

## Wpływ regulacji prędkości na pobór mocy przez silniki przenośnika taśmowego

**Streszczenie.** Badano zmiany poboru mocy przez silniki napędowe przenośnika taśmowego przy zmniejszaniu jego prędkości. Analizowano wpływ regulacji prędkości na pracę przenośnika poziomego i transportującego urobek dość stromo w górę. Obliczono wartości oporów ruchu i momenty obciążenia silników przy pełnej prędkości i przy połowie prędkości. Pobór mocy z sieci wyznaczono dwoma metodami. W pierwszym wariantie wykorzystano proste zależności statyczne. W wariantie drugim posłużono się dynamicznym modelem silnika zaimplementowanym w programie ATP/EMTP.

**Abstract.** The changes of the power consumption by the drive motors of the belt conveyor in case of reducing the speed were studied. The influence of the speed control on the work of two conveyors: horizontal and transporting excavated material quite steeply up were analyzed. Values of the resistances of motion and motor's load torque at full speed and at half speed were calculated. The power consumption of the supply network was determined by two methods. In a first variant according to uses simple static patterns. In the second variant a dynamic model of the engine implemented in the ATP / EMTP program was used. (**The influence of speed control on the power drawn by motors of the belt conveyor**).

**Słowa kluczowe:** przenośniki taśmowe, układ napędowy, silnik klatkowy, regulacja prędkości, oszczędzanie energii  
**Keywords:** belt conveyors, drive system, induction motor, speed control, energy conservation

### Wprowadzenie

Autorzy wielu publikacji twierdzą, że obniżenie ustalonej prędkości taśmy przenośnika taśmowego wpływa na zmniejszenie kosztów eksploatacji urządzenia [1, 6, 10, 12]. Energia potrzebna do realizacji procesu technologicznego jest wprost proporcjonalna do prędkości. Wobec tego praca napędu z minimalną prędkością powinna dać największe oszczędności.

Głównym efektem zmniejszania prędkości przenośnika jest ograniczenie poboru mocy przez silniki napędowe. Dodatkowo wolniej zużywają się elementy ruchome, takie jak krążniki, łożyska bębnowe oraz taśma. Pozytywnym efektem jest również ograniczenie hałasu.

Ograniczenie poboru mocy jest ważne ze względu na uzyskiwane oszczędności energii elektrycznej. Opłaty za energię elektryczną zużywaną przez przenośniki użytkowane przez jedną ze spółek zajmujących się zaopatrzeniem elektrowni w węgiel brunatny, wynosiły 40% kosztów związanych z utrzymaniem ruchu przenośników o łącznej długości 83 km [5]. Inne źródło szacuje, że stosowanie stałej prędkości przenośnika powoduje straty energii elektrycznej na poziomie od 40 do 70% [11].

Pomniejszenie ilości energii zużywanej przez przenośniki uzyskuje się przez pracę układu z prędkością zapewniającą utrzymanie znamionowego wypełnienia taśmy urobkiem. Wtedy wydajność urządzenia jest maksymalnie wykorzystywana [8]. W związku z tym konieczna jest możliwość regulacji prędkości w funkcji wielkości strugi urobku.

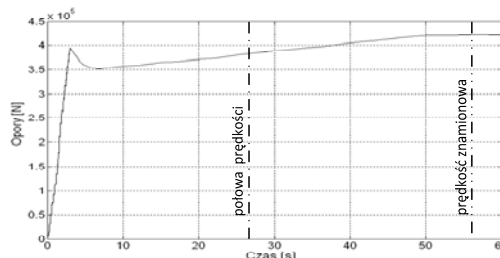
Pomimo cytowanych wypowiedzi literaturowych, niektórzy autorzy [9] kwestionują możliwości uzyskiwania oszczędności energii dzięki regulacji prędkości. W celu wyjaśnienia wątpliwości, przeprowadzono analizę zmian oporów ruchu i mocy pobieranej przez silniki przenośnika przy regulacji prędkości.

### Opory ruchu przenośnika

Obciążenie silników napędowych przenośnika zależy głównie od tzw. oporów ruchu taśmy. Do zaawansowanych sposobów obliczania oporów ruchu należy metoda oporów jednostkowych, którą ewentualnie można uzupełnić o składowe opory falowania.

Przykładowy przebieg zmian sumy oporów ruchu podczas rozruchu przenośnika ze sprzęgłami podatnymi uzyskany z wykorzystaniem rozbudowanego symulacyjnego modelu długiego przenośnika [6] przedstawiono na rys. 1. Wykorzystano metodę oporów jednostkowych [14]. Na

początku rozruchu wartość oporów gwałtownie rośnie w związku z wchodzeniem w ruch kolejnych odcinków elastycznej taśmy. Zjawisko to jest częściowo kompensowane przez zmiany wartości współczynników tarcia przy przechodzeniu od tarcia statycznego do dynamicznego w momencie ruszania kolejnych odcinków taśmy. Maksymalna wartość oporów, towarzysząca podwyższonej, statycznej wartości współczynnika tarcia stopniowo ruszającej taśmy odpowiada niewielkiej prędkości taśmy i silnika (w chwili około 2,8 s). Po przejściu do tarcia dynamicznego opory się obniżają (minimum dla czasu około 6 s). W dalszej części przebiegu opór rośnie wraz z prędkością aż do osiągnięcia przez taśmę prędkości ustalonej.

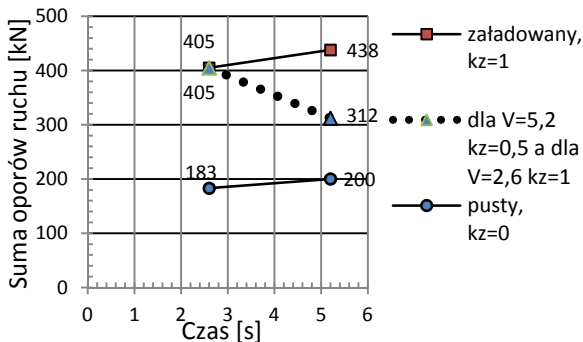


Rys. 1. Przebieg sumy oporów ruchu całej taśmy w czasie rozruchu, wyliczony metodą oporów jednostkowych, przenośnik załadowany [10]

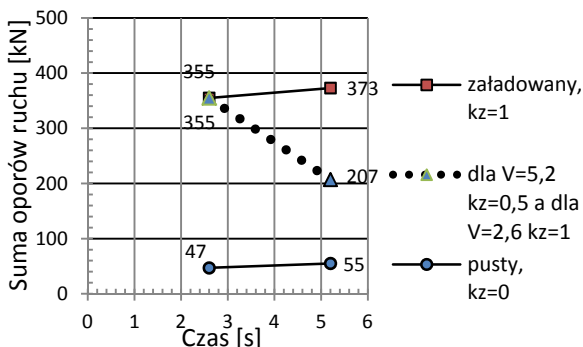
Poza przypadkiem pracy pustego przenośnika, regulacja prędkości odbywa się z zachowaniem stałości masy urobku przeniesionego w jednostce czasu. Przekrój strugi urobku zmienia się. Współczynnik załadowania taśmy rośnie wraz z obniżaniem prędkości. Przykładowo, jeśli współczynnik załadowania taśmy wynosi 0,5, jej prędkość można obniżyć do połowy, tak aby współczynnik załadowania wzrósł do 1. Taki przypadek wybrano do dalszej analizy.

Badania wykonano dla 2 przykładowych przenośników. Przenośnik numer 1, o długości ponad 3 km, przebiega poziomo. Jest napędzany przez układ 5 silników indukcyjnych klatkowych o mocy po 630 kW każdy. Przenośnik numer 2, o długości 1 km, podnosi urobek 25 m w górę. Jest napędzany przez 4 silniki indukcyjne klatkowe o mocy po 630 kW. Przebiegi zmian sumy oporów ruchu w zakresie zmian prędkości pomiędzy połową prędkości znamionowej i znamionową, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2 i 3.

Górne przebiegi dotyczą teoretycznego przypadku obniżania prędkości od znamionowej  $V = 5,2$  m/s do połowy znamionowej  $V = 2,6$  m/s bez zmiany współczynnika załadowania (czyli przy teoretycznym założeniu, że przekrój strugi urobku na taśmie jest stały). Przebiegi te pokazują niewielki spadek wartości oporów przy zmniejszaniu prędkości. Funkcją prędkości jest głównie opór toczenia krążników. Przebiegi dolne dotyczą pracy pustych przenośników. Różnica pomiędzy oporami ruchu załadowanego i pustego przenośnika jest znacznie większa w przenośniku nr 2, który podnosi urobek na wyższy poziom.



Rys. 2. Zmiany wartości oporów ruchu, odpowiadające dwukrotnym zmianom prędkości taśmy w przenośniku nr 1



Rys. 3. Zmiany wartości oporów ruchu, odpowiadające dwukrotnym zmianom prędkości taśmy w przenośniku nr 2

Liniami kropkowanymi zaznaczono przebiegi zmian dla analizowanego przypadku – gdy przenośnik załadowany w połowie (współczynnik załadowania  $kz = 0,5$ ), po zwolnieniu do połowy prędkości osiąga załadowanie znamionowe ( $kz = 1$ ). Wskutek wzrostu przekroju strugi urobku przy obniżaniu prędkości, opory ruchu znacząco rosną. Wzrost oporów wskutek zwiększania stopnia załadowania jest znacznie większy niż ich zmniejszanie wskutek obniżania oporu toczenia krążników.

Skoro przy obniżaniu prędkości przenośnika opory ruchu rosną, w pracy [9] wysunięto wątpliwość, czy rzeczywiście regulacja prędkości zapewnia oszczędności energii elektrycznej. Wątpliwość ta jest niesłuszna. Przy obniżaniu prędkości, w związku ze wzrostem oporów, rzeczywiście wzrasta moment obciążenia silników. Jednak pobierana moc nie jest liniową funkcją momentu. Moc jest iloczynem momentu i prędkości kątowej. A zatem jeśli dwukrotnemu obniżeniu prędkości towarzyszy mniejszy niż dwukrotny wzrost oporów ruchu, to pobierana moc będzie malała.

#### Obliczenia szacunkowe oszczędności energii

Przyjęto założenie upraszczające, że wszystkie silniki napędowe przenośnika obciążone są równomiernie. Siłę oporów ruchu można przeliczyć na moment obciążenia jednego silnika, wykorzystując następującą zależność:

$$(1) \quad M_o = \frac{W \cdot D_b}{2 \cdot n_s \cdot i_p \cdot \eta_p}$$

gdzie:  $M_o$  – moment obciążenia silnika [Nm],  $W$  – sumaryczna siła oporów ruchu [N],  $D_b$  – średnica bębna napędowego [m],  $n_s$  – liczba silników przenośnika,  $i_p$  – przełożenie przekładni mechanicznej,  $\eta_p$  – sprawność przekładni.

W obu analizowanych urządzeniach  $D_b = 1,4$  m,  $i_p = 14$ ,  $\eta_p = 0,9$ . W przenośniku nr 1 liczba  $n_s = 5$ , a w przenośniku nr 2  $n_s = 4$ . Moment znamionowy silnika wynosi 6100 Nm. Dla przenośnika nr 1 uzyskano moment obciążenia jednego silnika:

- przy obciążeniu znamionowym ( $V = 5,2$ ,  $kz = 1$ ,  $W = 438$  kN)  $M_{on} = 4866,6$  kNm,

- przy pełnej prędkości i połowie załadowania ( $V = 5,2$ ,  $kz = 0,5$ ,  $W = 312$  kN)  $M_1 = 3466,6$  Nm,

- przy połowie prędkości i pełnym załadowaniu ( $V = 2,6$ ,  $kz = 1$ ,  $W = 405$  kN)  $M_2 = 4499,9$  Nm.

Natomiast moment obciążenia silnika w przenośniku numer 2 wynosi:

- przy obciążeniu znamionowym ( $V = 5,2$ ,  $kz = 1$ ,  $W = 373$  kN)  $M_{on} = 5180,6$  Nm,

- przy pełnej prędkości i połowie załadowania ( $V = 5,2$ ,  $kz = 0,5$ ,  $W = 207$  kN)  $M_1 = 2875,0$  Nm,

- przy połowie prędkości i pełnym załadowaniu ( $V = 2,6$ ,  $kz = 1$ ,  $W = 355$  kN)  $M_2 = 4930,6$  Nm.

Badanemu procesowi zmiany prędkości z pełnej na połowę odpowiada zmiana momentu obciążenia od wartości  $M_1$  do wartości  $M_2$ .

Uproszczona zależność pozwalająca obliczyć moc  $P$  pobieraną przez silnik obciążony momentem  $M_o$  ma postać

$$(2) \quad P = M_o \cdot \omega$$

gdzie  $\omega$  jest prędkością kątową synchroniczną.

Dla pracy przenośnika z prędkością znamionową  $\omega = 104,6$  rad/s, a dla pracy z połową prędkości  $\omega = 52,3$ . A zatem w przenośniku nr 1 obniżeniu prędkości do połowy odpowiada zmiana mocy pobieranej przez silnik od 362,6 kW ( $3466,6 \cdot 104,6$ ) do 235,3 kW ( $4499,9 \cdot 52,3$ ). Obniżenie prędkości spowodowało zmniejszenie poboru mocy o 35% wartości początkowej. Odpowiednia zmiana mocy w przenośniku numer 2 wynosi od 300,7 kW do 257,9 kW czyli o 14% wartości początkowej.

Oszczędności mocy w przenośniku poziomym są znacznie większe niż w przenośniku, który transportuje urobek na wyższy poziom. Jest to związane wpływem narastania oporów podnoszenia urobku przy wzroście współczynnika załadowania taśmy.

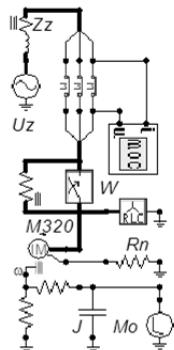
W [3] podano wyniki pomiarów z wykorzystaniem układu kaskadowego, umożliwiającego zmniejszenie prędkości do połowy znamionowej. Przetransportowanie tej samej masy urobku w tym samym czasie przy połowie prędkości taśmy i 100% załadowaniu w porównaniu ze znamionową prędkością taśmy i 50% załadowaniu wymagało poboru energii mniejszego o około 30%. Jest to wynik zbliżony do uzyskanego w niniejszej pracy dla przenośnika nr 1.

#### Badania dynamicznego modelu silnika

W celu weryfikacji uzyskanych wartości mocy pobieranych przez silniki, wykorzystano dynamiczny model silnika. Zastosowano model obwodowy, zaimplementowany w programie ATP/EMTP, przeznaczonym do modelowania elementów systemu elektroenergetycznego. Model silnika wraz z układem zasilania opracowany w tym programie przedstawiono na rysunku 4.

Poza standardowymi elementami, w modelu uwzględniono moduł do pomiaru pobieranej mocy czynnej, zaczerpnięty z [2]. Należy przy tym pamiętać, że moc znamionowa silnika określona jest na jego wale. Pobór mocy z sieci przy znamionowej pracy silnika przekracza

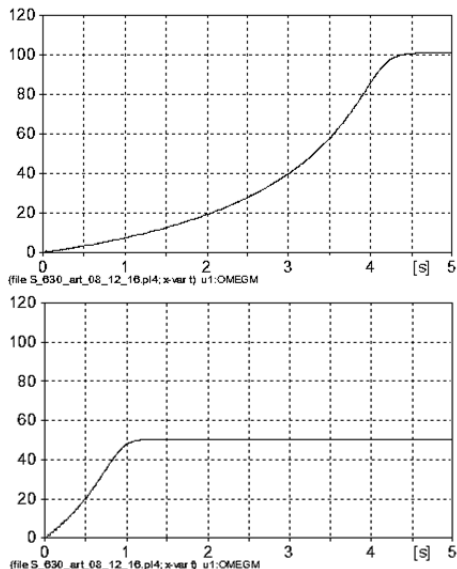
znamionową – jest równy stosunkowi mocy znamionowej do sprawności maszyny.



Rys. 4. Model w programie ATP

Dla sprawdzenia modelu, w pierwszej kolejności wykonano obliczenia porównawcze przebiegów rozruchowych silnika obciążonego znamionowo do pełnej prędkości i do połowy prędkości. Obniżenie prędkości ustalonej zamodelowano zmieniając wartość napięcia zasilającego i jego częstotliwości zgodnie z zasadami sterowania skalarnego.

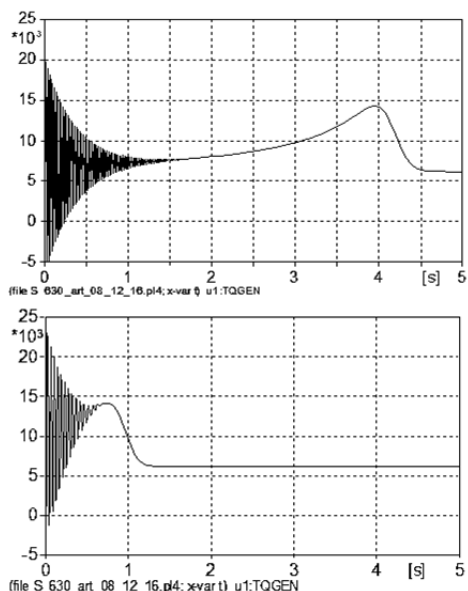
Znamionowe napięcie źródła – w ATP podaje się amplitudę napięcia fazowego – wynosiło 4898 V a częstotliwość  $f = 50$  Hz. Obniżenie napięcia i częstotliwości do połowy spowodowało, że prędkość kątowna zamiast do wartości 50,32 rad/s spadła do 47,68 rad/s. Nastąpił również spadek wartości momentu krytycznego silnika. Aby prędkość zmieniła się do połowy i to z zachowaniem tej samej wartości momentu krytycznego obniżone napięcie przyjęto na poziomie 2930 V, a częstotliwość 25,48 Hz. Uzyskane przebiegi rozruchowe przedstawiono na rysunkach od 5 do 8. Górne krzywe dotyczą rozruchu do pełnej prędkości, a dolne do połowy. Zmniejszenie ustalonej prędkości spowodowało znaczne (około 3,7-krotne) skrócenie czasu rozruchu, co oznacza zmniejszenie zużycia energii na rozruch przonośnika.



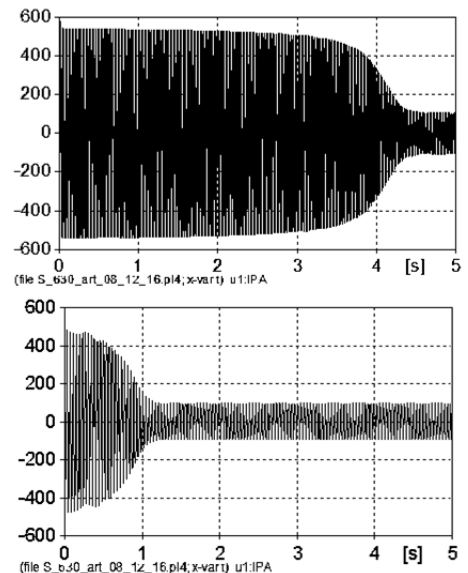
Rys. 5. Przebiegi prędkości silnika

Wartość ustalonego poboru mocy czynnej uzyskana z modelu wynosi 696 kW, co oznacza sprawność silnika na poziomie  $630/696 = 0,90$ . Natomiast przy pracy z połową prędkości silnik pobierał 369 kW, co daje sprawność  $315/369 = 0,85$ .

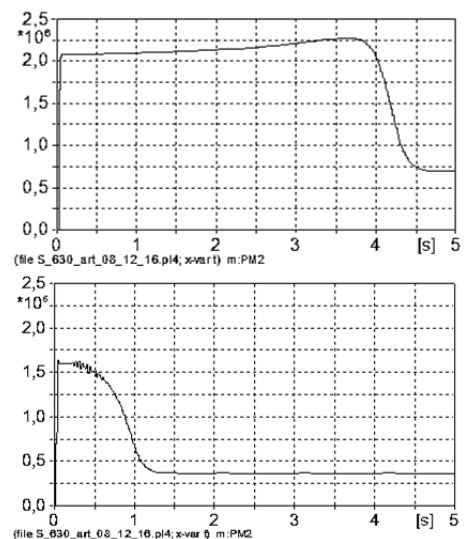
Sprawdzony model wykorzystano do wyznaczenia wartości mocy odpowiadających momentom  $M_1$  i  $M_2$ , wyznaczonym w poprzednim rozdziale ze wzoru (1).



Rys. 6. Przebiegi momentu elektromagnetycznego



Rys. 7. Przebiegi prądu pierwszej fazy stojana



Rys. 8. Przebiegi poboru mocy czynnej z sieci

W tabeli 1 zestawiono uzyskane wartości z obliczonymi wg wzoru (2). Wartości uzyskane z modelu w ATP różnią się od obliczonych metodą statyczną, zwłaszcza dla

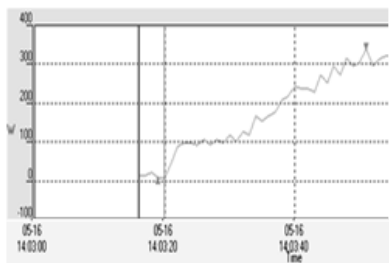
przenośnika nr 2. W przenośniku poziomym różnice te mieszczą się w logicznie dopuszczalnych granicach.

Tabela 1. Zmiany poboru mocy czynnej przez silnik przenośnika

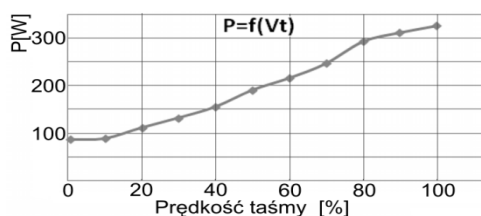
Moc pobierana przez	Silnik przenośnika nr 1			Silnik przenośnika nr 2		
	Prędk. znam.	Połowa prędk.	Zmiana mocy	Prędk. znam.	Połowa prędk.	Zmiana mocy
Metoda obl.	kW	kW	%	kW	kW	%
Wzory statyczne	362,6	235,3	35	300,7	257,9	14
Model w ATP	387,0	267,0	31	321,0	293,0	9
Pomiar [4]			30			

### Praca przenośnika pustego

Regulacja prędkości przy stałym współczynniku wypełnienia taśmy urobkiem odpowiada przypadkowi zerowego współczynnika wypełnienia czyli zmianom prędkości pustego przenośnika. Oszacowanie zmiany pobieranej mocy wykonano dla przenośnika nr 1. Jak przedstawiono na rys. 2, obniżeniu prędkości od znamionowej do połowy przy braku załadowania, odpowiada w tym przenośniku zmiana oporów ruchu od 200 do 183 kN. Ze wzoru (1) wyznaczono momenty obciążenia silnika  $M_1 = 2222$  Nm, a  $M_2 = 2033$  Nm. Wykorzystując model w ATP uzyskano zmianę pobieranej mocy od 248,3 kW do 121,0 kW. Zmniejszenie poboru stanowi 51% wartości początkowej.



Rys. 9. Pomiarowy przebieg zmian pobieranej mocy podczas rozruchu częstotliwościowego pustego podajnika [7]



Rys. 10. Zależność mocy pobieranej w funkcji prędkości taśmy pustego podajnika [7]

Wykonano rejestrację rozruchu krótkiego poziomego podajnika taśmowego napędzanego silnikiem o mocy 1,1 kW. Zmiany mocy czynnej przy płynnym zwiększaniu częstotliwości do 50 Hz przedstawiono na rysunku 9. Częstotliwość zmieniano na tyle wolno, że przebieg można traktować jako ciąg stanów ustalonych przy rosnącej prędkości, czyli można pominąć moc potrzebną na rozpędzenie mas urządzenia

Zmiany mocy czynnej pobieranej przez silnik, w funkcji prędkości taśmy przedstawiono na rys. 10.

W analizowanym podajniku zmiana mocy przy obniżeniu prędkości do połowy wynosi  $330 - 190 = 140$  W, co stanowi 42% wartości początkowej. Z pomiaru uzyskano mniejszą wartość oszczędności mocy niż z rozważań teoretycznych. Jest to spowodowane specyfiką mierzonego podajnika, którego charakterystyki różnią się od typowych przenośników taśmowych.

Wg [13], wypadkowe zużycie energii przez przenośniki ciągu węglowego w nowej odkrywce uruchomionej w Koninie, dzięki regulacji prędkości spadło o około 50%.

### Podsumowanie

Opory ruchu przenośnika taśmowego zależą w głównej mierze od stopnia załadowania urobkiem, a w znacznie mniejszym stopniu od prędkości taśmy. Skoro przy obniżaniu prędkości przenośnika rośnie współczynnik załadowania taśmy, to opory ruchu również będą wzrastać. A zatem wg [9], uzyskanie oszczędności energii przy obniżaniu prędkości jest problematyczne. Rzeczywiście przy obniżaniu prędkości załadowanego przenośnika moment obciążenia silnika wzrasta, ale do wyznaczenia poboru mocy trzeba uwzględnić zmiany prędkości silnika.

Obniżenie prędkości przenośnika poziomego do połowy znamionowej, przy zachowaniu takiej samej ilości transportowanego urobku w przenośniku poziomym daje oszczędność energii rzędu 30%. W przenośniku o dużym nachyleniu, podnoszącym urobek w górę, oszczędności będą mniejsze – w analizowanym przypadku do kilkunastu procent. Natomiast obniżeniu prędkości pustego przenośnika towarzyszy największa oszczędność – przy zmianie prędkości do połowy, obniżenie poboru energii powinno przekroczyć 50%.

**Autor:** Dr hab. inż. Bogusław Karolewski, prof. nadzw., Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: boguslaw.karolewski@pwr.edu.pl

### LITERATURA

- [1] Dunn H: Why Use Electronic Variable Speed Drives on Conveyor Applications. International Materials Handling Conference Beltcon 10, South Africa, 1999
- [2] Dzierżanowski W, Pytel J, Floryn J: Wykonanie i symulacyjne testowanie programu realizacji funkcji utrzymania w pracy elektrodzielnicy zakładowej podczas głębokich awarii systemowych. Raport serii Spr. Inst. Ergoelektryki PWR nr S5/2002, Wrocław
- [3] Glinka T: Zużycie energii elektrycznej w układach napędowych przenośników taśmowych. Przegląd Elektrotechniczny, R. 82, nr 6, 2006
- [4] Karolewski B, Ligocki P: Modelling of long belt conveyors. (Modelowanie długich przenośników taśmowych). Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 16, nr 2, 2014
- [5] Köhler U, Lehmann L-B: Przenośniki taśmowe z regulowaną prędkością transportu. Podst. Probl. Transp. Przenośnikowego nr.3, Szkoła Jesienna, Szklarska Poręba 2002
- [6] Köhler U, Sykulla M, Wuschek V: Variable-Speed Belt Conveyors Gaining in Importance. Surface Mining (Trans Tech Publications) no. 1, march 2001
- [7] Kowalczyk Ł: Badanie napędu przenośnika taśmowego o regulowanej prędkości. Inżynierski projekt dypl. w Inst. Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWR (opiekun B. Karolewski), Wrocław 2013
- [8] Landy C: Vector Controlled Variable Speed Drives – a Viable Alternate for Driving Conveyors. Beltcon 10, Johannesburg, October 1999
- [9] Lauhoff H: Speed Control on Belt Conveyors - Does it Really Save Energy? Bulk Solids Handling, vol. 25 no. 6, 2005
- [10] Ligocki P: Analiza dynamiki wielosilnikowego napędu przenośników taśmowych. Praca doktorska na Wydz. Elektrycznym Pol. Wrocławskiej, promotor B. Karolewski, 2008
- [11] Lisowski J: Sposób sterowania ciągiem przenośników taśmowych przy minimalnej energochłonności procesu transportu. Górnictwo Odkrywkowe nr 3, 1997
- [12] Lutyński A: Ekonomiczne aspekty stosowania przemienników częstotliwości w napędach przenośników taśmowych. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, seria: górnictwo 246, nr kol. 1480, 2000
- [13] Szymański J, Kasztelewicz Z: Energy saving control method of electrical drives in conveyor belts with regulated speed in surface brown coal mine. Archiwum Górnictwa, PAN, Vol. 53, nr2, 2008
- [14] Ściegosz W: Obliczenia podstawowe przenośników taśmowych. Zeszyty Problemowe COBPGO POLTEGOR nr 43, Wrocław, 1972