

Úloha III.P . . . osobní powerbanka

10 bodů; průměr 4,04; řešilo 27 studentů

Poslední procenta baterky v mobilu dochází, powerbanku máte vybitou nebo jste si ji pro jistotu nechali doma a 230 také není nikde v dohledu. Nebylo by skvělé mít neustále při sobě vlastní zdroj elektrické energie?

- Navrhněte několik různých zařízení, která by dokázala vyrábět elektrickou energii pouze ze zdrojů vašeho těla.
- Diskutujte jejich maximální výkon a účinnost. Co všechno byste s jejich pomocí dokázali zásobovat elektřinou?
- Diskutujte jejich dopad na vaše zdraví a fyzickou kondici. Které orgány by vám v důsledku jejich přetěžování selhaly nejdříve?

Jako jedno z možných zařízení uvažujte soustavu drobných turbín umístěných v krevním řečišti. Všechny argumenty podpořte co nejpřesnějšími výpočty.

Jáchym měl pocit, že mu chybí nějaká energie.

Lidské tělo získává energii z přeměny chemických látek v potravinách na jiné. Tuto energii opět uchovává ve formě chemických vazeb. Největší část energie (kolem 80 %) se nakonec přemění na teplo a zbytek se spotřebuje při vypařování vody¹. Stálo by za to toto teplo využít a přeměnit ho na elektrickou energii. Dále se nabízí použít vhodně umístěné turbíny (například v krevním řečišti nebo v dýchací trubici). energii můžeme získat i spálením methanu a vodíku, produkováných ve střevech. Jednu metodu již dlouhou dobu využíváme a tou je mechanická energie neboli práce svalů – určitě jste si již někdy točili klikou nabíjejíci svítilnu. Některé z těchto nápadů si detailněji rozebereme.

Nejdříve se podívejme na některá zařízení, která bychom chtěli napájet. Pro výpočet energie uložené v akumulátoru mobilního telefonu zvolme kapacitu $K = 2 \text{ Ah}$ a napětí $U = 4,5 \text{ V}$. Potom pro uloženou energii platí $E = KU = 32,4 \text{ kJ}$. Kapacity baterií chytrých hodinek se pohybují kolem $K = 300 \text{ mAh}$ s napětím $U = 3,8 \text{ V}$, takže uchovávají energii $E = 4,1 \text{ kJ}$. Nakonec se podívejme na velmi praktický přístroj, který se již vědci snaží napájet lidským tělem – kardiostimulátor, jehož průměrný příkon je $30 \mu\text{W}$ ².

Turbínka v krevním řečišti

Abychom mohli získávat energii z krevního oběhu, potřebujeme do něj nainstalovat nějaký systém turbín. Z praxe víme, že s rozměry turbíny roste i její účinnost. Proto zvolme co nejméně turbín hned vedle srdce, kde jsou tepny a žíly nejširší. Otázkou je z jaké strany. Jestli do místa, kde krev ze srdce proudí (aorta a výstup plicního oběhu), či naopak tam, odkud krev proudí do srdce (horní a dolní dutá žíla, vstup plicního oběhu). K této otázce se vrátíme později.

Práce W , potřebná na protlačení objemu V , je součinem síly a dráhy, na které daná síla působí. Je-li na počátku této dráhy tlak v kapalině p_1 a na konci tlak p_2 , výsledná síla bude

$$F = S(p_1 - p_2) ,$$

kde S je obsah plochy průřezu trubice. Proudí-li kapalina rychlostí v , pro výkon bude platit

$$P = Fv = Q(p_1 - p_2) ,$$

¹<https://opentextbc.ca/anatomyandphysiology/chapter/24-6-energy-and-heat-balance/>

²https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-50209-5_11

kde Q je objemový průtok kapaliny v trubici. U zdravého člověka zhruba odpovídá hodnotě³ $Q = 0,071 \cdot \text{tep}^{-1} = 0,0841 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tlak na začátku turbíny p_1 bude přibližně roven diastolickému tlaku, který pro zdravého člověka uvažujeme 90 mmHg. Pokud budeme tok krve takto brzdit, bude se srdce pravděpodobně snažit tuto ztrátu dohnat tím, že zvýší svůj výkon. Problémem je, že tato změna je velmi individuální (v závislosti na zdraví daného člověka) a nelze ji příliš dobře předpovídat. Navíc by tím docházelo k nadměrnému zatěžování srdce. Pokud bychom však počítali pouze malé rozdíly tlaků (při malém odporu turbíny), mohli bychom tuto skutečnost zanedbat. Pro větší rozdíly však můžeme vždy udělat dolní odhad předpokladem $p_1 = \text{konst}$. Tlak p_2 umíme nastavit změnou odporu turbíny. Hledáme tedy co nejmenší diastolický tlak, kdy ještě nedochází k žádným dalším zdravotním potížím.

Takto způsobená porucha se odborně nazývá "Isolated diastolic hypotension"⁴ a nastává při poklesu tlaku pod 60 mmHg, kdy člověk začne pocítovat únavu a může mít závratě. Ty jsou způsobeny špatným prokrvením mozku, čemuž lze předejít tím, že dáme turbínku na místa vtoku krve do srdce. Jediné nebezpečí tedy spočívá v nadměrném zatěžování srdce a v problémech s tím spojených, jako je například zvýšené opotřebovávání srdce. Ty se u lidí postižených touto vadou projevují až ve vyšším věku.

Jaká bude účinnost takové turbíny? Námi uvažované žíly mají průměr kolem 1 až 2 cm, což jsou pro výrobu přijatelné rozměry. Účinnost však při takových rozměrech bude hrát velkou roli, jelikož s klesajícími rozměry a výkonem výrazně klesá. Pozorováním závislosti účinnosti malých turbín na jejich výkonu⁵ můžeme optimisticky odhadnout účinnost vodní turbíny daných rozměrů na 10 %. Jelikož má krev přibližně stejnou hustotu jako voda ($1060 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), nemusíme tento odhad z důvodu použití jiné kapaliny měnit.

Dosažením hodnot do vztahu výše dostáváme

$$P = \eta Q (p_{90} - p_{60}) = 0,02 \text{ W}.$$

Námi stanovenou baterii telefonu bychom tímto způsobem nabili za asi tři týdny.

Pokud bychom postupně zvyšovali odpor turbíny (třeba v rámci měsíců až let), mohlo by si srdce na vyšší potřebný tlak zvyknout a posílit se. Každopádně by tak docházelo k jeho rychlejšímu opotřebení.

Některá zdravotní rizika již byla zmíněna. Co jsme však doposud nezmnili je problém s nízkou účinností turbíny. Zbýlých 90 % (účinnosti jsme uvažovali jako 10 %) se totiž ve výsledku přemění na teplo. Toto teplo je však velmi rychle odváděno krví a pokud by nevznikalo těsně u stěn žil, které by mohlo poškozovat, nemělo by být nebezpečné. V poslední řadě je třeba zmínit možnou poruchu turbín, při které by mohlo dojít k ucpání žil a následné vysoce pravděpodobné smrti. Dalším velmi vysokým rizikem je vznik trombu kvůli turbulencím, jež vedou ke krevním sraženinám a následné srdeční zástavě. V praxi bylo dosaženo $800 \mu\text{W}$ elektřiny pomocí podobného konceptu⁶, což je řádově menší hodnota než námi vypočítaná. To může být způsobeno špatným odhadem účinnosti nebo tím, že jsme výkon turbíny tlačili až na samotnou hranici dlouhodobé přežitelnosti člověka. Tu však lze redukovat snížením odporu turbíny, čímž nastavíme nižší tlak, který pro srdce nebude přílišnou zátěží.

³<https://hypertextbook.com/facts/2001/VitaliyShchupak.shtml>

⁴<https://www.uab.edu/mix/stories/diastolic-blood-pressure-how-low-is-too-low>

⁵https://ac.els-cdn.com/S187661021735124X/1-s2.0-S187661021735124X-main.pdf?_tid=b471dfa5-178d-4e57-92ee-a334313ce1c4&acdnat=1534083170_d5a9d5ddb0cd4230c8e48af14375ae92

⁶<http://blogs.discovermagazine.com/80beats/2011/05/17/tiny-turbine-inside-arteries-could-power-pacemakers-and-cause-blood-clots>

Mnohem slibnější koncept než turbíny využívá nanotrubiček⁷ a v budoucnu by jím bylo možné napájet různé senzory uvnitř krevního řečiště, například pro diabetiky nebo nanoboty.

Síla fuku

Na podobném konceptu by mohla fungovat turbínka umístěná v hrtanu, kde však neproudí krev, ale vzduch. Potom můžeme použít výše zmíněný vzorec, upravený pro danou situaci. Tedy výkon foukací turbíny bude

$$P = \eta Q (p_{\text{fuk}} - p_{\text{atm}}) .$$

Účinnost turbíny η bude snížena díky tomu, že jí proudí vzduch místo krve. Na druhou stranu bude zvýšena tím, že bude moct být větší. Vzhledem k tomu, jak hrubé odhady zde děláme, můžeme jí považovat za stejnou jako v případě krve. Objem vydechaného vzduchu a příslušný čas, který výdech trvá, lze snadno dohledat.⁸ Pro normální nádechy můžeme odhadnout $V = 0,5$ l. Jelikož se nadechujeme přibližně šestnáctkrát za minutu, turbínkou protéká $Q = 0,13 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vzduchu. Při dýchání naše plíce obvykle vytvářejí přetlak 2 – 3 kPa vůči okolnímu prostředí. Maximální dosažitelný přetlak je přibližně⁹ 15 kPa. Odhadněme, že přetlak 3 kPa oproti standardním 2 – 3 kPa by nebyl příliš obtížný na udýchání. Pak dostáváme výkon $P = 40$ mW. Pro maximální použitelný přetlak 12 kPa (tedy navíc oproti normálnímu přetlaku, nutnému k dýchání), máme $P = 160$ mW. Pomocí systému potrubí a klapky bychom mohli dosáhnout toho, že by vzduch turbínou proudil stále stejným směrem. Tím bychom docílili dvakrát většího výkonu.

Pro nižší přetlak uveďme pro srovnání, že nabití mobilního telefonu by trvalo téměř 230 h, chytré hodinky bychom nabili za 30 h. Spotřebu kardiostimulátoru pokrýváme přibližně tisíckrát.

Odpadní teplo

Teplo, jež vyzařují naše těla, má z velké části formu infračerveného záření. Pro generování elektrické energie uvnitř fotovoltaických článků je však nutné dosáhnout určité minimální energie dopadajícího záření. Typická solární křemíková buňka vyžaduje alespoň 1,1 eV, takže funkčnost je shora omezena vlnovou délkou dopadajícího záření přibližně 1200 nm.¹⁰ Zdola je pak omezena¹¹ hodnotou 300 nm, viz graf 1.

Uvažujme absolutně černého člověka, jehož teplota je 37 °C. Celková intenzita záření bude

$$I = \pi \int_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} dI(\lambda) ,$$

⁷<https://newsroom.wiley.com/press-release/angewandte-chemie-international-edition/how-draw-electricity-bloodstream-one-dimension>

⁸<https://www.mada.org.il/en/about/engineer/challenge/respiratory-system>

⁹http://flutopedia.com/refs_bpress.htm

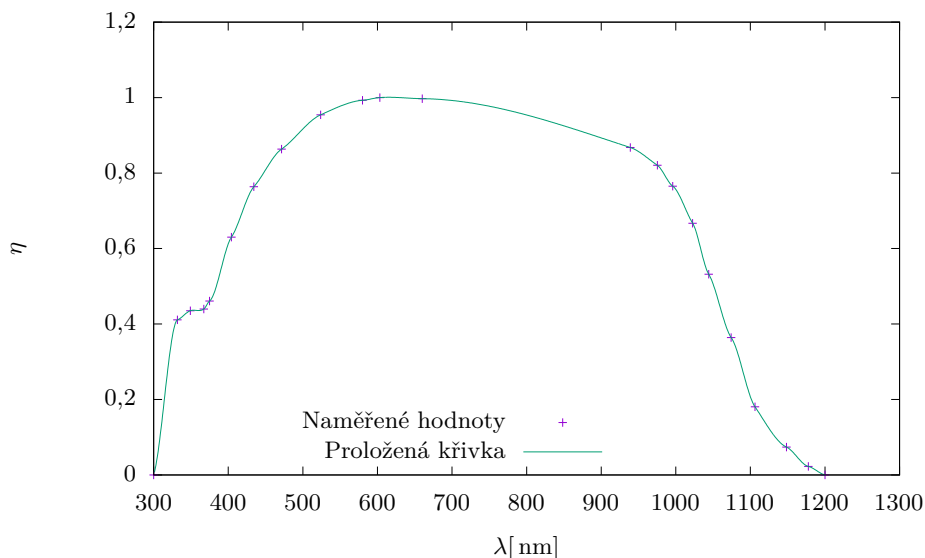
¹⁰<https://sciencing.com/effect-wavelength-photovoltaic-cells-6957.html>

¹¹https://www.researchgate.net/figure/Relative-quantum-efficiency-versus-wavelength-at-several-discrete-temperatures-for-a_fig1_283165648

kde $dI(\lambda)$ je spektrální intenzita záření, kterou můžeme spočítat z Planckova vyzařovacího zákona. Nás však zajímá elektrický výkon na jednotku plochy, čili musíme započítat ještě účinnost solárních panelů. Potom dostaneme

$$P_S = \int_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} \eta(\lambda) dI(\lambda).$$

Numerickou integrací nám vyšlo $P_S = 45 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. Stanovme plochu lidského těla¹² na 2 m^2 . Výkon získaný pomocí fotovoltaických článků z lidského těla tedy činí $P = 90 \text{ mW}$, čímž můžeme náš telefon nabít za dobu přibližně 4 dní. Prakticky by bylo možné články implementovat do oblečení, čímž bychom získali mnohem více energie ze slunečního záření než z člověka samotného. Dalším nedostatkem fotovoltaických panelů, jež nebyl zmíněn, je, že při malých tocích energie nemusí vůbec dojít k sepnutí nabíjecí části a získaná energie je tak nulová.



Obr. 1: Účinnost fotovoltaických článků v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření.

Větrný pohon

Obecně se udává, že člověk za den vyprodukuje okolo $1,4 \text{ dm}^3$ plynu v podobě větrů,¹³ jejichž složení je¹⁴

- Dusík: 20 – 90 %

¹²<https://www.calculator.net/body-surface-area-calculator.html?csex=m&bodyweight=85&bodyweightunit=kilogram&bodyheightfeet=&bodyheightinch=&bodyheight=180&x=96&y=23>

¹³<https://www.telegraph.co.uk/men/the-filter/qi/10305094/QI-gas-facts-how-much-gas-does-the-average-human-produce.html>

¹⁴<https://www.thoughtco.com/chemical-composition-of-farts-608409>

- Vodík: 0 – 50 %
- Oxid uhličitý: 10 – 30 %
- Kyslík: 0 – 10 %
- Methan: 0 – 10 %

Z toho jsou hořlavé vodík a methan. Produkce methanu není v lidském těle nijak velká, avšak spálením i jen malého množství můžeme získat hodně energie,¹⁵ přesněji $810 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Co se vodíku týká, jeho spálením lze získat až $120 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ neboli $240 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Ten by také bylo možné použít v palivovém článku, což je velmi perspektivní technologie s vyšší účinností než obyčejné spalování.

Za normálních podmínek je molární objem $22,4 \text{ dm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$. Za den tak dokážeme vyrobit energii maximálně

$$W_p = 12,6 \text{ kJ}.$$

Na využití této energie bychom potřebovali nějaký druh spalovacího motoru, jejichž účinnost se většinou pohybuje v intervalu 10 – 50%.¹⁶ Uvažme tedy $\eta = 10\%$, jelikož i při velmi dobrém konceptu spalovacího motoru nesmíme zapomínat na to, že spalujeme pouze malé množství plynu. Účinnost spalovacích motorů totiž roste se zvyšující se teplotou. Takto by bylo možné získat energii přibližně $W = 1,3 \text{ kJ}$. To stačí na nabití přibližně 4% baterie námi uvažovaného telefonu.

Seebeckův efekt

K tomuto jevu¹⁷ dochází při spojení dvou kovů či polovodičů s různými hodnotami Seebeckova koeficientu¹⁸ a s rozdílnou teplotou. Mezi oběma částmi vznikne napětí a tedy i elektrický proud. Napětí lze jednoduše spočítat jako

$$U = \Delta\alpha\Delta T,$$

kde $\Delta\alpha$ je rozdíl Seebeckových koeficientů použitých materiálů a ΔT je rozdíl teplot.

Chceme vybrat dva materiály s co největším rozdílem Seebeckova koeficientu. V případě polovodičů je největší rozdíl mezi selenem a $\text{Pb}_{15}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$, jež činí $\Delta\alpha_p = 2890 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$. Při pokojové teplotě 21°C je teplotní rozdíl vůči teplotě lidského těla $\Delta T = 16 \text{ K}$, což odpovídá napětí přibližně $U = 46 \text{ mV}$. Jak je vysvětleno v článku¹⁸ o seebeckově koeficientu, nelze z polovodičů sestavit fungující drátový systém a proto se používají spíše pro opačný Peltierův článek.¹⁹ Pro Seebeckův je nutně použít kovy. Zvolme antimon a bismut, kde $\Delta\alpha = 119 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$, tedy $U = 1,9 \text{ mV}$.

Podívejme se na nějaké reálné koncepty. Například v roce 2014 byl publikován článek,²⁰ podle kterého bylo dosaženo výkonu na plochu přibližně $1,5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Jedním metrem čtverečním bychom pokryli zhruba polovinu lidského těla. V úvodu bylo zmíněno, že na nabití mobilního telefonu potřebujeme $32,4 \text{ kJ}$ energie, což by v tomto případě trvalo zhruba 250 dní. Pro napájení kardiostimulátoru by nám stačila plocha 200 cm^2 .

Tato metoda je velmi bezpečná. Co se týče zatížení organismu, lidské tělo je v zimě připraveno zvýšit svůj tepelný výkon z přibližně 100 W na zhruba 150 W a ochlazování v řádech

¹⁵https://www.wou.edu/las/physci/GS361/Energy_From_Fossil_Fuels.htm

¹⁶https://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovací_motor

¹⁷<http://vlab.amrita.edu/?sub=3&brch=194&sim=351&cnt=1>

¹⁸<https://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>

¹⁹<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/peltier-effect>

²⁰<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/23/10/105002>

miliwattů, dokonce ani wattů, mu nezpůsobí žádné obtíže, takže omrzlin se bát nemusíme. Problém by samozřejmě nastal už při trochu větší zimě, jelikož kovové desky nelze považovat za příliš dobře izolující oblečení.

Pro napájení současných mobilních telefonů se všechny tyto koncepty ukázaly velmi nepraktické. Pokud však uvážíme podobnou elektroniku s menším příkonem, například energie získaná z větrného pohonu či krevní turbíny by pokryla polovinu elektrické spotřeby chytrých hodinek. Navíc všechny tyto možnosti byly dostatečné na napájení kardiostimulátoru, což je v dnešní době asi hlavní důvod zkoumání těchto přístrojů. Jako nejpraktičtější se jeví využití Seebeckova efektu či větrného pohonu, jelikož tato zařízení by bylo možné kdykoli sundat. Navíc nemají vedlejší efekty, jako je například možná smrt v případě turbíny v krevním řečišti.

Jan Střeleček
strela@fykos.cz

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

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