredovanjem strujnog vala udesno, napreduje i magnetsko polje. Zbog toga se između točaka 1 i 2 na slici 2 inducira napon (U), kao što se inducira između krajeva vodiča koji se giba okomito na silnice magnetskog polja. Izraz za napon glasi

$$U = Bv\Delta r$$

¹ Autor je profesor savjetnik u Gimnaziji Antuna Vrančića u Šibeniku.

odnosno

$$U = \mu \frac{I\Delta r}{2\pi vr} \quad (1)$$

gdje je $r_1 < r < r_2$, a v brzina napredovanja strujnog vala i magnetskog polja.

Napon između točaka 1 i 2 možemo iskazati i na drugi način.

Oko dijela vodiča duljine Δx nabijenog nabojem ΔQ postoji električno polje

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} = \frac{\Delta Q}{2\pi\epsilon r\Delta x},$$

gdje je $\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta x}$ linearna gustoća naboja, r udaljenost od vodiča, $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$, a $\epsilon_0 (= 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1})$ permitivnost vakuumu i ϵ_r relativna permitivnost sredstva u kojem se vodič nalazi. Napon je:

$$U = E\Delta r = \frac{\Delta Q}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta r}{2\pi\epsilon r} = \frac{\Delta Q}{v\Delta t} \cdot \frac{\Delta r}{2\pi\epsilon r} \quad (2)$$

$$U = \frac{I\Delta r}{2v\pi\epsilon r},$$

gdje je $\Delta x = v\Delta t$, $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = I$, a r udaljenost od vodiča jednaka onoj koja se nalazi u izvodu izraza (1).

Izjednačavanjem desnih strana izraza (1) i (2) dobijemo:

$$\mu \frac{Iv\Delta r}{2\pi r} = \frac{I\Delta r}{2v\pi\epsilon r}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

ili

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}}. \quad (3)$$

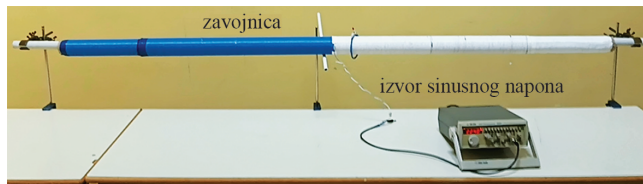
Brzinu strujnog vala možemo odrediti pokusom. Za to je potrebno izmjeriti valnu duljinu (λ) i frekvenciju (f) vala te ih uvrstiti u izraz

$$v = \lambda f.$$

Frekvenciju mjeri sam izvor izmjeničnog napona i ona u ovom pokusu iznosi 2240 kHz.

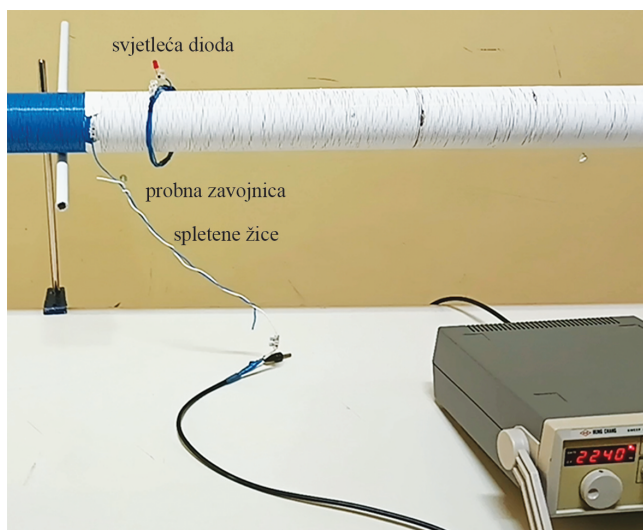
Kako izmjeriti valnu duljinu?

Znamo da je razmak između susjednih trbuha, odnosno čvorova stojnog vala jednak polovini valne duljine. Strujni se stojni val u vodiču može dobiti pomoću izvora sinusnog izmjeničnog napona. Vodič je u ovom pokusu zavojnica s izoliranom žicom dugom oko 234 m i debelom 1.7 mm (s izolacijom) namotanom na kartonsku cijev promjera $d = 6.4 \text{ cm}$ (slika 3).



Slika 3

Zavojnica je s izvorom sinusnog napona povezana spletenim izoliranim žicama (slika 4). Za otkrivanje trbuha struje služi probna zavojnica s nekoliko namotaja na koju je priključena svjetleća dioda (slika 4). U probnoj se zavojnici inducira napon koji je najveći kada je zavojnica na trбуhu struje. Svjetleća dioda tada najjače svijetli.



Slika 4

U ovom je pokusu između susjednih trбуha struje izbrojeno je $N = 186$ namotaja, svaki opsega $o = d\pi$ tako da je duljina žice između susjednih trбуha $Nd\pi$. Ta je duljina jednaka polovini valne duljine (λ) strujnog vala:

$$\frac{\lambda}{2} = Nd\pi,$$

a sama je valna duljina

$$\lambda = 2Nd\pi.$$

Sada možemo izračunati brzinu vala:

$$v = 2Nd\pi f = 2 \cdot 186 \cdot 0.064 \text{ m} \cdot \pi \cdot 2.24 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 1.67 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}.$$

Uzimajući da je relativna permeabilnost izolacije vodiča $\mu_r = 1$, pomoću izraza (3) možemo izračunati relativnu permitivnost izolacije:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \implies$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 \mu_r v^2}$$

$$= \frac{1}{8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1} \cdot 1 \cdot (1.67 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1})^2} = 3.2.$$

Napomena. Ako u jednadžbu (3) uvrstimo $\epsilon_r = 1$ i $\mu_r = 1$, dobit ćemo brzinu svjetlosti u vakuumu, $3 \cdot 10^8$ m/s. Možemo zaključiti da se strujni val širi brzinom svjetlosti, ali je ta brzina u vodiču umanjena za faktor $\sqrt{\epsilon_r} = 3.2$.

Pokus je snimljen i može se vidjeti na kanalu: Jakov Labor – You Tube pod naslovom **Strujni stojni val**.