

Jakov Labor

FIZIKA 3

UDŽBENIK ZA **TREĆI RAZRED SREDNJIH ŠKOLA**
S TROGODIŠNJIM PROGRAMOM FIZIKE



4. izdanje
Zagreb, 2024.

Nakladnik

Alfa d.d.

Zagreb, Nova Ves 23a

Za nakladnika

Ivan Petric

Urednik

dr. sc. Dragan Roša

Recenzenti

prof. dr. sc. Ivica Orlić

Stjepan Knežević, prof. savjetnik

Likovna urednica

Irena Lenard

Likovno i grafičko oblikovanje

Darija Vuković

Lektorica i korektorica

Kristina Ferenčina

© Alfa d.d. Zagreb, 2024.

Nijedan dio ove knjige ne smije se umnožavati,
fotokopirati ni na bilo koji način reproducirati
bez nakladnikova pismenog dopuštenja.

Udžbenik je uvršten u Katalog odobrenih udžbenika
rješenjem Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske:
KLASA: UP/I-602-09/14-01/00029
URBROJ: 533-26-14-0002, od 15. svibnja 2014.

CIP zapis dostupan u računalnome katalogu Nacionalne
i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001212565.

Tisak

Denona

Jakov Labor

FIZIKA 3

UDŽBENIK ZA **TREĆI RAZRED SREDNJIH ŠKOLA**
S TROGODIŠNJIM PROGRAMOM FIZIKE



4. izdanje
Zagreb, 2024.

Sadržaj

MEHANIČKO TITRANJE I VALOVI

Harmonijsko titranje	8
Matematičko njihalo	13
Prigušeno i prisilno titranje	16
Valno gibanje. Brzina vala	19
Valovi zvuka. Ultrazvuk	23
Refleksija valova. Stojni val	27

ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

Elektromagnetski titraji	32
Elektromagnetski val	36
Spektar elektromagnetskih valova	40

OPTIKA I OPTIČKI SUSTAVI

Širenje i odbijanje (refleksija) svjetlosti	46
<i>Fotometrija</i>	49
Sferna zrcala	52
Lom (refrakcija) svjetlosti	58
Leće	61
Disperzija svjetlosti	67
Optički sustavi	71
Interferencija svjetlosti	76
Ogib (difrakcija) svjetlosti	80
Polarizacija svjetlosti	84

ATOMI I KVANTI

Čestična svojstva elektromagnetskog zračenja	90
Valno-čestična svojstva elektromagnetskog zračenja i tvari	95
Thomsonov modela atoma	99
Rutherfordov i Bohrov model atoma	103
Kvantno-fizički model atoma	106
Primjena spoznaja o atomu	111
<i>Veze među atomima. Poluvodiči</i>	116

ATOMSKA JEZGRA

Struktura atomske jezgre	124
Radioaktivnost	127
Zakon radioaktivnog raspadanja	131
Energija vezanja jezgre. Fisija i fuzija	135
<i>Djelovanje ionizirajućeg zračenja na čovjeka</i>	140
Rješenja zadataka	142
Kazalo	144

Predgovor

Sukladno nastavnom programu fizike za srednje škole s trogodišnjim učenjem fizike, u ovom su udžbeniku obrađena sljedeća nastavna područja:

1. Mehaničko titranje i valovi
2. Elektromagnetsko zračenje
3. Optika i optički sustavi
4. Atomi i kvanti
5. Atomska jezgra

Pri **mehaničkom** se **titranju** tijelo giba po istoj putanji oko ravnotežnog položaja. Titranje je vrlo raširen oblik gibanja koji gotovo svakodnevno možemo uočiti (žica na gitari, satno njihalo), a karakterističan je i za svijet atoma i molekula. Širenjem raznih oblika poremećaja, uključujući i titranje, nastaje **val**. Valno gibanje jedan je od načina prenošenja energije. Proučavanje zvučnih pojava dovelo je do spoznaje da je zvuk vrsta vala.

Kod mehaničkog se titranja mijenja udaljenost tijela od ravnotežnog položaja. Slično se u elektromagnetskim sustavima mogu mijenjati električno i magnetsko polje. Tada govorimo o elektromagnetskom titranju. Prenosjenjem titranja električnog i magnetskog polja nastaje **elektromagnetski val**. Svjetlost je dio spektra elektromagnetskih valova.

Optika je grana fizike koja proučava svjetlost. Dijelimo je na fotometriju i na valnu i geometrijsku optiku. Fotometrija se bavi mjerenjem svjetlosnih veličina. Valna optika razmatra pojave svojstvene svjetlosti kao vala, a geometrijska opisuje širenje, odbijanje i lom svjetlosti, pri čemu valove svjetlosti prikazuje zrakama ne ulazeći u njihovu prirodu. Zakonima geometrijske optike može se rastumačiti rad različitih **optičkih sustava** (uređaja).

Neka opažanja u vezi s elektromagnetskim zračenjem (primjerice tamne i svijetle pruge u Youngovu pokusu) objašnjavamo pretpostavkom da je elektromagnetsko zračenje val. Međutim, opažaju se i pojave koje se ne mogu objasniti valnim svojstvima. Radi njihova tumačenja, elektromagnetsko zračenje zamišljamo kao roj čestica, tzv. **kvanata** energije.

Građu **atoma** ne možemo neposredno vidjeti. O izgledu i ustroju atoma zaključujemo na temelju promatranja i analiziranja različitih pojava. Zamišljen izgled i ustroj atoma nazivamo modelom atoma. Model je onoliko dobar koliko se dobro njime mogu objasniti rezultati pokusa. Kada to nije moguće, postojeći se model dopunjava ili zamjenjuje novim. Suvremena fizika atom opisuje tzv. kvantno-fizičkim modelom.

Gotovo sva masa atoma sadržana je u njegovoj (**atomskoj**) **jezgri**, koja zauzima vrlo mali dio atoma. Ona se sastoji od pozitivno nabijenih protona i električki neutralnih neutrona.

Nastavno je gradivo u udžbeniku raščlanjeno na nastavne jedinice i sažeto izloženo na učenicima pristupačan način. Prošireni i izborni sadržaji tiskani su *kosim slovima*.

Unutar nastavnih jedinica nalaze se i riješeni primjeri te pitanja i zadaci iz izloženoga gradiva. Zamišljeno je da učenicima posluže kao domaća zadaća koju nastavnik pregledava na početku nastavnog sata. Odgovarajući samostalno na ponuđena pitanja učenici mogu provjeriti koliko su obrađeno gradivo usvojili i razumjeli. Odgovori na pitanja nisu navedeni u udžbeniku, ali su sadržani u tekstu pa time potiču učenike na pažljivije čitanje udžbenika. Rjeđa su pitanja koja zahtijevaju malo više razinu znanja i u tekstu nemaju izravnog odgovora. Imaju li poteškoća s takvim pitanjima, učenici mogu zatražiti pomoć nastavnika.

Na kraju udžbenika nalaze se rješenja zadataka kako bi učenici mogli provjeriti ispravnost vlastitih rješenja.

Autor



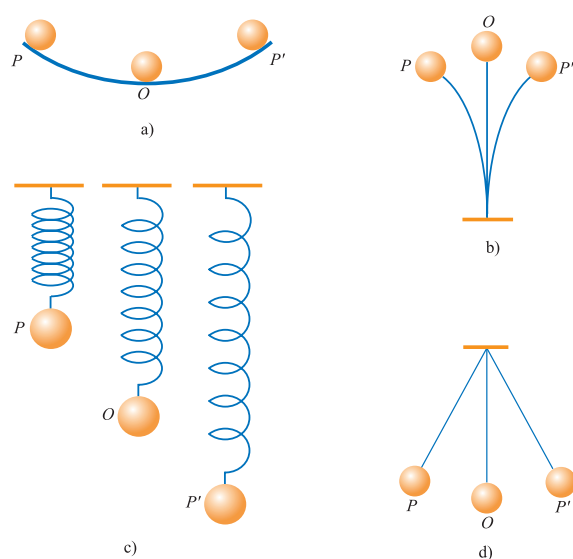
MEHANIČKO TITRANJE I VALOVI



Harmonijsko titranje	8
Matematičko njihalo	13
Prigušeno i prisilno titranje	16
Valno gibanje. Brzina vala	19
Valovi zvuka. Ultrazvuk	23
Refleksija valova. Stojni val	27

Harmonijsko titranje

Tijela se općenito gibaju na različite načine. Najčešće su to nejednolika gibanja koja je i najteže matematički opisati. Neka jednostavna gibanja, poput jednolikoga gibanja po pravcu ili jednoliko ubrzanoga gibanja, dobro su nam poznata iz ranije obrađenoga gradiva fizike. Sada ćemo razmotriti jednu posebnu vrstu gibanja koju često susrećemo u prirodi. Poslužit ćemo se s nekoliko primjera. Na slici 1.1.a prikazano je tijelo koje se giba ulegnućem. Tijelo na slici 1.1.b učvršćeno je za kraj elastične šipke, dok je tijelo na slici 1.1.c ovješeno o oprugu. Tijelo na slici 1.1.d niže se ovješeno o nit. Osobitost je svih ovih gibanja da se tijelo pušteno iz početnog položaja (P) giba ubrzano prema ravnotežnom položaju (O). Kada prođe ravnotežnim položajem, tijelo se giba usporeno, zaustavlja se u položaju P' , a zatim se preko ravnotežnog položaja vraća u početni. Istovjetno se gibanje potom ponavlja. Gibanje tijela po istoj putanji oko ravnotežnog položaja nazivamo **titranje** ili **osciliranje**. Dio gibanja koje se ponavlja nazivamo **titraj**, a vrijeme jednog titraja **period** (T) ili **titrajno vrijeme**. Tijelo koje titra zovemo **oscilator**.



Slika 1.1.
Primjeri titranja

Kvocijent broja titraja (N) i pripadnog vremena (t) naziva se **frekvencija** (f):

$$f = \frac{N}{t}.$$

Frekvencija je broj titraja u jedinici vremena (sekundi). Budući da je vrijeme jednog titraja T , za frekvenciju možemo pisati:

$$f = \frac{1}{T}.$$

Jedinica za frekvenciju je **herc** ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$).

Kruženje, kao periodično gibanje, opisivali smo kutnom brzinom (ω):

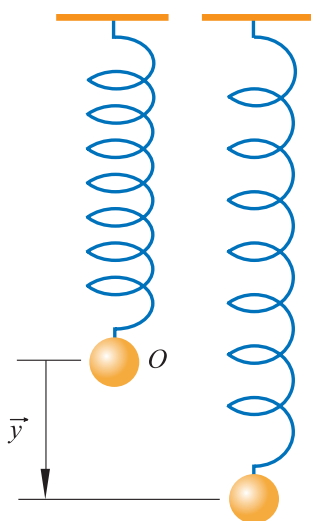
$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

odnosno:

$$\omega = 2\pi f.$$

Jednakim izrazima opisujemo i titranje, jer je i titranje periodično gibanje, samo ω ne zovemo kutnom brzinom nego **kružnom frekvencijom**. Titranje nije gibanje po kružnici, stoga nema smisla govoriti o kutnoj brzini.

Pri titranju se tijelo približava ravnotežnom položaju i udaljava od njega. Pomak tijela u nekom trenutku od ravnotežnog položaja nazivamo **elongacija**. Na slici 1.2. tijelo titra po osi y , pa smo elongaciju obilježili s $\vec{y}$. Pri titranju po osi x elongaciju bismo obilježili s $\vec{x}$. Elongacija je vektorska veličina usmjerena od ravnotežnog položaja prema trenutačnom položaju tijela. Najveću udaljenost tijela od ravnotežnog položaja nazivamo **amplituda** (y_0).



Slika 1.2.
Elongacija je pomak tijela od ravnotežnog položaja

Stanje titranja opisano je položajem (elongacijom) i brzinom tijela koje titra. Uobičajeno je za stanje titranja kazati **faza** titranja.

Izmjene energije pri titranju. Promatranjem titrajnih sustava prikazanih na slici 1.1. lako uočavamo da se u njima izmjenjuju kinetička (E_k) i potencijalna energija (gravitacijska, E_{gp} , i elastična, E_{ep}). Zbroj kinetičke i potencijalne energije sustava ne bi se mijenjao kada u njima uz mehaničku ne bi bilo drugih oblika energije:

$$E_k + E_{gp} + E_{ep} = konst.$$

Prisjetimo se izraza za te oblike energije.

Kinetička energija:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} ,$$

gdje je m masa tijela, a v njegova brzina.

Gravitacijska potencijalna energija:

$$E_{gp} = mgh ,$$

gdje je g akceleracija slobodnog pada, a h visina tijela iznad određenog položaja.

Elastična potencijalna energija:

$$E_{ep} = \frac{ky^2}{2} ,$$

gdje je k konstanta elastičnosti, a y produljenje, odnosno skraćenje elastične opruge ili sličnog elastičnog tijela.

Harmonijsko titranje. Dok titra, tijelo se prema ravnotežnom položaju giba ubrzano, a od ravnotežnog položaja usporeno. Prema tome, očigledno je da na tijelo pri titranju djeluje sila usmjerena prema ravnotežnom položaju. Ako je sila koja izaziva titranje u svakom trenutku razmjerna elongaciji:

$$\vec{F} = -k\vec{y} ,$$

titranje nazivamo **harmonijskim**, silu **harmonijskom silom**, a tijelo koje izvodi harmonijsko titranje **harmonijski oscilator**. Negativnim predznakom iskazujemo suprotnost smjerova sile i elongacije. Sila ima smjer prema ravnotežnom položaju, a elongacija od ravnotežnog položaja. Kada tijelo titra na elastičnoj opruzi, k je konstanta elastičnosti opruge.

Sila daje akceleraciju pa možemo pisati:

$$m\vec{a} = -k\vec{y}$$

odakle je akceleracija:

$$\vec{a} = -\frac{k}{m}\vec{y}.$$

Tijelo ovješeno o elastičnu oprugu (slika 1.1.c) titra pod utjecajem elastične sile i težine koje na tijelo djeluju u međusobno suprotnim smjerovima. U ravnotežnom su položaju te sile jednakih iznosa pa je njihova rezultanta jednaka nuli. Može se pokazati da je titranje utega ovješeno o elastičnu oprugu harmonijsko.

Period harmonijskog titranja. Očekujemo da period titranja utega ovješeno o elastičnu oprugu ovisi o amplitudi, o masi utega (m) i o elastičnosti opruge (k). Na koji način period ovisi o tim veličinama možemo utvrditi pokusom.

Pokus

Da bismo period titranja odredili što preciznije, mjerimo vrijeme za koje uteg učini više titraja (primjerice 20) i to vrijeme podijelimo brojem titraja.

U prvom dijelu pokusa određujemo period puštajući uteg iz različitih udaljenosti od ravnotežnog položaja. Uočavamo da period ne ovisi o amplitudi.

U drugom dijelu pokusa istražujemo ovisnost perioda titranja o masi utega. Pritom o oprugu vješamo utege različitih masa i za svaki slučaj određujemo period. Rezultati jednog takvog pokusa prikazani su u Tablici 1.1. Uočavamo da se period titranja udvostruči kada se masa utega poveća četiri puta. Iz toga zaključujemo da je period razmjernan kvadratnom korijenu iz mase:

$$T \sim \sqrt{m} .$$

Ostaje još da odredimo na koji način period ovisi o elastičnosti opruge. Za to su nam potrebne opruge različitih konstanti. Možemo ih dobiti serijskim spajanjem jednakih opruga. Spojimo li serijski dvije jednake opruge, ukupno će produljenje opruga biti dvostruko veće od produljenja samo jedne od njih pod utjecajem iste sile. To znači da je konstanta dviju serijski spojenih opruga, kao kvocijent sile i produljenja, upola manja od konstante jedne opruge. U Tablici 1.1 se nalaze periodi titranja istog utega na jednoj opruzi, dvjema i četirima serijski spojenim oprugama. Konstante su elastičnosti u tim slučajevima: k , $k/2$ i $k/4$. Vidljivo je da se period udvostruči kada se iznos konstante elastičnosti smanji na četvrtinu početne vrijednosti. Period je, dakle, obrnuto razmjern kvadratnom korijenu iz konstante elastičnosti:

$$T \sim \frac{1}{\sqrt{k}}.$$

Masa utega	T/s	Konstanta elastičnosti	T/s
m	0,83	k	0,83
$2m$	1,16	$k/2$	1,18
$3m$	1,43	$k/3$	1,45
$4m$	1,65	$k/4$	1,67

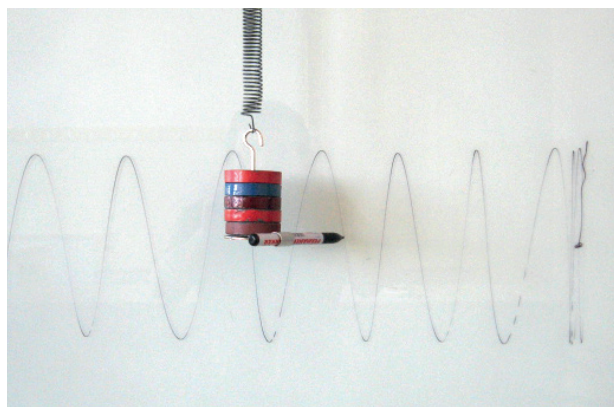
Tablica 1.1. Ovisnost perioda titranja o masi utega i elastičnosti opruge

Rezultati pokusa u skladu su s teorijom koja za period harmonijskog titranja daje:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Pokus

Za uteg ovješeno o oprugu učvrstimo flomaster. U neposrednu blizinu opruge postavimo vertikalnu staklenu ploču prema kojoj je flomaster položen ukoso i blago je pritišće. Ploča je s druge strane poprskana svjetlom bojom pomoću raspršivača. Dok uteg titra, flomaster ostavlja trag na staklenoj ploči. Ako ploču držimo nepomičnom, trag je ravna vertikalna crta čija je duljina jednaka dvostrukoj amplitudi titranja. Pomičemo li ploču jednoliko u horizontalnom smjeru, trag je oblika sinusoide (slika 1.3.). Tako dobiven graf prikazuje ovisnost elongacije o pomaku staklene ploče. Budući da je pomak ploče razmjern vremenu, graf zapravo prikazuje ovisnost elongacije o vremenu.



Slika 1.3.
Ovisnost elongacije
o vremenu

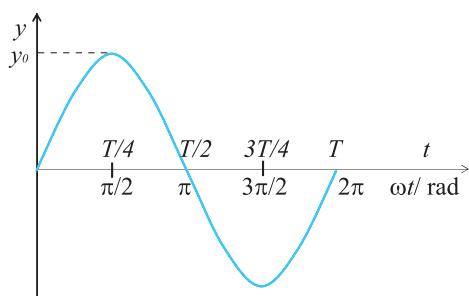
Krivulja prikazana na slici naziva se sinusoida. Ako tijelo u početnom trenutku prolazi ravnotežnim položajem, sinusoida izgleda kao na slici 1.4. Njezina je jednačina:

$$y = y_0 \sin \omega t.$$

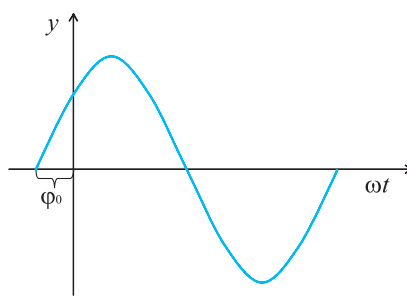
Pratimo li gibanje tijela od nekog drugog položaja, jednačina glasi:

$$y = y_0 \sin(\omega t + \varphi_0) ,$$

a graf izgleda kao na slici 1.5. Izraz u zagradi $(\omega t + \varphi_0)$ je **faza titranja** ili **fazni kut**, a φ_0 je **početni fazni kut**.



Slika 1.4.
Titranje bez početnog faznog kuta



Slika 1.5.
Titranje s početnim faznim kutom

Pitanja:

1. Koje titranje nazivamo harmonijskim?
2. Je li titranje kuglice na slici harmonijsko?



3. Uteg težak 2 N ovješeno o elastičnu oprugu titra periodom 0,5 s. Kolikom bi periodom titrao uteg težak 8 N ovješeno o istu oprugu?
4. Što bi se dogodilo s periodom titranja utega kada bismo uteg ovješeno o elastičnu oprugu sa Zemlje odnijeli na Mjesec?
 - a) Povećao bi se.
 - b) Smanjio bi se.
 - c) Ne bi se promijenio.
 - d) Mogao bi se povećati ili smanjiti, što ovisi o masi utega.
 - e) Mogao bi se povećati ili smanjiti, što ovisi o elastičnosti opruge.

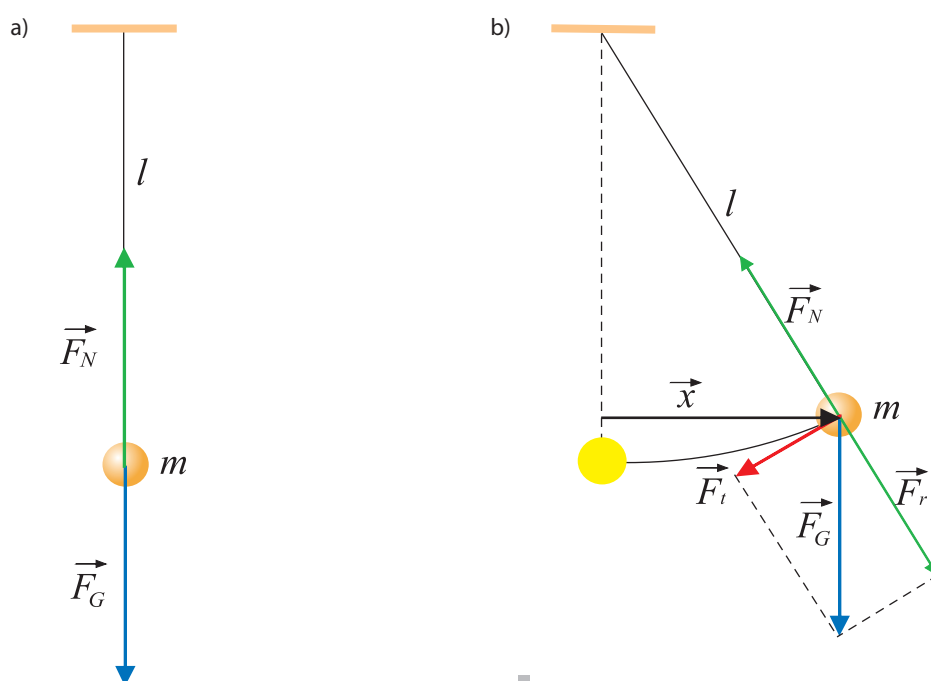
Zadaci:

1. Harmonijski oscilator učini 20 titraja za 10 s. Izračunajte period, frekvenciju i kružnu frekvenciju oscilatora.
2. Koliki put za 2 sekunde prijeđe čestica žice koja titra frekvencijom od 300 Hz i amplitudom od 1 mm?
3. Neka se opruga pod djelovanjem sile od 2 N produlji za 5 cm. Koliki bi bio period titranja utega mase 400 g ovješeno o istu oprugu?

Matematičko njihalo

Kuglicu ovješenu o nit koja se može njihati (titrati) nazivamo **jednostavno njihalo** (slika 1.6.a). Opis titranja kuglice možemo pojednostavniti ako kuglicu smatramo materijalnom točkom, a masu niti zanemarimo jer je mnogo manja od mase kuglice. Materijalnu točku ovješenu o nit bez mase nazivamo **matematičko njihalo**. Jednostavno se njihalo ponaša približno kao matematičko njihalo.

Na kuglicu njihala djeluju težina ($\vec{F}_G$) i napetost niti ($\vec{F}_N$). Položaj u kojemu se nalazi kuglica na slici 1.6.a ravnotežni je jer je rezultanta tih dviju sila jednaka nuli. Ako kuglicu odmaknemo od ravnotežnog položaja i pustimo, ona će se gibati po kružnom luku oko ravnotežnog položaja (slika 1.6.b). Gibanje kuglice oko ravnotežnog položaja jest titranje. Saznajmo o čemu ovisi period titranja.



Slika 1.6.
Mirovanje matematičkog njihala u ravnotežnom položaju (a)
i gibanje oko ravnotežnog položaja (b)

Kada kuglica nije u ravnotežnom položaju, težinu možemo rastaviti na dvije komponente, tangencijalnu (F_t) i radijalnu (F_r). Rezultanta napetosti niti i radijalne sile centripetalna je sila koja omogućuje kružno gibanje. Zbog tangencijalne komponente težine kuglica se giba ubrzano prema ravnotežnom položaju. Kada prođe ravnotežni položaj, kuglica se zbog te sile usporeno udaljava od ravnotežnog položaja. Tangencijalna je sila uzrok titranja.

Ograničit ćemo se na male amplitude titranja, odnosno na male kutove odklona niti od ravnotežnog položaja (do 10°). Uz taj uvjet kružni luk po kojem se kuglica giba možemo bez veće pogreške zamijeniti ravnom crtom. Tada za elongaciju (x) možemo uzeti duljinu polutetive (slika 1.6.b). Pravokutni trokut u kojem je tangencijalna sila (F_t) kateta, a težina (F_G) hipotenuza sličan je velikom pravokutnom trokutu u kojem je elongacija (x) kateta, a duljina niti (l) hipotenuza. Iz sličnosti tih trokuta i suprotnosti smjerova vektora $\vec{x}$ i $\vec{F}_t$ slijedi:

$$\frac{F_t}{F_G} = -\frac{x}{l},$$

odnosno:

$$F_t = -\frac{mg}{l}x,$$

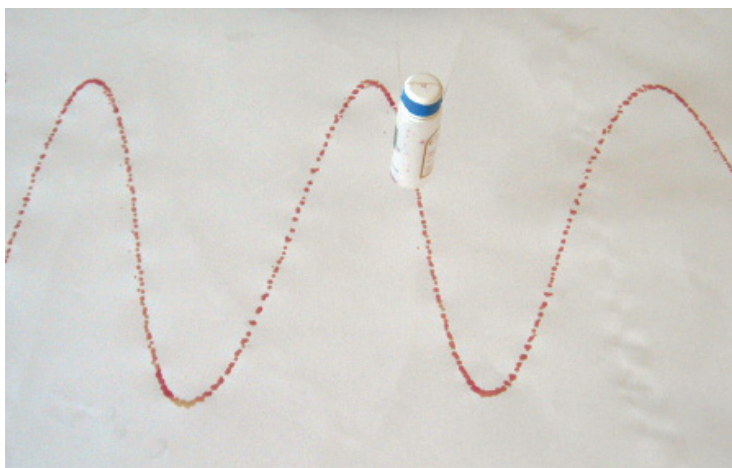
gdje je m masa kuglice. Kao što vidimo, sila koja vraća kuglicu prema ravnotežnom položaju je razmjerna elongaciji uz konstantu razmjernosti:

$$k = \frac{mg}{l}.$$

Titranje prouzročeno tom silom harmonijsko je titranje. Dakle, matematičko njihalo izvodi harmonijsko titranje kada titra malim amplitudama. To možemo provjeriti pokusom.

Pokus

Plastičnu bocu napunimo obojenom tekućinom i s grljom okrenutim prema dolje ovjesimo bifilarno o niti duljine nešto veće od **1 m** (slika 1.7.). Boca je zatvorena čepom koji na sredini ima mali otvor za istjecanje tekućine. Otvor je i na dnu (koje je okrenuto prema gore) kako bi tekućina mogla neprekidno istjecati kroz otvor na čepu. Na stolu ispod boce nalazi se malo tvrdi papir. Bocu zatitramo malom amplitudom i vučemo papir stalnom brzinom okomito na smjer titranja. Obojena tekućina na papiru ostavlja trag u obliku sinusoide, što znači da je titranje boce harmonijsko.



Slika 1.7.

Titranje jednostavnog njihala malom amplitudom harmonijsko je titranje

Uvrstimo li konstantu razmjernosti iz posljednjeg izraza u izraz za period harmonijskog titranja:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

dobit ćemo izraz za period jednostavnog (matematičkog) njihala:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Uočimo da period njihala ne ovisi o masi kuglice.

Pitanja:

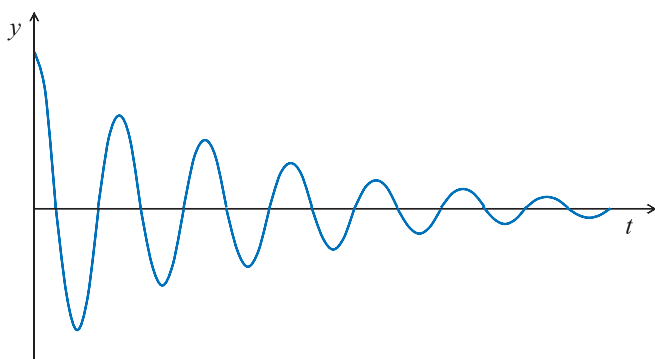
1. Kada jednostavno njihalo pomaknemo iz ravnotežnog položaja za 3° ono titra s periodom 2 s. Koliki će biti period istog njihala kada ga iz ravnotežnog položaja pomaknemo za 6° ?
 - a) 1 s
 - b) 2 s
 - c) 3 s
 - d) 4 s
2. Ako jednostavno njihalo duljine niti l titra periodom T , kolikim periodom titra njihalo duljine $4l$?
 - a) T
 - b) $2T$
 - c) $3T$
 - d) $4T$
3. Koji dio perioda protekne između dvaju uzastopnih prolazaka njihala ravnotežnim položajem?
4. Kuglice od aluminija i željeza ovješene su o niti jednakih duljina. Usporedite periode titranja kuglica malim amplitudama. Što bi se dogodilo s periodom svakog od njihala kada bismo ispod ravnotežnog položaja postavili magnet?
5. Jednostavno njihalo i uteg ovješeni o elastičnu oprugu titraju na Zemlji periodom T . Koliko bi iznosili periodi ovih titrajnih sustava na Mjesecu gdje je akceleracija slobodnog pada šest puta manja nego na Zemlji?
6. Kada bismo uru njihalicu prenijeli iz Hrvatske na Island, ura:
 - a) bi zaostajala.
 - b) bi brzala.
 - c) ne bi brzala ni zaostajala.
7. Ako je omjer perioda dvaju jednostavnih njihala 4:9, koliki je omjer njihovih duljina?
 - a) 2:3
 - b) 4:9
 - c) 16:81
 - d) 9:4
8. Ako jednostavno njihalo titra uz zanemarivo trenje i otpor zraka, graf koji prikazuje ovisnost mehaničke energije o vremenu ima oblik:
 - a) vodoravnog pravca.
 - b) pravca.
 - c) parabole.
9. Jednostavno njihalo titra u mirnom dizalu. Kada dizalo krene prema gore:
 - a) titranje će se njihala ubrzati.
 - b) titranje će se njihala usporiti.
 - c) njihalo će nastaviti titrati bez promjena.

Zadaci:

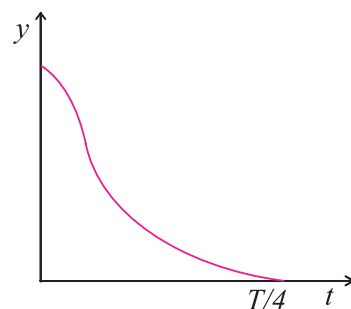
1. Polovinu titraja njihala nazivamo njihajem, a njihalo kojemu njihaj traje 1 s sekundnim njihalom. Kolika je duljina sekundnog njihala na mjestu gdje je akceleracija slobodnog pada $9,81 \text{ m s}^{-2}$?
2. Kolika je akceleracija slobodnog pada na mjestu gdje sekundno njihalo ima duljinu 99,103 cm?
2. Period nekog jednostavnog njihala na Zemlji iznosi 2,00 s, a na Marsu 3,25 s. Kolika je akceleracija slobodnog pada na Marsu? Za akceleraciju slobodnog pada na Zemlji uzmite $9,81 \text{ m s}^{-2}$.

Prigušeno i prisilno titranje

Prigušeno titranje. U dosadašnjem razmatranju titranja uzimali smo da titrajni sustav nema drugih oblika energije osim mehaničke, koja se pri titranju održava stalnom. U stvarnosti mehanička energija titrajnog sustava nije očuvana, nego se smanjuje prelazeći u druge oblike energije. To možemo vidjeti promatraju li titranje utega ovješena o elastičnu oprugu. Amplituda se utega smanjuje i titranje nakon nekog vremena prestaje. Titranje s opadajućom amplitudom nazivamo **prigušeno titranje** (slika 1.8.). Još jače gušenje opažamo pri titranju utega po horizontalnoj podlozi. Uzroci su gušenja trenje i otpor sredstva. Uz jače gušenje amplituda se brže smanjuje i titranje brže prestaje. Ako je gušenje dovoljno jako, tijelo se iz amplitudnog položaja polako vraća u ravnotežni i tu se zaustavi (slika 1.9.). To se gibanje ne ponavlja i prema tome nije periodično. Zovemo ga **aperiodično titranje**. Pri tzv. **kritičnom gušenju** tijelo za najkraće moguće vrijeme dolazi iz amplitudnog u ravnotežni položaj. Takvo gibanje izvodi amortizer na automobilu i kazaljke na različitim mjernim instrumentima.



Slika 1.8.
prigušeno titranje



Slika 1.9.
aperiodično titranje

Titrajno vrijeme i frekvenciju kojima titra titrajni sustav prepušten sam sebi nazivamo **vlastito titrajno vrijeme** (T_0) i **vlastita frekvencija** (f_0). Oni su općenito za harmonijski oscilator dani formulama:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}},$$

a za jednostavno njihalo:

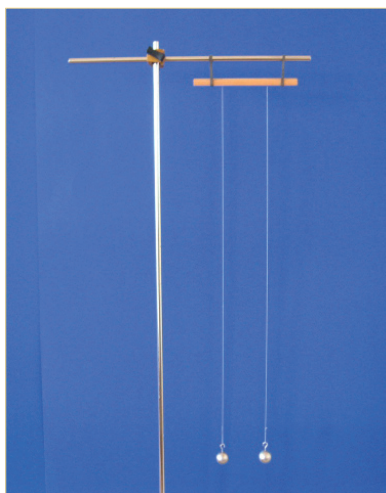
$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Prisilno titranje. Ako titrajni sustav titra pod utjecajem nekog vanjskog izvora titraja, njegovo titranje nazivamo **prisilnim**. U sljedećem je pokusu titrajni sustav koji prisilno titra njihalo, a vanjski je izvor titraja drugo njihalo.

Pokus

Na slici 1.10. prikazana su dva njihala ovješena o zajedničku nit. Nit je u gornjem dijelu provučena kroz letvicu, a letvica je gumenim vrpčama ovješena o nosač na stalku. Duljine se niti njihala mogu mijenjati. Povećavamo li duljinu niti jednom njihalu, drugom je istodobno smanjujemo. Ako zanjišemo jedno od njihala tako da ga izvedemo iz ravnotežnog položaja i pustimo, opažamo da i drugo njihalo počinje titrati. Mijenjamo li duljine niti njihala, opažamo da drugo njihalo postiže najveću amplitudu kada su duljine njihala jednake.

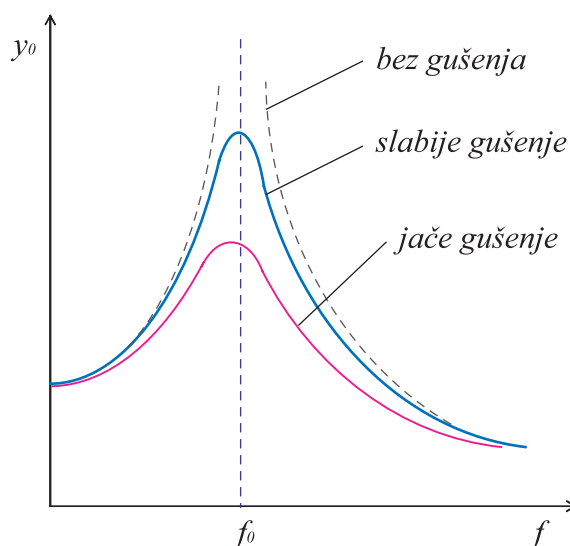
Pokus pokazuje da se energija titranja prenosi s jednog njihala na drugo. Pokazatelj je prenesene energije amplituda njihala koje prima energiju. Prijenos energije najbolji je kada su duljine njihala jednake. Tada je frekvencija njihala koje predaje energiju jednaka vlastitoj frekvenciji njihala koje prisilno titra. Pojavu da se energija titranja maksimalno prenosi sa sustava na sustav kada su frekvencije sustava jednake, nazivamo **rezonancija**. Sustav koji predaje energiju nazivamo **predajnik** ili **oscilator**, a sustav koji energiju prima **prijamnik** ili **rezonator**.



Slika 1.10.

Energija se s njihala na njihalo najbolje prenosi kada su duljine niti jednake, tada su i frekvencije njihala jednake

Ovisnost amplitude rezonatora o frekvenciji oscilatora prikazana je na slici 1.11. Kada je frekvencija oscilatora jednaka vlastitoj frekvenciji rezonatora (f_0), amplituda teži beskonačnosti ako nema gušenja (isprekidane crte). U realnim uvjetima najveća amplituda zbog gušenja ima konačnu vrijednost (pune crte). Pri jačem je gušenju maksimalna amplituda rezonatora manja (donja krivulja) nego pri slabijem (gornja krivulja). Zbog gušenja rezonancija nastupa pri frekvenciji koja je nešto manja od vlastite frekvencije rezonatora. Taj je pomak veći pri jačem gušenju.



Slika 1.11.

Zbog gušenja amplituda pri rezonanciji ima konačnu vrijednost, a rezonantna je frekvencija nešto manja od vlastite frekvencije rezonatora f_0

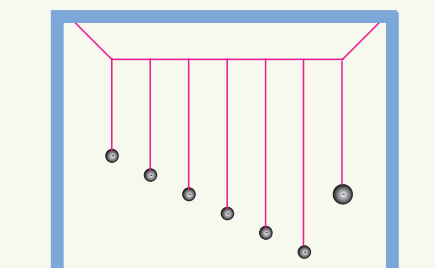
Rezonantnim prenošenjem energije prigušeno titranje sustava može se učiniti neprigušenim. Pri rezonanciji titrajni sustav nadoknađuje izgublenu mehaničku energiju primajući periodično novu iz

izvora kojemu je frekvencija jednaka vlastitoj frekvenciji sustava. Zato rezonancija ima važnu ulogu i u znanosti, i u tehnici, i u mnogim praktičnim područjima.

Rezonantni prijenos energije može imati i štetne posljedice. Primjerice, ako most prima energiju frekvencijom jednakom njegovoj vlastitoj frekvenciji, on titra sve većom amplitudom. Kada amplituda dovoljno naraste, most se može srušiti. Most može primati energiju od stroja vojnika koji stupaju prelazeći most, od tla koje podrhtava ili od vjetra.

Pitanja:

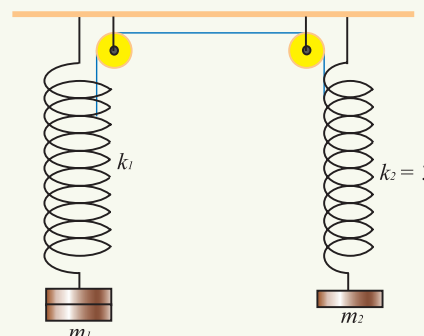
1. Kuglicu jednostavnog njihala, koje se nalazi u zraku, odmaknemo od ravnotežnog položaja i pustimo da titra. Koja se od navedenih veličina neće pri titranju mijenjati?
 - a) Mehanička energija.
 - b) Amplituda.
 - c) Elongacija.
 - d) Frekvencija.



2. Koje će od njihala prikazanih na slici titrati najvećom amplitudom nakon što zatitrano krajnje desno njihalo?

Zadaci:

1. Dvije opruge s ovješnim utezima međusobno su povezane pomoću niti (slika). Konstanta elastičnosti prve opruge iznosi 50 N m^{-1} , a masa utega koji o njoj visi 1 kg . Masa utega koji visi o drugoj opruzi može se mijenjati. Zatitrano li uteg na prvoj opruzi, opažamo da je amplituda titranja drugog utega najveća kada je njegova masa 50 g . Kolika je konstanta elastičnosti druge opruge?



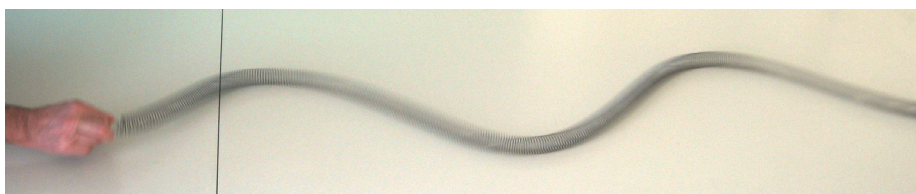
2. Dva njihala titraju periodima od 2 s i 3 s . Za koliko metara treba skratiti dulju nit da bi njihala bila u rezonanciji? Za akceleraciju slobodnog pada uzmite $9,81 \text{ m s}^{-2}$.

Valno gibanje. Brzina vala

Nastanak vala. Bacimo li kamen na mirnu površinu vode, opazit ćemo pojavu na površini vode koju nazivamo valom. On je nastao prenošenjem poremećaja izazvanog upadom kamena. Voda je sredstvo kojim se poremećaj prenosi. Općenito se prenošenje bilo kakvog poremećaja određenim sredstvom naziva **val**.

Valom se prenosi energija. Zamislimo komadić pluta na mirnoj površini vode. On nema kinetičku energiju. Uzburkamo li vodu na nekoj udaljenosti od pluta, česticama vode predat ćemo energiju. Nakon nekog vremena opazit ćemo da se komadić pluta giba tj. da ima kinetičku energiju. Ona je valom prenesena od naše ruke, preko vode do komadića pluta.

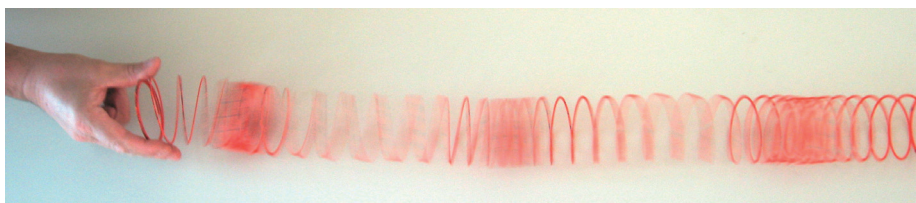
Harmonijski val. Širenje vala možemo promatrati na elastičnoj opruzi. Pobuđujemo li jedan kraj opruge na titranje okomito na njezinu duljinu, uzduž opruge će se gibati bregovi i dolovi (slika 1.12.). Ako krajem opruge izvodimo harmonijsko titranje, nastali val nazivamo **harmonijski**.



Slika 1.12.
Harmonijski val nastaje prenošenjem harmonijskog titranja

Transverzalni i longitudinalni valovi. Kada se pri širenju vala čestice sredstva gibaju okomito na smjer širenja vala, val nazivamo **transverzalnim** (slika 1.12.). On se može širiti samo kroz čvrsta tijela.

Čestice sredstva mogu se gibati usporedno s pravcem duž kojega se val širi. Takav val nazivamo **longitudinalnim**. Longitudinalni harmonijski val možemo promatrati na elastičnoj opruzi ako njezinim krajem izvodimo uzdužno harmonijsko titranje. Opažamo ga kao niz zgušnjjenja i razrjeđenja koja se uzduž opruge gibaju jedna za drugim (slika 1.13.).

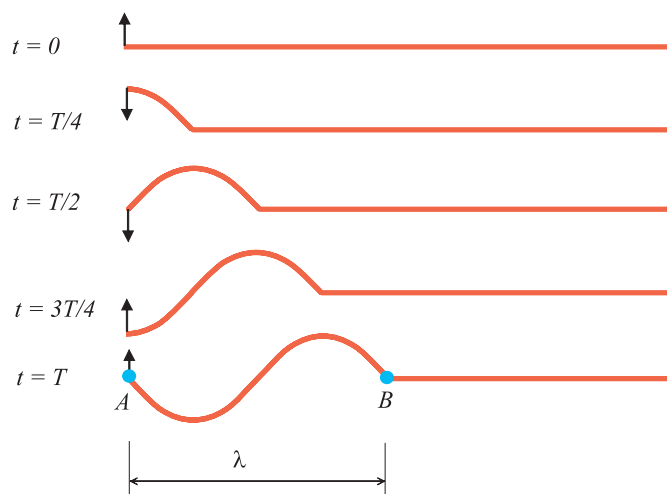


Slika 1.13.
Longitudinalni harmonijski val

Longitudinalni se val može širiti kroz čvrsta tijela, tekućine i plinove. Primjer longitudinalnog vala je zvuk.

Mehanički i elektromagnetski valovi. Valovima se prenosi energija. To može biti mehanička energija, ali i energija električnog i magnetskog polja. Prema tome razlikujemo **mehaničke** i **elektromagnetske** valove.

Valna duljina. Nastanak harmonijskog vala možemo pratiti motreći kako se mijenja izgled sredstva (na primjer gumene cijevi) dok njegov kraj titrajući harmonijski napravi jedan potpun titraj. Dio sredstva od kojega se titranje prenosi predstavlja **izvor vala**. Slika 1.14. prikazuje kako izgleda sredstvo prije nego što je izvor počeo titrati i nakon svake četvrtine titraja (perioda).



Slika 1.14.
Nastanak vala i valna duljina

Udaljenost na koju se val proširi za vrijeme jednoga titraja nazivamo **valna duljina** (λ). Kada bi čestica A, od koje se val širi, nastavila titrati, čestica B, koja je od čestice A udaljena za valnu duljinu, titrala bi s njom u fazi. Elongacije i brzine tih dviju čestica bile bi u svakom trenutku jednake. Daljnjim širenjem vala, u fazi s česticom A titrale bi i čestice koje su od nje udaljene dvije valne duljine, tri valne duljine, itd., općenito cijeli broj valnih duljina. Zato možemo reći da je valna duljina udaljenost između dviju najbližih čestica koje titraju u fazi.

Pri širenju vala mogu se uočiti i čestice koje titraju **protufazno**. Elongacije su i brzine dviju čestica koje titraju protufazno u svakom trenutku jednakih iznosa i suprotnih smjerova.

Brzina širenja vala. Širenje (napredovanje) transversalnog vala lako opažamo kao gibanje bregova i dolova, a širenje longitudinalnog vala kao gibanje zgušnjenja i razrjeđenja. Kolikom se brzinom šire bregovi i dolovi, odnosno zgušnjenja i razrjeđenja, tolika je brzina vala. Brijeg, dol, zgušnjenje i razrjeđenje samo su neke od faza (stanja) titranja. Mogli bismo pratiti gibanje bilo koje faze. **Brzina širenja vala** je brzina kojom se određena faza titranja prenosi od čestice do čestice sredstva. Budući da se za vrijeme jednog titraja (T) val proširi na udaljenost jednaku valnoj duljini (λ), brzina vala je:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Kako je recipročna vrijednost perioda jednaka frekvenciji ($\frac{1}{T} = f$), za brzinu vala još možemo pisati:

$$v = \lambda f$$

Brzina širenja transversalnog vala. Pri širenju transversalnog vala uzduž niti, djelići niti titraju oko ravnotežnih položaja. Razmislimo o čemu bi mogla ovisiti brzina širenja vala. Prije svega nit mora biti napeta. Zato očekujemo da je brzina vala veća pri većoj sili napetosti (F). Naime, pri većoj napetosti djelići niti brže se vraćaju u ravnotežni položaj, tj. titraju s kraćim periodom, a brzina je vala obrnuto razmjerna periodu ($v = \frac{\lambda}{T}$). Period titranja, a time i brzina širenja vala, ovisi i o gustoći niti (μ). Što je gustoća niti veća, djelići niti su tromiji i pri titranju se sporije vraćaju u ravnotežni položaj, što znači da je period titranja dulji, a brzina vala manja. Teorija za brzinu transversalnog vala daje:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$