

Ing. Antonín Zborok, VÚHU

Selektivní tlumení chvění

1.0 Úvod

Za provozu každého stroje vznikají dynamické síly, které rozkmitávají nejen tento stroj, ale i základ, na němž je stroj uložen a které se šíří i dále do okolí. Důsledkem toho je, že dochází ke zvýšenému namáhání všech strojů, přístrojů i budov vystavených působení chvění. Snižuje se tím životnost i funkční spolehlivost chvějících se zařízení. Chvění přenášené na člověka působí škody na lidském zdraví. Kromě toho chvění povrchů pevných těles se přenáší do vzduchu v podobě hluku, což má opět nepříznivý vliv na zdravotní stav člověka.

Dynamické síly způsobují chvění strojních zařízení a jejich okolí vznikají jednak vlivem vlastní pracovní činnosti strojů (např. u bucharu, sbíječky a podobně) a jednak následkem nepřesností výroby konstrukčních prvků (například excentrické síly nevyvážených rotujících těles).

Snižování chvění zaviněného nepřesnostmi výroby cestou zvyšování nároků na přesnost a pečlivost při výrobě, montáži a údržbě zařízení má své praktické meze. Jsou zaviněny neúměrným růstem nákladů na výrobu a údržbu zařízení se zúženými tolerancemi.

Omezení chvění vyvolaného pracovní funkcí strojů lze dosáhnout jen změnou podstaty technologických postupů (zejména při rozrušování, tváření nebo transportu materiálů). Je tedy nutno stroje, přístroje a člověka před nepříznivými účinky chvění izolovat.

2.0 Izolace chvění pružným uložením

2.1 Běžný způsob pružného uložení

Izolace proti chvění se používá za účelem omezení přenosu dynamických budících sil strojů na jejich základ, nebo k omezení kmitavých pohybů přenášených od chvějících se základů na chráněná zařízení na ně instalovaná. Mezi navzájem izolované části konstrukce, tj. mezi stroj jako zdroj budící síly a izolovaný základ, nebo mezi chráněný přístroj a kmitající základ se za účelem snížení chvění chráněného zařízení vkládá pružný element (izolátor). Vzniká tak soustava, která je z hle-

diska izolace vůči chvění jednoznačně určena tuhostí C použité pružiny a velikostí hmoty M zařízení uloženého na této pružině. Tato soustava je charakterizována vlastním rezonančním kmitočtem f_0 , závislým pouze na hmotě M a tuhosti C podle vztahu

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{M}}$$

V nadrezonanční oblasti, to je je-li kmitočet budících sil mnohem větší než rezonanční kmitočet mechanické soustavy f_0 , je izolační účinek pružného uložení soustavy vysoký. Setrvačná hmota M uloženého zařízení odporuje kmitavým silám, takže zařízení kmitá jen s malou amplitudou. Při malých deformacích pružného prvku se pak na druhou část konstrukce přenáší rovněž jen malá síla.

V rezonanční oblasti se budícími silami soustavě nucená energie hromadí a dochází tak k intenzivnímu rozkmitání celé soustavy.

Nelze-li zaručit, že se soustava během normálního provozu nevybudí do rezonance, je nutno záměrným tlumením odčerpávat tuto hromadící se energii. Tlumení se realizuje buď připojením zvláštního, např. kapalinového, nebo méně často elektrodynamického tlumiče paralelně k izolační pružině, a nebo konstrukcí pružného prvku z materiálu o potřebně vysokém vlastním tlumení, např. z vhodné pryže a podobně. Tlumení snižuje kmitání soustavy při rezonanci, avšak zároveň významně zhoršuje izolaci chvění v nadrezonanční oblasti kmitočtů.

Činitel přenosu budící síly se zdroje na izolovaný základ nebo přenosu výchylky z chvějícího se základu na chráněný přístroj závisí pouze na poměru ν kmitočtu budících sil f k rezonančnímu kmitočtu soustavy f_0 a na velikosti činitele tlumení k použitého tlumiče a je pro oba druhy přenosu stejně veliký.

Je-li činitel přenosu ε definován jako poměr síly přenesané izolátorem na podložku (základ) k síle budící, resp. jako poměr výchylky kmitů izolovaného zařízení k budící výchylce základu, pak pro pružné uložení platí:

$$\varepsilon^2 = \frac{1 + 4\nu^2 \frac{k^2}{p}}{(1 - \nu^2)^2 + 4\nu^2 \frac{k^2}{p}} \quad (1)$$

kde

$$\nu = \frac{f}{f_0} \quad a$$

k_p je poměrný útlum definován vztahem

$$k_p = \frac{k}{2\sqrt{CM}}$$

Velmi nízká hodnota přenosu v nadrezonanční oblasti ($\nu \gg 1$) u netlumených, resp. velmi málo tlumených ($k_p \approx 0$) soustav svědčí o vysokém izolačním účinku pružného uložení. Názorně to ilustruje křivka a na obr. 2.

V rezonanční oblasti ($\nu \approx 1$) však vlivem kumulace energie nabývá přenos nebezpečně vysokých hodnot. Zvýšením tlumení lze hodnotu přenosu při rezonanci radikálně snížit, avšak izolační účinek pružného uložení v nadrezonanční oblasti se tím silně znehodnotí. Křivka b na obrázku 2 znázorňuje přenos silně tlumeného uložení ($k_p = 1,346$), při němž je rezonanční efekt podstatně omezen ($\varepsilon_{\max} \approx 1,094$) na úkor zhoršení izolační schopnosti v oblasti nadrezonanční.

Vlastností, provedení a použití pružného uložení jsou podrobněji popsány např. v /1/ nebo /2/.

2.2 Selektivně tlumené pružné uložení

Jak vyplývá z rozboru vlastností pružně uložených soustav, lze požadavku účinného omezení chvění v nadrezonanční oblasti kmitočtů úspěšně vyhovět použitím netlumeného pružného izolátoru.

Je-li však kmitočet budících sil během normálního provozu zařízení proměnný, a nebo obsahují-li budící síly větší množství náhodně rozložených složek různých kmitočtů, pak nelze zajistit, že se taková soustava nevybudí do nebezpečné rezonanční oblasti kmitočtů. Aplikací klasických způsobů tlumení však nemůžeme zaměřit ohrožení takové soustavy při rezonanci, nechceme-li se vzdát přednosti účinné izolace chvění v nadrezonanční oblasti skýtaných netlumeným pružným uložení. V těchto případech se dobře uplatní způsob selektivního tlumení chvění /3/, u kterého velikost útlumu závisí na kmitočtu budících sil. Vyznačuje vysoký tlumicí účinek při rezonanci, zatímco v nadrezonanční oblasti kmitočtů nesnižuje izolační účinek netlumených pružně uložených soustav.

V zájmu potřebného ovlivňování kmitočtové charakteristiky útlumu lze k selektivnímu tlumení chvění s výhodou využít elektrodynamických tlumičů. Tlumení vzniká elektrodynamickými sílovými účinky mezi magne-

tickým polem magnetu a vodiči cívky kolnými k magnetickému poli, protékající elektrickým proudem přímoúměrným relativní rychlosti pohybu magnetu vůči vodičům cívky, kolné k magnetickému poli i k vodičům cívky zároveň. Protože síla vznikající mezi magnetem a cívkou je úměrná elektrickému proudu protékajícímu cívkou, lze vhodnou volbou závislosti proudu na kmitočtu přímo ovlivňovat i kmitočtovou závislost útlumu.

Požadovanou závislost proudu na kmitočtu s výrazně selektivním charakterem vykazuje například sériový rezonanční okruh. Princip řešení pružného uložení se selektivním tlumením pomocí sériového rezonančního obvodu je znázorněn na obr. 1. Vzájemným kmitavým pohybem cívky vůči magnetu v cívce indukovaná elektromotorická síla protlačuje sériovým rezonančním okruhem proud, který vyvolává vznik elektrodynamické tlumicí síly mezi magnetem a cívkou, působící proti směru jejich vzájemného pohybu. Přenos takové selektivně tlumené soustavy je dán vztahem:

$$\xi = \frac{v^2 H + v_e^2}{v^2 H + v_e^2 + v^2 (v^2 - v_e^2)} \quad (2)$$

kde

$$v_e = \frac{f_e}{f_0}$$

f_e je elektrický rezonanční kmitočet sériového rezonančního okruhu
 H je parametr závislý zejména na konstrukčních vlastnostech elektrodynamického tlumiče:

$$H = \frac{A}{CL} - 1$$

kde

L je indukčnost cívky elektrického rezonančního obvodu

C je tuhost (1) použité pružiny a

A je součin elektrodynamických součinitelů transformací:

- rychlost - elektrické napětí
- el. proud - mechanická síla

Závislost přenosu (2) na kmitočtu je graficky znázorněna křivkou ξ na obr. 2. Byla vypočtena pro pružné uložení se selektivním tlumením o parametrech:

$$H = 1$$

$$v_e = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Z průběhu této křivky je zřejmé, že izolace chvění pružným uložením s použitím selektivního tlumiče je v nadrezonanční oblasti účinnější než u netlumené soustavy (křivka a), při čemž útlum selektivního tlumiče při rezonanci ($\varepsilon_{\max} = 1,094$) je stejně účinný jako útlum velmi intenzivního klasického tlumení (křivka b).

Způsob selektivního tlumení chvění spojuje v sobě výhody účinného omezení nebezpečí rozkmitání soustavy při rezonanci, jaké vykazuje intenzivní klasické neselektivní tlumení, s vysokým chvění izolujícím účinkem v nadrezonanční oblasti kmitočtů vykazovaným netlumenými pružně uloženými soustavami. Další výtahy, z obr. 2 patrnou, předností tohoto řešení je i skutečnost, že při vhodném naladění elektrodynamického tlumiče lze kmitočet maximálního přenosu chvění posunout do podrezonanční oblasti mechanické soustavy, a tím vlastně snížit výsledný rezonanční kmitočet celé soustavy.

Přednosti popisovaného selektivního tlumení chvění ve srovnání s účinky dosud používaných neselektivních způsobů jsou tím výraznější, čím vyšší je selektivita elektrodynamického tlumiče. Vztah (2) pro přenos parametrů chvění byl odvozen za předpokladu použití bezztrátových prvků elektrického rezonančního obvodu. V praxi realizovatelné indukční cívky však mají nenulový elektrický odpor, který snižuje jejich kvalitu, a tím i selektivitu rezonančních obvodů. A požadavky na konstrukci tlumiče, sledující dosažení potřebných elektrodynamických parametrů, jsou v rozporu se snahou o snižování elektrických obvodových ztrát. Proto řešením selektivního tlumení chvění podle obr. 1 nelze dosáhnout odvozených teoretických výsledků.

Tento nedostatek se dá snadno odstranit řešením tlumiče dle obrázku 3. Tlumicí síla vzniká opět elektrodynamickými silovými účinky mezi magnetem a tlumicí cívkou protékanou výstupním proudem selektivního zesilovače buzeného vstupním elektrickým napětím vznikajícím ve snímací cívkě, pohybující se v magnetickém poli současně s tlumicí cívkou.

Náhrada klasického rezonančního obvodu aktivními selektivními obvody dává konstruktérům větší možnosti návrhu potřebného průběhu kmitočtové charakteristiky libovolné strmosti. Aktivní selektivní obvody jsou už dnes dostatečně teoreticky zvládnuté i prakticky rozšířené a při jejich realizaci pomocí integrovaných obvodů lze dosáhnout velmi vysoké provozní spolehlivosti.

3.0 Závěr

Popsané selektivní tlumení chvění umožňuje realizovat pružné uložení strojů a zařízení s vysokým, chvění izolujícím účinkem v nadrezonanční oblasti kmitočtů bez nebezpečí ohrožení soustavy intenzivními kmity při jejím vybudzení do rezonance. Tento způsob izolace chvění se dobře uplatní zejména v případech, kde budicí síly obsahují větší množství náhodně rozložených složek o různých kmitočtech i v případech, kde během normálního provozu zařízení je kmitočet budicích sil náhodně proměnný, např. u strojů a zařízení přepravujících, nebo jinak zpracovávajících nehomogenní a kusovitý materiál, jako jsou důlní dobývací a transportní stroje, zemědělské stroje a podobně.

Literatura

- /1/ Půst L., Lada M.: Pružné ukládání strojů, SNTL Praha, 1965
 - /2/ Harris C.M., Crede Ch.E.: Shock and Vibration Handbook, Mc. Graw - Hill, Inc., New York, 1961
 - /3/ Zborek A.: Způsob selektivního tlumení chvění, PV 7558 - 76
- Recenzoval: Ing. František Felcman

S h r n u t í

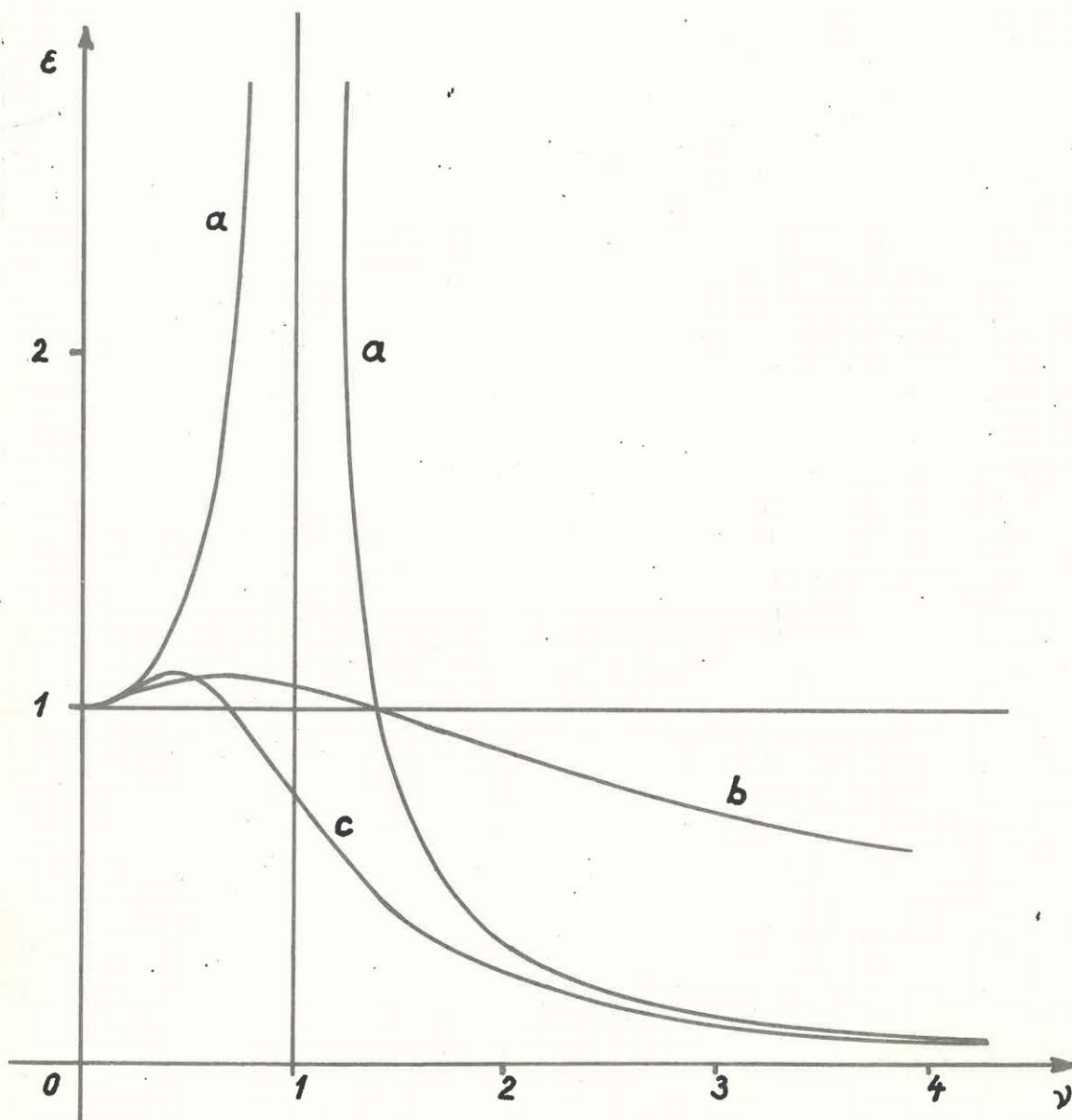
Selektivní tlumení chvění

Článek popisuje nový způsob selektivního tlumení chvění, vhodného k tlumení chvění pružně ukládaných strojů a zařízení za účelem omezení nebezpečných kmitů při rezonanci. Popsané selektivní tlumení chvění ne-
snižuje vysoký chvění izolující účinek pružného uložení v nadrezonanční oblasti kmitočtů. Je uvedena a stručně odvozena podstata činnosti tlumení i jeho výhody proti dosud známým způsobům a je naznačena možnost realizace a oblastí využití nového způsobu tlumení.

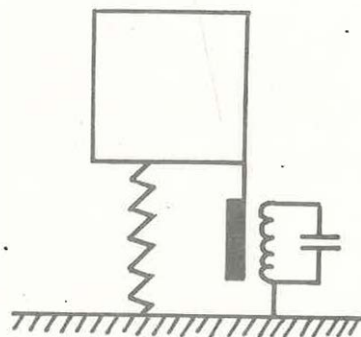
Р е з ю м е

Селективное демпфирование вибрации

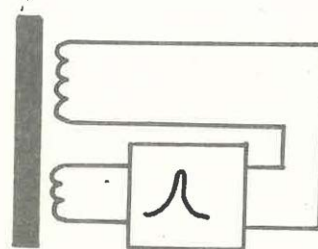
Описывается новый способ избирательного подавления вибрации, обеспечивающий эффективную амортизацию вибрации при работе машин и механизмов с упругой посадкой и ограничивающий амплитуды опасных колебаний в случае наступления резонанса. Предложенный метод несколько не уменьшает вы-



Obr. 2 - Kmitočtová závislost přenosů chvění



Obr. 1 - Selektivně tlumené pružné uložení



Obr. 3 - Selektivní elektrodynamický tlumič s aktivními obvody