

# FYZIKA

## Teoretické úlohy celostátního kola 48. ročníku FO



*Ve dnech 27. února – 2. března se v Bílovci uskutečnilo celostátní kolo 48. ročníku fyzikální olympiády (viz zprávu v MFI 16 (2007), č. 9, s. 574). V příspěvku uvádíme zadání i řešení teoretických úloh, jejichž autory jsou RNDr. Josef Jířů (úloha 1) a PaedDr. Přemysl Šedivý (úloha 2), úlohy 3 a 4 byly převzaty z časopisu Kvant.*

### 1. Potenciál

Dva hmotné body nacházející se ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti  $r$  nesou záporné elektrické náboje  $Q$  a  $nQ$ , kde  $n > 1$ .

- Určete na úsečce spojující oba hmotné body místo maximálního elektrického potenciálu a jeho hodnotu.
- Do uvedeného místa umístíme elektron a nepatrně jej vychýlíme mimo spojnici obou hmotných bodů. Určete limitní velikost rychlosti elektronu ve velmi velké vzdálenosti. Řešení proveďte klasicky i relativisticky.

Úlohy řešte nejprve obecně, pak pro hodnoty  $Q = -1,00 \mu\text{C}$ ,  $n = 5$ ,  $r = 0,200 \text{ m}$ . Klidová hmotnost elektronu  $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ , elementární náboj  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , rychlost světla ve vakuu  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $k = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{C}^{-2} \cdot \text{m}^2$ .

#### Řešení:

1. a) Zvolme souřadnicovou osu  $x$  procházející oběma hmotnými body a s počátkem v bodě s nábojem  $Q$ . Pak elektrický potenciál na spojnici

obou nábojů v bodě o souřadnici  $x$  je

$$\varphi = k \frac{Q}{x} + k \frac{nQ}{r-x}. \quad (1)$$

Hledáme maximum této funkce splňující podmínku  $0 < x < r$ . Provedeme derivaci podle  $x$ :

$$\frac{d\varphi}{dx} = kQ \left( -\frac{1}{x^2} + \frac{n}{(r-x)^2} \right).$$

Z podmínky nulové hodnoty derivace plyne  $x_1 = \frac{r}{\sqrt{n+1}}$ .

(Nulová hodnota derivace je ekvivalentní podmínce nulové intenzity elektrického pole, kterou je možné při řešení použít jako podmínku výchozí místo derivování potenciálu, známe-li vztah  $E_x = -\frac{d\varphi}{dx}$ ).

Dosazením  $x = x_1$  do rovnice (1) dostaneme  $\varphi_{\max} = \frac{kQ}{r}(1 + \sqrt{n})^2$ .

(Že se jedná o maximum, je zřejmé z toho, že  $\lim_{x \rightarrow 0} \varphi = \lim_{x \rightarrow r} \varphi = -\infty$ .)

Číselně vychází  $x_1 = 0,309r = 0,0618 \text{ m}$ ,  $\varphi_{\max} = -471 \text{ kV}$ .

**4 body**

b) Ze zákona zachování energie plyne pro limitní kinetickou energii urychleného elektronu  $E_k = -e\varphi_{\max}$ . Klasicky platí

$$\frac{1}{2}m_0v^2 = e \cdot \frac{k|Q|}{r}(1 + \sqrt{n})^2,$$

$$v = \sqrt{2}(1 + \sqrt{n})\sqrt{\frac{e}{m_0}}\sqrt{\frac{k|Q|}{r}} = (1 + \sqrt{n})\sqrt{\frac{2ke|Q|}{m_0r}}.$$

Podle teorie relativity je splněna rovnice

$$m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = e \cdot \frac{k|Q|}{r}(1 + \sqrt{n})^2.$$

Z rovnice plyne

$$v = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2c^4}{\left(m_0c^2 + e \cdot \frac{k|Q|}{r}(1 + \sqrt{n})^2\right)^2}}.$$

Číselně vychází podle klasické fyziky  $v = 4,07 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , podle teorie relativity  $v = 0,854c = 2,56 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Skutečnosti pro dané číselné hodnoty odpovídá pouze relativistický výsledek.

**6 bodů**

## 2. Dvojhvězda

Algol (beta Persei) je zákrytová dvojhvězda, jejíž dvě složky obíhají okolo společného těžiště po přibližně kruhových trajektoriích s periodou  $T = 2,867$  dne. Rychlosti obou složek mají velikosti  $v_1 = 44,5 \text{ km/s}$  a  $v_2 = 203 \text{ km/s}$ .

- Určete poloměry jejich trajektorií a vyjádřete je v astronomických jednotkách ( $1 \text{ AU} = 1,50 \cdot 10^8 \text{ km}$ ).
- Určete hmotnosti obou složek a porovnejte je s hmotností Slunce ( $m_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ).
- Určete velikost gravitačních sil, kterými na sebe obě složky působí.
- Hodnoty  $v_1, v_2$  byly vypočteny z výsledků spektroskopických měření. Bylo také zjištěno, že radiální rychlost, se kterou se od Slunce vzdaluje těžiště Algolu, má velikost  $v_c = 3,7 \text{ km/s}$ . V jakém rozmezí se mění během dlouhodobého pozorování vlnová délka spektrální čáry draslíku ve spektru menší hmotné složky Algolu, jestliže ve spektru draslíku z pozemského zdroje naměříme hodnotu  $\lambda_0 = 766,491 \text{ nm}$ ? Pohyb Země kolem Slunce považujte za rovnoměrný s rychlostí o velikosti  $v_z = 30 \text{ km/s}$ , spojnice Slunce a Algolu je od roviny ekliptiky odchýlena o úhel  $\beta = 11,5^\circ$ .

Gravitační konstanta je  $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ .

*Řešení:*

2. a) Poloměry trajektorií jsou

$$r_1 = \frac{v_1 T}{2\pi} = 1,75 \cdot 10^9 \text{ m} = 0,012 \text{ AU},$$

$$r_2 = \frac{v_2 T}{2\pi} = 8,00 \cdot 10^9 \text{ m} = 0,053 \text{ AU},$$

**1 bod**

b) Gravitační síly, kterými na sebe obě složky dvojhvězdy vzájemně působí, se uplatňují jako síly dostředivé. Platí

$$\frac{\kappa m_1 m_2}{(r_1 + r_2)^2} = m_1 \frac{4\pi^2}{T^2} r_1, \quad \frac{\kappa m_1 m_2}{(r_1 + r_2)^2} = m_2 \frac{4\pi^2}{T^2} r_2.$$

Vydělíme-li první rovnici  $m_1$ , druhou rovnici  $m_2$  a obě rovnice sečteme, dostaneme

$$\frac{\varkappa(m_1 + m_2)}{(r_1 + r_2)^2} = \frac{4\pi^2}{T^2}(r_1 + r_2),$$

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{\varkappa T^2}(r_1 + r_2)^3 = \frac{T}{2\pi\varkappa}(v_1 + v_2)^3 = 8,96 \cdot 10^{30} \text{ kg}.$$

Dále platí  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{v_2}{v_1}$ . Z toho

$$m_1 = (m_1 + m_2) \frac{v_2}{v_1 + v_2} = \frac{T}{2\pi\varkappa} v_2 (v_1 + v_2)^2 = 7,35 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 3,7 m_\odot,$$

$$m_2 = (m_1 + m_2) \frac{v_1}{v_1 + v_2} = \frac{T}{2\pi\varkappa} v_1 (v_1 + v_2)^2 = 1,61 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 0,81 m_\odot.$$

**4 body**

c) Gravitační síly vzájemného působení mají velikost

$$F = \frac{\varkappa m_1 m_2}{(r_1 + r_2)^2} = \frac{v_1 v_2 (v_1 + v_2)^2}{\varkappa} = 8,3 \cdot 10^{30} \text{ N}.$$

**1 bod**

d) Obě složky Algolu se střídavě přibližují k Zemi a vzdalují od Země. Pro meně hmotnou složku Algolu je maximální rychlost vzdalování

$$v' = v_2 + v_c + v_z \cos \beta \doteq 237 \text{ km/s}$$

a maximální rychlost přibližování

$$v'' = v_2 - v_c + v_z \cos \beta \doteq 229 \text{ km/s}.$$

V prvním případě se v důsledku Dopplerova jevu změní maximální vlnová délka spektrální čáry

$$\lambda' = \lambda_0 \sqrt{\frac{c + v'}{c - v'}} \approx \lambda_0 \left( 1 + \frac{v'}{c} \right) = 767,10 \text{ nm},$$

V druhém případě je změřená vlnová délka minimální a má hodnotu

$$\lambda'' = \lambda_0 \sqrt{\frac{c - v''}{c + v''}} \approx \lambda_0 \left( 1 - \frac{v''}{c} \right) = 765,91 \text{ nm}.$$

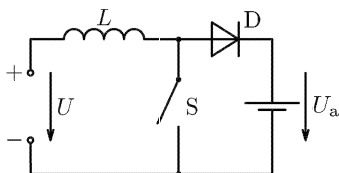
**4 body**

### 3. Nabíječka

K nabíjení akumulátoru o svorkovém napětí  $U_a = 12,0$  V z výkonového zdroje o svorkovém napětí  $U = 5,0$  V použijeme obvod podle obr. 1 skládající se z cívky o indukčnosti  $L = 1$  H, diody D a spínače S, který bude střídavě zapínán a vypínán ve stejných časových intervalech  $\tau_1 = \tau_2 = 0,010$  s.

- Určete a graficky znázorníte, jak se v závislosti na čase bude měnit okamžitý proud  $i$  procházející cívkou, okamžité napětí  $u_L$  na cívce a okamžité napětí  $u_D$  na diodě.
- Určete střední hodnotu proudu nabíjecího akumulátor.

Vnitřní odpory výkonového zdroje a akumulátoru jsou zanedbatelné a svorkové napětí akumulátoru se během nabíjení zvětšuje jen nepatrně. Cívku považujte za ideální. Také diodu považujte za ideální, tj. napětí na ní je v propustném směru zanedbatelné, odpor v závěrném směru je nekonečně velký.

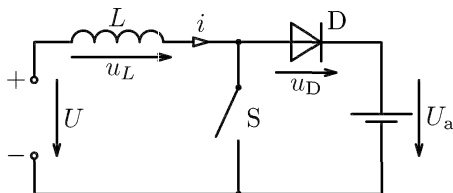


Obr. 1

*Řešení:*

**3. a)** Ve schématu vyznačíme veličiny  $i$ ,  $u_L$  a  $u_D$ , které nás zajímají (obr. R1). Při zvolené orientaci platí

$$u_L = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{u_L}{L}.$$



Obr. R1

Sepnutím spínače na začátku časového intervalu  $\tau_1$  rozdělíme celý obvod na dva samostatné okruhy. Součet napětí v každém z nich je nulový. V levém okruhu platí

$$u_L - U = 0 \quad \Rightarrow \quad u_L = U, \quad \frac{di}{dt} = \frac{U}{L} = \text{konst} > 0,$$

proud cívkou tedy z počáteční nulové hodnoty rovnoměrně poroste a v čase  $t = \tau_1$  dosáhne hodnoty  $I_{\max}$ , pro kterou platí

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{I_{\max}}{\tau_1} = \frac{U}{L} \quad \Rightarrow \quad I_{\max} = \frac{U\tau_1}{L} = 0,050 \text{ A}.$$

V pravém okruhu během časového intervalu  $\tau_1$  platí

$$u_D + U_a = 0 \quad \Rightarrow \quad u_D = -U_a < 0.$$

Dioda je tedy v intervalu  $\tau_1$  zapojena v závěrném směru a proud v pravém okruhu je nulový.

### 3 body

V okamžiku rozpojení spínače na začátku časového intervalu  $\tau_2$  se proud cívkou nepřerušuje, ale pronikne do diody, která se dostane do propustného stavu, a napětí na ní bude nulové. Celé zapojení se změní na jediný okruh, ve kterém platí

$$u_L + u_D + U_a - U = u_L + U_a - U = 0 \quad \Rightarrow \quad u_L = U - U_a = \text{konst} < 0.$$

Napětí na cívce má opačný směr než procházející proud, který se bude z počáteční hodnoty  $I_{\max}$  zmenšovat podle vztahu

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{i - I_{\max}}{t} = \frac{U - U_a}{L} \quad \Rightarrow \quad i = I_{\max} - \frac{U_a - U}{L}t$$

( $t$  měříme od začátku intervalu  $\tau_2$ ). Proud klesne na nulu za dobu

$$\tau_3 = \frac{I_{\max}L}{U_a - U} = \frac{U}{U_a - U}\tau_1 = 0,00714 \text{ s} < \tau_2.$$

Ve zbývajícím čase do konce intervalu  $\tau_2$  přejde dioda do závěrného stavu, cívkou přestane procházet proud a napětí na ní klesne na nulu. Napětí na diodě se naopak změní z nuly na  $U - U_a = -7 \text{ V}$ .

**5 bodů**

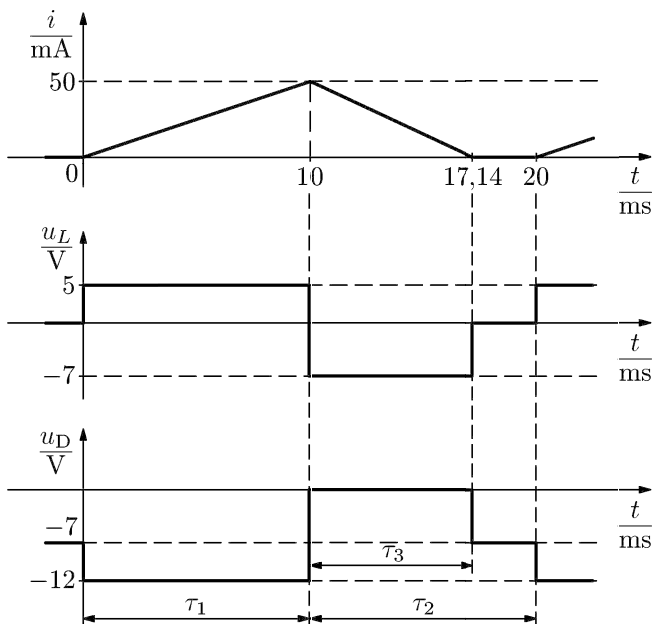
b) Nabíjecí proud prochází do akumulátoru jen v časovém intervalu  $\tau_3$  a jeho velikost se lineárně zmenšuje z  $I_{\max}$  na nulu. Za tuto dobu projde do akumulátoru náboj

$$Q = \frac{I_{\max} \tau_3}{2} = \frac{U^2 \tau_1^2}{2L(U_a - U)}.$$

Střední hodnota nabíjecího proudu je

$$I_{\text{stř}} = \frac{Q}{\tau_1 + \tau_2} = \frac{U^2 \tau_1^2}{2L(U_a - U)(\tau_1 + \tau_2)} = 8,9 \text{ mA}.$$

**2 body**



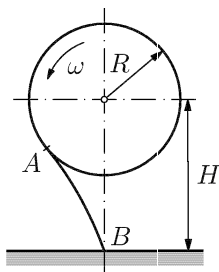
Obr. R2

#### 4. Kapka

Kolo o poloměru  $R = 1,00 \text{ m}$  se otáčí úhlovou rychlostí  $\omega = 5,0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  okolo vodorovné osy umístěné ve výšce  $H = 2,00 \text{ m}$  nad zemí. Od kola odlétla kapka a dopadla do bodu  $B$  přesně pod středem kola (obr. 2).

- Určete dobu letu kapky a polohu bodu  $A$ , ve kterém se uvolnila od kola.
- Určete velikost a směr rychlosti dopadu.

Odpor vzduchu zanedbejte,  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .



Obr. 2

*Řešení:*

4. a) Zvolme vztažnou soustavu podle obr. R3 a označme  $\alpha$  úhel, který svírá úsečka  $OA$  se zápornou poloosou  $y$ . Po odtržení od kola koná kapka vrh šikmo dolů s počáteční rychlostí o velikosti  $v_0 = R\omega$  a s elevačním úhlem  $-\alpha$ , který popisují parametrické rovnice

$$x = -R \sin \alpha + v_0 t \cos \alpha, \quad (1)$$

$$y = -R \cos \alpha - v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2. \quad (2)$$

**2 body**

V okamžiku dopadu platí  $x = 0$ ,  $y = -H$ . Po dosazení do (1) a (2) dostaneme

$$t = \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{v_0} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\omega}, \quad (3)$$

$$-R \cos \alpha - R \operatorname{tg} \alpha \sin \alpha - \frac{g \operatorname{tg}^2 \alpha}{2\omega^2} = -H. \quad (4)$$



Úpravou (4) dojdeme ke kvadratické rovnici

$$(g + 2\omega^2 H) \cos^2 \alpha - 2\omega^2 R \cos \alpha - g = 0.$$

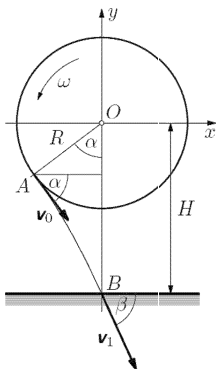
Úloze vyhovuje kladný kořen

$$\cos \alpha = \frac{\omega^2 R + \sqrt{\omega^4 R^2 + g^2 + 2gH\omega^2}}{g + 2\omega^2 H}.$$

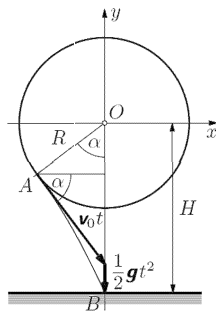
Dobu letu pak vypočítáme dosazením do (3).

Pro dané hodnoty vychází  $\cos \alpha = 0,6034$ ,  $\alpha = 52,9^\circ$ ,  $t = 0,264$  s.

**5 bodů**



Obr. R3



Obr. R4

*Jiný způsob výpočtu doby letu kapky:* Pohyb kapky probíhá jako pohyb složený z rovnoměrného přímočarého pohybu rychlostí  $v_0$  a volného pádu. Z obr. R4 plyne

$$\sqrt{R^2 + v_0^2 t^2} + \frac{1}{2} g t^2 = H.$$

Úpravou dojdeme k rovnici  $\frac{g^2}{4} t^4 - (\omega^2 R^2 + gH) t^2 + H^2 - R^2 = 0$ .

Úloze vyhovuje kořen

$$t^2 = \frac{2}{g^2} \left( \omega^2 R^2 + gH - R \sqrt{\omega^4 R^2 + 2\omega^2 gH + g^2} \right),$$

neboť doba letu kapky je jistě menší než doba volného pádu z výšky  $H$ , která je  $\sqrt{2H/g}$ .

b) Velikost  $v_d$  rychlosti dopadu určíme užitím zákona zachování energie:

$$\frac{1}{2}mv_d^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + mg(H - R \cos \alpha)$$

Z toho

$$v_d = \sqrt{v_0^2 + 2g(H - R \cos \alpha)} = \sqrt{\omega^2 R^2 + 2g(H - R \cos \alpha)} = 7,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Vodorovná složka rychlosti kapky se během vrhu nemění. Proto

$$v_0 \cos \alpha = v_d \cos \beta \quad \Rightarrow \quad \cos \beta = \frac{v_0 \cos \alpha}{v_d} = 0,4168, \quad \beta = 65,4^\circ.$$

**3 body**

## Co skrývá elektrická zásuvka?

PETER ŽILAVÝ

Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

### Úvod

Elektrické spotřebiče doma či ve fyzikální laboratoři jsou v dnešní době již běžnou součástí našeho života. Jedním ze základních požadavků kladených na ně je jejich bezpečnost jak vůči majetku (požár), tak i vůči živým bytostem (úraz elektrickým proudem).

Tento článek se zabývá, učeně řečeno, základními principy ochrany proti nadproudům a zkratovým proudům a tzv. ochranou neživých částí elektrických zařízení samočinným odpojením od zdroje (funkce ochranného kolíku). Jeho část je také věnována i ochraně proudovým chráničem. Článek je určen pro čtenáře – začátečníky hledající základní informace týkající se běžných elektrických instalací.

Vlastní začátky vzniku elektrizačních soustav spadají asi do poloviny 19. století, kdy objev elektrického dynama umožnil poprvé přeměnu mechanické energie v elektrickou. Zpočátku se elektrická energie přenášela v podobě stejnosměrného proudu, při prudkém rozvoji elektrizace však vznikla zásadní překážka v nemožnosti výroby a přenosu větších výkonů pomocí vyššího napětí.

Střídavý proud a možnost jeho výroby byl koncem roku 1870 již znám. Teprve však pozdější, po sobě následující objevy synchronního alternátoru pro výrobu větších výkonů trojfázového proudu, dále objev transformátoru pro potřebné zvyšování napětí na přenos a využití objevu Teslova točivého magnetického pole v asynchronním motoru, znamenaly zásadní změnu v rozvoji elektrizace střídavým proudem [1].

Zvyšující se napětí a přenášený výkon v elektrizačních soustavách na přelomu 19. a 20. století přinesly potřebu chránit před nebezpečným dotykem nejen živé, ale i neživé části elektrických zařízení. Živými částmi přitom rozumíme ty části, které jsou při normálním provozu zařízení pod napětím nebo vedou elektrický proud („vnitřnosti“ elektrických přístrojů), na neživých částech se naopak napětí vůči zemi vyskytne pouze v případě poruchy. Neživými částmi jsou například kovové kryty či vodivá dráždla elektrických spotřebičů.

Mezi nejběžnější ochrany živých částí patří např. *ochrana krytím* (kryt je součástí elektrických zařízení – důkladnost této ochrany závisí na prostředí, do kterého je zařízení určeno), *ochrana polohou* (živé části jsou mimo dosah – např. na sloupu) či *ochrana izolací*. Ochrana izolací spočívá ve vybavení živých částí tak důkladnou izolací, že je dotyk s nimi vyloučen (dvojitá izolace, zesílená izolace). Elektrický spotřebič vybaven touto ochranou je označován jako elektrický předmět třídy II. Na krytu je označen symbolem dvou „soustředných“ čtverců a k elektrické zásuvce se připojuje pomocí dvojpolové vidlice bez ochranného kolíku.

Mezi ochrany neživých částí patří tzv. *ochrana samočinným odpojením od zdroje*. Tento název v sobě zahrnuje staré názvy ochrany *zemněním*, *nulováním a napěťovým a proudovým chráničem*. Klíčovou roli v případě této ochrany hrají přístroje odpojovací vadnou část tj. pojistky, jističe a chrániče. Princip činnosti této ochrany je předmětem dalších odstavců.

## Elektrina v počátcích

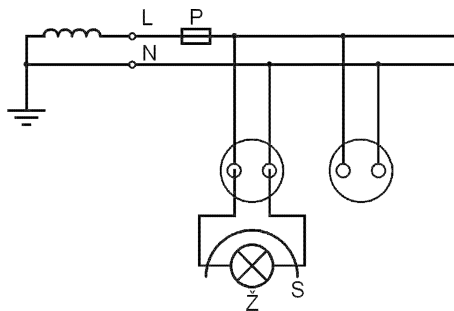
Od počátků elektrifikace se v kontinentální Evropě používal Edisonův nechráněný (bez ochranného kolíku) systém domovních zásuvek a vidlic

s válcovými pracovními kolíky na vidlici. Dutinky zásuvek nebyly vytvářeny jako díly s pružnými částmi, pružení zabezpečoval podélně rozříznutý a předpružený kolík. Později byla koncepce vidlic a zásuvek změněna, pružení již musely zajistit dutinky.

Příklad zapojení těchto nechráněných zásuvek a elektrických spotřebičů (jednofázové připojení) v počátcích elektrifikace ukazuje obr. 1. Písmenem L (Live) je označen fázový vodič, písmenem N (Neutral) je označen střední vodič. Střední vodič je spojen s uzlem trojfázového distribučního transformátoru a se zemí. „Cesta proudu“ začíná na svorce L sekundárního vinutí transformátoru, pokračuje přes pojistku P, levou dutinku zásuvky, spotřebič, pravou dutinku zásuvky, střední vodič N až do uzlu transformátoru.

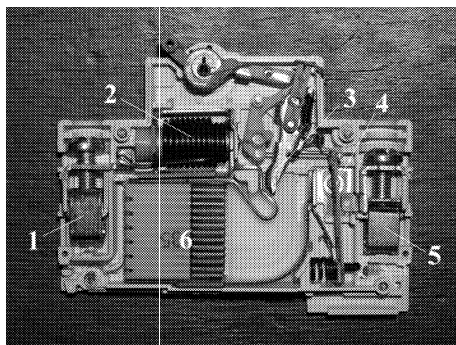
Úkolem pojistky P bylo zde odpojit vadnou část při zkratu či přetížení a ochránit tak vedení, spotřebič či jiný majetek od požáru vzniklého nadměrným zahřáním vodičů zkratovými proudy či nadproudy.

Princip pojistky spočívá v přetavení tenkého drátku z lehce tavitelného kovu (Woodův kov, stříbrný drátek . . . ) při proudu větším, než je jmenovitý proud pojistky. Drátek je přitom „obalen“ křemenným pískem, který pomůže uhasit elektrický oblouk vznikající při přerušení obvodu s proudem. Doba potřebná na přerušení obvodu přitom závisí na tom, kolikrát je překročen jmenovitý proud. Rozlišujeme také mezi pojistkami „pro vedení“ a pojistkami se zpožděnou charakteristikou (tzv. „motorové“) umožňující krátkodobé přetížení vznikající např. při rozběhu elektromotoru.



Obr. 1

S postupem času byly tavné pojistky nahrazovány postupně jističi (i když je i dnes celá řada aplikací, kde se tavné pojistky používají). Příklad jističe (vyroben v roce 2005) je zobrazen na obr. 2. Součástí jističe je tzv. elektromagnetická spoušť, která způsobí rychlé vypnutí jističe při velkých proudech – např. při zkratu nebo při několikanásobném (5 až 7 krát) překročení jmenovitého proudu jističe, a tzv. tepelná spoušť (pomalá – pracující na principu bimetalového pásku), která způsobí vypnutí jističe po určité době při přetížení (nadproudu).



Obr. 2 Jedopólový jistič

„Cesta proudu“ jističem začíná svorkou (1). Poté proud prochází cívkou (2) elektromagnetické spouště a následně rozpínacím kontaktem (3). Proud pak prochází bimetalovým páskem (4) tepelné spouště ke svorce (5). Důležitou součástí jističe je také zhášecí komora (6) – místo, kam je vytažen elektrický oblouk vznikající při rozpínání obvodu s proudem.

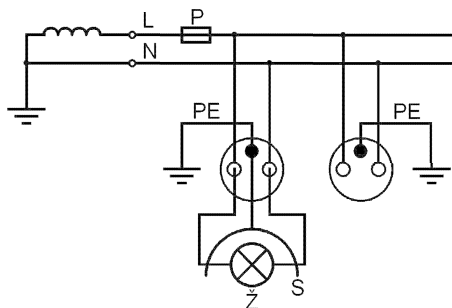
### Ochrana neživých částí samočinným odpojením od zdroje

Častou poruchou elektrických přístrojů (lampička, pračka, lednice ...) je nechtěné spojení jejich vnitřních živých částí s kovovým krytem přístroje („upadlý“ vodič uvnitř, poškozená izolace atd.). Pokud tak dojde k dotyku fázového vodiče (nebo jiné živé části pod napětím vůči střednímu vodiči) s krytem přístroje, objeví se na tomto krytu nebezpečné dotykové napětí vůči zemi. Jestliže se takto poškozeného přístroje dotýká živá bytost (člověk, zvíře) současně s jiným uzemněným předmětem (vodovodní kohoutek, topení, vodivá podlaha atd.), může dojít k úrazu elektrickým

proudem. Cesta poruchového proudu v tomto případě začíná na živém konci sekundárního vinutí distribučního transformátoru (viz obr. 1) a pokračuje pojistkou a fázovým vodičem (L) přes dutinku zásuvky do spotřebiče, dále nechtěným spojením na kostru přístroje a pak přes dotýkající se osobu a uzemněný předmět zemí zpět k uzlu distribučního transformátoru. Velikost tohoto proudu je především dána odporem živé bytosti – přechodovými odpory mezi tělem bytosti a krytem přístroje či uzemněného předmětu (suché nebo vlhké ruce ...). Poruchový proud nestačí na to, aby jistič či pojistka odpojily spotřebič od sítě. V nepříznivém případě, když se již živá bytost sama nezvládne pustit krytu přístroje, může pak nebezpečný proud působit trvale.

## Sít' TT

Jedno z možných řešení tohoto problému je dodatečné spojení kovových krytů přístrojů se zemí (obr. 3) vodičem PE (Protective Earth). Vznikne tak tzv. síť TT (první T znamená spojení uzlu distribučního transformátoru se zemí, druhé T označuje propojení neživých částí se zemí). Spojení krytu přístroje se zemí sice omezí velikost nebezpečných dotykových napětí, avšak v důsledku mnohdy velké impedance smyčky (procházející přes dvě uzemnění) nestačí poruchový proud k tomu, aby nadproudový jističí prvek (pojistka, jistič) odpojil v dostatečně krátké době poškozený přístroj od sítě. Dotykové napětí vůči zemi také velmi závisí na kvalitě provedení uzemnění. Síť TT se u nás vyskytují pouze v omezené míře a jsou postupně nahrazovány sítěmi TN.

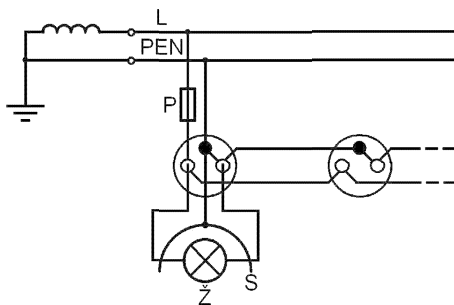


Obr. 3 Ochrana před nebezpečným dotykovým napětím v síti TT

## Síť TN-C

Problém dlouhé doby odpojení poškozeného přístroje v síti TT řeší náhrada cesty poruchového proudu zemí tzv. nulovacím vodičem PEN tak, jako to ukazuje obr. 4. Vodič PEN zde plní současně funkci pracovní (protékají jím pracovní proudy připojených elektrických spotřebičů) i funkci ochrannou. V případě poruchy – spojení fázového vodiče s kostrou S spotřebiče (např. kovového stínítka lampičky či kovového krytu žehličky) prochází poruchový proud z fázového vodiče (L) přes pojistku a levou dutinku zásuvky ke spotřebiči, v místě poruchy se pak dostává na kostru přístroje a ochranným vodičem se přes ochranný kolík a vodič PEN vrací do uzlu transformátoru. Jelikož v tomto případě není poruchový proud omezen odporem spotřebiče, je jeho hodnota dána pouze napětím sítě a impedancí smyčky („cesty proudu“).

Poruchový proud je při správně navržené instalaci (dostatečné průřezy vodičů atd.) a při jejím správném použití (vhodné pohyblivé přívody ke spotřebičům, krátké prodlužování šňůry) dostatečný k tomu, aby nadproudový jistící prvek (pojistka, jistič) odpojil v předepsané krátké době vadný spotřebič od sítě. Popsaná ochrana se dříve označovala jako *ochrana nulováním* (dnes ochrana samočinným odpojením od zdroje v síti TN-C).



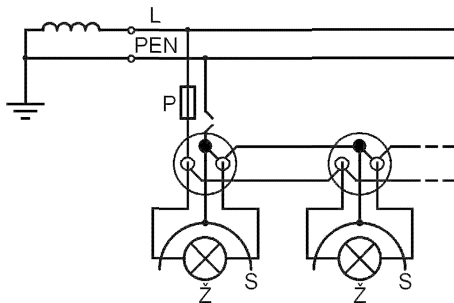
Obr. 4 Ochrana samočinným odpojením od zdroje v síti TN-C

Při provádění elektrické instalace je potřeba respektovat normou předepsané (domluvené) barevné značení vodičů. Fázový vodič (L) je označen černou nebo hnědou barvou (barva izolace), střednímu vodiči (N) náleží světlemodrá barva a ochrannému vodiči (PE) kombinace žluté a zelené barvy (= žlutá barva se zeleným pruhem). Jelikož je v síti TN-C u vodiče PEN funkce ochranná nadřazena funkci pracovní, označuje se tento vodič

také žluto/zelenou barvou. V případě sítě TN-C tedy „ve zdi“ přichází k zásuvce černý a žluto/zelený vodič, v zásuvce je vodič PEN rozdělen na ochranný vodič a střední vodič a tyto vodiče pak už ve svých barvách (žlutá/zelená a světlemodrá) pokračují spolu s hnědým (černým) fázovým vodičem uvnitř síťové šňůry ke spotřebiči.

Spojení kovových krytů přístrojů s vodičem PEN však přináší i některé negativní jevy. Například v důsledku protékajících pracovních proudů vodičem PEN vznikají (malé, ale přesto znatelné) rozdíly potenciálů mezi ochrannými kolíky jednotlivých zásuvek. Tyto rozdíly nejsou pro obsluhu nebezpečné, přinášejí ale problémy, pokud jsou přístroje propojeny navzájem ještě signálovými kabely. Může jít například o počítače propojené v počítačové síti nebo přístroje tvořící audio/video řetězec (známé potíže s „vrčením“ či vlněním obrazu). Rozdíl potenciálů mezi ochrannými kolíky zásuvek se prostřednictvím kovových krytů často přenáší právě na uvedené signálové kabely a ovlivňuje tak přenášenou informaci.

Závažným nedostatkem popsané ochrany nulováním je i ohrožení bezpečnosti v případě přerušení vodiče PEN, například v důsledku jím protékajících velkých pracovních proudů spotřebičů. Velice častou závadou je například „upálení“ vodiče pod špatně dotaženým šroubkem v elektrické zásuvce (hlavně u hliníkových vodičů). Nebezpečnou situaci ukazuje obr. 5.



Obr. 5 Nebezpečí při přerušení vodiče PEN v síti TN-C

Proud vycházející ze živého konce vinutí distribučního transformátoru (viz obr. 5) se po průchodu pojistkou a spotřebičem (spotřebiči) vrací do pravé dutinky zásuvky a odtud pokračuje k ochrannému kolíku zásuvky. Jelikož je v tomto případě přímá cesta k uzlu transformátoru přerušena (přerušen vodič PEN), proud pokračuje dále ochrannými vodiči (PE) po-

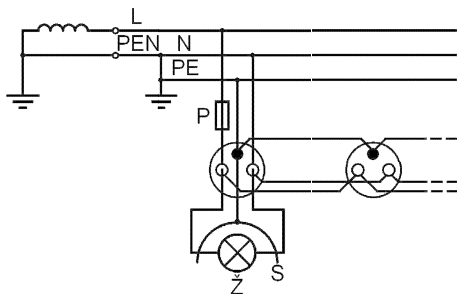


hyblivých přívodů (síťových šňůr) spotřebičů na jejich kovové kryty a přes dotýkající se obsluhu přes zem do uzlu distribučního transformátoru. Dotýkající se živá bytost je v tomto případě sériově spojena s odporem spotřebičů. Protože je odpor lidského těla obvykle výrazně větší než je odpor vlákna žárovky, topné spirály žehličky či jiného spotřebiče, objeví se na krytu přístroje nebezpečné dotykové napětí téměř v plné výši napětí sítě. Popsaná situace je ještě zákernější v případě, když je spotřebič vlevo na obr. 5 (např. lampička) připojen k zásuvce, avšak je vypnut síťovým vypínačem (na obrázku nezakreslen – přerušuje pouze fázový a popřípadě i střední vodič, ochranný vodič je trvale připojen ke krytu přístroje). Nic netušící obsluhou (dotýkající se krytu spotřebiče připojeného k levé zásuvce) zde může procházet proud, který se „dostal“ na ochranný kolík levé zásuvky přes zapnutý spotřebič zapojený v pravé zásuvce (umístěné například v sousední místnosti ...).

Sítě TN-C se u nás (na rozdíl od „západních“ zemí) přes všechny jejich nevýhody používaly (z důvodu šetření materiálem) téměř až do konce 20. století a teprve teď jsou při rekonstrukcích či nových projektech postupně nahrazovány bezpečnějšími sítěmi TN-S.

## Síť TN-S

Uvedeným nedostatkům sítě TN-C se dá částečně čelit rozdělením vodiče PEN na zvláštní ochranný vodič PE a samostatný pracovní střední vodič N v místě blíže k uzlu distribučního transformátoru tak, jako to ukazuje obr. 6. Obvykle je toto rozdělení provedeno v místě měření spotřeby elektrické energie (u elektroměru) nebo v následném podružném rozvaděči. V místě rozdělení vodiče PEN by měl být vodič PE uzemněn.



Obr. 6 Ochrana samočinným odpojením od zdroje v síti TN-S

V případě sítě TN-S tedy „ve zdi“ přichází k zásuvce tři vodiče – černý nebo hnědý (fázový), světlemodrý (střední) a žluto/zelený (ochranný). Tyto vodiče pak ve stejných barvách pokračují i uvnitř síťové šňůry ke spotřebiči.

Princip činnosti ochrany samočinným odpojením od zdroje v síti TN-S je podobný jako v případě sítě TN-C. Na rozdíl od předchozího případu ale zde neprochází ochranným vodičem pracovní proudy elektrických spotřebičů. Nevznikají tedy uvedené potenciálové rozdíly mezi ochrannými kolíky různých zásuvek a je také menší pravděpodobnost přerušení vodiče PE (vodič není během normální funkce elektrických spotřebičů zatěžován). Na druhou stranu ale, v případě přerušení vodiče PE např. v důsledku jeho mechanického poškození nás na tuto skutečnost „nic neupozorní“. Elektrické spotřebiče v tomto případě řádně pracují (na rozdíl od situace při přerušení vodiče PEN v síti TN-C). Teprve při souběhu s další poruchou, kdy dojde ke spojení fázového vodiče s kovovým krytem u některého z připojených spotřebičů, může nastat situace podobná té na obr. 5.

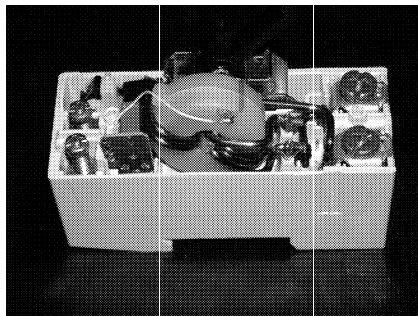
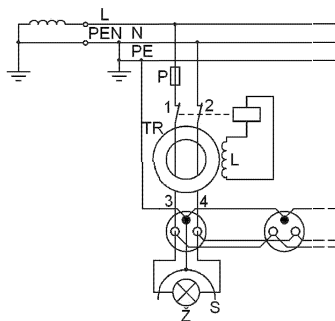
Podobně jako v síti TN-C, lze i u sítě TN-S vznést argument, že může dojít k přerušení vodiče PEN ještě před jeho rozdělením na vodič PE a N a tím k situaci popsané na obr. 5. Rozdělení vodiče PEN je však obvykle provedeno v místech s větším průřezem vodičů a pomocí robustnějších svorkovnic, takže pravděpodobnost této poruchy je výrazně menší, než v předchozím případě.

Jak již bylo uvedeno, popsaná ochrana samočinným odpojením od zdroje v sítích TT, TN-C i TN-S vyžaduje ke své správné funkci dosažení dostatečně velkého poruchového proudu, který způsobí vypnutí předřazeného jisticího prvku. V řadě případů (nedokonalé spojení s kostrou při poruše, velká jmenovitá hodnota jističe, dlouhé vodiče ...) však tomu tak není a porucha se v obvodu může vyskytovat příliš dlouho. Popsanou situaci řeší použití proudového chrániče.

## **Proudový chránič**

Jednoduše řečeno, úkolem proudového chrániče je „hlídat“, aby se proud vystupující z fázového vodiče (L) všechen vracel do vodiče středního (N). Pokud nastane větší odchylka v těchto proudech než je určitá malá předepsaná hodnota (viz dále), proudový chránič odpojí chráněné zařízení od sítě. Odchylka může nastat právě tím, že se část proudu uzavírá přes kovový kryt přístroje a ochranný vodič (nebo přes dotýkající se živou bytost) a nevrací se středním vodičem (N).

Základem proudového chrániče je tzv. diferenciální transformátor (TR). Na toroidním jádře jsou navinuta dvě vinutí o malém (stejném) počtu závitů ze silného vodiče, kterými protékají pracovní proudy spotřebiče (viz obr. 7 vpravo –  $2 \times 3$  závitů). Smysl těchto vinutí je takový, aby při rovnosti okamžitých hodnot proudu vytékajícího z fázového vodiče a proudu vracejícího se do středního vodiče byla okamžitá hodnota magnetické indukce v jádře transformátoru vždy rovna nule (aby se „dílní magnetická pole“ od obou vinutí navzájem odečetla).



Obr. 7 Proudový chránič

Na toroidním jádře je dále navinuto třetí vinutí (L) z tenkého vodiče o velkém počtu závitů. Na obr. 7 vpravo je toto vinutí pod plastovým krytem toroidního transformátoru – jsou vidět jeho přívodní svorky – k jedné z nich je připojen tenký bílý vodič.

Pokud dojde k poruše ve spotřebiči (např. ke spojení fázového vodiče s kovovým krytem přístroje) za proudovým chráničem, rozdíl proudů v prvních dvou cívkách způsobí výsledné nenulové (střídavé) magnetické pole v jádře transformátoru. V důsledku tohoto pole se ve třetí cívice s velkým počtem závitů indukuje napětí. Toto napětí po přivedení na elektromagnet vypínací spouště způsobí následné rozpojení kontaktů a odpojení vadného spotřebiče od sítě. Opětovné připojení chráněného spotřebiče k síti je pak možné pouze mechanicky pomocí ovládací páčky.

Proudové chrániče používané pro ochranu před nebezpečným dotykem jsou konstruovány tak, aby vypuly již při rozdílu proudů do 30 mA během 0,2 s. Připomeňme přitom, že fázovým a středním vodičem (a tedy i vinutími diferenciálního transformátoru) mohou téct pracovní proudy řádu

desítek ampér – při proudu 30 A tedy proudový chránič reaguje na rozdíl proudů, který je tisíckrát menší než je pracovní proud.

Samotný proudový chránič nechrání před zkratem mezi fázovým a středním vodičem a musí mu proto být předřazen jistící prvek (pojistka, jistič).

Proudové chrániče jsou opatřeny testovacím tlačítkem (v obr. 7 nezakresleno). Sériová kombinace tohoto tlačítka s rezistorem je zapojena mezi svorky 2 a 3 chrániče (viz obr. 7). Stiskem tlačítka se tak simuluje porucha (proud prochází pouze jedním vinutím diferenciálního transformátoru). Výrobce obvykle předepisuje pravidelné provádění této kontroly funkce chrániče (např. jednou za 6 měsíců).

Proudový chránič (jak plyne z principu jeho činnosti) chrání i před nebezpečným dotykem živých částí. Například, pokud se živá bytost dotkne přímo fázového vodiče (například dítě vsune hřebík do levé dutinky zásuvky) a proud touto bytostí překročí hodnotu 30 mA, odpojí proudový chránič tuto zásuvku. Nepomůže však při současném dotyku fázového a středního vodiče (hřebíky v obou dutinkách zásuvky.).

## Závěr

Tento článek není univerzálním návodem pro zřizování či opravy rozvodů elektrické energie v bytě, domě nebo v laboratoři. Tuto činnost smějí provádět pouze pracovníci s odpovídající elektrotechnickou kvalifikací. Umožňuje však poznat a prozkoumat (např. při výuce fyziky), jak jsou zapojeny elektrické obvody, jaké součásti se v nich používají a jakou mají funkci.

## Literatura

- [1] [http://www.pre.cz/pre/nase\\_spolecnost/vice\\_o\\_pre/historie.html](http://www.pre.cz/pre/nase_spolecnost/vice_o_pre/historie.html)
- [2] <http://www.elektrika.cz>
- [3] *Honyš, V.*: Nová příručka pro zkoušky elektrotechniků 1997 – 1998. IN-EL Praha (1997).
- [4] Norma: ČSN 33-2000-4-41