

# ZNÍŽENIE KMITANIA KONVERTORA KONŠTRUKČNÝMI ÚPRAVAMI A ZMENOU PREDPÄTIA KOTVIACICH SKRUTIEK

## REDUCTION OF CONVERTER VIBRATION BY STRUCTURAL MODIFICATIONS AND BY CHANGES OF PRESTRESS IN ANCHOR BOLTS

František TREBUŇA, František ŠIMČÁK, Jozef BOCKO, Daniel KOVÁČ<sup>1</sup>

### *Abstrakt*

Vzhľadom na vysoké investičné náklady pri výstavbe nových zariadení sa v súčasnosti pri rekonštrukciách často využívajú nosné systémy pôvodných zariadení. Skutočný stav pôvodných nosných systémov je často neznámy, takže po uvedení rekonštruovaného zariadenia do prevádzky môžu nastat' nežiaduce javy. V príspevku je uvedený postup analýzy príčin vzniku nežiadúcich kmitov nového konvertora uloženého na pôvodných stojanoch s návrhom opatrení na ich zníženie.

**Kľúčové slová:** stojan konvertora, frekvenčná analýza, kmitanie.

### *Abstract*

Because of high purchase costs in building of new equipments are at present during the reconstructions often used carrying systems of original old equipments. The actual state of original carrying system is in many cases unknown so that during the operation of equipment can erase undesirable effects. In the paper is described the procedure of analysis for determination of reasons of undesirable vibrations of new converter placed on original pedestals and suggestions of treatments for their decreasing.

**Keywords:** pedestal of converter, frequency analysis, vibration.

## ÚVOD

Pre spoľahlivú prevádzku dynamicky namáhaných strojov a zariadení je potrebné zabezpečiť ich vhodné uloženie tak, aby boli zamedzené nežiaduce výchylky a kmitanie. Nový konvertor (schematicky znázornený na obr.1) je uložený na stojanoch pôvodného konvertora, má vyššiu hmotnosť, umožňuje realizáciu tavia s hmotnosťou vyššou o cca 20 t, pričom pri prevádzke nového konvertora dochádza k väčším dynamickým účinkom ako pri prevádzke starého konvertora.

Po spustení nového konvertora do prevádzky boli pri rôznych pracovných režimoch (nasypávanie šrotu, nalievanie tekutého železa, otáčanie konvertorovej nádoby, fúkanie, liatie tekutej ocele) ako aj pri čistení konvertorovej nádoby identifikované nadmerné kmity vo výškovej úrovni +10,118 m ložiskového domčeka konvertorovej nádoby (pozri obr.1).

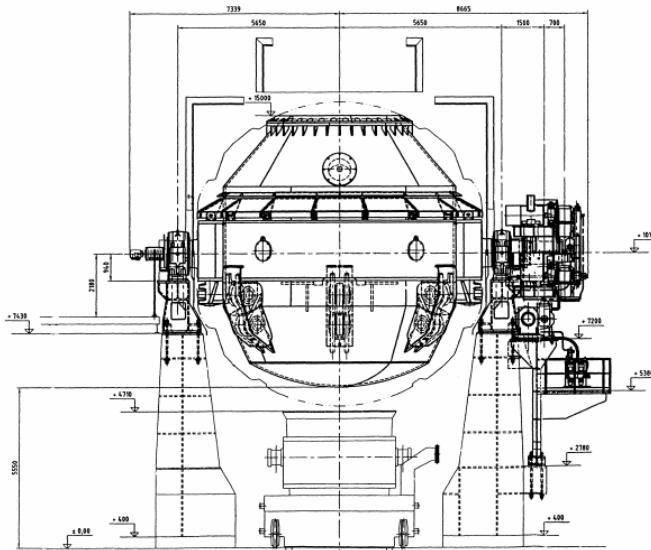
S cieľom identifikovať príčiny vzniku nežiadúcich kmitov a navrhnúť opatrenia na ich odstránenie, boli realizované rozsiahle experimentálne merania zahrňujúce

- stanovenie predpäťia v kotviacich skrutkách stojanov a meranie prírastkov síl v nich počas prevádzky,

<sup>1</sup> Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., prof. Ing. František ŠIMČÁK, CSc., doc. Ing. Jozef BOCKO, Ing. Daniel KOVÁČ, KAMaM, SjF TU v Košiciach, [frantisek.trebuna@tuke.sk](mailto:frantisek.trebuna@tuke.sk), [frantisek.simcak@tuke.sk](mailto:frantisek.simcak@tuke.sk), [jozef.bocko@tuke.sk](mailto:jozef.bocko@tuke.sk), [daniel.kovac@tuke.sk](mailto:daniel.kovac@tuke.sk)

Lektoroval: prof. Ing. Justin MURÍN, DrSc., KM, FEI STU v Bratislave, [justin.murin@stuba.sk](mailto:justin.murin@stuba.sk)

- určenie statickej zložky napäťí v stojanoch metódou odvítavania,
- určenie časových zmien napäťí vo vybraných miestach stojana tenzometrickou metódou,
- určenie časových priebehov posuvov podstavca ložiskového domčeka konvertorovej nádoby v smere jej osi otáčania,
- meranie kmitania na stojane konvertora,
- návrh konštrukčných úprav na stojane konvertora s cieľom zníženia nežiadúcich výchyliek,
- meranie kmitania konvertora po realizácii konštrukčných úprav.



Obr.1 Schéma nového konvertora upevneného na starých stojanoch

Súčasťou analýzy bolo modelovanie deformačných a napäťových stavov stojanov, podstavcov, kotviacich a spojovacích skrutiek pomocou MKP.

Výsledky niektorých častí experimentálnej analýzy boli uverejnené v [4], [5]. Podrobne je rozbor jednotlivých etáp riešenia uvedený v [1], [2], [3]. V príspevku sú uvedené výsledky merania časových priebehov posuvov a kmitania konvertora s posúdením vplyvov konštrukčných úprav na ich veľkosť.

## URČENIE ČASOVÝCH PRIEBEHOV POSUVOV PODSTAVCA V SMERE OSI OTÁČANIA KONVERTORA

Pre určenie časových priebehov posuvov podstavca pod ložiskovým domčekom na strane stojana bez pohonu boli použité dva inkrementálne snímače LARM MSL 30 s presnosťou merania  $5 \mu m$ . Meracie hraty snímačov boli opreté o kovovú dosku podstavca, pričom snímače boli uchytené v prípravkoch upevnených na nezávislých stojanoch (obr.2). Merania posuvov boli realizované pri nasledovných režimoch a polohách konvertora (obr.3).

Režim 1 – Prechod konvertora z polohy A do polohy B

Režim 2 – Prechod konvertora z polohy B cez C do D

Režim 3 – Prechod konvertora z polohy D do C

Režim 4 – Prechod konvertora z polohy C do B

Režim 5 – Prechod konvertora z polohy B cez C do D

Režim 6 – Prechod konvertora z polohy D do C

Režim 7 – Prechod konvertora z polohy C do B

Režim 8 – Prechod konvertora z polohy B cez C do D

Režim 9 – Prechod konvertora z polohy D cez C do B

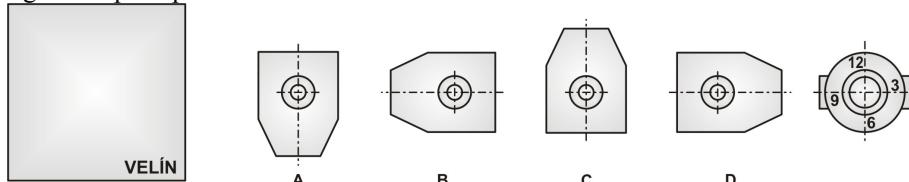
Režim 10 – Prechod konvertora z polohy B cez C cez D cez A do B so zastavením v medzipoloħah DC a CD a návrat konvertora z polohy B cez A cez D cez C do B so zastavením v medzipolohe AD.



Obr.2 Uchytenie inkrementálnych snímačov MSL 30 a ich poloha pri meraní

Čistenie lemu hrdla konvertora bolo modelované pri piatich takmer identických režimoch, ktoré sú v ďalšom označené ako režim 11, 12, 13, 14 a 15. Tlakom a rázovým zaťažením v miestach po obvode lemu hrdla konvertora bol tento zaťažovaný v miestach 6, 12, 9 a 3 (pozri obr.3).

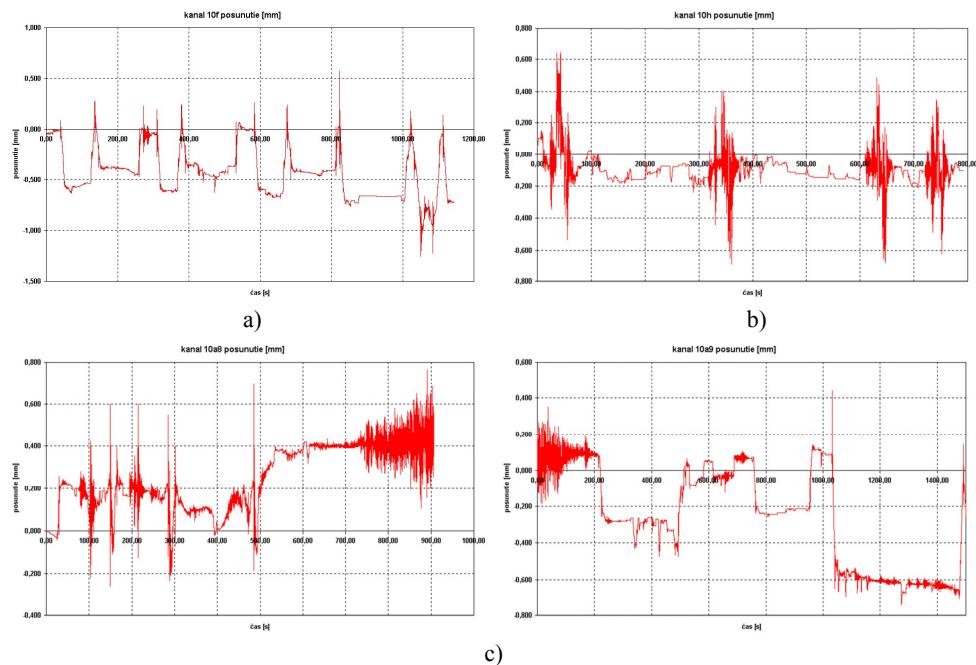
Ďalšie režimy merania boli vykonané pri prevádzke konvertora počas viacerých tavieb od vsádzky šrotu, jeho premiešania, cez naliatie tekutého železa, fúkanie a vylievanie, pričom medzi jednotlivými technologickými operáciami dochádzalo k otáčaniu konvertora v zmysle technologického postupu.



Obr.3 Polohy konvertora počas merania

Na obr.4 sú časové priebehy posuvov identifikované inkrementálnymi snímačmi pri jednotlivých režimoch. Ked'že časové priebehy posuvov na oboch stranach ložiskového domčeka boli takmer identické, sú uvádzané posuvy len na jednom inkrementálnom snímači.

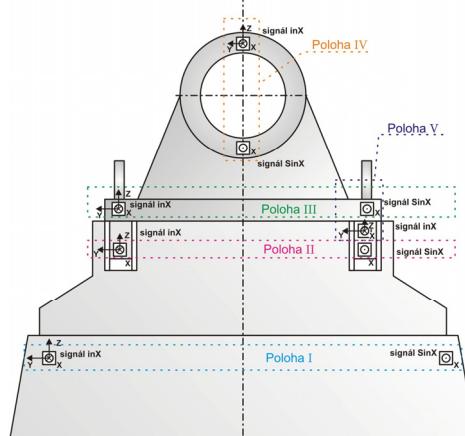
Inkrementálnymi snímačmi LARM MSL 30 získané časové priebehy posuvov v smere osi otáčania konvertora na ľavej a pravej strane podstavca dokumentovali symetriu v priebehoch, čo potvrdzuje skutočnosť, že pri simulovaní rôznych režimov ale aj pri prevádzke nedochádzalo ku skrúcovaniu stojanov. Meranie posuvov bolo realizované už po realizácii predpäťia na kotviacich skrutkách stojana (v dvoch skrutkách bolo predpätie zvýšené na hodnotu 460 a 580 kN, pričom tieto hodnoty ešte stále nedosiahli požadovanú optimálnu veľkosť 738 kN). Meraním posuvov pri viacerých tavbách bolo zistené, že počas prevádzky konvertora pri meraní v rámci sledovaných tavieb nedošlo ani v jednom prípade k nameraniu väčšej hodnoty posuvov ako pri simulovaných režimoch 1 až 15, čo autorov oprávňovalo vyvodiť záver, že prevádzkovatelia zariadenia pri simulovaní vyvolali také druhy zaťaženia, ktoré sa pri bežnej prevádzke nevyskytli.



Obr.4 Časové priebehy posuvov identifikované inkrementálnymi snímačmi. a) Režimy 1 až 10, b) Režimy 11 až 14, c) Režimy pri tavbe (sýpanie šrotu, premiešanie, fúkanie)

### MERANIE KMITANIA NA STOJANE KONVERTORA

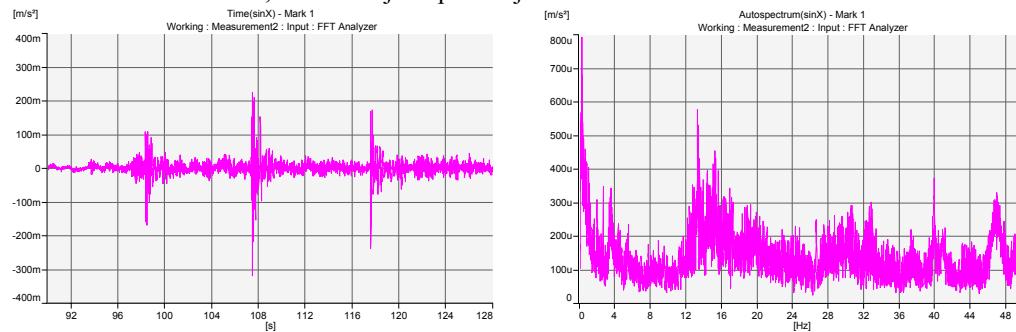
Kmitanie, ktoré bolo zistené počas predchádzajúcej prevádzky má svoje príčiny v konštrukčnom usporiadaní avšak dynamické silové účinky, ktoré toto kmitanie vyvolávajú sú spôsobené predovšetkým vlastnou frekvenciou konvertorovej sústavy, pohonmi ale aj vlastným technologickým procesom, či už pri fúkaní, čistení resp. pri rozbiehaní a brzdení prípadne pri reverzácii otáčania. Meranie kmitania prostredníctvom systému PULSE 6 bolo so zreteľom na počet snímačov (meracích kanálov) vykonané vždy v dvoch miestach pre päť kombinácií umiestnenia snímačov (pozri obr.5).



Obr.5 Poloha snímačov zrýchlenia pri meraní kmitania

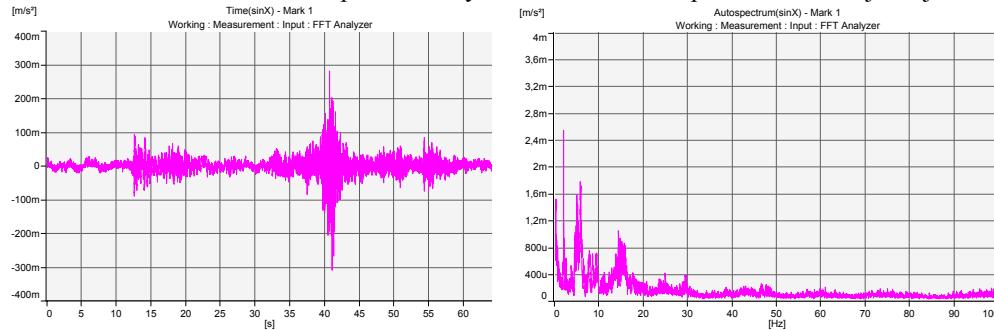
Na obr.5 pri polohe snímačov označenej I boli snímače zrýchlenia pripojené na hornú časť stojana bez pohunu. Snímače v polohe II boli umiestnené na podstavci v mieste podpier pre hydraulické zdviháky. V polohe III boli snímače pripojené na domčeku ložiska v mieste päťiek. Ďalšie merania boli vykonané pri polohe snímačov zrýchlenia IV. pričom obidva snímače boli vo vertikálnej rovine, ktorá prechádzala osou ložiska. Ďalšia poloha označená V umožňovala meranie zrýchlenia v miestach na spojovacích častiach tej istej skrutky. Snímače označené symbolom  $\sin X$  sú jednozložkové pričom smer meraného zrýchlenia je horizontálny, rovnobežný s osou otáčania konvertorovej nádoby. Symbolom  $\text{in} X$  sú označované trojzložkové snímače pričom os  $y$  je v horizontálnom a os  $z$  vo vertikálnom smere. Kladné smery sú zrejmé z obr.5, pričom orientácia kladnej osi  $x$  v jednozložkovom a trojzložkovom snímači bola opačná. Uvedenú skutočnosť treba mať na zreteli aby nedošlo k chybám záverom pri interpretácii výsledkov meraní.

Na obr.6, 7 a 8 sú uvedené výsledky merania kmitania a jeho analýzy pri polohe snímačov označenej na obr.5 symbolom I, pričom pre každý časový priebeh zrýchlenia je uvedená aj frekvenčná závislosť získaná rýchlosť Fourierovou transformáciou (FFT). Na obr.6a je znázornený časový priebeh zrýchlení pri otáčaní konvertora medzi polohami B,C,D v mieste jednozložkového snímača, na obr.6b je odpovedajúca frekvenčná závislosť.



Obr.6 Otáčanie konvertora medzi polohami B,C,D. a) Časový priebeh zrýchlení, b) Frekvenčná závislosť amplitúd zrýchlení

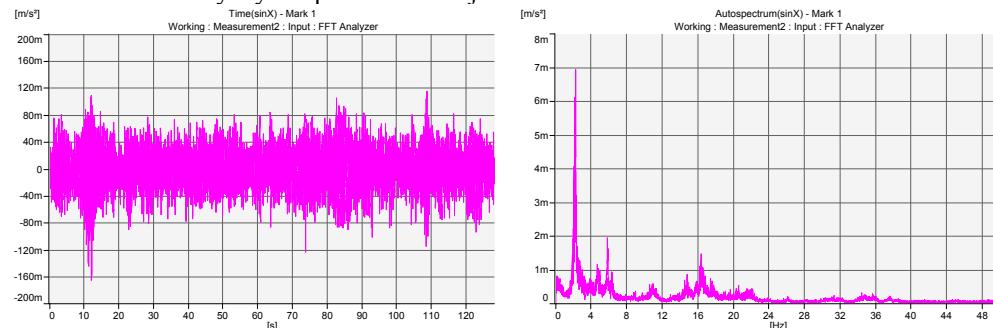
Na obr.7 a 8 sú znázornené časové a frekvenčné závislosti namerané pri nasypávaní šrotu a následnom otáčaní konvertora a pri fúkaní kyslíka do konvertora počas realizácie jednej z tavieb.



Obr.7 Nasypávanie šrotu a otáčanie konvertora. a) Časový priebeh zrýchlení,  
b) Frekvenčná závislosť amplitúd zrýchlení

Z analýzy časových priebehov zrýchlení a frekvenčných závislostí amplitúd zrýchlení bolo možné konštatovať, že nedochádza k výraznému skrúcovaniu stojana. Meraniami zrýchlení bolo zistené, že výrazné amplitúdy zrýchlení sa objavujú pri frekvencii 2,721 Hz, čo možno považovať za vlastnú frekvenciu kmitania sústavy konvertora. Menej výrazné amplitúdy zrýchlení sa počas prevádzky vyskytovali aj pri násobkoch tejto frekvencie. Ďalšie výrazné amplitúdy boli

viazané na budiace frekvencie od pohonu a na ich násobky. So zreteľom na nízku frekvenciu kmitov s výraznou amplitúdou bolo navrhnuté zvýšením predpäťa v skrutkových spojoch túto hodnotu amplitúdy zrýchlenia znížiť, čím poklesne dynamická zložka zaťaženia skrutiek a následne i hodnota výchyliek pri kmitaní stojana.



Obr.8 Fúkanie kyslíka do konvertora. a) Časový priebeh zrýchlení,  
b) Frekvenčná závislosť amplitúd zrýchlení.

## KMITANIE KONVERTORA PO REALIZÁCII KONŠTRUKČNÝCH ÚPRAV

Po podrobnej analýze meraní posuvov, zrýchlení, sil v skrutkách a napäti v stojane, i so zreteľom na kumuláciu poškodenia kotviacich skrutiek (pri uvážení takých riešení, ktoré by bolo možné zrealizovať s čo najmenšími nákladmi a v čo najkratšom čase i s prihliadnutím na veľmi nízke mechanické vlastnosti kotviacich skrutiek a tiež s prihliadnutím na výsledky modelovania posuvov miest stojana pri simulovanom zaťažení) dospeli autori k záveru, že pre zníženie amplitúd kmitania v smere osi otáčania konvertora sú kľúčovými sily počas prevádzky v kotviacich a spojovacích skrutkách. O uvedených skutočnostiach svedčia vplyvy jednotlivých častí stojana, podstavca, kotviacich a spojovacích skrutiek (obr.9) na tieto posuvy.

So zreteľom na vyššie uvedené skutočnosti a analýzu realizovanú v prvej etape riešenia bolo potrebné riešiť nasledovné okruhy otázok:

- Ako zvýšiť tuhosti prírub stojana (časti stojana pri kotviacich a spojovacích skrutkách).
- Ako znížiť namáhanie v kritickom mieste kotviacich skrutiek.
- Ako zabezpečiť tuhšie spojenie stojana k základu.

Riešenie uvedených problémov vzájomne úzko súvisí a bolo obsahom návrhu konštrukčných úprav. Návrhy konštrukčných úprav boli postupne s realizátormi odkonzultované a so zreteľom na technologické postupy upresňované až do definitívnej podoby.

S cieľom zníženia kmitania boli realizované nasledovné konštrukčné úpravy

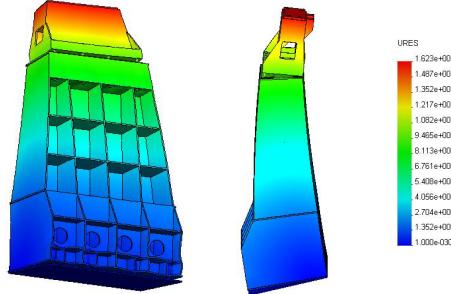
- bola zvýšená tuhost prírub v mieste upevnenia stojana kotviacimi skrutkami,
- bola zvýšená sila predpäťa kotviacich skrutiek, pričom boli použité matice s odľahčujúcimi závitmi, s cieľom zníženia koncentrácie napäcia v skrutkách,
- boli prerezané, prečistené a premazané závity kotviacich skrutiek a bol presne definovaný postup uťahovania kotviacich skrutiek momentovými kľúčmi.

Celkový pohľad na spoj kotviacej skrutky po realizácii konštrukčných úprav je na obr.10.

Po realizácii konštrukčných úprav boli opäťovne realizované merania posuvov a kmitania na tých istých miestach ako pred konštrukčnými úpravami.

Na obr.11 je časový priebeh posuvov identifikovaný inkrementálnym snímačom počas jednej tavby.

Pri meraniach v predchádzajúcej etape (pred konštrukčnými úpravami) bol maximálny rozkmit 1,9 mm (kladná výchylka 1,3 mm a záporná výchylka 0,6 mm). Pri meraní po konštrukčných úpravách bola najväčšia hodnota kladnej výchylky 0,65 mm a najnižšia hodnota zápornej výchylky 0,60 mm, takže maximálny rozkmit bol 1,25 mm, čo predstavuje pri vzťahovaní na pôvodnú hodnotu rozkmitu zníženie amplitúd kmitania približne o jednu tretinu.

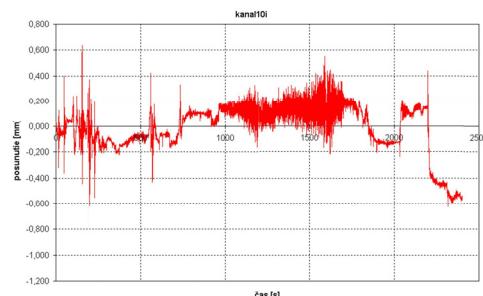


Obr.9 Pole posuvov pri zaťažení silami podľa údajov výrobcu určené MKP



Obr.10 Realizovaný návrh konštrukčnej úpravy v mieste stojana

Z nameraných časových priebehov posuvov sú zrejmé nasledovné skutočnosti:

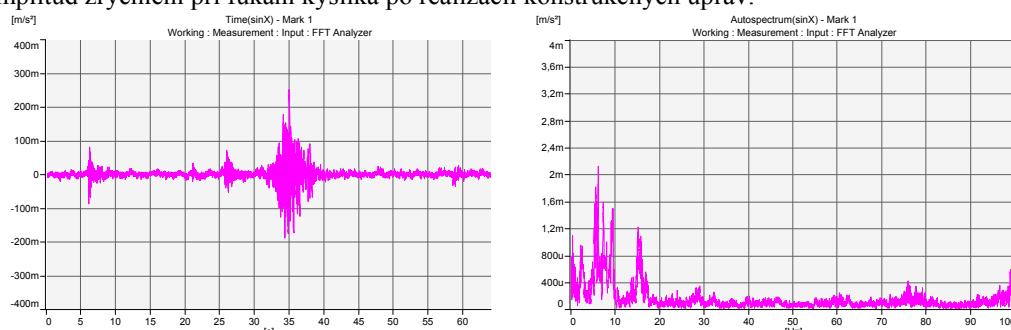


Obr.11 Časový priebeh posuvov identifikovaný inkrementálnym snímačom počas stavby

Hodnoty výchyliek (kladné alebo záporné) nie sú v konečnom dôsledku rozhodujúce, pretože ich hodnota závisí od počiatočnej polohy konvertora, pri ktorej začalo meranie a ku ktorej sú výchylky vzťahované. Z tohto dôvodu je potrebné porovnať rozkmyty.

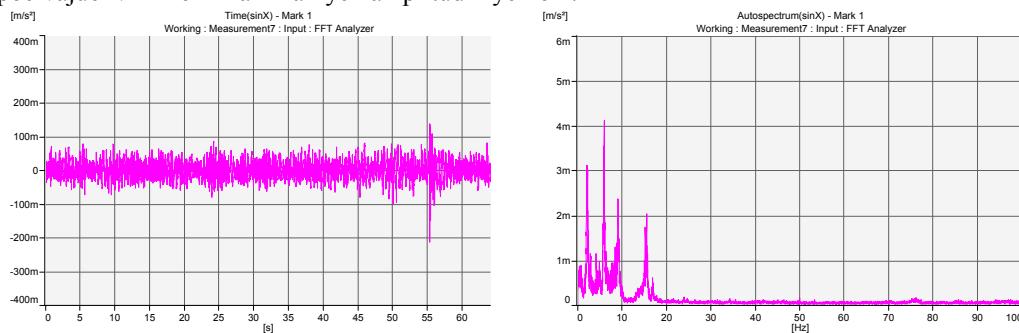
Na obr.12a,b je časový priebeh zrýchlenia a frekvenčné závislosti amplitúd zrýchlenia v mieste jednozložkového snímača pri nasypávaní šrotu a následnom otáčaní konvertora.

Na obr.13a,b je časový priebeh zrýchlení pri fúkaní kyslíka a frekvenčné závislosti amplitúd zrýchlení pri fúkaní kyslíka po realizácii konštrukčných úprav.



Obr.12 Nasypávanie šrotu a otáčanie konvertora, a) časový priebeh zrýchlení, b) frekvenčná závislosť amplitúd zrýchlení

Z porovnania obr.7,8 a obr.12,13 vyplýva pozitívny vplyv zmien kotvenia stojana spočívajúci v znížení maximálnych amplitúd zrýchlení.



Obr.13 Fúkanie kyslíka do konvertora, a) časový priebeh zrýchlení, b) frekvenčná závislosť amplitúd zrýchlení

## ZÁVER

Na základe realizovaných experimentov, nameraných údajov a ich analýzy možno po porovnaní dosiahnutých výsledkov z meraní pred a po konštrukčných úpravách (pri približne odpovedajúcich prevádzkových režimoch) vysloviť nasledovné stanoviska:

- Po vykonaní konštrukčných úprav na spodnej časti stojana – zvýšení tuhosti prírub a úprave sín predpäťia, sa amplitúdy výchyliek určené snímačmi LARM znížili približne o jednu tretinu.
- Vlastné frekvencie sa presunuli k vyšším hodnotám. Kým pri pôvodnom kotvení a predpäti boli najvýraznejšie amplitúdy zrýchlení pri frekvenciach 2,172 Hz až 2,7 Hz, po realizácii konštrukčných úprav a zväčšení predpäťia v kotviacich skrutkách sa tieto frekvencie zvýšili približne na dvojnásobok.
- Amplitúdy zrýchlení sa znížili v rozsahu 40 až 60 %. Toto zníženie je dôsledkom menšieho namáhania kotviacich skrutiek a ich deformácií v priebehu prevádzky, čím dochádza aj k zníženiu posuvov.
- Konštrukčnou úpravou spodnej časti stojana došlo nielen k výraznému zvýšeniu tuhosti príruby a tým k priznivejšiemu prerozdeleniu prevádzkovej sily do skrutky a príruby, ale úpravou matice došlo aj k zníženiu koncentrácie napätia v skrutke a tým k ďalšiemu zníženiu kumulácie poškodenia.

Autori ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektov č.1/2187/05 a č.1/1073/04.

## LITERATÚRA

- [1] TREBUŇA, F. a kol.: *Kmitanie stojana konvertora, návrhy prípadných konštrukčných úprav a ich overenie*. I. etapa Košice, máj, 2005
- [2] TREBUŇA, F. a kol.: *Návrh konštrukčných úprav na stojane KK1*. Košice, máj, 2005
- [3] TREBUŇA, F. a kol.: *Kmitanie stojana konvertora, návrhy konštrukčných úprav pre realizáciu, overenie ich funkčnosti a dopadov meraním po ich realizácii*. Záverečná správa, júl 2005
- [4] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F., BOCKO, J.: *Influence of flange stiffness of converter pedestal on loading of anchor and connecting bolts*. International Scientific Conference, VŠB Ostrava, september 2005, p. 95 - 96
- [5] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F., BURŠÁK, M., BOCKO, J.: *Increasing of reliability of converter*. Metalurgija, 45, 2, p. 119-125, 2006