

Dodati ali odvzeti, to je zdaj vprašanje



TINE GOLEŽ

→ Nobena skrivnost ni, da večina kozarcev lepo zveni. In kako se spreminja višina tona (v glasbenem smislu, fizikalno bi temu rekli zven), če v kozarec nalijemo vodo? Odgovora sta pravzaprav dva in si nasprotujeta. Med samim vlivanjem vode slišimo vse višji ton, torej vse večjo frekvenco. Podrobno je pojav opisal Ivo Verovnik [1]. Če pa kozarec uporabljamo kot neke vrste tolkalo, pa trkanje z žličko po kozarcu povzroči višji ton, ko je kozarec prazen, nižjega pa tedaj, ko je poln. Enaka frekvenca se namesto s trkanjem pojavi, če s prstom drsamo po robu kozarca. Tako nekateri ljudje iz množice kozarcev ustvarijo »stekleno harfo« in igrajo zahtevne melodije. Ravno obratno torej kot sprememba zvena, ki ga slišimo ob nalivanju vode ali pihanju v različno napolnjene, sicer enake steklenice.

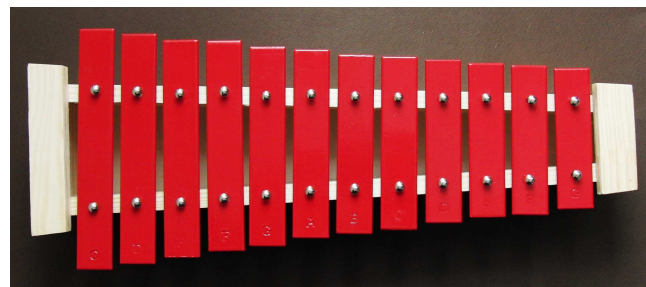
Nalivanje vode in pihanje v steklenico (kdor igra prečno flavto, to vsekakor dobro obvlada) povzroča šum, ki posebej izdatno resonira s frekvenco, ki ustreza lastni frekvenci zraka v kozarcu (ali steklenici). Ta je tem višja, čim bolj poln je kozarec. V prvem približku lahko rečemo, da gre za skrajševanje na eni strani zaprte piščali. Pri polnjenju kozarca ali udarjanju po kozarcu (ali drsanju z vlažnim prstom po robu kozarca) pa glasbilo ni padajoča voda, ki povzroča šum (ali šum pri pihanju v steklenico), in zrak nad njo, pač pa sam kozarec. Ker slišimo nižji ton, sklepamo, da nihajo v bolj polnem kozarcu stene kozarca zaradi dolite vode bolj ovirano in s tem z nižjo frekvenco. Preden torej odgovorimo, kaj moramo storiti za znižanje tona, moramo vedeti, na kateri način bomo ton povzročali. Dolivanje vode tako lahko frekvenco zniža ali zviša, odvisno od vrste rabe tega preprostega glasbila.

Iz trgovine

Ko sem se pred dnevi odpravil v trgovino le po izdelke a in sem imel kmalu v vozičku še nenaročene izdelke b , c in d , me je pritegnil zvok kovinskih zvončkov ali metalofona. Preprosto glasbilo je preizkušala nakupovalka. Presenečen sem bil, saj je bil instrument vrhunsko uglašen, kar pri cenениh glasbilih ni prav pogost pojav. Zvončki niso stali niti 20 evrov, zato so postali izdelek e in tako dopolnili moj nakup.

Bralci gotovo vedo, da struna, ki jo skrajšamo na polovico s pritiskom ob ubiralko, zveni natančno z dvakratno frekvenco. Glasbeno temu pravimo, da zveni za oktavo višji ton. Prav, pa pogledjmo sedaj zvončke. Ploščica, ki zveni kot nižji c , je dolga 16,7 cm, medtem ko je ploščica za oktavo višji c , dolga le 11,85 cm. Kvocien teh dveh števil je 1,41. Zlahka posumimo, da gre za razmerje dolžin $\sqrt{2}$, medtem ko je razmerje frekvenc 2. Dodajmo še, da sta tako debelina kot širina vseh ploščic enaki.

Pred nami je že prvi izziv, prva meritev. Kako niha ravnilo, ki je na eni strani vpeto? Ga je res treba skrajšati le za faktor 1,41 in ne za 2, če želimo podvojiti frekvenco? Ravnilo vpnemo tako, da je nihajoči del dolg npr. 20,6 centimetrov. Vključimo



SLIKA 1.

Zvončki; dolžine ploščic, ki zvenijo kot oktava, so v razmerju $1: \sqrt{2}$.

program za snemanje zvoka, zanihamo ravnilo in se ga na rahlo dotaknemo s tršim predmetom. Snemalnik posname »trke« ravnila in predmeta, iz katerih dokaj natančno preberemo nihajni čas. (Sam še vedno uporabljam CoolEdit.) Potem nihajoči del ravnila skrajšamo na 16,6 cm in izmerimo, da se je frekvenca podvojila. Očitno so transverzalna nihanja palic drugačna od nihanja strune.

A če palico udarimo s klavivom na koncu v smeri simetrijske osi palice, hkrati pa jo držimo na sredini, bomo dobili longitudinalno (lastno) nihanje. Takrat pa je frekvenca nihanja obratnosorazmerna z dolžino palice, pa tudi višjeharmonske frekvence so celoštevilski večkratniki osnovne frekvence.

Premislimo še, kako je frekvenca osnovnega transverzalnega valovanja odvisna od preseka palice, ki je vpeta na enem krajišču, kot je bilo vpeto ravnilo na sliki 2. Naj ima palica presek v obliki pravokotnika, da nekoliko spominja na deščico. Če preseka palico po dolžini, bo sila, ki je potrebna za upogib vsakega kosa palice, le polovico tolikšna, kot je bila pri nerazrezani palici. A tudi masa, ki jo mora polovična sila vrniti v začetno lego (in pri tem opravi četrtnihaja), je le polovična, zato pričakujemo, da se nihajni čas ne spremeni. Nihajni čas ni odvisen od širine palice. Drugačna zgodba pa je pri debelini. Če razrezano palico zlepimo v debelejšo (ali jo preprosto nadomestimo z debelejšo in ožjo), smo ohranili maso palice. Sila, ki je sedaj potrebna za upogib, je večja. Prav zato se tej večji sili posreči enako masivno palico vrniti do prvotne (ravnovesne) lege v krajšem času; prva četrtnina nihajnega časa (ter vse ostale četrtnine) in s tem nihajni čas je krajši. Frekvenca je kar



SLIKA 2.

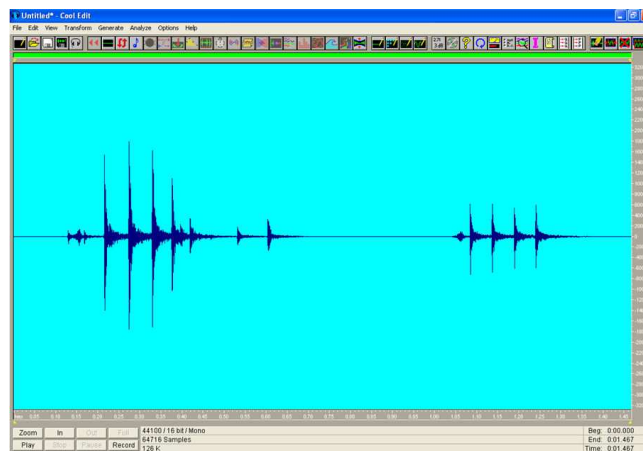
Ravnilo je vpeto na mizo; geotrikotnik le pomaga sponi. Med nihanjem ravnilo rahlo zadeva pisalo, ki ga sicer držimo kakih 5 cm od prostega roba ravnila tik nad ravnalom.

premosorazmerna z debelino. Da gre res za premosorazmernost, lahko sami izmerimo z različno debelimi palicami ali pa uporabimo diferencialne enačbe.

Povzemimo: frekvenca transverzalnega nihanja palice (ali podolgovate ploščice oz. jezička) je sorazmerna z debelino in obratnosorazmerna z dolžino palice na kvadrat; od širine palice pa ni odvisna. Če koga zanima še kaj več, bo pogledal, kaj je o tem napisal Iztok Kukman [2].

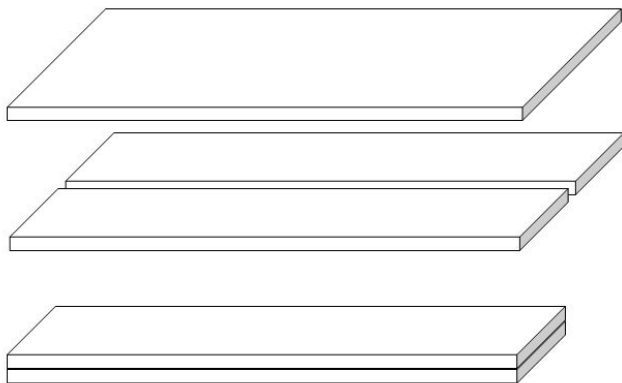
Iz kuhinjske omare

Ena izmed manj škodljivih posledic sladkosnednosti so tudi prazne skodelice različnih čokoladnih nama-zov. Že nekaj časa sta v naši kuhinjski omari dve. Ko sem ju prestavljal, se nista razbili, kot bi morda pričakoval bralec, pač pa le zazveneli. Prav to pa me je presenetilo; čeprav sta na prvi pogled enaki, je bil zven ene bistveno nižji od zvena druge. Naj se izrazim v glasbenem jeziku: prva je zvenela s tonom c, druga pa z (višjim) tonom f. Za nepoznavalce notnega zapisa povejmo, da je tolikšna razlika v frekvencah pri prvih dveh tonih slovenske himne. Očitno gre za nekaj več kot le majhno razliko, ki bi bila posledica naključja pri izdelavi.



SLIKA 3.

Prva skupina udarcev nihajočega ravnila ob pisalo je bila premočna, druga skupina pa dovolj nežna, da nihanja nismo znatno motili. Čas štirih udarcev je bil 0,155 s, kar pomeni, da je nihajni čas $0,155 \text{ s}/3 = 0,05167 \text{ s}$ (prvi udarec je udarec nič!) in frekvenca 19,4 Hz. Pri daljšem nihajočem delu ravnila (206 mm) pa je bila izmerjena frekvenca 9,4 Hz. Triodstotno odstopanje je povsem sprejemljivo za to preprosto meritev.



SLIKA 4.

Osnovna palica oz. jeziček, prerezani jeziček, iz katerega sta nastala dva (vsak zahteva polovično silo za upogib), in zlepljeni polovici. V zadnjem primeru je sila, ki je potrebna za enak upogib kot upogib prvotnega jezička, večja. Ni narisano, da so vsi jezički pritrjeni na levi strani tako, kot je pritrjeno ravnilo na sliki 2.

Ko sem skodelici ponovno vzel v roke, sem imel občutek, da nista obe enako težki. Kuhinjska tehnika je potrdila mojo domnevo; pri eni je pokazala 222 g, pri drugi pa 274 g. Hm, katera je torej masivnejša? Če pomislimo na strune, bi rekli, da bo tista, ki ima večjo maso, zvenela z nižjim tonom. Na kitari, godalih in tudi v klavirju so strune za nižje tone (za manjše frekvence, da povemo še s fizikalnim izrazom) vidno debelejšje. A dva udarca po skodelicah razkrijeta, da z nižjim tonom zveni skodelica, ki ima manjšo maso.

Po vsej verjetnosti ne gre za različno surovino, iz katere sta skodelici izdelani, pač pa za različno debelino. Pogled proti svetlobi potrди domnevo, saj je skodelica z manjšo maso nekoliko prosojnejša.

Skodelica je neke vrste zvon. Vprašajmo se, kako bi opisali frekvence zvona. Kaj se zgodi z okroglo luknjo v kovinski plošči. Bo zaradi segrevanja plošče večja ali manjša? Ploščo si predstavljamo sestavljeno iz obročev. Vsak obroč lahko obravnavamo kot palico, ki se zaradi segrevanja raztegne. S tem je obseg vsakega obroča večji, kar pomeni, da je luknja večja.

Nekaj podobnega naredimo (v mislih) tudi z zvonom ali našo skodelico. Predstavljajmo si, da je sestavljena iz obročev. Ko udarimo po zvonu ali skode-



SLIKA 5.

Skodelici sta fotografirani proti svetlobi, zato je slika sicer fotografsko skromna, fizikalno pa kaže, da je desna skodelica tanjša, saj svetloba bistveno bolj preseva.

lici, povzročimo lastno nihanje vsakega obroča. To pomeni, da moramo proučiti nihanje palice, saj obroč ni nič drugega kot ustrezno zakrivljena palica oz. kovinski trak ali jeziček.

Toda prav to smo že storili! Ugotovili smo, da debelejšje palice nihajo z večjo frekvenco oz. manjšim nihajnim časom. Zato se še vprašamo, ali naše ugotovitve pomenijo, da zvonove uglašujejo »navzdol« z odvzemanjem materiala oz. brušenjem. »Dr. Google« potrди to domnevo, do katere nas je pripeljalo premikanje skodelic in nekaj dodatnih poskusov. Zvon, ki ga po notranji strani nekoliko obrusijo, zveni z nižjim (osnovnim) tonom.

Iz omare upokojene profesorice glasbe

Da smem brskati po njeni omari, je krivo sorodstveno razmerje; sem namreč njen sin in nekatere njene omare lahko odprem. V eni izmed njih sem našel preprost ksilofon, ki je po sili razmer nastal pred pol stoletja. Na prvi pogled naj bi šlo za malomarno izdelano glasbilo, ki bi moralo biti še razglašeno, saj je ena deščica očitno prekratka. Uporaba pa priča, da je instrument odličen, saj je dobro uglašen. Kako je torej mogoče, da je deščica za ton h krajša od tiste za sosednji ton c? Les - posebno cenene vrste - pač ni zelo homogen. Prav spremenjena gostota bi bila lahko vzrok; lahko pa gre za različno debelino. Meritev potrди, da je deščica za ton h malo tanjša in zato navkljub manjši dožini uspe zveneti s pravo frekvenco. Po računu sodeč pa nekaj prispeva tudi sestava lesa, saj ta ni dovolj tanek, da bi le z debelino dosegel ustrezno nizko frekvenco. Očitno je, da

je bil glavni razsodnik pri izdelavi natančno uho; merilni trak je služil le kot približno vodilo.

Po pričakovanju pa sta dolžini deščic, ki zvenita v razmiku oktave ($c^1 - c^2$, $d^1 - d^2$, ...), praktično pri vseh drugih tonih skoraj natančno v razmerju 1,41: 1.

Za konec spet k zvončkom

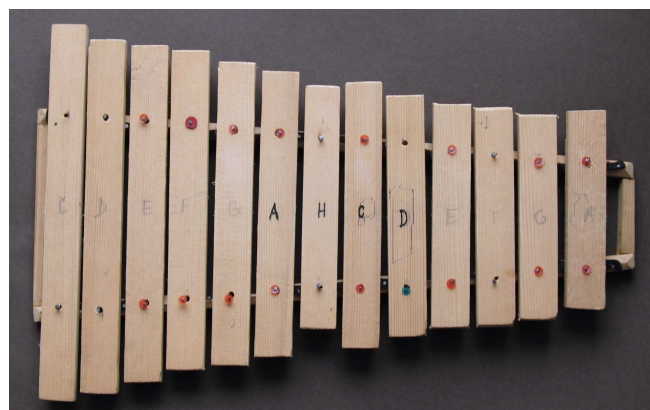
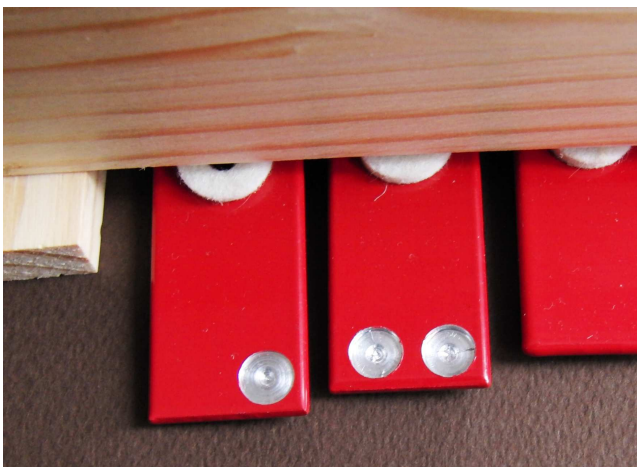
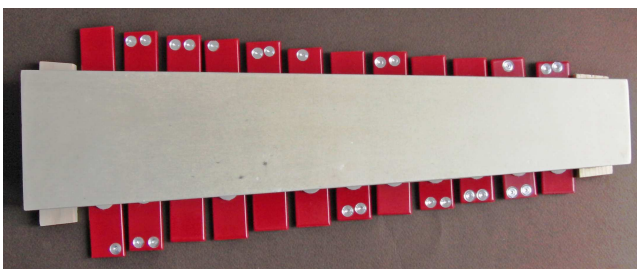
Še dve stvari izdajmo. Najprej moramo povedati, da v nasprotju z alikvotnimi toni, ki so pri strunah in piščalih celoštevilski večkratniki osnovne frekvence (1, 2, 3, 4, ... oz. 1, 3, 5, ... pri piščalih, ki so na eni strani zaprte), take urejenosti in harmonije pri transverzalnem nihanju palic ni. Prav zato so alikvotni toni, ki bi zveneli, moteči, saj pomenijo tisto, kar imenujemo razglašenost. Pri zvončkih to težavo obidemo tako, da je ploščica podprta tam, kje sta vozla osnovnega lastnega nihanja. Taka podpora osnovnega lastnega nihanja ne moti, medtem ko znatno ovira naslednje alikvotne tone oz. višjeharmonska nihanja, katerih frekvence niso celoštevilski večkratniki osnovne frekvence, pač pa 2,76 kratnik, 5,40 kratnik ... Teoretična izpeljava teh frekvenc presega zahtevnost članka.

Na koncu pogledjmo, kako so zvončke uglasili. So tako zelo natančno odrezali ploščice? Ne, zadnje uglaševanje je skrito pod ploščico. Ko zvončke obrnemo, opazimo, da so v nekaterih ploščicah zvrtna vdolbine. Prav s temi vdolbinami je mogoče zelo na-

tančno popraviti frekvenco. V katero smer pa? Ali frekvenco zvišamo ali znižamo? Če po branju pričujočega članka odgovor ni povsem razkrit, preverite kar sami. Kovinsko ploščico, ki jo dobite kot ostanek v trgovini z barvnimi kovinami, najprej podprite na ustreznih mestih, posnemite zvok, izmerite frekvenco in nato še ploščico malo navrtajte. Če uho ne izve, pa CoolEdit pove, v katero smer se je spreminila frekvenca. Na delo!

Literatura

- [1] I. Verovnik in L. Mathelitsch, *Kaj slišiš, ko točiš vino v kozarec*, Fizika v šoli, 1998, 18–24.
- [2] I. Kukman, *Nihanje jezičkov*, Fizika v šoli, 2010, 9–15.
- [3] <https://ccrma.stanford.edu/CCRMA/Courses/152/percussion.html> (uporabljeno 12. 2. 2013).



SLIKA 6.

Preprost ksilofon. Le za izdelavo deščice h je bil uporabljen malo drugačen les.

SLIKA 7.

Zvrtna vdolbine, ki služijo za uglašitev zvončkov.

× × ×