

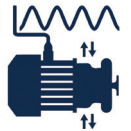


N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa
Savska cesta 16/5a, 10 000 Zagreb

Mjerenje i analiza vibracija

Prikazujemo osnovna načela i metode mjerenja vibracija. Analiza vibracija pomaže pri detekciji i nadzoru problema na strojevima i postrojenjima. Pročitajte kako protumačiti i analizirati informacije dobivene mjerenjem vibracija.



Analiza vibracija sofisticirana je tehnika i sve se više primjenjuje. Mjerenjem razine vibracija i frekvencije analizira se rad i ispravnost strojeva i postrojenja. Iako algoritmi za analizu na prvi pogled izgledaju složeno, analiza se, u pravilu, zasniva na mjerenju vibracija primjenom akcelerometra. Akcelerometar generira naponski signal proporcionalan količini i učestalosti vibracija u jedinici vremena.

Svaki stroj i postrojenje stvara vibracije. Podaci koji se prikupljaju prikazuju se u vremenskoj domeni kao relacija *amplituda vs. vrijeme* i u frekvencijskoj kao *amplituda vs. frekvencija* (primjenom brze Fourierova transformacije – FFT). Analiza se provodi računalnim algoritmima, a rezultate tumače inženjeri ili eksperti da bi utvrdili ispravnost stroja i identificirali potencijalne probleme kao što su: disbalans, problemi na ležajevima, mehanička labavost spojeva, rezonancija, kvarovi elektromotora, problemi na transmisiji i vratilima, problemi s podmazivanjem, pojava kavitacije u pumpama itd.



Slika 1 – Preventivno održavanje primjenom mjerenja vibracija

Mjerenje vibracija akcelerometrom

Vibracija je kretanje ili mehaničko osciliranje oko ravnotežnog položaja. Može biti periodična, poput gibanja njihala, ili slučajna, poput gibanja automobilske gume na makadamskoj cesti. Vibracije se iskazuju ubrzanjem (jedinice: m s^{-2}). Predmet može vibrirati slobodnom ili prisilnom vibracijom.

Do slobodnih vibracija dolazi kada se objekt ili struktura pomakne ili udari, nakon čega se nastavlja prirodno osciliranje. Tako, npr., kad udarimo u viljušku, ona zazvoni i na kraju se utiša. Prirodna frekvencija je frekvencija kojom struktura oscilira nakon

udara ili pomaka. Rezonancija je tendencija da sustav na nekim frekvencijama oscilira intenzivnije nego na drugim.

Prisilne vibracije na prirodnoj frekvenciji ili blizu nje uzrokuju rast energije unutar strukture. S vremenom vibracije mogu postati prilično velike iako je pobudna prisilna vibracija bila vrlo mala. Ako struktura ima prirodnu frekvenciju koja se podudara s vibracijama u njezinoj okolini, tada struktura vibrira intenzivnije i prije će doći do problema.

Prisilne vibracije nastaju kada konstrukcija vibrira zbog djelovanja promjenjive sile. Rotirajuće ili izmjenično kretanje može prisiliti objekt da vibrira na frekvencijama koje mu nisu svojstvene. Primjer za to je disbalans u perilici rublja, pri čemu se stroj tresе frekvencijom rotacije bubnja.

Mjerenjem vibracija prati se stanje rotacijske opreme kao što su kompresori, turbine i pumpe. Ti su uređaji sastavljeni od većeg broj dijelova, a svaki doprinosi jedinstvenom uzorku vibracija. Praćenjem i trendiranjem vibracija u vremenu može se predvidjeti kada će se pojaviti problemi ili otkazati oprema. Na temelju toga može se planirati održavanje.

Akcelerometar (lat. *acceler[are]*: ubrzati + grč. *μέτρον*: mjera) ili **mjerilo ubrzanja** mjerni je instrument ili uređaj za mjerenje akceleracije (ubrzanja) tijela u navigaciji, aeronautici, seizmologiji, za ispitivanje vibracija, udaraca i slično. Pri mjerenju se kućište akcelerometra učvršćuje na tijelo kojemu se mjeri ubrzanje. Ono se obavlja posredno, mjerenjem inercijske sile, koja pri ubravanju tijela djeluje na referentnu masu u akcelerometru. Iz poznate sile F i mase m izračunava se ubrzanje prema drugom Newtonovom zakonu:

$$a = F / m \quad (1)$$

Akcelerometri se mogu podijeliti na mehaničke i poluvodičke, tzv. MEMS (engl. *Micro-Electro-Mechanical Systems*). Mehanički se akcelerometar sastoji od mase koja je pričvršćena za okvir elastičnim vezama, pojednostavljeno oprugama. Mehanički akcelerometar u suštini je fizikalno tijelo određene tromosti (inercije) vezano elastičnom vezom za osnovnu (referentnu) podlogu. Poluvodički akcelerometar mjereno je osjetilo ili senzor (uz pripadajuće algoritme za analizu) koji omogućuje da npr. pametni telefoni prate broj koraka i tempo hoda. Takav akcelerometar čini niz drugih senzora koji sadrže kristalne strukture mikroskopske veličine koji registriraju djelovanje sile. Promjenom električnog napona u piezokristalima moguće je odrediti brzinu i smjer kretanja.

* Prof. dr. sc. Nenad Bolf
e-pošta: bolf@fkit.hr

Kako mjeriti vibracije?

Vibracije se najčešće mjere keramičkim piezoelektričkim osjetilom – akcelerometrom. Akcelerometar mjeri ubrzanje, a izlaz mu je naponski signal. Akcelerometri se obično postavljaju izravno na elemente poput ležajeva kotrljajućih elemenata, prijenosnika ili lopatica. Korisni su i za mjerenje udara (ispitivanja eksplozija i kvarova) i sporijih, niskofrekventnih vibracija. Prednosti akcelerometra su linearnost na širokom rasponu frekvencija i velik dimenzijski raspon.

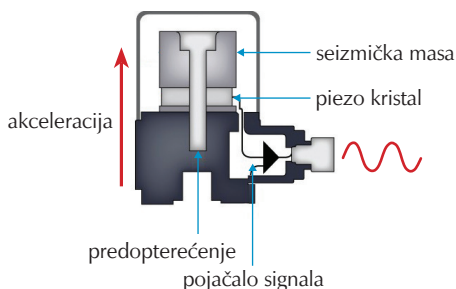


Slika 2 – Akcelerometar za mjerenje vibracija

Za mjerenje vibracija mogu se upotrijebiti i senzori pomaka, odnosno blizine (engl. *displacement, proximity probe*). To su nekontaktni pretvornici koji mjere udaljenost. U pravilu se ugrađuju u rotirajuće strojeve za mjerenje vibracija osovine, npr. u turbo strojeve. Zbog fleksibilnih ležajeva s fluidnim filmom i teškog kućišta, vibracije se ne prenose dobro na vanjsko kućište, pa se za mjerenje izravnih kretanja osovine primjenjuje mjerenje pomaka umjesto akcelerometara.

Kako radi akcelerometar?

Većina akcelerometara temelji se na piezoelektričnom efektu, tj. pojavi naboja na određenim vrstama kristala kad su pod opterećenjem. Ubrzanje tijela koje se ispituje prenosi se na seizmičku masu unutar akcelerometra koji pritišće piezoelektrični kristal. Kristal tada generira električni naboj proporcionalan primijenjenoj sili i, prema tome, proporcionalan ubrzanju.



Slika 3 – Izlazni naponski signal integriranog elektroničkog piezoelektričnog (IEPE) akcelerometra proporcionalan je sili vibracije primijenjenoj na piezoelektričnom kristalu

Kako odabrati akcelerometar?

Danas su u ponudi razni dizajni, veličine i mjerna područja akcelerometra. Poznavanje karakteristika signala koji se mjere i vanjskih utjecaja i ograničenja može pomoći pri odabiru.

Amplituda vibracija

Mjerno područje senzora odabire se na temelju maksimalne očekivane amplitude vibracija. Ako su vibracije izvan područja, signal će biti distorziran ili će se javiti tzv. *clipping*. Akcelerometri za praćenje visokih razina vibracija imaju nižu osjetljivost i manju masu.

Broj osi

Standardni akcelerometar mjeri ubrzanje duž samo jedne osi, tipično za mjerenje razine mehaničkih vibracija. Postoji i troak-

sijalni akcelerometar. On daje 3-dimenzijski vektor ubrzanja u obliku ortogonalnih komponenata. Upotrebljava se kad treba odrediti orijentaciju vibracije: bočnu, poprečnu ili rotacijsku.

Težina

Akcelerometri bi trebali težiti znatno manje od strukture kojoj se mjere vibracije. Dodavanje mase strukturi može izmijeniti njezine vibracijske karakteristike i uzrokovati netočno mjerenje. Težina akcelerometra u pravilu ne bi trebala biti veća od desetine ispitivane strukture.

Metode analize vibracija

Analiza vibracija općenito se svrstava u četiri kategorije, pri čemu svaka daje korisne informacije o radnim uvjetima i karakteristikama vibrirajućih dijelova.

1. Vremenska domena

Vibracijski signal se pomoću pretvornika pretvara u valni oblik, npr. na zaslonu osiloskopa. Taj se signal analizira u vremenskoj domeni. Premda se većina problema s vibracijama strojeva identificira analizom spektra, neki se problemi lakše uočavaju promatranjem valnog oblika u vremenskoj domeni.

2. Frekvencijska domena

Spektralna analiza valnog oblika rezultira prikazom *frekvencija vs. amplituda*, tj. spektrom. On u frekvencijskoj domeni predstavlja ono što su vibracije (oscilacije) u vremenskoj domeni. Dubinske analize vibracija strojeva provode se u frekvencijskoj domeni.

3. Povezane domene

Budući da su vibracije vremenski promjenjive, analiza više od jednog spektra odjednom može biti korisna. Za to se primjenjuje tehnika Gabor–Wigner transformacije, kojom se izračunavaju varijacije brze Fourierove transformacije, uključujući kratkotrajnu Fourierovu transformaciju (engl. *short time Fourier transform – STFT*).

4. Modalna analiza

Izmjerene funkcije frekvencijskog odziva dijela strojeva unose se u računalni model. Računalnim animacijama simuliraju se razne vibracije. Model se može podesiti dodavanjem ili oduzimanjem elemenata, promjenom mase, karakteristika materijala i sl.

Pored četiriju osnovnih kategorija postoje brojni oblici analize, izračuna i algoritmi koji se primjenjuju za različite aspekte analize vibracija kao što su:

- **Vremenski valni oblik**

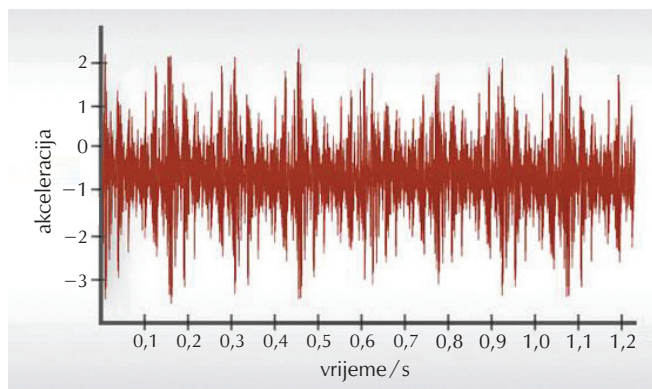
Vremenski valni oblik (engl. *time waveform*) prikaz je ovisnosti *akcelaracija vs. vrijeme*. Vremenski valni oblici pokazuju kratke uzorke vibracija, otkrivajući stanje strojeva koji nisu uvijek razlučivi u frekvencijskom spektru. Signali se analiziraju primjenom FFT-a.

- **Brza Fourierova transformacija**

FFT (engl. *fast Fourier transform*) je algoritam za izračunavanje spektra iz valnog oblika u vremenskoj domeni. Tim proračunom raščlanjuje se signal na sve njegove frekvencije. FFT pretvara signal iz vremenske u frekvencijsku domenu. Primjenjuje se za detekciju kvarova na strojevima poput ekscentričnosti i disbalansa.

- **Fazno mjerenje**

Pri analizi vibracija faza predstavlja relativnu vremensku razliku između dvaju izmjerenih signala iste frekvencije. Fazna mjerenja primjenjuju se zajedno s FFT-om za otkrivanje slabo učvršćenih dijelova, ekscentričnosti i disbalansa.



Slika 4 – Vremenski valni oblik

• Analiza reda

To je oblik FFT analize koji služi za kvantificiranje vibracija strojeva s promjenjivim brojem okretaja. Drugim riječima, analiza reda je frekvencijska analiza u kojoj se frekvencijska os spektra prikazuje u okretajima u minuti umjesto u Hz. "Red" se odnosi na frekvenciju koja je višekratnik referentne brzine rotacije. Na primjer, ako je signal vibracije dvostruko veći od frekvencije rotacije motora, red iznosi dva.

• Spektralna gustoća snage

PSD (engl. *power spectral density*) se izračunava i primjenjuje za detektiranje "slučajnih" vibracija ili gibanja na većem broju različitih frekvencija. PSD-om se uspoređuju slučajne vibracije s različitim duljinama signala.

• Analiza ovojnice

Analiza ovojnice (engl. *envelope analysis*) oblik je analize vibracija koja može otkriti "udare" vrlo niske energije često prikrivene drugim vibracijama. Ova analiza primjenjuje se za dijagnosticiranje oštećenih zubaca na zupčanicima i ležajeva valjaka.

• Rezonancijska analiza

Rezonancijska analiza identificira sve prirodne vibracije i frekvencije u strojevima. Prisutnost rezonancije otkriva pojavu velikih vibracija koje mogu oštetiti opremu.

Načini i vrste mjerenja vibracija

• Ukupna razina vibracija

Praćenjem ukupne razine vibracija provodimo tzv. "grubu provjeru". Dodirivanjem stroja rukom možemo steći dojam radi li približno u širokom frekvencijskom opsegu. Ta inicijalna provjera najbolje funkcionira kod rotacijskih strojeva, posebno pri velikim brzinama kod klipnih strojeva.

• Spektralna analiza vibracija

Spektralnom analizom transformira se signal iz vremenske u frekvencijsku domenu. Uglavnom se provodi primjenom FFT-a. Zadatak je utvrditi karakteristične frekvencije pojedinih komponenata stroja ili postrojenja. Lokacija vrha frekvencijskog signala otkriva vjerojatni izvor vibracija. Uobičajeno se spektralna analiza primjenjuje za brzinu rotacije osovine ili učestalost doticanja zubaca na paru zupčanika.

• Praćenje diskretnih frekvencija

Ako treba nadzirati određenu komponentu u stroju ili na postrojenju, prati se razina vibracija koja se generira na određenoj frekvenciji koju ta komponenta stvara. Na primjer, ako želimo pratiti vratilo na stroju, pratiti treba brzinu rotacije stroja. Diskretna frekvencija izračunava se algoritmom FFT-a.

• Praćenje pulsni udara

Riječ je o tehnici prediktivnog održavanja kojom se, obično ručnim instrumentom, prate ležajevi kotrljajućih elemenata. Instrument mjeri prirodnu frekvenciju pobudenu udarima ili vibracijama generiranim kotrljajućim ležajevima. Drugim riječima, kada se dva metala u pokretu dodiruju, njihovim dodiranjem razvijaju se udarni valovi koji putuju kroz metal. Mjerenje udarnih valova osnova je za praćenje pulsni udara.

• Mjerenje kurtozije

Kurtozija (engl. *kurtosis*) je mjera oštine vrhova ("šiljatosti") slučajnog signala. Signali s većom kurtozijom imaju više vrhova, koji su trostruko veći od srednje vrijednosti kvadratnog korijena signala (RMS) signala. U analizi vibracija kurtozija se primjenjuje za praćenje razvoja zamora u kotrljajućim ležajevima.

• Usrednjavanje signala

Budući da se signali mijenjaju s vremenom, usrednjavanje (engl. *averaging*) signala važno je pri analizi spektra jer određuje razinu signala na svakoj od frekvencija. To je posebno važno pri mjerenju niskih frekvencija jer je tada potrebno dulje vrijeme usrednjavanja da bismo dobili dobru procjenu spektra. Često se primjenjuje pri praćenju zupčanika i brzine rotacije. Ovdje će usrednjavanje signala pokazati ciklično djelovanje svakog zuba u zupčanicu. Ako zub ima pukotinu ili se lomi, to će se jasno uočiti.

• Kepstralna analiza

Izvorno namijenjena karakterizaciji seizmičkih ehoa (jeka) izazvanih potresima i eksplozijama bombi, kepstralna (engl. *cepstrum*) analiza primjenjuje se za praćenje ponavljajućih obrazaca u spektru, kao npr. pri analizi govora. U Fourierovoj analizi kepstral se dobiva izračunavanjem inverzne Fourierove transformacije. Kepstralna analiza primjenjuje se pri praćenju interakcija frekvencije rotacije lopatica rotora i frekvencije prolaska lopatica. Drugi primjer je, pak, ispitivanje frekvencije doticanja zubaca zupčanika i brzine rotacije zupčanika.

Veličine koje se mjere kod analize vibracija

Sve ove tehnike analize vibracija zasnivaju se na tri osnovna mjerenja: mjerenju ubrzanja, mjerenju brzine (engl. *root-mean square* – RMS brzina) i mjerenju pomaka (engl. *displacement, proximity*). Iako se akcelerometri i dalje najčešće upotrebljavaju, suvremena napredna tehnologija izrade senzora donijela je bezkontaktne laserske senzore velike brzine. Njihovom upotrebom analiza postaje preciznija i lokalizirana. Svaka veličina oslikava određeno frekvencijsko područje, a najbolja dijagnostika rezultat će iz cjelovite analize:

• Ubrzanje

Mjerenje ubrzanja prikladno je za visoke frekvencije. Osim toga, signal ubrzanja može se pretvoriti u brzinu ili pomak.

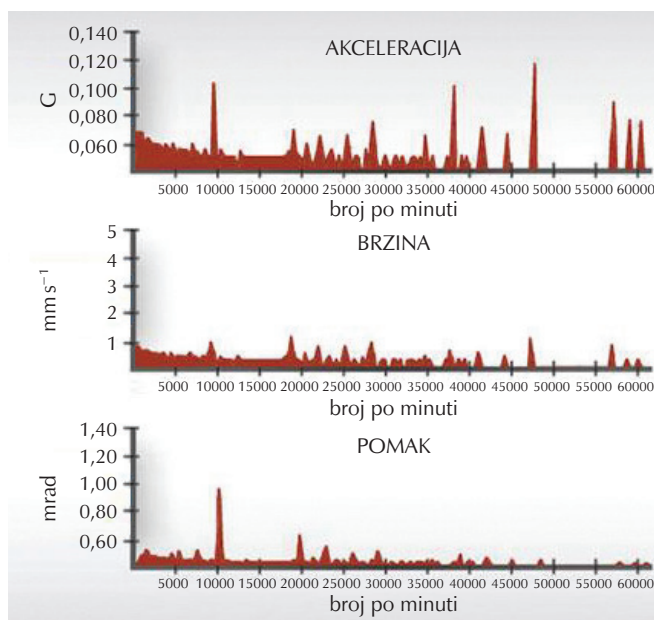
• Pomak

Mjerenjem pomaka prate se niske frekvencije. Uglavnom se primjenjuje pri ispitivanju mehaničkih vibracija. Otkriva disbalans u rotirajućim dijelovima koji se javlja zbog promjene brzine rotacije osovine.

• Brzina

Praćenje brzine ukazuje na posebno destruktivne sile vibracija. Jednaku važnost pridaje visokim i niskim frekvencijama.

Na slici 5 prikazan je primjer ubrzanja, pomaka i brzine signala. Neki pikovi se preklapaju na istim frekvencijama, ali svaki ima različitu amplitudu. Jasno se vidi da svaka od tih varijabla daje različitu važnost određenim frekvencijskim rasponima.



Slika 5 – Prikaz analize ubrzanja, pomaka i brzine signala

Tehnike i alati za analizu vibracija

Napredak tehnologije, posebno bežične, uvelike je unaprijedio prikupljanje, tumačenje i analizu vibracija. Danas su analizatori vibracija prijenosni, komuniciraju s pametnim telefonima i tabletima u stvarnom vremenu, a FFT provode u iznimno visokoj razlučivosti. Velik broj tvrtki izrađuje vlastite aplikacije za interpretaciju podataka dobivenih s vibracijskim instrumentima.

Neke tvrtke koje proizvode instrumente za analizu vibracija nude i baze podataka s tisućama snimljenih uzoraka frekvencija kvarova koje pomažu u prepoznavanju. Neki softveri kontinuirano nadziru geometriju rotirajućih elemenata i upozoravaju na moguću pojavu kvarova.

Koje vibracije treba kontinuirano pratiti?

Ako se pravilno primijeni, kontinuirano praćenje vibracija pomoći će da strojevi i postrojenja rade u optimalnim uvjetima:

- **Praćenje kritične opreme**

U kritičnu opremu spada svaki element stroja ili postrojenja koji će u slučaju kvara uzrokovati zastoj i velike financijske gubitke. Kontinuirano praćenje vibracija pomaže u otkrivanju promjena u spektru vibracija, što može razotkriti probleme s podmazivanjem i ležajevima prije nego što se pojave veći problemi.

- **Nadzor opreme u intenzivnom radu**

Velik broj postrojenja radi neprekidno, a zaustavljaju se samo zbog redovitog održavanja. Neplanirani prekidi proizvodnje znatno će ugroziti poslovanje. Kontinuiranim praćenjem vibracija nadzire se stanje opreme u intenzivnom radu i šalju upozorenja kada se to stanje počinje mijenjati.

- **Nadzor nedostupne opreme**

Održavanje opreme koja se nalazi na mjestima kojima nije lako pristupiti teško je. Uređaje na krovovima, rashladnim tornjevima i u visokotemperaturnim zonama moguće je kontinuirano pratiti na temelju vibracija. Održavanje će se provesti na vrijeme, a osoblje neće morati pristupiti tim mjestima.

Primjer analize vibracija

Pogledajmo jedan primjer analize vibracija. Ispituje se klimatizacijski uređaj u farmaceutskoj proizvodnji. Uređaj pokreće dva ventilatora kapaciteta koji mora zadovoljiti zahtjeve za izmjenom zraka u prostoriji. Klimatizacijski uređaj ima dva izravno spojena ventilatora, svaki opremljen motorom od 110 kW. Početna analiza pokazala je da jedinica radi normalno kad radi samo ventilator 1, ali kad se uključi ventilator 2, na određenim mjestima javljaju se problematične vibracije.

Mjerenje otkriva da je nakon uključivanja ventilatora 2 došlo do blagog povećanja amplitude vibracija na sva tri mjerna mjesta. Analiza je pokazala da se najveća amplituda pojavila u vertikali izvan motora pri brzini $1,158 \text{ cm s}^{-1}$ uz dominantni pik na 841 o min^{-1} . To ukazuje da je problem strukturna rezonancijska vibracija jer spektralni podatci nisu pokazali znakove drugih mehaničkih problema.

Tablica 1 – Rezultati ispitivanja vibracija pri radu dva ventilatora*

| Mjerno mjesto | Brzina pogona s promjenjivom frekvencijom /Hz | Ventilator 1 / cm s^{-1} | Ventilator 2 / cm s^{-1} |
|-------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Motor – vanjska vertikala | 55,6 | 0,648 | 1,158 |
| Motor – unutarnja vertikala | 55,6 | 0,442 | 0,881 |
| Motor – unutarnja horizontala | 55,6 | 2,438 | 0,660 |

* Podatci preuzeti od tvrtke IVC Technologies

Preporuka je da se pregleda strukturu okvira i dinamički apsorber ventilatora 2. Predlaže se i ispitivanje na udar kako bi se locirale i analizirale rezonantne vibracije.

Izvori

- URL: <https://www.reliableplant.com/vibration-analysis-31569> (pristupljeno 8. 2. 2021.).
- URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Akcelerometar>; akcelerometar (pristupljeno 8. 2. 2021.).
- Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=1089> (pristupljeno 8. 2. 2021.).
- URL: https://www.pcb.com/techsupport/docs/vib/TN_17_VIB-0805.pdf (pristupljeno 8. 2. 2021.).
- URL: http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel (pristupljeno 8. 2. 2021.).
- URL: https://www.endevco.com/news/newsletters/2012_07/tp327.pdf (pristupljeno 8. 2. 2021.).
- URL: <https://www.ni.com/en-rs/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html> (pristupljeno 8. 2. 2021.).
- URL: <https://www.plantservices.com/articles/2006/154/> (pristupljeno 8. 2. 2021.).