

PROJEKTIRANJE IZOLACIJE MEHANIČKIH VIBRACIJA U FUNKCIJI OSIGURANJA KVALITETE

DESIGN OF ISOLATION OF MECHANICAL VIBRATIONS IN THE FUNCTION OF THE QUALITY ASSURANCE

Davorka Šaravanja, izvanredni profesor
Fakultet strojarstva i računarstva, Sveučilište u Mostaru
Mostar

Marko Grbešić, prvostupnik strojarstva
Fakultet strojarstva i računarstva, Sveučilište u Mostaru
Mostar

REZIME

U članku se navode osnovne karakteristike vezane za pojmove izolacije mehaničkih vibracija i metode i načine projektiranja izolacijskih podloga. Posebna pozornost odnosi se na karakteristike vibroizolacijskih podloga kao što su statički ugib, vlastita frekvencija, funkcija prijenosa i odnos prinudne i vlastite frekvencije koja dovodi do rezonancije, a sve u cilju poboljšanja postupka projektiranja vibroizolacije u funkciji osiguranja kvalitetnije eksploatacije mehaničkih konstrukcija pri njihovoj uporabi. Osnovni cilj ovog članka je pokazati da izabrane karakteristike izolacijske podloge moraju zadovoljiti nekoliko uvjeta koji se odnose na masu, krutost i frekvenciju vibracija mehaničke konstrukcije.

Ključne riječi: izolacija vibracija, prijenosna funkcija, frekvencija, vibroizolator

ABSTRACT

The article presents the basic properties related to the concepts of isolation of vibrations and methods and ways of insulating supports. Special attention refers to the characteristics of the insulating surface such as the static deflection, the natural frequency, the functions of transmission and the ratio of forced and natural frequency, which leads to resonance, and in order to improve the design process of isolation of vibrations in the function of providing better exploitation of mechanical structures of their use. The main goal of this article is to show that selected characteristics of the insulating substrates must satisfy several conditions relating on the mass, the stiffness, and the frequency of vibration of mechanical structures.

Keywords: isolation of vibration, transfer function, frequency, vibroisolator

1. UVOD

Postoje razni izvori pobude vibracijskog gibanja mehaničkih konstrukcija, koji predstavljaju razloge zbog kojih dolazi do porasta amplitude vibriranja na različitim i karakterističnim frekvencijama (frekvencija vrtnje rotora i sl.), a to su razne vrste nepravilnosti, kao što su otkloni vratila od koaksijalnosti, promjene u geometriji rotirajućih sklopova (ležajevi, diskovi

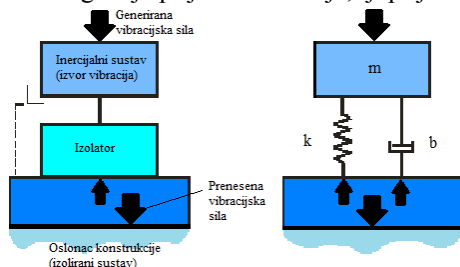
turbine, zupčanci reduktora, propeleri i sl.), pa čak i periodičke sile koje nastaju u toku radnog procesa. Dakle, polazeći od spoznaje da se u radu strojeva realizira pretvaranje jednog oblika energije u drugi ili jedan oblik gibanja u drugi kao uvjet optimalnosti njihovog kvalitetnijeg funkcioniranja javlja se potreba za osiguranjem maksimalno mogućeg koeficijenta djelovanja svakog pojedinačnog dijela stroja, tj. potreba za izolacijom svakog pojedinog dijela stroja ili konstrukcije.

Međutim, bez obzira na razne postupke koji služe kvalitetnijem konstruiranju, montaži i otkrivanju nepravilnosti u radu strojeva, kvarovi su neizbježna pojava koja proizvodi periodična gibanja određenih sklopova oko ravnotežnog položaja, različitog intenziteta i jačine, što se održava na gibanje čitave konstrukcije.

2. IZOLACIJA MEHANIČKIH VIBRACIJA

Uvjete kvalitetnije eksploatacije mehaničke konstrukcije moguće je osigurati što ravnomjernijim gibanjem pogonskih dijelova (tj. omogućiti što konstantniju relativnu brzinu sklopova). Dakle, postupak optimalne izolacije nastoji se ugraditi u fazu projektiranja pogonskih dijelova. Pri tome se formira vibroakustični računski model u cilju osiguranja točne ocjene frekvencija njihove pobude i vlastitih frekvencija vibracija, kako bi se izbjegla pojava funkcioniranja u rezonancijskim režimima. Kao najbolji alat za utvrđivanje utjecaja promjene izolacijskih karakteristika u funkciji koeficijenta utjecaja defekta pokazao se rezonancijski dijagram kao pokazatelj promjene prijenosne funkcije ovisne o odnosu pobudne i vlastite frekvencije.

Problem projektiranja izolacije je kako izabrati prihvatljive parametre tako da se za vibracije, koje se prenose na sustav, odrede vrijednosti unutar radnog frekvencijskog područja. Rješenja izolacijskih problema sastoje se u formiranju podloge između strojne konstrukcije i strukture podloge sa elastičnim (k) i prigušnim elementima (b) koji vrše amortizaciju, odnosno apsorpciju vibracijske energije koja onemogućuje prijenos vibracija, tj. prijenos sile.



Slika 1. Shema primjera izolacije sile

Gornja slika pokazuje da odnos prenesene vibracijske sile koja se prenosi na oslonac konstrukcije (izolirani sustav) i generirane vibracijske sile sa izvora predstavlja prenosivost koja pokazuje da se izvor vibracija pokreće istom brzinom kao i izolator, tj. da su paralelno povezani. Sila se tako dijeli na inercijski dio (isprekidana crta) i na puno manji dio koji utječe na oslonac konstrukcije, tj. izolirani sustav [1].

Dakle, prijenosna funkcija praktički određuje razinu prigušenja koja je daleko važnija od fazne razlike između pobude i odziva vibracija (1)

$$|T| = \sqrt{\frac{1 + 4\zeta^2 r^2}{(1 - r^2)^2 + 4\zeta^2 r^2}} \quad \dots (1)$$

gdje je ζ - faktor prigušenja sustava, a gdje je r - odnos pobudne i vlastite frekvencije.

Iz jednadžbe se vidi da područje izolacije odgovara odnosu $r > \sqrt{2}$, što pratkično određuje projektiranje izolatora na radnu frekvenciju koja mora biti veća od $\sqrt{2}\omega_n$, a parameter izolatora

k i b birati da prijenosna funkcija bude manja od specificirane vrijednosti u radnom frekvencijskom području. Prijenosna funkcija za vrlo malo prigušenje ima najveću vrijednost za $r=1$ (rezonancija), ali magnituda prijenosne funkcije opada kako raste faktor prigušenja, tj. izolacija pripada području $r > \sqrt{2}$ gdje apsolutna vrijednost prijenosne funkcije raste sa faktorom prigušenja. Postupak projektiranja izolacije najbolje je predstaviti jednadžbom (2):

$$I = (1 - |T|)100\% \quad \dots (2)$$

Matematičko pojašnjenje gornje jednadžbe ukazuje na činjenicu da su najbolji uvjeti za izolaciju dani kad je faktor prigušenja jednak nuli, ali to u praksi nije provedivo pa se faktor prigušenja održava što je moguće manjim.

Drugi pristup je da se krutost predstavi u funkciji prenosivosti, tj. $k = \frac{\omega^2 mT}{1+T}$, što se više koristi za projektiranje krutosti izolatora ukoliko je određen postotak potrebe izoliranosti u radnom frek. području za sustave poznate mase i tada se uključuje i masa izolatora.

Da bi se izolacija obavila u području za $r > \sqrt{2}$ dobro je da je što manja vlastita frekvencija kako bi se dobilo najšire frek. područje, a to se postiže čineći izolator što je moguće mekanijim i savitljivijim (krutost što manja). Međutim, i za ovaj slučaj postoje ograničenja zbog pojave točaka na koje treba obratiti pozornost s obzirom na snagu konstrukcije, njenu stabilnost i iskorištenost opruga. Iz tog razloga vrši se povećanje ukupne mase dodajući, tzv. inercijske blokove koji se postavljaju na opružne izolatore sa dodanim prigušivačem ili kao zračno-ispunjen pneumatski izolator. Inercijski blok pomjera težište sustava, s tim da se vodi računa o uvjetima stabilnosti, prijenosu buke i redukciji (eng. rocking motion) konstrukcije. Za poboljšanje distribucije opterećenja, umjesto samo jedne opruge konstrukcijskog koeficijenta krutosti k postavlja se grupa od n opruga od kojih svaka ima koeficijent krutosti k/n i koje se ravnomjerno raspoređuju ispod inercijskog bloka.

Važan zahtjev, kojeg treba zadovoljiti pri projektiranju je sniženje prigušenja. Međutim, problem je u tome što se prigušenje povećava da se spriječe rezonancijske vibracije koje se najčešće pojavljuju pri uvjetima paljenja i zaustavljanja stroja kad varira pobudna frekvencija. Dakle, u svrhu rješavanja ovih problema koriste se takve izolatorske podloške ili obloge koje su napravljene od materijala sa prigušnim svojstvima kakvi su pluto, prirodna i umjetna guma i sl. jer mogu ostvariti zadovoljavajuće prigušne odnose (bliske 0,01) [1].

3. UTJECAJI PRI PRAKTIČNOM PROVOĐENJU POSTUPKA IZOLACIJE

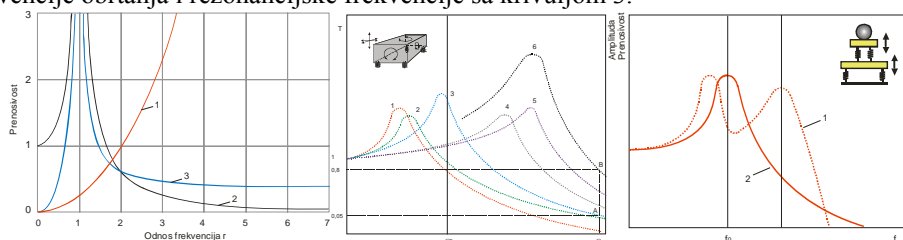
3.1. Utjecaj mase i krutosti opruga

Za osiguranje kvalitetne izolacije vibracija, neophodno je da je frekvencija pobude značajno veća od vlastite frekvencije i da sustav djeluje u uvjetima određenim masama. U tom slučaju, veličinu pomjeranja određuju karakteristike mase, a ne karakteristike opruge. Npr. veća masa koja deformira kruću oprugu vibrira na istoj frekvenciji kao i manja masa koja deformira manje krutu oprugu (mekšu) na istu tu veličinu. Obje mase će vibrirati na približno istoj frekvenciji. Pri povećanju mase koja djeluje na oprugu, povećava se progib opruge što dovodi do smanjenja vlastite frekvencije i koeficijenta prijenosa. Ako se, pri povećanju mase, poveća i krutost opruge, uz prethodnu veličinu statičkog progiba, vlastita frekvencija i koeficijent prijenosa dobivaju svoju prethodnu veličinu. Međutim, ovaj slučaj najviše pokazuje nesklad između teorijskih i praktičnih saznanja.

Na dijagramu prenosivosti (Sl.2a) pokazana je ovisnost promjene prenosivosti od odnosa frekvencija. Za većinu strojeva, taj dijagram ne odražava promjenu neuravnoteženih sila koje su proporcionalne kvadratu eksploatacijske brzine. Pri nultoj veličini poremećajne frekvencije, u postocima, koeficijent prijenosa jednak je 100% (moguće samo teorijski), što znači da je tada prenesena sila jednaka nuli. Međutim, u praktičnoj primjeni i eksploataciji strojeva, radne

brzine se mijenjaju, tj. povećavaju, pa se povećavaju i poremećajne frekvencije, odnosno sustav prolazi i kroz rezonancijsko stanje [2].

Pri radu nekog rotacijskog sustava, u uvjetima određenim samo masom, s porastom radnih brzina povećava se neuravnotežena sila, pri čemu se kompenzira sniženje koeficijenta prijenosa izazvanog povećanjem frekvencija koje su u vezi sa radnim brzinama. Konačni rezultat izražava se time što sile koje se prenose poprimaju konstantne veličine neovisno o radnoj brzini. Na Sl.2a. promjena pobudne sile predstavljena je sa krivuljom 1, promjena koeficijenta prijenosa sa krivuljom 2, a promjena sile koja se prenosi kod rotacijskog stroja u ovisnosti od odnosa frekvencije obrtanja i rezonancijske frekvencije sa krivuljom 3.



Slika 2a. Prenosivost u funkciji odnosa frekvencija, 2b. ovisnost pri složenim pomjeranjima, A očekivana prenosivost, B stvarna prenosivost, 2c. 1-elastična konstrukcija oslonca, 2-kruta konstrukcija oslonca

3.2. Pomjeranje u drugim pravcima osim vertikalnog

U praksi, sustavi ne vibriraju samo u vertikalnom nego i u bilo kojoj od šest mogućnosti u prostoru. Na Sl.2b. predstavljena je ovisnost funkcije prijenosa od složenih pomjeranja, i to krivulje od 1-5 predstavljaju vlastite frekvencije za određenu vrstu pomjeranja. Krivulja 6 predstavlja koeficijent prijenosa opće sile. Frekvencije za neke oblike pomjeranja ponekad su važnije od frekvencije običnog vertikalnog naizmjeničnog pomjeranja. Ako su te različite vlastite frekvencije niže od frekvencije karakterističnih za vertikalno pomjeranje, tada će sustav, razrađen na temelju već spomenutih principa (za vertikalno pomjeranje) zadovoljiti tražene uvjete. Međutim, ako je bilo koja od tih vlastitih frekvencija značajno veća od frekvencije vertikalnih pomjeranja, tj. frekvencije vibriranja u vertikalnom pravcu, može se približiti frekvenciji poremećajne sile. Na taj način će i koeficijent prijenosa biti će veći od željenog (pretpostavljenog) [3].

Pretpostavka o pomjeranju samo u vertikalnom pravcu, često ne odgovara realnim uvjetima, zato što, npr. za obične rotacijske sustave, neuravnotežene sile izazivaju, ne samo vertikalno promjenljivo, već i bočno pomjeranje, npr. kod određenih vrsta kompresora, neuravnotežene sile mogu izazvati samo bočno pomjeranje. Poznajući geometrijske parametre sustava, moguće je izračunati njegove vlastite frekvencije. Taj proračun nije jednostavan, jer su za proračun potrebne i informacije koje nisu definirane u fazi projektiranja sustava [4].

3.3. Krutost oslonaca

Pretpostavka o konstrukciji oslonca kao beskonačno krutoj, vrijedila je za konstrukcije prošlog vremena, dok suvremena konstrukcija, nastala kao rezultat usavršavanja tehnologija, traži nove pristupe i postavlja nove uvjete. Ta pretpostavka je posebno neprimjenjiva kod čeličnih i betonskih konstrukcija koje se oslanjaju izravno na zemlju ili na oslonce, pa za takve konstrukcije veće značenje ima elastičnost.

Pri odsustvu krutosti, konstrukcija oslonca sustava (predstavljenog kao masa-opruga na tvrdj podlozi), pretvara se u sustav predstavljen masom sa oprugom na drugoj masi sa oprugom koja može, ali i ne mora imati tvrdj podlogu.

Sustav predstavljen sa dvije mase i dvije opruge ima dvije vlastite frekvencije. Jedna od tih frekvencija je obično niska na kojoj se gibaju obje mase u fazi. Druga frekvencija je viša i na njoj se mase gibaju u suprotnim smjerovima, dakle u protufazi. U ovisnosti od odnosa krutosti dvaju opruga kao i dvaju masa, te vlastite frekvencije se mogu približavati jedna drugoj ili se značajno razlikovati. Te dvije frekvencije nalaze se više i niže od vlastite frekvencije gornje mase s oprugom. Ako je vlastita frekvencija gornje mase visoka ona se približava pobudnoj frekvenciji i tako se stvaraju uvjeti za rezonanciju. U ovisnosti od odgovarajuće mase opreme i konstrukcije oslonca mogu se pojaviti dva slučaja ovisnosti amplitude vibriranja i prenosivosti od frekvencije prikazana na Sl.2c.

4. KONSTRUKCIJA VIBROIZOLATORA

Projektiranje sustava izolacije vibracija raznih strojeva koji se javljaju u strojarскоj industriji može se podijeliti na faze: 1. izbor odgovarajućeg pomjeranja ili progiba od statičkog opterećenja mehaničkog sustava; 2. izbor veza kod oslonaca; 3. izbor mjesta za vibroizolatore i određivanje napreznja (opterećenja) za svakog od njih; 4. izbor oslonačnih vibroizolatora u suglasnosti sa prethodnim točkama; 5. razrada veza vibroizolacije sa mehaničkom opremom-strojem, s tim da te veze ne snižavaju efekt vibroizolacije dobiven ugradnjom vibroizolatora.

Postoje, uglavnom, tri načina vezivanja vibroizolatora: a) neposredno za izvedena montažna mjesta; b) na čelični oslonačni okvir i veza vibroizolatora za okvir; c) montaža na betonsko "inercijsko" postolje (po preporukama proizvođača opreme).

a) Montažna mjesta: Ovaj način koristi se samo za vrlo krute mehaničke sustave koji se praktički ne deformiraju pri njihovom postavljanju na montažna mjesta. Ovaj način je pogodan za, npr. strugove srednje veličine, pojedine vrste pumpi (monoblokovske) i druge kompaktne sustave.

b) Montaža mehaničkog sustava na čelični okvir: U slučaju da mehanički sustav predstavlja veći broj strojeva ili ima značajno velike gabarite tada je potrebno izvršiti njegovo pričvršćenje zavrtnjima što osigurava neophodnu čvrstoću. Ako se mehanički sustav postavlja na vibroizolatore, snižava se konstrukcijski efekt krute ploče, pa se to sniženje mora kompenzirati na neki drugi način. Vrlo često se, iz tih razloga, sustav montira na čelični okvir koji ima dovoljnu čvrstoću, a osigurava neophodni utjecaj oslonaca.

U čestim slučajevima sustav se postavlja na lagani okvir, koji se, zatim montira na krutu betonsku ploču. Ako se sustav postavlja na vibroizolatore takvi okviri su, obično nedovoljni.

Za montažu višeagregatne opreme (npr. pumpa, kompresor, elektromotor i sl.) često se koristi čelični okvir. Ako, u tom, slučaju, konstrukcija postolja (oslonca) nema dovoljnu krutost mogu nastati ozbiljni problemi pojavom vibracija što je karakteristično za sustave u kojima se nalaze remenski ili zupčasti prijenosi, kao i ventilatori. Čelični okviri pružaju mogućnosti korištenja širokog postolja na kojem vibroizolatori mogu biti razmješteni na većim rastojanjima jedan do drugog, što, također, povećava stabilnost sustava. To je posebno važno kod sustava čije je središte masa (težište) relativno visoko pozicionirano.

c) Montaža na inercijskom postolju: Inercijski blokovi prave se od betona i koriste se zbog smanjenja pomjeranja sustava montirane opreme. Pri tome oni ispunjavaju i druge funkcije: osiguravaju stabilnost sustava; snižavaju položaja središta masa; ravnomjernije raspoređuju mase; smanjuju posljedice, tzv. vezanih vibracija; smanjuju greške pri određivanju položaja središta masa opreme; stvaraju vibroakustičku pregradu. Na ovaj način inercijski blokovi smanjenju amplitudu pomjeranja, srazmjerno povećanju mase. Kod montaže mehaničkih sustava na vibroizolatore, mjesta određena za montažu na običnim betonskim krutim pločama, koja su blizu jedno drugom, ne osiguravaju potrebnu stabilnost. Zato se koriste betonska inercijska postolja koja povećavaju površinu oslonaca, a tako i stabilnost sustava (postolje izrađena od konstrukcijskog čelika). Također, pri montaži masivnog betonskog postolja, snižava se položaj središta masa cijelog sustava, što utječe na povećanje površina oslonca i

snižavanje vjerojatnosti pomjeranja u bočnom pravcu. U većini slučajeva pojedini dijelovi mehaničkih sustava su značajno teži i nalaze se na jednom kraju u odnosu na ostale dijelove. Zbog toga su za rješavanje problema izazvanih neravnomjernim rasporedom masa, potrebni različiti oslonci. Ako se želi primijeniti inercijski blok, a ne poboljšati koeficijent prijenosa za zadani statički progib, tada se, za isto pomjeranje mogu koristiti krući vibroizolatori. Pri povećanju mase sustava dva puta, krutost vibroizolatora na kojima će se montirati sustav, također treba biti udvostručena čime sustav postaje manje izložen djelovanju vanjskih sila. Za osiguranje krutosti montiranog sustava moguće je, u istoj mjeri, koristiti ili inercijsko betonsko postolje ili čelično okvirno postolje.

Rješavanje problema izazvanih režimom "vezanih" vibracija

Frekvencija koja je viša od dvije bočno vezane vibracije mehaničkog sustava može i dva-tri puta prelaziti osnovnu frekvenciju vibracija u vertikalnom pravcu, što dovodi i do pojave rezonancija. Korištenje inercijske osnove snižava vlastitu frekvenciju vibracija što smanjuje vjerojatnost pojave navedenih problema.

Snižavanje utjecaja pogreške pri određivanju položaja središta masa mehaničkog sustava

Pri konkretnom izboru vibroizolatora treba odrediti ukupno opterećenje, pa ga razdijeliti na svaki od izolatora. T se izvodi ako se poznaje ili ako se izračuna položaj središta mase svakog od sklopova meh. sustava. Ako ta informacija (od strane proizvođača) ili proračun nije dovoljno točna, tada se rezultati proračuna opterećenja mogu razlikovati od stvarnih podataka (stanja) što dovodi do preopterećenosti ili nedovoljne opterećenosti vibroizolatora, tj. do problema u funkcioniranju mehaničkog sustava. Rješenje je u korištenju vibroizolatora sa većim statičkim progibom.

Primjena inercijskih blokova u funkciji kvalitete, tzv. "mjesne" vibroakustičke pregrade

U slučaju montiranja mehaničkog sustava (koji proizvodi veliku buku) na pod prostorije, tada pod prostorije koji se nalazi ispod mehaničkog sustava, može biti izložen djelovanju vrlo visokih razina vibracija i zvučnog tlaka. Od poda prostorije, u tom slučaju, može se prenositi zvučna energija u druge prostorije. Betonske inercijske osnove, u tom slučaju, djeluju u funkciji kvalitetne vibroakustične pregrade.

5. ZAKLJUČAK

Istraživanja na različitim varijantama eksperimentalnog modela i sa različitim sustavom vibroizolatora pokazuju da snižavanju vibroaktivnosti najviše ovise o izboru pobudne frekvencije, pogotovo njenim nižim vrijednostima, dok bi se za više vrijednosti rezultat snižavanja vibracija trebao tražiti u izmijenjenim ili, što je bolje, varijabilnim karakteristikama sustava izolatora.

Rezonancijski dijagram je najbolji pokazatelj promjene prenosivosti u funkciji odnosa frekvencija, tj. najbolji alat za utvrđivanje utjecaja promjene izolacijskih karakteristika u funkciji koeficijenta utjecaja neke određene nepravilnosti. Za povećane vrijednosti odnosa frekvencija bilo bi vrlo interesantno provesti istraživanja koja bi se temeljila na promjenama prigušnih osobina mehaničkog sustava, ali i sustava vibroizolatora.

6. LITERATURA

- [1] C. W. de Silva: Vibration Fundamentals and Practice, Taylor & Francis Group, London-New York (dopunjeno izdanje), 2006.
- [2] D. J. Inman: Engineering Vibration, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2007.
- [3] Šaravanja, D.; Cigić, A.: Influence of Defect Factor on Vibration Isolation Procedures on Rotating Machines, 20th DAAAM International Symposium International Conference UPS 2009, Vienna, 2009.
- [4] Šaravanja, D.; Grbešić, M.; Dragičević, M.: Optimization of Impact Vibration Isolation, 27th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation, Mostar&Vienna, 2016.