

POMIAR DRGAŃ KRYSTALIZATORA CIĄGŁEGO ODLEWANIA STALI (COS) NA CELE DIAGNOSTYCZNE – BADANIA MODELOWE

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia propozycję analizy stanów pracy krystalizatora w urządzeniu COS na podstawie pomiaru przyspieszenia występującego na krystalizatorze. Autorzy dają krótki opis technologii COS, dzięki któremu łatwiej będzie Czytelnikowi zrozumieć źródło pomysłu proponowanego rozwiązania, prosty model drgań krystalizatora – wykorzystany do badań symulacyjnych, wyniki pomiarów przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie oraz ich analizę widmową. Podsumowaniem jest porównanie wyników badań symulacyjnych z wynikami pomiarów i przedstawienie możliwych perspektyw rozwoju proponowanego rozwiązania.

Słowa kluczowe: ciągłe odlewanie stali, drgania krystalizatora

CONTINUOUS STEEL CASTING MACHINE MOULD OSCILLATION MEASUREMENT AND ANALYSIS – SIMULATION INVESTIGATIONS

The paper puts forth a proposal to analyze work of Continuous Steel Casting Machine mould by measurement of its acceleration. Authors outline short description of Continuous Steel Casting technology which will allow reader to understand origin of the proposed solution, simple model of mould oscillations that was used for simulations, and real measurements results and their analyzes. Summary of the paper is comparison of measurements and simulations results as well as prospect for further development of enrolled conception.

Keywords: Continuous Steel Casting Machine, mould oscillations

1. WSTĘP

Technologia ciągłego odlewania stali (COS) jest od lat 70. XX w. najczęściej stosowaną metodą odlewania stali ze względu na jej wydajność, niskie koszty i wysoką jakość produktu końcowego.

Wyparta przez metodę COS, metoda konwencjonalna odlewania stali do wlewnic wykorzystywana jest obecnie jedynie wtedy, gdy wymagane są szczególne gabaryty wlewków oraz w sytuacjach awaryjnych.

Największym zagrożeniem dla procesu COS, przy założeniu, że parametry są poprawne technologiczne, jest przerwanie pasma odlewanej stali. Zjawisko to polega na przywarciu wytworzonego w krystalizatorze naskórka do ścian krystalizatora, na skutek czego może dojść do jego przerwania i wylania się ciekłego rdzenia pasma. Niesie to za sobą straty finansowe związane z uszkodzeniem maszyny oraz zagrożenie dla zdrowia i życia osób obsługujących urządzenie COS. W mniej drastycznych przypadkach wynikiem przerwania są uszkodzenia powierzchniowe końcowego produktu procesu odlewania stali.

W artykule przedstawiono propozycję diagnozowania stanów pracy krystalizatora na podstawie pomiaru przyspieszeń występujących na krystalizatorze, a następnie ich analizę. Proponowany pomiar i analiza jego wyników może być punktem wyjściowym do wczesnego wykrywania stanów zmierzających do przerwania pasma odlewanej stali w maszynie COS.

Należy również nadmienić, że opisany poniżej model jest pierwszą próbą matematycznego opisu drgań krystalizatora w urządzeniu COS na potrzeby jego diagnostyki.

2. OPIS OBIEKTU

Urządzenie COS pozwala w ciągły sposób przeprowadzać metal ze stanu ciekłego do stanu stałego, z zachowaniem określonych wymiarów geometrycznych.

Ciekła stal z kadzi głównej jest przekazywana do kadzi pośredniej, która stanowi sobą bufor zapewniający stałe ciśnienie ferrostatyczne stali nad krystalizatorem. Aby ograniczyć kontakt ciekłej stali z powietrzem na odcinku pomiędzy kadzią główną a kadzią pośrednią, stosowane są rury osłonowe oraz wytwarzana jest osłona z gazu obojętnego. Następnie z kadzi pośredniej stal przekazywana jest do krystalizatora. Stal przepływa pomiędzy kadzią główną, pośrednią i krystalizatorem z wykorzystaniem sił grawitacji. W dalszym etapie za krystalizatorem jest transportowana przez układ rolek nazywany prowadnicą pasma.

W krystalizatorze wytwarzany jest naskórek, tzn. na skutek kontaktu ciekłej stali z chłodzonymi ścianami krystalizatora rozpoczyna się krystalizacja (przejście z fazy ciekłej do fazy stałej) powierzchni ciekłej stali stykającej się ze ścianami krystalizatora. Naskórek otacza ciekły rdzeń. Aby zapobiec przywieraniu stali do ścian krystalizatora, wprowadza się go w ruch oscylacyjny oraz dodaje zasyпки smarujące, zmniejszające siły tarcia. Ruch oscylacyjny krystalizatora jest wymuszony poprzez układ mimośrodów. Układ ten nazywany jest stołem oscylacyjnym.

Następnie pasmo wyciągane jest z krystalizatora poprzez prowadnicę pasma i chłodzone wodą. Etap ten nazywany jest wtórnym chłodzeniem. Podczas jego trwania naskórek staje się coraz grubszy, aż do momentu, gdy cały przekrój poprzeczny pasma znajdzie się w fazie stałej. Pasma prze-

* Katedra Metrologii, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

** Volantis Systems Ltd., oddział Polska

chodzi następnie przez rolki ciągnące oraz prostujące. Kolejnym krokiem jest cięcie całkowicie skrzepniętego pasma na odcinki o wymaganej długości, za pomocą palników tlenowych.

Należy zaznaczyć, iż waga samego stołu oscylacyjnego z zamontowanym na nim krystalizatorem sięga rzędu kilkudziesięciu ton (dla obiektu badanego wartość ta wynosiła około 35 ton).

Przedstawiony powyżej krótki opis procesu ciągłego odlewania stali obrazuje zjawiska, jakie mają miejsce podczas jego trwania (dokładny opis maszyny oraz technologii można znaleźć w literaturze [1] i [2]).

Aby zapewnić jak najlepszą wydajność i sprawność maszyn COS, stosuje się szeroką diagnostykę pomiarową na każdym z etapów produkcji. Autorzy skupili się na krystalizatorze. Krystalizator jest podstawowym elementem, w którym w sposób ciągły mierzy się przeważnie poziom stali oraz temperaturę ścian. Okresowo, najczęściej po każdej sekwencji odlewania dokonuje się pomiaru zniekształceń ścian krystalizatora, również okresowo dokonuje się pomiarów amplitudy drgań krystalizatora w celu regulacji urządzenia. Sekwencja odlewania może trwać od kilkunastu godzin do paru tygodni, czy też dłużej.

Ciągła obserwacja temperatury ścian krystalizatora oraz poziomu lustra stali w krystalizatorze, w przypadku wystąpienia przerwania, daje informacje o zdarzeniu po jego rozpoczęciu i nie umożliwia, w większości przypadków, zapobieżeniu przerwania lub wstrzymaniu procesu, tak aby nie spowodować strat w produkcji. Porównanie oczekiwanych parametrów drgań krystalizatora z drganiami rejestrowanymi może być informacją umożliwiającą wcześniejszą reakcję obsługi. Do tego celu konieczny jest model drgań.

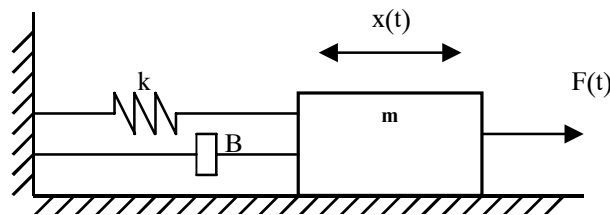
3. MODEL DRGAŃ DO CELÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Punktem wyjściowym do badania zjawiska jest zbudowanie jego modelu. Na cele diagnostyczne matematyczny model drgań krystalizatora w urządzeniu COS został oparty na równaniu różniczkowym drugiego rzędu opisującym wymuszony ruch harmoniczny (1).

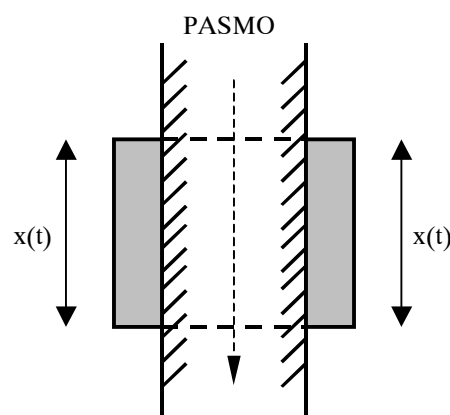
$$m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B \left(\text{sign} \left(\frac{dx(t)}{dt} \right) \right) \cdot \frac{dx(t)}{dt} + k \cdot x(t) = F(t) \quad (1)$$

gdzie:

- m – masa drgająca (rys. 1),
- $B \left(\text{sign} \left(\frac{dx(t)}{dt} \right) \right)$ – współczynnik tłumienia, wielkość zmienna w zależności od znaku prędkości,
- k – stała sprężystości,
- $x(t)$ – przemieszczenie,
- $F(t)$ – siła wymuszająca.



Rys. 1. Układ mechaniczny opisany równaniem (1)



Rys. 2. Układ krystalizator – pasmo

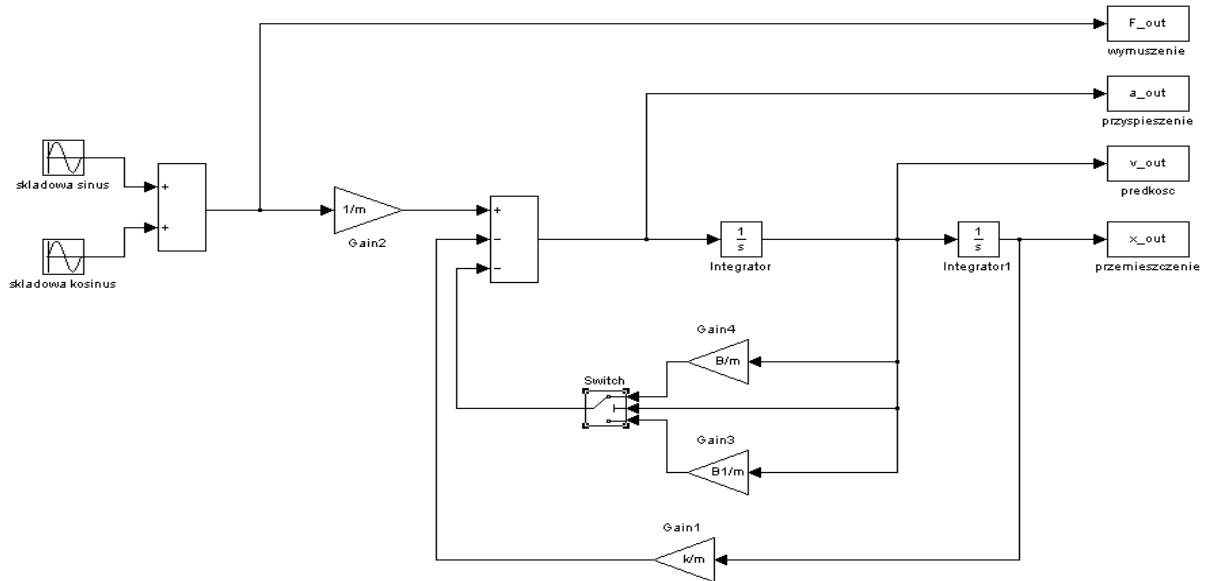
Współczynnik tłumienia B w modelu reprezentuje siły tarcia występujące w rzeczywistym obiekcie i jest zmienny ze względu na kierunek ruchu krystalizatora i stan technologiczny urządzenia. Należy zauważyć, że podczas ruchu krystalizatora w dół (kierunek zgodny z kierunkiem ruchu pasm) siły tarcia pomiędzy krystalizatorem a pasmem (rys. 2) są znikome, gdyż pasmo oraz krystalizator poruszają się z niemal równą prędkością. Wzrost sił tarcia następuje podczas zmiany kierunku ruchu krystalizatora na przeciwny do kierunku ruchu pasma. Wobec powyższych wniosków założono, iż w chwili zmiany kierunku ruchu następuje zmiana wartości współczynnika tłumienia B w modelu. Tak opracowany model – opis matematyczny może posłużyć do badań modelowych.

4. BADANIA SYMULACYJNE W ŚRODOWISKU MATLAB-SIMULINK

Model diagnostyczny został zbudowany w środowisku Matlab z wykorzystaniem pakietu Simulink. Schemat blokowy modelu (rys. 3) oraz dane liczbowe znajdują się poniżej.

Wartości wynikające z obserwacji obiektu:

- amplituda przemieszczenia krystalizatora wynosi $X = 0,006$ m;
- częstotliwość drgań f zawiera się w przedziale od 1 do 6 Hz, wartość zaobserwowana w hucie wynosiła 1,5 Hz;
- masa krystalizatora bez pasma wynosi 23 700 kg, a masa części drgającej stołu oscylacyjnego 11 750 kg, co łącznie daje masę drgającą $m = 35 460$ kg (dane katalogowe).



Rys. 3. Schemat blokowy modelu drgań krystalizatora w urządzeniu COS

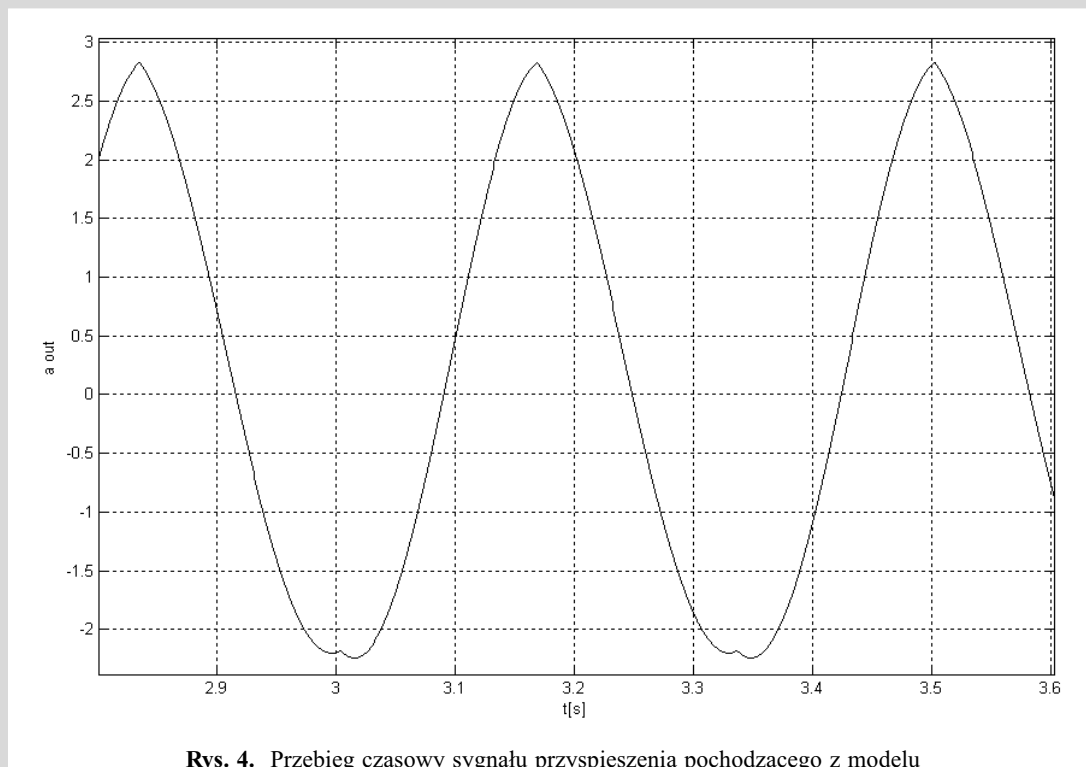
Wartości przyjęte arbitralnie:

- współczynnik tłumienia przy ruchu przeciwnym do kierunku ruchu pasma (jazda w górę) $B = 222 \cdot 10^3 \text{ kg/s}$,
- współczynnik tłumienia przy ruchu zgodnym z kierunkiem ruchu pasma (jazda w dół) $B_1 = 300 \cdot 10^3 \text{ kg/s}$,
- współczynnik sprężystości układu $k = 47 \cdot 10^5 \text{ kg/s}^2$.

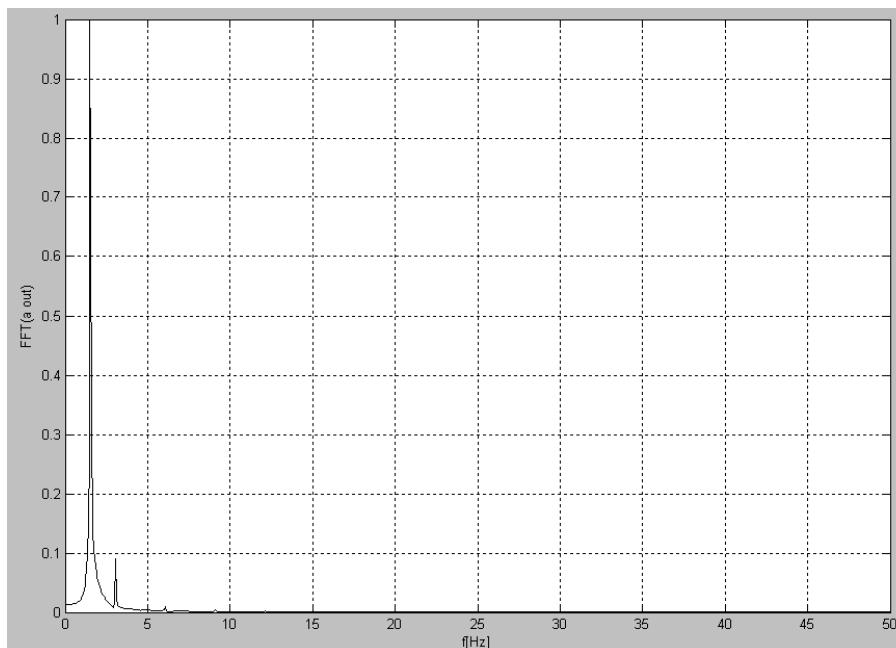
Zmiana wartości współczynnika tłumienia następuje przy zmianie kierunku ruchu krystalizatora. W modelu do symulacji tych zmian użyty został blok przełączający. Dla podanych wartości przeprowadzone zostały symulacje.

Wyniki zamieszczone zostały na rysunkach 4 i 5; przedstawiono tam sygnał przyspieszenia krystalizatora i jego widmo.

W przebiegu czasowym sygnału przyspieszenia (rys. 4) nietrudno zauważyć zniekształcenia. Reprezentują one zmianę siły tarcia wynikającą ze zmiany kierunku ruchu krystalizatora, z kierunku zgodnego z ruchem pasma na przeciwny. W widmie analizowanego sygnału (rys. 5) ujawniają się one jako wyższe harmoniczne, których zmiana zawartości może nieść w sobie informacje o ewentualnym stanie zagrożenia procesu produkcyjnego przerwaniem pasma.



Rys. 4. Przebieg czasowy sygnału przyspieszenia pochodzącego z modelu



Rys. 5. Widmo sygnału przyspieszenia pochodzącego z modelu

Posiadając gotowy model diagnostyczny oraz wyniki jego symulacji, można przejść do przeprowadzenia pomiarów na prawdziwym obiekcie, które umożliwiają weryfikację modelu.

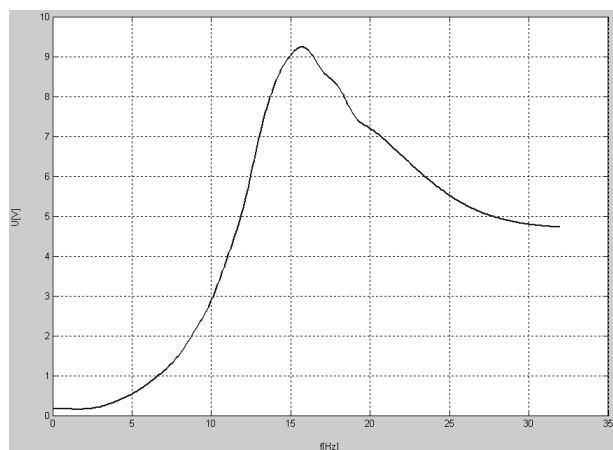
5. REJESTRACJA DRGAŃ OBIEKTU – KRYSTALIZATORA

Kolejnym krokiem badań było zaplanowanie i wykonanie eksperymentu na rzeczywistym urządzeniu COS. W tym celu konieczne było wybranie czujnika, który w najlepszy sposób nadawał się do pomiaru niskich częstotliwości. Wybór padł na czujnik indukcyjny z masą sejsmiczną. Zasadę działania takiego czujnika można znaleźć w [4]. Do eksperymentów użyto czujnik zbudowany w Katedrze Metrolo-

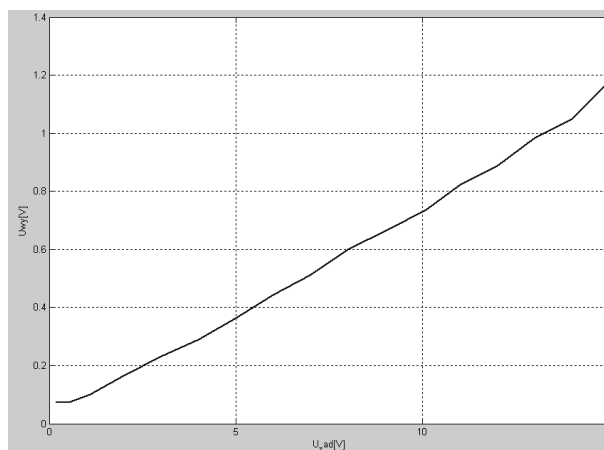
gii, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Czujnik ten posiadał dostatecznie niskie pasmo częstotliwości oraz małe szумы własne w porównaniu do innych dostępnych czujników. Na poniższych rysunkach (rys. 6 i 7) znajdują się przykładowe charakterystyki użytego czujnika. Charakterystyki zostały zdjęte podczas pracy czujnika na laboratoryjnym stole oscylacyjnym.

Podczas kolejnej prac pomiarowych na maszynie COS, mieliśmy możliwość wykonania pomiarów w czasie pracy urządzenia na sucho, tzn. bez pasma, oraz podczas normalnej pracy – w trakcie odlewania stali.

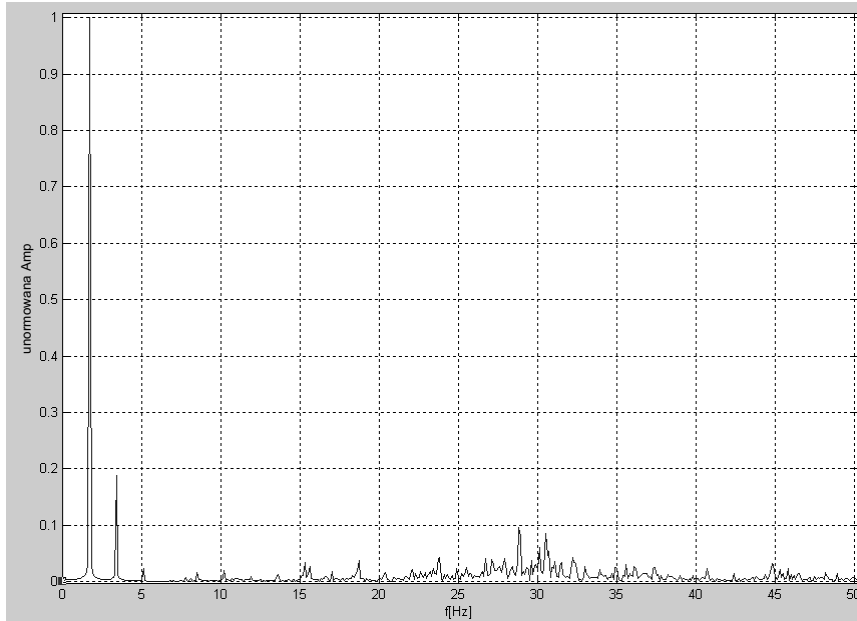
Sygnały pochodzące z czujnika przyspieszeń przekazywane były do komputera osobistego, na którym je rejestrowano. Dalsze przetwarzanie zarejestrowanych sygnałów odbywało się z wykorzystaniem środowiska Matlab.



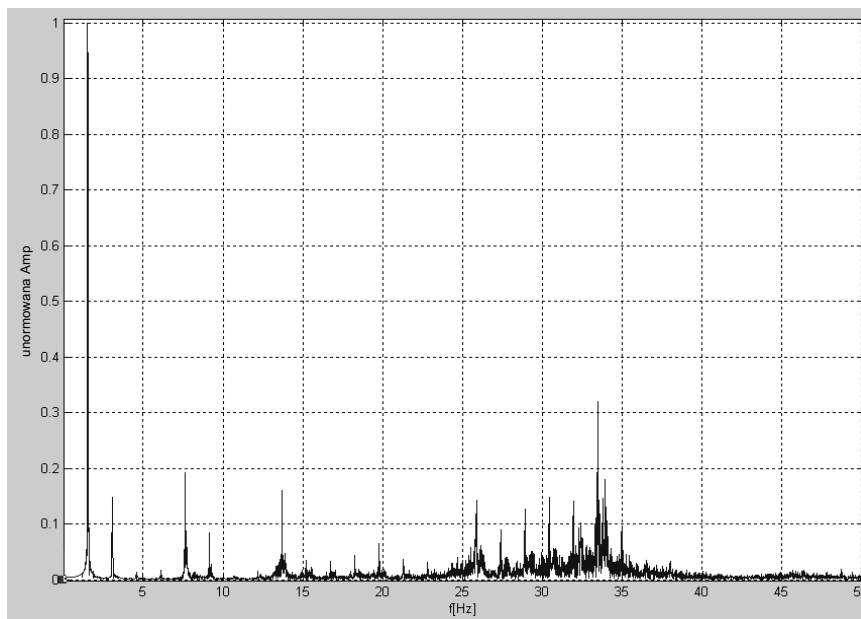
Rys. 6. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa (napięcie wyjściowe czujnika w funkcji częstotliwości)



Rys. 7. Charakterystyka statyczna dla wymuszenia o $f = 10$ Hz (napięcie wyjściowe czujnika w funkcji napięcia wymuszającego drgania)



Rys. 8. Widmo sygnału przyspieszenia przy pracy maszyny COS bez pasma



Rys. 9. Widmo sygnału przyspieszenia w stanie normalnej pracy z pasmem

Na dwóch kolejnych rysunkach (rys. 8 i 9) przedstawiono widma sygnałów z obu wymienionych wcześniej przypadków pomiarowych.

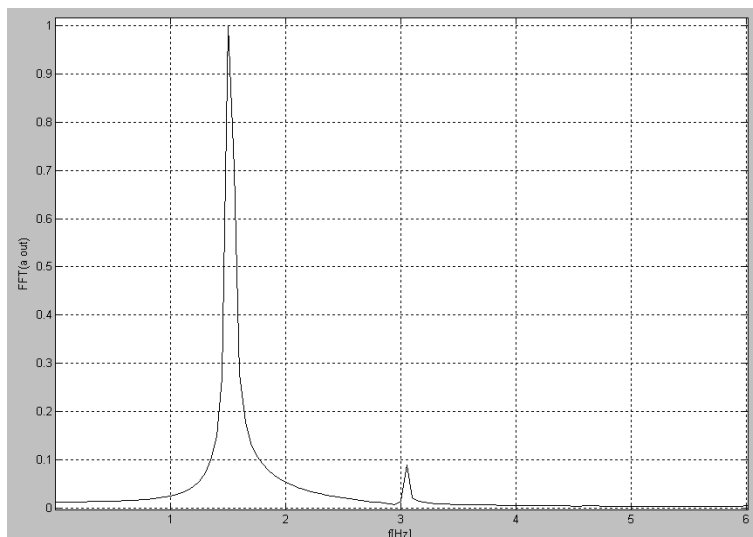
Porównując powyższe widma, nietrudno zauważyć, że podczas pracy maszyny COS z pasmem zawartość wyższych harmonicznych jest zdecydowanie większa niż w przypadku pracy bez pasma. Podstawowa częstotliwość drgań ma wartość w przybliżeniu równą 1,5 Hz. Harmoniczne z przedziału 20-40 Hz na rysunku 8 reprezentują zakłócenia pochodzące od wiatraków chłodzących otoczenie górnej pokrywy krystalizatora, gdzie pracuje część obsługi maszyny.

Na rysunku 9 można zauważyć, że amplitudy poszczególnych harmonicznych są znacznie większe niż widma sygnału przyspieszenia przedstawione na rysunku 8, duże

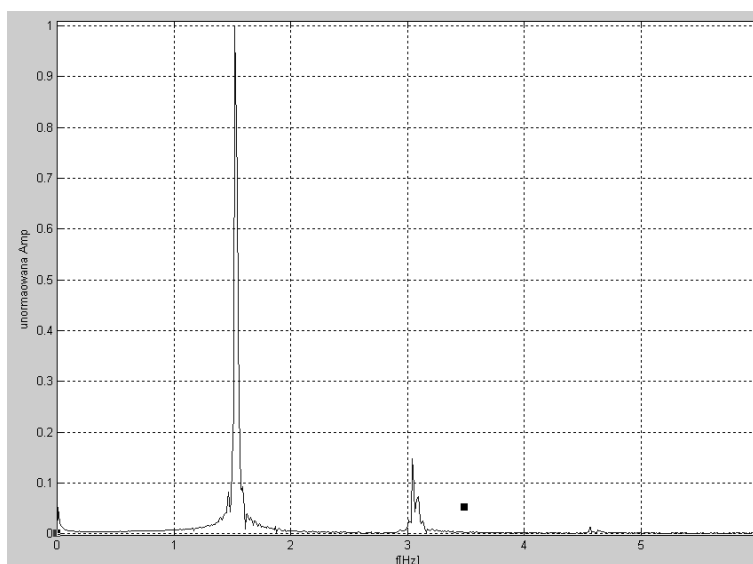
wartości są poza składową podstawową, mają 2., 5., 6. i 9. harmoniczną oraz widmo w przedziale od 17. do 23. harmonicznej.

6. WERYFIKACJA MODELU DRGAŃ KRYSTALIZATORA

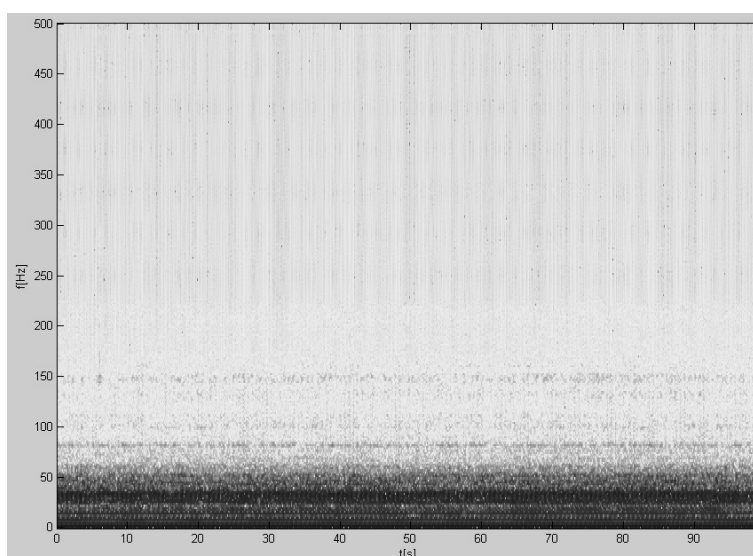
Porównując widma sygnałów pochodzących z modelu oraz widma sygnałów zarejestrowanych, można stwierdzić, że model, który został zaproponowany, jest poprawny dla zakresu od 0 do 6 Hz. Obserwacja ta jest widoczna na rysunkach (rys. 10 i 11), na których porównać możemy widma sygnału z modelu oraz prawdziwego obiektu pracującego z pasmem.



Rys. 10. Widmo sygnału przyspieszenia pochodzącego z modelu, zakres 0÷6 Hz



Rys. 11. Widmo sygnału przyspieszenia pochodzącego z obiektu, zakres 0÷6 Hz



Rys. 12. Spektrogram sygnału przyspieszenia krystalizator, praca z pasmem, okno Hamminga

Zakres poprawności pracy modelu ogranicza jego prostota, jest to model podstawowy będący punktem wyjścia do diagnostyki COS.

W kolejnych etapach prac, model będzie rozwijany tak, aby uzyskać jak najszerszy zakres częstotliwości, w których w najlepszy sposób będzie on odwzorowywał rzeczywiste zjawiska.

Na koniec przyjrzyjmy się jeszcze sygnałowi przyspieszenia zarejestrowanemu podczas pracy urządzenia COS z pasmem. Na rysunku 12 zaprezentowano spektrogram tego sygnału.

Poza wymienionymi wcześniej harmonicznymi, występującymi w rozważanym sygnale, na spektrogramie widoczna jest również 54. harmoniczna.

Należy zauważyć, iż zarówno ona, jak i niższe harmoniczne z przedziału od 25 do 35 Hz wykazują zdecydowaną tendencję do niestałości czasowej, tzn. w pewnych chwilach czasowych ich zawartość w sygnale jest większa, a w innych z kolei zdecydowanie mniejsza. Tego typu zjawisko świadczy o zmieniających się stanach pracy – zmieniającej się sile tarcia pomiędzy naskórkiem pasma a krystalizatorem. Zanikanie wymienionych składowych ma dla wszystkich z nich miejsce w tych samych chwilach czasowych. Można postawić tezę, iż w przypadku wystąpienia zagrożenia przerwania pasma zawartość wyższych harmonicznymi w sygnale będzie w sposób widoczny ulegała zmianie. W celu określenia rodzaju zmian, konieczne jest przeprowadzenie większej liczby rejestracji oraz dokonanie ich statystycznej analizy.

7. ZAKOŃCZENIE

W opinii autorów artykułu, powyższe obserwacje są punktem wyjściowym do prowadzenia dalszych badań, które docelowo mają zaowocować systemem umożliwiającym diagnozowanie stanów pracy urządzenia COS na podstawie pomiaru drgań krystalizatora. System ten może stanie się nawet systemem wczesnego ostrzegania o przerwaniach pasma.

Dalsze prace nad poruszonym tematem obejmą w pierwszej kolejności rozwinięcie modelu matematycznego zjawisk zachodzących pomiędzy krystalizatorem a pasmem, z uwzględnieniem sposobu pobudzania krystalizatora do ruchu oscylacyjnego.

Kolejnym krokiem będzie rozwinięcie aparatury pomiarowej w celu uzyskania większej dokładności pomiarów.

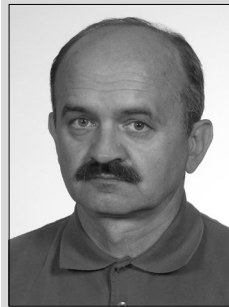
Konieczne jest z pewnością przeprowadzenie szeregu rejestracji na prawdziwym obiekcie, jak również zbudowanie aparatu analizującego prace maszyny COS na podstawie zmian zawartości wyższych harmonicznymi w sygnale przyspieszenia.

Literatura

- [1] The AISE Steel Foundation *The making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition, Casting Volume*. 1998, ISBN 10: 0930767020
- [2] Nieslera M. (red.): *Najlepsze dostępne techniki, wytyczne dla produkcji, stalownia elektryczna z odlewaniem stali*. Warszawa 2005
- [3] Siemiński P.: *Pomiar i analiza drgań krystalizatora w urządzeniu do ciągłego odlewania stali*. Kraków, AGH 2006 (praca magisterska, opieka dr. hab. inż. Andrzeja Bienia)
- [4] Miłek M.: *Pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi*. Zielona Góra, Wyd. Politechniki Zielonogórskiej 1998

Wpłynęło: 29.03.2007

Andrzej BIENIŃ



Urodził się w Warszawie w 1954 roku. Studiował, otrzymał stopień doktora, a następnie obronił pracę habilitacyjną na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracuje w Katedrze Metrologii Akademii Górniczo-Hutniczej. Jego główne zainteresowania zawodowe związane są z pomiarami i systemami pomiarowymi z użyciem szybkich procesorów sygnałowych, w szczególności aplikacje związane z energią elektryczną i jej jakością. Prywatnie: zimą narty, latem turystyka piesza, wędkarstwo.

e-mail: abien@agh.edu.pl

Paweł SIEMIENSKI



Urodził się 21 stycznia 1981 roku w Krakowie. Ukończył Technikum Łączności im. Obrońców Poczty Gdańskiej w Krakowie z tytułem technika telekomunikacji o specjalności teleinformatyka w 2001 roku. W latach 2001–2006 był studentem Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na kierunku elektrotechnika, specjalność automatyka i metrologia. Studia ukończył w 2006 roku z tytułem magistra inżyniera. Obecnie pracuje w Volantis Systems LTD oddział Polska. W czasie studiów członek prezydium KU AZS AGH. Hobby: pływanie, muzyka, narty, kolarstwo.

e-mail: pawel.siemienski@gmail.com