

Elektrické obvody očima termovizní kamery

PETR KÁCOVSKÝ

Katedra didaktiky fyziky, MFF UK, Praha

Abstrakt

Příspěvek popisuje tři experimenty, které využívají termovizní kameru pro sledování tepelných jevů v elektrických obvodech. První pokus ukazuje konstrukci vodivého bludiště, ve kterém je Joulovo teplo využito pro nalezení cesty mezi dvěma jeho východy. Druhý experiment se zabývá rozdílnou tepelnou kapacitou různě velkých rezistorů, která se projeví jejich nestejnoměrným zahříváním. Třetí pokus je pak věnován teplotním změnám v harmonickém střídavém obvodu s velmi nízkou frekvencí.

Úvod

Termovizní kamery se vzhledem k jejich setrvale klesajícím cenám postupně stávají stále častěji užitečným pomocníkem nejen ve stavebnictví a průmyslu, ale také na půdě škol. Bylo popsáno mnoho způsobů, jak termokamery využít ve fyzikálních pokusech (např. [1-4]), a to zejména v oblastech molekulové fyziky a termiky v souvislosti s tepelnou vodivostí, skupenskými přeměnami či vnitřní energií. Tento příspěvek navazuje na [5] a rozšiřuje využití termovizních kamer v oblasti elektřiny a magnetismu, konkrétně při studiu tepelných jevů v elektrických obvodech.

Všechny tři experimenty vycházejí z detekce nárůstu teploty, který je způsoben uvolňováním Joulova tepla generovaného při průchodu elektrického proudu vodičem. Pro vodič o odporu R , kterým prochází proud I po čas t , je Joulovo teplo Q_J :

$$Q_J = RI^2t,$$

kde RI^2 je výkon elektrického proudu ve vodiči.

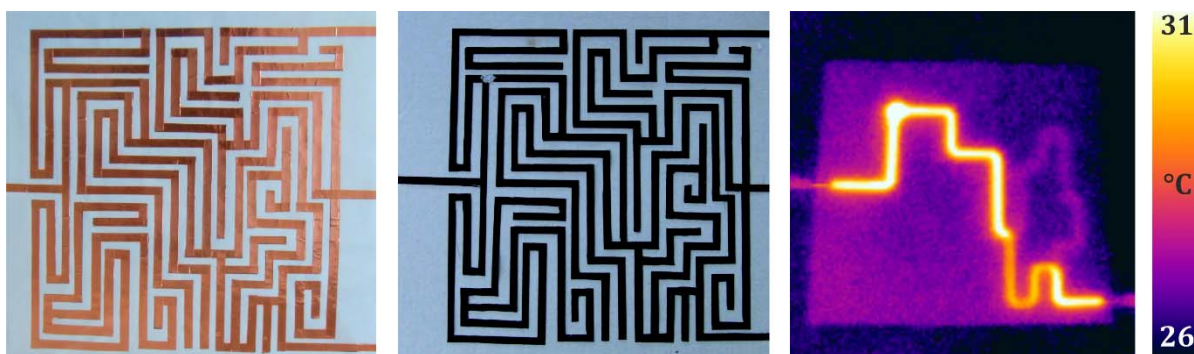
1. Termografické bludiště

Myšlenka využít zahřívání elektrickým proudem pro vyřešení elektricky vodivého bludiště je publikována např. v [6], odkud je převzata i konkrétní podoba labyrintu, který je představen v tomto příspěvku. Fyzikální princip je triviální – připojíme-li dva vodivě spojené výstupy bludiště ke zdroji napětí, poteče mezi nimi proud a zvýší teplotu těch „chodeb“ bludiště, kterými protéká. Termovizní kamera pak snadno odhalí celou vodivou cestu. Existuje-li více různých řešení, ukáže termokamera všechny cesty, přičemž delší cesty budou vzhledem ke svému většímu odporu (předpokládáme homogenní materiál bludiště) méně zahřáté a tedy i méně zřetelné.

Konstrukce bludiště je o poznání obtížnější. Možnost vyřezat jej z tenkého plechu je určena spíše pro manuálně zdatné a v případě zapojení do výuky je takový způsob pro studenty z bezpečnostních důvodů nerealizovatelný. Využití vodivé barvy pro nakreslení bludiště je také značně omezené, pokud chceme, aby byla cesta z hlediska elektrického odporu homogenní. Použitelnější se zdála být možnost sestavit bludiště postupným nalepováním samolepicí měděné pásky, která je zespoda opatřena elektrovodivým lepidlem a je možné ji běžně sehnat v elektrikářstvích. V levé části obr. 1 je ukázka takového bludiště vytvořeného

z přibližně 4 metrů pásky o šířce 5 mm. Proměrování takto vytvořené vodivé cesty však ukázalo, že v řádu sekund její odpor kolísá v rozmezí od desítek ohmů po desítky megaohmů, a to i bez vnějších zásahů (pohybu či změny polohy). Možnou příčinou takové nestability může být zřejmě velký počet přechodových odporů ve všech pravoúhlých spojích, ztráty kontaktu mezi kovem a lepidlem či špatné vodivé propojení mezi bludištěm a napájecími vodiči. Ať už jde o kombinaci těchto vlivů či některý z nich dominoval, celá konstrukce je pro pokus nepoužitelná.

Funkční model bludiště se podařilo vyrobit až díky použití vodivých plastů, které byly představeny na VNUF 19 v příspěvku [7], a to vyřezáním bludiště z kaptonové fólie. Fyzická podoba kaptonového bludiště je zachycena na obr. 1 uprostřed, termografický snímek zachycující vodivou cestu mezi dvěma jejími konci na témže obrázku vpravo.



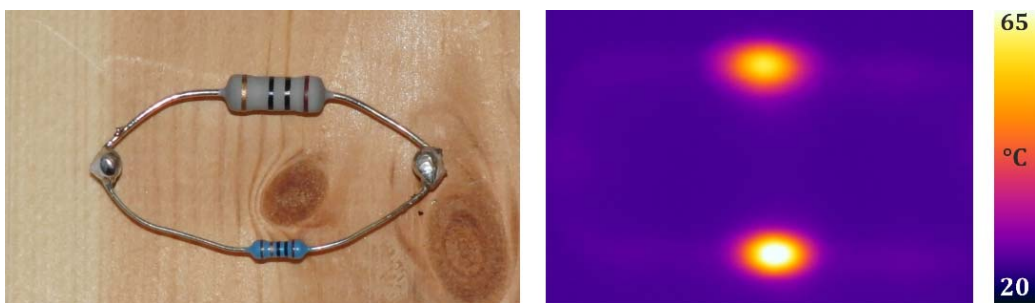
Obr. 1. Vlevo nefunkční bludiště z měděné pásky, uprostřed bludiště z kaptonové fólie a vpravo jeho termografický snímek po připojení napětí 40 V DC. Na termografickém snímku je patrné rozvětvení obvodu (v pravé dolní části) a také místo, kde byl obvod omylem rozstřížen a poté opraven vodivou pastou (jasně svítící bod vlevo nahoře).

2. Tepelná kapacita rezistorů

V příspěvku [5] se autor tohoto článku před dvěma lety věnoval mj. situaci, kdy elektrický proud prochází dvojicí paralelně zapojených rezistorů se stejným odporem. Termovizní měření v tomto případě velmi přesně korespondují s fyzikální teorií, podle které je proud oběma rezistory (a tedy i výkon na nich) stejný – oba rezistory se v takovém případě zahřívají stejně rychle.

Je třeba ovšem dodat, že tento jednoduchý závěr má jeden podstatný předpoklad – abychom dostali očekávaný výsledek, musí být také rozměry, geometrie a materiál rezistorů shodné. Tento experiment ukazuje, co se stane, pokud tomu tak není. Paralelně zde byly zapojeny dva rezistory o odporu 10Ω , kde ovšem horní rezistor byl výrazně hmotnější a objemnější (obr. 2 vlevo). Po připojení ploché baterie (napětí 4,5 V) se sice na obou rezistorech vyvíjí stejné Joulovo teplo, ovšem větší rezistor má výrazně vyšší tepelnou kapacitu a zahřívá se tak pomaleji (obr. 2 vpravo). Naopak, pokud zdroj odpojíme, bude větší rezistor pomaleji chladnout.

Experiment je zachycen na videu ve sbírce [8].



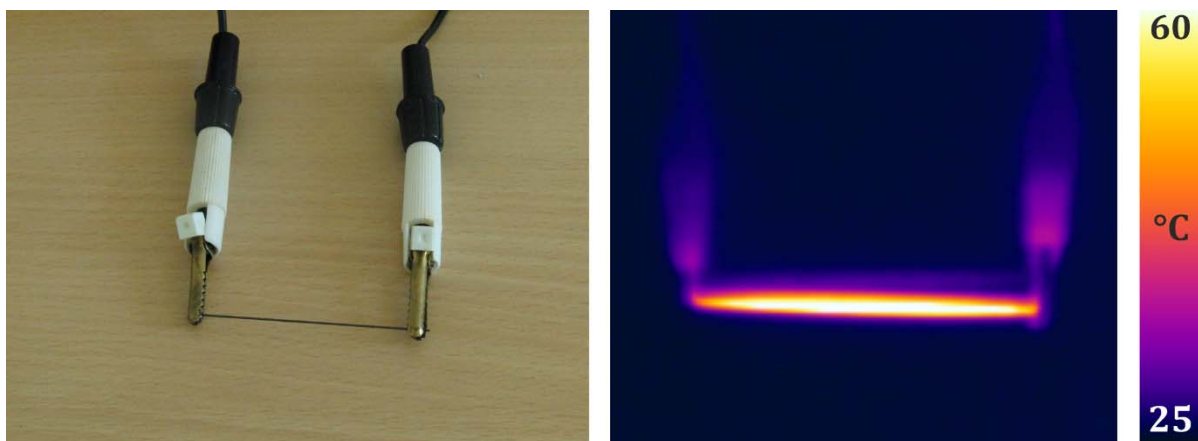
Obr. 2. Vlevo dvojice různě velikých rezistorů ve viditelném oboru, vpravo v IR oboru 10 sekund po připojení ploché baterie.

3. Teplotní změny v harmonickém střídavém obvodu

Ve střídavých obvodech, kde se proud periodicky mění, je také výkon na odporových prvcích proměnný. Konkrétně pro harmonický průběh dostáváme pro ideální rezistor o odporu R průběh výkonu $p(t) = RI_m \sin^2(\omega t)$, kde I_m je amplituda proudu a ω úhlová frekvence. Průběh funkce $\sin^2(\omega t)$ naznačuje, že za dobu jedné periody dosáhne výkon dvakrát svého maxima a dvakrát nulové hodnoty.

Termovizní kamera ovšem neměří výkon, ale teplotu vodiče. Je proto nutné použít vodič, který je schopen změny výkonu velmi rychle převádět na změny teploty, tedy vodič s velmi malou tepelnou kapacitou. Vhodným experimentálním nástrojem se pro tento účel ukázaly být tuhy do mikrotužky, jejichž elektrický odpor je při běžné délce 6 cm a průměru 0,5 mm v řádu jednotek ohmů a umožňuje tak průtok poměrně vysokých proudů.

V popisovaném experimentu byla tuha do mikrotužky připojena ke generátoru harmonických funkcí (obr. 3 vlevo) s efektivní hodnotou napětí 1 V a frekvencí 0,1 Hz. Ideální by bylo používat frekvenci ještě o něco nižší, aby měla tuha možnost v oblastech výkonových minim dostatečně zchladnout, ale běžné školní generátory obvykle s nižšími frekvencemi nepočítají. Každopádně i frekvence 0,1 Hz se ukázala být pro tento pokus použitelná a umožňuje v pětisekundových intervalech pozorovat teplotní maxima a minima. Autora příspěvku až překvapilo, že zpoždění mezi výkonovými a teplotními maximy bylo v jeho měřeních velmi malé.



Obr. 3. Připojení tuhy ke zdroji 1 V AC – ve viditelném i IR oboru

Poděkování

Tento příspěvek byl (coby součást vývoje experimentů určených k odstraňování bariér při porozumění fyzikálním konceptům a zákonitostem) podpořen programem Univerzitní výzkumná centra UK č. UNCE/HUM/024.

Literatura

- [1] The Concord Consortium. *Infrared Tube*. Dostupné online: <http://energy.concord.org/ir>
- [2] Vollmer, M., Möllmann, K.-P.: *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim 2010.
- [3] Short, D. B. *Thermal imaging in the science classroom*. *School Science Review*, 94 (346), 75-78, 2012.
- [4] Haglund, J., Jeppsson, F., Hedberg, D., Schönborn, K. J.: *Thermal cameras in school laboratory activities*. *Physics Education*, 50 (4), 424-430, 2015.
- [5] Kácovský, P.: *Fyzika očima termografie*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 21. E.: T. Milář, J. Válek. Masarykova univerzita, Brno 2016. ISBN 978-80-210-8465-0 (online, PDF) s. 99-103. Dostupné online: <https://katedry.ped.muni.cz/vnuf21/wp-content/uploads/sites/35/2017/02/sbornikvnuf21.pdf>
- [6] Ayrinhac, S.: *Electric current solves mazes*. *Physics Education* 49 (4), 443-446, 2014. Dostupné online: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/49/4/443/pdf>
- [7] Hubeňák, J.: *Vodivé plasty – zajímavý materiál pro laboratorní práci*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 19. E.: V. Vochozka. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2015. ISBN 978-80-210-8465-0 (online, PDF) s. 55-60. Dostupné online: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/19-05-Hubenak.html>
- [8] Sbírkka fyzikálních pokusů. *Jouleovo teplo*. Dostupné online: <http://fyzikalnipokusy.cz/1657/jouleovo-teplo>