

Elektromagnetický snímač pro sochorová kontilití oceli

Electromagnetic Sensor for Steel Billet Continuous Casting

Ing. Martin Štěpánek

VÚHŽ a.s., č.p. 240, 739 51 Dobrá, Česká republika, korespondenční email: mstepanek@vuhz.cz

Článek popisuje koncept elektromagnetického snímače pro sochorová kontilití oceli a jeho praktické provozní zkoušky. Pozornost je věnována počátečním úvahám o pozici a principu umístění snímače na krystalizátoru, přes prvotní mechanické návrhy a ideové koncepty až po praktické provozní testy, kde se prokazuje přínos tohoto typu měření. Za klíčovou výhodu je považováno měření tekuté hladiny oceli bez vlivu liciho prášku a větší stabilita hladiny při běžné produkci. Důležitým aspektem, který se podařilo naplnit, byly následně automatické starty, které musí být s ohledem na velikost odlévaného formátu realizovány pouze v automatickém režimu.

Klíčová slova: Elektromagnetický snímač, hladinoměr, hladina tekuté oceli, krystalizátor, sochorové kontilití

The article describes the concept of an electromagnetic mold level sensor for billet casters of the continuous steel casting machines and its practical operational tests. Attention is paid to the initial considerations of the position and principle of placing the sensor on the mold, through the initial mechanical design and conceptual layout to practical operational tests, where the benefits of this type of measurement are demonstrated. The key advantage is considered to be the measurement of the liquid steel level without influence of the casting powder and greater stability of the steel level during regular production. An important aspect that was successfully fulfilled was the subsequent automatic starts, which must be implemented in the automatic mold level control mode only, taking into account the size of the casted format. The practical tests showed that the electromagnetic sensor brings improvement of the mold level signal stability by reduction of its noise. The measuring range is sufficient to ensure automatic start of casting. The mold level sensor was used for a production for several months and no major issues were found. Sensor itself is made of stainless steel block, cooled by water and built for a short time steel overflow. All those aspects were tested in practise. The biggest improvement seen was the mold level stability coming out from the electromagnetic measurement principle with a combination of two reading coils. Such a set up allowed also a special functions which were impletemented to provide operational safety even during emergency situations. Such as slag O rings removal, slag cracking, cleaning. The mold powder was safely independent from the measurement and its layer was invisible for the mold level sensor. All above tests were carried our with SEN casting. Number of steel grades were tested including stopper rod control and casting speed control casting. The mold level sensor itself is safe from EMC point of view with his low voltage range only. I tis now more about mechanical mold modifications needed for a mold level sensor placement on the mold copper plate top.

Key words: Electromagnetic sensor, mold level measurement, level of liquid steel, mold, billet continuous caster

1. Úvod

Klíčovým výrobkem VÚHŽ a.s., divize Automatizace je hladinoměr, který se skládá z elektromagnetického snímače výšky hladiny tekuté oceli v krystalizátoru a vyhodnocovací jednotky. Typickou aplikací jsou bramová kontilití, bloková kontilití a tenké bramy. Snímače pracují ve značně náročných podmínkách, které zahrnují až případné havarijní přelití tekutou ocelí. Měření hladiny funguje na principu generování vířivých proudů ve všech kovových dílech v okolí snímače a ve vyhodnocení změny intenzity magnetického pole v krystalizátoru vyvolané změnou výšky měřené hladiny. Každý snímač se skládá ze dvou samostatných měřících hlav, které spolu měřením pokrývají maximální možný povrch tekuté oceli.

Výsledkem je přirozeně filtrovaný signál výšky hladiny, který je dále použitý pro automatickou regulaci hladiny.

Snímač samotný je tvořen nerezovým tělesem, které je vybavené budicí cívkou pracující na frekvenci v okolí 800 Hz, a dále dvěma snímacími cívkami, které jsou typicky schopné měřit hladinu ve dvou lokalitách krystalizátoru. Tato vlastnost jednak poskytuje možnost měřit a vyhodnocovat signály ze dvou částí (oblastí) krystalizátoru a jednak poskytuje možnost mezi jednotlivými signály přepínat v případě mimořádného stavu. Velice často se tyto signály v praxi vyhodnocují samostatně pro účely pokročilého určování kvality odlévaného polotovaru.

Princip vířivých proudů je založen na střídavém elektromagnetickém poli vybuzeném budicími cívkami snímače. Pole budí vířivé proudy v okolních kovových

částech a rovněž v měřené hladině tekuté oceli. Předností tohoto typu měření je nezávislost na vyhodnocované třídě oceli, což poskytuje značnou volnost pro jakékoli typy odlévání. Takto se měření používá pro měření nerezových ocelí stejně jako pro uhlíkaté třídy.

2. Koncept sochorového snímače

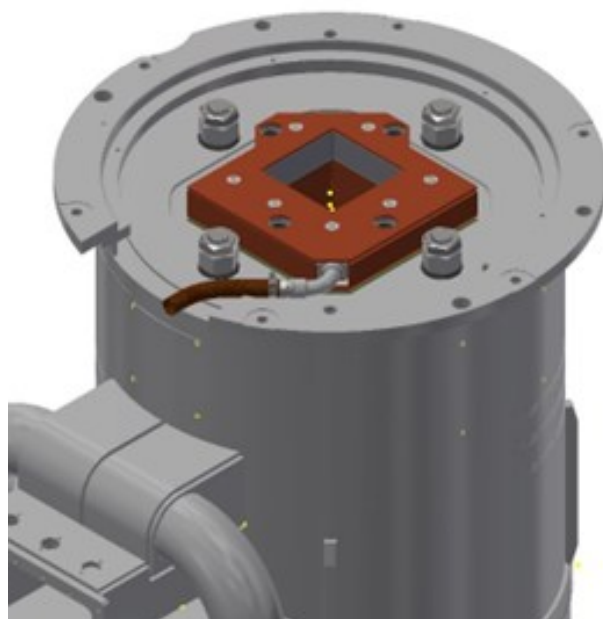
Pro účely elektromagnetického měření hladiny využívá společnost VÚHŽ a.s. nerezová tělesa snímačů, která jsou navržena do extrémních provozních podmínek a obecně vzato jsou konstruována na přežití havarijních podmínek přelitím tekutou ocelí. Ve stejném konceptu byl navržen i sochorový snímač. Z hlediska elektromagnetického měření je klíčové, že desky krystalizátorů jsou měděné a tvoří jakési stínění pro elektromagnetické pole. Toto pak lze koncentrovat dovnitř krystalizátoru, kde je žádoucí jeho co nejvyšší intenzita. Stejně jako krystalizátor, je i snímač obalen v 5 mm tlustém měděném plechu, který opět tvoří štít nebo stínění pro magnetické pole snímače, které je v maximální míře směřováno do krystalizátoru.

Z výše uvedeného plyne, že mezery anebo volné prostory mezi snímačem hladiny a krystalizátorem jsou nežádoucí a umožňují magnetickému poli unikat mimo měřicí oblast hladiny tekuté oceli. Snímač je na krystalizátor uchycen přímo na horní hranu měděné desky anebo trubky tak, aby případné mezery nevznikaly ani při různých situacích během produkce. Což je klíčové pro stabilitu signálu, který se po celou dobu produkce využívá pro regulaci hladiny. Cílená fluktuace hladiny je mnohdy do ± 2 mm.

Původní konstrukce sochorového snímače vycházela z konstrukce rámečku. Takový snímač byl položen po celém obvodu krystalizátorové trubky a byl vyroben přímo na míru dle daných konkrétních rozměrů. Výhodou byla pevná a tuhá koncepce snímače, který se z technického pohledu měření hladiny jevil jako nejlepší možné řešení pro splnění daného cíle měřit hladinu na sochorovém kontiliti. Následné komplikace v provozní praxi vyplynuly velice rychle. Zjistili jsme, že v podstatě každý jiný výrobce typicky stejných měděných trubek pro sochorová kontiliti má ve své horní části jiné rozměry. Proto by bylo nutné pro koncept rámečkového snímače individuálně vyrábět jiné a další velikosti rámečkového snímače hladiny, který by rozměrově vyhovoval dané měděné trubce.

Výše uvedené omezení nám bylo známo a interně jsme brali rámečkový typ snímače jako mezikrok pro další evoluční konstrukční verzi sochorového snímače. Šlo tedy o projektové cvičení s jediným cílem ověřit si funkčnost a použitelnost elektromagnetického principu měření hladiny na sochorovém rozměru. Velikou nejistotu v tomto projektu určoval fakt, že jsme se rozhodli měřit reálný povrch tekuté oceli principem, který opravdu nahlíží seshora na povrch měřené hladiny skrz krycí ochranný lící prášek. Nicméně od samého začátku byl rámeček tvořen dvěma měřicími rameny a dvěma pasivními rameny, která byly konstrukčně, z pohledu pevnosti a tuhosti, vyrobeny z jednoho dílu teplotně odolné nerezové oceli. Pohled viz Obr. 1.

Snímač samotný je vybaven budicími a snímacími cívkami. Je propojen s vyhodnocovací elektronikou pomocí 12žilového kabelu, který, jelikož není umístěn uvnitř vodního pláště krystalizátoru, mohl být realizován klasickým způsobem pouze s ochranou s ohledem na podmínky chladicí komory kontiliti. Snímač je dále vybaven vstupem a výstupem chladicí kapaliny a upínacími body, pomocí nichž je mechanicky přichycen ke krystalizátoru. Celá montáž snímače probíhá typicky na dílně oprav krystalizátorů, kde je na montáž dostatek prostoru. Snímač je dále elektricky oddělen od krystalizátoru pomocí izolační podložky, která má za cíl eliminovat případný vliv bludných proudů, které v tělese krystalizátoru vznikají.



Obr. 1 Rámečkový sochorový snímač

Fig. 1 Frame-type billet sensor

3. Provozně výhodná konstrukce

Prvotní testy rámečkového sochorového snímače proběhly v režimu sledování hladiny a následně i v režimu automatické regulace hladiny s tím, že největší výzvou měření byly úpravy PLC s ohledem na nutné plně automatické starty odlévání. Hladina tekuté oceli na sochorovém kontiliti s rozměry kolem 150 x 150 mm je s ohledem na hloubku žádané hladiny pro obsluhu téměř mimo zorné pole, a i s ohledem na rychlost odlévání nelze počítat s možností ručního odlévání. Jakékoli mimořádné situace tam musí být zohledněny v programu PLC, což vytváří na programátory zvýšené nároky. Je potřeba logikou ovládní pokrýt širokou škálu situací, které mohou při odlévání nastat, a všechny je mít připravené v samotném programu. Diskuze kolem automatické regulace hladiny tedy probíhaly na etapy. Mnohé situace se musely otestovat až v praxi. Takto jsme například v pozorovacím režimu, kdy nebyl použit signál rámečkového snímače pro automatickou regulaci, čelili přelití snímače a mohli si tak naživo ověřit možnosti vodního chlazení. Pro snímač

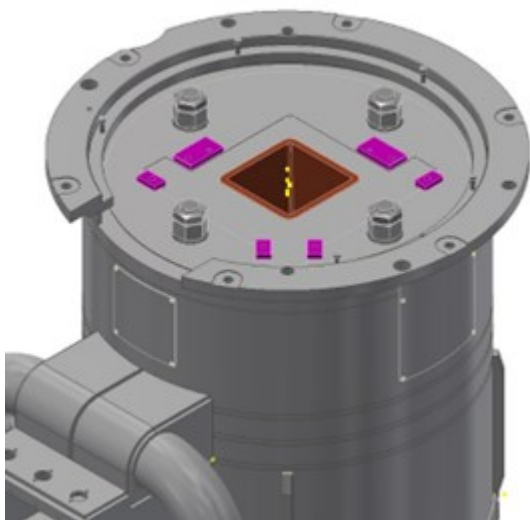
samotný nebylo přelití tekutou ocelí nijak zásadní a po očištění jsme rámečkový snímač mohli opět použít pro lití.

S ohledem na rozmanitost konstrukčních řešení měděných trubek jsme přešli do druhé fáze a tou byl snímač tvaru L. To umožňovalo vyrobit jeden samotný snímač L, který mohl být univerzálně použitý na rozdílné měděné trubky jednoho sochorového kontilití bez nutnosti větších úprav. Snímač je doplněn pasivní vložkou, která mechanicky doplňuje potřebný rámečkový tvar snímače a je tak poměrně levně a univerzálně přizpůsobená konstrukci dané měděné trubky krystalizátoru. Je potřeba brát technicky v potaz, že samotný snímač a L pasivní vložka tvoří v podstatě prodloužení měděné trubky krystalizátoru a musí

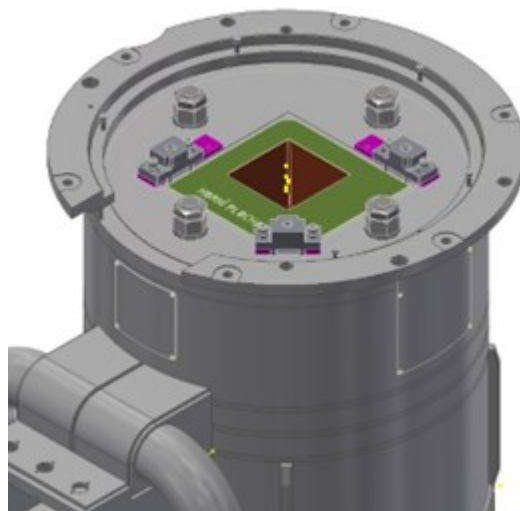
do finální fáze s použitím signálu pro automatickou regulaci odlévání včetně automatických startů.

Na Obr. 2 až 6 lze vidět mechanické uchycení L sochorového snímače VÚHŽ na krystalizátoru koncového zákazníka Třineckých železáren, na kterém se ověřovaly možnosti a předpoklady elektromagnetického principu měření na sochorovém kontilití. Snímač svým principem měří a vyhodnocuje celý povrch tekuté oceli, který integruje jeho povrch do výsledného signálu hladiny.

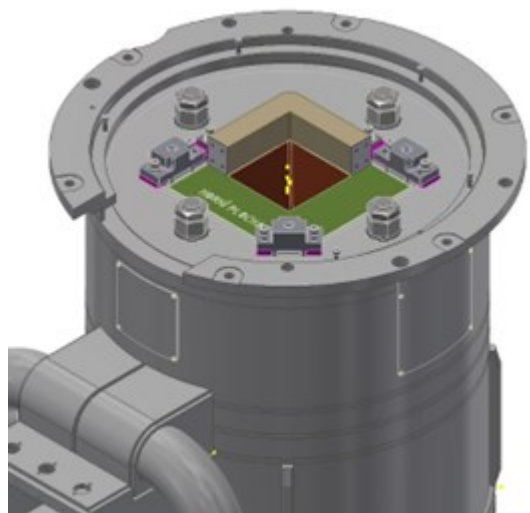
Princip mechanického uchycení je v souladu s principy uchycení ostatních snímačů VÚHŽ, který uplatňuje tzv. princip dotlačování. Poloha snímače je mechanicky



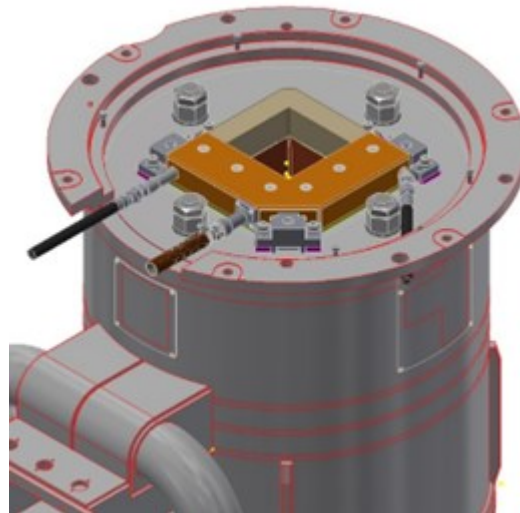
Obr. 2 Mechanické úpravy krystalizátoru
Fig. 2 Mechanical modifications of the mold



Obr. 3 Držáky a podložka na krystalizátoru
Fig. 3 Sensor holders and gasket on the mold



Obr. 4 Pasivní vložka na krystalizátoru
Fig. 4 Passive insert on the mold



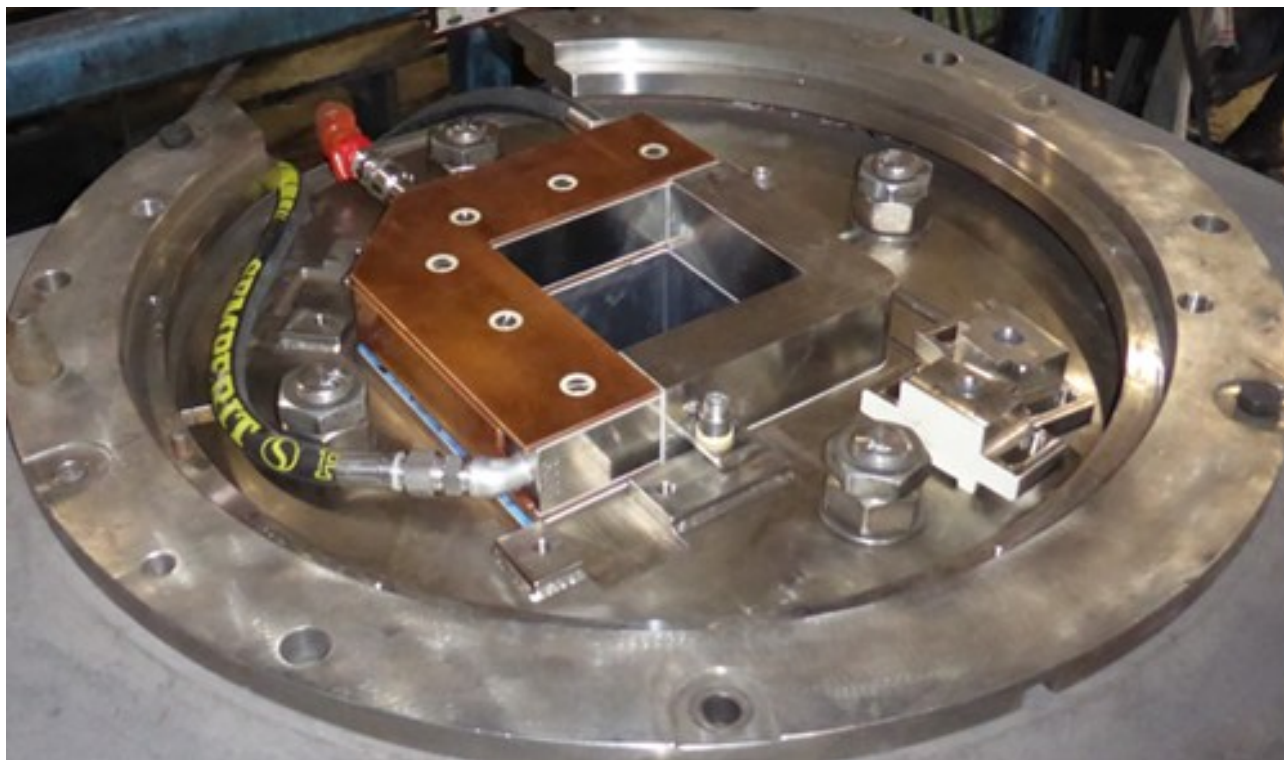
Obr. 5 Sochorový L snímač na krystalizátoru
Fig. 5 L-shape billet sensor on the mold

být konstrukčně připravené i na možné přelití tekutou ocelí. Na tento havarijný stav jsou snímače VÚHŽ konstruovány a technicky připraveny již historicky a tvoří tím jednu ze svých předností.

S tímto snímačem jsme zopakovali již dříve provedené provozní zkoušky a již v mnohem rychlejším režimu přešli

vymezená držáky, které určují samotnou pozici snímače. Ten je dále seshora dotlačován krytem snímače, popřípadě horní flánží krystalizátoru. Celý tento princip zajišťuje fixní vzájemnou polohu snímače a horní části měděné desky během celého procesu odlévání, a tedy během pracovní doby snímače. Robustnost snímače a jeho vhodné

uchycení na krystalizátor cílí na maximální možnou životnost snímače bez nutnosti zásahu údržby.



Obr. 6 Sochorový L snímač na krystalizátoru
Fig.6 L-shape sensor on the mold

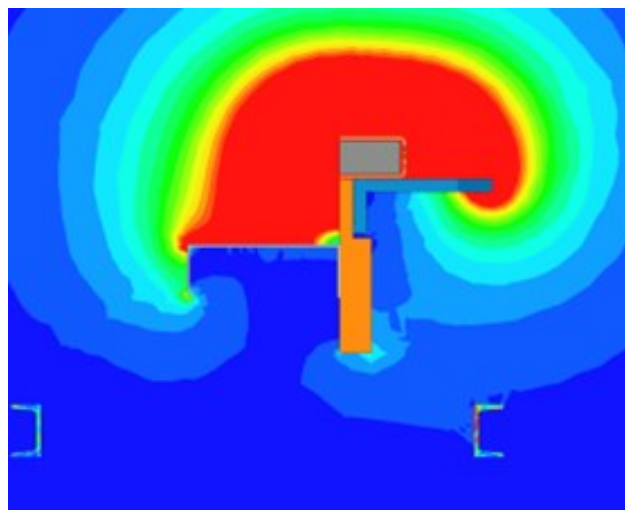
4. Praktické provozní zkoušky

Snímač svým principem generuje elektromagnetické pole uvnitř krystalizátoru. Toto pole vniká do povrchu tekuté oceli. Tím se ve vodivém povrchu tekuté oceli generují vířivé proudy. Vypočtené magnetické pole generované snímačem je zobrazeno na Obr. 7. Jeho tvar a intenzita jsou konceptem snímače koncentrovány dovnitř krystalizátoru tak, aby jeho maximální část intervenovala s povrchem tekuté oceli jakožto s měřenou veličinou. Výsledkem je signál hladiny oproštěný od vlivu licího prášku, popřípadě teploty měděné trubky. Tím se odlišuje od většiny jiných konkurenčních měřidel. Snímač vyniká stabilním signálem hladiny, což je dáno jeho principem měření celého povrchu tekuté oceli, což je dáno jeho velikostí magnetického pole, které se pro účely měření vyhodnocuje.

V Obr. 7 je červenou barvou zvýrazněná oblast největší intenzity magnetického pole snímače. Pod snímačem a magnetickým polem je vidět simulovaná hladina, která je pro účely laboratorních testů tvořena hliníkovou deskou. Zelené a modré části ukazují na oblasti s nižší intenzitou magnetického pole.

Pro představu je potřeba si uvědomit, že magnetické pole je střídavé a je tak schopno měřit i nemagnetické ovšem vodivé materiály, což je požadavek vzniku vířivých proudů. Tato skutečnost je klíčovou pro měření tekutých kovů, které se svou teplotou pohybují vysoko na

Curieovým bodem. Pozbývají tedy své feromagnetické vlastnosti. Díky tomuto fyzikálnímu jevu lze pomocí interakce vířivými proudy měřit tekutou ocel, tekutou měď, tekutý hliník a další kovy.



Obr. 7 Rozložení elektromagnetického pole snímače
Fig. 7 Sensor electromagnetic field view

4.1 Studené zkoušky

Pro účely provozních testů – a především z důvodu schválení celého projektu – jsme se spolu s koncovým zákazníkem dohodli na dodržení stejné fyzické hladiny v krystalizátoru, jaká byla na tomto proudu provozována před testy. Jelikož jsme pro účely elektromagnetického měření potřebovali umístit snímač blíže k tekuté oceli, museli jsme si nechat vyrobit novou a kratší měděnou trubku a tím vznikl i požadavek na novou konstrukci samotného krystalizátoru. Výsledná měděná trubka má délku 930 mm a umožňuje, aby se snímač nacházel zhruba 60 až 80 mm nad úrovní jmenovité hladiny oceli. Omezujícím faktorem byl dosah elektromagnetického snímače, který byl stanoven na 150 mm. Elektromagnetické pole je zde limitováno velikostí měděné trubky, a to svým rozměrem 150x150 mm.

V průběhu příprav na testy elektromagnetického snímače na sochorovém kontilitu byly nutné i úpravy PLC, a to z důvodu jiného rozsahu měření pro nový vs. původní systém měření hladiny. V obdobném duchu se upravily limity i pro regulaci. Menší vzdálenost mezi žádanou hladinou a horní hranou měděné trubky, což vyvolalo diskuzi o možném snížení bezpečnosti během případného přelítí, jsme zargumentovali 3x rychlejší odezvou elektromagnetického snímače hladiny. Na případné změny hladiny tak mohla regulace reagovat mnohem dříve a v konečném důsledku jsme považovali úroveň bezpečnosti stejnou anebo obdobnou jako pro původní měření hladiny.



Obr. 8 Hliníková simulační deska
Fig.8 Aluminium simulation plate

Studené zkoušky v sobě zahrnovaly simulace automatických startů, které jsme realizovali pomocí hliníkové simulační desky (viz Obr. 8), se kterou se daly nasimulovat různé situace, které by mohly při odlévání nastat. Rovněž jsme se zaměřili na bez nárazové přepínání mezi původním a novým měřením po rampě. Veškeré úpravy byly realizovány společně s koncovým zákazníkem a byly diskutovány jak z pozice bezpečnosti, tak technického přínosu celého testu.

Nutné úpravy v sobě zahrnovaly především změny limitů hladiny s ohledem na bezpečnost při odlévání. Principiálně rozdílné typy měření pro automatické starty vyžadovaly různé přístupy z pohledu logiky PLC, dále možnost přepnutí ze stávajícího měření hladiny na nový snímač L, a to bez nárazově po rampě, atd.

Samotné měření hladiny VÚHŽ vyžaduje nastavení parametrů během studených testů. Tyto probíhají se simulační hliníkovou deskou a zjišťuje se zde odezva signálu na změnu pozice hliníkové desky jakožto modelu pro různé vzdálenosti desky od snímače. Dle získané odezvy jsme nastavili parametry měření tak, aby byla výsledná závislost co nejbližší požadovanému cílovému rozsahu, které definovalo nastavení řízení hladiny v PLC.

4.2 Provozní zkoušky

V první fázi testů byl použit elektromagnetický snímač pouze k pozorování hladiny a doladění parametrů hladinoměru VÚHŽ. Pro účely ověření signálu snímače v porovnání s pozicí tekuté oceli v krystalizátoru jsme používali ocelový drát, který se pro účely ověřování vnořoval do tekuté oceli, kde se utavil na pozici aktuální výšky oceli v krystalizátoru. Výsledná délka drátu byla použita pro ověření se signálem hladinoměru. Takto jsme během testů provedli zhruba 200 ověřovacích měření s průměrnou výslednou odchylkou do 1 mm od skutečné výšky hladiny (viz ukázka záznamu na Obr. 9).

Takto ověřený signál hladiny, kdy jsme s koncovým zákazníkem kontrolovali signál v různých situacích v provozu, a po důkladné verifikaci jsme použili pro automatickou regulaci hladiny. Velkou výzvou byly starty lití, kde jsme neměli tolik šancí samotný signál verifikovat. Nakonec se však starty lití podařily realizovat spolehlivě a naskytla se možnost použít signál z elektromagnetického snímače hladiny pro celou sekvenci. Takto jsme realizovali zhruba 13 sekvencí lití. Tímto jsme využili veškerou kapacitu životnosti měděné trubky krystalizátoru a mohli tak přejít k zakoupení další měděné trubky pro další testy. Současné měření nám tak umožnilo spolehlivě provozovat elektromagnetický snímač hladiny umístěný na hraně měděné trubky sochorového krystalizátoru ZPO2 kontilitu v Trineckých železárnách. Mohli jsme tak přejít k vyhodnocení signálu hladiny v porovnání s původním radioaktivním měřením.

Hned při verifikaci signálu hladiny z elektromagnetického snímače jsme si všimli závislosti výšky tekuté oceli v krystalizátoru na výšce lícího prášku, která ovlivňovala

původní měření a aktivně tak měnila reálnou hladinu v krystalizátoru během produkce.

Signál hladiny z měření typickým radioaktivním izotopem, který se v dnešní době pro sochorová kontilita používá nejčastěji, v sobě přirozeně zahrnuje šum a je tak značně rozkmitaný. Z pohledu přepnutí na signál hladiny z elektromagnetického snímače jsme okamžitě dosáhli zhruba 5x menší hodnoty sigma střední odchylky hladiny, které jsme monitorovali pomocí snímače VÚHŽ. Toto uklidnění hladiny bylo v souladu s teoretickým předpokladem principu samotného měření hladiny. Kdy elektromagnetický snímač měří fyzicky pouze povrch hladiny tekuté oceli v krystalizátoru a není tak zatížen jinými nežádoucími faktory. Navíc z pohledu elektromagnetického principu je signál imunní vůči tloušťce licího prášku v krystalizátoru. Rozdíly jsou patrné ze záznamů uvedených na Obr. 10 a Obr. 11.

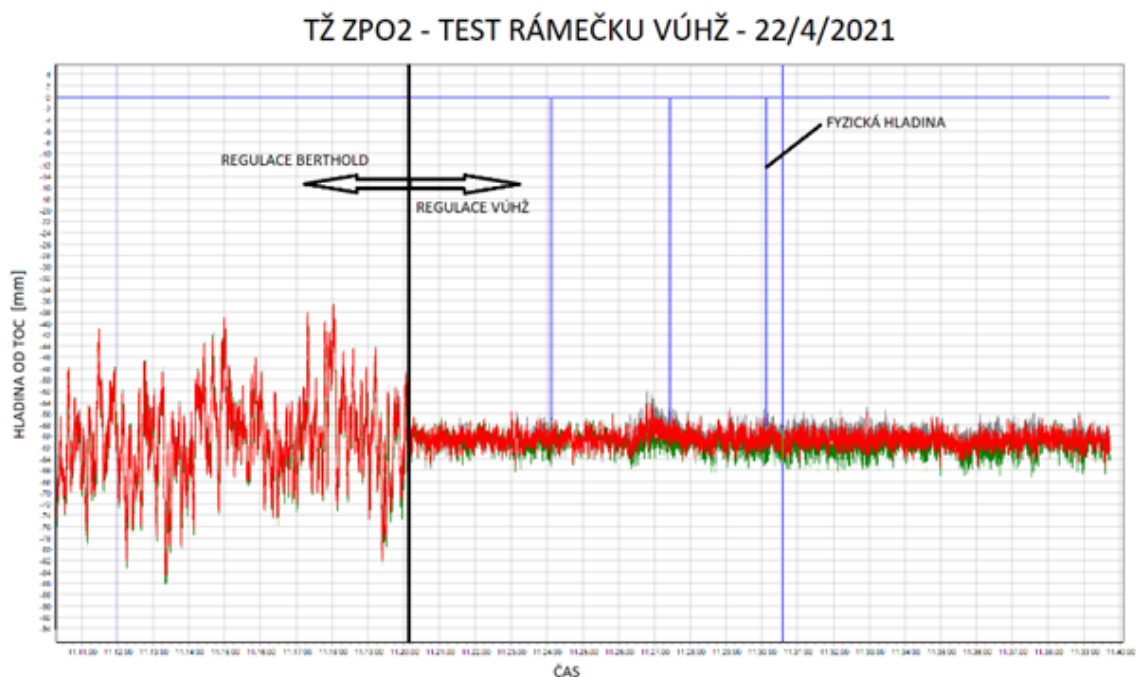
Výše uvedené provozní zkoušky proběhly v konfiguraci odlévání s ponornou licí trubicí a hladina byla zakryta licím práškem. Jde o odlévání kvalitních tříd ocelí. I proto zde mělo testování s elektromagnetickým snímačem technické předpoklady. Cílem provozních testů bylo jednak prokázat přínos kvality na odlévaném sochoru a jednak potvrdit si realizovatelnost provozovat elektromagnetický snímač na sochorovém kontilitu.

Zákazník se specializuje na široký sortiment odlévaných ocelí, zde mohu vyjmenovat například cementační oceli, mikrolegované oceli, šroubárenské a řetězové oceli. Dále ložiskové, pružinové a automatové oceli. Z toho důvodu nám byl při testech elektromagnetického snímače hladiny poskytnut nadstandartní prostor pro testy a po celou dobu příkladná a obětavá spolupráce, jak ze strany provozu a technologie, tak i ze strany podpory pro úpravy PLC.

	A	B	C	D	E	F	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ
	time	real steel	hlad_o	hlad_l	hlad_p	tepl_1	Hla (mm) zmerena pri liti	rozdi (mm) pri liti	pořadové číslo liti	čas startu	datum	sensor	krystal zátor
1													
210	0:27:58	-60	15,95	15,95	15,93	51,59	-61	-1	13	18.8.2021	4x test autostart		
211	0:28:45	-61	16,02	16,22	15,797	51,7	-60	1					
212	16:09:44	-60	15,98	15,85	16,109	55,59	-60	0					
213	16:11:16	-63	16,15	15,88	16,391	55,59	-58	5					
214	16:55:50	-58	16,03	16,06	15,992	55	-60	-2					
215	16:56:53	-56	16,02	16,04	16,008	55	-60	-4					
216	17:20:38	-59	16,02	16,16	15,875	53,8	-60	-1					
217	17:21:55	-57	16,02	16,13	15,891	53,8	-60	-3					
218							PRŮMĚR	0					
219													

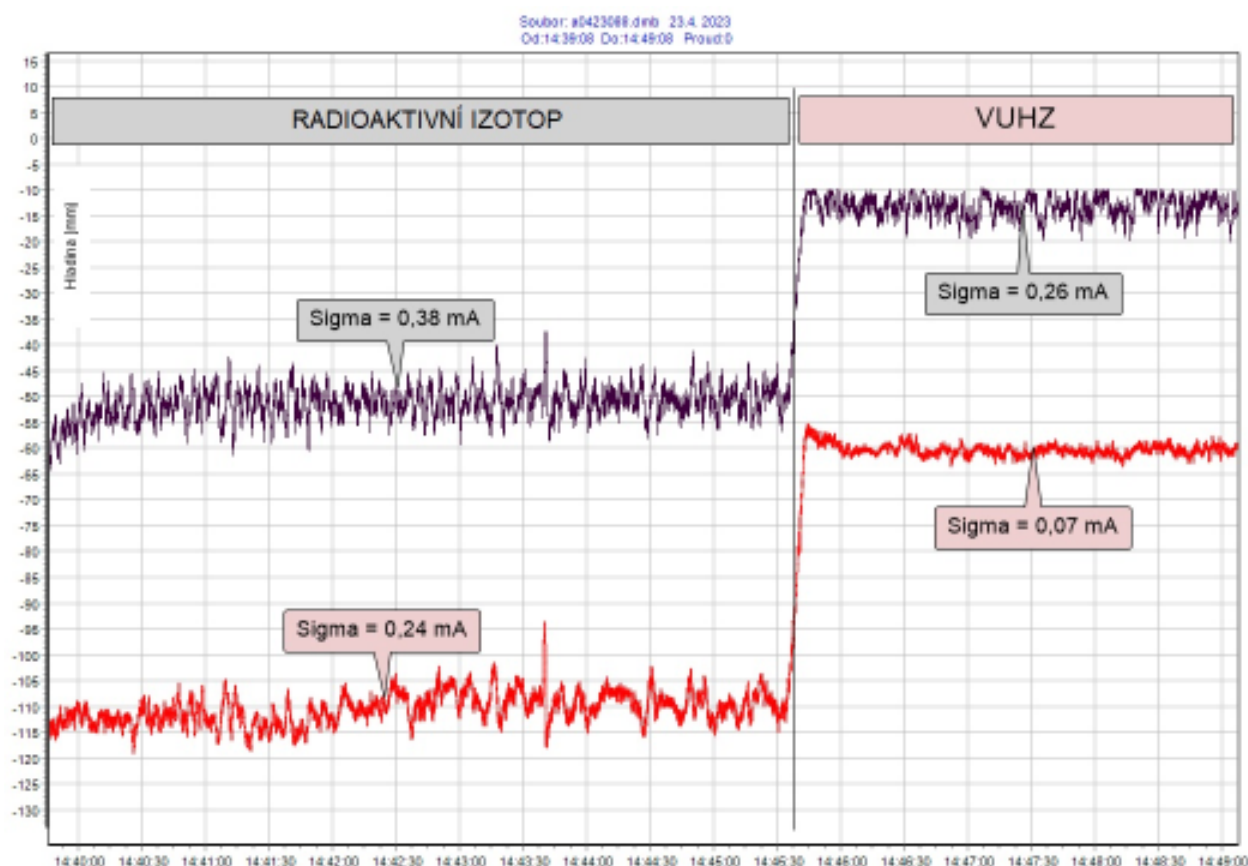
Obr. 9 Měření odchylky signálu hladiny pomocí drátu

Fig.9 Steel wire dips checking results



Obr. 10 Trend signálu hladiny při přepnutí na signál z L snímače

Fig. 10 Switch over to L-shape sensor signal



Obr. 11 Porovnání hodnot sigmy při přepnutí regulace na signál ze snímače L [1]

Fig.11 Sigma comparison from sensors switchover during AMLC

5. Závěr

Teoretické předpoklady elektromagnetického principu měření snímače L VÚHŽ byly v praxi plně potvrzeny a navíc se snímač prokázal jako schopný realizovat kompletní lící sekvenci od samotného plnění krystalizátoru, automatického startu lití, přes použití v regulační smyčce po celou dobu produkce. Plně se navíc projevil jeho přínos pro klidnější a ustálenější hladinu, a to jak z pohledu trendu samotného (signál v regulaci), tak z pohledu reálné hladiny tekuté oceli v krystalizátoru, což bylo ověřeno nezávislým třetím měřením a tím bylo měření pomocí drátu. Je potřeba na druhou stranu zmínit nutnost použití lící trubice a nutnost použití nerezových nástrojů (ideálně dřevěných) pro práci v krystalizátoru během odlévání celé sekvence. Pouze pak je možné mluvit o spolehlivém a opakovatelně dosažitelném přínosu elektromagnetického signálu hladiny pro regulaci na sochorovém kontilitu.

Poděkování

Autor příspěvku děkuje spolupracovníkům divize Automatizace, VÚHŽ, a.s. za pomoc a ochotu při přípravě snímače a realizaci provozních zkoušek.

Použitá literatura

- [1] Rostislav MILATA, Martin SZMARAGOWSKI, Martin ŠTĚPÁNEK, Měření hladiny oceli - VÚHŽ sochorový snímač.pptx, firemní prezentace
- [2] Miroslav PATOČKA Magnetické jevy a obvody, Brno, 2011
- [3] Karel ZEHNULA, Měření neelektrických veličin – měřicí metody, Praha, 1978
- [4] T. PINDUR, A. PAWLIK, J. ROHÁČ, VUHZ electromagnetic mold level measuring system on thin slab caster equipped with electromagnetic mold brake, ECCO, Vídeň, 2017
- [5] J. ROHÁČ, A. PAWLIK, J.E. ERIKSSON, D.A. DOMANSKI, K. VÁLIMAA, D. BOCEK, J. CUPEK, Electromagnetic MLS on bloom continuous casting machines equipped with electromagnetic mold stirrer, JSI, Paříž, 2012