

AKTIVNE I PASIVNE METODE SMANJIVANJA VIBRACIJA

ACTIVE AND PASSIVE METHODS FOR REDUCING VIBRATIONS

Pisačić K.¹

¹Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, Hrvatska

Sažetak: Ovaj članak opisuje metode koje se koriste za smanjivanje vibracija na strojevima i konstrukcijama. U uvodnom dijelu je opisan pojam vibracija kao te su navedeni neki uzroci pojave vibracija. U radu su navedene razne metode koje se koriste da bi se kontrolirala razina vibracija. Opisan je piezoelektrični efekt i mogućnosti korištenja piezomaterijala pri aktivnoj kontroli vibracija

Ključne riječi: vibracije, smanjenje vibracija, kontrola vibracija, uzroci vibracija

Abstract: This article describes methods used to reduce vibrations. The term vibration is described in the introduction along with some of the origins of vibrations. Various methods used to control the level of vibrations are described in the article. Piezoelectric effect is described together with the possibilities of using piezo materials for active vibration control.

Key words: vibrations, vibration reduction, vibration control, vibration origin

1. UVOD

Vibracije su mehaničke oscilacije sustava s malim amplitudama, dok su oscilacije općenito periodičko gibanje bilo koje amplitude [1]. Kod periodičkih gibanja u istim se vremenskim periodima ponavljaju isti ili vrlo slični pomaci mase koja se giba. Najčešće se pod pojmom vibracija misli na harmonijsko gibanje. Harmonijsko gibanje je gibanje kod kojega se položaj, brzina, a obično i ubrzanje neke mase mijenjaju po zakonu sinusoide ili kosinusoide [2]. Harmonijsko gibanje je najjednostavniji oblik vibracijskog gibanja. Proučavanje vibracija ima veliko značenje u strojarstvu, građevinarstvu, brodogradnji, gradnji zrakoplova i drugim granama tehnike. Grana mehanike koja se bavi proučavanjem vibracija se naziva teorija vibracija. Za neki sustav kaže se da je vibracijski ako se sastoji od mase koja vibrira i elastičnog elementa, u realnim sustavima su prisutni još i elementi kao što su prigušenje i poremećajna sila [2].

Vibracije se izučavaju jer one mogu uzrokovati:

- naprezanja u materijalu koja mogu izazvati lom
- tehnološke smetnje u radu stroja

- fiziološku i psihičku nelagodu kod radnika na stroju

Vibracije su obično štetna pojava, štetno djeluju na ljude. Pri dužem izlaganju vibracijama može doći do tzv. „vibracijske bolesti“ čiji su simptomi bolovi u mišićima i zglobovima, gubitak osjećaja boli i dodira na prstima ili pak atrofija mišića. U konstrukcijama vibracije uzrokuju poremećaje u radu i lomove te nepotrebno troše mehaničku energiju.

U početku industrijalizacije pogonski inženjeri su na temelju iskustva mogli odrediti stanje stroja dodiranjem ili slušanjem. Vremenom su se strojevi sve više upotrebljavali i problemi uzrokovani vibracijama postajali su sve veći. Postupno su se razvijale metode projektiranja strojeva kojima su se vibracije svodile na najmanju moguću mjeru. Istodobno su se razvijali i uređaji za mjerenje i analizu vibracija, a u novije vrijeme i za aktivnu kontrolu vibracija. U nastavku će se opisati osnovni pojmovi vezani za vibracije i buku kao jednu od negativnih popratnih pojava vezanih uz vibracije.

Ponekad su vibracije korisna pojava, jer se koriste prilikom nekih tehnoloških postupaka, npr. za popuštanje zaostalih naprezanja nakon lijevanja ili kod opreme kao što su vibracijska sita, vibracijski konvejeri, dozatori i slično.

2. KLASIČNE METODE SMANJENJA VIBRACIJA

Proučavanjem vibracija dolazi se do zaključka da se u većinu ljudskih aktivnosti uključuje neki pojavni oblik vibracija.

Postoje mnogi primjeri štetnih utjecaja vibracija: većina vozila ima vibracijskih problema zbog neuravnoteženosti motora, neuravnoteženost diesel motora može proizvesti potresne valove dovoljno jake da budu smetnja u urbanim zonama. Kotači lokomotiva se pri velikim brzinama zbog neuravnoteženosti mogu odvojiti više od centimetra od tračnica. U turbinama vibracije uzrokuju spektakularne mehaničke kvarove. Općenito, vibracije rezultiraju bržim trošenjem i kvarovima dijelova motora kao što su nosači i kotači, a također stvaraju i jaku buku. U današnje vrijeme provode se mnoga istraživanja s ciljem da se otklone vibracije koje nastaju u ležajevima motora.

Kad god se prirodna frekvencija vibracije motora ili strukture podudara s frekvencijom vanjskog poticaja, nastaje fenomen koji se zove rezonancija. Ona može

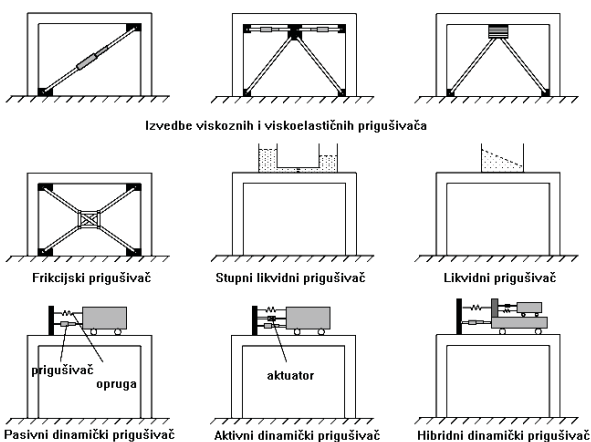
uzrokovati poremećaje u radu strojeva i lom konstrukcije. Zbog negativnog utjecaja kojeg vibracije imaju na strojeve i konstrukcije, testiranje i praćenje vibracija postalo je standardan postupak u dizajnu i razvoju većine inženjerskih sustava.

Usprkos svom štetnom djelovanju, vibracije se mogu uspješno primijeniti u nekim industrijskim granama. Primjena vibracijske opreme proteklih se godina znatno povećala. Na primjer, vibracije su iskorištene u vibracijskim pokretnim transporterima, sitima, u procesu kalupljenja, perilicama rublja, električnim četkicama za zube, zubarskim bušilicama, satovima, ultrazvučnim uređajima, električnim masažnim uređajima, spravama za fitness itd. Vibracije se koriste za simulacije potresa radi geoloških istraživanja i pri istraživanjima dizajna nuklearnih reaktora.

Zbog mnogih izrazito negativnih utjecaja vibracija na konstrukcije i ljudski organizam teži se smanjivanju (redukciji) vibracija. Veličina izmjerenih amplituda i pripadne frekvencije pokazat će na temelju propisa jesu li vibracije u dopuštenim granicama izdržljivosti materijala, uvjeta funkcioniranja stroja te udobnosti i zdravlja radnika koji su pod djelovanjem vibracija [1]. Ako su vibracije iznad dozvoljenih granica, nastoje se smanjiti amplitude vibracija. Da bi se postiglo smanjenje potrebno je promijeniti parametre kojima su određene vibracije (masa, krutost i prigušenje) i koji određuju vlastita vibracijska svojstva objekta [1].

Postoje različite metode smanjenja vibracija:

- izbjegavanjem rezonancije vlastitih vibracija objekta i vibracija uzbuđe promjenom krutosti ili mase odnosno vlastite frekvencije objekta ili promjenom frekvencije uzbuđe,
- ugradnjom dinamičkih, hidrauličkih ili tarnih prigušivača, smanjivanjem intenziteta uzbuđe promjenom izvora uzbuđe,
- ugradnjom dinamičkih kompenzatora, koji rade na načelu uzbuđivača, ali s razlikom da oni djeluju protufazno, tj. poništavaju ili smanjuju uzbuđu,
- korištenjem posebnih izolatora, materijala koji upijaju vibracije i time sprječavaju njihovo prenošenje.



Slika 1. Razne izvedbe prigušivača

Dinamički prigušivač je uređaj koji se sastoji od vibrirajuće mase koja vibrira jednakom frekvencijom kao i glavna konstrukcija, ali protufazno. Pasivni dinamički prigušivač ili kompenzator sastoji se mase povezane s

konstrukcijom preko opružnog i prigušnog elementa. Princip rada pasivnog dinamičkog prigušivača odlično je ilustriran na primjeru dinamičkog prigušivača Renault-ovog bolida na slici 2. Dinamički prigušivač reducira vibracije bolida i stabilizira njegov prednji dio, osobito kada automobil prelazi preko ivičnjaka, a najizraženije je djelovanje prigušivača u zavojima.



Slika 2. Pasivni dinamički prigušivač na Renault-ovom bolidu [3]

Aktivni dinamički prigušivač, osim prigušne mase sadrži također kontrolni i uzbuđni sustav. Kontrolno računalo analizira izlazne signale mjernih instrumenata na glavnoj konstrukciji te ovisno o podacima uzbuđni sustav izaziva vibracije i djeluje protufazno na glavnu konstrukciju.

Hibridni dinamički prigušivač ponaša se kao pasivni dinamički prigušivač u normalnim uvjetima, a u slučaju jakog vjetra ili pojačane aktivnosti konstrukcije djeluje kao aktivni dinamički prigušivač, ovisno o njegovim karakteristikama.

Likvidni prigušivač sastoji se od spremnika koji je djelomično napunjen tekućinom. Kada se montira na konstrukciju koja je podložena vibracijama, valno kretanje tekućine uzrokuje disipaciju energije. Prigušivanje vibracija se postiže zbog viskoznosti tekućina.

Stupni likvidni prigušivač sastoji se od U-cijevi koja je djelomično napunjena tekućinom. Kada se pričvrsti na konstrukciju podloženu vibracijama izazvanim vjetrom, dio mehaničke energije vjetra se apsorbira kinetičku energiju oscilirajućeg stupca tekućine. Period vibracija stupca tekućine prilagođen je periodu vibriranja konstrukcije da bi se dobila optimalna redukcija.

Na slici 3. prikazan je pasivni dinamički prigušivač ugrađen u toranj Taipei 101 ima funkciju obrane tornja od orkanskih vjetrova i potresa. Prigušivač mase 730 tona bio je pretežak da bi se kranom podigao na vrh zgrade pa su ga radnici sastavljali na licu mjesta. Prigušivač drže četiri sajle koje se sastoje od po osam čeličnih kablova.



Slika 3. Pasivni dinamički prigušivač na neboderu Taipei 101 (kugla teška 730 tona) [4]

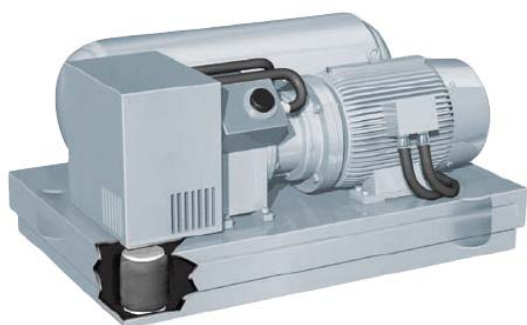
Osim sustava prigušivača ugrađuju se i jednostavnije varijante u vidu komponenti kao što su:

- opruge
- pneumatski prigušivači
- hidraulički prigušivači
- zračne opruge
- razni polimerni elementi

Elastični gumeni ili čelični izolatori ugrađuju se da bismo smanjili utjecaj konstrukcije na okoliš. Dakle oni ne služe da bismo reducirali vibracije nego da bismo spriječili da se vibracije sa stroja prenose na okolinu. Jednako tako elastični elementi (slike 4. i 5.) mogu služiti da bismo izolirali neki objekt od vibrirajuće okoline, ali je taj zadatak puno teži i postižu se slabiji rezultati.



Slika 4. Razni prigušni elementi koji se ugrađuju na strojeve ili u podnožje strojeva [5]



Slik 5. prigušenje nosača motora zračnom oprugom

Elementi kojima se prigušuju vibracije koriste se i na građevinskim konstrukcijama (slike 6. i 7.)

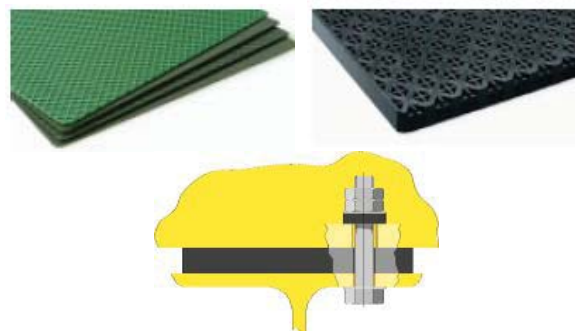


Slika 6. Opruga kao prigušni element



Slika 7. Prigušenje dimnjaka pomoću opruga

Osim raznih izvedbi prigušivača, u strojogradnji i građevini za reduciranje vibracije koriste se razni izolacijski materijali, kao što su polimerni materijali, gumeni, metalne pjene, silikonski gelovi i slično (slike 8. i 9.).

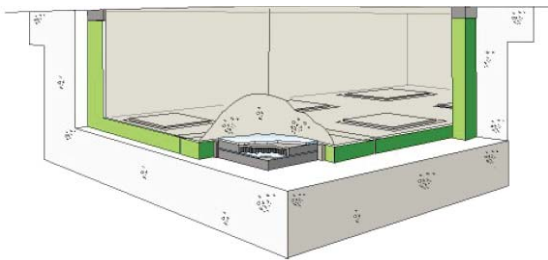


Slika 8. Izolacijske folije i sendvič izolacije [6]

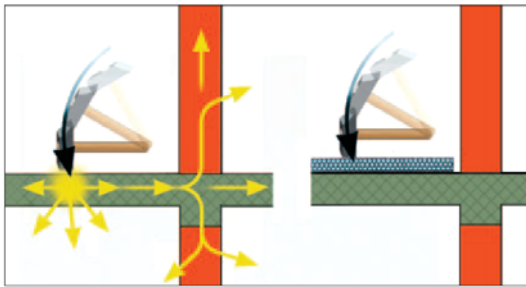


Slika 9. Izolacija temelja [7]

Takvi materijali se u obliku folija instaliraju da bi spriječili širenje vibracija ili zvuka (slike 10. i 11.).



Slika 10. Izolacija temelja [6]

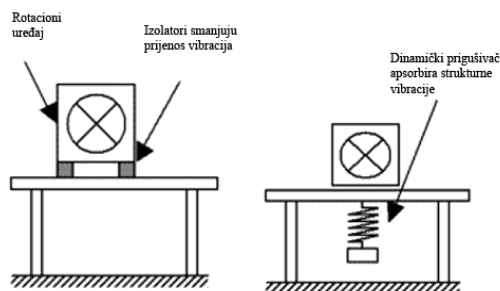


Slika 11. Zaštita od buke i vibracija izolacijskim folijama

Korištenjem ovakvih materijala moguće je postići znatne rezultate u zaustavljanju širenja vibracija, ali nije moguće postići kontrolu vibracija na njihovom izvoru.

Kako je već navedeno klasični prigušivači rade na principu pasivnog prigušenja. Prilagođeni su za samo jednu vrstu uređaja na koje se ugrađuju i često su velikih dimenzija. Pasivni prigušivači ne reagiraju na promjenu uzbude i ne mogu se prilagoditi drugačijim uvjetima vibriranja.

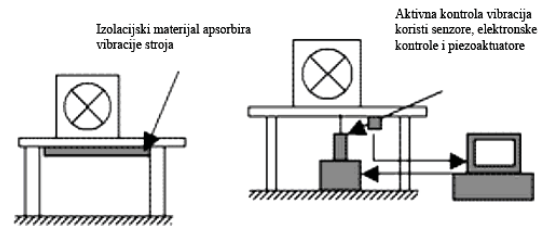
Slika 12. prikazuje najčešće korištene metode pasivne kontrole vibracija, a to su izolatori (gume ili opruge) koji apsorbiraju mehaničku energiju i dinamički prigušivači.



Slika 12. Pasivna kontrola vibracija

Da bismo spriječili širenje vibracija najčešće se koriste prigušni materijale (slika 13.) jer su najpristupačniji i najjeftiniji dok je aktivna metoda kontrole vibracija ujedno i najskuplja.

U usporedbi s pasivnom kontrolom vibracija, aktivna metoda redukcije vibracija je puno naprednija. Aktivna kontrola vibracija omogućuje da se prigušivač prilagodi iznosu uzbude. Pomoću senzora očitavaju se vrijednosti frekvencija. Upravljačka jedinica analizira podatke dobivene sa senzora i šalje signal kojim se pokreće prigušivač. Pravilnim projektiranjem upravljačkog sustava može se postići da se ovakav sustav kontrole vibracija napaja crpeći većim dijelom energiju pretvorenu iz mehaničke energije pobude, a manjim dijelom vanjskim napajanjem.



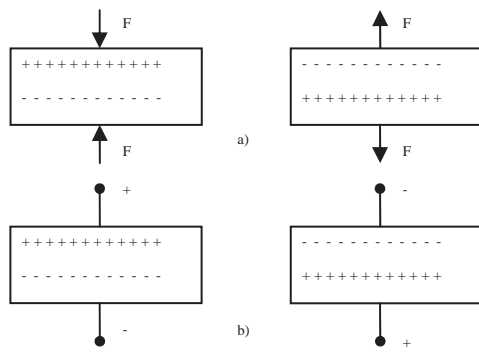
Slika 13. Korištenje apsorpcionih materijala i aktivna kontrola vibracija

3. KONTROLA VIBRACIJA POMOĆU PIEZOELEMENATA

3.1 Piezoelektrični efekt

Da bismo mogli razumjeti princip na kojem se zasniva ova metoda potrebno je prvo reći nešto o osnovama piezomaterijala i piezoelektričnom efektu.

Piezoelektrični efekt (grč. piezo - gurati) se objašnjava kao pojava kada pri elastičnoj deformaciji nekih kristalnih dielektrika, kristali postaju električki polarizirani (slika 14.). Takve kristalne tvari se nazivaju piezoelektričnim kristalima ili piezoelektricima. Prema tome piezoelektrik je svaki materijal koji pokazuje konverziju između mehaničke i električne energije. Za piezoelektrični kristal vrijedi, ako ulažemo mehanički rad na dvije suprotne plohe, električni napon se javlja na nekom drugom paru ploha (slika 14.). Najveća polarizacija nastaje kada je naprezanje takvog dielektrika na pravcu, tzv. piezoelektričnoj osi kristala. Ako se kristalna pločica odrezana na odgovarajući način pritišće silom F , tada se na jednoj strani površine pločice pojavi polarizirani pozitivni naboj, a na drugoj negativni naboj. Ako deformacija promjeni smjer, tada se promjeni i polaritet polarizacije [8]. Nadalje, ako se pločice piezoelektričnog kristala priključe na napon, pod utjecajem električnog polja nastaje polarizacija dipola, koji se orijentiraju u smjeru polja. Električno polje u kristalu uzrokuje mehaničko naprezanje (slika 15.). Nastali efekt naziva se inverzni piezoelektrični efekt.

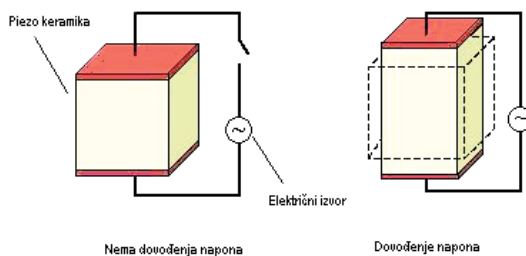


Slika 14. Piezoelektrični efekt: a) pomoću sile F ; b) inverzni piezoelektrični efekt pomoću napona [8]

Prve pretpostavke o postojanju takve pojave postavio je Coulomb (1815.), pretpostavivši da je moguće proizvesti elektricitet deformacijom čvrstog tijela. Becquerel je 1820.g. predložio pokuse sa kristalima minerala u tom smislu. Te pokuse su 1880.g. izveli braća Pierre i Jacques Curie u svojoj 21., odnosno 24. godini, postavši pronalazačima piezoelektričnog efekta. Otkrili su da kada se tlače kristali topaza, kvarca, Rochelle soli i šećera od šećerne trske, dobiva se električni napon koji je proporcionalan uloženoj mehaničkoj pobudi.

Naime, još prije njihovog pronalaska bilo je poznato svojstvo pojave električnih polova različitih predznaka na suprotnim krajevima kristala kada bi kristali bili izloženi promjeni temperature, ta pojava naziva se piroelektricitet (grč. pyr - vatra). Pierre i Jacques Curie uspjeli su postići isto ponašanje primjenjujući silu na kristal u određenim smjerovima.

Naziv piezoelektricitet predložen je 1881.g. (Hankel), a iste godine postavljena je pretpostavka o postojanju suprotnog ponašanja - mehaničke deformacije kristala ako mu se na suprotne krajeve dovedu raznoimenu električni naboji. Tu pretpostavku su 1881.g. potvrdili istraživači efekta, Pierre i Jacques Curie. Kasnije se pokazalo da je reverzibilnost ove pojave posljedica simetrija u kristalima. Znanost i tehnologija dobili su jednostavan, izravan i izvanredno precizan način pretvorbe mehaničke u električnu energiju i obratno.



Slika 15. Piezoelektrični efekt

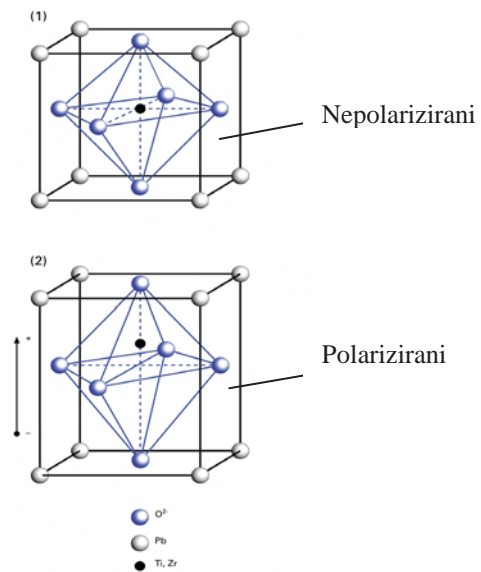
Teorijsku osnovu za razumijevanje piezoelektričnog efekta postavio je Kelvin (1893.), a tenzorske jednadžbe koje opisuju (linearnu) vezu između deformacije i električnog polja kod piezoelektričnih kristala dao je Voight 1894.

Do prvih praktičnih primjena piezoelektričnog efekta došlo je za vrijeme I. svjetskog rata, kada su proizvedeni prvi sonarni uređaji za otkrivanje podmornica. Sljedećih

godina otkriveni su novi piezoelektrični materijali, i unapređivano je teorijsko razumijevanje pojave. Danas je pažnja usmjerena na nove tehnološke primjene i otkrivanje novih piezoelektričnih materijala (posebno korisnima su se pokazale piezoelektrične keramike i sintetski polimeri). Ovim otkrićima otvorena su vrata velikom napretku u razumijevanju fizike čvrstog stanja, a njihove tehnološke primjene i civilizacijska važnost su goleme.

Zbog opisanih svojstava piezoelekt se koristi u radijskoj tehnici te se piezoelektrični materijali u velikoj mjeri koriste za izradu senzora i imaju široku primjenu u današnjoj tehnologiji. Najvažnija svojstva piezoelektrika su mogućnost vrlo brze i učinkovite pretvorbe mehaničkih deformacija u električne impulse i obrnuto.

Za potrebe pretvorbe električnih impulsa u mehaničke pomake i obrnuto najprikladniji materijali su piezoelektrične keramike, poput PZT-a (slika 16.), i polimerni piezoelektrici. Piezoelektrična svojstva se često kombiniraju sa nekim drugim fizikalnim svojstvima materijala, da bi se dobili materijali novih svojstava. Jedan od najpoznatijih, najšire korištenih i prvih otkrivenih piezoelektrika je kristal kvarca. Ostali piezo materijali: BaTiO₃, KNbO₃, Ba₂Nb₅O₁₅, LiNbO₃, SrTiO₃, Pb(ZrTi)O₃, Pb₂KNb₅O₁₅, LiTaO₃, BiFeO₃, Na_xWO₃.



Slika 16. Struktura PZT keramike [9]

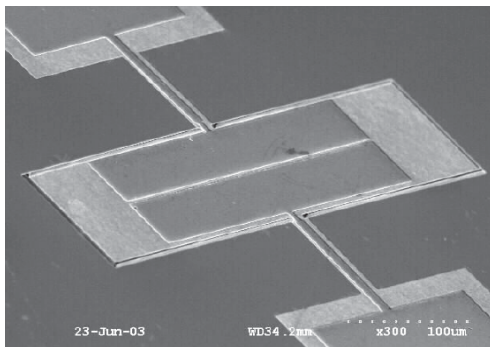
Piezoelektrični efekt općenito ovisi o temperaturi. Tako pri temperaturama ispod 50K obični materijali gube velik dio svoje piezoelektričnosti. No, otkriveni su i materijali koji imaju obrnuto svojstvo - jače izražen efekt pri vrlo niskim temperaturama, što pokazuje da se piezoelektrični efekt može koristiti i pri niskim temperaturama, što je važno za niskotemperaturnu fiziku.

Elektromehanički pretvornici pretvaraju električnu energiju u mehaničku i obrnuto. Koriste se pasivno i aktivno. Pasivno se izravno piezoelektrična svojstva koriste da bi se proizveo napon iz vanjskog naprezanja. Ovaj način uključuje hidrofone, podvodne prislušne naprave, mikrofone, fonograme, mjerne trake dinamičkog naprezanja, senzore vibracija i dr. U aktivnom modu se koriste za slanje akustičkih signala u

medij. To uključuje nerazarajuće procjene, pronalazače ribe/dubine, tintne štampače, mikropozicijske naprave, mikropumpe, ultrazvuk u medicini.

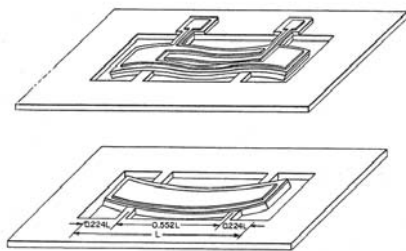
Najpoznatiji primjeri uporabe piezoelektrika u svakodnevnom životu su npr. "kvarcni" ručni satovi, koji koriste precizno oblikovan kristal kvarca (poznati piezoelektrik) kao izvor oscilacija precizno određene i konstantne frekvencije. Takvi oscilatori koriste se i u svakom elektroničkom računalu kao generatori takta za procesor, sabirnicu itd. Piezoelektrični oscilatori nalaze se i u dojavljivačima i mobilnim telefonima, i odgovorni su za precizan odabir radio frekvencije na kojima uređaji rade. Naime, svaki piezoelektrični kristal posjeduje vlastitu rezonantnu frekvenciju (ili više njih), koje ovise o obliku i veličini kristala, kao i o materijalu od kojega je kristal izrađen.

U nastavku članka razmatrat će se metoda kontrole, odnosno smanjenja vibracija pomoću piezoelemenata, odnosno elektronskih elemenata izrađenih iz piezoelektričnih materijala. Piezoelementi (slika 17.) rade na principu piezoelektričnog efekta i koriste se jer su sposobni vršiti pretvorbu energije.



Slika 17. Primjer izvedbe piezoelementa [10]

Piezomaterijali pretvaraju mehaničku energiju u električnu i obrnuto (slika 18.), stoga svojstva piezoelemenata omogućuju korištenje piezoelementa za mjerenje, ali i pobuđivanje vibracija.

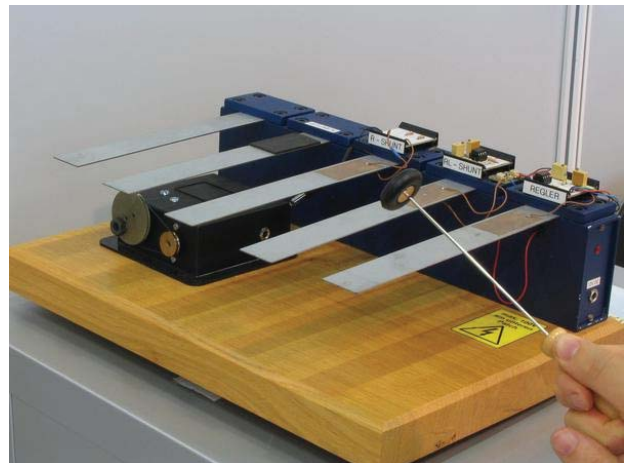


Slika 18. Deformacija piezoelemenata dovođenjem električne energije [10]

3.2. Primjena piezoelektričnog efekta u aktivnoj kontroli vibracija

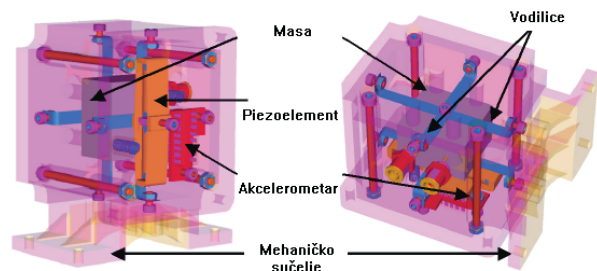
Postoje razni primjeri praktične primjene piezoelemenata u prigušivanju vibracija. Proučavajući trenutno jedan od najpristupačnijih izvora informacija, internet, može se naći veliki broj primjera kako eksperimentalnih tako i komercijalnih izvedbi piezoelektričnih prigušivača.

Primjerice prema [11], pokazana je usporedba učinkovitosti prigušivanja pričvršćivanjem piezoelemenata i pričvršćivanjem gume na trake lima.



Slika 19. Usporedni test prigušivača [11]

Pokus se provodio da se gumenim batom udari po slobodnom kraju limene trake (slika 19.). Nakon što su na taj način pobuđene vibracije promatrani su efekti. Pokazalo se da je trakica na kojoj je piezoelement gotovo odmah prestala vibrirati, dok je ona sa nalijepljenom gumom vibrirala još neko vrijeme.



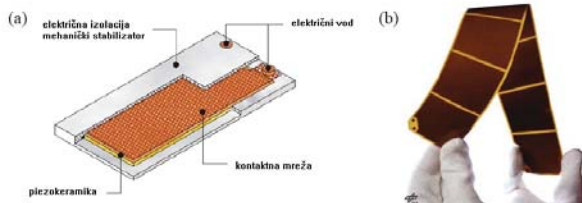
Slika 20. PM900M Izvedba dinamičkog prigušivača kontroliranog piezoelementima [12]

Slika 20. pokazuje jednu varijantu upotrebe piezoelemenata u kojoj oni služe da bi kontrolirali prigušnu masu dinamičkog prigušivača. Ovakav dinamički prigušivač radi na vrlo sličnom principu klasičnog prigušivača, ali je prednost ovog prigušivača što je vrlo malih dimenzija i može se softverski kontrolirati. Akcelerometrom se očitavaju vrijednosti vibracija, signal dolazi do upravljačke jedinica. Upravljačka jedinica analizira signal i ovisno o stanju uključuje napon na piezoelement, koji pobuđuje vibracije mase koja služi kao dinamički prigušivač.

Prema istraživanju jednog njemačkog instituta, objavljenog na internetu pokazani su praktični primjeri, prednosti i mogućnosti korištenja piezoelemenata za redukciju vibracija.

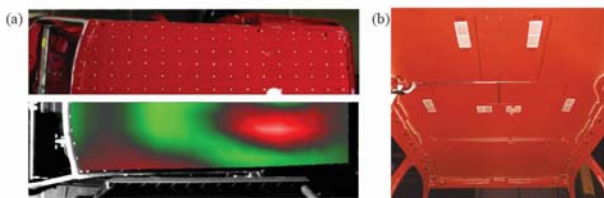
Komercijalna upotreba piezomaterijala otežana je zbog specifičnih svojstava ovih materijala. Na slici 21 a) pokazan je primjer sendvič izvedbe, gdje je piezokeramika smještena između tankih slojeva izolatora i kontaktne mreže vodova električne energije. Na ovaj

način moguće je proizvesti dijelove raznih oblika inteligentne strukture, kao što je prikazano na 22 b).



Slika 22. Izolirani uzorak i posebno oblikovani piezoelement [13]

Automobilska industrija još je jedan od primjera gdje se mogu koristiti piezoelementi za kontrolu vibracija i buke (slika 23). Krov automobila jedan je od glavnih izvora buke.



Slika 23. Redukcija buke karoserije automobila [13]

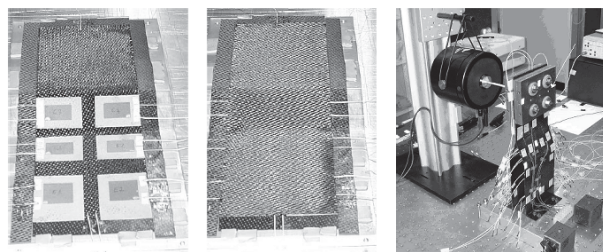
Vibracije uzrokovane radom motora prenose se na ostatak konstrukcije. Ako vibracije uzrokovane radom motora dođu u rezonanciju s prirodnom frekvencijom metalne konstrukcije krova, dolazi do jake buke [13]. Ovakve pojave mogu se izbjeći ugradnjom prigušivača. Zbog činjenice da pasivne prigušivače nije moguće kontrolirati težilo se novim načinima reduciranja vibracija. Ideja je u postavljanju „anti-oscilatora“ koji bi doprinijeli smanjenju vibracija konstrukcije krova i time reducirali buku u unutrašnjosti automobila [13]. Pokusi su izvođeni na automobilu Volkswagen Golf 3. Na krov su pričvršćeni piezoelementi koji su korišteni i kao senzori i kao aktuatori. Prvo su određene prirodne frekvencije krova, a zatim optimalni raspored piezoelemenata i došlo se do zaključka da je moguće postići znatne rezultate u smanjenju vibracija krova, a time i smanjenja buke u unutrašnjosti automobila. Postoje također primjeri primjene piezoelemenata na drugim dijelovima automobila: upravljaču, ispusnom sustavu, osovina i drugim dijelovima koji su izvori buke i vibracija u automobilu.

Osim u autoindustriji, proizvodnji strojeva, primjena piezoelemenata pri aktivnoj kontroli vibracija moguća je i u avioindustriji. Prema [13] primjenom piezoelektričnih materijala izumljena su „pametna krila“. Primjenom integriranih piezoelektričnih aktuatora moguće je smanjiti buku i vibracije propelera helikoptera bez znatnih promjena dizajna lopatica (slika 24). Zbog male specifične mase ugradnja slojeva piezomaterijala ne utječe puno na konstrukciju lopatica.



Slika 24. Princip integriranih piezoelektričnih aktuatora [13]

Piezoelektrični materijali koriste se i za potrebe svemirskih istraživanja, slika 25. prikazuje primjenu piezoelemenata na svemirskim letjelicama.



Slika 25. Primjena piezoelemenata za potrebe svemirske tehnologije [14]

4. ZAKLJUČAK

Razni su primjeri primjene piezoelemenata mogući u redukciji vibracija lakih konstrukcija, digitalnih uređaja, automobilskih dijelova, ali je još uvijek upitna njihova cijena i proizvodi na koje se ugrađuju ovakvi sustavi kontrole vibracija još uvijek nisu zastupljeni u masovnoj proizvodnji prvenstveno zbog njihove cijene. Uz navedene primjere može se vidjeti da je kontrola vibracija pomoću piezoelemenata praktično moguća te da su široka područja njene primjene. Rad mnogih stručnjaka na ovom polju trebao bi dovesti do masovne primjene piezomaterijala te stvaranja inteligentnih struktura dostupnih potrošačima.

5. LITERATURA

- [1] Vibracije//Tehnička enciklopedija. Zagreb:Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Sv. 13. 1997. Str 462-467.
- [2] Matejiček, Franjo: Kinetika sa zbirkom zadataka. Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, 2006. Str. 167-192.
- [8] Renault Mass Damper Explained! <http://ecsurf.com/renault-mass-damper.html>. (15.8.2007.)
- [4] Eddy, Nathan: Taipei 101's 730-Ton Tuned Mass Damper. May 2005. <http://www.popularmechanics.com/technology/industry/1612252.html>. (16.08.2007)

- [5] GELTEC Catalog, 2005.
<http://www.geltec.co.jp/english/catalog/index.htm>
(15.8.2007.)
- [6] Farrat Isolevel Ltd. <http://www.farrat.com/products/>
(16.8.2007.)
- [7] Graunke, K.: Maschinenschwingungen gezielt bekämpfen. 05.01.2006.
http://www.airloc.com/pdf/Machine_vibrations_english.pdf . (16.08.2007.)
- [8] Kuzmanović, Branislav: Osnove elektrotehnike I. Zagreb: Element, 2000. Str. 111-112.
- [9] Kistler Instrumente AG. <http://www.kistler.com/> ,
(13.8.2007.)
- [10] Humad, Shweta: Piezo on silicon microelectromechanical resonators. Georgia, 2004.
<http://etd.gatech.edu/> (25.08.2007)
- [11] Oscillation damper with Piezo effect,
<http://live.pege.org/2005-material/oscillation-damper.htm>. (1.9.2007.)
- [12] PM900M proof mass damper. Cedrat Technologies October 2006.
http://www.cedrat.com/engineering/Active_materials_applications/Actuators/Actuators.htm (1.9.2007.)
- [13] Monner, H. P.; Wierach, P.: Overview of smart-structures technology at the German Aerospace Center, Smart Structures – Now a Reality, Institution of Mechanical Engineers (IMECHE), 22. September 2005, BAWA, Bristol, GB
- [14] Tralli, A.; Rutigliano, L.; Olivier, M.; Sciacovelli, D.; Gaudenzi, P.: Modelling of Active Space Structures for Vibration Control. 2004.
naca.central.cranfield.ac.uk/dcscs/2004/D14_48_TralliE-DITfinal1.pdf. (29.08.2007)