

James Kakalios

FYZIKA VŠEDNÍCH VĚCÍ

Neobyčejná věda
v pozadí obyčejného dne

ARGO / DOKOŘÁN

edice zip
svazek 62

James Kakalios
FYZIKA VŠEDNÍCH VĚCÍ
Neobyčejná věda v pozadí obyčejného dne

Z anglického originálu *The Physics of Everyday Things*,
vydaného nakladatelstvím Crown v New Yorku roku 2017,
přeložil Martin Žofka.

Obálka a sazba Martin Radimecký.

Odpovědný redaktor Václav Hozman.

Technický redaktor Milan Dorazil.

V roce 2018 vydalo nakladatelství Argo,

Milíčova 13, 130 00 Praha 3,

www.argo.cz, argo@argo.cz,

jako svou 3755. publikaci,

a nakladatelství Dokořán,

Holečkova 9, 150 00 Praha 5,

www.dokoran.cz, dokoran@dokoran.cz,

jako svou 974. publikaci.

Vytiskla tiskárna Akcent.

Vydání první.

ISBN 978-80-257-2652-5 (Argo)

ISBN 978-80-7363-919-8 (Dokořán)

VÁŠ DEN ZAČÍNÁ

*Je brzy ráno a vy spíte ve své posteli. Váš pomalý, pravidelný dech a stálý tep odměřují běh času a nesou vás blíž k okamžiku, kdy budete muset vstát a kdy vám začne den. Dnešek bude rušný. Navštívíte lékařku a potom kvůli obchodní prezentaci poletíte do jiného města. Starobylé hodiny na zdi, dárek od babičky, vás uklidňují svým tikáním, jak se závaží visící ze skříňky hodin rytmicky pohupuje sem a tam. Ačkoli jdou hodiny dobře, spoléháte se na budík nastavený na vašem chytrém telefonu, který vás vzbudí. První smysl, který zaznamená začátek dne, nebude váš sluch, ale čich. Včera večer jste nastavili **digitální časovač** na svém kávovaru, tak aby se cyklus vaření spustil deset minut před tím, než zazvoní budík na telefonu. Váš pokoj je brzy plný vůně čerstvé kávy a vy se začínáte vrtět.*

Elegantní fyzika kmitajícího kyvadla je základem chodu hodin na zdi i elektronického časovače ve vašem kávovaru a hraje stěžejní roli v mnoha zařízeních, která použijete, až se budete na dnešní den připravovat.

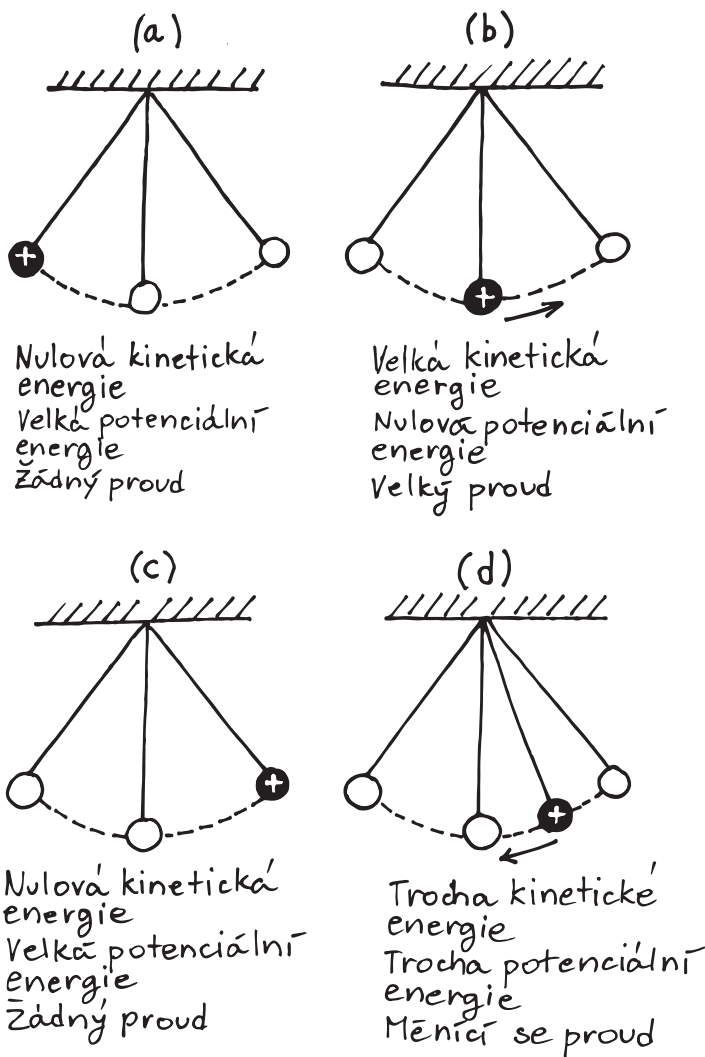
Kyvadlo je velice jednoduché zařízení skládající se z provázku, který je na jednom konci upevněný a na jehož druhém konci je přidělané nějaké hmotné těleso, označované jako „závaží“. Kmity kyvadla jsou vizuálním potvrzením jedné z nejdůležitějších představ ve fyzice, principu zachování energie. Kinetickou energii, energii pohybu, lze převést pouze na potenciální energii (energii související se silou, působící na nějaký předmět, a se vzdáleností, na níž tato síla může vyvolat pohyb) a naopak. U kyvadla se potenciální energie závaží na provázku zvyšuje zvednutím, kdy se koná práce proti gravitaci, která táhne závaží dolů. Jakmile je závaží vypuštěno, jeho potenciální energie se mění na kinetickou energii, jak se závaží pohybuje po oblouku půlkružnice. V nejvyšším bodě bude veškerá kinetická energie převedena zpět na potenciální energii – pokud závaží uvolníte a nestrčíte do něj, nikdy nemůže vystoupat do větší výšky, než odkud začínalo.

Kyvadlo se hodí k měření času. Doba, kterou závaží kývající se sem a tam potřebuje na dokončení plného cyklu, nezávisí na tom, jak je závaží těžké ani jak vysoko je zvednuto, aby se začalo houpat. Čím výš se závaží zvedne, tím delší je oblouk, po němž se houpe tam a zpět, a tím větší kinetickou energii a rychlost bude mít ve spodním bodě svého oblouku. Větší vzdálenost a vyšší rychlost se přesně vykompenzují, takže doba potřebná k dokončení cyklu je táž – nehledě na to, jak vysoko je závaží zdviženo. Jediný faktor, který určuje dobu cyklu, je délka provázku (přinejmenším pro poměrně malé rozkmity). Kyvadlu, jehož provázek je jen maličko kratší než 25 centimetrů, bude trvat jednu sekundu, než dokončí plný kmit. Jak se houpe, závaží část své kinetické energie předává okolí, protože odstrkuje z cesty molekuly vzduchu. Pečlivou kontrolou se zjistí, že nárůst kinetické energie vzduchu se přesně rovná poklesu celkové energie kyvadla, což je důvod, proč mechanické hodiny – pendlovky i jiné – potřebují pravidelně natahovat.

Totéž platí pro digitální časovač v kávovaru i pro mechanické kyvadlo – abychom zaznamenali plynutí času, je zapotřebí zajistit energii (jelikož vše, dokonce i odpočítávání sekund, vyžaduje zdroj energie) a způsob, jak tuto energii přeměnit na nějaký pravidelně se měnící cyklus. Kávovar je zapojen do zásuvky napojené na vnější elektrickou síť. Pro nás je šikovné, že mechanismus výroby elektrické energie v elektrárně automaticky generuje proud, který kmitá sem a tam jako kyvadlo, jež lze využít k výrobě časovače.

Výrobce elektřiny otáčí cívkami drátu mezi póly velkých magnetů. Abychom nahlédli, jak to vede ke vzniku střídavého elektrického proudu, vraťme se k jednoduchému mechanickému kmitajícím kyvadlu. Nechtě má závaží na konci provázku nějaký elektrický náboj daný pár elektrony navíc, které na něm sedí. I kdyby toto kyvadlo mělo čep bez tření a houpalo se v dokonalém vakuu bez jakéhokoli odporu vzduchu, přesto se nakonec zpomalí a zastaví. Kam otekla energie závaží? Do elektromagnetických vln, což ukazuje principiální symetrii mezi elektrickým a magnetickým polem, kterou budete v průběhu dne využívat opakovaně.

„Elektrický proud“ je definován jako pohyb elektrických nábojů a elektricky nabitě závaží, které se kývá sem a tam, představuje neustále se měnící proud. Tento proud je velký ve spodním bodě oblouku, když se závaží pohybuje nejrychleji, a je nulový v horním bodě oblouku, kdy je závaží v daný okamžik nehybné. Pohybující se elektrické náboje, jež vytvářejí elektrický proud, generují magnetické pole (to je známý Ampérův zákon); čím rychleji se pohybují, tím větší toto magnetické pole je. Kývající se závaží, které vytváří neustále se měnící proud,



Obr. 1 Schéma kyvadla s kladně nabitým závažím pohupujícím se sem a tam. (a) Když je závaží v nejvyšším bodě nalevo, nemá žádnou kinetickou energii, ale potenciální energie je maximální. Proud neteče (náboj se nepohybuje). (b) Závaží je v nejnižším bodě a rychle se pohybuje doprava. Má velkou kinetickou energii, nemá ale žádnou potenciální energii. Doprava teče velký elektrický proud. (c) Když je závaží v nejvyšším bodě napravo, nemá žádnou kinetickou energii, ale potenciální energie je opět maximální a proud neteče. (d) Závaží se během kyvu pohybuje doleva. Má určitou kinetickou a určitou potenciální energii (jejich součet se rovná celkové energii v bodech a, b a c výše) a elektrický proud teče doleva. Proud se mění, jelikož náboj zrychluje a také mění směr.

generuje stejně harmonicky proměnné magnetické pole. Toto měnící se magnetické pole zase budí proměnné elektrické pole (to známe jako Faradayův zákon). Rytmičké kmitání elektrického a magnetického pole se nazývá elektromagnetická vlna a bude mít stejnou frekvenci jako kmitající závaží. Tyto vlny nesou energii, a energie je tedy nezbytná k jejich vzniku. Proto kmity elektricky nabitého závaží pomalu vymizí, jak se energie jeho pohybu mění na elektromagnetické vlny. Tyto elektromagnetické vlny bychom mohli vidět pouhým okem, pokud by se kyvadlo pohupovalo velice svižně (řekněme tisíc bilionkrát za sekundu), jelikož v tom případě by se vlny projevil jako viditelné světlo.

Fyziku takových kmitů využívá výrobce elektriny, když pomocí cívek drátu otáčejících se mezi póly magnetu generuje elektrické napětí, které máte k dispozici v zásuvce ve zdi. Napětí dodávané výrobcem elektriny plynule přechází od kladného po záporné napětí a zase zpět, a vytváří tak vlnění, které je matematicky totožné se změnami polohy závaží kyvadla kmitajícího sem a tam, a jde o přirozený důsledek výroby elektriny. (Proto elektrickou energii nazýváme střídavý proud.) Elektrárna využívá fyzikální princip nazývaný Faradayův zákon, který popisuje, jak měnící se magnetické pole vyvolá tok elektrického proudu. Jak se cívka otáčí, velikost magnetického pole prostupujícího její kruhovou plochou se mění a v cívkě vzniká proud.* Cívku si představte jako drát namotaný na špulku o hodně velkém průměru. Když je plocha cívky přivrácena k pólům magnetu, prochází jí (podél její osy) většina magnetického pole, pokud se otočí o devadesát stupňů, pole plochou cívky téměř neprochází. Stálá rychlost otáčení dává plynule se měnící elektrický proud, který v průběhu času kmitá sem a tam úplně stejně, jako se pohybuje kyvadlo závaží. Ve Spojených státech se cívky otáčejí šedesátkrát za sekundu (v Evropě padesátkrát), a frekvence vytvářeného střídavého napětí je tedy 60 hertzů.

Napětí v zásuvce se plynule mění sem a tam 60krát za sekundu, což znamená, že trvá pouze 0,0167 sekundy, než se dokončí jeden cyklus. Aby časovač v kávovaru tuto periodu zpomalil, používá speciálně zkonstruované čipy, které napodobují roli frekvenčních měničů z rádiových přijímačů.** Jeden čip dělí příchozí frekvenci deseti, takže vlna napětí, které kmitala šedesátkrát za sekundu, nyní

* K roztáčení cívky se používá pára o vysokém tlaku, která se vyrábí z vody uvedené do varu spalováním uhlí, zemního plynu nebo biomasy či prostřednictvím energie jaderných reakcí. Bez ohledu na palivo, které spotřebovávají, využívají všechny elektrárny k výrobě elektriny stejnou fyziku.

** Tyto čipy vytvářejí rázy přidáním druhé frekvence k prvnímu signálu (jde o proces nazývaný „heterodynní detekce“). Výsledkem jsou dva kmity, jeden o vyšší frekvenci, která

za sekundu kmitá šestkrát. Další čip tuto frekvenci dodatečně dělí šesti, takže frekvence šesti cyklů za sekundu je snížena na jeden cyklus za sekundu. Tyto pomalejší kmity napětí se posílají dalšímu čipu, který počítá, kolikrát napětí dosáhne své největší kladné hodnoty (to je totéž, jako když sledujeme, jak často se kyvadlo vrátí do své původní výchozí polohy). Tento „sčítací“ čip sleduje ubíhající sekundy a tuto informaci lze pomocí několika obvodů zobrazit na digitálním ciferníku. Když nastavíte časovač na kávovar, dáváte čipu pokyn, aby toto sčítání sledoval, a zároveň jste jej naprogramovali tak, že až součet dosáhne konkrétní hodnoty, čip pošle jisté napětí do jiné části tohoto elektronického systému. Toto napětí je stejné jako to, které vznikne, když ručně stisknete tlačítko „ZAP“ a spustí se proces vaření.

Systém měření času se spustí, když kávovar zapneme a zadáme správný čas. Je-li kávovar vypnutý, tato předem nastavená hodnota zmizí. Jak tedy elektronický časovač funguje, když není zapojený do vnějšího zdroje střídavého napětí přiváděného z elektrické zásuvky?

*Do vašeho pokoje se line vůně kávy, která zapůsobí na vaši ne zcela probuzenou mysl. Kromě nastavení časovače na kávovar jste si včera v noci nařídili i **budík** na chytrém telefonu. Budík se spustí a zahraje předem nastavenou melodii uloženou v paměťovém čipu telefonu. Když zkontrolujete čas, zamručíte, jelikož musíte vstát dříve než obvykle. Jste v pokušení tůknout na ikonu označenou „opakované buzení“. Když ale vdechnete aroma kávy, všimnete si své nacpané cestovní tašky stojící v rohu ložnice. Připomenete si, že před sebou máte dlouhý den, a přinutíte se vylézt z postele. Když se postavíte, při došlápnutí na levou nohu sebou lehce cuknete. Bylo by dobře, kdyby se vám na to dnes někdo podíval.*

Problém měření času v zařízení nepřipojeném do vnějšího zdroje elektrické energie je starý; předchází vlastně existenci elektrické energie. Ve starodávných budících se používaly pružinky, a když ručičky na ciferníku hodin dospěly do nastaveného bodu, přeskočila páčka, která uvolnila další stočenou pružinku. Tato pružinka potom rozkmitala paličku mezi dvěma kovovými kalíšky a ty začaly vydávat tak hlasitý řinčivý zvuk, že by vzbudil i mrtvého. Budík ve vašem chytrém telefonu je menší a budicí melodie je méně drásavá, ale princip jeho fungování zůstává v zásadě stejný.

je součtem obou původních frekvencí, a další o nižší frekvenci, která je jejich rozdílem. Pomocí filtru lze potom vybrat onu nižší frekvenci.

Váš chytrý telefon využívá cosi, co se nazývá piezoelektrický krystal a co nahrazuje mechanickou pružinku v budíku. Nejprve se blíže podíváme na jednoduché pružinky, piezoelektrické krystaly přijdou na řadu až po nich.

Pružiny jsou velice dobré měřiče času. Při natahování a stlačování se vzpírají a reagují silou, která působí proti změně jejich délky. Čím víc se pružina natáhne či stlačí, tím větší je síla působící proti této změně. Zavěste ze stropu stočenou pružinu a na její konec připevněte závaží. Pružina se protáhne dolů a zajistí tak sílu mířící vzhůru, která působí proti natahování a vyrovnává dolů směřující tíhu závaží. Pokud závaží stáhnete o kousek níž a pustíte jej, síla daná pružinou bude větší (čím víc je pružina natažena, tím větší je síla působící proti natažení) než dolů směřující tíha závaží, těleso se začne pohybovat vzhůru a projde skrz svou původní polohu. Jakmile ji přeletí, začne pružinu stlačovat a ta reaguje silou směřující dolů, která nyní působí proti stisku a tlačí závaží zpět směrem do jeho výchozí polohy. Závaží bude pravidelně poletovat nahoru a dolů, přičemž jeho pohyb se nebude nijak lišit od houpání kyvadla či střídavého napětí v elektrické zásuvce. Vlastní frekvence kmitů pružiny (počet zhoupnutí nahoru a dolů za sekundu) je určena tuhostí pružiny a hmotností závaží visícího na jejím konci.

Původ síly v pružině, která se brání natahování či stlačování, je týž jako v piezoelektrickém krystalu v chytrém telefonu – tedy elektrina. Atomy ve všech pevných látkách drží pohromadě elektrické síly, které zajišťují i to, že atomy setrvávají v určitých polohách. Jsou-li dva atomy v pevné látce příliš blízko sebe, jejich elektrony na sebe vzájemně působí odpudivou silou, která atomy tlačí od sebe. Představte si atom v krystalu jako obyčejnou kouli. Chemické vazby, které drží atom na místě, znázorníme pružinami připevněnými k sousedním atomům. Vychýlíme-li nějaký atom z jeho přirozené polohy v pevné látce, pak elektrony, které jej obklopují, proniknou příliš blízko k jeho sousedům na jedné straně, zatímco na druhé straně budou příliš daleko. Takto vznikne nerovnovážná síla, která bude atom tlačit zpět do jeho rovnovážné polohy. Tato síla sice poklesne, jakmile se atom dostane zpět na své přirozené místo, ale atom díky své kinetické energii svou původní polohu přeletí směrem k sousedům na druhé straně. Bude kmitat sem a tam kolem preferované polohy s rozkmitem závislejícím na teplotě dané pevné látky a frekvence kmitů bude záviset na hmotnosti atomu a tuhosti chemických vazeb, které jej v pevné látce drží na místě. K takovýmto kmitům atomů dochází ve všech pevných látkách: v této knize, v židli, na níž sedíte, a dokonce i ve vás samotných.

Elektronické měřiče času, jako jsou digitální náramkové hodinky či váš chytrý telefon, používají k odměřování času speciální oscilátor, který je mnohem přesnější než stočená pružina – jde o krystal křemene. Křemen je pevná látka složená

z molekulárních jednotek tvořených oxidem křemičitým, což je zároveň chemická podstata písku. Krystaly křemene mají zvláštní vlastnost: pokud je v jednom směru zmáčkneme, všechny elektrické náboje v nich se seřadí a vytvoří podél této pevné látky nenulové výsledné elektrické pole. Tento druh materiálu se nazývá piezoelektrická látka: „piezo“ znamená v řečtině „zmáčknout“ či „stisknout“ a piezoelektrická látka je pevná látka, ve které po stlačení vzniká elektrické napětí. Když u jistých materiálů a krystalických struktur stlačíme protilehlé strany pevné látky k sobě, všechny její atomy se vychýlí tak, že vytvoří velké výsledné elektrické pole.

Chceme-li piezoelektrickou látku použít jako zařízení měřící čas, celý proces obrátíme. Přivedeme tedy na tuto pevnou látku napětí, takže stěny krystalu se stáhnou k sobě, jako by je tiskla vnější síla. Jakmile toto napětí zrušíme, krystal se roztáhne a začne kmitat na své vlastní frekvenci. Tato frekvence je určena velikostí a tvarem krystalu a může se pohybovat od pár tisíc cyklů za sekundu až po několik set milionů cyklů za sekundu. Jak krystal křemene osciluje, vytváří napětí o téže vlastní frekvenci a tu lze využít jako zpětnou vazbu k udržování kmitů krystalu. Jako v digitálním časovači čipy zajišťující dělení frekvence sníží vysokou frekvenci krystalu křemene na jeden cyklus za sekundu. Jakmile uplyne předem nastavený čas, odešle se, stejně jako v případě digitálního časovače v kávovaru, na další čip signální pulz. Tento druhý čip zahájil vaření kávy, zatímco ve vašem telefonu spustí přehrávání předem vybrané hudby.

Sledování času je pro chytrý telefon velice důležité, i když pomineme jakékoli funkce budíku. Každá procedura vykonaná počítačem (a pro naše účely lze chytrý telefon považovat za malý počítač) je operace probíhající v čase. Tento proces má začátek a konec – což ho připodobňuje hudební skladbě. Aby se dosáhlo požadovaného účinku, musí se jako v hudbě tóny přehrát v příslušné posloupnosti a ve správný okamžik. Pro správnou souhru symfonického orchestru je zapotřebí dobrý dirigent, který udržuje takt a zajišťuje, aby například trubky nenastoupily ke čtvrté větě, zatímco smyčce se ještě ladí. V počítači s miliony tranzistorů, logických prvků a paměťových buněk, které všechny musí fungovat ve správné posloupnosti, je „dirigentem“ čip nazývaný centrální procesorová jednotka, neboli CPU. Pomocí krystalického oscilátoru dokáže CPU držet rytmus – a nadto velice rychlý rytmus –, aby zkoordinovala součástky, které se přepínají za méně než jednu nanosekundu.

Když se upravíte, popadnete svůj chytrý telefon ležící na nočním stolku a zamíříte do kuchyně. Z lednice si vyndáte housku a kostku másla a necháte je na lince

*zahřát. Zatímco se začínáte připravovat na dnešní den, najdete podcast, který jste si předem stáhli do telefonu, a zaposloucháte se do něj. Tento konkrétní podcast přináší profily slavných houslařů, současníků Stradivariho. Životopisy těchto mistrů v práci se dřevem prokládá program ukázkami klasické hudby provedenými na jejich skvostných nástrojích. Abyste si úryvky hudby lépe užili, připojíte svůj chytrý telefon ke dvěma malým, ale kvalitním **reproduktorům**, které stojí na kuchyňské lince.*

Když chcete poslouchat podcast nebo jakoukoli hudbu uloženou v paměti chytrého telefonu, musí telefon převést jistý číselný kód na zvukové vlny, což jsou změny hustoty (a tedy i tlaku) vzduchu. Schopnost ukládat hudbu je starší než éra elektroniky – jednoduché natahovací hrací skřínky uměly přehrát krátký úryvek jedné melodie a mechanické klavíry dokázaly přednést celou skladbu. Informace ukládaly velice odlišnými postupy, je ale jedna věc, kterou mají hrací skřínky, mechanické klavíry i chytrý telefon společnou – aby byly slyšet, musí dojít k vibracím vzduchu.

MP3 přehrávač* používá sadu digitálních příkazů, které napodobují fungování dírek v papírové roli v mechanickém klavíru. Mechanický klavír má vnitřní mechanismus, jenž umí na základě ruličky papíru s účelně rozmístěnými dírkami dát klavíru pokyn, jaké klávesy se mají stisknout. Proměnlivé polohy a rozestupy dírek v tomto listu papíru v podstatě obsahovaly program, který klavírní mechanismus interpretoval tak, že přehrál konkrétní píseň. I digitální informace uložené v chytrém telefonu jsou v zásadě program, který po správném přečtení vybudí sekvenci napětí. Když se tato napětí odešlou do reproduktoru, budou převedena na zvukové vlny konkrétní melodie. Uvnitř reproduktoru je membrána (velice tenká plastová fólie), která může vibrovat. Podle frekvence a rozkmitu vibrací membrány vznikají ve vzduchu tlakové vlny – a právě tyto vlny slyšíme.

Jak se elektrické napětí převádí na mechanické chvění membrány, abychom slyšeli výsledné zvukové vlny? Dělá se to pomocí magnetů. K membráně je připevněna malá cívka z drátu. Pomocí napětí vyvoláme v cívice proud, v němž se projeví jakékoli změny tohoto napětí. Změny proudu se převedou na mechanické kmity membrány reproduktorů díky téže symetrii mezi elektrickými proudy a magnetickými poli, s níž jsme se setkali již dříve. Měnící se elektrické proudy budí měnící se magnetická pole. Cívka na membráně sedí přímo nad permanentním

* Tento zápis je zkratka popisující software používaný ke komprimaci hudby, aby bylo v sadě pokynů odeslaných reproduktorům potřeba méně „jedniček“ a „nul“.

magnetem umístěným hned pod membránou. Když proud protéká ve směru hodinových ručiček, vytváří magnetické pole orientované tak, že jeho severní pól míří ven, směrem k severnímu pólu permanentního magnetu. Jelikož stejné póly se odpuzují, působí mezi magnety síla, která je odtlačuje od sebe a vyvolává průhyb membrány směrem ven. Když se směr napětí převrátí, teče proud opačným směrem (proti směru hodinových ručiček) a generované magnetické pole je k severnímu pólu permanentního magnetu přitočeno pólem jižním. Opačné magnetické póly se přitahují, a cívka je tak přitahována k permanentnímu magnetu, což způsobí, že se membrána natáhne dovnitř. Změny napětí – jak jeho frekvence, tak amplitudy – modulují tvar membrány, což vytváří zvukové vlny.

Sluchátka nazývaná pecky umísťují kmitající membránu do těsné blízkosti ušního bubínku. U běžného stereo systému je membrána reproduktoru uprostřed většího rozšiřujícího se kuželu, který vibrace membrány zesílí a nasměruje. Reproduktoři chytrého telefonu jsou umístěny v těle přístroje, proto je kvalita a hlasitost přehrávané hudby omezená. (Chcete-li rychle a improvizovaně zesílit zvuk z reproduktorů chytrého telefonu, položte reproduktor telefonu na dno velké mísy vyrobené nejlépe ze dřeva a zvuk bude mít sytější a hlubší tón. Vlastní frekvence dřeva zvýrazní odražené zvukové vlny – proto je dřevo vyhledávaným materiálem na výrobu strunných nástrojů.)

*Zaposloucháte se, když v podcastu přehrávají živý úryvek hudby. Představujete si virtuosa, jak smyčcem rytmicky přejíždí sem a tam přes struny. Představa smyčce vám najednou připomene, že si ještě musíte vyčistit zuby. Zvýšíte hlasitost, řítíte se do koupelny a z plastového držáku, který slouží jako nabíječka baterií, si vezmete **elektrický zubní kartáček**.*

Aby se štětiny elektrického zubního kartáčku pohybovaly automaticky sem a tam, používá se v něm malý elektrický motor spojený s dobíjecí baterií. Přeměna elektrické potenciální energie uložené v baterii na rotační kinetickou energii je základem mnoha technologií, s nimiž se denně setkáváme. Baterie vyvolá v motoru proud, který poteče cívkou tvořenou drátem. Cívka se nachází mezi severním a jižním pólem malého magnetu. Proud procházející drátem vytvoří magnetické pole, které je odpuzováno jedním pólem magnetu a přitahováno pólem druhým, takže cívku stáčí. Cívka je připevněna k tyčce, která ji příčně protíná, a jak se cívka stáčí, tyčka rotuje. Pomocí chytrého přepínacího mechanismu lze docílit toho, že stejnosměrný proud z baterie (který se liší od střídavého proudu z elektrické zásuvky) bude každou půlotáčku měnit směr, takže cívka bude nepřetržitě

jedním pólem pevného magnetu odpuzována a k druhému bude přitahována. Čím víc proudu prochází cívkou, tím větší je odpuzující síla a tím rychleji se bude cívka otáčet. Pomocí vyosené hřídele se otáčivý pohyb motoru uvnitř zubního kartáčku převádí na posun sem a tam, a díky tomu kmitají štětiny zubního kartáčku po vašich zubech.

Motor v některých elektrických zubních kartáčkích se otáčí několikrát za sekundu, což vyvolává bzučení, které slyšíte, když si čistíte zuby. Některé zubní kartáčky mohou mít frekvenci až 1,6 milionu cyklů za sekundu (avšak s oscilacemi o velice malém rozkmitu). Tyto vysokofrekvenční vibrace jsou generovány frekvenčními násobiči (přesně jak jsme to viděli u digitálního časovače) a piezoelektrickým krystalem (který najdete i v časovači chytrého telefonu).

Zdrojem elektrické energie v zubním kartáčku je baterie, která využívá jistou chemickou reakci k ukládání kladných nábojů na kovovém plíšku (nazývaném elektroda) a záporných nábojů na druhé elektrodě. Rozdíl nábojů pohání proud procházející cívkou v motoru (nebo rozkmitává piezoelektrický krystal křemene). Tato chemická reakce nakonec dojde do bodu, kdy už na elektrody nelze přidat další náboj. V dobíjecí baterii se proto na svorky přivede napětí, které tuto reakci přinutí probíhat opačným směrem. Když se baterie vrátí do původního stavu, může přímá chemická reakce zase průběžně nabíjet elektrody a baterie je opět připravena k akci.

Jak ale baterii v elektrickém zubním kartáčku připojit ke zdroji elektrické energie, když se toto zařízení bude už ze své podstaty vyskytovat poblíž vody, nebo bude dokonce ve vodě ponořené? Mnoho elektrických zubních kartáčků má plastovou rukojeť, která se postaví do válcové nabíječky a ta – ačkoli se zapojuje do elektrické zásuvky – je také celá z plastu. Plast je elektrický izolant, v němž každý elektron v každém atomu poctivě drží tyto atomy pohromadě a nejsou tu k dispozici žádné elektrony, které by v reakci na vnější napětí vedly proud. Jak tedy propojení dvou plastů mezi nabíječkou a rukojetí zubního kartáčku dodává elektrickou energii dobíjecí baterii? Na základě téhož fyzikálního principu, který popisuje, jak mění se magnetická pole budí elektrické proudy.

V podstavě nabíječky zubního kartáčku je cívka z drátu, jíž po připojení do zásuvky protéká střídavý proud. Tento proud neustále mění směr a chvíli teče ve směru hodinových ručiček a potom zase proti nim, jako když se kyvadlo pohybuje sem a tam. I magnetické pole buzené tímto proudem bude neustále měnit směr, takže k podstavci nabíječky bude nejprve otočen severní pól a v druhé půlce cyklu zase pól jižní. Spodek elektrického zubního kartáčku obsahuje další cívku orientovanou tak, aby magnetické pole nabíječky procházelo kruhovou