

## Zadání III. série



Termín odeslání: 17. ledna 2000

Milí řešitelé,

konečně dostáváte do rukou autorská řešení první série Fykosu společně se svými opravenými úlohami. Na konci brožurky najdete výsledkovou listinu. Je možné, že některé vaše údaje ve výsledkové listině nesouhlasí se skutečností nebo jsou neúplné. Pošlete nám tedy doplňující informace s řešením další série. Dejte pozor na to, abyste svá řešení posílali včas a správně ofrankovaná. Přejeme vám všem krásné Vánoce a úspěšný nový rok 2000.

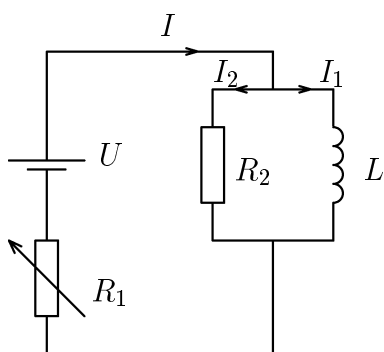
organizátoři Fykosu

### Úloha III.1 ... asfaltoví holubi

Na pokusné střešnici se nachází vrhač asfaltových holubů. Ve vzdálenosti  $d$  od něj stojí myslivec, snažící se zasáhnout letící cíl. Pod jakým úhlem  $\alpha$  musí namířit, aby se trefil, víme-li, že na zamíření potřebuje čas  $\tau$  (tj. čas od vrhu holuba do výstřelu)? Asfaltoví holubi jsou vrháni kolmo vzhůru rychlostí  $v_h = 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , náboj opouští hlaveň rychlostí  $v_0 = 400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , vzdálenost  $d = 50 \text{ m}$  a čas  $\tau = 2 \text{ s}$ . Odpor prostředí zanedbejte.

### Úloha III.2 ... supravodič

Mějme následující obvod:



Obr. 1

Část obvodu obsahující  $R_2$  a  $L(10 \text{ H})$  je ponořena do kapalného hélia. Vodiče v této části jsou supravodivé (mají nulový odpor). Vyndáme-li  $R_2$  z hélia, má odpor  $5 \Omega$ .

První experiment probíhá následovně: Proud  $I$  měníme pomocí  $R_1$  tak, aby v časovém intervalu  $(t_0, t_1)$  byl konstantní  $1 \text{ A}$ , v  $(t_1, t_2)$  rovnoměrně klesal na nulu, v  $(t_2, t_3)$  rovnoměrně stoupal na  $0,5 \text{ A}$  a dále byl konstantní. V čase  $t_3$  rezistor  $R_2$  vyndáme z hélia a v čase  $t_4$  jej tam opět spustíme. V  $t_0$  je  $I_1 = I_2 = 0,5 \text{ A}$ . Určete časový průběh  $I_1$  a  $I_2$  v časovém intervalu  $(t_0, t_4)$ .

Druhý experiment probíhá následovně: Na počátku je  $R_2 = 0 \Omega$ ,  $I_1 = 0 \text{ A}$ ,  $R_1 = 7,5 \Omega$ ,  $I = 0,5 \text{ A}$ .  $R_1$  se dále nemění. V čase  $t_1$  vyndáme  $R_2$  z hélia a v čase  $t_2$  jej tam opět spustíme. Načrtněte do grafu průběh časové závislosti  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ .

### Úloha III.3 ... a přece se točí

Uvažte měděný kruhový závit o poloměru  $R = 10 \text{ cm}$ , který leží na stole v magnetickém poli Země (vektor magnetické indukce je rovnoběžný se stolem, který se nachází na rovníku). Poloměr drátu je  $r = 0,3 \text{ mm}$ . Závitem prochází proud  $I$ . Určete  $I$  tak, aby se závit překloupil (předpokládejte, že tření je dostatečně velké, takže závit neproklouzne).

### Úloha III.4 ... „My name is James Bond ...“

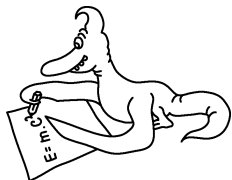
Představme si autíčko, které jede po letišti rovnoměrně přímočaře (vzhledem k letištní hale) rychlostí  $\vec{v}$ . Kromě autíčka stojí na letišti sličná letuška (nestojí na přímce, po které se pohybuje autíčko). V okamžiku, kdy je autíčko letušce nejbližší (t.j. spojnice autíčko — letuška je kolmá na  $\vec{v}$ ), se řidič rozhodne, že dojede letušku navštívit. Autíčko dokáže v libovolném směru vyvinout zrychlení o maximální velikosti  $a$ . Za jaký nejkratší čas se autíčko dostane k letušce? Čas se počítá od okamžiku fatálního rozhodnutí. Předpokládejte, že auto u letušky nebude zastavovat ani přibrzďovat. (Nápověda: Uvažujte různé vztažné soustavy.)

**Úloha III.P ... šup sem, šup tam**

Spočítejte frekvenci kmitů atomů v krystalu  $NaCl$ . Můžete si úlohu zjednodušit tak, že budete uvažovat pouze coulombovské působení sousedních atomů. Jako bonus můžete spočítat i amplitudu výchylky.

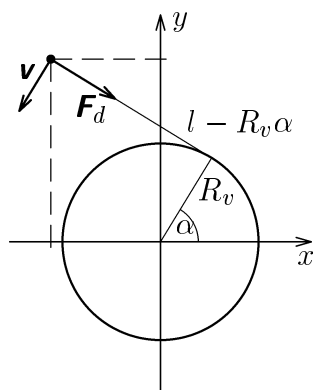
**Úloha III.Exp ... hustota lihu**

Sežehněte si stopky, dostatečné množství lihu (denaturovaného) a nekalibrovaný hustoměr (či dřevěnou tyčku zatíženou závažíčkem), u kterého si můžete zjistit rozměry a hmotnost. Navrhněte vhodnou metodu, ve které použijete zmíněné pomůcky, a změřte hustotu lihu.

**Řešení I. série****Úloha I.1 ... trhání nitě** (4 body, řešilo 121 studentů)

Mějme pevně upevněný válec o poloměru  $R_V$  umístěný ve vakuu mimo jakékoliv silové pole. K tomuto válci připevníme (např. přilepíme) jeden konec niti, která má mez pevnosti v tahu  $\sigma_p$ , poloměr  $r$  a délku  $l$ , na jejímž druhém konci je upevněna olověná kulička o hmotnosti  $m$ . Nit napneme a kuličce udělíme rychlost  $v_0$ , jejíž směr bude kolmý na napnutou nit a na osu válce. Nit se začne na válec namotávat. Určete, v jaké vzdálenosti od válce se kulička utrhne a jaká bude v tomto okamžiku její rychlost.

Řešte nejprve obecně a pak pro hodnoty:  $v_0 = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $m = 2 \text{ kg}$ ,  $r = 0,2 \text{ mm}$ ,  $\sigma_p = 160 \text{ MPa}$ ,  $R_V = 5 \text{ cm}$ ,  $l = 2 \text{ m}$ .



Obr. 2

Nejdříve si musíme uvědomit, jak se kulička bude chovat. Nejprve se bude pohybovat po kružnici, dokud provázek nebude mít směr tečny válce. Poté začne navíjení provázku na válec. Provázek na kuličku bude působit dostředivou silou o velikosti  $F_d = \frac{mv^2}{l_1}$ , kde  $l_1$  je délka nenavíjené části provázku a  $v$  je jeho okamžitá rychlost. Provázek se přetrhne, až na něj bude působit tahová síla o velikosti  $F_{max} = S\sigma_p = \pi r^2 \sigma_p$ . Při přetržení tedy budou obě síly v rovnováze, bude tedy platit

$$\pi r^2 \sigma_p = \frac{mv^2}{l_1}$$

$$l_1 = \frac{mv^2}{\pi r^2 \sigma_p}.$$

Abychom zjistili, jak se mění délka provázku, musíme zjistit, jak se mění velikost rychlosti kuličky. Zde nastane problém, jaké zákony zachování můžeme použít. Zákon zachování hybnosti a momentu hybnosti použít nelze. Budeme-li totiž na válec působit silou, která bude zároveň vyvolávat moment síly, nezačne se válec pohybovat, neboť je upevněný. Nelze u něj tedy určit hybnost ani moment hybnosti. Zákon zachování mechanické energie však platit bude. Kulička se nenachází v žádném silovém poli, její potenciální energie se nemění, a protože se nemění ani celková energie válce, zůstává kinetická energie kuličky konstantní. Toto lze také ukázat tím, že dostředivá síla působící na kuličku nekoná žádnou práci. Vykonaná práce bude  $W = \int \mathbf{F}_d \cdot d\mathbf{r}$ . Zavedme souřadnou soustavu, která má počátek ve středu válce. Je zřejmé, že provázek bude stále napnutý, proto můžeme polohový vektor kuličky vyjádřit v závislosti na úhlu  $\alpha$  takto:

$$\mathbf{r} = (R_V \cos \alpha - (l - R_V \alpha) \sin \alpha, R_V \sin \alpha + (l - R_V \alpha) \cos \alpha).$$

V této soustavě vyjádříme vektor dostředivé síly takto:

$$\mathbf{F}_d = (F \sin \alpha, -F \cos \alpha)$$

Diferencováním polohového vektoru získáme:

$$d\mathbf{r} = ((R_V\alpha - l) \cos \alpha \, d\alpha, (R_V\alpha - l) \sin \alpha \, d\alpha)$$

Skalární součin  $\mathbf{F}_d \cdot d\mathbf{r} = 0$ , tedy  $d\mathbf{r}$  je kolmé na  $\mathbf{F}_d$ . Vykonaná práce tedy bude nulová. Kinetická energie kuličky se nemění, bude platit  $v = v_0$ . Délka provázku při přetržení bude:

$$l_1 = \frac{v_0^2 m}{\pi r^2 \sigma_p} \doteq 10 \text{ cm} .$$

Protože hledáme vzdálenost kuličky od válce, musíme si uvědomit, jak tato vzdálenost závisí na délce provázku. Budeme uvažovat že kulička se stále pohybuje v rovině kolmé na osu válce. Pak snadno z Pythagorovy věty určíme vzdálenost kuličky od válce:

$$d = \sqrt{R_V^2 + l_1^2} - R_V \doteq 6,1 \text{ cm} .$$

Na závěr lze dodat, že počáteční délka provázku je větší než délka, při které se kulička utrhne. Provázek se tedy přetrhne až po započetí navíjení.

**Karel Honzl**

### Úloha I. 2 ... brzdící vlak (3 body, řešilo 172 studentů)

Určete, jaký výkon dodává do elektrické sítě vlak o hmotnosti  $m = 800 \text{ t}$ , který pomocí elektrodynamických rekuperačních brzd (brzdy, které přemění kinetickou energii vlaku na energii elektrickou) zastaví z rychlosti  $v_0 = 80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  za  $\tau = 2 \text{ min}$ . Účinnost rekuperace uvažujte 50%.

Energie předaná brzdám (resp. práce brzd vykonaná na vlakové soupravě) bude rovna celkové kinetické energii vlakové soupravy. Ovšem získaná energie vrácená do sítě bude vzhledem k účinnosti brzd ( $\eta = 50\%$ ) poloviční. Pak podle známého vzorce určíme průměrný výkon  $\bar{P}$ , který po dobu brzdění dodávají rekuperační brzdy zpět do sítě.

$$\bar{P} = \eta \frac{W}{\tau} = \eta \frac{E_k}{\tau} = \eta \frac{mv_0^2}{2\tau}$$

Číselně  $\bar{P} \doteq 823 \text{ kW}$ .

Budeme-li navíc předpokládat, že vlak brzdí rovnoměrně a tedy že se pohybuje rovnoměrně zpomaleně, můžeme ještě určit závislost  $P(t)$  okamžitého výkonu na čase. Podívejme se, co se stane za malý čas  $\Delta t$ . Rychlost vlaku se sníží o  $\Delta v$ . Za předpokladu, že jde o rovnoměrně zpomalený pohyb platí:

$$\Delta v = a\Delta t ,$$

kde  $a$  je zpomalení dané jako  $a = v_0/\tau$ . Změna kinetické energie je

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}m((v + \Delta v)^2 - v^2) = \frac{1}{2}m(2v\Delta v + \Delta v^2)$$

a okamžitý výkon (pro  $\Delta t \rightarrow 0$ )

$$P = \eta \frac{\Delta E_k}{\Delta t} = \eta \frac{\frac{1}{2}m(2va\Delta t + a^2\Delta t^2)}{\Delta t} = \eta mav .$$

S přihlédnutím k závislosti  $v(t) = v_0 - at$  a po následné úpravě dostaneme výsledný vztah:

$$P = \eta \frac{mv_0^2}{\tau} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)$$

Pro ty, kteří někdy o derivacích slyšeli, dodejme jen, že k hledanému vztahu jsme se mohli dostat přímo derivací práce podle času.

$$P = \eta \frac{dW}{dt} = \eta \frac{d}{dt} \left(\frac{mv^2}{2}\right) = \eta mav$$

Vzhledem k ne zcela přesnému zadání jsme udělovali bonusový bod za závislost  $P(t)$  nebo zdůvodnění faktu, že neznáme-li průběh brzdění, nemůžeme tuto závislost určit. A protože byla úloha velice jednoduchá, strhávali jsme body i za špatná numerická řešení, což byla kupodivu častá chyba. V některých řešeních chyběl rozumný slovní komentář nebo popis veličin, což je pro opravující celkem důležité. Posledním problémem bylo rozumné zaokrouhlování. Jistě uznáte, že udávat výše uvedený výsledek ve wattech s přesností na 4 desetinná místa je přinejmenším fyzikální úlet.

**Daniel Sprinzel**

### Úloha I.3 ... zahřívání a ochlazování (5 bodů, řešilo 83 studentů)

Do nádoby s vodou dáme ponorný ohříváč a zapneme jej do zásuvky. Závislost teploty na čase po zapnutí ohříváče vidíme na grafu na obrázku 3. Poté, co teplota dosáhne  $60^\circ\text{C}$  (trvalo to tři minuty), ohříváč vypneme. S pomocí grafu odhadněte, za jak dlouho nádoba s vodou vychladne na  $50^\circ\text{C}$ . A za jak dlouho na  $30^\circ\text{C}$ ? Tepelnou kapacitu a tepelnou setrvačnost ohříváče neuvažujte.

Při řešení této úlohy použijeme následující předpoklady: výkon ohříváče ( $P$ ) a tepelná kapacita vody ( $C$ ) jsou konstanty a zanedbáváme vypařování vody. Při ohřívání se jen část dodané energie spotřebuje na ohřátí vody, zbytek unikne do okolí. Označme  $P_z$  ztrátový výkon (je to energie, která unikne do okolí za jednotku času). Platí rovnice

$$Pt - P_z t = C\Delta T$$

kde  $t$  je čas, za který se voda ohřeje o teplotu  $\Delta T$ .  $P_z$  je přibližně úměrný rozdílu teploty okolí a vody. Při ohřívání z  $20^\circ\text{C}$  na  $30^\circ\text{C}$  je tento rozdíl malý, můžeme si tedy dovolit ztráty v tomto úseku zanedbat ( $P_{z1} = 0\text{W}$ ). Díky tomu odhadneme výkon ohříváče jako

$$P = C \frac{\Delta T_1}{t_1}$$

$\Delta T_1$  a  $t_1$  vyčteme z grafu. Při dalším ohřívání už  $P_z$  zanedbat nelze, řekněme, že v každém z intervalů  $30^\circ\text{C}$  až  $40^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  až  $50^\circ\text{C}$  a  $50^\circ\text{C}$  až  $60^\circ\text{C}$  je  $P_z$  přibližně konstantní, pak platí

$$P_{zi} = P - C \frac{\Delta T_i}{t_i} = C \left( \frac{\Delta T_1}{t_1} - \frac{\Delta T_i}{t_i} \right) \quad i = 2, 3, 4$$

Když vypneme ohříváč, voda se z  $60^\circ\text{C}$  na  $50^\circ\text{C}$  ochladí výkonem  $P_{z4}$  za čas  $t_4^*$ , z  $50^\circ\text{C}$  na  $40^\circ\text{C}$  výkonem  $P_{z3}$  za  $t_3^*$  a konečně ze  $40^\circ\text{C}$  na  $30^\circ\text{C}$  výkonem  $P_{z2}$  za  $t_2^*$ . Přičemž platí

$$P_{zi} t_i^* = C \left( \frac{\Delta T_1}{t_1} - \frac{\Delta T_i}{t_i} \right) t_i^* = C \Delta T_i \quad i = 2, 3, 4$$

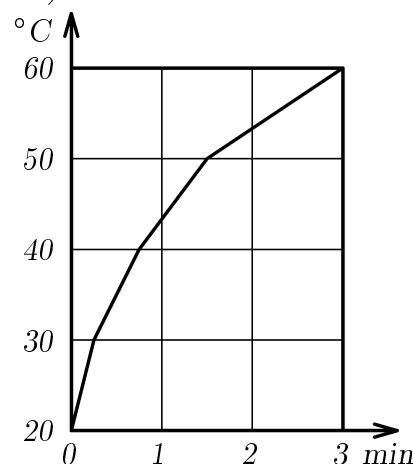
$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3 = \Delta T_4 = 10^\circ\text{C}$  a tedy se pokrátí. Po úpravě vyjde

$$t_i^* = \frac{t_1 t_i}{t_i - t_1}$$

Z grafu vyčteme tyto hodnoty:  $t_1 = 15\text{s}$ ,  $t_2 = 30\text{s}$ ,  $t_3 = 45\text{s}$ ,  $t_4 = 90\text{s}$ . Po dosazení dostaneme, že na  $50^\circ\text{C}$  se voda ochladí asi za  $t_4^* = 18\text{s}$  a na  $30^\circ\text{C}$  za  $t_4^* + t_3^* + t_2^* = 70\text{s}$ .

Ve skutečnosti ztráty v prvním úseku nebudou nulové, tedy skutečný výkon vařiče bude větší, proto i ztrátové výkony budou větší a časy chladnutí kratší.

Někteří úlohu řešili tak, že graf ohřívání otočili kolem osy odpovídající  $40^\circ\text{C}$  a tento považovali za graf chladnutí. Dostali tak odhad  $t_4^* = 15\text{s}$  a  $t_4^* + t_3^* + t_2^* = 90\text{s}$ . Ne všichni si ovšem uvědomili, že takto by úloha šla řešit pouze v případě, že by teplota okolí byla  $20^\circ\text{C}$  a voda by byla ohřívána



Obr. 3

dostatečně dlouho (aby se ztrátový výkon vyrovnal ohřívacímu) a dostatečně malým výkonem (aby se voda nevypařila).

Další možnost pro ty, kteří umí řešit diferenciální rovnice, je, že předpokládáme  $P_z$  přímo úměrný rozdílu teploty vody a okolí ( $T_0$ ). Vyřešíme rovnici

$$P dt - K(T - T_0) dt = C dT$$

Je-li  $T_0$  i počáteční teplota vody, vyjde

$$T = \frac{P}{K}(1 - e^{-\frac{K}{C}t}) + T_0$$

Konstanty hledáme tak, aby graf v zadání tuto rovnici splňoval. Přibližně vychází  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\frac{P}{K} = 45^\circ\text{C}$  a  $\frac{K}{C} = \frac{1}{80}\text{s}^{-1}$ . Pro ochlazování řešíme

$$-K(T - T_0) dt = C dT \quad \Rightarrow \quad t = -\frac{C}{K} \ln \frac{T - T_0}{T^* - T_0}$$

kde  $T^*$  je teplota na počátku chladnutí, tedy  $60^\circ\text{C}$ . Číselně vychází, že ochlazování na  $50^\circ\text{C}$  trvá 23s a na  $30^\circ\text{C}$  asi 110s, což je více než v předchozích odhadech.

Těžko ovšem můžeme říci, který z odhadů je nejlepší, neboť o ohřívání a ochlazování nevíme nic bližšího. Nedá se tedy jednoznačně určit, které ze zanedbání, jež jsme provedli, vnáší do výsledku větší chybu.

**Lenka Zdeborová**

#### Úloha I.4 ... moře (4 body, řešilo 92 studentů)

Planeta o poloměru  $R = 6400$  km je obklopena  $H = 10$  km hlubokým mořem o hustotě  $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Měřením bylo zjištěno, že při ponořování tělesa do moře se nemění gravitační síla na něj působící. Máte-li zadánu gravitační konstantu  $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ , spočítejte gravitační zrychlení u povrchu planety.

Na začátku bychom se chtěli omluvit za "chybné" zadání této úlohy. Chybné v uvozovkách, protože pozměněné zadání má taky řešení. Na to přišli ale jenom čtyři řešitelé. Chyba byla v tom, že těleso jsme *ponořovali*, a měli jsme ho jenom *ponořit*.

Podívejme se nejdříve, jak to bude vypadat, když těleso do vody *ponoříme*. Pro gravitační zrychlení na povrchu planety platí:

$$g(R) = g(R + H) \Rightarrow \frac{\kappa \frac{4}{3} \pi \rho_{pl} R^3}{R^2} = \frac{\kappa \left[ \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_{pl} - \rho) + \frac{4}{3} \pi (R + H)^3 \rho \right]}{(R + H)^2} \quad (1)$$

Odtud dostaneme vztah pro hustotu planety

$$\rho_{pl} = \rho \frac{(R + H)^3 - R^3}{R(R + H)^2 - R^3} \quad (2)$$

Dosazením do (1) dostaneme rovnici:

$$g = \frac{4}{3} \pi \kappa \rho \frac{(R + H)^3 - R^3}{(R + H)^2 - R^2} = \frac{4}{3} \pi \kappa \rho \frac{3R^2 + 3RH + H^2}{2R + H} \quad (3)$$

Podle zadání  $R \gg H$ , proto můžeme členy  $3RH + H^2$  vůči  $3R^2$  zanedbat, stejně jako  $H$  vůči  $2R$ . Potom platí:

$$g \approx 2\pi\kappa\rho R = 2,68 \text{ ms}^{-2} \quad (4)$$

Někteří z vás psali výsledek na osm i deset platných číslic. Je to zbytečné, protože  $\kappa$  známe s přesností na tři platné číslice a výsledek určitě nemůžeme znát přesněji.

Jak to bude vypadat, když budeme těleso do vody *ponořovat*? Musí platit

$$g = \frac{\frac{4}{3}\kappa\pi \left[ R^3 (\rho_{pl} - \rho) + \rho (R + h)^3 \right]}{(R + h)^2} = konst. \quad (5)$$

Zderivováním této funkce musíme zjistit, že derivace se rovná nule nezávisle na  $h$ . Zderivováním dostáváme

$$\frac{dg}{dh} = \frac{4}{3}\pi\kappa \frac{\rho (R + h)^3 - 2R^3 (\rho_{pl} - \rho)}{(R + h)^3} \quad (6)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že  $dg/dh$  závisí na  $h$ , a tedy  $g$  se musí měnit s hloubkou. To znamená, že v zadání je chyba, nemůžeme mít konstantní  $g$  po celou dobu ponořování.

**Pavol Habuda**

### Úloha I. P ... hrníček (6 bodů, řešilo 49 studentů)

Máme stůl a na něm hrníček. Chceme stůl přemístit o 10 m dále. Navrhněte průběh zrychlení tak, aby hrníček nespadol a stůl se přemístil co nejrychleji (přičemž na konci pohybu se nebude hýbat ani hrníček ani stůl). Stůl má rozměry  $1 \times 1$  m a hrníček je před pohybem umístěn ve středu. Koeficient statického smykového tření (mezi hrníčkem a stolem) je  $f_0 = 0,19$ , koeficient tření v pohybu je  $f = 0,10$ , stůl se může pohybovat maximálně se zrychlením  $a_{\max} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Veškerý pohyb (a tedy i zrychlení) se odehrává v rovině stolu, která je vodorovná.

Na úvod řešení je třeba doplnit jisté předpoklady. Za prvé, že hrníček se nám nepřevrhne při zrychlování a za druhé, že pohyb stolku je pouze posuvný. Dále si označme  $L = 10$  m.

Nejjednodušší způsob jak "rychle" přenést stůl s hrníčkem, je dát stolku zrychlení, nazveme ho kritické  $a_k$ , kdy se stůl pohybuje největším zrychlením a hrníček se díky koeficientu statického tření nepohne a pak stůl opačným zrychlením ubrzdí.

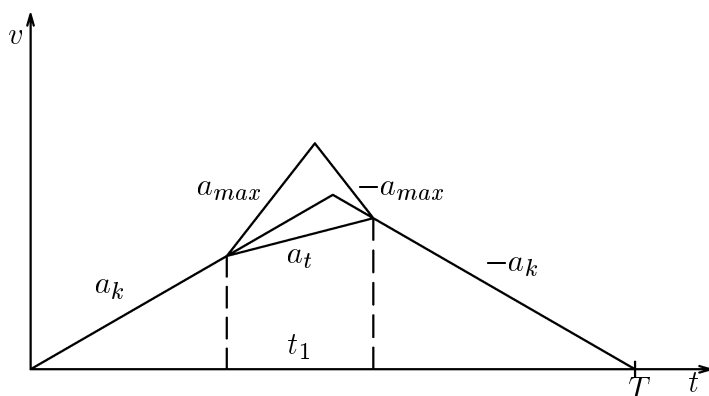
$$a_k = gf_0.$$

S tímto zrychlením stůl projde dráhu  $L/2$  za čas

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot L/2}{gf_0}} = \sqrt{\frac{L}{gf_0}} \doteq 2,316 \text{ s}.$$

Zbylou dráhu  $L/2$  bude stůl brzdit. Celkový čas

$$t_2 \doteq 4,63 \text{ s}.$$



Obr. 4

Teď se podívejme za jaký čas přesuneme stůl když hrníček bude klouzat. Nejlepší čas dostaneme, když hrníček bude klouzat dozadu, dobrzdí na konci stolku a zůstane tam. Nic lepšího se udělat nedá. Je zbytečné, aby hrníček někdy klouzal dopředu (vůči stolu). Tím by se sice zkrátil čas na brzdění stolku, ale vzhledem k tomu, že hrnek brzdí s největším zrychlením  $a_t = gf = 0,981 \text{ ms}^{-2}$ , což je dost málo, celkový čas by byl horší.

Teď si ještě uvědomit, že jistou dobu třeba stůl posouvat se zrychlením  $a_k$  (největší možné, aby se hrníček nezačal hýbat), protože se nám nepodaří uskutečnit klouzání hrnku a jeho ubrzdění při  $a_{\max}$  na dráze 0,5, resp.  $1/\sqrt{2}$  metru za celkovou dobu posouvání. Když dobrzdí dříve než stůl, což se i stane, pak brzdíme stůl zrychlením  $-a_k$ .

*Poznámka:* Když začneme brzdit stůl zrychlením  $-a_{\max}$ , pak hrnek začne brzdit vůči stolu. Právě opsaný pohyb je znázorněn na obrázku 4.

Z grafu spočteme celkový čas:

Plocha pod grafem je vzdálenost, kterou urazí stůl za čas  $T$ . Označme si plochu trojúhelníka o stranách  $a_k, -a_k, T$  jako  $S$ , plochu trojúhelníka o stranách  $a_{\max}, -a_{\max}, a_t$  jako  $l$  a plochu trojúhelníka o stranách  $a_k, -a_k, a_t$  jako  $\Delta L$ , kde  $l = 0,5$  m. Platí

$$\begin{aligned} L &= S + l - \Delta L \\ S &= \frac{a_k T^2}{4} \\ \Delta L &= \frac{1}{2} a_k t_1^2 - \frac{1}{2} a_t t_1^2 - a_k t'^2 \\ t' &= \frac{a_k - a_t}{a_k} t_1 \\ \Delta L &= \frac{1}{2} t_1^2 \left( 2 \left( \frac{a_k - a_t}{a_k} \right)^2 a_k + a_k - a_t \right) \\ l &= \frac{1}{2} t_1^2 \left( 2 \left( \frac{a_{\max} - a_t}{a_{\max}} \right)^2 a_k + a_{\max} - a_t \right) \end{aligned}$$

Číselně vychází  $T = 4,6$  s, což je lepší výsledek jako  $t_2$ .

*Poznámka 2:* Řešitel Petr Houštěk napsal užitečný spodní odhad  $t_{\min}$ . Cituji: "Ať už ale budeme stůl posunovat jakkoli, posune se hrníček alespoň o  $d = 9,5$  m, jeho zrychlení nepřekročí  $a_k$  ( $a \leq a_k$ ), odtud dostáváme, že čas nemůže být menší než

$$\begin{aligned} t_{\min} &= 2\sqrt{\frac{d}{a_k}}, \\ t_{\min} &= 4,51 \text{ s.} \end{aligned}$$

**Ladislav Michnovič**

### Úloha I. Exp ... měrná tepelná kapacita vody (8 bodů, řešilo 115 studentů)

Vaším úkolem je změřit měrnou tepelnou kapacitu vody. Metodu měření si můžete vybrat sami, lze například měřit rychlost vzrůstu teploty vody ohřívané ponorným vařičem nebo měřit změnu teploty vody při ponoření tělesa o známé teplotě a tepelné kapacitě, vaší vynalézavosti se však meze nekladou.

#### Chyby měření

Z praktických důvodů zde uvádíme základní poznatky z teorie chyb.

#### Chyby systematické

Jde o chyby způsobené použitou metodou, měřícími přístroji a některé chyby experimentátora. Systematické chyby obvykle zkreslí výsledek, buď k trvale vyšším nebo trvale nižším hodnotám.

- 1) Chyby metody — např. považujeme odpor spirály za konstantní a on se s teplotou mění.
- 2) Chyba měřidla — nedokonalost a nepřesnost stupnic (např. vzdálenost mezi jednotlivými dílky teploměru odpovídá 0,99 K namísto 1 K).
- 3) Některé chyby osobní — jsou dány nedokonalostí našich smyslů apod.

Systematické chyby nelze zmírnit velkým počtem měření!

#### Chyby náhodné

Při opakování měření za týchž podmínek zjistíte, že jednotlivé výsledky se navzájem poněkud liší. Měření je ovlivněno malými změnami teploty či tlaku, změnou polohy oka, prouděním vzduchu, ... Takových navzájem nezávislých jevů bývá mnoho a těžko bychom hledali přesnou příčinu

odchyly, proto náhodné chyby připisujeme skutečně náhodě. Několikerým opakováním měření je můžeme potlačit.

### Chyby hrubé

Jsou to velké chyby, které vznikají nedostatečným soustředěním experimentátora. Objevíme je, jestliže měření opakujeme vícekrát (viz níže). Měření zatížená hrubou chybou vyřadíme ze souboru hodnot.

### Zpracování výsledku dostatečné k řešení experimentální úlohy

Uvádíme zde jednoduchý algoritmus, který vám doporučujeme použít na zpracování dostatečného počtu měření (alespoň deseti). Body 1) až 5) se týkají jen statistické chyby.

- 1) Určíme z naměřených hodnot aritmetický průměr.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Dá se dokázat, že za jistých předpokladů je pro nekonečně mnoho měření aritmetický průměr shodný se střední hodnotou měřené veličiny (viz literatura).

- 2) Stanovíme pro každou hodnotu odchylku od průměru  $\Delta x_i$ .
- 3) Vypočteme standardní odchylku

$$s_{st} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}.$$

4) Vyloučíme hrubé chyby. K tomu se používá takzvané 3-s kritérium. Vyloučíme všechny hodnoty, které se od aritmetického průměru liší o více jak  $3s_{st}$  a opakujeme předchozí body.

- 5) Určíme směrodatnou odchylku aritmetického průměru (statistickou odchylku)

$$s_{sm} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}$$

6) Určíme systematickou chybu. Za chybu přístrojů můžeme považovat např. půlku nejmenšího dílku stupnice. Chybu metody, kterou neumíme spočítat, musíme alespoň fundovaně odhadnout.

- 7) Určíme celkovou chybu dle vzorce

$$s_{celk} = \sqrt{(3s_{sm})^2 + s_{sys}^2},$$

pro malý počet měření dle přibližného vzorce  $s_{celk} = 3s_{sm} + s_{sys}$ .

8) Chybu zaokrouhlíme na jednu platnou číslici, jen je-li jí jednička, na dvě. Aritmetický průměr zaokrouhlíme na řád poslední platné cifry chyby.

- 9) Výslednou hodnotu uvádíme jako  $x = (\bar{x} \pm s_{celk})$

Ještě byste měli vědět, k čemu se vůbec chyby počítají. Odchylna nám udává, jak přesně jsme danou veličinu změřili. Dá se odvodit, že přesná hodnota leží v uváděném intervalu s pravděpodobností 99,7%.

### Řešení úlohy

Vypracování experimentální úlohy by mělo obsahovat na začátku trochu teorie popisující danou problematiku, následuje stručný, ale srozumitelný popis měření, na škodu není ani výčet pomůcek. Nezbytná je tabulka naměřených hodnot, výpočet odchylky měření (viz Chyby měření) a závěr s diskuzí výsledku, kde srovnáváte jednotlivé metody, výsledky apod.

Vaši vynalézavosti, co se týče způsobu měření, se meze nekladly, ale přesto se objevilo jen několik málo metod. My použijeme obě dvě doporučené v zadání.

#### 1) Kalorimetr

Teorie: Zahřejeme těleso o známé tepelné kapacitě  $C_t$  na teplotu  $t_t$  a vložíme jej do kalorimetru o kapacitě  $C_k$  s vodou o teplotě  $t_v$ . Změříme, na jaké teplotě  $t$  se soustava ustálí.



Z kalorimetrické rovnice plyne:

$$c = \frac{C_t(t_t - t) - C_k(t - t_v)}{m(t - t_v)},$$

kde  $m$  je hmotnost vody, kterou jsme určili za pomoci odměrného válce a její známé hustoty.

Pomůcky: kalorimetr ( $C_k = 725 \text{ JK}^{-1}$ ), odměrný válec (jeden dílek je 0,01 l), měděný předmět ( $C_t = 145 \text{ JK}^{-1}$ ), teploměr (jeden dílek je 0,5 K), ohřívač.

č. m.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
$t_v [^{\circ}\text{C}]$	22,0	23,5	23,5	23,25	22,0	22	21,5	22,75	22,5	22,25
$t_t [^{\circ}\text{C}]$	80,0	81,25	84,5	79,75	90,5	80,0	82,25	80,75	80,0	80,0
$t [^{\circ}\text{C}]$	23,75	25,0	25,0	24,75	24,25	23,75	23,5	24,5	24,25	24,0

Aritmetický průměr měrné tepelné kapacity je  $\bar{c} \doteq 4,22 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

Standardní odchylka je  $s_{st} = 0,5 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

Směrodatná odchylka je  $s_{sm} = 0,17 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

Systematickou chybu jsme odhadli na  $s_{sys} = 1,0 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

Celková chyba je  $s_{celk} = 1,2 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

Výsledná hodnota tedy je  $c = (4,2 \pm 1,2) \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

Diskuze: Velká chyba je způsobena hlavně malou tepelnou kapacitou předmětu vzhledem ke schopnostem teploměru, která vede jak k velké systematické chybě, tak k velké standardní chybě. Toto měření by se dalo zpřesnit užitím tělesa o vyšší tepelné kapacitě či použitím přesnějšího teploměru.

## II) Ohřívání vody

Teorie: Nalijeme 1 l vody do rychlovarné konvice. Změříme počáteční teplotu. Zapneme konvici a měříme, za jaký čas se voda ohřeje o  $x$  stupňů.

Během ohřívání dodáme vodě teplo  $Q = P\eta t = cm\Delta T$ , kde  $P$  je příkon,  $\eta$  je účinnost,  $t$  je čas, po který vodu zahříváme,  $c$  je měrná tepelná kapacita a  $\Delta T$  je rozdíl koncové a počáteční teploty. Měrnou tepelnou kapacitu tedy určíme ze vztahu:

$$c = \frac{P\eta t}{m\Delta T}$$

Pomůcky: varná konvice ( $P = 1000 \text{ kW}$ ,  $\eta$  jsme odhadli na  $0,95 \pm 0,05$ ), teploměr, stopky, odměrný válec.

Naměřené hodnoty:

$V = 1,00 \text{ l}$

$T [^{\circ}\text{C}]$	24,5	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0
$t [\text{s}]$	0,0	26,0	48,6	71,6	94,4	113,2	137,2	157,3	180,9	201,3	223,5	241,2

Aritmetický průměr je  $c = 4,28 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

Standardní odchylka je  $s_{st} = 0,11 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

Směrodatná odchylka je  $s_{sm} = 0,03 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

Systematická chyba je  $s_{sys} = 0,2 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

Celková chyba je  $s_{celk} = 0,2 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

Výsledná hodnota je  $c = (4,3 \pm 0,2) \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

Diskuze: Měření dává poměrně příznivou chybu. Přesto by ji určení účinnosti mohlo výrazně zmenšit, neboť velká část chyby je dána právě tím, že jsme ji odhadli. K zpřesnění by přispělo i změření tepelné kapacity konvice, kterou bychom získali provedením tohoto měření ještě s jiným množstvím vody a porovnáním výsledků obou měření.

Toto měření je přesnější než první hlavně díky větší přesnosti měřidel.

## III) Další metody

Další metoda, která se vyskytla, se od předchozí lišila jen použitím mechanického zdroje energie (mixér). Byly zde vyšší ztráty a proto byla méně přesná.

Naopak další metoda byla spíše opakem druhé. Voda se ohřála na teplotu vyšší než teplota okolí a měřilo se, jak rychle se ochlazuje. Se znalostí poklesu teploty a odevzdaného tepla je možné vypočítat  $c$ .

Ukázkový případ, jak se vyhnout měření, provedl jeden řešitel, když vyšel z tvrzení, že od té doby, co postavili přehradu, jsou teploty v létě o dva stupně nižší a v zimě o dva stupně vyšší. Spočítal jaké teplo přijme z (odevzdá do) okolí přehrada a se znalostí objemu přehrady určil měrnou tepelnou kapacitu.

*Literatura:* J. Brož a kol.: Základy fyzikálních měření (I), SPN, Praha 1967

E. Svoboda: Přehled středoškolské fyziky, Prometheus, Praha 1996

**Miroslav Musil**

### Úloha S.I ... pásová teorie (3 body, řešilo 63 studentů)

Určete, kolikrát méně elektronů je ve vodivostním pásu typického izolantu (šířka zakázaného pásu je 10 eV), než v případě polovodiče (šířka zakázaného pásu křemíku je 1,12 eV) při pokojové teplotě. Předpokládejte, že v limitě vysokých teplot se koncentrace vyrovnají. Jak se tento poměr změní při zahřátí izolantu i polovodiče na teplotu 500 K?

V minulém dílu seriálu jsme uvedli přibližný vztah pro počet elektronů ve vodivostním pásu

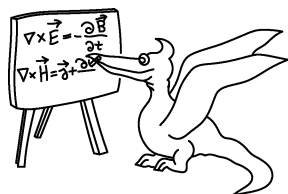
$$n = C e^{\frac{E_g}{kT}},$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$ ),  $T$  je termodynamická teplota a  $E_g$  je šířka zakázaného pásu (v seriálu značená  $\Delta E$ ). V tomto vztahu předpokládáme obecnou konstantu úměrnosti  $C$  charakteristickou pro každý materiál. Dle zadání víme, že v limitě vysokých teplot  $T \rightarrow \infty$  se koncentrace elektronů ve vodivostním pásu izolantu a polovodiče vyrovnají. Ze vztahu vidíme, že exponenciála jde k jedné, takže pro oba materiály předpokládáme stejnou konstantu  $C$ . Zajímáme-li se pouze o poměr koncentrací, vyšetřujeme

$$\frac{\exp\left[\frac{E_{g1}}{kT}\right]}{\exp\left[\frac{E_{g2}}{kT}\right]} = \exp\left[\frac{E_{g1} - E_{g2}}{kT}\right].$$

Dosadíme číselně a máme pro  $T = 300 \text{ K}$  výsledek  $e^{343} \approx 10^{149}$ . Triviálně můžeme dále dosadit teplotu 500 K a dostaneme poměr  $e^{206} \approx 10^{89}$ . Na závěr malou připomínku: při pohledu na výsledek zapsaný pomocí exponenciály si nikdo nedokáže hned představit, kolik to přesně je. Naší mateřskou číselnou soustavou je desítková. Proto je na místě napsat řešení tak, jak je výše naznačeno, spočítat, kolik je exponent pro základ  $e$  a poté ho vydělit přirozeným logaritmem deseti — dostaneme exponent pro základ 10. A dostaneme přímo počet řádů, o kolik se koncentrace liší.

**Tomáš Ostatnický**



## Seriál na pokračování

### Diodová rovnice

V tomto dílu seriálu se konečně dostáváme k vlastnostem polovodičů velmi důležitým pro elektroniku. Jistě každý ví, co pro rozvoj elektroniky znamená polovodičový přechod — rozhraní mezi polovodičem typu N a polovodičem typu P. Jeden přechod usměřňuje — dioda, více přechodů vhodně spojených tvoří tranzistory, diaky, tyristory, triaky, atd. Protože jsme fyzici, uděláme nejprve trochu teorie a poté se podíváme na její důsledky.

Volné nosiče náboje musíme rozdělit na majoritní a minoritní. V polovodiči typu N jsou majoritní elektrony a minoritní díry, v polovodiči typu P naopak. Přiložme k sobě polovodič typu N

a polovodič typu P tak, aby vzniklo rovinné rozhraní. Po určité době se vytvoří rovnováha (ale to neznamená, že nosiče se přes rozhraní nepohybují — pouze střední hodnota proudu je nulová). Při vytváření rovnováhy se elektrony a díry přitahují navzájem směrem k rozhraní polovodičů. V důsledku tohoto pohybu se vždy část majoritních nosičů náboje z daného polovodiče přesune přes rozhraní a poté je zachycena nosiči z druhého polovodiče. Tím pádem z polovodiče typu N odčerpáme elektrony a dodáme díry a vznikne kladný prostorový náboj, v polovodiči typu P se vytvoří záporný náboj. Ovšem tyto náboje se netvoří v celém objemu polovodiče, ale pouze v malém okolí rozhraní, protože přitažlivé síly mezi elektrony a dírami nemají díky stínění ostatními elektrony velký dosah. Námí vymezený prostor s nenulovým prostorovým nábojem se nazývá polovodičový přechod. Charakterizujeme ho šířkou  $d$ .

Jak se chovají zbylé nosiče náboje v okolí přechodu? Minoritní nosiče se polem přechodu urychlují (např. elektrony z polovodiče typu P, kde je záporný náboj, přecházejí do polovodiče typu N, kde je v prostoru přechodu kladný náboj). Naopak majoritní nosiče se polem přechodu zpomalují. Urychlování minoritních nosičů znamená, že vznikne elektrický proud způsobený těmito nosiči. Protože ale mají malou koncentraci, z objemu polovodiče nestačí rychle difundovat, takže proud je omezený. A je omezený natolik, že ani po přiložení vnějšího napětí by se tento proud nezvětšil.

Nyní se dostaneme konečně k fyzice. Rozumný fyzik si řekne: proudí sice minoritní nosiče, ale my požadujeme rovnováhu. Zde jsou možné dva případy. Buďto v rovnováze pole přechodu neexistuje, což jsme zavrhlí již při úvahách o vytváření rovnováhy, nebo je existující proud kompenzován proudem majoritních nosičů. Sice jsme si řekli, že jsou zpomalovány polem přechodu, ale některé z nich mají jistě tak velkou energii, že dokážou toto pole překonat. Jelikož je jejich koncentrace řádově větší než koncentrace minoritních nosičů, dokáží proud ve směru pole přechodu kompenzovat. Takže můžeme psát první dvě rovnice pro rovnováhu, kde  $I_{nn}(0)$  a  $I_{pp}(0)$  značí proudy majoritních nosičů a  $I_{np}(0)$  a  $I_{pn}(0)$  jsou proudy minoritních nosičů při nulovém vnějším napětí:

$$I_{nn}(0) \exp\left(-\frac{eV_B}{kT}\right) = I_{np}(0)$$

$$I_{pp}(0) \exp\left(-\frac{eV_B}{kT}\right) = I_{pn}(0)$$

$V_B$  je velikost elektrického pole přechodu, člen s exponenciálou vystihuje statistické vlastnosti majoritních nosičů. Samozřejmě  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je termodynamická teplota. Po přiložení vnějšího napětí  $V$  změním  $V_B \rightarrow V_B - V$ . Samozřejmě  $I_{np}(0)$  a  $I_{pn}(0)$  se nezmění a objeví se proud přes přechod  $I_-$  a  $I_+$ :

$$I_- = I_{nn}(0) \exp\left[-\frac{e(V_B - V)}{kT}\right] - I_{np}(0)$$

$$I_+ = I_{pp}(0) \exp\left[-\frac{e(V_B - V)}{kT}\right] - I_{pn}(0)$$

Protože platí vztah pro elektrickou vodivost

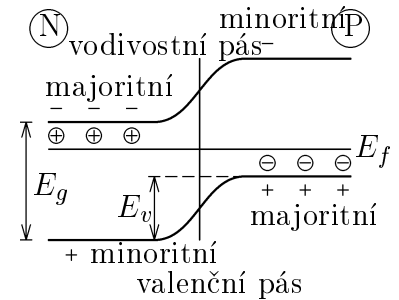
$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p ,$$

zřejmě platí pro celkový proud

$$I = I_- + I_+ .$$

Ještě je nutné dodat, že  $V$  je kladné, pokud je kladné vnější napětí na polovodiči P. Celkem tedy po sečtení rovnic dostaneme

$$I = [I_{np}(0) + I_{pn}(0)] \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$



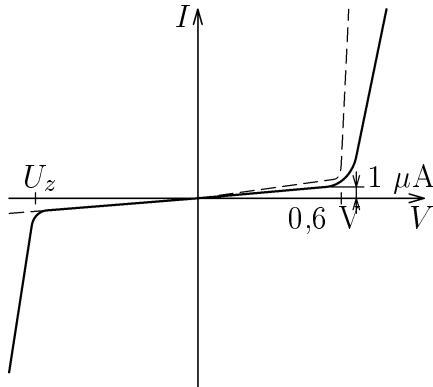
Obr. 5 Pásová struktura polovodičového přechodu

a po zavedení

$$I_0 = I_{np}(0) + I_{pn}(0)$$

můžeme psát diodovou rovnici ve tvaru

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] .$$

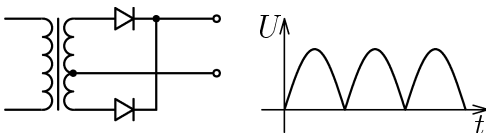


Obr. 6 Voltampérová charakteristika křemíkové diody

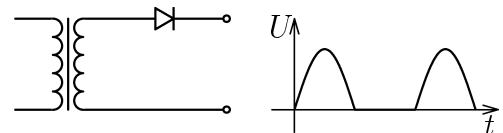
V celém odvození diodové rovnice jsme předpokládali, že elektrický odpor celé součástky je nulový. Toho se v praxi dosáhne tím, že polovodičové vrstvy se dělají tenké. Ukazuje se však, že ačkoli jsme odvodili vztah pro ideální diodu, v reálném případě můžeme diodu modelovat naší ideální diodou a malým odporem. Podívejme se, jak se chová např. křemíková dioda v propustném směru ( $V > 0$ ). V ideálním případě by proud diodou rostl s napětím exponenciálně, díky vnitřnímu odporu vzniká koleno, ve kterém začíná růst proud (viz obr. 6 — čárkovaně je teoretická předpověď pro ideální diodu bez vnitřního odporu a plnou čarou je reálná charakteristika). Pro křemík je napětí, při kterém se charakteristika zlomí, přibližně 0,6 V, pro germanium je toto napětí přibližně 0,3 V.

V závěrném směru ( $V < 0$ ) je vzrůst záporného proudu diodou přibližně lineární. To až do záporného napětí, které se značí  $U_Z$  a nazývá se průrazné či Zenerovo, kdy proud diodou prudce stoupne. Průraz může mít několik příčin. Může jít o tzv. lavinový průraz, kdy vnější pole je větší než pole přechodu a tudíž většina volných nosičů překoná přechod. Navíc strhává ostatní volné nosiče náboje a tím se tvoří jakási lavina volných nosičů — od toho lavinový průraz. Samozřejmě takový průraz znamená pro diodu velmi rychlý konec, protože prudce vzroste proud a tím i ztrátový výkon na diodě, který ji zahřeje a přechod se poškodí. Po průrazu sice dál vede elektrický proud, ovšem v obou směrech, což je jistá nevýhoda.

### Aplikace



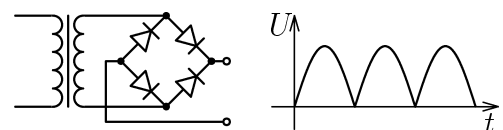
Obr. 7 Dvojecestný usměrňovač



Obr. 8 Jednocestný usměrňovač

Speciální konstrukcí lze dosáhnout toho, že dioda se při průrazu nezničí. Potom se jedná o Zenerovy diody. Využívaly se ve stabilizovaných zdrojích napětí, kde byla dioda připojena sériově s ochranným odporem v závěrném směru mezi svorky nestabilizovaného napětí (např. usměrněný a kondenzátorem vyfiltrovaný výstup transformátoru). Na Zenerově diodě potom bylo konstantní Zenerovo napětí dané diodou. Dnes se ovšem do zdrojů montují přesnější stabilizátory napětí s využitím operačních zesilovačů.

Polovodičový přechod v diodách se používá k usměrňování střídavého napětí na stejnosměrné. Ovšem široké využití našly diody také v optoelektronice. Světlo dopadající na polovodičový přechod je pohlceno elektrony, které díky vnitřnímu fotoefektu (elektron je vyražen ze své energetické hladiny fotonem do vodivostního pásu, ovšem neopustí krystal — zůstane uvnitř) tvoří elektron-děrové páry a tím zvyšují koncentraci minoritních nosičů. V důsledku nerovnováhy na polovodičovém přechodu se zdeformují energetické hladiny a na svorkách se objeví napětí. Tento princip se



Obr. 9 Graetzův můstek

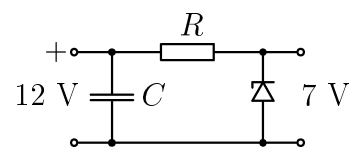
využívá ve fotodiodách a fotobateriích. Protože polovodiče jsou velmi dobře prozkoumané materiály (křemík je snad vůbec nejdůkladněji prozkoumaná pevná látka), je možné vyrábět fotodiody přesně na míru určitému záření. Protože elektron musí přejít přes zakázaný pás, je rozhodující pro spektrální citlivost fotodiody právě šířka zakázaného pásu. Tu lze regulovat volbou různých materiálů od citlivosti na gama záření po citlivost na infračervené záření. Nevýhodou však je, že křemík, který je nejlevnějším polovodičem s nejlevnějším zpracováním a možností vysoké integrace, vůbec není pro optoelektroniku vhodný. Proto je snaha najít materiály, jejichž výroba je levná a přitom mají vhodné vlastnosti. Módou jsou solární články jakožto zdroj alternativní energie. Problém je ten, že k výrobě fotobaterie (od fotodiody se liší konstrukcí — musí se dosáhnout co největší účinnosti konverze záření na elektrickou energii) by bylo třeba více energie, než sama dokáže vyrobit.

Další aplikací pro optoelektroniku jsou svítivé diody (LED) nebo polovodičové lasery. V obou případech se využívá emise světla při rekombinaci elektronu a díry po překonání polovodičového přechodu jedním nosičem. Polovodičové lasery se vyrábějí v rozměrech milimetrů až mikrometrů. Výhodou je vysoká účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, nevýhodou jejich malý výkon.

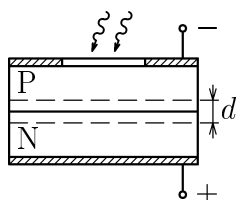
Zajímavostí jsou takzvané Schottkyho diody. V nich je přechod vytvořen na rozhraní kov-polovodič. Mají trochu jiné vlastnosti než běžné polovodičové diody, ovšem jejich velkou předností je přechodové napětí (tedy napětí, při kterém se zlomí v koleně voltampérová charakteristika diody), které je menší než u běžných diod. Využívá se v obvodech STTL, což jsou logické obvody sestavené z bipolárních tranzistorů (tedy tranzistorů, které běžně kolem sebe potkáváme). Pod logickým obvodem si představte černou podlouhlou součástku s velkým množstvím nožiček, která vykonává logické funkce. Běžné obvody TTL (tranzistor-tranzistorová logika) jsou frekvenčně limitované zhruba 10 MHz. Přidáním Schottkyho diod do obvodů dostaneme horní mez frekvencí až 150 MHz.

Na obrázcích je několik jednoduchých obvodů využívajících diod.

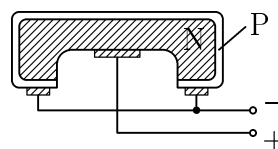
Jedná se o usměrňovače (obr. 7–9). Mohlo by se zdát divné, proč existuje mnoho druhů stabilizátorů napětí, proč se standardně nepoužívá pouze jeden. Důvod je prostý. Každý stabilizátor má své výhody a nevýhody. Jednocestný usměrňovač (obr. 8) má výhodu v tom, že usměrní napětí s použitím pouze jedné diody. Ovšem jak vidíme v grafu u obrázku, využívá pouze jedné poloviny signálu, druhá se prostě ořízne a účinnost usměrňovače klesne pod polovinu. Naopak dvojcenné usměrňovače využívají více výkonu a k jejich konstrukci je třeba dvou, nebo čtyř diod. Diody na usměrňování velkých proudů jsou drahé, proto je levnější namotat transformátor se dvěma sekundárními vinutími a použít usměrňovače na obr. 7. Naopak pro nízkovýkonové aplikace (např. v laboratorních zdrojích) se s výhodou užívají usměrňovače se zapojením dle obr. 9 — tzv. Graetzův můstek. Není nutné mít speciální transformátor, levnější je koupit čtyři diody.



Obr. 10 Stabilizovaný zdroj napětí se Zenerovou diodou



Obr. 11 Fotodioda



Obr. 12 Fotobaterie

Na obr. 10 je zdroj stabilizovaného napětí využívající Zenerovy diody. Pokud napětí na diodě v závěrném směru klesne při odběru proudu ze svorek pod požadovanou hodnotu (Zenerovo napětí), dioda se zavře a napětí na ní vzroste. Pokud je naopak napětí na diodě větší než Zenerovo, vzroste proud diodou a na diodě klesne napětí (díky odporu zařazenému s diodou v sérii). Tím se opět dioda uzavírá, atd. Takto bychom si mohli představit vytváření rovnováhy (napětí na diodě se za velmi krátkou dobu ustálí), které nastane vždy při změně velikosti odebíraného proudu. Protože napětí na diodě je vždy v rovnováze rovno přibližně Zenerovu napětí, dostáváme stabilizovaný

zdroj napětí, které víceméně nezávisí na odebíraném proudu. Dnes samozřejmě existují zdroje ještě více stabilní, kde je řídicím prvkem operační zesilovač.

Na obrázcích 11 a 12 jsou znázorněny konstrukce fotodiody a fotobaterie.

### Úloha III.S ... *diodová charakteristika*

Uvažujme reálnou křemíkovou diodu s přechodovým napětím 0,6 V při pokojové teplotě (fyzici pro jednoduchost považují za pokojovou teplotu 300 K, oproti normální 20 °C = 293 K, protože se s tím lépe počítá a lépe se to pamatuje). Pokuste se z uvedených rovnic (i v minulých dílech seriálu) odhadnout, jak se bude dioda chovat při zvýšení teploty o 10 K, 20 K a 40 K. Není třeba do puntíku počítat, co se přesně stane, jde pouze o kvalitativní odhady. Ti, kdo mají možnost, mohou odhady ověřit měřením — k měření voltampérové charakteristiky je třeba pouze dioda, ochranný odpor (nikdy nezapojujte diodu v propustném směru přímo na napětí!), zdroj napětí, voltmetr a ampérmetr. Odhady by měly být pro přehlednost aspoň schematicky nakreslené v nějakém grafu. Zaměřte se zejména na velikost závěrného proudu a polohu kolena v propustném směru.

Naše adresa:

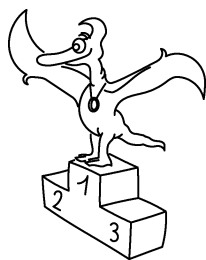
**FYKOS**

**Matematicko-fyzikální fakulta UK — UTF**

**V Holešovičkách 2**

**180 00 Praha 8**

**<http://www.mff.cuni.cz/news/fks>**



## Pořadí řešitelů po I. sérii



### Kategorie čtvrtých ročníků

	Jméno	Příjmení	Třída	Škola	1	2	3	4	5	6	S1	I
	<i>Student</i>	<i>Pilný</i>	<i>F.1</i>	<i>MFF UK</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>3</i>	<i>33</i>
1	Jan	Houštěk	septima	G Pelhřimov	4	3	5	6	6	8	3	35
2	Pavel	Augustinský	septima B	G Havířov	2	3	5	4	6	4	2	26
3 - 5	Stanislav	Hugec		G Michalovce	2	4	5	4	3	6	—	24
3 - 5	Jiří	Chaloupka		G Židlochovice	4	4	5	4	2	2	3	24
3 - 5	Juraj	Suchár	4.	G Dubnica n. Váhom	4	3	5	6	—	3	3	24
6	Milan	Berta	IV.A	G Velké Kapušany	2	3	5	6	2	3	2	23
7	Tomáš	Matoušek	VII.C	G Karlovy Vary	2	2	5	4	—	8	1	22
8 - 9	Jakub	Kulaviak	sexta B	G Blansko	1	4	5	—	—	9	2	21
8 - 9	Jan	Novotný	septima	G Mělník	4	3	—	4	—	8	2	21
10	Karel	Kouřil	sexta B	G Blansko	4	3	5	4	—	2	2	20
11	Petr	Schimm	VII.C	G Karlovy Vary	2	3	—	4	1	8	1	19
12 - 13	Jan	Houfek	septima	G Uh. Hradiště	2	3	5	—	2	3	2	17
12 - 13	Martin	Pieš	4.C	G Košice - Šrobárova	2	3	0	4	1	5	2	17
14	Ondřej	Souček	4.	G Jablonec n. N. - U Balvanu	4	3	4	4	—	—	1	16
15 - 16	Martin	Benčo			2	3	—	4	—	4	—	13
15 - 16	Lenka	Knopová	6.M	G Pardubice	3	3	5	—	1	1	—	13
17	Tomáš	Linhart	septima	GOA Sedlčany	—	3	—	6	—	1	2	12
18 - 19	Petra	Dobroucká			—	3	—	4	—	4	0	11
18 - 19	Stanislav	Hampl	septima	GOA Sedlčany	—	3	—	4	—	4	0	11
20	Tomáš	Páleník	4.A	G Trenčín	2	3	—	—	—	5	—	10
21 - 22	Jan	Gruber	7.A	G Frenštát p. R.	2	3	2	2	—	—	—	9
21 - 22	Marek	Rybčák	4.A	G Bardejov	2	1	—	—	—	6	—	9
23 - 26	František	Kolář	sexta	G Praha - Nad Kavalírkou	2	3	—	—	3	—	—	8
23 - 26	Andrej	Pavlík	4.D	G Trenčín	—	3	—	—	—	5	—	8
23 - 26	Ondřej	Škoda		G Benešov	—	3	—	—	—	5	—	8
23 - 26	Martin	Vitikáč	4.B	G Spišská Nová Ves	2	3	3	—	—	—	—	8
27 - 28	Radek	Chromý		G Telč	4	3	—	—	—	—	—	7
27 - 28	Marie	Svobodová	septima	G Uh. Hradiště	0	3	—	4	0	—	—	7
29 - 30	Martin	Macásek	4.	G Dačice	—	3	—	3	—	—	—	6
29 - 30	Zbyněk	Šrubař	septima A	G Frenštát p. R.	3	3	0	—	—	—	—	6
31 - 32	Ondrej	Bačo		G Košice - Šrobárova	2	3	—	—	—	—	—	5
31 - 32	Petr	Nachtigall	septima A	G Frenštát p. R.	2	3	—	—	—	—	—	5
33 - 36	Lukáš	Florner	5.B	SPŠ Havlíčkův Brod	2	2	—	—	—	—	—	4
33 - 36	Jiří	Krejsa	sexta	G Semily	—	4	—	—	—	—	—	4
33 - 36	Jiří	Novák		G Ledec nad Sázavou	—	3	0	—	—	1	—	4
33 - 36	Miroslav	Šimko	4.A	G Nitra	4	—	—	—	—	—	—	4
37 - 38	Matěj	Koudelka		SSPŠ Praha - Preslova	2	—	—	—	—	—	—	2
37 - 38	Naděžda	Vaškovicová	4.A	G Uh. Hradiště	1	1	0	0	—	—	—	2
39 - 40	Tomáš	Lindouský	4.D	G Nové Zámky	—	—	0	—	—	1	—	1
39 - 40	Pavel	Lupač		G Jihlava	—	—	—	—	—	1	—	1

### Kategorie třetích ročníků

	Jméno	Příjmení	Třída	Škola	1	2	3	4	5	6	S1	I
	<i>Student</i>	<i>Pilný</i>	<i>F.1</i>	<i>MFF UK</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>3</i>	<i>33</i>
1	Peter	Čendula	3.B	G Liptovský Mikuláš	4	4	5	4	3	10	3	33
2	Petr	Nečasal	V.C	G M. Budějovice	2	3	5	4	3	7	2	26
3	Karel	Židek		G Opava	3	3	5	1	5	6	2	25

	Jméno	Příjmení	Třída	Škola	1	2	3	4	5	6	S1	I
	<i>Student</i>	<i>Příjmení</i>	<i>F.1</i>	<i>MFF UK</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>3</i>	<i>33</i>
4	Martin	Beránek	VI.	G Praha - Ohradní	—	3	4	6	2	4	3	22
5 - 7	Vladimír	Fuka	sexta A	G Rakovník	4	4	4	4	—	1	3	20
5 - 7	Jaromír	Chalupský	sexta A	G Sušice	4	3	4	4	—	5	0	20
5 - 7	Jan	Kunc	3.A	G Kolín	4	3	1	4	3	5	—	20
8 - 10	Martin	Hejna	S3.A	SPŠE Dobruška	2	3	2	4	—	5	3	19
8 - 10	Hedvika	Kadlecová	3.C	G Praha - Botičská	2	3	—	4	2	8	0	19
8 - 10	Ondřej	Plašil	septima B	G Praha - Chodovická	4	3	3	4	3	—	2	19
11 - 12	David	Kolovratník	3.E	SPŠS Chrudim	4	4	5	0	1	2	2	18
11 - 12	Pavol	Mikčo	3.B	G Stropkov	1	3	—	4	1	8	1	18
13	Patrik	Hudec	III.C	G Bílovec	3	3	0	4	3	1	2	16
14 - 16	Pavel	Janda	sexta	G Telč	4	3	5	—	—	3	—	15
14 - 16	Pavel	Kočica	3.A	G Uh. Brod	2	3	—	4	1	5	0	15
14 - 16	Zoltán	Mics	3.B	G Šahy	4	3	2	4	—	—	2	15
17 - 21	Petr	Klíma	3.A	G Louny	2	3	—	4	—	3	2	14
17 - 21	Jan	Kratochvíl	3.K	SPŠST Praha - Panská	—	4	5	—	—	5	—	14
17 - 21	Ivo	Lazar		G Prachatice	3	4	0	0	2	5	0	14
17 - 21	Robert	Meixner	5.A	G Brno - Slov. nám.	4	3	—	4	2	1	0	14
17 - 21	Lukáš	Schmiedt	3.D	SG Olomouc	3	3	—	4	—	2	2	14
22 - 23	Lukáš	Dumský	sexta	GOA Sedlčany	—	3	—	4	—	4	2	13
22 - 23	Libor	Tomšík	3.F	SPŠE Plzeň	2	3	3	—	—	5	—	13
24 - 28	Ladislav	Benda		G Hradec Králové - JKT	4	4	—	—	3	—	1	12
24 - 28	Zdeněk	Cejnar	3.A	G Říčany	1	2	3	3	0	3	0	12
24 - 28	Dáša	Eisenmannová	3.A	G Praha - Mezi školami	2	3	0	—	—	7	—	12
24 - 28	Martin	Holík	3.C	G Bílovec	3	2	0	4	2	1	—	12
24 - 28	Jakub	Levic	sexta B	G Louny	2	3	—	4	—	1	2	12
29	Jaroslav	Tykal	3.C	G Jihlava	1	3	—	4	—	3	0	11
30 - 35	Jan	Bauer	sexta A	G Praha 3	1	3	1	—	—	5	—	10
30 - 35	Michal	Bláha	M	SPŠST Praha - Panská	1	4	5	—	—	—	—	10
30 - 35	Martin	Hrba	sexta A	G Sušice	2	4	0	—	2	2	—	10
30 - 35	Andrea	Oravcová	7.D	G Partizánske	2	3	1	0	—	4	—	10
30 - 35	Miloš	Skalský	3.D	G Vsetín	3	3	—	3	—	1	—	10
30 - 35	Michal	Škoda	sexta B	G Turnov	3	—	—	—	—	7	—	10
36 - 41	Jan	Alster	septima A	G Holešov	—	3	4	—	2	—	—	9
36 - 41	Ivan	Banas	5.G	G Martin	—	3	—	—	—	6	—	9
36 - 41	Vlastislav	Filgas	3.D	G Vsetín	2	3	—	4	—	—	—	9
36 - 41	Martin	Jakl	5.D	G Pardubice	2	4	2	—	—	—	1	9
36 - 41	Jaroslav	Kočiček	3.C	G Čadca	1	1	0	4	2	1	—	9
36 - 41	Jaroslava	Plasová	septima C	G Klatovy	0	3	0	1	—	5	—	9
42 - 44	Jan	Pšíkal	3.F	SPŠE Pardubice	1	3	—	4	—	—	—	8
42 - 44	Daniel	Reitzner	3.C	G Košice - Šrobárova	2	3	1	—	—	2	—	8
42 - 44	Zuzana	Vlčková	septima	G Košice - Alejová	4	2	0	0	1	1	—	8
45 - 49	Pavel	Kolář	3.D	SPŠS Chrudim	4	3	—	—	—	—	—	7
45 - 49	David	Krayzel	3.A	G Chrudim	—	3	0	4	—	—	—	7
45 - 49	Miroslav	Patočka	3.C	G Ivančice	—	2	—	—	—	5	—	7
45 - 49	Martin	Pavel	3.A	G Dobruška	—	3	—	4	—	—	—	7
45 - 49	Pavel	Vraspír	sexta	G Polička	—	3	—	—	—	4	—	7
50 - 51	Lukáš	Brázda	3.C	G Jihlava	—	3	—	—	—	3	—	6
50 - 51	Ján	Uhrin	3.E	G Michalovce	2	—	—	4	—	—	—	6
52 - 56	Michal	Janoušek	sexta	G Zastávka	2	1	—	—	—	2	—	5
52 - 56	Andrej	Mičica	3.C	G Čadca	—	1	—	4	—	—	—	5
52 - 56	Marek	Skarka	sexta	G Vítkov	1	3	—	—	1	—	—	5
52 - 56	Jiří	Tománek	V5.A	G Hranice	—	1	—	—	—	2	2	5
52 - 56	Jan	Zikán	3.E	G Praha - Arabská	2	3	—	—	—	—	—	5
57 - 58	Ondřej	Pánek	3.C	G Jihlava	—	3	—	—	—	1	—	4
57 - 58	Norbert	Požár	7.A	G Bruntál	—	3	—	—	—	1	—	4
59 - 64	Tomáš	Bouda	sexta B	G Jablonec n. N. - dr. Randy	1	2	0	0	—	—	—	3
59 - 64	Martina	Havrdová	VI.A7	G Olomouc - Hejčín	—	3	—	—	—	—	—	3
59 - 64	Petr	Hřebačka	6.A	G Brno - Křenová	—	3	—	—	—	—	—	3
59 - 64	Petra	Nýtrová	V.C	G Frýdek-Místek - ČSA	—	3	—	0	—	—	—	3
59 - 64	Martin	Šimek	sexta	G Telč	2	1	—	—	—	—	—	3
59 - 64	Peter	Valachovič	3.B	SPŠ Trenčín	1	2	0	—	—	—	—	3
65 - 66	Hana	Besedová	3.B	G Frenštát p. R.	—	1	—	—	—	—	—	1
65 - 66	Michal	Hamran	3.C	G Martin	—	1	0	—	—	—	—	1
67	Petra	Adamová	3.A	G Benešov	—	0	—	0	—	—	—	0



## Kategorie druhých ročníků

	Jméno	Příjmení	Třída	Škola	1	2	3	4	5	6	S1	I
	<i>Student</i>	<i>Půlný</i>	<i>F.1</i>	<i>MFF UK</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>3</i>	<i>33</i>
1	Jan	Fröhlich	sexta A		2	4	4	5	1	8	2	26
2	Petr	Kavánek	sexta	G Čáslav	2	3	5	4	4	4	0	22
3	Marie	Hůlková	2.B	G Náchod	3	3	4	4	1	1	—	16
4 - 5	Lenka	Beranová	sexta C	G Klatovy	—	3	—	—	3	8	—	14
4 - 5	Václav	Matouš	2.A	G Klatovy	3	3	—	4	—	4	—	14
6 - 9	Matej	Dubový	2.B	G Trenčín	1	2	2	—	—	8	—	13
6 - 9	Tomáš	Hanzák	2.	G Kladno	—	3	—	4	—	6	—	13
6 - 9	Michaela	Komm	sexta	G Praha - Parlářova	2	3	—	4	2	2	0	13
6 - 9	Miroslav	Šulc	kvinta B	G Ústí n. L. - Stavbařů	4	3	0	—	2	4	0	13
10	Milan	Jalový	kvinta A	G Blansko	4	3	—	—	—	5	—	12
11	Karol	Martinka	2.G	G Trenčín	—	3	0	—	—	8	—	11
12 - 15	Jaroslav	Frost	kvinta A	G Brno - Eglartova	4	3	0	2	—	1	—	10
12 - 15	Stanislav	Páca	2.A	COP Hronov	—	3	0	4	—	3	—	10
12 - 15	Vít	Urbánek	kvinta B	G Jihlava	—	3	—	4	—	1	2	10
12 - 15	Jiří	Vlach	kvinta	GOA Sedlčany	—	3	—	4	—	1	2	10
16 - 17	Michal	Hajn		G Jihlava	—	3	0	4	—	2	—	9
16 - 17	Jiří	Klímeš	2.B	G Náchod	2	3	—	—	—	2	2	9
18 - 21	Ľuboš	Bednárík	2.F	G Trenčín	—	3	—	—	—	5	—	8
18 - 21	Aleš	Ducháč	2.B	COP Hronov	1	3	0	4	—	—	—	8
18 - 21	Petr	Křístek	2.C	G Frýdek-Místek - TGM	—	1	—	0	—	5	2	8
18 - 21	Martin	Nývlt	2.B	G Náchod	4	3	—	—	—	1	—	8
22 - 26	Jan	Beneš	sexta	G Brno - Barvičova	2	3	—	—	—	1	1	7
22 - 26	Václav	Bouše	6.A	G Praha - Mezi školami	4	3	—	—	—	—	—	7
22 - 26	Zdeněk	Čejka		G Praha - U Lib. zámku	3	4	—	—	—	—	—	7
22 - 26	Lukáš	Hunana	2.B	G Dubnica nad Váhom	2	3	0	2	—	—	—	7
22 - 26	Miroslav	Krůs	2.A	G Klatovy	—	3	—	4	—	—	—	7
27 - 32	Lenka	Blažková	2.B	G Kutná Hora	—	2	—	4	—	—	—	6
27 - 32	Otakar	Dokoupil	2.B	G Přerov	3	3	—	—	—	—	—	6
27 - 32	Matin	Hamrle	2.A	G Peřimov	4	2	—	—	—	—	—	6
27 - 32	Rudolf	Kopřiva	2.C	G Frýdek-Místek - TGM	—	1	0	—	—	5	—	6
27 - 32	Pavel	Kwicien	2.A	G Dvůr Králové	1	3	0	—	1	1	—	6
27 - 32	Mariana	Matýšková	4.B	G Trinec	—	2	—	4	—	—	—	6
33 - 35	Jiří	Eliášek	2.B	G Trutnov	2	3	—	—	—	—	—	5
33 - 35	Ondřej	Chochola		G Kladno	2	3	—	—	—	—	—	5
33 - 35	Kateřina	Jandová	sexta A	G Praha - Mezi školami	—	3	—	—	—	2	—	5
36 - 42	Eva	Haluzová	2.B	G Uh. Brod	—	3	0	0	—	1	—	4
36 - 42	Michal	Kabát	2.A	G Púchov	—	1	—	—	—	3	—	4
36 - 42	Iva	Kouřilová	2.B	OA Blansko	0	3	—	—	—	1	—	4
36 - 42	Karel	Martíšek	kvinta A	G Brno - Eglartova	—	3	—	—	—	1	—	4
36 - 42	Peter	Murárik	2.G	G Trenčín	0	3	—	—	—	1	—	4
36 - 42	Ondřej	Srba	II.B	G Příbor	—	3	—	1	—	—	—	4
36 - 42	Michal	Zapletal	P2C	G Rožnov pod Radhoštěm	1	3	0	—	—	—	—	4
43 - 44	Petr	Čech	2.A	G Přerov	—	3	—	—	—	—	—	3
43 - 44	Jiří	Palek	2.A	G Nové Strašecí	1	—	—	—	—	2	—	3
45	Lenka	Němcová	2.A	SGŠ Bratislava	—	1	1	—	—	—	—	2
46	Tomáš	Sábl		G Semily	—	1	—	0	—	—	—	1
47 - 48	Jan	Čechmánek	2.A	G Uh. Hradiště	—	0	—	—	—	—	—	0
47 - 48	Jindřich	Štástka	2.E	G Sokolov	0	—	—	—	—	—	—	0

*Kategorie prvních ročníků*

	Jméno	Příjmení	Třída	Škola	1	2	3	4	5	6	S1	I
	<i>Student</i>	<i>Půlný</i>	<i>F.1</i>	<i>MFF UK</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>3</i>	<i>33</i>
1 - 2	Michal	Bareš	kvinta A	G Plzeň - Mikuláš. nám.	4	4	4	4	—	8	2	26
1 - 2	Miroslav	Hejna	5A8	G Rychnov n. K.	2	3	2	6	5	6	2	26
3	Luboš	Matásek	kvinta A	G Plzeň - Mikuláš. nám.	2	4	4	4	—	3	2	19
4	Václav	Cviček	3.A	G Frýdek-Místek - ČSA	3	3	5	4	1	1	1	18
5	Petr	Houštěk	tercie	G Pelhřimov	4	3	5	—	2	1	2	17
6	Petr	Šimek	1.A	G Blansko	2	4	3	4	1	2	—	16
7 - 8	Zdeněk	Moravec	1.C	G Blansko	2	3	1	4	—	5	—	15
7 - 8	Václav	Varvařovský	kvinta A	G Plzeň - Mikuláš. nám.	3	4	3	4	—	—	1	15
9	Tibor	Vansa		G Moravská Ostrava	4	3	0	0	5	2	—	14
10	Karel	Tůma	kvinta A	G Moravská Ostrava	2	3	1	—	4	1	2	13
11 - 12	Pavel	Čížek	kvinta		3	3	—	2	—	—	2	10
11 - 12	Jan	Chmelař	1.A	G Hranice	3	3	1	—	2	1	—	10
13	Jan	Klusoň	kvinta	G Litomyšl	4	3	—	—	—	1	—	8
14	Jiří	Hampl	1.SP	SPŠ Příbram	—	3	—	4	—	—	0	7
15 - 16	Jaroslav	Kudlička	kvinta A	G Hodonín	—	2	0	—	—	4	—	6
15 - 16	Hana	Suhomeřová	8.A	ZŠ Trenčín	—	—	—	—	—	6	—	6
17 - 20	Ondřej	Honzl	kvinta	G Podbořany	2	3	—	—	—	—	—	5
17 - 20	Lukáš	Chvátal		G Brno - Vejrostova	2	3	—	—	—	—	—	5
17 - 20	Mária	Šedivá	8.A	ZŠ Trenčín	—	—	—	—	—	5	—	5
17 - 20	Vít	Šípal	V5.B	G Ústí n. L. - Jateční	1	1	—	—	—	3	—	5
21 - 23	Pavel	Jež	3.B	G Frýdek-Místek - ČSA	—	3	—	—	—	—	—	3
21 - 23	Stanislav	Mlenský	1.B	COP Hronov	—	3	—	—	—	—	—	3
21 - 23	Martin	Rybář	kvarta A	G Blansko	1	1	—	—	—	1	—	3
24 - 25	Petr	Hrázský		G Frenštát p. R.	—	1	0	1	—	—	—	2
24 - 25	Martin	Vacek	1.A	G Nové Zámky	—	1	0	0	0	1	—	2
26 - 27	Lukáš	Snášel	1.B	COP Hronov	—	1	—	—	—	—	—	1
26 - 27	Michal	Záhorák	kvinta	G Sabinov	—	—	—	1	—	—	—	1
28	Marek	Mikloš	kvinta	G Sabinov	—	—	—	0	—	—	—	0

Fyzikální korespondenční seminář, který je zastřešen Oddělením vnějších vztahů a propagace MFF UK, je organizován studenty MFF UK za podpory Ústavu teoretické fyziky MFF UK a jeho zaměstnanců a Jednoty českých matematiků a fyziků.