

Ing. František F e l c m a n, VÚHU

Dynamické účinky na ocelové konstrukce kolesových rýpadel

1. Úvod do problematiky kmitání

Úkoly, před které je v současné době postaven SHR v těžbě uhlí a skrývky, vyžadují stále zvyšování výkonnosti a provozní spolehlivosti velkostrojů. Dynamickým účinkům na kolesových rýpadlech není dosud věnována patřičná pozornost, i když mnohdy ovlivňují výkonnost a spolehlivost velkostrojů rozhodujícím způsobem. V současné době se budeme stále častěji setkávat s úkolem, posoudit ocelovou konstrukci na dynamická zatížení, vyvolaná setrvačnými silami.

Nevhodné dynamické účinky vedou:

- ke snížení pevnosti strojních součástí vlivem cyklicky se měnícího namáhání;
- k zvýšení poruch na technologickém zařízení;
- k rozkmitávání konstrukce a tím nutnosti snižování výkonnosti rýpadla;
- k nepříznivému vlivu na elektrické zařízení stroje;
- k zhoršování hygienických podmínek obsluhy.

Požadavky na využití pevnosti materiálu a nároky na ekonomické provedení konstrukce většinou zvyšují citlivost konstrukce na dynamické vlivy. U kolesových rýpadel je nutno vzít v úvahu, že dynamické účinky jsou neoddělitelně spojeny s technologickou funkcí rýpadel.

Vyšetřování dynamicky namáhaných ocelových konstrukcí rýpadel vyžaduje komplexní přístup a kladé značné požadavky na teoretické znalosti. Současná připravenost k řešení zásadních otázek dynamiky velkostrojů je nedostatečná. Tento úvodní článek přiblíží zájemcům problémy, které je nutno v rámci dynamického řešení velkostrojů objasnit.

2. Dynamická charakteristika rýpadla

Nejprve několik základních pojmů. Jestliže kmitavý pohyb závisí jen na vlastnostech kmitavého systému (hmota, tuhosti pružin, tlumicí konstanty) a na počátečních podmínkách, hovoříme o vlastních kmitech. V technické praxi je však často tento systém (sám o sobě schopný po vychýlení z rovnovážné polohy kmitat) vystaven působení budících sil. Při působení harmonicky proměnné budící síly se kmitavý pohyb skládá ze dvou částí. První představuje pohyb s vlastní frekvencí, který se při nenulovém tlumení za určitou dobu zcela utlumí. Tato složka představuje přechodovou část kmitání - vlastní kmity. Druhou složkou je kmitavý pohyb s frekvencí budící síly, jehož amplituda se s časem nemění. Je to tzv. stacionární složka kmitání - vynucené kmity. Složka těchto kmitů není závislá na počátečních podmínkách.

a) Základní dynamická charakteristika rýpadla

Základní dynamická charakteristika je v podstatě spektrum vlastních frekvencí a tvarů kmitání. Důležité jsou zejména vlastní frekvence v okolí budících frekvencí, kde je nebezpečí vzniku rezonance. Jsou v podstatě dvě cesty k odstranění rezonance. Buď podle vlastní frekvence kmitání rýpadla upravíme budící frekvenci (např. zmenšíme otáčky kola), nebo provedeme zásah na konstrukci rýpadla, abychom mohli udělat větší "mezeru" mezi vlastními frekvencemi pro frekvenci budící. Na strojích v provozu obvykle budeme postupovat prvním způsobem, který je po teoretické stránce jednodušší. U tak složitých strojů, jakými jsou kolesová rýpadla, bude spektrum vlastních frekvencí vždy velmi husté. Proto bude nutné především sledovat, aby se do rezonance nedostaly rozhodující tvary kmitání. Velikost potřebného odstupu vlastní frekvence od budící zůstává zatím otázkou otevřenou.

Některé ocelové konstrukce lze vyšetřovat bez vlivu tlumení, u jiných bychom dostali zkreslené výsledky. Nosné konstrukce typu kelesových rýpadel mají poměrný útlum řádu 10^{-2} , což jsou hodnoty, které nemohou výrazně ovlivnit vlastní frekvence, proto tlumení obvykle zanedbáváme.

b) Vybuzení vlastních frekvencí

Z teorie je známo, že kmitavý pohyb, vybuzený impulsem síly, bude mít frekvenci a periodu vlastního kmitání. Rýpadlo je ve skutečnosti prostorový kmitající systém. Z praktických důvodů se však při měřeních vybuzuje zvlášť kmitání stroje pro vertikální rovinu symetrie horní stavby a zvlášť pro horizontální rovinu.

Impuls k rozkmitání horní stavby lze vyvodit např.:

- přetržením měrné tyčky tahem buldozeru jak pro horizontální, tak i pro vertikální rovinu;
- spouštěním kelesového výložníku a jeho prudkým zabrzděním (pro vertikální rovinu);
- otáčení horní stavby rýpadla a jejím náhlým zabrzděním (pro horizontální rovinu);
- impulsem raketových motorků, používaných ve stavebnictví k dynamickým zkouškám mostů (v kterémkoliv směru dle nastavení motorků).

c) Vliv parametrů rýpadla na vlastní frekvenci

Kolesová rýpadla při činnosti mění své parametry (zdvih a výsuv kelesového výložníku, vzájemná poloha kelesového a nakládacího výložníku atd.). Tyto nutné technologické pohyby ovlivňují více či méně vlastní frekvenci konstrukce. Některé předpokládané závislosti lze vyslovit již nyní.

Zaseuváním kelesového výložníku se frekvence vlastního kmitání bude zvyšovat jak v horizontální, tak i ve ver-

tikální rovině, protože kmitající soustava se při zasouvání ztužuje.

Se zvětšující se výškou kola nad terénem se hodnoty vlastních frekvencí ve vertikální rovině zvyšují, protože délka lan se zmenšuje.

Nejnižší vlastní frekvenci lze očekávat ve vodorovné rovině, protože v tomto směru je lanový závěs kolesového výložníku značně poddajný.

Dopravovaný materiál nebude mít na vlastní frekvence výrazný vliv, protože poměr jeho hmotnosti vůči hmotnosti konstrukce rýpadla je malý.

Poddajnost spodní stavby rýpadla a zeminy, která změkčuje uložení horní stavby rýpadla, bude hodnoty vlastních frekvencí zmenšovat.

Ideální by bylo sledovat změny vlastní frekvence na pohybu těžiště rýpadla, který v sobě zahrnuje veškeré možné kombinace manipulačních pohybů.

3. Budící frekvence a jejich zdroje

Budící síly vznikají buď pohybem rýpadla samotného, nebo při pohybu nevyvážených hmot. Nevyváženost je jednak úmyslná z funkčních důvodů (záběr korečků kola), nebo neúmyslná, vznikající z nedokonalosti výrobního charakteru (nevyvážené válečky na pásovém dopravníku, otáčení horní stavby rýpadla po nerovné kulové dráze).

Budící síly jsou vnější síly proměnné v čase, které působí na konstrukci a vyvolávají její kmitání. Někdy bychom určili velikost budících sil poměrně přesně, jindy se dá jejich průběh vyjádřit matematicky velmi obtížně. Potom zjišťujeme budící síly experimentálně.

Harmonicky proměnné síly zpravidla vznikají periodickými pohyby rotačních částí. Nejvýznamnější periodická síla

na kolesovém rýpadle vzniká záběrem korečků. Frekvenci budící síly na kolese určíme ze vztahu:

$$f_b = \frac{n_k \cdot z}{60}$$

kde: f_b frekvence budící síly /Hz/

n_k otáčky kola /min⁻¹/

z počet korečků (včetně mezibřítů).

V následující tabulce jsou budící frekvence na kolese u rýpadel používaných v SHR.

Rýpadlo	I. rychlost	II. rychlost	III. rychlost
K 800	0,53 Hz	0,67 Hz	-
K 300 B	0,65 Hz	0,90 Hz	-
KU 300/1-6, 8-16	0,84 Hz	1,00 Hz	1,28 Hz
KU 300/7	0,79 Hz	0,93 Hz	-
KU 300/18-22	0,88 Hz	1,01 Hz	1,31 Hz
KU 800/1	2,05 Hz	2,48 Hz	-
KU 800/5	1,53 Hz	1,85 Hz	-
KU 800/6-7, 9-11	1,64 Hz	1,98 Hz	-
KU 800/3, 8-R	1,15 Hz	-	-

Rozhodující význam u periodických budících sil mají nejnižší harmonické složky, zatímco další vyšší harmonické podstatně dynamickou charakteristiku neovlivňují.

Některé budící síly jsou zcela obecnou funkcí času. S těmito neperiodickými silami se setkáváme jako s výsledkem náhlého uvolnění energie (např. nárazy při kráčení rýpadel, kusovitý materiál na přesypech dopravníků).

Poslední kategorií budících sil jsou síly náhodného charakteru (např. působení větru, náraz kola na tvrdý materiál, působení pracovní plošiny na podvozek). Tyto síly musí být stanoveny pomocí teorie náhodných procesů nebo experimentálně.

4. Výpočetní metody dynamických účinků

Dynamický výpočet je v současné praxi nahrazován statickým výpočtem, při němž se místo dynamického zatížení zavádí do výpočtu ekvivalentní statické zatížení, u kterého amplitudy budících sil se násobí dynamickým součinitelem. Například v ČSN 27 7008 - Navrhování ocelových konstrukcí rýpadel a zakladačů - jsou setrvačné a rázové síly vyjádřeny pomocí vyrovnávacího součinitele ψ a dynamického součinitele φ . Je to přibližný výpočet, vhodný pro návrh jednotlivých konstrukčních částí, ale nedává nám obraz o celkovém dynamickém chování konstrukce. Tento postup je vhodný pouze při pomalé změně, tzn. jsou-li setrvačné síly vůči statickým účinkům malé. Další slabinou je zodpovědné určení hodnoty dynamického součinitele.

Dynamický výpočet je vždy do určité míry přibližný, protože při něm nahrazujeme složitou mechanickou soustavu jednodušším výpočetním schématem. Musí se provést výpočet vlastního i vynuceného kmitání. Vyšetřují se vlastní frekvence a příslušné tvary kmitu, časové průběhy výchylek, rychlostí a zrychlení kmitání konstrukce jako celku i jejích konstrukčních částí, vyvolané budícími silami.

V první fázi jde vždy o vytvoření správného výpočetního modelu, aby bylo možné určit základní dynamickou charakteristiku rýpadla (tzn. spektrum vlastních frekvencí a tvarů kmitání) již při konstrukci. Jde hlavně o zamezení rezonančních jevů a snížení dynamického namáhání hlavních uzlů stroje.

Pro ocelové konstrukce tak rozměrné a složité jako jsou u velkostrojů, přichází v úvahu prakticky jediná výpočetní metoda - metoda konečných prvků. Základním předpokladem metody konečných prvků je, že konstrukce může být uvažována jako řada prvků se známými charakteristikami tuhosti. Prvky jsou vzájemně propojeny konečným počtem uzlů, do kterých je soustředěna hmotnost prvků. Výpočet lze uplatnit u staticky určitých i neurčitých konstrukcí. Je možno zadat nejružnější okrajové podmínky pro určité typy vazeb. Dynamický problém se pak řeší numerickými metodami při použití samečinných počítačů. Při vytvoření důsledně prostorového modelu rýpadla je požadavek na kapacitu paměti výpočetní techniky značný. V poslední době se ujali tohoto problému pracovníci katedry mechaniky na VŠB v Ostravě, kteří sestavili výpočtový model rýpadla KU 300 a metodou konečných prvků s pomocí počítačů ODRA 1204 a TESLA 200 určili vlastní frekvence a tvary kmitání.

Přesnost dynamického řešení závisí vždy na volbě matematického modelu. Proto se navrhuje obvykle jednoduchá náhradní soustava s tím, že se zaměříme na podstatné okolnosti a zanedbáváme vedlejší vlivy.

5. Experimentální metody pro vyšetření dynamických účinků

Každý výpočet musí být ověřen experimentem. Při experimentálním měření kmitání na kolesových rýpadlech je nutno se zaměřit na:

- 1) způsob vybuzení vlastních kmitů,
- 2) měření kmitání za provozu (při působení budících sil),
- 3) přístrojovou techniku pro měření a záznam nízkých frekvencí,
- 4) analýzu a vyhodnocení záznamu.

Všechny tyto body mají stejnou důležitost a podcenění některého z nich znamená neúspěšný experiment v plném rozsahu.

a) Měřicí technika pro měření kmitání

Oblast kmitání ocelových konstrukcí velkorýpadel má přibližné hranice 0 až 2 Hz. Těmto velmi nízkým frekvencím se vyhýbají jak experimentátoři, tak i výrobci snímačů kmitání, zesilovačů a vůbec měřících přístrojů. Technika pro přímé měření v oblasti 0 až 1 Hz je pro většinu měřících skupin nedostupná. Proto se většinou používá pro tyto kmitočty metoda cejchování celé měřicí soustavy nízkofrekvenčním generátorem kmitů. Měřicí soustava tvoří obvykle snímač kmitů, zesilovač, záznamový prostředek (zapisovač, měřicí magnetofon). Pro snímání kmitů lze použít tenzometrické snímače, indukční snímače, ale nejpohodlnější práce je se snímačem zrychlení - akcelerometrem.

b) Vyhodnocení kmitání

V některých jednoduchých případech je možno vyhodnocovat frekvenci kmitání z registračního záznamu zapisovače pro určitý počet kmitů dle vztahu:

$$f = \frac{v \cdot n}{l} \quad /Hz/$$

kde: v ... rychlost posuvu registračního papíru $/mm.s^{-1}/$
 n ... počet sledovaných kmitů
 l ... sledovaná délka záznamu $/mm/$.

K získání plnohodnotného výsledku, tj. k vytěžení všech informací ze získaných materiálů ovšem nestačí proložit pásem záznamu křivku střední hodnoty, změřit pravítkem amplitudy a dobu periody.

Obtížnost a komplikovanost vyhodnocení záznamů z kmitání je patrná z obr. 1 a 2. Na obr. 1 je ukázka ze záznamu kmitání kolesového výložníku rýpadly KU 800/8 ve vertikální rovině při rozběhustroje. Zrychlení bylo snímáno akcelerometrem fy Philips. Ze záznamu je názorně vidět skládání

kmitů od jednotlivých budících sil a na posledním záznamu dole je již rýpadlo v plném provozu. Na obr. 2 je ukázka z kmitání zdvihového lana předního závěsu kolesového výložníku KU 800/8. Nahoře je křivka vlastního kmitání lana, vyvolaného silovým impulsem, na dolním záznamu je kmitání téhož lana při provozu stroje. Je zřejmé, že zde již nemůžeme vystačit s normálním vyhodnocením a musíme přikročit k moderním metodám analýzy dynamických signálů.

c) Frekvenční analýza záznamu a analyzátory

Při vyhodnocování se používá hlavně frekvenční analýza, korelace a pravděpodobnostní analýza. Jsou to metody teoreticky známé poměrně dlouho, ale uvedené do praxe teprve rozvojem elektroniky.

Frekvenční analýza informuje o frekvencích, pravděpodobnostní analýza hlavně o amplitudách a korelační analýza o časových závislostech jak s cizími signály, tak i s jinými oblastmi zkoumaného signálu.

Obvyklý způsob pozorování dynamických signálů je zobrazení jako funkce času na osciloskopu. Lze takto dobře znázornit vzájemné časové závislosti a informace o fázi. Mnohem přehlednější je zobrazení signálu jako funkce frekvence. Situaci objasňuje obr. 3. Na axonometrickém náčrtku je zobrazen signál složený ze základní frekvence a její druhé harmonické. Zatímco osciloskop pohlíží na náčrtek ve směru osy f (která se nezobrazí) a ukazuje $A(t)$ jako součet všech frekvenčních složek, frekvenční analyzátor při pohledu ve směru osy t (která se nezobrazí) ukazuje $A(f)$ s oddělenými jednotlivými frekvenčními složkami. Tím se získá jiné vyjádření téhož děje.

Provádíme-li analýzu periodického obecně nesinusového signálu pomocí Fourierova rozkladu a byla-li vstupní funkce funkcí času v délce periody T_0 , obdržíme amplitudové spek-

trum $A(f)$ a fázové spektrum $\varphi(f)$ jako funkce frekvence - viz. obr. 4. Ve spektru nebudou obsaženy žádné frekvence nižší než $f_0 = 1/T_0$.

V poslední době byly vyvinuty vhodné typy analyzátorů pro tyto účely. Kvalitní analyzátory, v podstatě analogové, mají dnes digitální prvky (syntetizátory kmitočtu, digitální filtry, čítače, atd.) a lze je použít jedině ve spolupráci s počítačem. Digitální analyzátor s kompresí času provádí analýzu v reálném čase, je vhodný i pro velmi nízké frekvence, umožňuje odkrývání signálu v šumu. Digitální analyzátor FFT (Fast Fourier Transform) je vhodný pro nízké frekvence a pro Fourierovu analýzu. Ceny těchto přístrojů se mění podle konkrétního provedení a podle výrobce. V každém případě jsou však značně vysoké.

6. Příklad konkrétního měření kmitání na rýpadle KU 300

Největší nebezpečí vzniku rezonance na ocelových konstrukcích rýpadel pochází obvykle od budící síly na kolese. Na rýpadlech KU 300 v některých nepříznivých režimech práce kmitání ocelové konstrukce přímo ohrožuje bezpečnost stroje i osádky. Předpokládalo se, že frekvence vlastních kmitů se nebezpečně blíží frekvenci vynucených kmitů od pohonu kola. Měření provedené VÚHU Most tento předpoklad potvrdilo. Na rýpadle KU 300/7 se ukázalo, že v okamžicích, kdy se stroj dostával do frekvence 0,78 až 0,8 Hz, docházelo k prudkému zvyšování amplitud (budící frekvence na kolese byla 0,786 Hz). To ukázalo nevhodnou dynamickou charakteristiku stroje KU 300 v oblasti budící frekvence kola, která musela být upravena změnou převodu pohonu kola.

7. Závěr

Dynamické vyšetřování ocelových konstrukcí je poměrně mladá disciplína, která však v posledních letech zaznamená-

vá velký rozvoj a uplatnění v praxi. Při dynamickém řešení konstrukce je třeba řešit:

- namáhání nosných částí na základě dynamické analýzy,
- vliv kmitání na technologický proces s ohledem na předcházení poruchám,
- dynamické účinky na osádku rýpadla se snahou o vytvoření optimálního pracovního prostředí.

Je proto nutné pokračovat ve výzkumu výpočetních a experimentálních metod, potřebných pro dynamické charakteristiky velkostrojů.

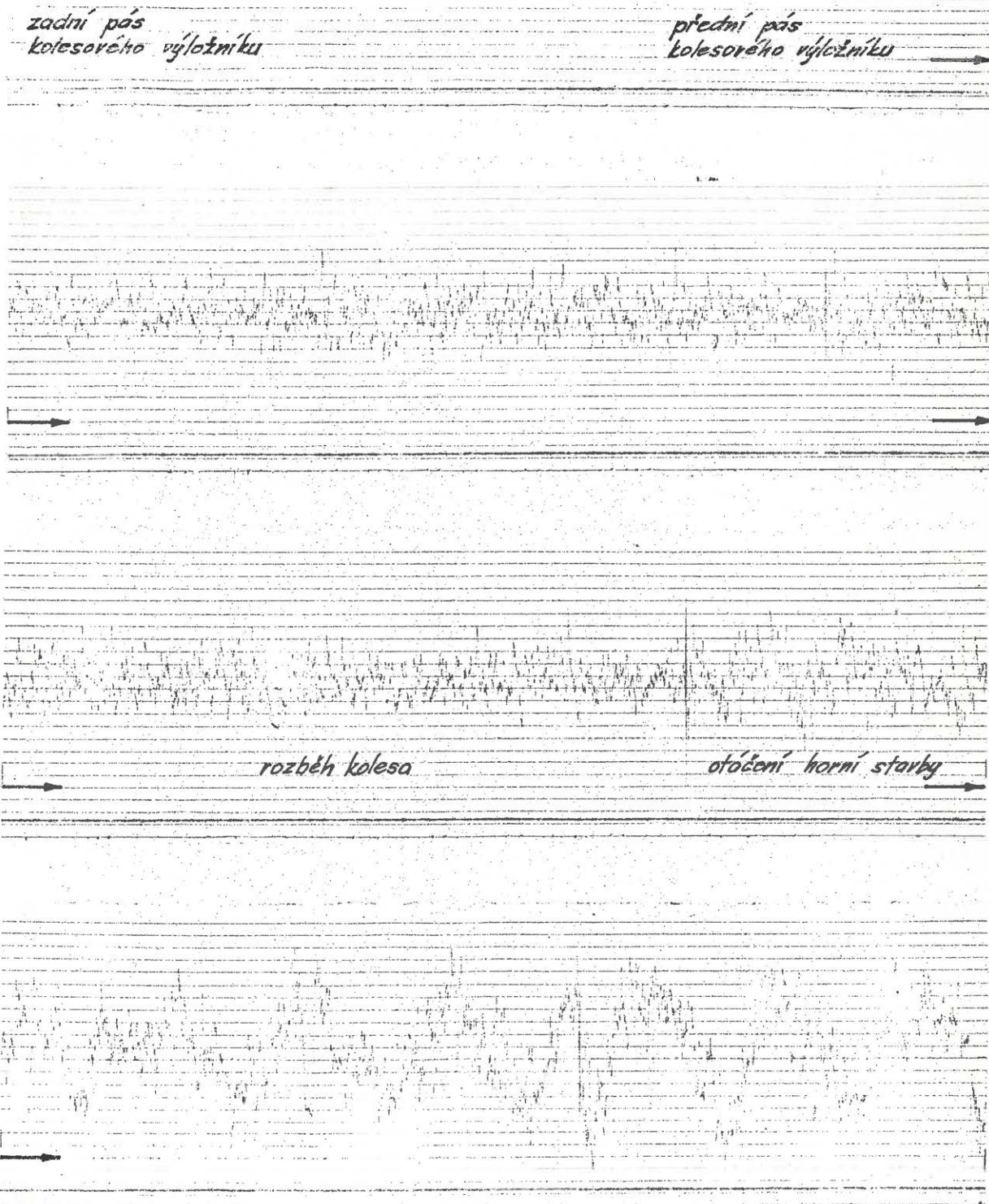
Na tento úvodní článek budou postupně navazovat další články s tematikou experimentálního výzkumu kmitání na velkostrojích, zabývající se hlavně moderními způsoby vyhodnocování kmitání při použití měřicího magnetofonu.

S h r n u t í .

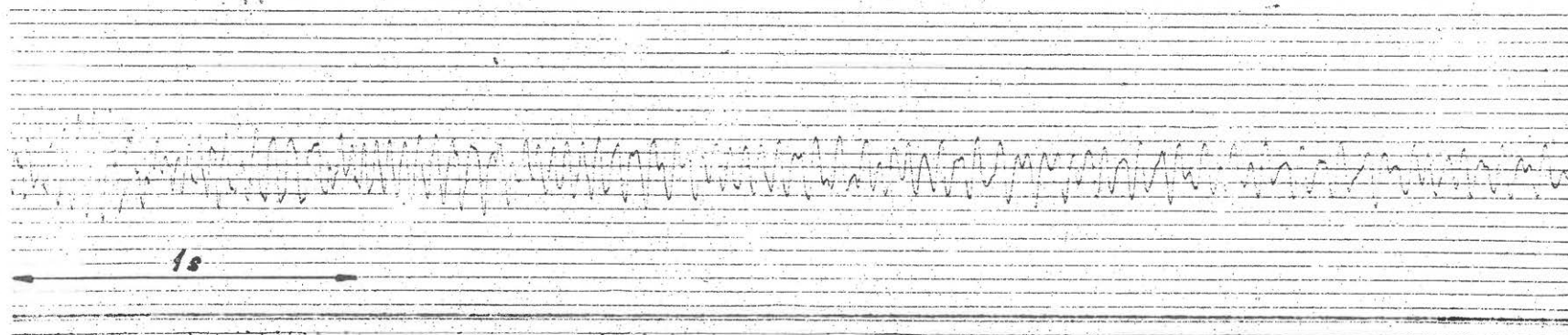
Dynamické účinky na ocelové konstrukce kolesových rýpadel

Článek pojednává o současném rozvoji výpočetních a experimentálních metod při vyšetřování dynamického namáhání konstrukcí kolesových rýpadel. Mimo některých pojmů z teorie kmitání je vysvětlena základní dynamická charakteristika rýpadla, nebezpečí vzniku rezonance, vliv parametrů rýpadla na vlastní frekvenci, budící frekvence a jejich zdroje na kolesových rýpadlech. Článek poukazuje na problémy při experimentálním měření dynamických účinků, zejména při vyhodnocování záznamů a seznamuje s frekvenční analýzou záznamu.

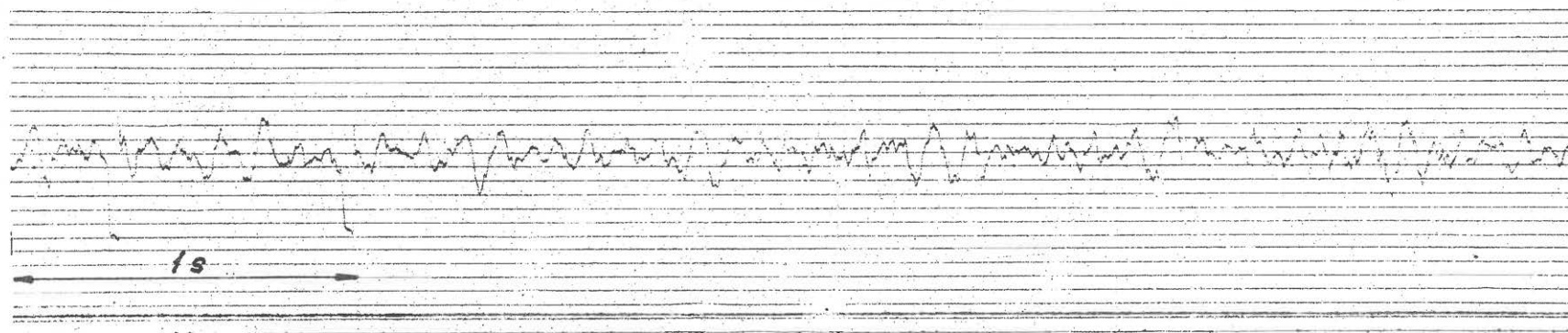
1s



Obr. 1 KMITÁNÍ KOLESOVÉHO VÝLOŽNÍKU RYPADLA KU 800/8
PŘI ROZBĚHU STROJE

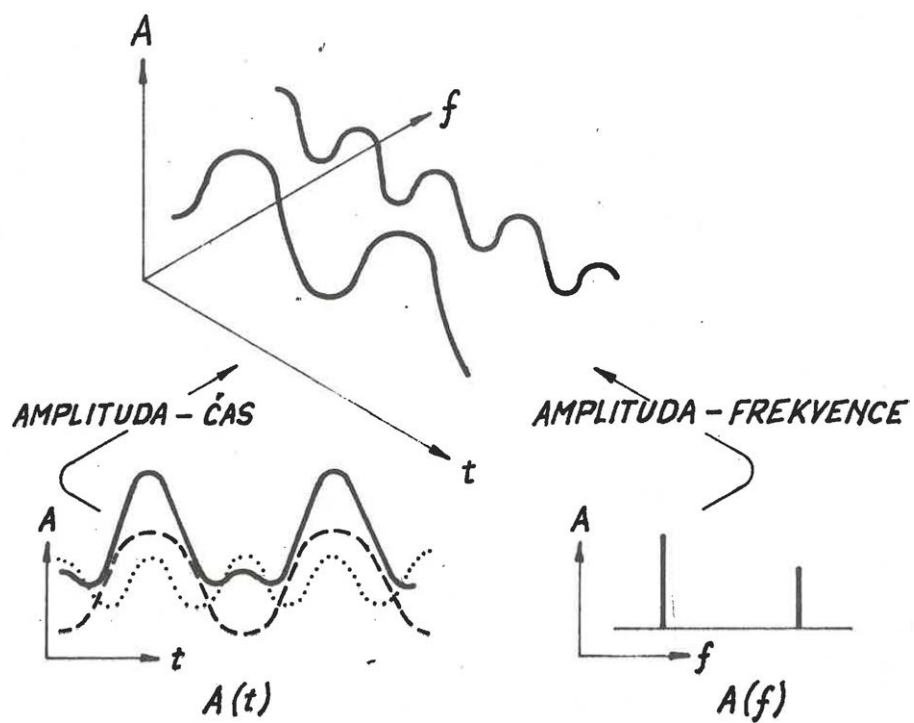


VLASTNÍ KMITÁNÍ

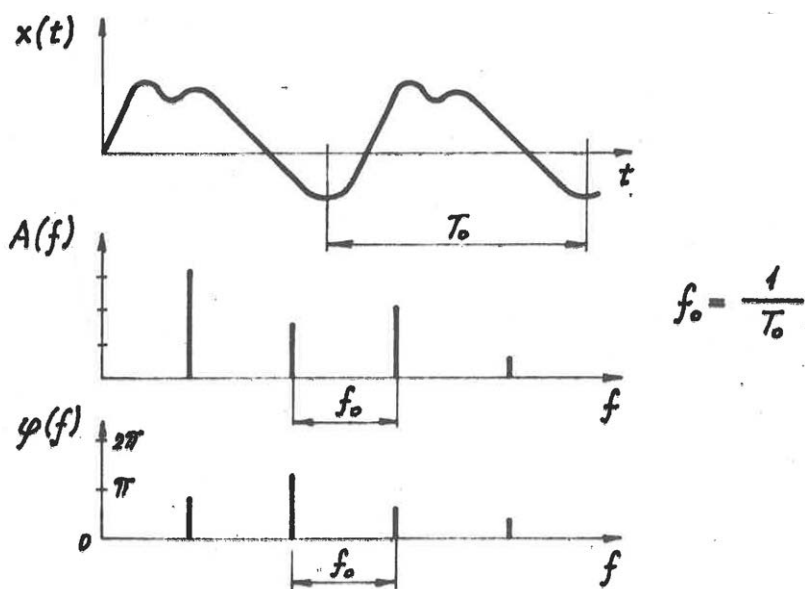


VYNUCENÉ KMITÁNÍ

Obr. 2 KMITÁNÍ LANA PŘEDNÍHO ZÁVĚSU KOLESOVÉHO VÝLOŽNÍKU RYPADLA KU 800/8



Obr. 3



Obr. 4