

# Recenzované výzkumné články

## Protiprůvalový systém pro zařízení plynulého odlévání v konceptu průmyslu 4.0

### Antibreak-out System for Continuous Casting Machine in the Concept of Industry 4.0

Ing. Miroslav Klus<sup>1</sup>; Ing. Jiří Cibulka, Ph.D.<sup>1</sup>; Ing. Miroslav Plachta Ph.D.<sup>1</sup>; Ing. Adam Rucki<sup>1</sup>; Ing. Martin Papoušek<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, 739 61 Třinec-Staré město, Česká republika

<sup>2</sup> VÚHŽ a.s., Dobrá 240, 739 51 Dobrá, Česká republika

Mění se tvář průmyslu stále více nahrává automatizaci. Čtvrtá průmyslová revoluce je označením pro současný trend modernizace a automatizace jednotlivých pracovišť a zařízení. V rámci modernizace blokového zařízení plynulého odlévání Třineckých železáren, a.s., (TŽ) byl v nedávné době nahrazen elektromechanický oscilační mechanismus za moderní hydraulický oscilační mechanismus od firmy Danieli. V důsledku realizovaných modernizačních zásahů však bylo nezbytné vyřešit i další důležité aspekty spojené s řízením technologie plynulého odlévání, jako je např. funkčnost protiprůvalového systému (tzv. DGS), který byl od roku 2000 založen (mimo jiné) na analýze digitálního signálu z kardanu motoru oscilačního mechanismu v závislosti na změně časových posunů frekvence oscilací. Tento signál přechodem na novou technologii pohonu hydraulickým válcem již nebyl dále k dispozici, a proto bylo nezbytné vyvinout nový způsob vyhodnocení alarmu nebezpečí průvalu, označovaný jako ABS. Současně se však objevily i nové možnosti, jak proces řízení plynulého odlévání dále rozvíjet, aby plnil moderní požadavky konceptu průmyslu 4.0. V rámci realizovaných výzkumů tak byl např. i odzkoušen také nový digitální tříosý akcelerometr, primárně určený pro diagnostiku oscilačního mechanismu. Akcelerometr navrhl a odzkoušel VUHŽ a.s., Dobrá, který spolupracoval se specialisty odboru řídicí systémy TŽ na jeho odladění. V současné době se pracuje na využití získaných poznatků pro další rozvoj nového, již plně funkčního protiprůvalového systému ABS, který je aktuálně založen na analýze změny signálu koeficientu tření hydraulického válce v průběhu odlévání. Koeficient tření je vypočten v řídicím systému Simatic S7 z jednotlivých analogových signálů čtených měničem oscilace. Kritéria detekce rizikových stavů nastavená technology TŽ jsou automaticky načítána podle odlévané značky oceli. Systém je schopen plně automaticky generovat adekvátní zásahy do procesu plynulého odlévání na základě zjištěných dějů v krystalizátoru.

**Klíčová slova:** protiprůvalový systém; plynulé odlévání; krystalizátor

*Automation increasingly benefits from the changing face of the industry. The fourth industrial revolution denotes a typical trend of modernization and automation of individual workplaces and equipment. As part of the modernization of the bloom continuous casting machine at the Třinecké železáren, a.s., (TŽ), the electromechanical oscillating mechanism has been recently replaced by a modern hydraulic oscillating mechanism from the company Danieli. However, due to the implemented modernization interventions, it was necessary to solve other important aspects associated with the control of continuous casting technology, such as the functionality of the anti-breakout system (so-called DGS, the exploitation of which from started in 2000 based on the analysis of a digital signal from the cardan shaft. This signal, by switching to the new hydraulic cylinder drive technology, was no longer available for calculation in the breakout prediction system, and therefore it was necessary to develop a new way of evaluating the breakout alarm. The new anti-breakout system is called ABS. However, this change provided also new challenges on how to improve the existing control system of the continuous casting process to meet the requirements required by the Industry 4.0 concept. As part of the research, a new digital 3-axis accelerometer for diagnostics of the oscillating mechanism was also tested. The accelerometer was designed and tested by the research institute VUHŽ a.s., Dobrá which was cooperating with specialists from the TŽ control systems department to adjust it for conditions at the bloom continuous casting machine. It is supposed that the newly developed accelerometer will be also very beneficial in the future to realize further progress of the existing ABS prediction system, which is currently based on friction force change during continuous casting of steel.*

**Key words:** antibreak-out system; continuous casting; mould

V posledních letech se klade důraz na prediktivní údržbu v rámci optimalizace efektivity výroby a snížení prostojů ve výrobě. Přesnou a včasnou informací o možném vzniku poruchového stavu je možno zabránit ekonomickým ztrátám a nedodržení výrobního plánu. V minulosti byl častou příčinou ztrát ve výrobě na provozu blokového kontinuálního odlévání oceli v Třineckých železárnách, a.s. (TŽ) průval na licím proudu. Tento jev v důsledku protřžení licí kůry způsobuje odstavení daného licího proudu, a to po dobu dolití momentálně odlévané sekvence, a má rovněž významný vliv na zvýšení prostojů ve výrobě spojených s odstraněním rozstříku oceli v licím oblouku a s výměnou poškozených licích jednotek.

V roce 2000 byl pro dané zařízení plynulého odlévání vyvinut a instalován protiprůvalový systém (tzv. DGS) pro predikci nebezpečí průvalu. Tento diagnostický systém pracoval na základě analýzy dat dostupných z akcelerometru instalovaného na ramenu oscilačního mechanismu a digitálního signálu z kardanu motoru. Byly navrženy speciální algoritmy, které na základě změny frekvence jednotlivých signálů stanovují signalizaci alarmu indikujícího nebezpečí tvorby významných trhlin (obr. 1), které by mohly vést k iniciaci průvalu.



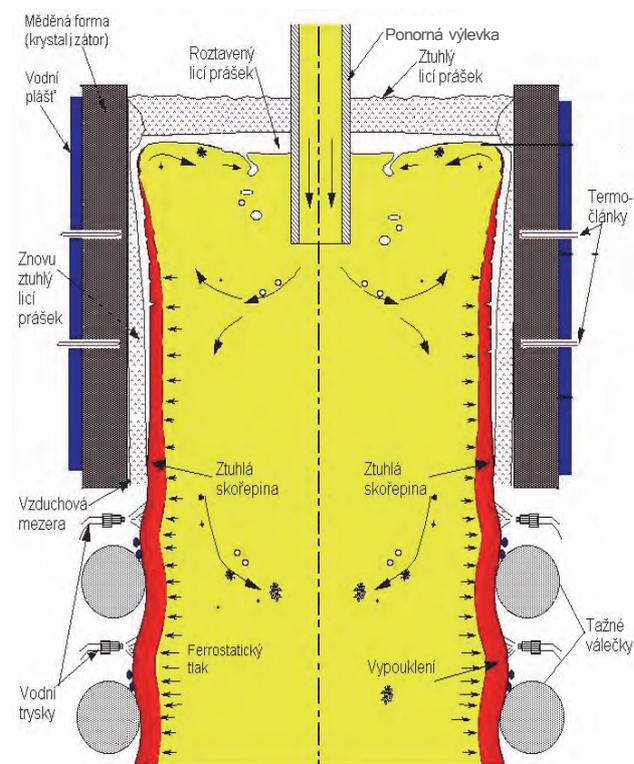
Obr. 1 Příklad povrchové trhliny s potenciálem způsobit průval licího proudu

Fig. 1 Example of a bloom surface crack causing break-out of a strand

Další přidanou hodnotou systému DGS byl diagnostický systém vyhodnocující stav oscilačního mechanismu a odchylky způsobené špatně usazenou licí jednotkou. Přestože byl původní protiprůvalový systém plně funkční a zcela vyhovující pro dané zařízení plynulého odlévání, bylo nezbytné začít s vývojem jeho nové koncepce. Původní elektromechanická oscilace byla totiž nahrazena moderním hydraulickým pohonem, čímž došlo ke ztrátě signálu z kardanu elektromechanického pohybového ústrojí. Tento signál byl pro plnou funkčnost systému DGS naprosto klíčový.

Rozhodnutí o náhradě stávajícího oscilačního mechanismu mechanismem novým vycházelo ze skutečnosti, že hydraulická oscilace zajišťuje daleko širší a flexibilnější možnosti optimalizace dějů v oblasti menisku, neboť (na rozdíl od elektromechanické oscilace) umožňuje kromě frekvence oscilací měnit v jakémkoliv období odlévání i zdvih krystalizátoru. Tím lze pro danou ocel nastavit ideální podmínky pro tvorbu oscilačních vrásek, kompresi licí kůry a mazání při jakékoliv odlévací rychlosti. Lze tak optimalizovat děje probíhající v oblasti menisku, které jsou schématicky znázorněny na obr. 2.

Správně nastavená hydraulická oscilace umožňuje také minimalizovat nebezpečí průvalu. Takové nastavení však obvykle jde proti kvalitativním požadavkům, takže je nezbytné vždy hledat určitý kompromis zohledňující kvalitativní a bezpečnostní rizika v závislosti na odlévaném druhu oceli a formátu. Další výhodou hydraulické oscilace je také výrazně přesnější vedení krystalizátoru v průběhu oscilačního cyklu, díky čemuž nedochází na pohybovém ústrojí k žádným časovým zpožděním, jejichž analýza byla podstatná pro určení rizikových stavů na původním DGS systému. Bylo tak nezbytné najít jednak způsoby, jak rizikové stavy nově detekovat, ale také diagnostikovat stav celého oscilačního mechanismu. Tato metoda tak posunula dosavadní způsob řízení procesu plynulého odlévání dále do koncepce kompatibilní s požadavky průmyslu 4.0.



Obr. 2 Děje probíhající v krystalizátoru [5]

Fig. 2 Typical processes in the mould [5]

## 1. Nový algoritmus pro vyhodnocení průvalů

### Výpočet koeficientu tření

Analýzou signálů v řídicím systému Simatic S7, který řídí pohyb hydraulického válce oscilačního mechanismu, byly nalezeny vhodné analogové signály pro vývoj nového algoritmu predikce průvalu. Základním podstatným signálem je koeficient tření, který vyjadřuje, jakou silou působí ocel na stěny krystalizátoru a jaký odpor vzniká vlivem tření během pohybu předlitku v krystalizátoru.

Koeficient tření se počítá jako rozdíl mezi zatížením hydraulického válce při oscilaci krystalizátoru naprázdno a při zatížení během reálného odlévání. Výpočty se provádějí nezávisle pro každý válec. Jednotlivé analogové

signály pro výpočet jsou snímány z měniče Sinamics oscilačního mechanismu, který řídí motor hydraulického válce.

Pro výpočet koeficientu tření je nezbytné nejprve stanovit práci hydraulického válce během reálného odlévání a během činnosti naprázdno. Práce hydraulického válce oscilačního mechanismu krystalizátoru během odlévání je dána následující rovnicí

$$W_{hot} = \oint_{cicle} (F \cdot dy), \quad (1)$$

kde  $W_{hot}$  je práce při zatížení [kJ],  $dy$  je konečný zdvih oscilací krystalizátoru [m],  $F$  je naměřená hodnota síly působící na válec [kN].

Práce hydraulického válce oscilačního mechanismu krystalizátoru naprázdno mimo odlévání určuje analogicky rovnice

$$W_{cold} = \oint_{cicle} (F \cdot dy). \quad (2)$$

V další fázi je nezbytné z vypočítaných hodnot práce stanovit tzv. pracovní křivky v závislosti na celkovém zdvihu hydraulického válce  $s$  [mm] a frekvenci oscilací  $f$  [ $s^{-1}$ ], tedy pro případ provozu mimo zatížení

$$W_{cold} = W_{cold}(s, f). \quad (3)$$

Je nutno mít vykreslené různé pracovní křivky pro všechny (sinusoidní) asymetrické podmínky, z nichž se při analýze tření následně vychází. Při reálném odlévání je práce hydraulického válce zásadně ovlivňována ději v krystalizátoru, což způsobuje výraznou deformaci pracovních křivek běžných pro režim naprázdno. Právě charakter detekovaných změn je klíčem k odhadu tření v krystalizátoru. Během odlévání totiž dochází k smršťování předlitku, přičemž účinkem lubrikantu (licího prášku) se zhoršuje přenos tepla a dochází dokonce k ohřevu licí kůry. Kůra se vlivem ferostatického tlaku prohýbá zpět k desce krystalizátoru. Do vzniklých trhlin ve vrstvě již ztuhlých dendritických krystalů znovu vniká tekutá ocel. Až ve spodní části krystalizátoru je licí kůra natolik pevná, že udrží ferostatický tlak a mezera mezi kůrou a deskou krystalizátoru, kterou vypadnul natuhlý licí prášek, se vyplní plynem. Veškeré uvedené děje pak podstatně mění tření v krystalizátoru, a tedy i pracovní křivky válcem během odlévání.

Na základě znalosti pracovních křivek válce hydraulické oscilace je možno stanovit třecí sílu  $\tau_{fric}$ , která je vypočtena jako pracovní průměrná síla dělená povrchovou plochou krystalizátoru [ $kN \cdot m^{-2}$ ], tedy je dána rovnicí

$$\tau_{fric} = \frac{W_{hot} - W_{cold}}{2 \cdot s \cdot (M_{width} - M_{thickness})} \cdot L_{act} \quad (4)$$

Kde:

$M_{width}$  je šířka vnitřní měděné vložky krystalizátoru [m],

$M_{thickness}$  je tloušťka vnitřní měděné vložky krystalizátoru [m],

$L_{act}$  je délka měděné vložky krystalizátoru [m].

Koeficient tření  $\mu_{fric}$  je pak definován jako poměr třecí síly k ferostatické síle v krystalizátoru, tedy je dán rovnicí

$$\mu_{fric} = \frac{2 \cdot \tau_{fric}}{\rho \cdot g \cdot L_{act}}, \quad (5)$$

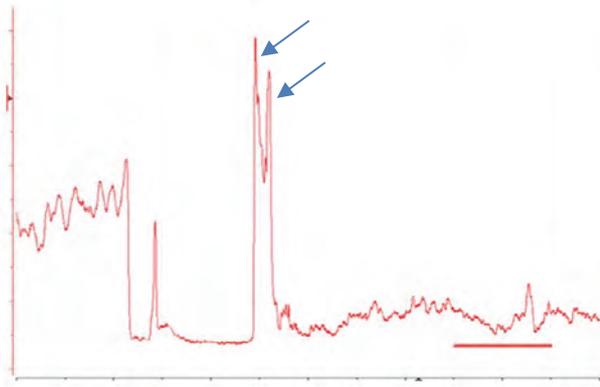
kde  $\rho$  je hustota kapalné oceli =  $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $g$  je gravitační zrychlení =  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Pro analýzu se neustále zaznamenávají všechny výše uvedené proměnné ve vizualizačním softwaru In Touch od firmy Siemens v kabině obsluhy zařízení. Jednotlivé signály jsou ukládány v diagnostickém softwaru iba. Systém iba slouží ke sběru a analýze procesních dat sestavených z dokonale upravených hardwarových a softwarových komponent určených pro zpracování naměřených dat. Výhodou softwaru iba je zpětná analýza průběhu jednotlivých křivek a případná diagnostika poruchy. V neposlední řadě je velkou výhodou možnost analýzy závislosti jednotlivých signálů na sobě a případná pomoc v predikci poruchového stavu zařízení.

### Algoritmus pro stanovení alarmu o predikci průvalu

Při návrhu hodnotícího algoritmu docházelo v první fázi k systematickému sběru dat a jejich konfrontaci se známými výstupními kontrolami plynule litéch předlitků. Analýzou bylo zjištěno, že koeficient tření  $\mu_{fric}$  představuje velice efektivní indikátor nestandardních dějů v krystalizátoru, které mohou vést až k průvalu. Na obr. 3 je uveden příklad rizikového nárůstu koeficientu tření. Pro správnou činnost nového protiprůvalového systému ABS však bylo nezbytné stanovit kritické nárůsty koeficientu tření, které se pro různé druhy oceli a formáty mohou zásadně lišit. Každá ocel se totiž během odlévání projevuje jinými typickými charakteristikami. Např. u nízkouhlíkových (zejména peritektických) ocelí na jednu stranu dochází k velice prudkému a mnohdy nepravidelnému smrštění licí kůry, na druhou stranu jejich meniskus je velice pevný a nehrozí zde velké riziko jeho přilepení ke stěně krystalizátoru. Pro oceli s vyšším obsahem uhlíku je naopak typická vysoká náchylnost k přilepení menisku ke stěně krystalizátoru. Tím tak během odlévání různých skupin ocelí dochází k odlišnému průběhu koeficientu tření, přičemž jednotlivé jeho nárůsty mohou představovat buď běžné projevy dané charakteristickým chováním oceli během tuhnutí, nebo naopak riziko průvalu. Je proto na místě vždy pečlivě zvážit, co jednotlivé píky v průběhu koeficientu tření znamenají a správně je při analýze interpretovat.

V současné době jsou na blokovém zařízení plynulého odlévání v TŽ definovány 3 úrovně kritických nárůstů koeficientu tření, které jsou navíc sledovány pro různé značky oceli v několika časových oknech. Nastavená kritéria jsou v řídicím systému pro jednotlivé značky automaticky načítána a novým protiprůvalovým systémem ABS konfrontována s reálnými průběhy koeficientu tření během plynulého odlévání. Při překročení limitních stavů pak protiprůvalový systém ABS generuje adekvátní zásahy do procesu odlévání efektivně zamezující vznik průvalu, aniž by byla nutná asistence osádky.



Obr. 3 Trend změny koeficientu tření v průběhu odlévání s rizikovým nárůstem jeho hodnot

Fig. 3 Trend of change in friction coefficient during continuous casting

## 2. Digitální akcelerometry pro přesnější diagnostiku oscilačního mechanismu

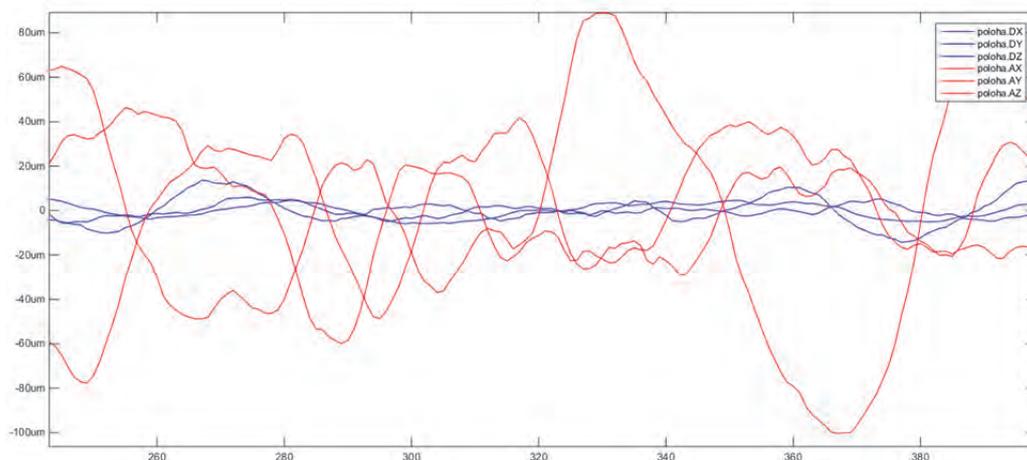
Ve spolupráci s VUHŽ a.s., Dobrá (VÚHŽ) byl jako nadstavba vyvinutého protiprůvalového systému ABS otestován digitální tříosý akcelerometr pro vyhodnocení stavu oscilačního mechanismu. V současné době jsou na blokovém zařízení plynulého odlévání TŽ využívány analogové akcelerometry. Během testu na jednom licím proudu se potvrdilo, že digitální akcelerometr je přesnější

a lze využít jeho signál jako další vstup do algoritmu vyhodnocení nebezpečí tření.

Dřívější systém DGS využíval dva dvouosé analogové akcelerometry umístěné v chlazeném pouzdru. Signály jednotlivých akcelerometrů byly připojeny na analogovou kartu elektroniky DGS, která pomocí mikropočítačové karty NUCLEO odfiltruje a vyhodnotí signál. Následně jej aplikací DGS na serveru uloží v datových souborech.

Nový systém vyvinutý ve spolupráci s VÚHŽ je založen na jednom tříosém digitálním akcelerometru. Samotný akcelerometr v pouzdře byl během testů uložen na místě stávajícího akcelerometru. Při testování napojení diagnostiky pohybu krystalizátoru na informační systém TŽ se měřily parametry stávajícího analogového řešení a také digitální náhrady. Šum snímače zrychlení lze přepočítat z mV, resp. LSB, na mm. Lze tedy stanovit, jakou výchylku by akcelerometr zobrazil, pokud by nebyl vystaven dynamickému zrychlení (pokud by nedocházelo k žádnému pohybu oscilačního stolu).

Jako A/D převodník pro test byl použit velmi kvalitní 24bitový B&K analyzátor. Měření bylo prováděno v laboratorních podmínkách. V průmyslovém prostředí plném rušivých signálů se bude navíc u analogové verze přidávat šum indukovaný do kabelu a tento šum bude růst s délkou kabelu. Z toho vyplývá, že signál analogového akcelerometru bude v průmyslovém prostředí vykazovat ještě horší parametry, než byly zjištěny při srovnávacích testech.



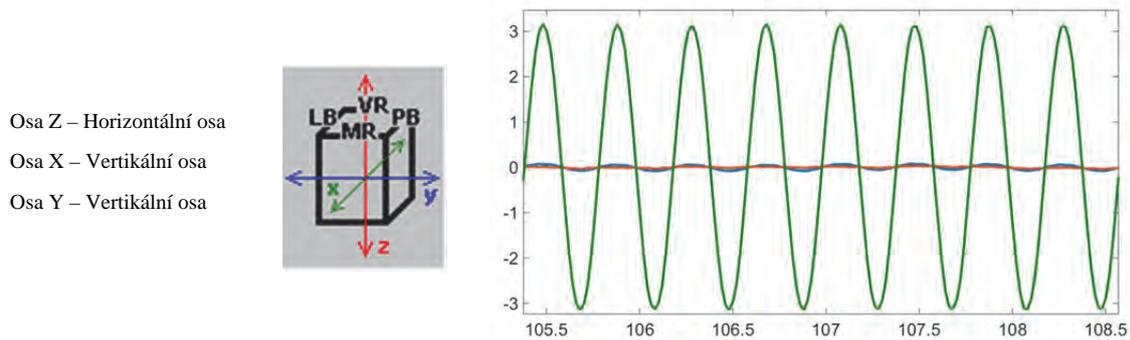
Obr. 4 Srovnání šumu analogový (červená) vs. digitální (modrá)

Fig. 4 Comparison of analog (red) vs. digital (blue) noise

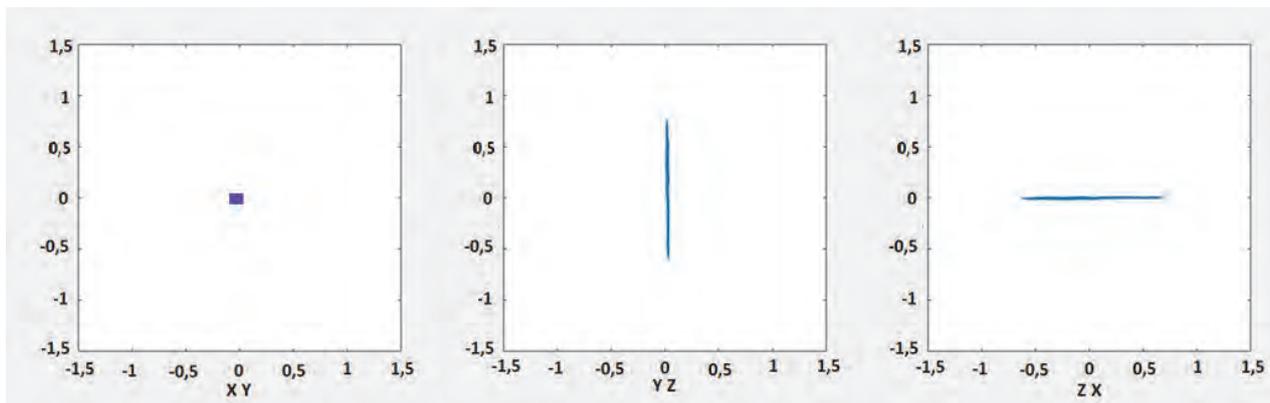
Jelikož digitální verze akcelerátoru vykazovala výrazně lepší šumové parametry, jak lze vidět na obr. 4, upustilo nadále se od napojení analogového akcelerometru. S použitím navrhnutého digitálního akcelerometru lze předpokládat maximální chybu v řádu 10 – 20  $\mu\text{m}$ , zatímco u analogového akcelerometru do 100  $\mu\text{m}$ .

K akcelerometru bylo navrženo zařízení sbírající data z akcelerometru, které provádělo filtraci. Data z akcelerometru se vzorkovací frekvencí 1 kHz byla decimována, filtrována a integrována na výstupní signál 40 Hz. Na obr. 5 a 6 je vykreslen výsledek testu digitálního

akcelerometru v třech osách. Tyto křivky budou vykresleny ve vizualizaci In Touch v kabině obsluhy zařízení. Obsluha provádí po každé přestávce licí jednotky na jiný formát odlévání test oscilačního mechanismu. Samotný test spočívá v zapnutí oscilačního mechanismu v definovaném časovém intervalu. Po dobu testu oscilačního mechanismu akcelerometr jednotlivé osy vyhodnotí a zobrazují je v informačním systému. Pokud výsledný graf zobrazí odchylku osy X, Y nebo Z větší než 0,5 mm, je tato anomálie považována za poruchový stav.



Obr. 5 Vypočtená poloha,  $f_s = 40$  Hz, oscilační pohyb krystalizátoru  
Fig. 5 Calculated position,  $f_s = 40$  Hz, the oscillating motion of the mould



Obr. 6 Vypočtená poloha X, Y, Z, oscilační pohyb krystalizátoru  
Fig. 6 Calculated X, Y, Z, position, the oscillating motion of the mould

Ze změřených dat lze usuzovat, že po doplnění vizualizace jednotlivých os v informačním systému bude možno plně nahradit stávající analogový systém. Následně bude možno propojit tento systém s protiprůvalovým systémem a dosáhnout přesnější a včasější predikce vzniklých rizikových stavů.

## Závěr

V podmínkách blokového zařízení plynulého odlévání TŽ byl vyvinut nový protiprůvalový systém ABS pracující na základě analýzy zatížení válců hydraulické oscilace. Jako vhodný indikátor rizikových stavů v průběhu plynulého odlévání se osvědčil koeficient tření, který je počítán na základě analýzy pracovních křivek válce ve stavu bez zatížení a během odlévání. Bylo také prokázáno, že pro správnou funkci navrženého protiprůvalového systému je nezbytné používat různé kritické nárůsty koeficientu tření a sledovat je v různých časových oknech. Nutnost používat odlišné přípustné nárůsty koeficientu tření v různých časových oknech pro různé druhy oceli a také různé formáty vyplývá z rozdílného projevu jednotlivých ocelí během tuhnutí. Některé značky oceli totiž vykazují vysokou a nepravidelnou smrštitost, jiné zase náchylnost k lepení ke stěně krystalizátoru. Tím mohou být vyvolány změny koeficientu tření v průběhu odlévání, které přímo nesouvisí s rostoucím nebezpečím průvalu, ale jsou přirozeným projevem dané oceli při tuhnutí. Aktuálně se na

daném zařízení plynulého odlévání používají celkem tři úrovně kritických nárůstů koeficientu tření, které jsou navíc sledovány pro jednotlivé značky oceli v různých časových oknech. Vyvinutý protiprůvalový systém ABS navíc umožňuje automaticky generovat adekvátní zásahy do procesu odlévání, a efektivně tak zamezit vzniku průvalu bez nutné asistence osádky, což je v souladu s moderními požadavky na dodržení zásad průmyslu 4.0. Pracuje se také na dalším rozvoji již vyvinutého a plně funkčního systému ABS, kdy se ve spolupráci s VUHŽ podařilo odzkoušet nový tříosý digitální akcelerometr, jehož implementací bude možné dále zpřesňovat detekci rizikových stavů a provádět diagnostiku celého oscilačního mechanismu.

## Literatura

- [1] BECKMAN, J. *Optimální metody údržby: Praktická příručka*. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00657-8.
- [2] BÖHM, Z., CAGAŠ, J., DOLEJŠÍ, Z., KUČERA, J., PĚTROŠ, J., ŠMRHA, L. *Plynulé odlévání oceli*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1992, 448 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [3] DAVID, J. aj. *Etapa 5 - Zvyšování kvality plynule litéch předlitků monitorováním a diagnostikovaním vad v závislosti na životnosti desek krystalizátoru* (Průběžná zpráva o řešení etapy projektu v programu TIP). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 12/2011, 25 s.
- [4] IRVING, W. R. *Continuous Casting of Steel*. Leeds: University of Leeds, Institute of Materials, Velká Británie, 1993, ISBN 0901716537, 9780901716538.
- [5] ŠTĚTINA, J. *Optimalizace parametrů lití sochou pomocí modelu teplotního pole*. (Habilitační práce) Brno: VUT v Brně, 2008.