

PORÓWNANIE ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ PRZENOŚNIKI TAŚMOWE W KOPALNI WĘGLA BRUNATNEGO

CZĘŚĆ 4. ROZWAŻANIA TEORETYCZNE I WERYFIKACJA DLA DANYCH Z KONINA

COMPARISON OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION BY BELT CONVEYORS IN A BROWN COAL MINE

PART 4. THEORETICAL CONSIDERATIONS AND VERIFICATION FOR DATA FROM KONIN

Mirosław Bajda, Leszek Jurdziak - Wydział Geoinżynierii Górniczej i Geologii, Politechnika Wroclawska
Zbigniew Konieczka - PGE GiEK S.A. Oddział KWB Belchatów

Czwarty artykuł z cyklu poświęconego analizie zużycia energii przez przenośniki węglowe w kopalni węgla brunatnego nie odwołuje się do danych z kopalni, lecz przedstawia rozważania teoretyczne zagadnienia zużycia energii przez przenośniki. Przechodząc od czynników wpływających na zużycie energii i całkowitych oporów ruchu przenośnika autorzy przeszli do zapotrzebowania na moc i zdefiniowanego we wcześniejszych pracach wskaźnika zużycia energii WskZE. Weryfikację przeprowadzono dla danych empirycznych opublikowanych w innych artykułach dla przenośników ze zmienną prędkością, które funkcjonują w kopalni węgla brunatnego w Koninie. W przeciwieństwie dla danych z kopalni Belchatów na przenośniku węglowym DW5, który miał podobną długość (940 m), to wydajność koparki była stała w trakcie testów, a zmieniana była prędkość taśmy i przez to stopień wypełnienia taśmy. Dzięki temu można było przetestować zależności testowe zarówno dla zmiennej średniej wydajności przy stałej prędkości [1-3] jak i zmiennej prędkości przy stałej wydajności [30, 31, 34, 35]. Wskaźnik zużycia energii, jak podpowiada teoria oporów ruchu przenośnika, okazał się funkcją dwóch zmiennych, dla przenośnika poziomego. Jest on liniowo zależny od prędkości i odwrotnie proporcjonalny od bieżącej wydajności. Analiza ilorazu mocy potrzebnej do jałowej pracy przenośnika (pustego) i pracy z obciążeniem pokazała, że choć obniżanie prędkości przy stałej wydajności prowadzi do coraz niższego zużycia energii, to jednak coraz większą część energii zużywa się na transport ciężkiej i szerokiej taśmy oraz poruszanie wielkich krążników dobranych do przeniesienia szczytowych wydajności koparki. W pracy zasugerowano zmianę paradygmatu doboru przenośników, by poprawić stosunek masy urobku na taśmie do masy części ruchomych (taśmy i krążników) i obniżyć zużycie energii poprzez lepsze wykorzystanie wydajności teoretycznej poprzez lepszą organizację pracę ciągów np. pokazywanie nie tylko ilości i jakości urobku na tablicach synoptycznych, lecz również bieżącego wskaźnika zużycia energii i wartości skumulowanych dla wybranych okresów.

Słowa kluczowe: zużycie energii elektrycznej, przenośniki taśmowe, zmienna prędkość, oszczędność energii, dobór przenośnika, transport węgla brunatnego

The fourth paper from the cycle devoted to the analysis of energy consumption by coal conveyors in a lignite mine does not refer to data from the Belchatów mine but presents theoretical considerations of the issue of energy consumption by conveyors. Moving from factors influencing energy consumption and the total resistance of the conveyor, the authors moved to the demand for power and the unit energy consumption index WskZE defined in previous works. The verification was carried out for empirical data published in other papers for conveyors with variable speed that operate in the Konin lignite mine. Unlike the data from the Belchatów mine on the DW5 coal conveyor in Konin, which had a similar length (940 m), the excavator's output was constant during testing, and the belt speed and thus the degree of belt filling degree (in %) was changed. Thanks to this, it was possible to test relationships for both: variable average capacity at the constant speed [1-3] and variable speed at the constant capacity [30, 31, 34, 35]. The unit energy consumption index, as suggested by the theory of conveyor resistance, turns out to be a function of two variables (for a horizontal conveyor). It is linearly dependent on speed and inversely proportional to current capacity. Analysis of the ratio of power needed for the idle operation of the conveyor

(empty) and work with load showed that although lowering the speed at constant capacity leads to lowering the level energy consumption, however, an increasing part of the energy is consumed for the transport of heavy and wide belt and moving large rollers selected to match peak excavator performance. The paper suggests a change in the paradigm of the selection of conveyors to improve the ratio of the mass of spoil on the belt to the mass of moving parts (belts and rollers) and reduce energy consumption by better use of theoretical efficiency through better organization of the conveyor lines operation, e.g. showing not only the quantity and quality of spoil on synoptic boards but also the current energy consumption indicators and their cumulative values for selected periods.

Keywords: electricity consumption, belt conveyors, variable speed, energy saving, belt conveyor selection, lignite transport

Wprowadzenie

W czwartym artykule z cyklu poświęconego analizie zużycia energii przez przenośniki węglowe w kopalni węgla brunatnego autorzy nie odwołują się tym razem do danych z kopalni, lecz przedstawiają teoretyczne rozważania zagadnienia zużycia energii przez przenośniki. Analizy danych z kopalni Bełchatów w poprzednich pracach prowadzone były bez odwoływania się do teorii oporów ruchu przenośnika by dobrane empirycznie funkcje opisujące zidentyfikowane zależności nie były motywowane modelami teoretycznymi.

Obecnie przechodząc od czynników wpływających na zużycie energii i klasycznych zależności pozwalających na wyznaczenie całkowitych oporów ruchu przenośnika autorzy przeszli do zapotrzebowania na moc i zdefiniowanego we wcześniejszych pracach jednostkowego wskaźnika zużycia energii $WskZE$.

Uzyskane zależności zweryfikowano dla danych empirycznych opublikowanych w innych artykułach. Dotyczyły one jednego z przenośników z ciągu węglowego w odkrywcze Drzewce w kopalni węgla brunatnego Konin. Ciąg ten ma możliwość zmiany prędkości taśmy, co daje unikalną możliwość analizy wpływu zmiany prędkości na zmianę zapotrzebowania na energię. Wyniki testów zostały opisane w kilku pracach różnych autorów [30, 31, 34, 35].

Opisano w nich zużycie energii na przenośniku DW5, który ma podobną długość (940 m), co analizowane wcześniej przenośniki A i B w kopalni Bełchatów [1-3]. W przeciwieństwie do sytuacji w kopalni Bełchatów to wydajność koparki w okresie testów była stała, a zmieniana była prędkość taśmy i przez to stopień jej wypełnienia.

W pracy określono teoretycznie i empirycznie stosunek zapotrzebowania na moc przenośnika w ruch jałowym (bez urobku) do mocy niezbędnej do pracy przenośnika pod obciążeniem. Pokazało to stopień marnotrawstwa energii na transport pustej taśmy. Odniesiono ten iloraz do stosunku masy transportowanego urobku do masy wozidła w transporcie oponowym.

Porównanie takie uwypukliło znaczenie stosunku masy urobku do masy taśmy i krążników przypadających na 1 mb trasy przenośnika dla efektywności energetycznej przenośnika [10, 26]. Obniżanie prędkości przy obniżonej wydajności to słuszny kierunek, ale dla funkcjonujących już ciągów. Dla nowych przenośników warto chyba zmienić zasady doboru przenośników. Konieczność przejścia przez nie maksymalnych (szczytowych) wydajności chwilowych pojawiających się bardzo rzadko [8, 17-21] powoduje, że później przez

długie lata eksploatacji, przy średniej wydajności sięgającej 30%-40% wydajności teoretycznej ponosi się koszty energii na transport szerokiej i ciężkiej taśmy.

Warto chyba zmienić ten paradygmat projektowy i zadbać o to, aby ograniczyć szczytowe wydajności lub przejąć je w zbiornikach wyrównawczo-przesypowych za koparką, by na przenośniki odbierające podać równą strugę urobku, dobraną do optymalnie dobranego percentyla wydajności [19-20]. Warto też lepiej wykorzystywać czas pracy maszyn, gdyż stopień wykorzystania czasu kalendarzowego też jest niski [23, 27], a przecież można eksploatować urobek dłużej z mniejszą wydajnością i zapewnić lepsze wypełnienie wydajności nominalnej.

Warto pracować też nad obniżeniem masy taśmy i krążników. Ich waga zależy od szerokości i wytrzymałości taśmy. Gdy wydajność koparek się obniży, to zmieni się też waga części ruchomych. Wagę tę można obniżać również poprzez zmianę materiałów i konstrukcji.

Czynniki wpływające na zużycie energii przez przenośniki

Podczas stabilnej pracy siła napędowa bębna napędowego jest równa całkowitym oporom ruchu, które należy pokonać [11, 29].

Norma DIN 22101 [5] przyjmuje, że całkowite opory ruchu przenośnika F_C można podzielić na cztery główne składowe: opory główne F_G , opory skupione F_S , opory podnoszenia urobku F_H i opory dodatkowe F_D

$$F_C = F_G + F_S + F_H + F_D \quad [\text{kN}] \quad (1)$$

Całkowity opór ruchu można obliczyć wg wzoru:

$$F_C = C_f L g [m_k + (2 m_t + m_u) \cos \delta] + m_u g H, \quad [\text{N} = \text{kg m/s}^2] \quad (2)$$

w którym, m_k , m_t , m_u reprezentują masę krążników (k), taśmy (t) i urobku (u) przypadające na 1 mb długości trasy (w kg/m). Oczywiście można poszczególne elementy tego wzoru przedstawić jako suma części składowych dla jednorodnych odcinków trasy przenośnika charakteryzujące się jednakowymi parametrami (np. kątem nachylenia trasy δ_i). Dla uproszczenia przyjęto, że przenośnik jest jednorodny pod tym względem. Nie chodzi bowiem o dokładne obli-

czenie oporów ruchu tego przenośnika, to warto robić z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania po uwzględnieniu wszystkich niezbędnych szczegółów [25, 28], lecz pokazanie czynników wpływających z ogólnych proporcji wpływu różnych czynników na opór całkowity przenośnika.

Masa m_u urobku obciążającego 1 mb długości taśmy przenośnika może być wyliczona z wydajności przenośnika Q_r i prędkości taśmy v według poniższego wzoru:

$$m_u = \frac{Q_r}{3,6 v} \quad [\text{kg/m}] \quad (3)$$

gdzie wydajność przenośnika Q podana jest w Mg/h, a prędkość taśmy w m/s.

Masę taśmy przypadającą na 1 mb długości przenośnika oblicza się wzorem:

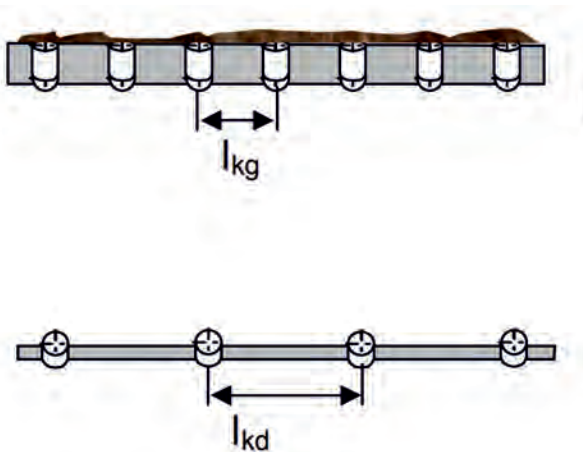
$$m_t = \frac{B}{1000} m_{tj} \quad [\text{kg/m}] \quad (4)$$

Dla analizowanych przenośników o szerokości taśmy $B=1,6\text{m}$, 1 m^2 taśmy waży $45,88\text{ kg}$, a 1 mb $73,4\text{ kg}$ ($=1,6 \cdot 45,88$), co daje łączną masę taśmy $146,8\text{ kg}$ ($2m_t$).

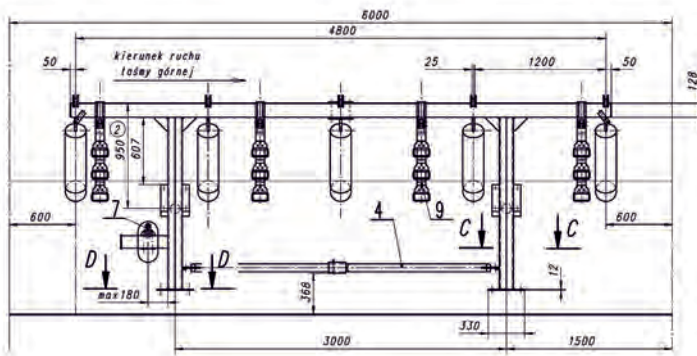
Masa m_k obrotowych części krążników przypadająca na 1 mb długości przenośnika.

Masę obrotowych części krążników przypadających na 1 mb długości przenośnika oblicza się wzorem:

$$m_k = \frac{m_{zkg}}{l_{kg}} + \frac{m_{zkd}}{l_{kd}} \quad [\text{kg/m}] \quad (5)$$



Rys. 1. Geometria zestawów przenośnikowych w cięgnie górnym i dolnym [29]
Fig. 1. Geometry of the conveyor idler set in the upper and lower band [29]



Rys. 2. Schemat członu trasy analizowanych przenośników (dane z kopalni)
Fig. 2. Diagram of the construction set of the analysed belt conveyors (data from the mine)

Trasa analizowanych przenośników składa się z powtarzalnych członów przedstawionych na rysunku 2.

Na jeden człon, który ma długość 6 m przypada 5 zestawów górnych o łącznej masie 609,5 kg (w jednym zestawie są trzy krążniki i łączna ich masa wynosi 121,9 kg) oraz jeden zestaw krążników dolnych o masie 69,8 kg. W sumie masa części obrotowych wynosi 679,3 kg, a na jeden metr bieżący przenośnika przypada ok. 113,2 kg masy krążników.

Przy pełnym obciążeniu przenośnika (jego pracy z wydajnością teoretyczną $Q_{\text{teor}}=6\text{ 400 Mg/h}$) na 1 mb taśmy znajduje się zaledwie 339,27 kg urobku (wg 3). Przy pracy z obciążeniem 30-40% ilość urobku zmienia się w granicach od 101,78 kg do 135,71 kg. Widać więc, że wpływ wagi taśmy i krążników ma istotne znaczenie dla całości oporów, bo ich waga przypadająca na 1 mb taśmy (260 kg) jest dwukrotnie większa niż waga urobku. Pogarsza to proporcje dla pełnego obciążenia, dla którego masa taśmy stanowi tylko 24,5% łącznego obciążenia, a masa krążników 18,89%. W sumie masa krążników i taśmy stanowi wtedy 43,39% pełnego obciążenia, co zapewnia podobny stosunek masy ruchomej do transportowanego urobku 1:1,3 jak w najbardziej wydajnych ciężarówkach i wozidłach. Niestety, gdy obciążenie przenośnika spada poniżej nominalnego, to stosunek ten jest dużo gorszy. W analizowanym przypadku 40% obciążenia stosunek ten wynosi ok. 2:1 (dokładnie 1,9:1). Co z grubsza odpowiada proporcjom dla wozideł dla trasy w obu kierunkach (z urobkiem i bez w trakcie powrotu). Dwukrotnie zużywamy energię na transport maszyny i tylko w jedną stronę wieziemy urobek o wadze odpowiadającej wadze wozidła.

Oszacowanie zapotrzebowania na energię niezbędną do transportu urobku przenośnikiem należy dokonać w oparciu o znajomość oporów ruchu F_c .

Niezbędną moc P_c potrzebną do napędu przenośnika, którą musi przekazać układ napędowy obliczamy ze wzoru [29]:

$$P_c = \frac{F_c}{1000 \eta} v \quad [\text{kW}=1000 \text{ kg m}^2/\text{s}^3] \quad (6)$$

gdzie η jest sprawnością napędu przenośnika.

Znając zapotrzebowanie na moc możemy wyznaczyć wskaźnik jednostkowego zużycia energii na transport 1 Mg na odległość 1 km ($WskZE$). Jeśli założymy, że przenośnik przez czas T (podany w godzinach) pracuje z wydajnością Q_r (Mg/h), to przenosi masę TQ_r urobku (w Mg) i jednostkowy wskaźnik zużycia energii $WskZE$ można obliczyć z wzoru:

$$WskZE = \frac{P_c T}{T Q_r L} = \frac{P_c}{Q_r L} \quad [\text{kW h}/(\text{Mg km})] \quad (7)$$

$$WskZE = \frac{F_c}{3,6 \eta m_u L} \quad [\text{kW h}/(\text{Mg km})] \quad (8)$$

Po wstawieniu F_c (2) otrzymujemy

$$WskZE = \frac{CfLg[m_k + (2m_t + m_u)\cos\delta] + m_u gH}{3,6 \eta L m_u} \quad (9)$$

$$WskZE = \frac{Cfg[m_k + (2m_t + m_u)\cos\delta]}{3,6 \eta m_u} + \frac{gH}{3,6 \eta L} \quad (10)$$

$$WskZE = \frac{Cfg}{3,6 \eta} \left[\frac{m_k}{m_u} + \left(2 \frac{m_t}{m_u} + 1 \right) \cos\delta \right] + g \frac{H}{3,6 L} \quad (11)$$

Już teraz widzimy, że jednostkowy wskaźnik zużycia energii zależy od stosunku jednostkowych mas części ruchomych i masy urobku na taśmie m_k/m_u i m_t/m_u oraz współczynników oporu C i f oraz sprawności η . Ma też swoją składową zależną od stosunku wysokości podnoszenia urobku H i długości przenośnika L . Nie zależy jednak bezpośrednio od długości przenośnika, gdyż zużytą energię przelicza się na 1 km trasy i 1 Mg urobku.

Masa urobku na 1 mb taśmy m_u zależy jednak od wydajności przenośnika Q_r i prędkości taśmy v (wg 3) dlatego warto dalej przekształcać równanie 11.

Weryfikacja dla przenośników płaskich

Zależność liniowa zużycia energii od prędkości taśmy jest zgodna z wynikami badań przemysłowych. W pracy [30] przedstawiono wyniki badań układów napędowych taśmociągów, które były prowadzone na poziomym przenośniku DW5 o długości 940 m pracującym w odkrywce Drzewce (Rys. 3). Badania obejmowały pomiary zmian mocy pobieranej przez napędy w zależności od prędkości przesuwu taśmy i jej obciążenia urobkiem.

$$WskZE = \frac{Cfg}{3,6 \eta} \left[\frac{m_k}{\frac{Q_r}{3,6 v}} + \left(2 \frac{m_t}{\frac{Q_r}{3,6 v}} + 1 \right) \cos\delta \right] + g \frac{H}{3,6 L} \quad (12)$$

$$WskZE = \frac{Cfg}{\eta} \left[\frac{v m_k}{Q_r} + \left(2 \frac{v m_t}{Q_r} + \frac{1}{3,6} \right) \cos\delta \right] + g \frac{H}{3,6 L} \quad (13)$$

Dla przenośników poziomych, gdy $H=0$ i $\cos\delta = 1$, $WskZE$ (wzór 13) staje się funkcją dwóch zmiennych: prędkości taśmy v i wydajności rzeczywistej przenośnika Q_r i przyjmie postać:

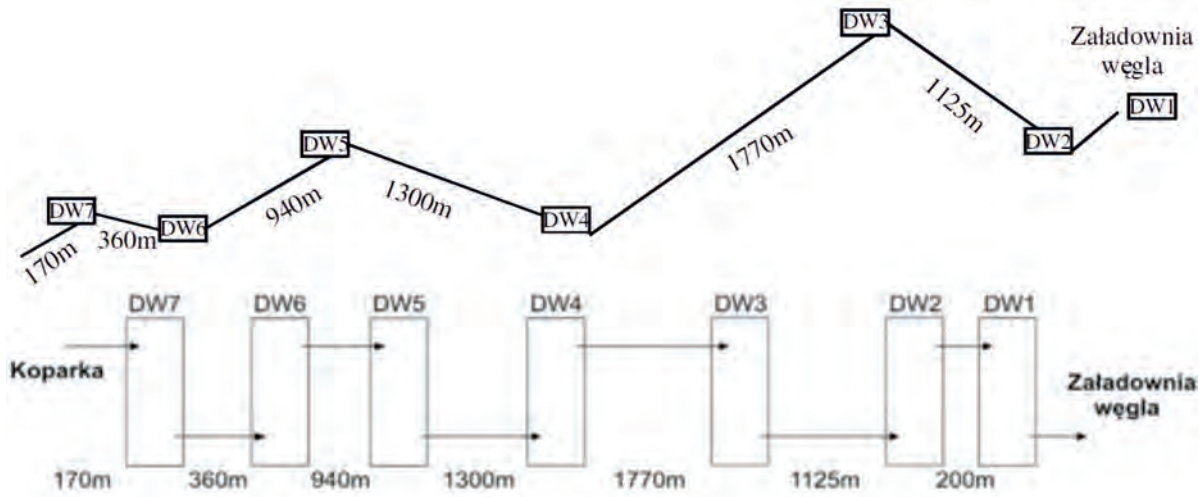
$$WskZE(v, Q_r) = \frac{Cfg}{\eta \left(v \frac{m_k + 2 m_t}{Q_r} + \frac{1}{3,6} \right)} \quad (14)$$

gdy Q_r jest przez odpowiednio długi czas obniżone (mniejsze niż Q_{teor}) i przez odpowiednio długi czas stałe (np. z uwagi na pracę koparek w trudniejszych warunkach) to z uwagi na to, że wskaźnik zużycia energii $WskZE$ zależy liniowo od prędkości **sluszne jest zmniejszanie prędkości taśmy do wartości minimalnej zapewniającej pełne załadowanie taśmy przenośnika**. Przy tej obniżonej prędkości (gdy Q_r dużo mniejsza niż Q_{teor}) istotnie zmniejszamy zużycie energii.

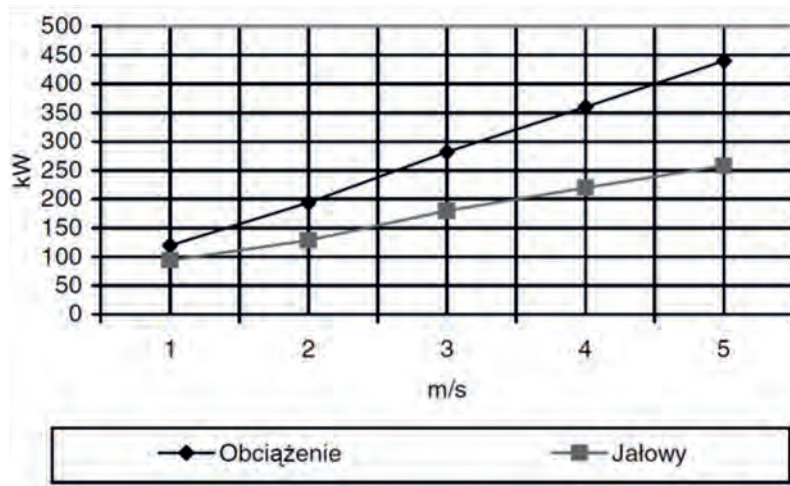
Przy taśmociągach poziomych [29], a takie głównie występują w ciągu taśmowym odkrywki Drzewce, mierzono pobór energii przenośników taśmowych w funkcji zmian prędkości przesuwu taśmy przy stałym obciążeniu (koparka pracowała ze stałą wydajnością ($Q_r=833$ Mg/h). Zużycie energii jest praktycznie proporcjonalne do prędkości przesuwu taśmy (Rys. 4).

Zapotrzebowanie na moc P_c można wyznaczyć ze wzoru 6 wstawiając F_c (2):

$$P_c(v, L) = \frac{CfgL}{1000 \eta [m_k + (2m_t + m_u) \cos[\delta]] v} + \frac{m_u gH}{1000 \eta} v \quad [\text{kW}] \quad (15)$$



Rys. 3. Schemat ciągu węglowego odkrywki Drzewce [24, 30]
 Fig. 3. Scheme of the coal conveyors line in the Drzewce lignite surface mine [24, 30]



Rys. 4. Zależność poboru mocy układów napędowych płaskiego taśmociągu pustego i z obciążeniem w zależności od prędkości przesuwu taśmy [30]
 Fig. 4. Dependence of power consumption of the horizontal conveyor belt drive system (with empty belt and belt with load) depending on belt speed [30]

Potrzebną moc w ruchu bez obciążenia P_{jalowy} można wyznaczyć przyjmując $m_u = 0$, a dla przenośnika poziomego $\cos \delta = 1$:

$$P_{jalowy}(L, v) = \frac{Cf g}{100\sigma\eta(m_k + zm_t)Lv} \quad [\text{kW}] \quad (16)$$

Wykorzystując wzór 3 można obliczyć moc P_c :

$$P_c(L, v) = \frac{Cf g}{100\sigma\eta} \left[m_k + \left[(2m)_t + \frac{Q_r}{3,6v} \right] \cos \delta \right] Lv + \frac{Q_r g H}{3600\eta} \quad [\text{kW}] \quad (17)$$

Dla przenośnika poziomego, gdy $H=0$, $\cos \delta = 1$

$$P_c(L, v) = \frac{Cf g L}{100\sigma\eta} (m_k + zm_t)v + \frac{Cf g L Q_r}{100\sigma\eta 3,6} \quad [\text{kW}] \quad (18)$$

W konsekwencji przyjętych założeń stosunek mocy potrzebnej do pracy przenośnika bez oraz z urobkiem dla płaskiego przenośnika odpowiada stosunkowi masy części ruchomych krążników i taśmy do łącznej masy wraz z urobkiem:

$$\frac{P_{\text{jałowy}}}{P_C}(v) = \frac{[(m)]_k + 2m_t}{[(m)]_k + 2m_t + m_u} = \frac{1}{1 + \frac{m_u}{m_k + 2m_t}} \quad (19)$$

Im stosunek masy urobku do masy części ruchomych jest większy, tym udział mocy niezbędnej do pracy pustego przenośnika będzie stanowiła mniejszą część mocy czynnej niezbędnej do pracy obciążonego przenośnika. Dla stałej wydajności $Q_r = 833$ Mg/h oraz prędkości $v=1, 2, 3, 4$ i 5 m/s stosunek ten zmienia się od ok. 50,51%, poprzez 67,12%, 75,38% i 80,33%. Nie odpowiada to wynikom pomiarów (Rys.4): 73,75%, 65,24%, 63,59%, 61,02% i 58,95%, co może wskazywać, że ilość urobku m_u wpływa na zmianę współczynnika oporów ruchu f , który przyjmuje inne wartości dla biegu jałowego oraz pracy pod obciążeniem. Zapewne zmienia się on również w zależności od stopnia wypełnienia taśmy¹, a może i w inny jeszcze sposób od prędkości taśmy v . Wraz ze zmianą obciążenia taśmy zmienia się bowiem strefa jej kontaktu i nacisk, a ma na to jeszcze wpływ poziom jej napięcia wstępnego, którego nie bierze się tu pod uwagę.² Widać więc, że warto kontynuować badania, a wiedza jak zmienia się zapotrzebowanie na moc dla przenośników przy różnej prędkości i różnym stopniu wypełnienia jest bardzo cenna.

Założmy, że współczynnik oporów ruchu zależy od prędkości taśmy. Wtedy stosunek mocy przyjmie postać:

$$\frac{P_{\text{jałowy}}}{P_C}(v) = \frac{[f_{\text{jałowy}}(v)] [(m)]_k + 2m_t}{f_C(v) [(m)]_k + 2m_t + m_u} \quad (20)$$

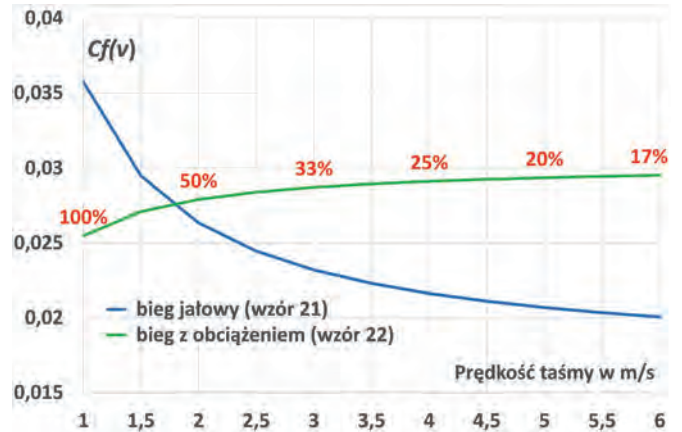
Metodami statystycznymi tak dobrano funkcje, by iloczyn Cf dla biegu jałowego i z obciążeniem zapewniły dobre dopasowanie równań zapotrzebowania na moc. Założono, że przenośnik ma długość $L=940$ m, masa części ruchomych wynosi 260 kg, a pojemność 1 mb taśmy wynosi 232,80 kg. Wtedy Cf w funkcji prędkości przyjmie postać:

$$Cf_{\text{jałowy}}(v) = 0,0169222 + 0,0188338/v \quad (21)$$

$$Cf(v) = 0,0303286 - 0,00485153/v \quad (22)$$

Nie są to najlepsze równania zapewniające najwyższy wskaźnik R^2 , lecz w miarę proste modele zapewniające, że ich iloczyn z

równaniami liniowymi daje liniowy wynik dla biegu jałowego i prawie liniowy dla pracy z obciążeniem. Można je wyznaczyć wykorzystując założone wartości. Zapotrzebowania na moc $P_{\text{jałowy}}(v)$ i $P_C(v)$ przy różnej prędkości v z uwzględnieniem



Rys. 5. Zmiany iloczynu $Cf(v)$ w funkcji prędkości taśmy v (w m/s) i stopnia wypełnienia taśmy (w % ,przyjęto 100% dla prędkości 1 m/s) i stałej wydajności $Q_r=833$ Mg/h

Fig. 5. Changes in the product of $Cf(v)$ as a function of belt speed v (in m/s) and the degree of belt filling (in %, 100% assumed for the speed of 1 m/s) and constant capacity $Q_r = 833$ Mg/h

zmienności współczynnika oporów $Cf(v)$ (21 i 22) przedstawiają równania:

$$P_{\text{jałowy}}(v) = C_{\text{jałowy}}(v) * 2523,752 v \quad (23)$$

$$P_{\text{jałowy}}(v) = 47,53184 + 42,70744 v$$

$$P_C(v) = Cf(v) (2523,752 v + 2246,03) \quad (24)$$

$$P_C(v) = 55,8749 + 76,54185 v - 10,897/v$$

Dla tak wyznaczonych funkcji iloraz zapotrzebowania na moc przenośnika bez i z obciążeniem odpowiadają teraz proporcjom wyznaczonym z wykresu (Rys. 4) i nie odbiegają od nich o więcej niż +/- 2%. Dla kolejnych prędkości 1, 2, 3, 4, 5 i 6 m/s stosunek mocy wynosi 74,26%, 65,33%, 62,32%, 60,77%

1 $Q_r \cdot v_{\text{max}} / (v Q_{r\text{teor}})$, gdzie v_{max} jest prędkością dobraną dla maksymalnej wydajności teoretycznej $Q_{r\text{teor}}$

2 W pracy [28] różnicuje się współczynnik oporów ruchu przenośnika od wielu parametrów taśmy, przenośnika, urobku, a nawet temperatury. Widać więc, że mogą mieć one wpływ na iloraz zapotrzebowania na mocy w ruchu bez i z obciążeniem i zarówno pełnym jak i niepełnym. Wymaga to odrębnych badań. Przedstawione rozważania są jedynie szacunkowe i na danych odczytanych z wykresu.

i 59,82% odpowiednio. Oznacza to, że nawet dla 6 m/s blisko 60% energii zużywane jest na pokonanie oporów ruchu pustej taśmy (stosunek 1.5:1). Dla 1 m/s stosunek energii zużywanej na transport taśmy do energii zużywanej na transport urobku wynosi 4:1 (Rys. 5).

W obliczeniach przyjęto, że do pomiarów opisanych w [30] prędkości dobrano, tak by wydajność $Q_r = 833$ Mg/h wypełniła w ok. 100% niekłą taśmy dla $v = 1$ m/s. Przy tym założeniu przy prędkości 5,24 m/s minimalna wydajność nominalna ciągu Q_{teor} powinna wynosić ok. 4 400 Mg/h, a dla 6 m/s ok. 5 000 Mg/h. Oczywiście może być większa i wtedy masa 233,80 kg/m odpowiadałaby niższej wartości stopnia wypełnienia. Nie jest to tak istotne dla charakteru i kierunku zmian.

Dla danych zaprezentowanych na wykresie (Rys. 4) można obliczyć i wykreślić zmiany $WskZE$ w funkcji obciążenia taśmy (stopnia jej wypełnienia, Rys. 6).

Widać, że wskaźnik zużycia energii zmniejsza się ze wzrostem obciążenia taśmy (stopniem wykorzystania wydajności teoretycznej).

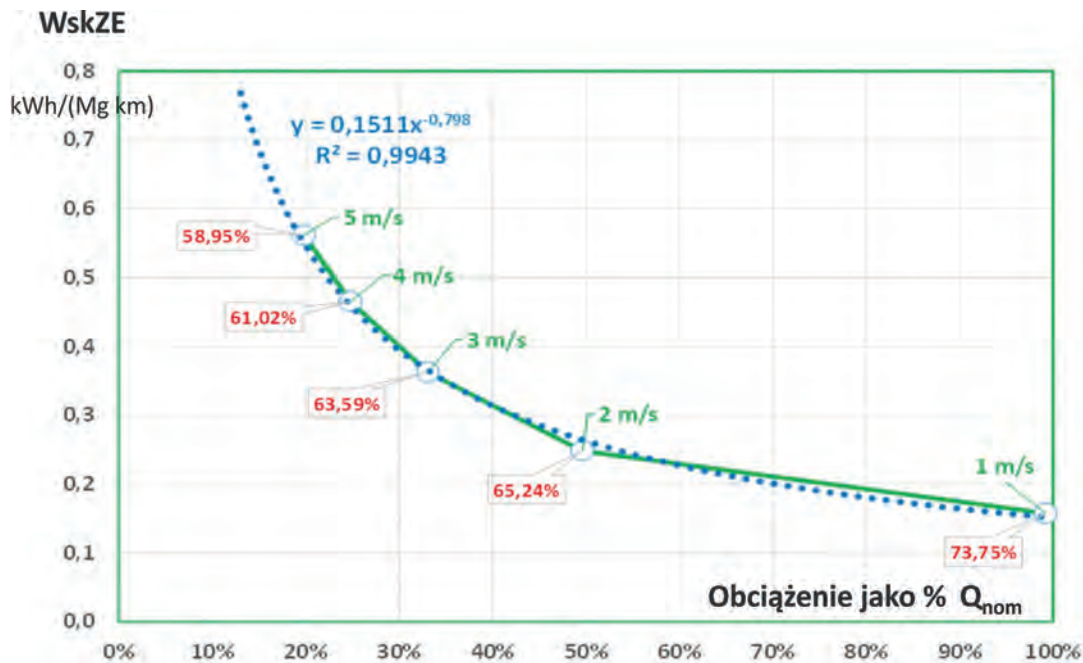
ulega nieznacznej modyfikacji i nieco zwiększa się błąd oszacowania, ale za to parametry równania są bliższe rzeczywistym danym.

$$WskZE = 0,299555 \cdot (260 \cdot v / 833 + 1/3,6) \quad (26)$$

$$WskZE = 0,093498559 v + 0,083209722$$

$$C_{fg}/\eta = 0,299555$$

Zmiana wydajności i prędkości musi spełniać warunek maksymalnej ilości urobku na taśmie. Przyjęto, że tą wielkością jest ilość 233,25 kg/m ($= 4\,400 / (3,6 \cdot 5,24)$). Na wykresie (Rys. 8) zobrazowano to poprzez usunięcie danych dla ok. połowy wykresu poniżej przekątnej (833 Mg/h, 6 m/s). Jeśli z powodu przesypów na taśmie pozostanie tylko maksymalna ilość urobku, to $WskZE$ nie będzie zależał już od Q_r i v , gdyż taśma więcej urobku przyjąć nie może, a z wzoru 11 wynika, że wskaźnik ten zależy od ilości urobku m_u (dla danej konstrukcji trasy warunkujących wartości m_k i m_t). Q_r i v służą jedynie



Rys. 6. Zmiany jednostkowego wskaźnika zużycia energii $WskZE$ dla przenośnika DW5 i danych z rysunku 4. Dla punktów pomiarowych podano prędkość taśmy i zapotrzebowanie przenośnika na moc podczas pracy bez obciążenia jako % zapotrzebowania z obciążeniem

Fig. 6. Changes in the unit energy consumption indicator $WskZE$ for the DW5 conveyor for data from Figure 4. For measuring points, the belt speed and the conveyor's demand for power during empty operation are given as % of the demand with the load

Po obliczeniu $WskZE$ na podstawie pomiarów (wg 7) można dobrać parametry w równaniu liniowym we wzorze 14. Pozwoli to oszacować niektóre nieznane parametry.

$$WskZE(v) = 0,18589 \cdot (0,551314 v + 1/3,6) = 0,102484 v + 0,051636 \quad (25)$$

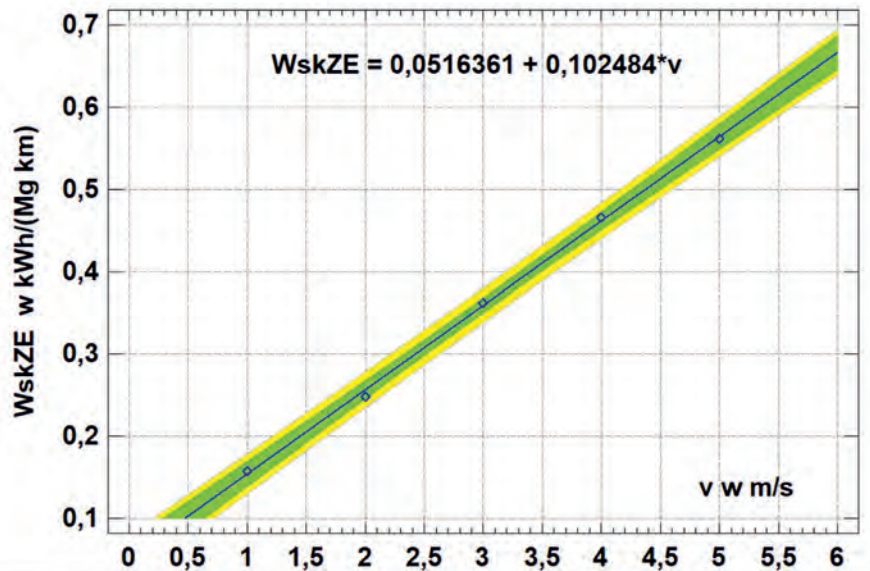
$$C_{fg}/\eta = 0,18589, (m_k + 2m_t)/Q_r = 0,551314$$

Pozwala to oszacować masę taśmy i krążników na ok. 459,24 kg/mb, co wydaje się zbyt dużą wartością w świetle tej wyznaczonej dla przenośników z Bełchatowa (260 kg/m).

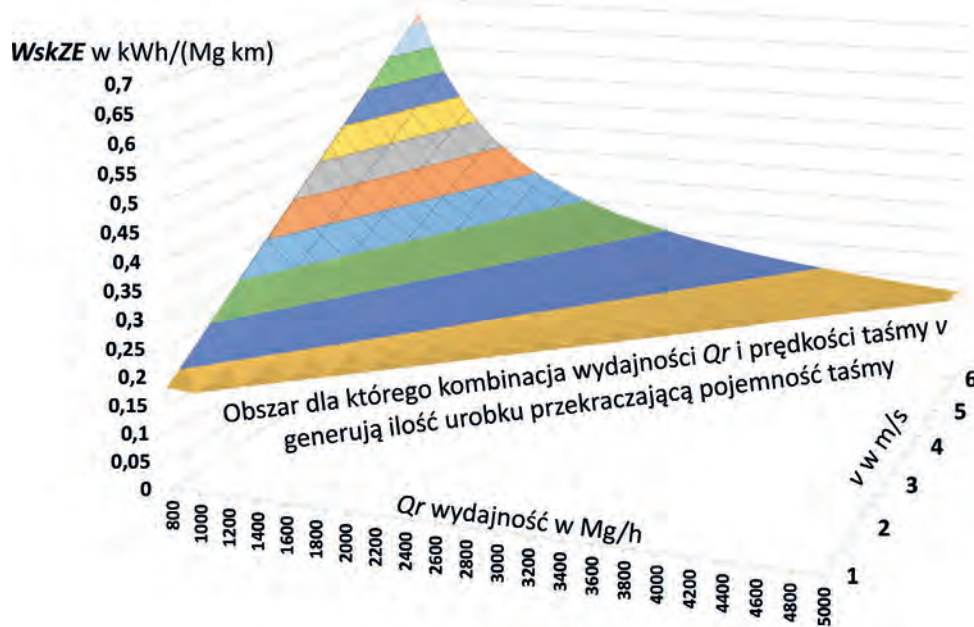
Po zastosowaniu szacunków z Bełchatowa równanie

do wyznaczenia tej ilości o ile nie przekracza ona wartości maksymalnej wynikającej z pojemności taśmy.

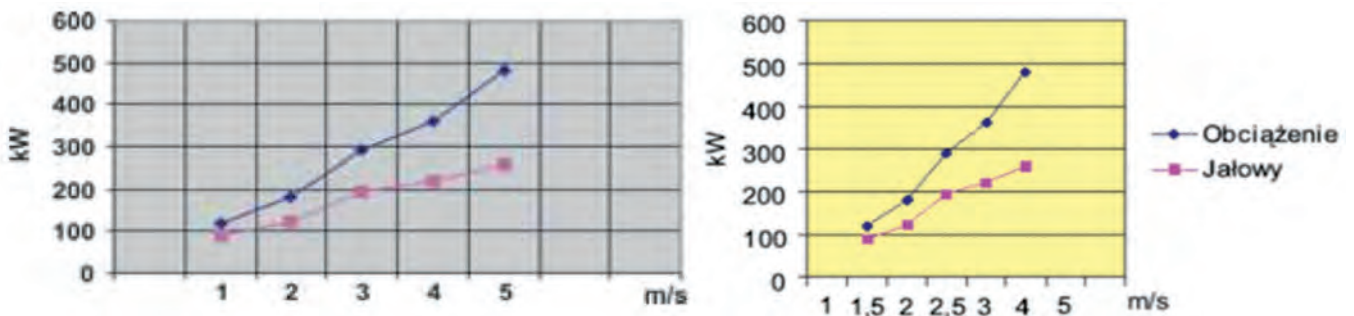
Podobne rezultaty zaprezentowano w dwóch pracach [24, 31]. Również dotyczą one taśmociągów poziomych z odkrywki Drzewce, w której na ciągu węglowym o regulowanej prędkości przenośników mierzono pobór energii przenośników taśmowych w funkcji zmian prędkości taśmy przy stałym obciążeniu. Również w tych pracach potwierdzono, że zużycie energii jest proporcjonalne do prędkości przesuwu taśmy (Rys. 9). Niestety zaprezentowane wykresy w dwóch publikacjach [24, 31], wydają się niejednoznaczne, w zakresie opisu osi 0X, co utrudnia wyciągnięcie wniosków. Obie prace prezentują podobne proporcje energii zużywanej na biegu jałowym do energii zużywanej do przenoszenia węgla ze stałą wydajnością.



Rys. 7. *WskZE* w funkcji prędkości taśmy na przenośniku DW5 dla stałej wydajności pracy koparki kołowej
 Fig. 7. *WskZE* as a function of belt speed for the DW5 conveyor under the constant capacity of the BWE operation



Rys. 8. *WskZe* (v, Q) dla zmian prędkości w zakresie 1-6 m/s oraz wydajności 800-5 000 Mg/h
 $WskZE = 0,299555(260 v / Q_r + 1/3,6)$
 Fig. 8. *WskZe* (v, Q) for speed changes range 1-6 m/s and capacity changes range 800-5000 Mg/h
 $WskZE = 0,299555 (260 v / Q_r + 1 / 3,6)$



Rys. 9. Przebieg poboru mocy układów napędowych taśmociągu pustego i z obciążeniem w zależności od prędkości przesuwu taśmy [24, 31]
 Fig. 9. Power consumption course of conveyor belt drive system (with empty belt and belt with load) depending on the belt speed [24, 31]

Pomimo niejednoznaczności opisu osi OX można jednak wykorzystać te dane w zgrubnych obliczeniach $WskZE$ (wg 7). Założono, że dane pochodzą z ciągu o regulowanej prędkości w odkrywce Drzewce, który pracował z wydajnością 833 Mh/h i najprawdopodobniej z tego samego płaskiego przenośnika DW5, który pojawiał się już w innych badaniach [30].

Dla ogólnego przypadku widać, że moc P_c zależy liniowo od L i właśnie dlatego przeliczenie jednostkowego zużycia energii na 1 km trasy w wzorze na $WskZE$ (wg 14) usuwa ten wpływ. Należy mieć na uwadze, że dla obliczenia zużycia dla całej trasy należy pomnożyć $WskZe$ przez długość trasy L podaną w kilometrach.

Współczynnik kierunkowy prostej do wyznaczenia zapotrzebowania na moc przenośnika P_c (15,18) wynosi $0,94C_{fg}(m_k + 2m_l)/(1000\eta)$. Widać, że im większa jest masa krążników i taśmy na 1 mb przenośnika, tym szybciej wzrasta potrzebna moc do pokonania oporów ruchu. Wzrost wydajności przenośnika przesuwają całą linię w pionie zwiększając potrzebną moc, gdy Q rośnie lub zmniejszając, gdy maleje. Należy pamiętać, że pewne kombinacje Q i v nie są możliwe do realizacji, gdyż dla każdej prędkości mamy wydajność graniczną wynikającą z pojemności taśmy. Nie da się więc zmniejszać zapotrzebowania obniżając prędkość i zwiększając wydajność. Można oszczędności uzyskać obniżając prędkość, gdy wydajność z jakichś względów spada. Potwierdzają to realne dane z pomiarów w kopalni.

W pracy [34] dla ciągu przenośników węglowych w odkrywce Drzewce w KWB Konin liczącego 5,716 km wyznaczono wskaźnik jednostkowego zużycia energii. $WskZE$ wyniósł 0,26141 kWh/tkm. W ciągu miesiąca dla przeniesienia 125 280 ton węgla na odległość 5,716 km zużyto 187 196 kWh energii elektrycznej (tab. 1).

Tabela 1 [34]

Odkrywka	Długość ciągu	Zużycie energii za miesiąc	Wydobycie za miesiąc	Wskaźnik energochłonności
	km	kWh	nadkład, m ³ węgiel, t	kWh/m ³ km kWh/tkm
Odkrywka „Drzewce”	KTZ I	2 399 653	1 129 283	0,923
	2,302			
przenośniki węglowe o regulowanej prędkości taśmy 1,5 m/s – 6,00 m/s	węgiel	187 196	125 280	0,261
	5,716			

W artykule tym [34] wyznaczono $WskZE$ dla większej liczby ciągów nadkładowych i węglowych w KWB „Konin”, ale ten z odkrywki Drzewce przypomina przenośniki A i B analizowane w pracach (Bajda 1, 2, 3), zwłaszcza przenośnik DW5, który ma długość 940 m, a więc prawie 1 km. Jego cechą wyróżniającą jest możliwość regulacji prędkości, co spowodowało obniżenie $WskZE$ z poziomu średniej w innych odkrywkach wynoszącej ok. 0,4997 kWh/tkm (0,442 kWh/tkm w o.Lubstów, 0,594 kWh/tkm w o.Józwin, 0,463 kWh/tkm

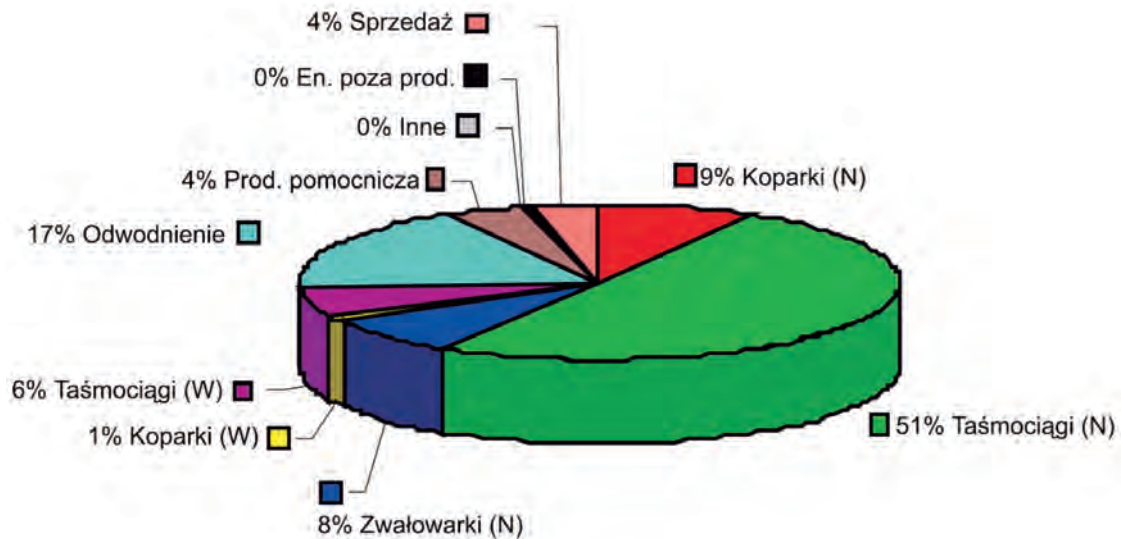
w o.Kazimierz) do poziom 0,261 kWh/tkm. To redukcja o ok. 50%. Ważne jest, że niski poziom wskaźnika $WskZE$ w KWB „Bełchatów” osiągnięto bez regulacji prędkości, a korzyści z zastosowania taśm energooszczędnych pokazane zostaną w następnej pracy. Średnie wartości tego wskaźnika wynosiły: 0,2886 kWh/tkm (przen. A) i 0,3036 kWh/tkm (przen. B) [1]. Widać więc, że istnieje jeszcze potencjał dalszych oszczędności energii i warto prowadzić nadal badania nad różnymi możliwościami obniżenia tego wskaźnika.

Podobne wyniki zaprezentowano w pracy [24]. W KWB Konin eksploatuje się przenośniki o łącznej długości 50 km. Długość przenośników taśmowych o regulowanej prędkości taśmy w ciągu węglowym stanowi 12% całkowitej długości eksploatowanych przenośników. W okresie od maja 2006 do marca 2007 zużyto 3 328 781 kWh i przeniesiono 2 323 101 ton węgla na odległość 5,867 km. Wskaźnik zużycia energii wyniósł 0,244 kWh/tkm. Analizowany ciąg pracował przez 8 miesięcy z prędkością 3 m/s i przez 3 miesiące z prędkością 2,5 m/s. Osiągnięty wskaźnik był więc nieco niższy od zaprezentowanych w tabeli 1. Energochłonność jest więc o ponad 50% niższa niż w odkrywce Kazimierz (0,434 kWh/tkm) i odkrywce Józwin (0,622 kWh/tkm). Dzięki temu w całym zakładzie zredukowano zużyta energię o 4,2%.

W KWB „Konin” ok. 70% energii elektrycznej pobierają układy napędowe [30]. 51% zużywają przenośniki nadkładowe, 6% przenośniki węglowe (do elektrowni węgiel transportowany jest pociągami). Koparki nadkładowe 9%, węglowe 1%, a zwałowarki 8%. W sumie stanowi to 78% całej energii zużywanej przez kopalnię, a rocznie kopalnia zużywa 350 GWh [35] (rys. 10).

Według autorów [31] optymalne zużycie energii elektrycznej występuje wtedy, gdy przenośnik pracuje z nominalnym

obciążeniem. Ponieważ obciążenie taśmociągu uzależnione jest od rodzaju materiału przenoszonego przez taśmociąg (węgiel, nadkład) jak i od wydajności koparki, która jest zmienna, narzuca się wniosek, że prędkość taśmy powinna być dopasowana do bieżącego obciążenia [30]. Nie jest bowiem możliwe, ze względu na zróżnicowaną strukturę geologiczną pokładów węgla, zapewnienie stałej wydajności koparki węglowej, aby jednocześnie zapewniła nominalne obciążenie przenośnika taśmowego o stałej nominalnej prędkości (5,24 m/s). W takich



Rys. 10. Zużycie energii KWB „Konin” z podziałem na poszczególne procesy techniczne (N — nadkład, W — węgiel) [34]
 Fig. 10. KWB „Konin” energy consumption divided into individual technical processes (N - overburden, W - coal) [34]

zastosowaniach, dla zapewnienia nominalnego wypełnienia taśmy, niezbędne staje się dopasowanie prędkości taśmy przenośnika do chwilowej wydajności koparki [30].

Skala uzyskanych oszczędności (4,2% w skali kopalni) dzięki modyfikacjom 12% ciągów transportowych wydaje się znacząca. Kłopot stwarza jednak prognozowanie wydajności z wyprzedzeniem pozwalającym na dopasowanie prędkości do oczekiwanej wydajności w okresie załadunku całego przenośnika.

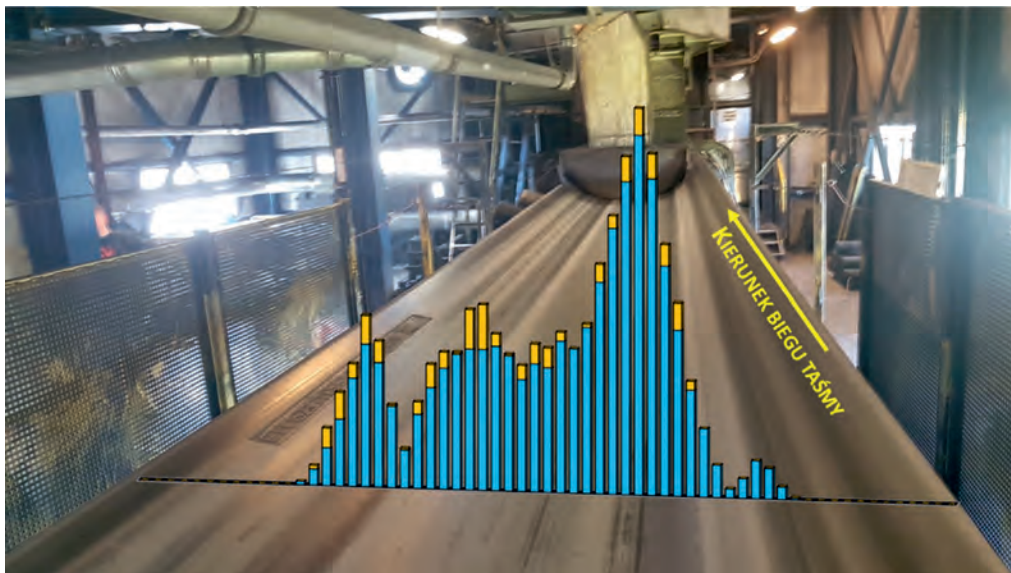
Podsumowanie

Im dłuższy jest przenośnik i im bardziej obniżyliśmy prędkość taśmy, tym dłuższy czas stabilnych warunków w przyszłości jest potrzebny dla zdyskontowania obniżonej prędkości. Dla przenośnika o długości trasy 2 km, przy prędkości 5,24 m/s potrzeba tylko 6,36 minuty dla przejechania podanego urobku na koniec przenośnika. Przy prędkości 2,5 m/s potrzeba już 13,33 minut, a dla prędkości 1 m/s ok 33,33 minut, czyli ponad pół godziny. Aby uzyskać oszczędność energii z obniżenia prędkości do tej wartości potrzebujemy, by wydajność koparki nie wzrosła w tym czasie. Po wzroście wydajności mogłyby powstać przesypy urobku (gdy wzrost prędkości nie nadąży za wzrostem wydajności) lub trzeba będzie szybko zwiększyć prędkość taśmy i przez to zmniejszą się oczekiwane oszczędności. Konieczne wydaje się dokładne dopasowanie zmian prędkości do szczegółowych planów pracy koparki z uwzględnieniem wszystkich zidentyfikowanych przeszkód, w tym pozostałości cementowych rur w otworach odwodnienia [32] lub utworów trudno urabialnych [7]. W pracy [34] podano schemat algorytmu dostosowującego prędkość taśmy do wydajności, ale nie przedstawiono prób z realnego jego zastosowania. W cyklu pracy koparek kołowych urabiających zabierkę zdarzają się chwilowe spadki, nawet do zera na kilka sekund, gdy koło koparki opuści zabierkę [17], lub nawet na kilkadziesiąt sekund a nawet dłużej, gdy koparka wykonuje manewry. Nie wydaje się jednak by ekonomicznie opłacalne byłoby natychmiastowe podążanie ze zmianami prędkości w ślad za zmianami wydajności koparki, gdy zmiany te są krótkotrwałe, (krótsze niż okres załadunku pełnego załadunku

przenośnika z obniżoną wydajnością i prędkością. Zmiany wydajności koparki można opisać niestacjonarnym procesem stochastycznym o dużej, lecz ograniczonej zmienności z występowaniem okresowych zmian odpowiadających cykлом pracy koparki [17, 21]. Proces ten tylko chwilowo można uznać za stacjonarny i ergodyczny [18], gdyż zmienność warunków urabiania i konieczność pokonywania przeszkód wymuszają nietypową pracę, a zdarza się to dosyć często.

Innym rozwiązaniem byłoby wprowadzenie za koparką koszy zasypowych o dobranej wielkości, by przejmowały szczytowe wydajności koparki, które pojawiają się stosunkowo rzadko. Zapewni to równą strugę urobku na taśmie dobranej nie do wartości maksymalnych lecz do określonego poziomu wydajności (wybranego optymalnie percentyla wydajności) [19, 20]. Urobek z przekroczeń granicznej wydajności chwilowo znalazłby się w koszu by go opuścić, gdy wydajność koparki się zmniejszy. Optymalizować powinno się łącznie wydajność graniczną dla doboru prędkości i szerokości taśmy oraz pojemność kosza. Warto też przeprowadzić badania skuteczności pracy takiego kosza z wykorzystaniem symulacji DEM z odwzorowaniem właściwości urobku w różnych warunkach atmosferycznych [6, 36, 37]. Bez wprowadzenia takiego bufora przenośniki dużo więcej energii zużywają na wożenie ciężkiej, zbyt szerokiej i przez to bardzo kosztownej taśmy, która i tak bardziej zużywa się w części środkowej (Rys. 11).

Wydaje się, że należy ponownie zatrudnić matematyków do analizy danych [12-14], tym bardziej, że kopalnie dysponują nieporównywalnie większą ilością danych pomiarowych niż w latach sześćdziesiątych [12-14], a matematycy dysponują programami statystycznymi i komputerami do prowadzenia tego typu analiz. Jak widać dane z poboru energii, przeniesionej masy i czasu pracy przez kilka przenośników [1-3] pozwoliły na wszechstronną analizę danych, a kopalnie dysponują ogromną ilością danych o wydajnościach, lecz tylko czasami publikują wyniki [10]. W dobie przemysłu 4.0 należy w górnictwie w większym stopniu wykorzystać data mining. Wiele danych pomiarowych jest zbieranych i wiele prac zmierzających do zebrania tych danych jest już prowadzona. Teraz przychodzi czas by wykorzystać je w praktyce.



Rys. 11. Skumulowany rozkład uszkodzeń linek w rdzeniu na przekroju poprzecznym taśmy St na podstawie pomiarów magnetycznym systemem diagnostycznym DiagBelt w tle taśmy i przenośnika [4]

Fig. 11. Cumulative distribution of cable damage in the core on the cross-section of the St belt based on measurements with the DiagBelt magnetic diagnostic system on the background of the belt conveyor picture [4]

Dobór bardzo szerokiej taśmy mogącej przejąć maksymalne chwilowe wydajności, by potem zwalniać jej prędkość by zapewnić lepsze wypełnienie jej przekroju, gdy koparka z jakiś względów pracuje z mniejszą wydajnością wydaje się nieracjonalnym działaniem. Bufor i węższa taśma pozwala obniżyć udział mas ruchomych krążników i taśmy (składnik $m_k + 2m_t$ we wzorze 15) i lepsze jej wypełnienie nawet bez regulacji prędkości. Dobór szerokości taśmy do maksymalnych chwilowych wydajności powoduje wzrost udziału wagi krążników i taśmy w łącznej masie. Badania wydajności koparek pokazują, że stopień wykorzystania maksymalnych wydajności jest niewielki [17, 23, 27] i dlatego proponuje się spowolnienie jej ruchu (bo wydajności ekstremalne pojawiają się rzadko), co wcale nie jest dobre dla trwałości elementów i kosztów. Przy obniżonej prędkości taśmy marnotrawstwo biegu jałowego przenośnika się zwiększa, na co zwrócono uwagę przy omawianiu rysunku 4.

Warto przeprowadzić dokładniejsze analizy zmian $WskZE$ w funkcji v i Q , gdyż ich zmiany mają wpływ na dobór taśmy i konstrukcji trasy a więc i na masę części ruchomych ($m_k + 2m_t$) [9]. Ważne są też analizy statystyczne zmian chwilowych obciążeń przenośnika [17-20], by wyznaczyć jaka pojemność kosza zasypowego byłaby odpowiednia do przejścia ekstremalnych obciążeń chwilowych - przekroczeń wyznaczonego poziomu załadowania przenośnika odbierającego. Można wykorzystać tu teorię wartości ekstremalnych i statystyki przekroczeń zadanego poziomu POT (Peak Over Threshold) [20] oraz metody symulacji DEM z uwzględnieniem właściwości urobku [6, 36, 37]. Metodami symulacyjnymi można również rozstrzygnąć, czy budowa zbiorników w punkcie

nadawy i odbioru na nie jest lepszym rozwiązaniem, niż dublowanie ciągu przenośników, by zapewnić niezbędne odstawy, odpowiedni poziom niezawodności przy akceptowalnym poziomie kosztów inwestycyjnych i operacyjnych. Politechnika Wrocławska dysponuje odpowiednim oprogramowaniem i kadrami do prowadzenia tego typu analiz a są one niezbędne zanim podejmie się decyzje inwestycyjne o wyborze rodzaju transportu z odległych wyrobisk. Dużą rolę mogą tu odegrać badania energochłonności ciągów przenośników przy różnym stopniu wykorzystania możliwości transportowych, bo zwiększanie stopnia wykorzystania możliwości transportowych przy zapewnieniu stabilności strugi (a tą mogą zapewnić zbiorniki i kosze zasypowe przejmujące szczytowe wydajności chwilowe) wydaje się najlepszym rozwiązaniem.

Badania stanu rdzenia taśmy St pracującej na długim przenośniku węglowym prowadzone przez pracowników PWr dla kopalni Bogdanka [4] pokazują, że przy stabilnej strudze węgla i dbałości o taśmę, o jej żywotności mogą bardziej decydować procesy ścierania okładki, a nie degradacja rdzenia w miejscu nadawy. Badania te potwierdzają prognozy analiz wpływu długości przenośnika na trwałość taśmy [15, 22] i w konsekwencji na zmniejszenie kosztów inwestycyjnych i operacyjnych [16]. Do tego można dodać również niskie rachunki za energię, gdy zapewniamy pracę przenośnika z wydajnością nominalną [1-3] i możemy skorzystać z proponowanych tu rozwiązań. Energochłonność przenośników staje się aktualną, potrzebną, a nawet modną tematyką, którą zajmuje się coraz więcej autorów m.in. z Politechniki Wrocławskiej [26, 33]. Tematyka taśm energooszczędnych poruszona będzie w dalszych częściach cyklu.

Literatura

- [1] Bajda, M., Jurdziak, L., Konieczka, Z., 2018. *Porównanie zużycia energii elektrycznej przez przenośniki taśmowe w kopalniach węgla brunatnego*. Cz. 1, Badanie istotności statystycznej różnic i korelacji. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 5, 2018, s. 4-14, ISSN: 0043-2075

- [2] Bajda, M., Jurdziak, L., Konieczka, Z., 2019. *Porównanie zużycia energii elektrycznej przez przenośniki taśmowe w kopalniach węgla brunatnego. Cz. 2, Badanie istotności statystycznej różnic i korelacji.* Górnictwo Odkrywkowe nr 3, 2019
- [3] Bajda, M., Jurdziak, L., Konieczka, Z., 2019. *Porównanie zużycia energii elektrycznej przez przenośniki taśmowe w kopalniach węgla brunatnego. Cz. 3, Korekta prognozy jednostkowego zużycia energii o wpływ temperatury.* Górnictwo Odkrywkowe nr 4, 2019, s. 11-23
- [4] Błażej, R., Jurdziak, L., Kozłowski, T., Bajda, M., 2020. *Wykonanie badania rdzenia taśmy z linkami stalowymi za pomocą systemu automatycznej oceny stanu z opcją predykcji DIAGBELT w warunkach odstawy urobku węglowego.* Raport z badania taśmy St w jednej z kopalń węgla kamiennego w Polsce, Politechnika Wroclawska (raport niepublikowane)
- [5] DIN 22 101. *Norma Gurtförderer für Schüttgüter*
- [6] Doroszuk, B., Król, R., 2019. *Analysis of conveyor belt wear caused by material acceleration in transfer stations.* Mining Science 26:189–201, DOI: <https://doi.org/10.37190/msc192615>
- [7] Galetakis, M., Michalakopoulos, T., Bajcar, A., Roumpos, C., Lazăr, M., Svoboda, P. 2016. *Project Bewexmin: Bucket Wheel Excavators Operating under Difficult Mining Conditions Including Unmineable Inclusions and Geological Structures with Excessive Mining Resistance*
- [8] Gładysiewicz, L., Kawalec, W., 2006. *Optimised selection of a belt conveyor loaded by a BWE.* In: Proceedings of the 8th International Symposium of Continuous Surface Mining ISCSM, Aachen, pp. 353–357
- [9] Gładysiewicz, L., Kawalec, W., Król, R. 2016. *Selection of carry idlers spacing of belt conveyor taking into account random stream of transported bulk material.* Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2016; 18 (1): 32–37, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.1.5>
- [10] Gładysiewicz, L., Migdał, W., 2017. *Współczynniki energochłonności przenośników taśmowych.* Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, Nr 4, s.5-9
- [11] Gładysiewicz, L., „*Przenośniki taśmowe – teoria i obliczenia*”, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003
- [12] Gładysz, S., 1964. *Analiza statystyczna nieregularności rozkładu mas na taśmociągach i zwalówarkach obsługujących układ koparek i taśmociągów.* Prace Naukowe Instytutu Matematyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1964 (praca niepublikowana)
- [13] Gładysz, S., 1964. *Proces awarii układu technologicznego kopalń odkrywkowych.* Węgiel Brunatny, 1, 1964, s. 62÷74
- [14] Gładysz, S. *Wydajność systemu taśmociągów.* Węgiel Brunatny. 1965, nr 3, s. 199÷204
- [15] Jurdziak, L., 1988. *Określenie wpływu długości przenośnika na trwałość taśm przenośnikowych w kopalni podziemnej.* Prace Naukowe Instytutu Górnictwa P.Wr. Nr 50, Seria: Konferencje Nr 11, Podstawowe Problemy Transportu Kopalnianego, Wrocław
- [16] Jurdziak, L., 1999. *Wpływ zmian trwałości taśm na koszty eksploatacji przenośników.* Wiadomości Górnicze. Nr 10, s.424-431
- [17] Jurdziak, L., 2006. *Methodology of BWE efficiency analysis for power reduction of conveyor drives.* Proceedings of the 8th International Symposium Continuous Surface Mining, ISCSM 2006, Aachen, Mainz, 24th–27th September 2006, pp. 125–131
- [18] Jurdziak, L., 2006. *Reaktywacja modelu rozkładu urobku na taśmie przenośnika.* Mining Science 2006;VIII(1):99–109
- [19] Jurdziak, L., 2006. *Wykorzystanie teorii wartości ekstremalnych do wymiarowania przenośników współpracujących z koparkami kołowymi.* Transport przemysłowy, 3, 25, 2006, s. 38-43
- [20] Jurdziak, L., 2008. *Application of extreme value theory for joint dimensioning of BWEs and long distance belt conveyors in lignite mines.* In: International Conference on Bulk Europe 2008, Prague, Czech Republic, 11–12 September 2008. Vogel Industrie Medien, Würzburg
- [21] Jurdziak, L., 2019. *Analysis of Moving Averages of BWEs Actual Capacity.* Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 835. Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance, ISPEM 2019, Springer
- [22] Jurdziak, L., Bajda, M., Błażej, R., 2019. *Estimation of Purchase and Replacement Costs of Conveyor Belts and their Splices in an Underground Mine Based on their Durability, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 221*
- [23] Kasztelewicz, Z., 2004. *Analiza parametrów pracy krajowych kopalń węgla brunatnego.* Górnictwo Odkrywkowe 46(2), 21–32
- [24] Kasztelewicz, Z., Szymański, J., 2007. *Nowoczesne napędy węglowych przenośników taśmowych o regulowanej prędkości taśmy.* Górnictwo Odkrywkowe, Nr 5-6, 81-87
- [25] Kawalec, W., Kulinowski, P., 2007. *Obliczenia przenośników taśmowych,* T. Przem. 1(27), 2007
- [26] Kawalec, W., Woźniak, D., 2014. *Energy efficiency of the bottom cover of a conveyor belt – the first step to the new classification of belts.* Mining Science 2014;21(Special Issue 2):47–60
- [27] Kolovos, Ch., 2004. *Efficiency of a bucket wheel excavator lignite mining system.* Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ. 18(1), 21–29
- [28] Kulinowski, P. *Geneza zintegrowanego środowiska programowego QNK-TT.* <http://www.entertech.com.pl/articels>
- [29] Kulinowski, P., *Dobór mocy napędu i wytrzymałości taśmy przenośnika w warunkach pracy ustalonej.* www.kmg.agh.edu.pl

- [30] Matras E., Reizer R., Umiński W., 2007. *Optymalizacja pracy ciągu przenośników taśmowych*. Problemy eksploatacji, 1-2007, s.57-65
- [31] Matras, E., Reizer, R., Umiński W, 2006. *Zastosowanie nowoczesnych napędów w modernizacji maszyn*. <https://www.utrzymanieruchu.pl/zastosowanie-nowoczesnych-napedow-w-modernizacji-maszyn/> z dnia 1.10.2006 (ściągnięto 28.03.2020)
- [32] Nowak-Szpak, A., Strempsi, A., Bajcar, A., 2012. *The results of studies on mining process in example of excavator SchRs 4000.37.5*. Górnictwo Odkrywkowe, Nr 5-6
- [33] Suchorab, N., 2019. *Specific energy consumption – the comparison of belt conveyors*. Mining Science, vol. 26, 2019, 263–274
- [34] Szymański, J., 2009. *Przenośniki węglowe o regulowanej prędkości taśmy. aspekty techniczne i ekonomiczne*. Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 33, Zeszyt 2, 2009
- [35] Szymański, J., 2009. *Zagadnienia logistyczne i ekonomiczne transportu węgla brunatnego w kopalniach z zastosowaniem przenośników o regulowanej prędkości taśmy*. Logistyka 4/2009
- [36] *Using DEM to improve transfer chute design*. <https://rocky.esss.co/blog/using-dem-to-improve-transfer-chute-designs/>
- [37] Walker, P., Doroszuk, B., Król, R., 2018. *Wykorzystanie DEM do modelowania przepływu materiałów ziarnistych*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 3(4), s.2-8



Kopalnia Wapienia Miedzianka