

Kazimierz Jagiela<sup>1</sup>, Janusz Rak<sup>2</sup>, Marek Gała<sup>2</sup>, Marian Kępiński<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ATH, Bielsko-Biala, <sup>2</sup>Politechnika Częstochowska, Częstochowa

## ASYMETRIA PRĘDKOŚCI LINIOWYCH WIELOSILNIKOWEGO STEROWANEGO NAPĘDU DC

### ASYMMETRY OF THE LINEAR SPEED OF MULTI-MOTOR CONTROLLED DC DRIVE

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia strukturę i właściwości zespołu wielosilnikowych napędów grupowych DC transportującego formowane pasmo metalu. Każda z grup napędowych jest sterowana przekształtnikiem tyrystorowym od strony obwodu tworników. Obwody wzbudzenia silników grupy są zasilane z jednego prostownika półsterowanego z dodatkowymi rezystorami do indywidualnego ustawiania prądów wzbudzenia. Rezultatem uwarunkowań technologicznych związanych z dociskiem hydraulicznym, niedoskonałością geometryczną rolek napędowych, warunkami termicznymi i plastycznością pasma jest występowanie asymetrii prędkości liniowych, które determinują określone wady półproduktu. Wykorzystując enkodery do pomiaru prędkości obrotowej silników i rolek transportowych oraz programy DasyLab i MATLAB obliczono wartości prędkości liniowych, na podstawie których określono stopień asymetrii prędkości liniowych rolek. W końcowej części artykułu przedstawiono podsumowanie i wnioski.

**Abstract:** The paper presents the structure and properties of the unit comprising several groups of multi-motors DC drives. The unit drives the transport line of molded steel band. Each drive group is controlled by the SCR rectifier in armature circuits. Excitation circuits of the group of motors are powered from a single semi-controlled rectifier with additional resistors to set the individual excitation currents. The result of technological conditions associated with hydraulic clamp, geometrical deviations of drive rollers, thermal conditions and elasticity of the band is the occurrence of asymmetric linear velocity that determine specific defects of the slabs. Linear speeds of transport rollers were calculated using encoders to measure the speed of motors and programs DasyLab and MATLAB. Asymmetry of the linear speeds of rollers was determined. The summary and conclusions are presented at the end of the paper.

**Słowa kluczowe:** linia ciągłego odlewania stali, napęd wielosilnikowy, silniki prądu stałego, asymetria prędkości

**Keywords:** continuous steel casting line, multi-motor drive, DC motors, asymmetry of speeds

### 1. Wstęp

Szybki rozwój energoelektroniki oraz zaawansowanych systemów sterowania doprowadził do powszechnego stosowania napędów prądu przemiennego z przemiennikami częstotliwości eliminując w sposób naturalny układy z silnikami prądu stałego. Niemniej z uwagi na uwarunkowania techniczno-ekonomiczne w polskim przemyśle hutniczym bardzo często w ramach prac modernizacyjnych pozostawia się dotychczas eksploatowane silniki prądu stałego, zasilając je z nowoczesnych układów przekształtnikowych, w których realizowane są zaawansowane sposoby sterowania, takie jak MASTER-FOLLOWER [1, 2] czy MULTIFEX [3]. Dotyczy to zazwyczaj układów napędowych o dużych jednostkowych mocach silników elektrycznych lub znacznej liczbie silników grupowanych w postaci sterowanej sekcji. Pozostawienie silników prądu stałego i dalsza ich eks-

ploatacja daje ograniczenie kosztów remontu zespołu napędowego przy modernizacji instalacji i systemu zasilania. Zamiana układu napędowego prądu stałego na napęd AC z regulacją prędkości za pomocą przemiennika częstotliwości wymaga natomiast znacznie większych nakładów, wynikających z zakupu nowego sprzętu oraz konieczności wykonania robót mechaniczno-budowlanych związanych z posadowieniem nowego silnika o innych gabarytach i jego mechanicznym sprzęgnięciem z zespołem roboczym [2].

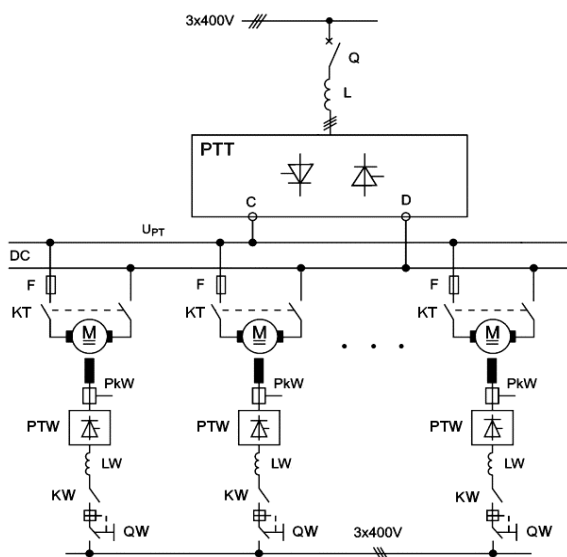
W artykule przedstawiono właściwości i warunki pracy napędu linii ciągłego odlewania stali (COS) transportującego formowane pasmo metalu. Jest to zespół kilku wielomaszynowych napędów grupowych prądu stałego zawierający przekształtniki tyrystorowe zasilające uzwojenia tworników oraz wzbudzeń silników. Zain-

stalowane na wybranych silnikach enkodery i tachoprądnice umożliwiają stabilizację prędkości poszczególnych sekcji napędowych oraz pomiar prędkości w poszczególnych punktach maszyny COS. Wprowadzenie dodatkowych sprzężeń wyrównujących obciążenie pozwala zsynchronizować wszystkie sekcje napędowe i utrzymać jednakową prędkość liniową wyciąganego pasma metalu.

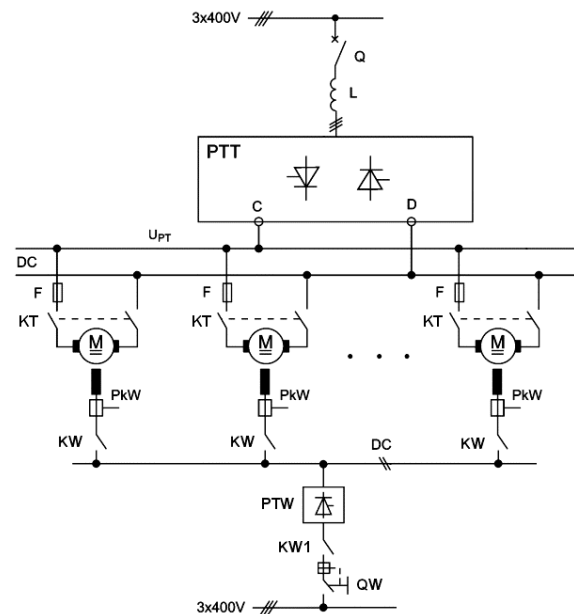
## 2. Struktury zasilania i sterowania tyrystorowych napędów grupowych DC

Napędy grupowe z silnikami prądu stałego mogą być realizowane w kilku konfiguracjach zasilania obwodów tworników i wzbudzeń. Możliwe topologie połączeń i odpowiadające im schematy układów zasilania pokazano na rysunkach od 1 do 4:

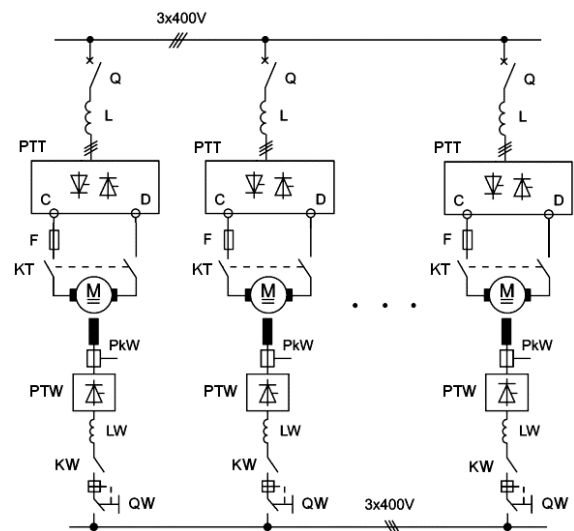
- 1) jeden rewersyjny przekształtnik PTT zasilający tworniki grupy silników DC oraz  $n$  przekształtników PTW zasilających obwody wzbudzenia poszczególnych silników (rys. 1);
- 2) jeden rewersyjny przekształtnik PTT zasilający tworniki grupy silników oraz jeden przekształtnik PTW zasilający uzwojenia wzbudzenia wszystkich silników DC (rys. 2);
- 3)  $n$  rewersyjnych przekształtników PTT zasilających każdy obwód twornika silnika DC oraz  $n$  przekształtników PTW zasilających obwody wzbudzenia poszczególnych silników (rys. 3);
- 4)  $n$  rewersyjnych przekształtników PTT zasilających każdy obwód twornika silnika DC oraz jeden przekształtnik PTW zasilający wzbudzenie wszystkich silników grupy (rys. 4).



Rys. 1. Schemat układu zasilania napędu grupowego DC z jednym PTT i wieloma PTW



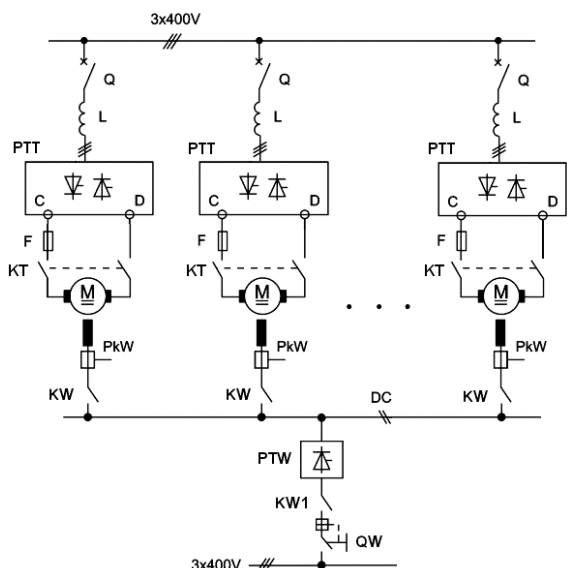
Rys. 2. Schemat układu zasilania napędu grupowego DC z jednym PTT i jednym PTW



Rys. 3. Schemat układu zasilania napędu grupowego DC z wieloma PTT i wieloma PTW

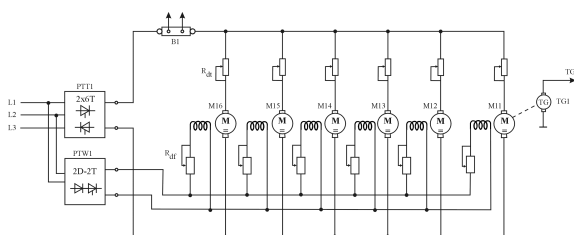
Przedstawione na rysunkach od 1 do 4 schematy zasilania napędów grupowych DC nie ujmuje dostępnych sposobów sterowania. Można rozróżnić aplikacje umożliwiające sterowanie niezależne silników realizowane w obwodach tworników (rys. 3 i 4) z możliwością regulacji prądów wzbudzenia poszczególnych silników (rys. 3) lub nastawy zadanego prądu wzbudzenia – najczęściej nominalnego (rys. 4). Dla topologii zasilania wg rys. 1 można zastosować metodę sterowania typu MULTIFEX [3] poprzez indywidualną regulację prądów wzbudzenia poszczególnych silników.

Z punktu widzenia sterowania i stabilizacji prędkości poszczególnych silników, układ pokazany na rysunku 2 posiada najmniejsze możliwości regulacyjne.



Rys. 4. Schemat układu zasilania napędu grupowego DC z wieloma PTT i jednym PTW

W opisywanym napędzie linii ciągłego odlewania stali zastosowano zespoły napędowe złożone z kilku silników prądu stałego, których obwody tworników i wzbudzeń zasilane są z niezależnych przetworników energoelektronicznych według konfiguracji odpowiadającej strukturze pokazanej na rysunku 2. Strukturę układu zasilania przykładowej grupy silników przedstawiono na rysunku 5.

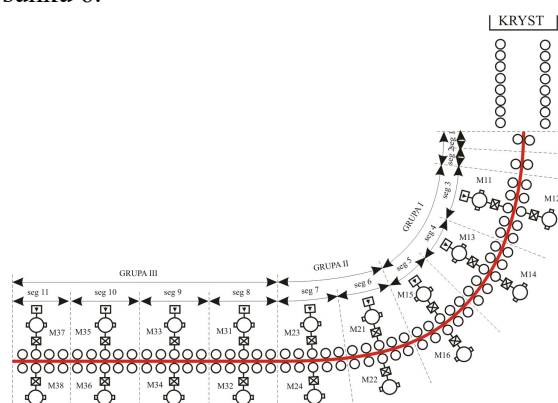


Rys. 5. Struktura zasilania przykładowej grupy silników napędu linii ciągłego odlewania stali

Modyfikacją tego układu względem topologii pokazanej na rysunku 2 jest szeregowe włączenie rezystorów regulacyjnych w obwody tworników i wzbudzeń poszczególnych silników, odpowiednio:  $R_{dt}$  i  $R_{df}$  (rys. 5). Regulacja i stabilizacja prędkości obrotowej silników danej grupy odbywa się na podstawie sprzężenia tachometrycznego (TG) dla skrajnego silnika i pomiaru sumarycznego prądu obwodów tworników grupy silników (bocznik B1).

### 3. Napęd linii ciągłego odlewania stali

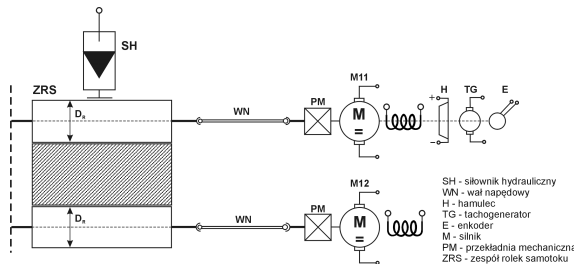
Współcześnie do ciągłego odlewania wlewków stalowych przeznaczonych na wyroby płaskie stosuje się łukowe maszyny COS o zmiennym promieniu, które zapewniają kilka punktów prostowania pasma [4]. Prostowanie pasma odlewanej stali odbywa się w strefie *soft reduction* metodą dogniatania pasma. Polega to na zmniejszaniu odstępów pomiędzy rolkami, w kolejnych parach rolek prowadzących pasmo w miejscu jego zakrzepnięcia na wskroś [4]. Schemat kinematyczny napędu maszyny linii COS wyciągającej pasmo stali pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat kinematyczny napędów rolek maszyny wyciągowej pasma COS

Napęd maszyny linii COS stanowią trzy grupy napędowe złożone z poszczególnych segmentów wyposażonych w rolki grawitacyjne i po jednej parze rolek napędowych (dół, góra) z dociskiem od góry za pomocą siłownika hydraulicznego. Każda grupa ma inną ilość silników DC, co jest widoczne na rysunku 6.

Schemat kinematyczny jednej pary rolek ciągnących napędzanych silnikami prądu stałego (M) poprzez przekładnie mechaniczne (PM) i wały napędowe (WN) z przegubami Cardana pokazano na rysunku 7. Silnik napędowy górnej rolki jest wyposażony w hamulec (H), tachogeneratory (TG) i enkoder inkrementalny (E).



Rys. 7. Schemat kinematyczny pary rolek napędowych maszyny wyciągowej linii COS

Podstawowe parametry techniczne dla obwodu elektromagnetycznego pojedynczego silnika prądu stałego zasilanego z przekształtników PTT i PTW (rys. 5) zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1  
Parametry obwodów silników linii COS

| Parametry silnika  |
|--|
| $P = 7,5 \text{ kW}; U = 400 \text{ V}; I = 20,7 \text{ A};$<br>$n = 1300/2500 \text{ obr/min}; I_F = 0,35\text{A}/0,17 \text{ A}$ |
| Zakres regulacji prędkości liniowej<br>$v_{\min} = 0,5 \text{ m/min} \rightarrow v_{\max} = 1,1 \text{ m/min}$                     |
| Parametry rezystorów dodatkowych   |
| $r_{dt} = \frac{R_{dt}}{R_{rw}} = (0,8 \div 2); r_{df} = \frac{R_{df}}{R_f} = (0,6 \div 0,9)$                                      |

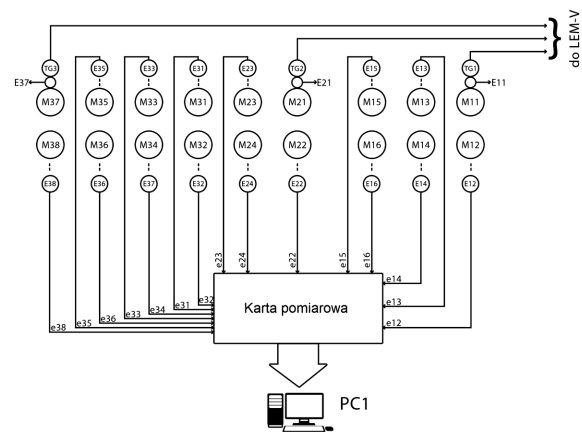
Obliczenia numeryczne wykonane dla modelu cieplnego maszyny COS dowodzą, że prędkość odlewania ma istotny wpływ na wartości długości metalurgicznych oraz właściwości pasma. Aby uzyskać stałość długości metalurgicznej wynikającą z geometrii maszyny COS niezbędne jest skorelowanie natężenia przepływu wody chłodzącej z prędkością wyciągania pasma [5]. Ważne jest również utrzymanie równomierności prędkości liniowych poszczególnych rolek ciągnących z uwzględnieniem ich zróżnicowania wynikającego z krzywizny wyciąganego pasma stali oraz właściwy docisk rolek do powierzchni pasma.

#### 4. Pomiary asymetrii prędkości liniowych ciągnionego pasma

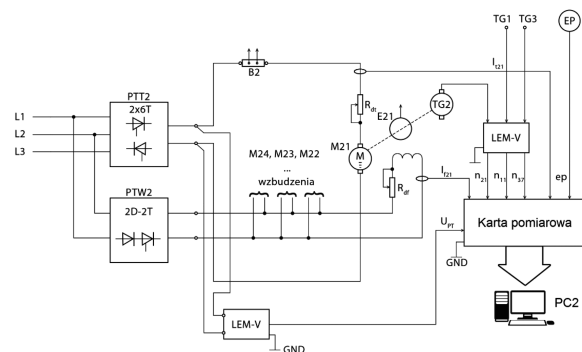
Producent napędu maszyny badanej linii COS zabudował tachoprądnice i enkodery jedynie na trzech silnikach napędowych rolek górnych, po jednym w każdej z trzech grup (rys. 5). Uzyskanie pełnej informacji o prędkościach liniowych w poszczególnych punktach toru maszyny łukowej COS (rys. 6) w trakcie pełnej sekwencji wyciągania pasma odlewanej stali wymagało zainstalowania dodatkowych 15 enkoderów i wykorzystania komputerowych układów pomiarowych do rejestracji przebiegów czasowych wybranych wielkości elektromechanicznych.

Do pomiaru prędkości obrotowej silników prądu stałego (poza M11, M21 i M37 – rys. 6) zastosowano nowe enkodery typu Profi 100/06, które poprzez sprzęgła elastyczne zostały sprzężone z wałami pozostałych silników grup

napędowych I, II i III pokazanych na rysunku 6. Schemat pierwszego stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 8. Obejmuje ono rejestrację piętnastu sygnałów o częstotliwości 100 imp./obrót uzyskiwanych z enkoderów. Przebiegi impulsowe z enkoderów doprowadzone są następnie do karty pomiarowej komputera, którego zadaniem jest przetwarzanie ich na sygnał ciągły prędkości liniowej oraz archiwizacja danych pomiarowych. W drugim stanowisku pomiarowym (rys. 9) rejestrowane były przebiegi chwilowe napięcia zasilania grupy drugiej, prądów twornika i wzbudzenia silnika M21 z grupy II, trzy napięcia z tachoprądnic silników M11, M21 i M37 oraz sygnał z enkodera pomiarowego EP służącego do identyfikacji wytopu i pasma.



Rys. 8. Schemat układu pomiarowego prędkości obrotowych piętnastu silników napędu linii COS



Rys. 9. Schemat układu pomiarowego sygnałów elektromechanicznych dla silników drugiej grupy

W obu stanowiskach zastosowano przemysłowe komputery pomiarowe z oprogramowaniem aplikacyjnym DASyLab, wyposażone w karty pomiarowe NI USB-6212, umożliwiające rejestrację i przetwarzanie szesnastu sygnałów jednocześnie. Obliczenia zostały wykonane w programach MATLAB i EXCEL z wykorzysta-

niem danych z plików pomiarowych DASYLab zapisanych w formacie tekstowym.

Z uwagi na niezbędną separację galwaniczną komputerowego systemu pomiarowego od sieci zasilania zespołów napędowych, w obwodach wejściowych zastosowano przetworniki napięciowe LEM i pomiarowe kleszcze prądowe. Pasmno przenoszenia dla przetwornika prądowego wynosi  $DC \div 100$  kHz, a dla przetwornika napięciowego LV odpowiednio  $0 \div 25$  kHz. Linijowość przetwarzania sygnału wynosi  $\pm 0,2$  %, a dokładność pomiaru  $\pm 0,8$  %.

Częstotliwość próbkowania rejestrowanych sygnałów wynosiła 10 kHz, co jest wartością wystarczającą do prawidłowego odtworzenia kształtu napięć i prądów oraz sygnałów z enkoderów.

### 5. Asymetria prędkości liniowych pasma

Za pomocą układów pomiarowych pokazanych na rysunkach 8 i 9 wykonano rejestrację komputerową przebiegów czasowych następujących wielkości:

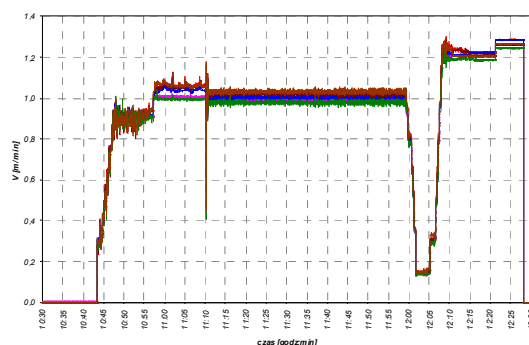
- prędkości obrotowych w postaci sygnałów cyfrowych uzyskanych z 15 enkoderów silników dla trzech grup napędowych;
- prędkości obrotowych w postaci sygnałów analogowych uzyskanych z tachogeneratorów TG1 (M11), TG2 (M21) i TG3 (M37);
- napięcia zasilania tworników silników grupy drugiej uzyskanego z przekształtnika tyristorowego PTT2;
- prądu twornika silnika M21;
- prądu wzbudzenia silnika M21;
- prędkości obrotowej rolki pomiarowej uzyskanej z enkodera inkrementalnego EP.

Pomiary przeprowadzono w sposób ciągły w czasie jednego tygodnia dla różnych gatunków stali, wymiarów geometrycznych pasma oraz stosowanych zasypek. Dla każdej sekwencji odlewania pasma rejestrowane były przebiegi czasowe, które obejmowały następujące fazy pracy maszyny COS:

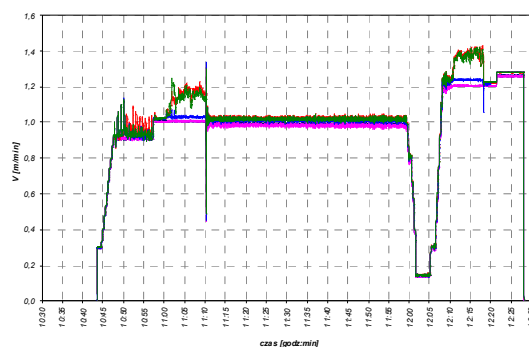
- 1) wciąganie drąga maszyny COS;
- 2) wejście pasma w górne segmenty;
- 3) wejście pasma w strefy 1-2;
- 4) wyjście pasma ze strefy 3 i wyrównywanie obciążeń;
- 5) wyciąganie pasma – całkowite odlewanie;
- 6) pełzanie – zamrażanie ogona pasma;
- 7) rozpędzanie;
- 8) bieg jałowy.

Zmiany prędkości liniowych dla napędów warstwy górnej i dolnej ciągnionego pasma w wymienionych ośmiu fazach pracy maszyny COS zostały pokazane na rysunkach 10, 11, 12 dla reprezentatywnej sekwencji odlewania nr 2 ze zbioru siedmiu rejestrowanych sekwencji. Na każdej ilustracji zmian prędkości liniowych na podstawie przebiegów zmierzonych przez tachogeneratory TG1 TG2 i TG3 naniesiono średnią prędkość, wyliczoną jako:

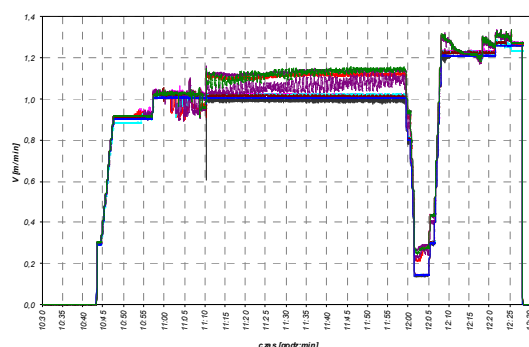
$$v_{\text{sr}} = 1/3 (v_{\text{TG1}} + v_{\text{TG2}} + v_{\text{TG3}}) \quad (1)$$



Rys. 10. Przebiegi zmian prędkości liniowych rolek dla napędów grupy I



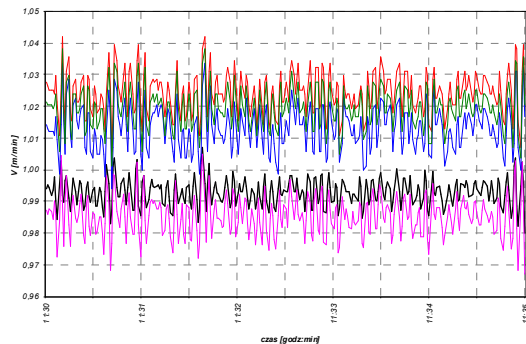
Rys. 11. Przebiegi zmian prędkości liniowych rolek dla napędów grupy II



Rys. 12. Przebiegi zmian prędkości liniowych rolek dla napędów grupy III

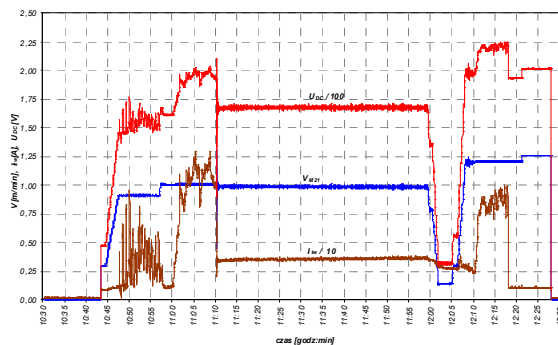
Dla oceny stopnia asymetrii prędkości liniowych obliczonych na podstawie zmierzonych prędkości obrotowych z enkoderów, na rysunku 13 pokazano chwilowe zmiany prędkości dla

napędów grupy II wraz z prędkością średnią z tachogeneratorów w przedziale 5 min. podczas fazy piątej – całkowitego odlewania.



Rys. 13. Przebiegi zmian prędkości liniowych dla napędów grupy II w piątej fazie odlewania

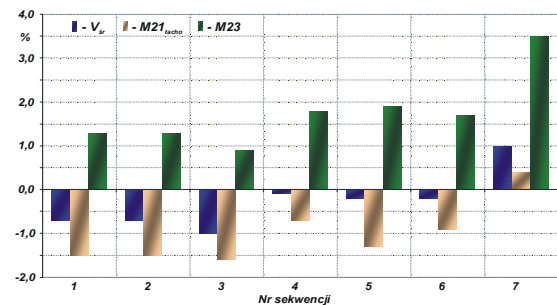
W celu przeprowadzenia kompleksowej analizy pomiarowej, w której zgodnie ze schematem (rys. 9) przewidziano rejestrację przebiegów napięciowo-prądowych dla skrajnego silnika grupy II (M21 – rys. 6), na kolejnym rysunku 14, zamieszczono przebiegi napięcia zasilania  $U_{DC}$  przekształtnika PTT, prądu twornika  $I_{TW}$  oraz prędkości liniowej wyliczonej na podstawie sygnału z tachogeneraatora TG2.



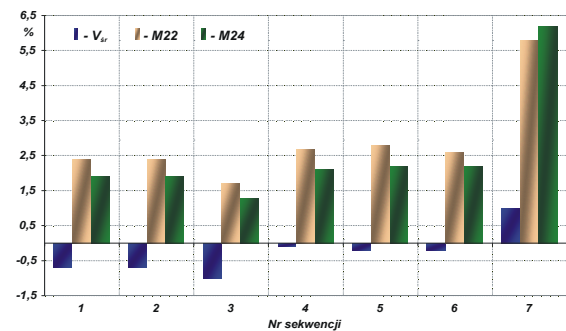
Rys. 14. Przebiegi napięcia, prądu i prędkości liniowej silnika M21 grupy napędowej II

Wykorzystując bazę danych plików z pomiarów prędkości obrotowych silników prądu stałego grup I, II i III linii COS obliczono prędkości liniowe rolek, a następnie wyliczono procentowe względne odchyłki w stosunku do zadanej prędkości liniowej pasma dla wybranych siedmiu sekwencji. Przykładowo dla silników grupy II wyniki tych odchyłek przedstawiono w postaci wykresów słupkowych pokazując niezależnie stopień asymetrii dla rolek przyległych do górnych (rys. 15) i dolnych (rys. 16) stron pasma. Na podstawie ustalonego w ten sposób stopnia asymetrii określono przyczyny występowania różnic prędkości liniowych rolek prowadzących pasmo i ich wpływ na jakość

półproduktu. Wyniki te stanowiły również wytyczne dotyczące korekcji wartości rezystancji, głównie w obwodach wzbudzeń poszczególnych silników grup napędowych.



Rys. 15. Rozrzut względnych średnich wartości różnic prędkości liniowych: średniej oraz prędkości rolek górnych grupy II dla badanych sekwencji



Rys. 16. Rozrzut względnych średnich wartości różnic prędkości liniowych: średniej oraz prędkości rolek dolnych grupy II dla badanych sekwencji

## 6. Podsumowanie

Na uzyskanie jednorodnej struktury krystalicznej pasma w procesie COS mają wpływ następujące parametry [4, 5]:

- szybkość i równomierność odlewania,
- intensywność chłodzenia dostosowana do prędkości odlewania i grubości pasma,
- prawidłowe ustawienie hydraulicznego docisku rolek w obszarze dogniatania i prostowania pasma tj. w strefie *soft reduction*,
- równomierne dawkowanie zasyпки krystalizatorowej.

Kluczowe parametry, jakimi są szybkość i równomierność odlewania pasma zależą bezpośrednio od właściwości statycznych i dynamicznych zespołów napędowych maszyny COS. Zadana szybkość odlewania pasma dla określonej sekwencji wynika z ustawienia prędkości obrotowych rolek ciągnąco-podtrzymujących, napędzanych przez silniki prądu stałego, zasilane grupowo z prostowników sterowanych.

Zastosowany w maszynie COS system napędowy złożony z trzech grup silników oddziaływujących wzajemnie na siebie poprzez istnienie więzów mechanicznych w postaci pasma gorącej stali o zróżnicowanej plastyczności może działać poprawnie pod warunkiem dostosowania do obciążenia mechanicznego występującego na poszczególnych rolkach ciągnących. Charakterystyka elektromechaniczna, a zatem prędkość każdego z silników może być skorygowana indywidualnie poprzez regulację rezystancji włączonych w obwód wzbudzenia oraz twornika każdego z nich. Ma to na celu bądź wyrównanie prędkości silników w danej grupie, względnie odpowiednie zróżnicowanie tam, gdzie pasmo stali jest prowadzone po łuku o zmiennym promieniu (grupa II i częściowo I), a rolki podtrzymujące (dolne) powinny obracać się nieco szybciej niż dociskające (górne) ze względu na różne promienie krzywizny górnej i dolnej powierzchni pasma. Należy zaznaczyć, że właściwe ustawienie prędkości silników w grupie obejmującej strefę *soft reduction* można uzyskać jedynie dla określonej wielkości obciążenia i jego rozkładu pomiędzy rolki.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów przeanalizowano przebiegi chwilowych prędkości obrotowych każdego z silników w poszczególnych grupach zarówno na biegu jałowym, jak i pod obciążeniem w przedziałach czasu, gdy działał układ automatycznego wyrównywania obciążeń. Określono również różnice w prędkościach liniowych względem wartości zadanej i średniej. Ustalono, że dla stanu wyciągania pasma z włączonym wyrównywaniem obciążeń grup dla wszystkich analizowanych sekwencji występują te same ogólne prawidłowości:

- dla poszczególnych par rolek napędowych ciągnąco-podtrzymujących we wszystkich trzech grupach prędkość silnika dolnego jest większa niż silnika górnego, co wynika z relacji odpowiednich prędkości liniowych,
- chwilowe wahania prędkości liniowej na rolkach w grupach I i II, gdy pasmo stali jest jeszcze plastyczne i występuje płynny rdzeń pod naskórkim są znacząco większe niż dla rolek w grupie III, gdzie transportowane i wyprostowane pasmo jest skryształizowane w całym przekroju,
- prędkości liniowe na rolkach dociskających (górných) w strefie III są nieco większe niż wartość zadana, podczas gdy w strefach I i II prędkości rolek górnych są niższe od prę-

kości zadanej, co świadczy, że są one znacznie bardziej obciążone (dogniatanie i prostowanie pasma),

- prędkości liniowe rolek dolnych w grupie III są znacznie wyższe niż rolek górnych, chociaż powinny mieć wartości zbliżone, ponieważ w tym obszarze pasmo jest już wyprostowane i przesuwane w płaszczyźnie poziomej; świadczy to o ich niedociążeniu, być może w wyniku zbyt słabego docisku hydraulicznego oraz sztywności pasma skryształizowanego w całym przekroju.

Właściwe ustawienie prędkości obrotowej silników napędowych w poszczególnych grupach jest możliwe podczas biegu jałowego poprzez skorygowanie prądów wzbudzenia maszyn za pomocą rezystorów dodatkowych.

## 7. Literatura

- [1]. Gała M., Rak J., Kępiński M., Jagieła K.: *Zastosowanie oprogramowania DriveWindow w procesie diagnozowania stanów pracy układów napędowych AC i DC*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 82/2009, str. 33-38.
- [2]. Jagieła K., Gała M.: *Napęd przemiennikowy śrub nastawczych walców klatki pionowej z wykorzystaniem sterowania MASTER-FOLLOWER*. Materiały IX Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej”, Częstochowa 2008, tom 1, str. 146-149.
- [3]. Jagieła K., Gała M., Rak J., Kępiński M.: *Zintegrowany napęd dużej mocy samotoków wysadowych z wykorzystaniem systemu MULTIFEX*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 2/2013 (99), str. 91-96.
- [4]. Kudliński Z.: *Technologie odlewania stali*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [5]. Miłkowska-Piszczek K.: *Opracowanie i zastosowanie numerycznego modelu procesu COS do wyznaczenia technologicznych parametrów odlewania stali S235*, Rozprawa doktorska, 2013, AGH Kraków.

## Autorzy

dr hab. inż. Kazimierz Jagieła, prof. ATH

e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com

Akademia Techniczno-Humanistyczna  
w Bielsku-Białej

Wydział Budowy Maszyn i Informatyki  
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

dr inż. Janusz Rak, e-mail: jrak@el.pcz.czyst.pl

dr inż. Marek Gała,

e-mail: m.gala@el.pcz.czyst.pl

mgr inż. Marian Kępiński

e-mail: mkepinski@el.pcz.czyst.pl

Politechnika Częstochowska, Wyd. Elektryczny  
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa