

Určení kritických míst testovacího standu s lineárním motorem a jeho optimalizace

Ing. Eduard Stach

Vedoucí práce: Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.

Abstrakt

Testovací stand s lineárním motorem vykazuje nadměrné vibrace způsobené skoky zrychlení a rychlosti. Pro optimalizaci standu vedoucí k potlačení nežádoucích vibrací byl vytvořen výpočetní model. Byly identifikovány kritické tvary kmitání, nepříznivě se projevující v řízení pohonů a byly navrženy konstrukční úpravy vedoucí ke zvýšení frekvencí kritických vlastních tvarů a snížení jejich amplitud.

Klíčová slova

Optimalizace struktury, určení kritických míst struktury

1. ÚVOD

Dynamické vlastnosti mechanické stavby pohonu rozhodujícím způsobem ovlivňují dynamiku řízení a možnost nastavení parametrů regulátorů. Ve vztahu k řízení pohonu je významnou charakteristikou frekvenční přenosová funkce X/F mezi posunem bodu na odměřování X a reakční silou na motoru F . Z teorie regulace je přitom známo, že charakteristika tohoto přenosu má přímou souvislost s možností naladění parametrů regulace pohonu. Vlastností, která je limitujícím faktorem v dosažitelné dynamice pohonu je první propad v amplitudové charakteristice frekvenčního přenosu X/F , označovaný jako tzv. antirezonanční frekvence ω^* . Při antirezonanční frekvenci dochází ke kmitání mechanické soustavy při zablokovaném motoru, což je stav, který není schopno odměřování polohy zaznamenat a tudíž řízení účinně potlačit.

Pro různě složité modelové náhrady mechanických částí pohonu byly odvozeny vztahy, z nichž lze předběžně usuzovat na hodnoty dosažitelného zesílení K_v v polohové smyčce přímo z velikosti antirezonanční frekvence ω^* . Rozsah dosažitelných hodnot K_v leží v pásmu:

$$K_{vBEZ} [\text{m/min/mm}] = 0,044 \omega^* [\text{Hz}] \quad (1)$$

kde K_{vBEZ} značí bezpečně dosažitelnou hodnotu a

$$K_{vMAX} [\text{m/min/mm}] = 0,1 \omega^* [\text{Hz}] \quad (2)$$

kde K_{vMAX} značí maximálně možnou hodnotu.

Nižší bezpečně dosažitelná hodnota platí pro více tělesový poddajný systém, horní hodnota je odvozena na základě modelové náhrady mechanické stavby pohonu jednoduchým dvouhmotovým systémem. Důležitým parametrem ovlivňujícím dosažitelnou dynamiku řízení pohonů je ovšem tlumení významných tvarů kmitání mechanické stavby stroje. Při vyšším útlumu kritických frekvencí je tak např. možno dosáhnout nastavení zesílení regulátoru polohy blížíící se hornímu limitu v uvedeném pásmu. [1]

Přímé lineární motory představují posuvové systémy s vysokou dynamikou, která je rozhodujícím kritériem pro nasazení v aplikacích vysokorychlostního obrábění. Pohon

lineárním motorem neobsahuje vložené převody, a tudíž řízení motoru vyžaduje rychlé regulace proudu a vysokou hodnotu zesílení v polohové vazbě K_v . S vyšší hodnotou K_v souvisí zvýšené propustné pásmo pohonu, díky čemuž jsou přímé pohony schopny zachytit malé nespojitosti v jeho řízení. Struktura stroje je tak pohonem buzena i v oblasti vyšších frekvencí. [2]

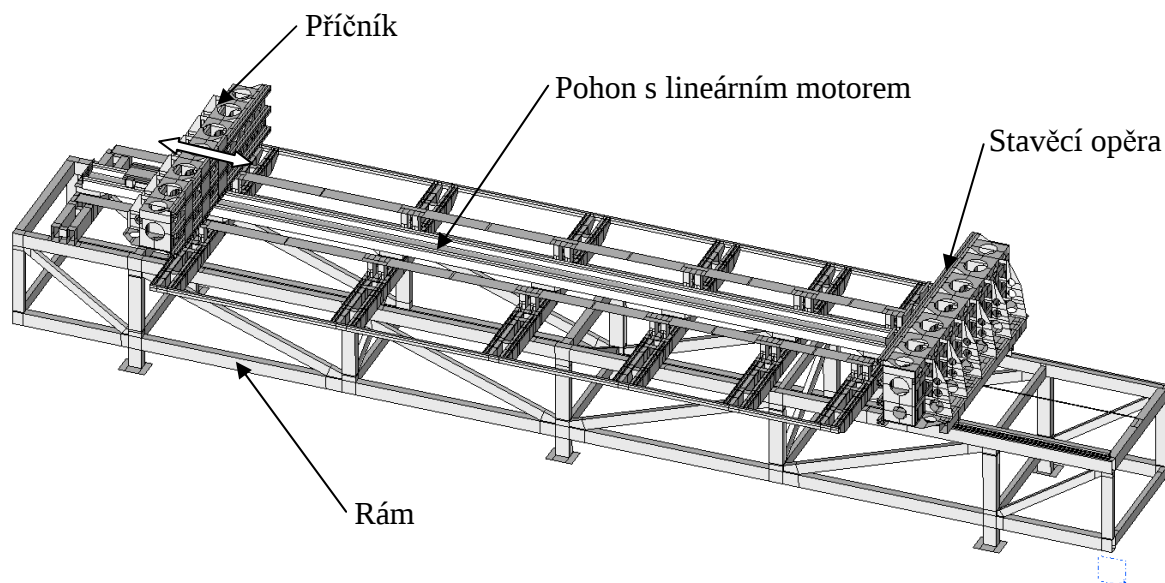
Tento referát je zaměřen na určení nepříznivých vlastních tvarů struktury reálného standu, které omezují využití lineárního motoru pod limit jeho dynamických možností. Nalezené kritické body budou optimalizovány a přínosy jednotlivých úprav hodnoceny vzhledem k regulaci pohonu.

2. POPIS STANDU

2.1. Charakteristika

Jednouúčelový testovací stand byl postaven za účelem měření pasivních odporů teleskopických krytování obráběcích strojů. Původně byl vybaven řemenovým pohonem, který byl později nahrazen lineárním motorem (o zdvihu 5,6 m) se dvěma primáry a společným sekundárem. Struktura standu se skládá z rámu, svařence z tenkostěnných profilů o tloušťce stěny 2 až 3 mm, z příčnicku namontovaném na pohyblivých primárech a stavěcí opěry namontované na rámu. Příčnicku a opěra jsou svařence z plechů tloušťky 2 až 4 mm. Testovací stand byl navržen tak aby pojal teleskopické kryty různých velikostí, které se montují mezi stavěcí opěru a pohyblivý příčnicku (Obr. 1).

Konstrukce standu zůstala beze změny a přesto, že mohla být vyhovující pro řemenový pohon, u pohonu s lineárním motorem se stává limitujícím faktorem dosažitelné dynamiky testovacího standu.



Obr. 1. Struktura současné stanice s lineárním motorem

2.2. Rozsah zlepšení

Původní stavba rámu testovacího standu není vyhovující pro použití pohonu s lineárním motorem a je nutná jeho modifikace. Frekvence významných vlastních módů by měly být zvětšeny. Pólová rozteč sekundáru lineárního motoru, která je 32 mm [5], spolu s požadovanou maximální rychlostí posuvu 2 m/s poukazuje na frekvenci alternující přitažlivé síly mezi primárem a sekundárem lineárního motoru na 62,5 Hz. Tyto proměnlivé přitažlivé síly fungují jako buzení ve vertikálním směru (osa Y). Důsledkem toho je důležitou charakteristikou dynamických vlastností standu nejen přenosová funkce X/F v horizontálním

směru, ale také přenosová funkce Y/F mezi posunutím na motoru Y a reakční silou na motoru ve stejném bodě F ve vertikálním směru.

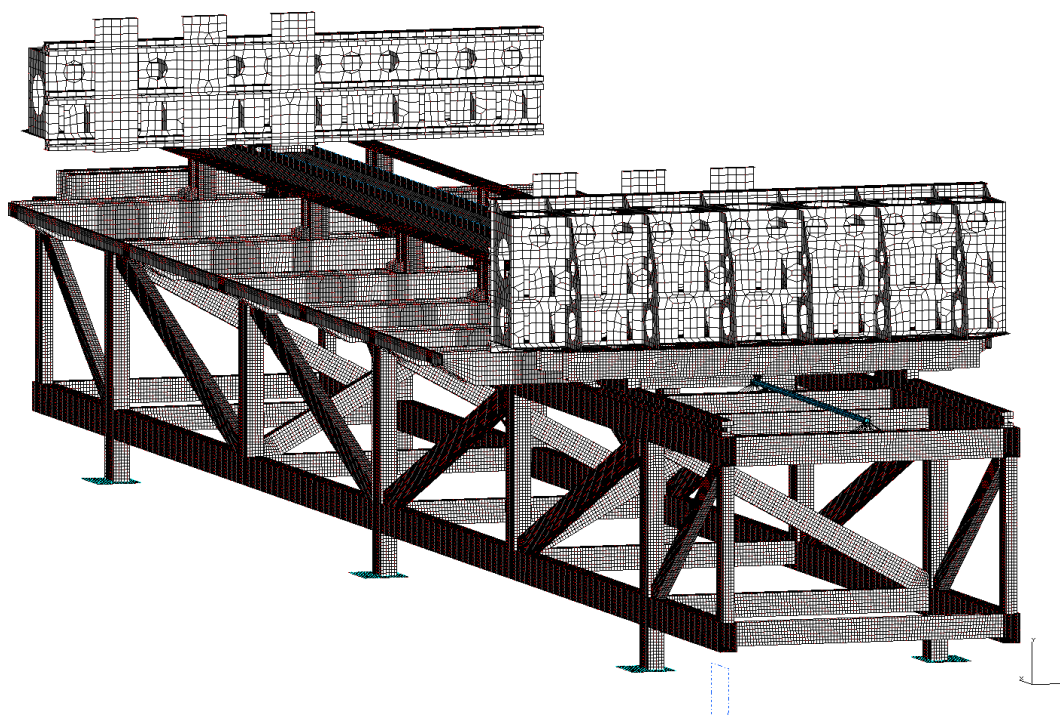
3. MATEMATICKÝ MODEL

3.1. MKP

Model testovacího standu byl sestaven jako MKP sestava v programu NX I-deas 6.1. Na základě existující objemové geometrie standu byla vytvořena zjednodušená skořepinová geometrie, ve které byly zanedbány některé konstrukční detaily jako například zaoblení hran a malé otvory, jak je vidět z Obr. 1. Zjednodušená skořepinová geometrie byla připravena pro mapované síťování. Některé součásti sestavy standu byly síťovány objemovými prvky, ale většina struktury byla síťována skořepinovými prvky. MKP model testovacího standu je vidět na Obr. 2.

Během síťování byl kladen důraz na kvalitní reprezentaci vlastností rámu. Objemovými prvky byla vytvořena lineární mapovaná síť z prvků typu THIN SHELL s délkou hrany 10 mm. Příčník a stavěcí opěra byly vytvořeny z lineárních prvků typu THIN SHELL s délkou hrany 30 mm. Pohonná jednotka s lineárním motorem, skládající se z duralového základu, sekundáru, primárů, lineárního vedení a systému odměřování polohy byla také vytvořena z lineárních elementů typu THIN SHELL s délkou hrany 10 až 30 mm.

Každý vozík lineárního vedení v pohonné jednotce byl nahrazen šesti za sebou řazenými lineárními pružinami s odpovídajícími linearizovanými tuhostmi v ose X, Y, Z. Vozík HGH20H s lehkým předpětím vykazuje ve směrech Y a Z tuhost $560 \text{ N}/\mu\text{m}$ [3].



Obr. 2. MKP model testovací stanice

Základ pohonu s lineárním motorem je zhotoven z duralu, všechny ostatní části struktury standu byly vyrobeny z oceli. Materiály primární a sekundární části lineárního motoru jsou v MKP modelu reprezentovány jako ocelové.

MKP sestava modelu standu byla vytvořena ve třech konfiguracích za účelem prozkoumání dynamických vlastností standu v různých polohách:

1. Poloha – příčník je na začátku zdvihu
2. Poloha – příčník je uprostřed zdvihu
3. Poloha – příčník je na konci zdvihu

3.2. Popis dynamických vlastností standu

Dynamické vlastnosti testovacího standu s lineárním motorem jsou vyjádřeny jako přenosové funkce mezi charakteristickými body na posuvovém mechanismu ve směru osy X a Y. Frekvenční přenosová funkce může být vytvořena pomocí z harmonické analýzy v MKP, ale tento postup je časově velmi náročný a neumožňuje možnost vyhodnocení velkého frekvenčního rozsahu v rámci jednoho výpočtu. Proto byl zvolen postup transformace popisu dynamických vlastností poddajného tělesa do stavového prostoru. Tuto transformaci lze provést dvojím způsobem. První je založen na znalosti matic hmotnosti, tuhosti a tlumení mechanického systému, druhý vychází z pohybové rovnice soustavy přepsané do modálních souřadnic a řešení úlohy nalezení vlastních vektorů a frekvencí. Předností postupu sestavování matic stavového prostoru na základě modální analýzy je možnost výběru jen takových vlastních tvarů kmitání, které se významněji podílejí na určité přenosové funkci. Kromě toho postačuje popis ve stavovém prostoru založit jen na vlastních vektorech souvisejících s těmi uzly MKP sítě, v nichž jsou přenosové funkce hledány. Tímto způsobem provedená redukce popisu vede na malé rozměry matic stavového prostoru, s nimiž lze dále dobře pracovat např. v prostředí Matlab/Simulink. Přitom je ale zachována kvalita původního MKP modelu, který není redukován ve smyslu snižování počtu jeho geometrických stupňů volnosti. [4]

Tlumení je do modelu zadáno prostřednictvím hodnot proměnných modálních útlumů pro jednotlivé vlastní frekvence kmitání. V modelu standu bylo nastaveno konstantní poměrné tlumení 2 procenta pro všechny vlastní tvary.

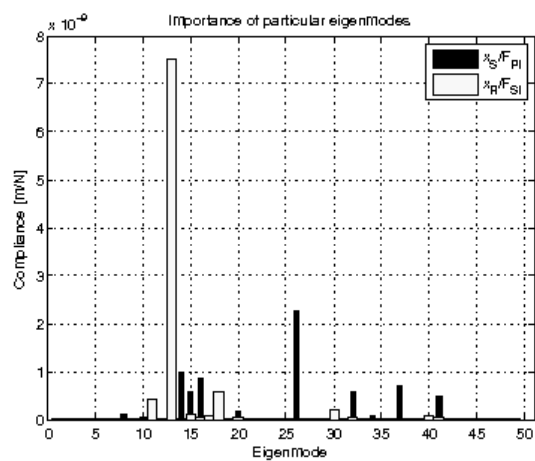
4. VLASTNOSTI PŮVODNÍ STRUKTURY STANDU

K charakteristice dynamických vlastností standu bylo zvoleno vyjádření frekvenčních přenosových funkcí v místech pohonu a odměřování X_R/F_{SI} , mezi posunutím bodu na koleji lineárního vedení s magnetickou měřicí páskou X_R a silou působící na bod na sekundáru lineárního motoru F_{SI} , X_S/F_{PI} mezi posunutím jezdce odměřování X_S a silou na pohyblivém primáru lineárního motoru F_{PI} , Y_{SI}/F_{SI} mezi posunutím bodu na sekundáru lineárního motoru Y_{SI} a silou působící na stejný bod F_{SI} . Důležité vlastní módy byly určeny pomocí absolutních hodnot přenosových funkcí v jednotlivých konfiguracích.

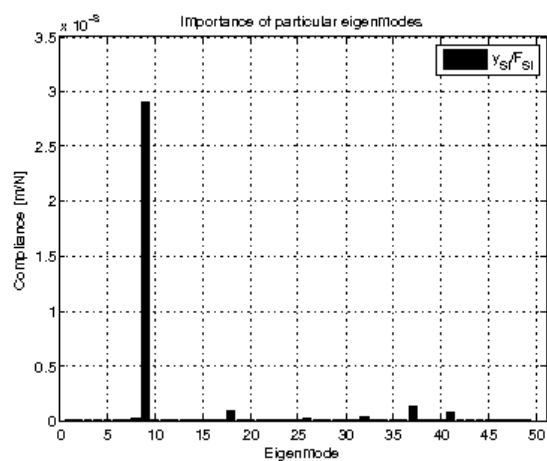
Z vyhodnocení dynamické poddajnosti přenosové funkce X_R/F_{SI} na jednotlivých vlastních tvarech (Obr. 3) je vidět, že vlastní tvar s největší dynamickou poddajností je 13. na frekvenci 54 Hz, jehož tvar je na Obr. 5. Méně významný je 26. vlastní tvar na frekvenci 77 Hz ve směru X náležící přenosové funkci X_S/F_{PI} jehož tvar je vidět na Obr. 6. Vyhodnocení dynamické poddajnosti přenosové funkce Y_{SI}/F_{SI} v jednotlivých vlastních tvarech na Obr. 4 ilustruje největší dynamickou poddajnost 9. strukturálního vlastního tvaru a měl by být posunut nad frekvenci buzení při maximální posuvové rychlosti.

Na Obr. 5 je vidět paralelogramový pohyb rámu testovacího standu, který má významný vliv na pohon standu v každé poloze příčníku.

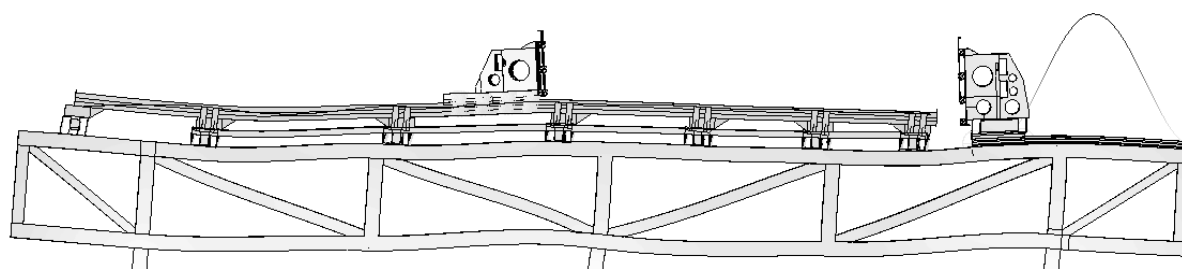
Významnost průhybu pohonné jednotky a rámu, na Obr. 6, je závislá na poloze příčníku vůči vertikálním nosníkům konstrukce. Tvar kmitání kritický pro buzení rámu standu ve směru Y je zobrazen na Obr. 7, je zde viditelný propad příčníku spolu s průhybem pohonné jednotky a rámu.



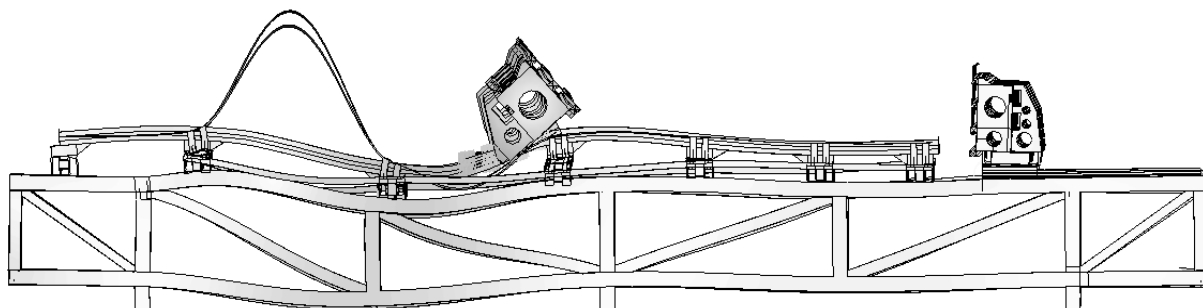
Obr. 3. Důležitost jednotlivých vlastních tvarů ve směru osy X v druhé poloze



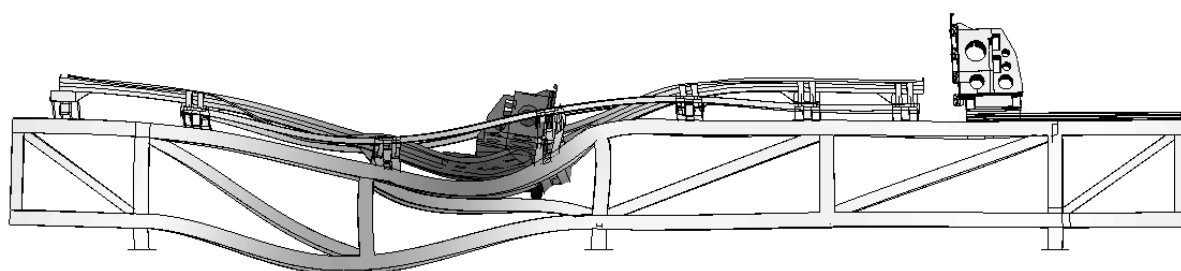
Obr. 4. Důležitost jednotlivých vlastních tvarů ve směru osy Y v druhé poloze



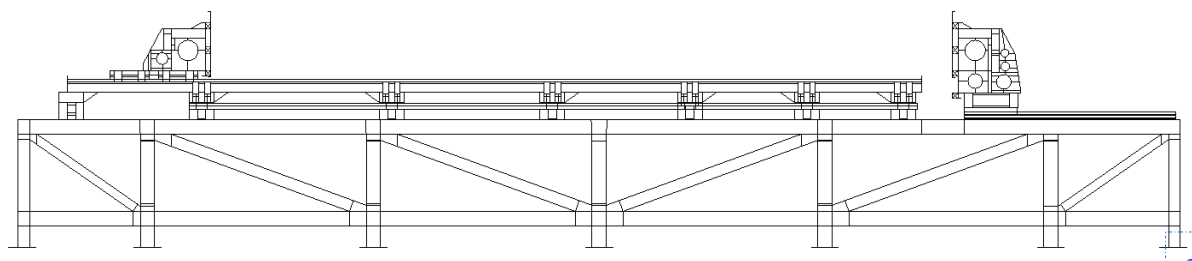
Obr. 5. 13. Vlastní tvar přenosové funkce X_R/F_{SI}



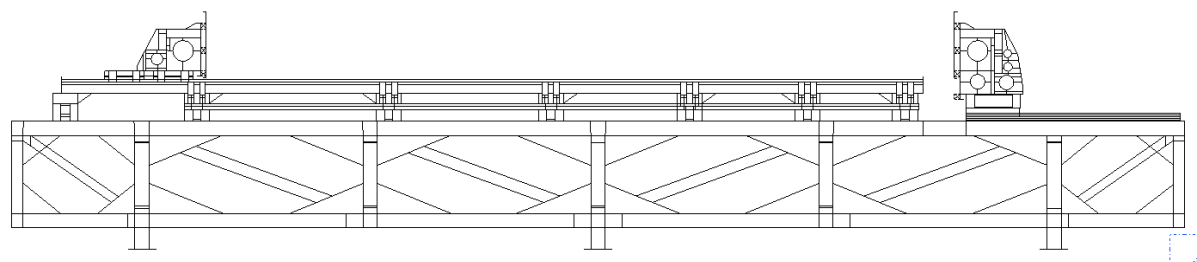
Obr. 6. 26. Vlastní tvar přenosové funkce X_S/F_{PI}



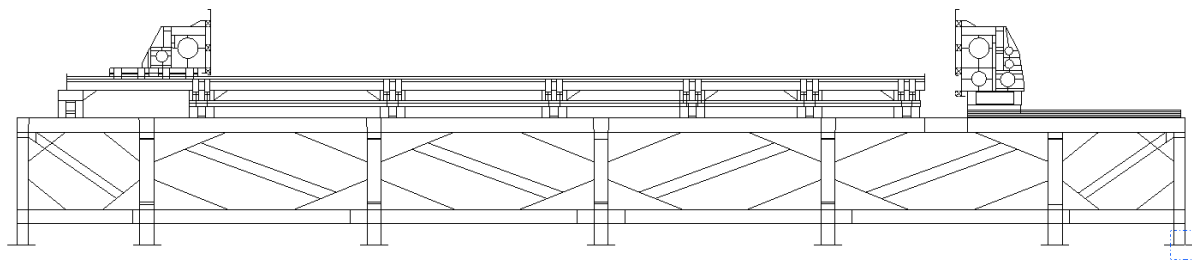
Obr. 7. 9. Vlastní tvar přenosové funkce Y_{SI}/F_{SI}



Obr. 8. 1. Modifikace struktury standu



Obr. 9. 2. Modifikace struktury standu



Obr. 10. 3. Modifikace struktury standu

5. OPTIMIZACE

5.1. Popis úprav

Cílem úprav testovacího standu je posunutí frekvencí důležitých vlastních tvarů na vyšší frekvenci, což následně umožní lepší nastavení regulátoru pohonu. Za tímto účelem bylo zpracováno několik modifikací vyztužení struktury standu.

První modifikace eliminuje posuny struktury standu přidáním nosníků spojujících spodní část standu se základem na osmi dalších místech (Obr. 8).

V druhé modifikaci jsou do struktury standu zakomponována podélná žebra, jak je zobrazeno na Obr. 9. Tato úprava si klade za cíl snížení vlivů paralelogramového pohybu rámu na regulaci pohonu standu.

Třetí modifikace kombinuje dvě předchozí varianty, výsledná struktura testovacího standu je znázorněna na Obr. 10.

6. Výsledky analýzy optimalizovaných struktur

Z porovnání přenosových funkcí X_R/F_{SI} pro jednotlivé varianty úprav původní verze konstrukce standu (Obr. 11) vyplývá, že dochází k výrazným posunům kritické vlastní frekvence z výchozí hodnoty 53,5 Hz. Třetí úprava vykazuje posun této frekvence o 20,8 Hz na výslednou hodnotu 74,3 Hz a snížení amplitudy 1,5 krát. Přenosové funkce X_R/F_{SI} mají ve všech polohách příčnicku velmi podobný průběh.

Z porovnání přenosových funkcí X_S/F_{PI} pro jednotlivé varianty úprav původní verze struktury standu je viditelné, že dochází k rozličným posunům kritické vlastní frekvence z výchozí hodnoty v závislosti na poloze příčnicku.

V první poloze příčnicku je kritická vlastní frekvence posunuta z výchozí hodnoty 68 Hz o - 7 Hz, amplituda je snížena o 17 procent třetí úpravou struktury standu.

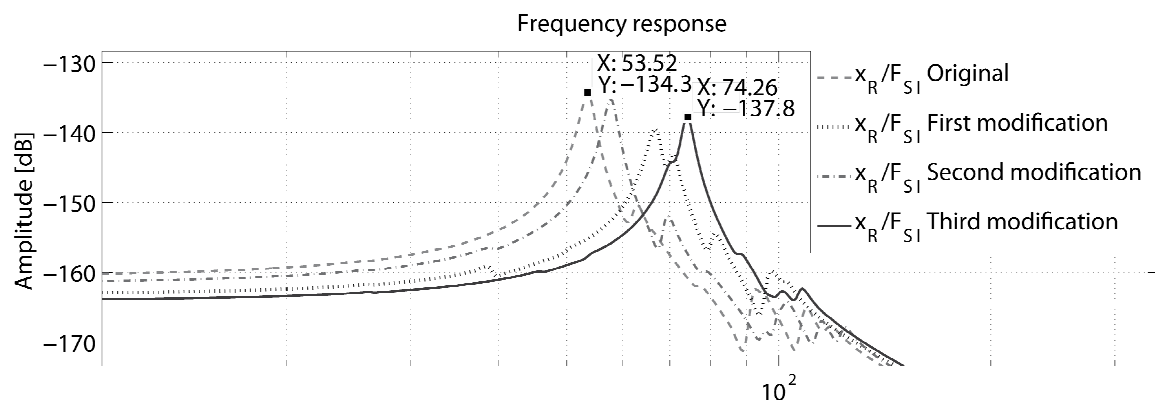
V druhé poloze příčnicku je kritická vlastní frekvence původní varianty (Obr. 12) posunuta z původní hodnoty 77 Hz o 10,5 Hz a amplituda 1,4 krát zvýšena třetí variantou úprav.

Ve třetí poloze příčnicku je kritická vlastní frekvence posunuta z původní hodnoty 87 Hz o 8 Hz a amplituda snížena o 3,5 procenta třetí variantou úprav.

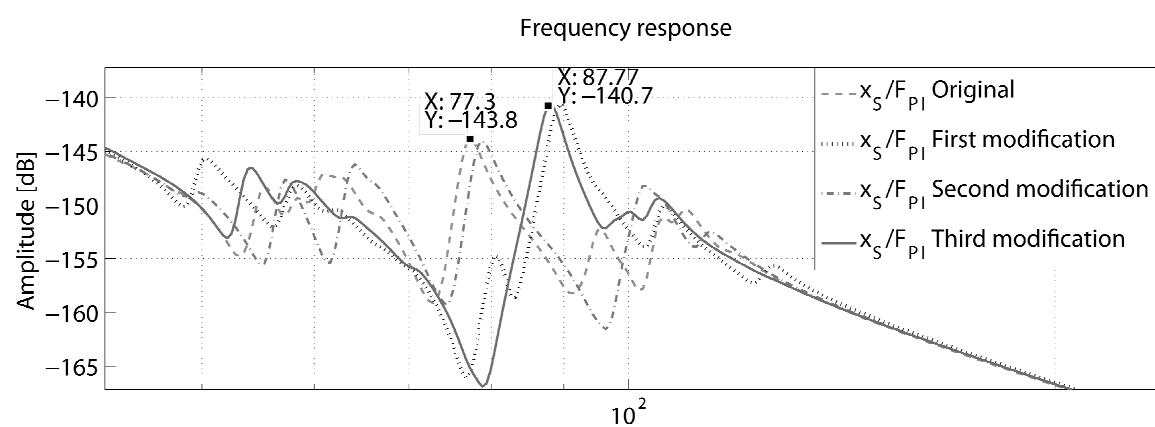
Porovnání přenosových funkcí Y_{SI}/F_{SI} pro jednotlivé varianty úprav původní verze konstrukce standu znázorňuje výrazný posun kritické vlastní frekvence v každé poloze příčnicku a každé úpravě.

V druhé poloze příčnicku je kritická vlastní frekvence (Obr. 13) výrazně posunuta z výchozí hodnoty 44,7 Hz na hodnotu 74,3 Hz náležící třetí variantě úprav.

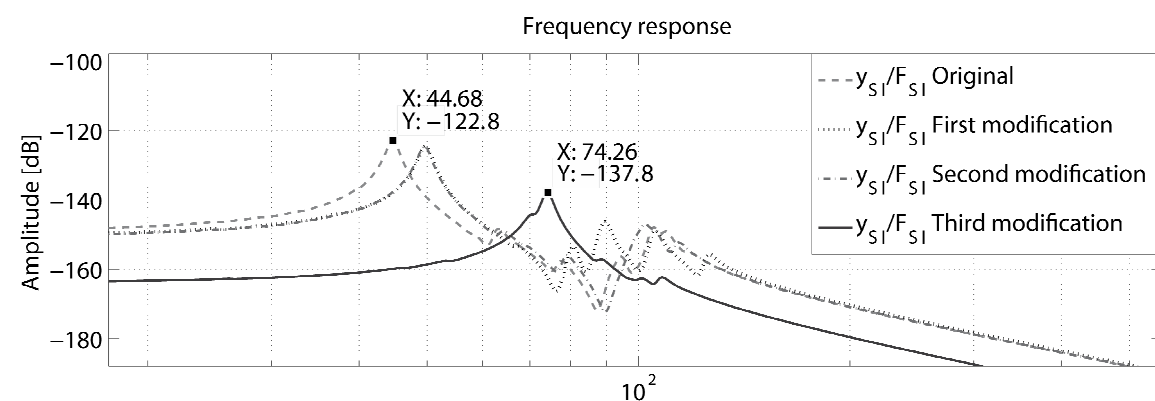
V první a druhé poloze příčnicku dochází k posunu kritické vlastní frekvence z původní hodnoty 30,3 Hz resp. 45,9 Hz na hodnotu 51,8 Hz resp. 52,1 Hz.



Obr. 11. Srovnání modifikací v 2. pozici pomocí FRF X_R/F_{SI}



Obr. 12. Srovnání modifikací v 2. pozici pomocí FRF of X_S/F_{PI}



Obr. 13. Srovnání modifikací v 2. pozici pomocí FRF of Y_{SI}/F_{SI}

7. ZÁVĚR

Přínosy jednotlivých variant jsou viditelné z přenosových funkcí znázorňujících zvýšení kritických vlastních frekvencí a několikanásobným snížením amplitudy kmitání ve většině variant.

Ve směru osy X, byl paralelogramový kritický tvar kmitání posunut na vyšší frekvenci a jeho amplitudy byly sníženy v každé pozici příčnicku. Třetí modifikace vykazuje nejvýznamnější zvýšení frekvence vlastního tvaru. Frekvence tvaru průhybu pohonné jednotky s lineárním motorem a rámu testovacího standu byla zvýšena v druhé a třetí pozici každou modifikací, přičemž první a třetí modifikace vykazovaly největší zvýšení kritické vlastní frekvence. Naproti tomu v první poloze příčnicku vykazuje zvýšení frekvence kritického vlastního tvaru pouze druhá modifikace.

Ve směru osy Y, je zvýšena frekvence kritického vlastního tvaru (propad příčnicku spolu s průhybem pohonné jednotky a rámu) a sníženy jeho amplitudy v každé poloze každé úpravy. Třetí úprava vykazuje nejvýznamnější zlepšení s frekvencí důležitého vlastního tvaru v poloze 2 nad frekvencí buzení přitažlivými silami vznikajícími přejezdy primáru přes pól páry sekundáru při maximální rychlosti. V poloze 1 a 2 nebylo této frekvence dosaženo i přes výrazné zlepšení dynamických vlastností struktury standu.

Na základě znázorněných dynamických charakteristik testovacího standu se ukazuje třetí modifikace jako nejlepší řešení. V případě její implementace na reálnou strukturu standu je třeba brát pouze zřetel na buzení přitažlivými silami mezi primárem a sekundárem, které omezuje oblast využitelných rychlostí posunu příčnicku o pásmo 1,6 až 1,7 m/s.

Seznam symbolů

ω^*	antirezonanční frekvence	[Hz]
K_v	zesílení v polohové smyčce	[m/min/mm]
K_{vBEZ}	bezpečně dosažitelné zesílení v polohové smyčce	[m/min/mm]
K_{vMAX}	maximální dosažitelné zesílení v polohové smyčce	[m/min/mm]
X_R	posunutí bodu na koleji lineárního vedení	[mm]
X_S	posunutí jezdce odměřování	[mm]
Y_{SI}	posunutí bodu na sekundáru pod prvním primárem	[mm]
F_{SI}	síla působící na sekundár v bodě pod prvním primárem	[N]
F_{PI}	síla působící na první primár	[N]
F_{SI}	posunutí bodu na sekundáru pod prvním primárem	[mm]

Seznam použité literatury

1. M. Ondráček, M. Sulitka, L. Novotný, J. Hovorka, T. Repák, P. Rybář, O. Horejš. *Roční zpráva „Seismicky vyvážený obráběcí stroj“ za rok 2008*. 2008. 110 s. Výzkumná zpráva VCSVTT V-08-062.
2. M. Sulitka, J. Vesely, T. Holkup, L. Novotný. *Závěrečná Zpráva Projektu 1.4.3*. 2005. 52 s. Závěrečná zpráva VCSVTT V-05-073.
3. HIWIN s.r.o. Kaštanová 34, Brno. *Lineární vedení*. 78 s. Dostupný z WWW: <http://www.hiwin.cz/cs/linearni-vedeni/pdf-download.html?id=6>
4. M. Sulitka, J. Vesely, P. Strakos, L. Novotny. *Závěrečná Zpráva Projektu 1.4.3*. 2006. 124 s. Závěrečná zpráva VCSVTT V-06-047.
5. HIWIN MIKROSYSTEM CORP. No. 1, 6th Road, Taichung, Taiwan. *Linear Motor System*. 70 s. Dostupný z WWW: <http://www.hiwin.com/pdf/lm/M99TE03-0705%28ebook%29.pdf>