

Úloha V.P ... budiž světlo

10 bodů; průměr 8,69; řešilo 29 studentů

Odhadněte čas, který uplyne mezi stlačením vypínače a rozsvícením světelného zdroje. Zvlášť vyřešte pro žárovku, zářivku, LED a neonovou trubici. Diskutujte co nejméně faktorů, které tento čas ovlivňují. *Dodo vyhodil jističe.*

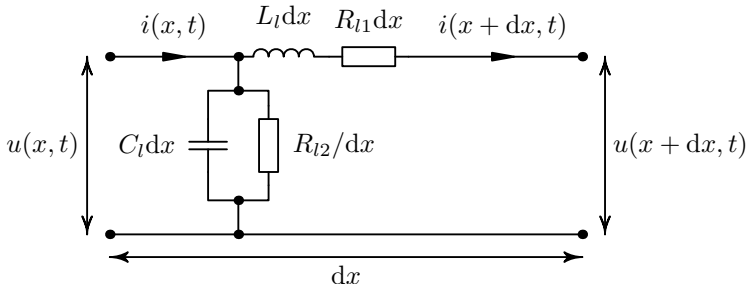
To, ako rýchlo sa rozsvieti svetelný zdroj od stlačenia vypínača, závisí na dvoch základných dejoch:

- ako rýchlo sa preniesie informácia o zopnutí obvodu do svetelného zdroja,
- ako rýchlo je svetelný zdroj schopný premeniť elektrickú energiu na svetlo.

Pri prenose informácie je dôležité uvedomiť si, čo to je a ako sa to šíri. Svetelný zdroj potrebuje pre svoju činnosť energiu, ktorú sme do teraz nazývali informáciou o zopnutí. Energia sa v elektrických obvodoch šíri prostredníctvom elektromagnetického poľa. Nesprávnou úvahou by bolo skúmať rýchlosť šírenia samotných elektrónov, musíme skúmať rýchlosť šírenia elektromagnetickej vlny vo vedení.

Prenosová sústava

Uvažujme, že vypínač je spojený so svetelným zdrojom prostredníctvom homogénneho vedenia. Takéto vedenie má rovnaké vlastnosti po celej svojej dĺžke a jednotlivé druhy energie elektromagnetického poľa sú spojitou rozprestreté pozdĺž jeho vodičov. Elementárny úsek jeho náhradného zapojenia je znázornený na obrázku 1. Ide o element celkovej dĺžky vedenia dx , kde C_l je merná kapacita, L_l je merná indukcia a R_{l1}, R_{l2} je merný odpor vedenia. Veličiny L_l a R_{l1} sú merané pozdĺž vedenia a sú vzťahované na jednotkovú dĺžku, zatiaľ čo C_l a R_{l2} sú merané priečne a tiež sú vzťahované na jednotkovú dĺžku vodiča. Avšak odpor R_{l2} je potrebné deliť dĺžkou elementu (pri nulovej dĺžke by bol zrejme priečny odpor nekonečný, jednotka R_{l2} je $\Omega \cdot m$ nárzdziel od klasického dĺžkového odporu).



Obr. 1: Schéma obvodu.

Obvodové veličiny vo vedení sú funkciami času t a pozdĺžnej vzdialenosti x . Pomocou Kirchhoffových zákonov dostávame pre element vedenia nasledujúce vzťahy

$$u(x, t) = i(x + dx, t)R_{l1}dx + \frac{\partial i(x + dx, t)}{\partial t}L_l dx + u(x + dx, t),$$

$$i(x, t) = i(x + dx, t) + \frac{u(x, t)}{R_{l2}} dx + \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} C_l dx.$$

Uvažováním limity

$$\lim_{dx \rightarrow 0} \frac{u(x + dx, t) - u(x, t)}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

a analogicky pre prúd, dostávame základné rovnice vedenia

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_{l1} i + L_l \frac{\partial i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= \frac{u}{R_{l2}} + C_l \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned}$$

Ich deriváciou a vzájomnou elimináciou premenných získavame vlnovú rovnicu napätia

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_l C_l \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \left(\frac{L_l}{R_{l2}} + C_l R_{l1} \right) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{R_{l1}}{R_{l2}} u.$$

Keďže skúmame vlastnosti vedenia z časového hľadiska, zaujímajú nás predovšetkým časovo zotrvačné vlastnosti ako sú kapacita a indukčnosť (prvky C_l a L_l). Pre zjednodušenie preto môžeme uvažovať bezstratové vedenie a rezistivitu v pozdĺžnom smere vodiča položiť rovnú nule ($R_{l1} = 0$). Ďalej uvažujeme, že priečna rezistivita je veľmi veľká ($R_{l2} \rightarrow \infty$), inak by si priečna kapacita v rovniciach nezahrála. Potom dostávame vzťah

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= L_l C_l \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Rightarrow \frac{\Delta x^2}{\Delta t^2} = \frac{1}{L_l C_l}, \\ \frac{\Delta x}{\Delta t} &= \frac{1}{\sqrt{L_l C_l}} = v, \end{aligned}$$

kde v je rýchlosť šírenia elektromagnetickej vlny vodičom. Zaujíma nás, aký odpor kladie vedenie (vodič) pohybu elektromagnetickej vlny. Môžeme preto písať $L = \tilde{\mu}_r \mu_0$ a $C = \tilde{\epsilon}_r \epsilon_0$, kde $\tilde{\mu}_r$ je relatívna permeabilita a $\tilde{\epsilon}_r$ je relatívna permitivita vedenia. Sú to číselné faktory závislé na geometrii a materiáli konkrétneho vedenia. Dosadením získame

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\tilde{\mu}_r \mu_0 \cdot \tilde{\epsilon}_r \epsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\tilde{\mu}_r \tilde{\epsilon}_r}}.$$

Zistili sme, že rýchlosť v závisí iba na relatívnej permeabilite a permitivite vodiča a platí $v \leq c$. Z elektrotechnickej praxe je známe, že v dobrých vodičoch sa signál šíri rýchlosťou $0,9c$ a v horších vodičoch $0,8c$ ¹. Taktiež platí, že pri dostatočne vysokých frekvenciách sa kapacitory začínajú správať ako rozpojené obvody a indukty ako skraty. V takýchto prípadoch sa so zvyšujúcou frekvenciou bude rýchlosť v limitne blížiť c .

Uvažujme bežný vodič s rýchlosťou šírenia $v = 0,85c$ a typické sieťové napätie o frekvencii 50 Hz. Pri takto malej frekvencii môžeme jej účinky na rýchlosť šírenia elektromagnetickej vlny zanedbať. Čas potrebný pre prenos informácie o zopnutí obvodu do svetelného zdroja je $t = \frac{l}{0,85c}$, kde l je dĺžka vedenia a c je rýchlosť svetla vo vákuu. Pre dĺžku vodiča 10 m dostávame odchýlku $t = 3,9 \cdot 10^{-9}$ s, teda rádovo nanosekundy.

¹ William D. Walker: *Superluminal Propagation Speed of Longitudinally Oscillating Electrical Fields, Causality and Locality in Modern Physics*, Springer Netherlands, 1998

Svetelné zdroje

Žiarovka je jednoduchý svetelný zdroj, ktorý emituje svetlo rozžeravením odporovej špirály umiestnenej vo vákuu alebo inertnom plyne. V tomto prípade má skutočne zmysel hovoriť o čase ohrevu (angl. heating-time). Ten závisí na konkrétnej technológii výroby žiarovky, menovite na realizácii tvaru a materiálu odporovej špirály. Keďže žiarovka sa v čase rozsvetuje plynulo, za rozsvietený stav sa bežne považuje dosiahnutie 90 % svetivosti. Z technickej dokumentácie rôznych výrobcov je možné dohľadať, že žiarovky rôznych typov dosahujú 90 % svojej svetivosti v časovom intervale 0,05 s až 0,7 s.² Žiarovky vyšších výkonov majú tendenciu potrebovať dlhší čas ohrevu.

Žiarivka patrí medzi nízkotlaké výbojky a funguje na princípe fluorescencie. Elektrický prúd tečie vnútri žiarivky vzácnym plynom s parami ortute. Dochádza pritom k ich excitácii a vyžarovaniu krátkovlnného ultrafialového žiarenia. To dopadá na fosforový plášť, na ktorom dochádza k emitácii viditeľného svetla. Tieto zdroje svetla potrebujú pre svoju funkčnosť štartér, ktorý je priamou súčasťou zariadenia. Jeho úlohou je po zopnutí napájania žiarivky zabezpečiť vznik a udržanie toku elektrického prúdu plynom. Práve táto súčiastka spôsobuje skúmané časové zdržanie. Na základe jeho veľkosti môžeme štartéry rozdeliť do troch skupín:

1. Mechanické štartéry často využívajú bimetalový pásik, ktorý pre štart žiarovky potrebuje niekoľko cyklov. Tie môžeme pozorovať po zopnutí ako po sebe nasledujúcu sériu zábleskov doprevádzanú autentickým zvukovým efektom. Tento druh štartéra sa v súčasnosti používa len zriedka a pre štart potrebuje rádovo jednotky sekúnd. Tento čas závisí na druhu bimetalu, veku štartéra a celkovej technickej kondícii žiarivky.
2. Elektronické predradníky sú rôzne druhy zapojení aktívnej elektroniky zabezpečujúce funkčnosť žiariviek. Medzi najpoužívanejšie patria polo-rezonančný predradník, quick-start predradník alebo rapid-start predradník. Ich spoločnou vlastnosťou je dĺžka štartu blízko (no stále pod) hranicou jednej sekundy.
3. Instant-start predradník patrí medzi štandardné elektronické predradníky, no odlišuje sa od nich veľmi rýchlim štartom. Elektrický prúd žiarivkou je stabilizovaný už po prvých desatinách sekundy.

Neónová trubica je druh nízkotlakej výbojky, ktorý používa ako vzácny plyn neón. So žiarivkou zdieľa spôsob štartu a platia pre ňu vyššie diskutované časové vlastnosti žiariviek. Dôležité je nesplieť si neónovú trubicu s neónovou lampou - tlejivkou. Tá nepotrebuje štartovací obvod a pracuje na inom princípe.

LED svetidlá sú moderným zdrojom svetla. Jedná sa o polovodičové súčiastky využívajúce jav elektroluminiscencie. Kvalitné LED sú veľmi rýchle a dokážu operovať vo frekvenciách až 50 MHz. Čipy používané vo väčšine bežných svetidiel sú ale pomalšie a dokážu pracovať v oblasti 1 MHz až 5 MHz. Ich reakčný čas sú preto jednotky mikrosekúnd. V praxi sa však LED nepripájajú na rozvodnú sieť priamo, ale prostredníctvom ovládača. Na trhu existuje množstvo variánt tejto elektroniky od jednoduchých zapojení pasívnych súčiastok až po integrované čipy. Čas potrebný pre inicializáciu takéhoto obvodu sa môže pohybovať od stotín až po desatiny sekundy.

Vo všetkých vyššie uvedených zdrojoch svetla je rozumné uvažovať aj priebeh sieťového napätia v čase ich zopnutia. To má sínusový priebeh o frekvencii 50 Hz, no vyššie popísané zdroje svetla a ich ovládače nerozlišujú svojou technickou realizáciou kladnú a zápornú polvlnu.

² Dulli Agrawal: *Heating-times of tungsten filament incandescent lamps*, World News of Natural Sciences, Vol. 15 11/2017 dostupné online https://www.researchgate.net/publication/320835572_Heating-times_of_tungsten_filament_incandescent_lamps

Môžeme preto uvažovať sieťové napätie zložené z kladných polvln o frekvencii 100 Hz. Ak zopneme vypínač v momente, kedy je priebeh napätia mimo blízkeho okolia amplitúdy, prejaví sa to na svetelnom zdroji ako časové zdržanie. Vláknó žiaroviek sa nestihne dostatočne rozžhaviť a riadiaca elektronika štartérov nedobije kapacitory na potrebnú úroveň. Tieto chyby sa však napravia hneď na ďalšej polvlne. Ak uvažujeme funkčnú oblasť okolo amplitúdy ako $\frac{1}{3}$ z dĺžky periódy, môžeme hovoriť o časovom oneskorení až $\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{100 \text{ Hz}} \doteq 6,7 \text{ ms}$.

Záver

Elektromagnetická vlna je nosičom energie pre svetelný zdroj a vedením sa pohybuje rýchlosťou blízkou rýchlosti svetla. Takto spôsobené oneskorenie je typicky v nanosekundách. Pridáva sa k nemu oneskorenie spôsobené priebehom sieťového napätia v momente zopnutia intervalu 0 – 0,006 s. Napokon prichádza v úvahu rýchlosť samotného svetelného zdroja. Tu to veľmi závisí na jeho druhu a technickej realizácii. Oneskorenie môže byť v rozsahu od pár milisekúnd (LED) až po niekoľko sekúnd (žiarivka).

Filip Geib
geib@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.