

## Układ sterowania i kontroli pracy przenośnika kbelkowego w osadzarkowym węźle wzbogacania

dr inż. Sebastian Jendrysik  
dr inż. Sławomir Bartoszek  
dr inż. Dariusz Jasiulek  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG  
mgr inż. Andrzej Gawliński  
KWK „Budryk”

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono strukturę i zasadę działania układu sterowania przenośnikiem kbelkowym pracującym w osadzarkowym węźle wzbogacania. Ideą metody sterowania prędkością przenośnika było uzyskanie nominalnego wypełnienia kbelków na całej długości przenośnika, w celu ograniczenia biegu jałowego i zmniejszenia zużycia energii elektrycznej. Przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych układu sterowania oraz omówiono moduł systemu sterowania informujący o nadmiernym wydłużeniu łańcucha przenośnika.

Słowa kluczowe: przenośnik kbelkowy, sterowanie, identyfikacja

Keywords: bucket conveyor, controlling, identifying

### Abstract:

Structure and operating principle of the system for control of bucket conveyor in jig beneficiation node system was discussed. The idea of controlling the speed of conveyor consisted in obtaining the nominal filling up of the buckets along the entire length of the conveyor to limit idle run and to reduce energy consumption. Results of the field tests of control system are given and the control system module informing about excessive elongation of the conveyor chain are discussed.

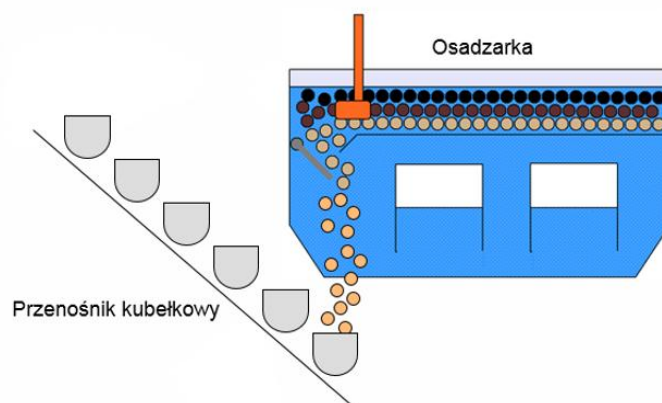
## 1. Wprowadzenie

Przenośniki kbelkowe stosowane w zakładach przerobczych węgla kamiennego, służą do transportu i odwadniania materiałów uzyskanych w procesie wzbogacania, w osadzarkach pulsacyjnych. W sytuacjach, gdy wzbogacana nadawa węglowa charakteryzuje się niewielką ilością produktu odpadowego i/lub półproduktu, przenośniki bez regulacji prędkości, pracują przez długi czas z niewielkim obciążeniem. Taka praca powoduje przyspieszone zużywanie się przenośnika i nadmiarowy pobór energii elektrycznej. Zapobiegać temu można poprzez zastosowanie układu automatycznej regulacji, zmieniającego prędkość ruchu kbelków celem uzyskania nominalnego obciążenia przenośnika.

Takie działania realizowane są przez ITG KOMAG, który wraz z partnerami przemysłowymi prowadzi prace nad automatyzacją przenośników kbelkowych, w kontekście automatyzacji pracy całego węzła osadzarkowego.

## 2. Charakterystyka pracy przenośnika kbelkowego w osadzarkowym węźle wzbogacania

Charakterystyczną cechą pracy przenośników kbelkowych pracujących w osadzarkowych węzłach wzbogacania (rys. 1) jest zmienność ich obciążenia. Wzrost ilości materiału podawanego na przenośnik może być powodowany przyrostem obciążenia osadzarki, zmianą składu grawimetrycznego wzbogacanego materiału lub ingerencją operatora. W takim przypadku prędkość przenośnika powinna niezwłocznie wzrosnąć, celem dostosowania do nowych warunków obciążenia i niedopuszczenia do nadmiernego gromadzenia się materiału w strefie ładowania przenośnika. Nadmiar materiału w tej strefie może spowodować jego awaryjne zatrzymanie, a w konsekwencji zatrzymanie całego węzła osadzarkowego.



Rys. 1. Proces załadunku przenośnika kubełkowego w osadzarkowym węźle wzbogacania [2]

Ponieważ proces wzbogacania w osadzarkach pulsacyjnych odbywa się w środowisku wodnym (przenośniki kubełkowe do około połowy swojej wysokości zalane są wodą), istnieje trudność z identyfikacją stopnia wypełnienia kubełków w obrębie stacji zwrotnej przenośnika (strefy ładowania kubełków). Wymusza to konieczność poszukiwania rozwiązań, które pomimo tych trudności, umożliwią niezawodne sterowanie prędkością przenośnika kubełkowego.

### 3. Układ sterowania prędkością przenośnika

Przy współpracy ITG KOMAG z kopalnią „Budryk”, opracowano metodę sterowania prędkością przenośnika kubełkowego pracującego w osadzarkowym węźle wzbogacania, w której wykorzystano sterowanie predycyjne, wykorzystujące informację o stopniu otwarcia kłapy upustowej osadzarki.

Wydajność teoretyczną przenośnika, można określić na podstawie zależności [1]:

$$Q_t = 3,6 \cdot \frac{V}{a} \cdot \gamma \cdot v \cdot \Psi \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

gdzie:

$V$  – pojemność kubełka [ $\text{m}^3$ ],

$a$  – rozstaw kubełków [m],

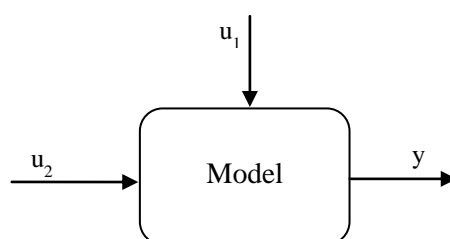
$\gamma$  – masa usypowa transportowanego materiału [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$v$  – prędkość liniowa poruszania się kubełków [m/s],

$\Psi$  – współczynnik napełnienia kubełka ( $0 \div 1$ ).

Z równania (1) wynika, że regulację wydajności przenośnika kubełkowego można prowadzić poprzez zmianę jego prędkości. Zmiana prędkości obrotowej silnika przekłada się na zmianę prędkości ruchu kubełków transportujących materiał, co przy założeniu stałego strumienia produktu dolnego z osadzarki, powoduje natychmiastową zmianę stopnia napełnienia kubełków, czyli zmianę masy materiału znajdującego się w danej chwili na przenośniku.

Podstawowym zakłóceniem, oddziaływującym na masę materiału znajdującego się w danej chwili na przenośniku jest zmiana natężenia strumienia produktu dolnego z osadzarki. Zmiana ta jest wynikiem działania regulatora, utrzymującego stałą wysokość warstwy produktu odpadowego w przedziale osadzarki. Identyfikacja tego zakłócenia w opracowanej metodzie, realizowana jest poprzez pomiar otwarcia kłapy upustowej osadzarki, a układ sterowania aktywnie koryguje prędkość przenośnika, dążąc do utrzymania stałej masy materiału znajdującej się na przenośniku. Należy jednak pamiętać, że produkt dolny wyprowadzany z osadzarki opada w środowisku wodnym, pokonując kilka metrów do strefy ładowania przenośnika. Występowanie tego opóźnienia zdeterminowało potrzebę zastosowania predykcyjnego układu automatycznej regulacji i poszukiwania modelu procesu, którego strukturę przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura blokowa modelu procesu [2]

gdzie:

- $u_1$  – stopień otwarcia kłapy upustowej osadzarki,
- $u_2$  – prędkość liniowa poruszających się kubełków przenośnika,
- $y$  – masa materiału znajdującego się na przenośniku.

Założono zatem, że masa materiału znajdującego się w danej chwili na przenośniku  $y$ , zależy od stopnia otwarcia kalpy upustowej osadzarki  $u_1$  oraz prędkości przenośnika  $u_2$ . Założenie takie jest prawdziwe tylko wtedy, gdy osadzarka pracuje w stanie ustalonym i do osadzarki podawana jest nadawa.

Aproksymację modelu, potrzebnego do budowy układu regulacji predykcyjnej, uzyskano w drodze identyfikacji na podstawie wyników pomiarów sygnałów wejściowo-wyjściowych [2]. Pomiaru te przeprowadzono w kopalni „Budryk”, w układzie przenośnika kubełkowego odprowadzającego produkt odpadowy z osadzarki OS36D3E przeznaczonej do trójproduktowego wzbogacania materiału w klasie ziarnowej 60(80) – 12(0) mm.

Otrzymany liniowy model parametryczny wykorzystano w zmodyfikowanym układzie regulacji z predyktorem Smitha, korygującym prędkość przenośnika, celem utrzymania stałej masy materiału znajdującego się na przenośniku (stałego średniego napełnienia kubełków).

W ramach badań weryfikacyjnych, przeprowadzono analizę zużycia energii elektrycznej przez silnik przenośnika kubełkowego, pracujący w trzech wariantach:

- wariant 1 – z układem automatycznej regulacji – pomiary w warunkach przemysłowych,
- wariant 2 – z regulacją ciągłą (załadowanie 80%) – rozważania teoretyczne,
- wariant 3 – z regulacją ciągłą (załadowanie 100%) – rozważania teoretyczne,

– wariant 4 – ze stałą (znamionową) prędkością obrotową – rozważania teoretyczne.

Do badań wykorzystano ten sam przenośnik kbelkowy, pracujący w węźle osadzkowym kopalni „Budryk”, jednak wyposażony w sterownik z zaimplementowanym algorytmem do ciągłej regulacji jego prędkości.

W tabeli 1 przedstawiono energochłonność przenośnika kbelkowego w czterech wariantach sterowania prędkością obrotową silnika.

**Zestawienie energochłonności przenośnika kbelkowego  
w analizowanych wariantach sterowania prędkością obrotową silnika [2]**

Tabela 1

Wariant	Czas pracy	Masa przetransportowanego materiału	Zużyta energia	Wartość procentowa zużycia energii
	[min]	[kg]	[kWh]	[%]
1	600	832238	69,5	83,8
2			67,8	81,7
3			62,3	75,0
4			83,0	100

Do badań wybrano losowo 10 grup pomiarów, każda obejmująca okres 60 min. Analizowano tylko chwile, w których przenośnik pracował z obciążeniem. Każda grupa pochodzi z innego dnia, z różnych zmian. Łączny czas pomiarów rozpatrywanych podczas badania wynosił 600 min. W tym czasie przetransportowano ponad 832238 kg produktu odpadowego. Bazą odniesienia w porównaniu jest układ napędowy przenośnika pracujący z układem automatycznej regulacji. W 10 godzin zużycie energii przez silnik przenośnika wynosiło 69,5 kWh. Zużycie to uzyskano podczas pracy układu sterowania z wartością zadaną masy transportowanego produktu odpadowego na poziomie 80% obciążenia nominalnego. Jednak w wybranych chwilach czasowych obserwowano 100% wypełnienie kbelków w związku z czym zrezygnowano z dalszego podwyższania wartości zadanej i uznano, że jest to wartość graniczna, gwarantująca bezpieczną pracę przenośnika. Uzyskane zużycie energii porównano z teoretycznie wyliczonym zużyciem, przy takim samym wypełnieniu, zużycie to wyniosło 67,8 kWh. Natomiast teoretycznie wyliczone zużycie energii podczas pracy z wypełnieniem kbelków na poziomie 100% obciążenia nominalnego wynosi 62,3 kWh. Teoretycznie wyznaczono również zużycie energii przez silnik przenośnika podczas pracy ze stałą znamionową prędkością (wariant 4), które wyniosło 83 kWh. Traktując to zużycie energii jako zużycie 100%, zastosowanie układu automatycznej regulacji pozwoliło na zmniejszenie zużycia o 13,5%, gdzie maksymalnie można było ograniczyć zużycie o 20,7%. Porównując uzyskane zużycie energii, z teoretycznie wyliczonym zużyciem dla takiej samej wartości zadanej (80%), uzyskano różnicę wynoszącą 1,7 kWh.

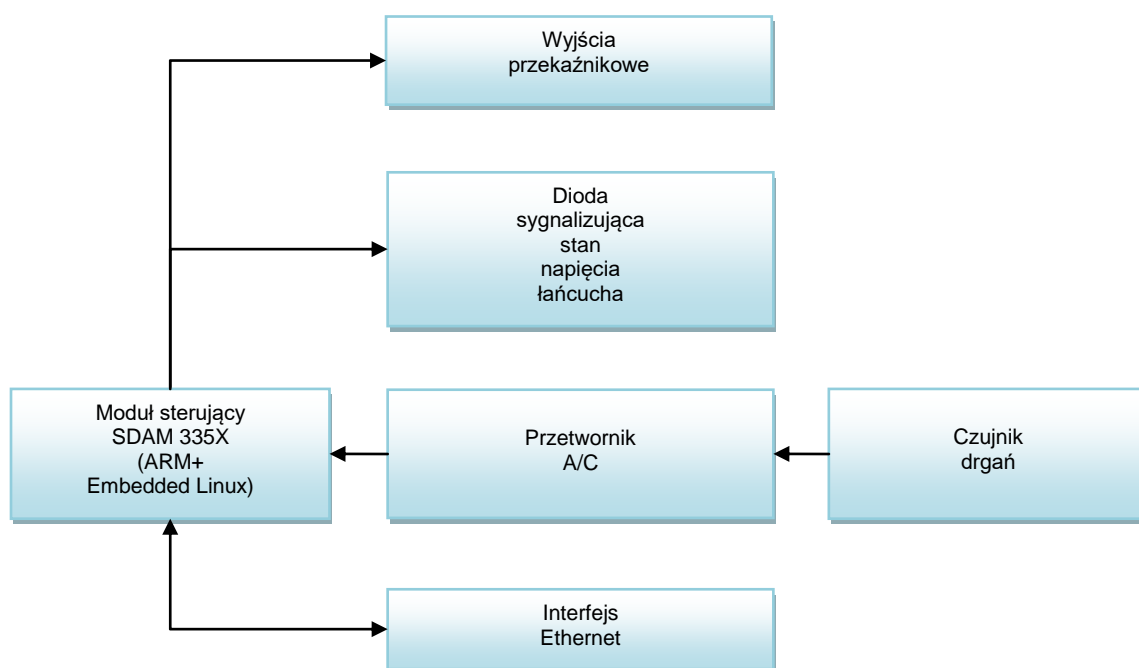
#### 4. Ciągła kontrola wydłużenia łańcucha przenośnika kulek

Inną funkcją realizowaną na potrzeby automatyzacji przenośników kulek jest ciągła kontrola wydłużenia łańcucha przenośnika kulek.

Ponieważ przenośniki kulek pracujące w zakładach przerobczych polskich kopalń wykorzystywane są do pracy ciągłej, ich długotrwała praca, z dużym obciążeniem, może powodować rozciąganie łańcucha(ów) przenośnika. Nadmierne wydłużenie łańcucha jest najbardziej widoczne w obrębie stacji zwrotnej przenośnika.

W proponowanym rozwiązaniu wykorzystuje się fakt, że wydłużeniu łańcucha opasującego wał stacji zwrotnej towarzyszą stuki i drgania jej konstrukcji. Analiza tych drgań pozwala określić graniczny stopień wydłużenia łańcucha [4].

Do budowy układu rejestracji drgań i kontroli wydłużenia łańcucha zastosowano moduł zaprojektowany na bazie procesora ARM, z wbudowanym systemem operacyjnym Linux. Procesor wyposażono w oprogramowanie odczytujące wyniki pomiarów, filtrację i analizę sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz algorytm umożliwiający identyfikację stanu pracy wskazującego na nadmierne wydłużenie łańcucha przenośnika. Strukturę blokową układu kontroli wydłużenia łańcucha zaprezentowano na rysunku 3.



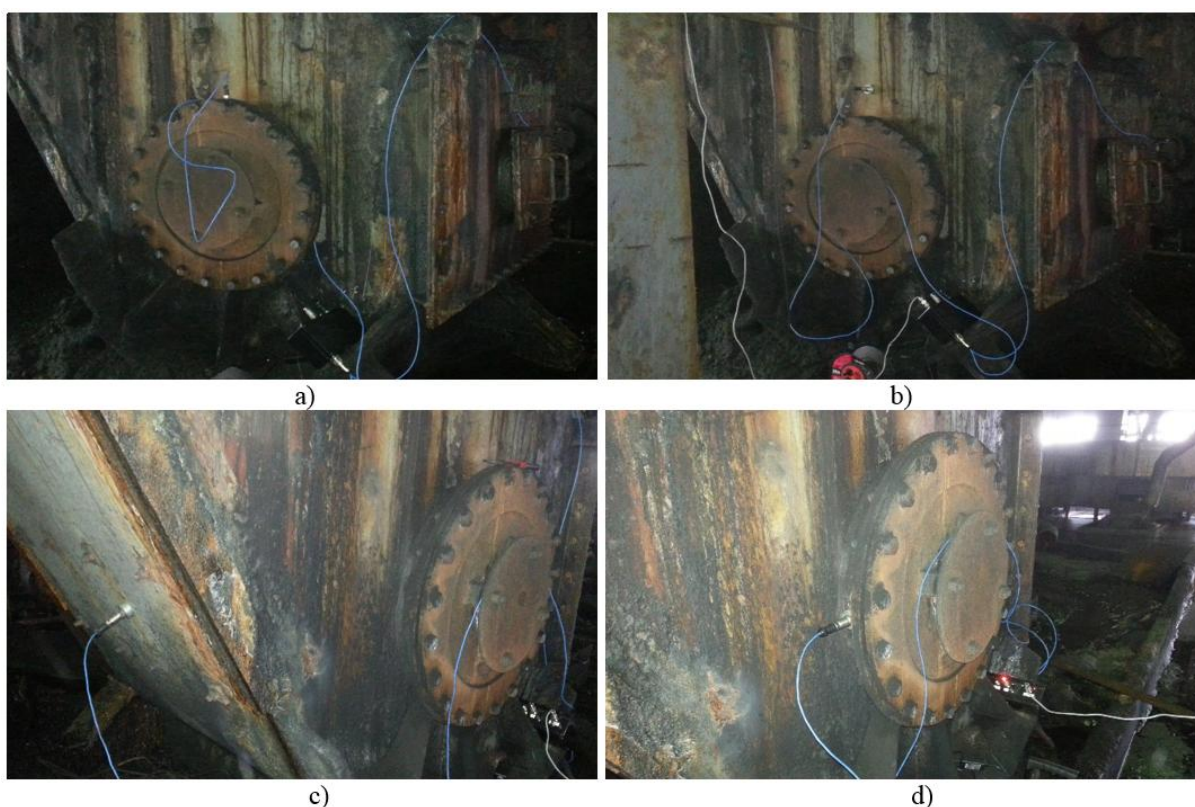
Rys. 3. Struktura układu kontroli wydłużenia łańcucha przenośnika kulek [4]

Układ kontroli składa się z modułu zasilania, przetwornika analogowo–cyfrowego, kanału pomiarowego i elementów sterujących interfejsem Ethernet. Ponadto, urządzenie wyposażono w:

- jedno wejście typu ICP do podłączenia czujnika drgań,
- jedno wejście do podłączenia impulsatora pomiaru prędkości przenośnika,
- dwa wyjścia przekaźnikowe, umożliwiające przesłanie stanu analizy np. do sterownika PLC,

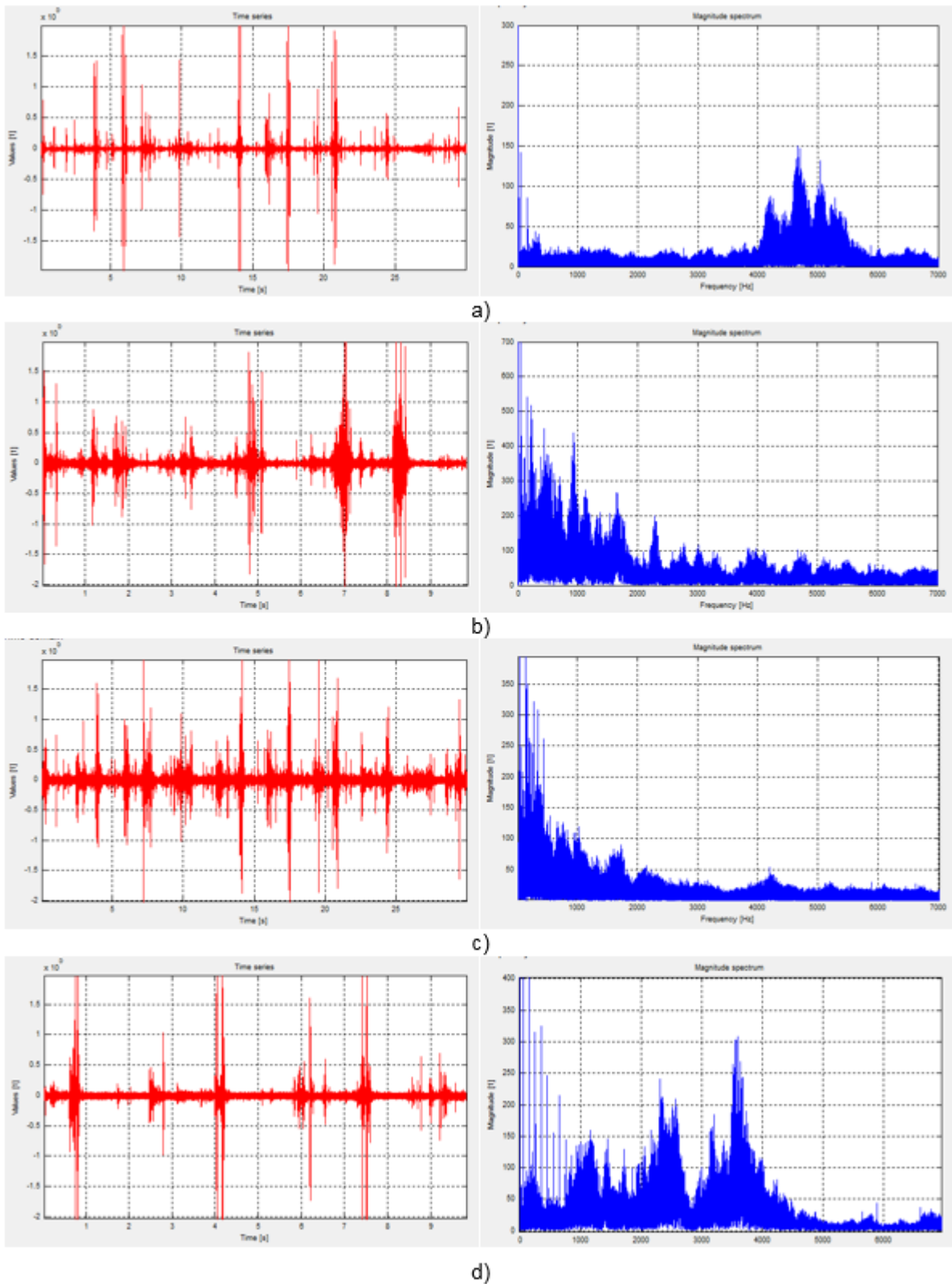
- złącze zasilające,
- złącze Ethernet służące do programowania oraz konfiguracji.

Badania z wykorzystaniem opracowanego modułu przeprowadzono w kopalni „Budryk”, na przenośniku odprowadzającym produkt odpadowy z pierwszych dwóch przedziałów koryta osadzarki średnioziarnowej OS36D3E. Próby prowadzono przy trzech stanach napięcia łańcucha: poprawnego, niewielkiego oraz znacznego zluźnienia łańcucha przenośnika. Sprawdzano również wpływ umiejscowienia czujnika drgań na stacji zwrotnej przenośnika na jakość otrzymywanych sygnałów. Sposób zamontowania czujników przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Mocowanie czujników na stacji zwrotnej przenośnika, w odniesieniu do których rejestrowano przebiegi drgań: a) położenie 1, b) położenie 2, c) położenie 3, d) położenie 4 [3]

Sygnale zarejestrowane w przedziałach czasowych, w których przenośnik pracował bez obciążenia, w odniesieniu do 4 różnych zamocowań czujnika, pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Sygnały zarejestrowane w przedziałach czasowych, w których przenośnik pracował bez obciążenia, w czterech pozycjach zamocowań czujnika:

a) położenie 1, b) położenie 2, c) położenie 3, d) położenie 4 [3]

Analizę wyników pomiarów zarejestrowanych podczas badań przemysłowych i określenie ich przydatności do budowy układu identyfikacji stanu wydłużenia łańcucha, przeprowadzono na podstawie następujących parametrów [3, 4, 5]:

- energia w wybranym zakresie pasma częstotliwości z widma amplitudowego sygnału drgań – C,
- całkowita energia sygnału – EN,
- wartość skuteczna sygnału – RMS,
- kurtoza sygnału – KURT,
- wariancja sygnału – VAR.

Wyniki badań pozwoliły na opracowanie algorytmu identyfikującego zluźnienie łańcucha, dostrojenie układu i wyznaczenie sygnału bazowego, do którego porównywano bieżące zapisy drgań stacji zwrotnej. Otrzymywano powtarzalne wskazania nadmiernego wydłużenia łańcucha, wynikające z automatycznej analizy drgań, świadczące o konieczności weryfikacji położenia łańcucha.

## 5. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono metodę sterowania prędkością przenośnika kubełkowego pracującego w osadzarkowym węźle wzbogacania, wykorzystującą algorytm predykcyjny. Praca przenośnika w trakcie prowadzonych badań była stabilna, a przeprowadzona analiza wykazała, że zaproponowana metoda ogranicza zużycie energii elektrycznej. Przy założeniu pracy napędu przez średnio 15 godzin na dobę i cenie energii elektrycznej brutto 0,50 zł/KWh, otrzymuje się oszczędności wynoszące ponad 5200 zł/rok. Spodziewane jest uzyskanie większych oszczędności związanych z wydłużeniem żywotności przenośnika. Trwają obecnie badania potwierdzające tę tezę. Przedstawione wyniki analizy dotyczą tylko przenośnika kubełkowego, na którym były przeprowadzone badania.

Kolejną funkcją, realizowaną w ramach układu sterowania przenośnikiem kubełkowym jest identyfikacja stanu zluźnienia łańcucha w przenośniku kubełkowym. Informacje o stanie łańcucha przenośnika uzyskiwano na podstawie analizy parametrów sygnałów odbieranych z czujników drgań, w tym amplitudy mierzonego sygnału, jego obwiedni oraz amplitudy poszczególnych składowych widma częstotliwościowego. W artykule omówiono budowę fizycznego modelu układu realizującego tę funkcję.

Przedstawione rozwiązania posłużą do budowy autonomicznego układu sterowania węzłem osadzarkowym. Integracja lokalnych systemów sterowania urządzeń węzła w jeden, nadrzędny system sterowania będzie prowadzona pod kątem zwiększenia żywotności układów wykonawczych w warunkach zmiennego obciążenia.

## Literatura

- [1] Hubert W., Gutorski Z. i inni: Katalog przenośników kubełkowych odwadniających. ITG KOMAG, Gliwice 1982 (materiały niepublikowane)
- [2] Jendrysik S.: Metoda sterowania przenośnikiem kubełkowym w osadzarkowym węźle wzbogacania. Praca doktorska. Politechnika Śląska 2016



- [3] Jendrysik S., Latos M., Jasiulek D., Stankiewicz K., Gawliński A.: Automatyczny system sterowania węzłem osadzarkowym z ciągłą kontrolą wydłużenia łańcucha przenośnika kubełkowego. KOMEKO 2015, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2015 s. 62-68; 0,48 ark. wyd., ISBN 978-83-60708-85-9
- [4] Bartoszek S., Jagoda J., Jasiulek D., Jura J., Latos M., Stankiewicz K.: System wibrodiagnostyczny maszyn górniczych. KOMTECH 2013, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność - Niezawodność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2013 s. 347-363; 1,08 ark. wyd., ISBN 978-83-60708-78-1
- [5] Latos M., Bartoszek S., Rogala-Rojek J.: Diagnostics of underground mining machinery. Materiały na konferencję: MMAR 2014, 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, Poland, 02-05 September 2014 s. 782-787, ISBN 978-83-7518-697-0