

PORÓWNANIE ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ PRZENOŚNIKI TAŚMOWE W KOPALNI WĘGLA BRUNATNEGO. CZĘŚĆ 3. KOREKTA PROGNOZY JEDNOSTKOWEGO ZUŻYCIA ENERGII O WPŁYW TEMPERATURY

COMPARISON OF ELECTRICITY CONSUMPTION BY BELT CONVEYORS IN A BROWN COAL MINE. PART 3. CORRECTION OF THE FORECASTS OF THE UNIT ENERGY CONSUMPTION BY TEMPERATURE INFLUENCE

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

Trzeci artykuł z cyklu poświęconego analizie zużycia energii przez przenośniki węglowe w kopalni węgla brunatnego przedstawia wpływ średniej temperatury w kolejnych miesiącach na korektę prognozy poziomu jednostkowego zużycia energii prognozowanego na podstawie średniej wydajności przenośników. W poprzednim artykule pokazano, że różnice w zużyciu energii przez bliźniacze przenośniki wynikały jedynie z różnic w ich średnim obciążeniu w kolejnych miesiącach. Badania regresji jednostkowego wskaźnika zużycia energii względem średniej wydajności pokazały, że dane z obu przenośników tworzą jednorodną grupę danych, gdy rozpatruje się je z uwzględnieniem średniej wydajności. Dopasowana krzywa regresji dla danych z obu przenośników tylko nieznacznie odbiega od krzywych regresji dobranych indywidualnie. Badania reszt względem kolejności pomiarów pokazały, że reszty zachowują cykliczną regularność odpowiadającą kolejnym miesiącom. Dla letnich miesięcy różnice były dodatnie, a dla zimowych ujemne. Istotnym czynnikiem różnicującym opór toczenia taśmy po krążnikach (główny składnik oporów ruchu przenośnika) jest temperatura, co wykazały liczne badania w kraju i za granicą. W modelu regresji uwzględniono więc wpływ średnich warunków pogodowych panujących w kolejnych miesiącach prowadzenia badań. W tym celu obliczono różnice pomiędzy zarejestrowanymi pomiarami a prognozą i zbadano ich korelację z parametrami pogody, która panowała w badanym okresie. Okazało się, że najwyższą ujemną korelację ma temperatura T10, która była mierzona na poziomie 10 cm powyżej gruntu. Wykorzystano ją do modyfikacji modelu prognozy wskaźnika zużycia energii o składnik zależny od temperatury. Zaproponowano dwa warianty modyfikacji modelu o liniowy wpływ temperatury, które zapewniły wzrost współczynnika R^2 z poziomu 74% do ponad 84%. Modele te w kolejnej części zostaną wykorzystane do porównania zużycia energii na przenośniku z taśmą energooszczędną. Opracowanie przedstawionych tu modeli było konieczne, by interpretacja energooszczędności okładek taśmy nie była zaburzona wpływem obciążenia przenośnika i temperatury.

Słowa kluczowe: zużycie energii elektrycznej, przenośniki taśmowe, kopalnia węgla brunatnego

The third paper from the cycle devoted to the analysis of energy consumption by coal conveyors in a lignite mine presents the impact of average temperature in subsequent months on the correction of the forecast of the unit energy consumption based on the average efficiency of conveyors. A previous paper showed that the differences in energy consumption of twin conveyors were only due to differences in their average load in the following months. Regression testing of the unit index of energy consumption versus average efficiency showed that the data from both conveyors form a homogeneous group of data when considered with regard to average efficiency. The fitted regression curve for data from both conveyors is only slightly different from the individually selected regression curves. Examination of the residues against the order of measurements showed that the residues maintain cyclical regularity corresponding to subsequent months. For summer months the differences were positive and for winter negative. An important factor differentiating the rolling resistance of the belt (the main component of motion resistance of the conveyor belt) is temperature, which has been shown by numerous studies in the country and abroad. Therefore, the effect of average weather conditions prevailing in the following months of research was included in the regression model. For this purpose, the differences between the recorded measurements and the forecast were calculated and their correlation with the weather parameters that was prevailing in the examined period was examined. It turned out that the highest negative correlation has the temperature T10 (temperature measured 10 cm above the ground). It was used to modify the energy consumption forecast model with a temperature dependent component. Two variants of modification of the model with a linear temperature effect were proposed, which ensured the R^2 coefficient increased from 74% to over 84%. These models in the next part will be used to compare energy consumption on the conveyor with energy-saving belt. The development of the models presented here were necessary so that the interpretation of energy saving belt cover was not disturbed by the influence of the conveyor load and temperature influence.

Keywords: energy consumption, belt conveyors, brown coal mine

Wprowadzenie

W 5 numerze Górnictwa Odkrywkowego z 2018 roku ukazał się pierwszy artykuł z cyklu poświęconego porównaniu zużycia energii elektrycznej przez przenośniki taśmowe w jednej z kopalń węgla brunatnego [2]. Na podstawie wyników 4-letnich pomiarów danych o czasach pracy, przeniesionej masie węgla i zużytej energii przez bliźniacze przenośniki o długości ok. 1 km zbadano statystyczną istotność różnic i korelacji pomiędzy tymi parametrami. Okazało się, że zdefiniowany *jednostkowy wskaźnik energii zużytej na przeniesienie 1 Mg na odległość 1 km* po obliczeniach dla dwóch analizowanych, bliźniaczych przenośników A i B istotnie różni się dla nich. Przenośnik oznaczony literą A miał istotnie niższe zużycie energii niż przenośnik B. Jego średnie zużycie energii elektrycznej na przeniesienie 1 Mg węgla brunatnego wyniosło 288.573 Wh/Mg/km i było niższe niż dla przenośnika B o zużyciu 303.579 Wh/Mg/km. Różnice zużycia energii pomiędzy przenośnikami nie były duże. Średnie wartości różniły się o ok. 15 Wh/Mg/km, co stanowi ok. 5% wartości wskaźnika. Były jednak trwałe i występowały na wszystkich poziomach zużycia energii. Wykresy dystrybuant empirycznych były prawie równoległe przesunięte względem siebie, co z pozoru mogłoby sugerować różnice w oporach ruchu powodujące różnice w zużyciu energii (Rys. 1).

Drobna różnica w zużyciu energii wynosząca ok. 15 Wh/Mg/km z uwagi na dużą ilość transportowanych mas węgla (ponad 40 mln ton rocznie, z czego na pojedynczy przenośnik w ciągu przypadało od 11 do 16 mln Mg) i sporą odległość (ze Szczercowa nawet 27 km) w skali roku mogłyby się przekładać na bardzo duże różnice w sumarycznym zużyciu energii (w przedziale 4-7 GWh). Niepokojący był jednak fakt, że do analiz wybrano bliźniacze przenośniki o identycznej konstrukcji i zamontowanych na tych samych urządzeniach. Oba przenośniki pracowały też w identycznych warunkach. Skąd, zatem wzięły się te istotne statystycznie różnice we wskaźniku zużycia energii. Jedyne, czym różniły się one był sposób ich pracy. Oba przeniosły bowiem inne masy w poszczególnych miesiącach, średnio: 1.17 mil.Mg/mies. (A) i 0.97 mil.Mg/mies. (B). Oba miały też różną długość czasu pracy, średnio: 490.9 h/mies. (A) 419.8 h/mies. (B). Różniły się więc istotnie zarówno pod względem średniego zużycia energii: 334.96 Wh/mies. (A) i 291.54 Wh/mies. (B), jak i średniej wydajności: 2 370,56 Mg/h i 2 296,89 Mg/h (B). Właśnie ujemna korelacja

wskaźnika zużycia energii Wsk. ZE i osiągniętej wydajności Q, wynosząca: $R^2 = -0.84$ (A) i $R^2 = -0.85$ (B) była przedmiotem analiz w następnym artykule (Rys.2, [3]).

Korelacja wskaźnika zużycia energii Wsk. ZE i wydajności Q, choć nie była najsilniejsza (dla czasu i masy oraz zużytej energii oraz przeniesione masy o zużytej energii współczynniki determinacji były zdecydowanie wyższe, $R^2 \geq 0.95$), to jednak okazała się bardzo wysoka a wiązała ze sobą wszystkie badane parametry (czas, masę i energię). Powinno to pozwolić na wykorzystanie zidentyfikowanej zależności do prognozy zużycia energii i do sterowania jej zużyciem poprzez wpływanie na sposób obciążania przenośników, który jest pod kontrolą dyspozytora. Wpływ wzrostu wydajności przenośnika na spadek wskaźnika zużycia energii wydaje się bezsporny. Im więcej urobku jest na taśmie tym mniejsza część energii zużywana jest na ruch taśmy i wskaźnik maleje [17,18,19,20,21].

Dobry model regresji dla danych z obu przenośników A i B przedstawiony jest na rysunku 2.

$$\text{Wsk_ZE}(Q) = 1 / (0.000317691 + 0.00000131529 * Q) \quad (1)$$

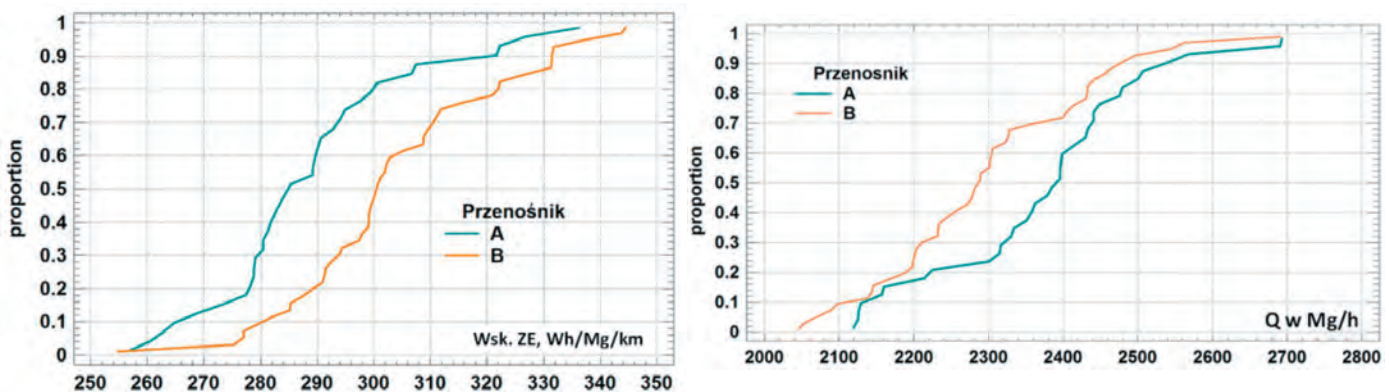
Nie odbiegał on znacząco od modelu dobranego dla danych z przenośnika A (2) i B (3).

$$\text{Wsk_ZEA} = 1 / (0.000551173 + 0.00000123477 * Q_A) \quad (2)$$

$$\text{Wsk_ZEB} = 1 / (0.000412267 + 0.00000126021 * Q_B) \quad (3)$$

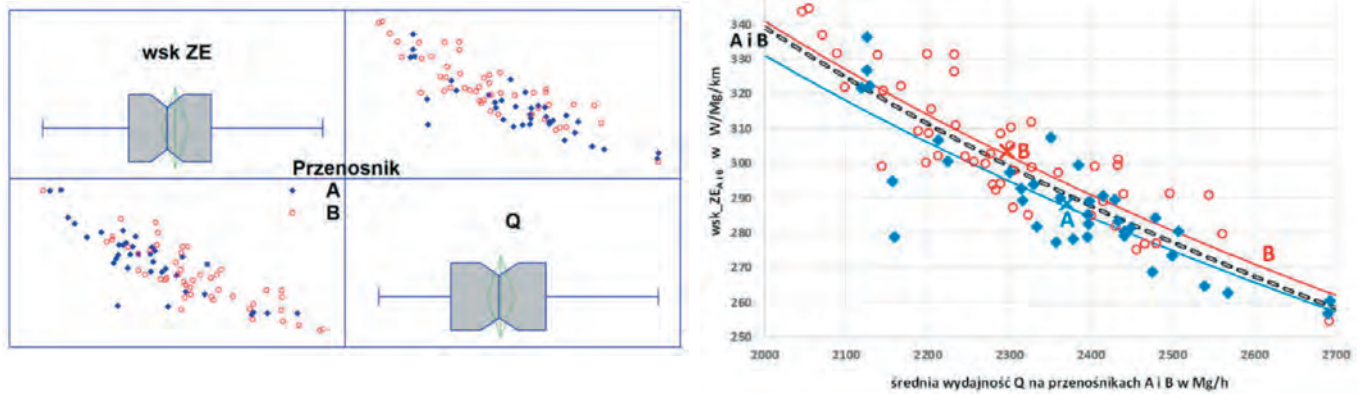
Oczywiście należy pamiętać, że nie można przy użyciu dobranego metodami statystycznymi modelu ekstrapolować wartości wskaźnika zużycia energii Wsk. ZE dla wydajności Q spoza obszaru zebranych danych Q (od 2046 Mg/h do 2693 Mg/h). Przykładowo dla $Q=0$ Wsk. ZE osiąga wartość 3,147 kWh/Mg według (1), choć wtedy przenośnik nie transportuje żadnej masy i Wsk. ZE powinien mieć wartość nieokreśloną (dążącą do nieskończoności). Dobry model nie ma uzasadnienia fizycznego, dlatego jego wykorzystanie jest ograniczone. Nie przedstawia zużycia energii przez przenośnik w zależności od masy taśmy i urobku, lecz zużycie energii niezbędnej do transportu urobku (węgla) na odległość 1 km (przenośnikiem o tej długości).

W pracy [3] stwierdzono, że zużycie energii zmniejsza się znacznie ze wzrostem wydajności przenośnika (stopniem wykorzystania wydajności teoretycznej). Dla obserwowanych miesięcznych wzrostów wydajności od ok 2000 Mg/h (31.3%



Rys. 1. Wykres skumulowanych dystrybuant empirycznych dla wskaźników zużycia energii Wsk. ZE (z lewej) oraz miesięcznych średnich wydajności Q dla przenośników A i B (z prawej)

Fig. 1. Graph of cumulative empirical distributions for the unit energy consumption indicators Wsk. ZE (left) and the monthly averages of capacity Q for conveyors A and B (right)



Rys. 2. Wykres macierzowy prezentujący graficznie wpływ miesięcznej średniej wydajności Q na wskaźnik jednostkowego zużycia energii wsk_ZE dla obu przenośników A i B. Dobrane modele prostej regresji wskaźnika zużycia energii przenośników A i B oraz łączenie dla obu przenośników względem średniej wydajności przenośników w poszczególnych miesiącach okresu analizy

Fig. 2. Selected models of simple regression of the energy consumption index for conveyors A and B and both of them in relation to the average capacity of conveyors in particular months of the analyzed period

wydajności teoretycznej Q_{teor}) do 2700 Mg/h (42,2% Q_{teor}) odnotowano spadki jednostkowego zużycia energii z poziomu 345 Wh/Mg/km do 255 Wh/Mg/km. Wzrost wydajności o ok. 11 punktów procentowych wydajności teoretycznej, co odpowiada 35% względnemu wzrostowi wydajności z poziomu 2000 Mg/h, spowodował spadek jednostkowego zużycia energii o 90 W/Mg/km, co odpowiada względnemu spadkowi tego wskaźnika o ok. 26%.

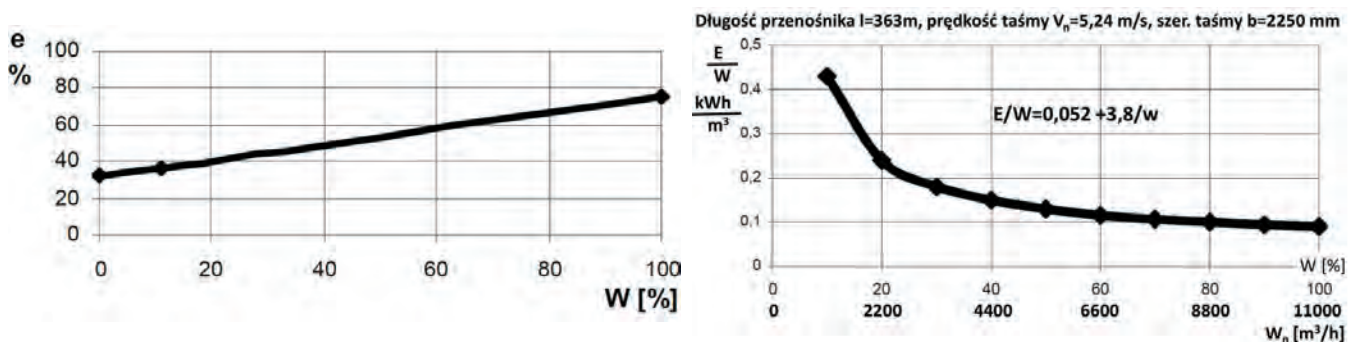
Widać więc, że odpowiednie zarządzanie obciążeniami poszczególnych ciągów może się przyczynić do znacznego obniżenia jednostkowego zużycia energii (rzędu 30%). Maksymalna wydajność nie przekraczała 42% wydajności teoretycznej. Można się więc zastanawiać, jakiego rzędu oszczędności można byłoby uzyskać zwiększając wykorzystanie przenośników jeszcze bardziej. Dla zaobserwowanych różnic w obciążeniu (od 2200 do 2700 Mg/h) różnice w zużyciu energii wynosiły ok. 80 Wh/Mg/km (od 340 do 260 Wh/Mg/km). Dla trasy ze Szczercowa liczącej ok. 27 km i 20 mln Mg węgla rocznie oszczędność energii z tytułu lepszego wykorzystania wydajności (tylko w zaobserwowanym zakresie zmian) mogłaby osiągnąć poziom 43 GWh/rok. Oszacowanie oszczędności z dalszego wzrostu wydajności wymaga budowy modelu teoretycznego zużycia energii i jego potwierdzenia praktycznego, również w zakresie możliwości zarządzania zmianami obciążeń ciągów. Tu różnice wydajności w poszczególnych miesiącach wydają się zupełnie przypadkowe.

Taki duży potencjał oszczędności energii wynika z malejącej proporcji ilości transportowanego urobku do masy taśmy, na której on leży, przy wzroście wykorzystania wydajności

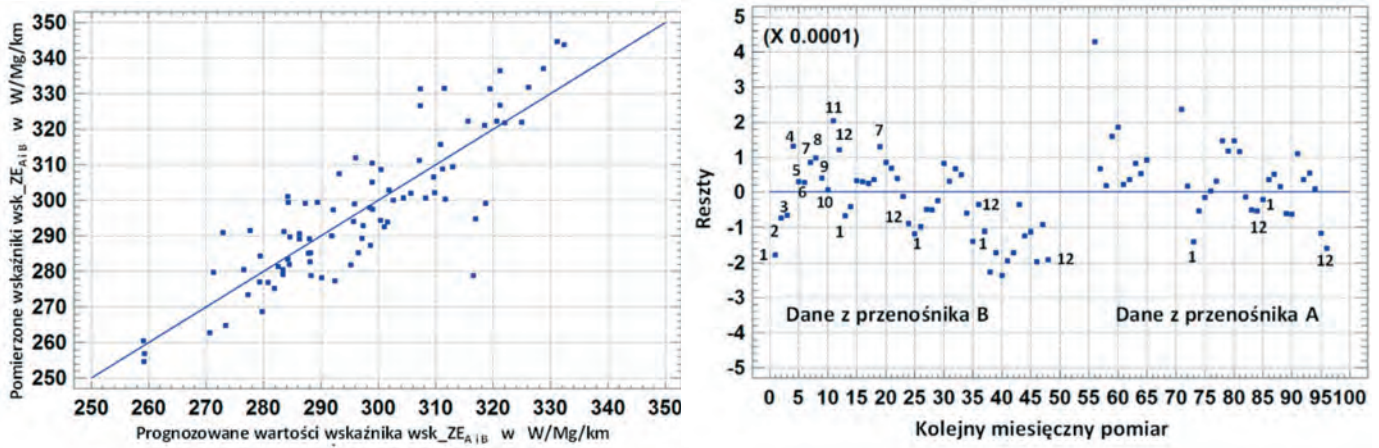
teoretycznej. W skrajnych przypadkach, gdy przenośnik pracuje bez urobku (bieg jałowy) to na pokonanie oporów ruchu samej taśmy przenośnik zużywa całkiem spore ilości energii w pracy jałowej (32% energii pobieranej w znamionowych warunkach pracy lub nawet 42% energii pobieranej przy znamionowej wydajności przenośnika (Rys.4, [6]). Właśnie przy pełnym wykorzystaniu wydajności przenośnika można oczekiwać najniższego jednostkowego zużycia energii. Przy biegu jałowym energia zużywana jest tylko do przeniesienia pustej taśmy i pokonania oporów ruchu jakie ona stwarza. Na szczęście dzięki odpowiednim procedurom uruchamiania ciągów w kopalni [15,23] okres pracy jałowej przenośników został zminimalizowany [22].

W pracy [3] zauważono, że reszty (różnice pomiędzy wartościami obliczonymi na podstawie dobrego modelu i pomiarami rzeczywistymi w kopalni) miały cykliczny charakter powiązany z czasem (numeracją kolejnych miesięcy w roku). Wpływ zmian temperatury może częściowo wyjaśniać ich rozrzut wokół przekątnej (Rys. 4, po lewej) oraz cykliczne zmiany. Reszty przyjmują wartości ujemne zazwyczaj dla miesięcy zimowych i wiosennych oraz dodatnie dla letnich i jesiennych (Rys. 4, po prawej).

Największy udział w oporach ruchu przenośnika ma opór wgniatania krążników w gumę okładki bieżnej (do 54% [4]). Zastosowanie taśm energooszczędnych z gumą o zmniejszonych oporach tocznienia pozwala zmniejszyć zapotrzebowanie na energię poprzez obniżenie tej składowej oporów ruchu. W następnym artykule omówione zostaną wyniki analiz wpływu zastosowania taśm energooszczędnych w kopalni. Nim to



Rys. 3. Charakterystyka energetyczna przenośnika o długości 363 m, szer. taśmy 2250 mm, prędkości 5,24 m/s i Q (lub W_n) znamionowej 11 000 m³/h (według [6])
Fig. 3. Energy characteristics of a conveyor with a length of 363 m, belt width 2250 mm, speed 5.24 m/s and Q (or W_n) rated 11,000 m³/h (according to [6])



Rys. 4. Porównanie wartości obliczonych z modelu (prognoz) i pomierzonych w rzeczywistości (po lewej) i rozkład reszt dla kolejnych miesięcy [3]
 Fig. 4. Comparison of values calculated from the model (forecasts) and measured in reality (observed) and the distribution of residuals for consecutive months for conveyor A and B [3]

nastąpi, model opisujący zmiany jednostkowego wskaźnika zużycia energii zostanie zmodyfikowany o wpływ temperatury. Zmiany temperatury mogą mieć istotny wpływ na właściwości dynamiczne gumy i poziom oporów ruchu przenośnika i dlatego model należy skorygować.

Wpływ temperatury na właściwości dynamiczne gumy – badania w skali laboratoryjnej

W celu identyfikacji wpływu właściwości mieszanek gumowych, z których wykonuje się okładki bieżne, na opory toczenia taśmy po krążnikach, a tym samym na energooszczędność taśmy, należy w pierwszej kolejności rozpoznać ich właściwości tłumiące. W tym celu należy wykonać badania laboratoryjne polegające na zidentyfikowaniu parametrów dynamicznych gumy: modułu sprężystości oraz współczynnika tłumienia. Obydwa współczynniki zależą od temperatury [1]. Badania należy wykonywać w zakresie temperatur zarówno dodatnich jak i ujemnych. Badania mieszanek gumowych wykonuje się na maszynie do badań dynamicznych. Próbkę okładki bieżnej w kształcie krążków o odpowiednich wymiarach należy obciążać cyklicznie z przerwami odwzorowując rzeczywiste parametry z jakimi mamy do czynienia na przenośniku uwzględniając prędkość taśmy, rozstaw zestawów krążeniowych, obciążenie zestawu [1].

W opracowanej przez Gładysiewicza [7,8] metodzie analitycznego wyznaczania oporu toczenia taśmy uwzględniono właściwości sprężyste oraz tłumienie taśmy poprzez wprowadzenie odpowiednich współczynników obliczeniowych:

- modułu sprężystości okładki bieżnej taśmy E_e , wyrażonego w N/m^2 ,
- współczynnika tłumienia okładki bieżnej taśmy Ψ_e , wyrażonego w %.

Uwzględniając pewną stałą, której wartość nie zależy od właściwości taśmy (ale od innych parametrów takich jak: obciążenie, geometria zgięcia taśmy na krążniku, średnicy krążnika, grubości okładki) Bajda [1] wprowadził współczynnik tłumienia gumy D_{gumy} w postaci ilorazu Ψ_e (współczynnik tłumienia okładki bieżnej) i E_e (moduł sprężystości gumy okładki bieżnej). Wartości liczbowe tych parametrów można wyznaczyć w badaniach laboratoryjnych, ściskając cyklicznie próbki gumy z odpowiednią częstotliwością i siłą. Rejestrowane jest odkształcenie gumy $\varepsilon(t)$ pod wpływem dostarczonego obciążenia $\sigma(t)$. Na podstawie pomiarów odkształcenia gumy i odpowiadającej

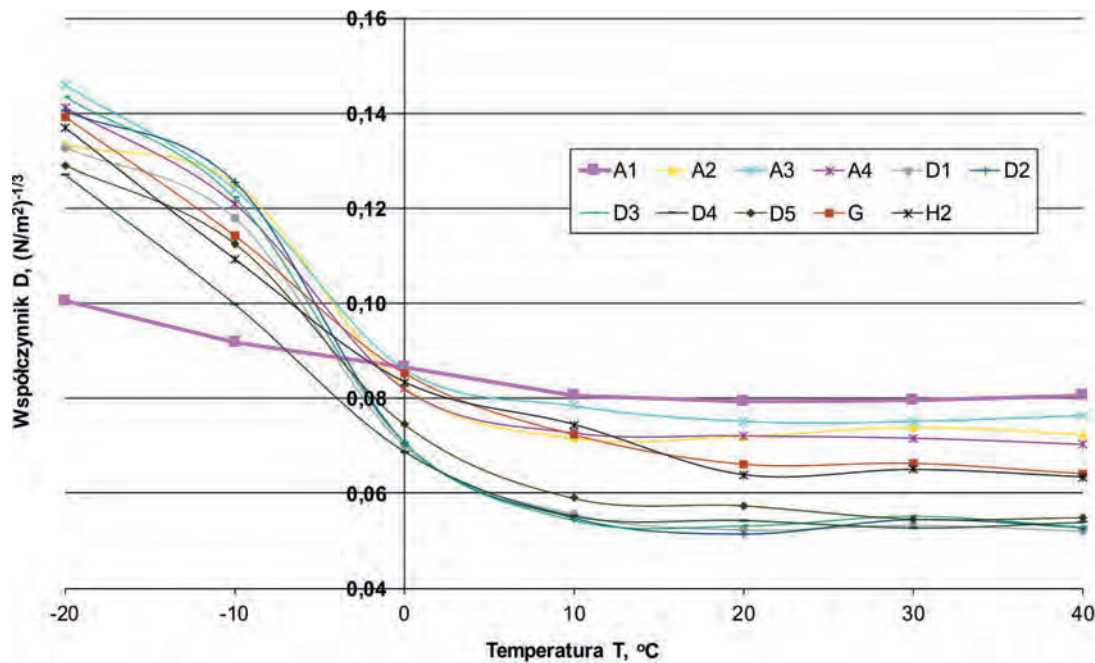
jej sile oddziaływania sporządzany jest wykres $\sigma = f(\varepsilon)$ zwany histerezą gumy. Współczynnik tłumienia wyznaczany jest jako iloraz pola powierzchni pętli histerezy (energia przemieniona) i pola powierzchni pod gałęzią obciążenia (energia deformacji taśmy). Równocześnie wyznaczany jest moduł sprężystości taśmy na podstawie kąta nachylenia histerezy [1,7].

$$D_{gumy} = \frac{\Psi_e}{\sqrt[3]{E_e}}, \quad (N/m^2)^{-1/3} \quad (4)$$

Współczynnik D_{gumy} (dalej D_g) opisuje właściwości dynamiczne gumy. W badaniach laboratoryjnych mieszanek gumowych wartość tego współczynnika powinna przyjmować jak najmniejsze wartości. Na rysunku 5 przedstawiono zmiany wartości współczynnika D_g w zależności od temperatury dla 10. analizowanych mieszanek gumowych. Badania wykonano w przedziale temperatur od -30 do $+40^\circ C$ co $10^\circ C$. W zakresie temperatur dodatnich wszystkie mieszanki mają niższy współczynnik niż mieszanka standardowa (porównawcza) oznaczona jako A1 (kolor filoletowy). Mieszanka ta jest powszechnie stosowana na okładki taśm w kopalniach węgla brunatnego. W temperaturach niższych (poniżej $-5^\circ C$) okazało się jednak, że mieszanka standardowa przyjmuje niższe wartości współczynnika D_g niż pozostałe. Dlatego do określenia właściwości dynamicznych mieszanek gumowych tak istotne jest pokazanie ich wrażliwości na zmiany temperatur, a nie określenie tej wartości tylko dla jednej temperatury.

Oczywiście, korzyści ze stosowania tej czy innej mieszanki można ocenić po określeniu wpływu właściwości dynamicznych na energochłonność przenośnika oraz rocznego rozkładu temperatur. Fakt, że w niskich temperaturach współczynniki D_g mieszanki A1 jest dużo niższy od pozostałych mieszanek (Tab.1) nie oznacza bezwzględnej wyższości w całym zakresie temperatur. Przykładowo w analizowanych w artykule wynikach pomiarów w kopalni Bełchatów nie odnotowano średniej miesięcznej temperatury poniżej zera, co pokazuje, że gorsze właściwości mieszanki A1 w temperaturach powyżej zera mogą istotnie wpływać na większą energochłonność taśm z takimi okładkami, a taka właśnie mieszanka jest powszechnie używana w kopalniach węgla brunatnego.

W tabeli 1 przedstawiono procentową zmianę przyrostów współczynnika D_g względem punktu odniesienia (wartości D_g w temperaturze $10^\circ C$, bliskiej średniej temperatury w ciągu roku w Polsce, wynoszącej ok. $7^\circ C$).



Rys. 5. Zmiany współczynnika D_g dla różnych mieszanek w zależności od temperatury [1]
 Fig. 5. Changes in the D_g factor for different mixtures depending on the temperature [1]

Im wyższa jest średnia wartość przyrostów, tym bardziej właściwości dynamiczne mieszanki są wrażliwe na zmiany temperatury. Na rysunku 6 przedstawiono graficznie przyrosty (znak „-”, oznacza spadki) współczynnika D_g w odniesieniu do temperatury 10°C dla dziesięciu mieszanek gumowych o najniższych wartościach współczynnika D_g .

Badane mieszanki charakteryzują się zróżnicowaną wrażliwością na zmiany temperatur. Najmniej wrażliwą jest mieszanka A1, natomiast mieszanki oznaczone symbolem D1, D2 i D3 są najbardziej wrażliwe na zmiany temperatur.

Badania dynamiczne gumowych okładek bieżnych taśm powinny stanowić pierwszy etap badań laboratoryjnych związanych z określeniem energooszczędności taśm. Wykonanie tych badań jest stosunkowo szybkie i istnieje możliwość zbadania bardzo dużej ilości mieszanek gumowych. Dopiero po wytypowaniu mieszanek gumowych o najlepszych parametrach

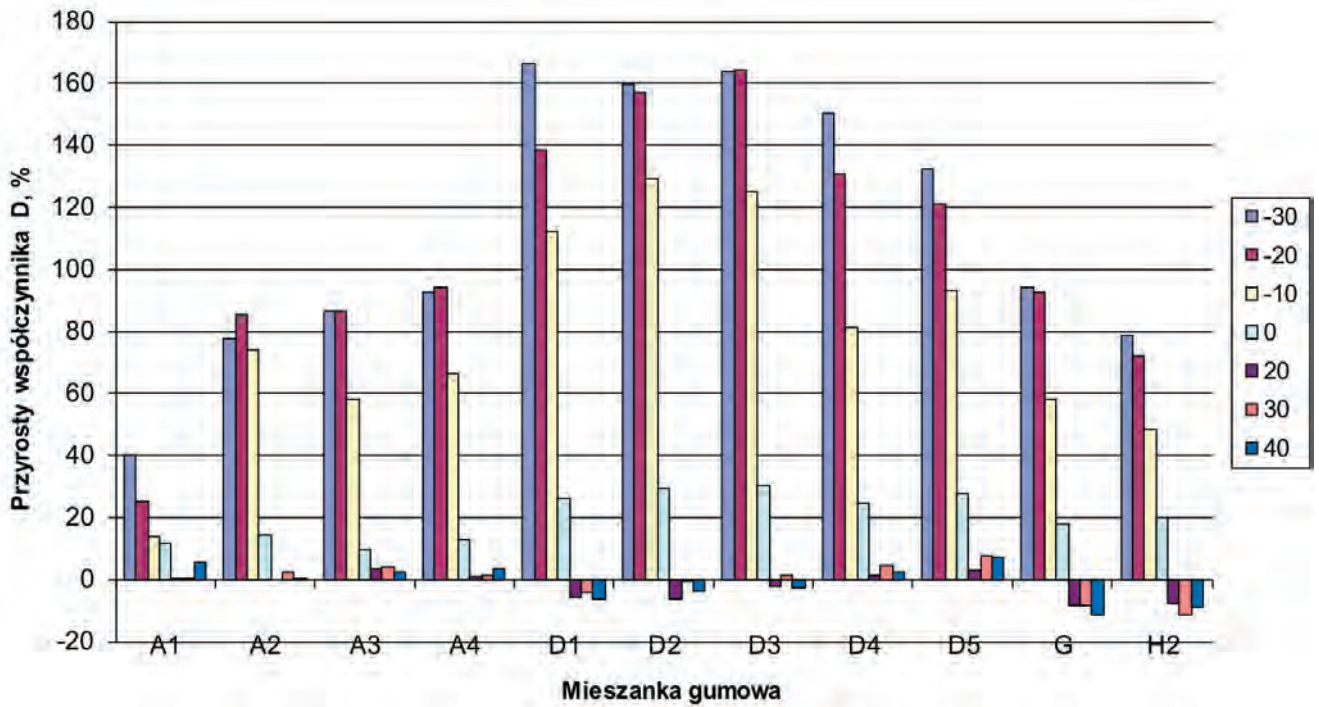
dynamicznych można przygotować taśmę energooszczędną do dalszych badań, tym razem w skali przemysłowej. Dlatego tak istotne są wyniki i analizy prezentowanych tu pomiarów zużycia energii przez przenośniki w warunkach ruchowych.

Podsumowanie badań mieszanek gumowych wykonanych w rozprawie doktorskiej jednego ze współautorów [1]:

1. Obniżenie temperatury wywiera negatywny wpływ na wartości oporów toczenia taśmy po krążnikach. Wraz ze spadkiem temperatury od 40°C do -30°C wzrasta moduł sprężystości przy ściskaniu, co powinno polepszać warunki toczenia taśmy po krążnikach, ale jednocześnie istotnie wzrasta współczynnik tłumienia okładki bieżnej. Ponieważ wartość D_g liniowo zależy od współczynnika tłumienia i wykładniczo z wykładnikiem -1/3 maleje ze wzrostem

Tab. 1. Procentowa zmiana przyrostów współczynnika D_g względem jego wartości w temperaturze 10°C
 Tab. 1. The percentage change in the increases of the D_g coefficient relative to its value at 10°C

Temp. °C Próbka	Procentowa zmiana przyrostów współczynnika D_g względem jego wartości w temp. 10°C							$\frac{\sum \Delta_i }{7}$, %
	-30	-20	-10	0	20	30	40	
A1	40,04	24,99	13,99	11,64	0,36	0,13	5,41	13,79
A2	77,75	85,54	74,27	14,46	0,00	2,64	0,56	36,46
A3	86,37	86,21	58,05	9,85	3,62	4,18	2,57	35,83
A4	92,88	94,15	66,18	12,68	0,81	1,49	3,23	38,78
D1	166,37	138,67	112,05	25,90	-5,94	-4,32	-6,47	65,67
D2	159,6	156,86	129,43	29,07	-6,22	-0,55	-3,66	69,34
D3	163,90	164,27	124,86	30,20	-2,21	1,47	-2,58	69,93
D4	150,11	130,63	81,08	24,69	1,62	4,53	2,38	56,44
D5	132,21	121,19	92,97	27,72	2,69	7,43	6,92	55,88
G	94,04	92,80	58,03	-8,59	-8,59	-8,31	-11,36	41,59
H2	78,55	72,16	48,46	19,78	-8,12	-11,63	-9,15	35,41



Rys. 6. Przyrosty współczynnika D_g w odniesieniu do jego wartości w 10°C
 Fig. 6. Increments of the D_g coefficient in relation to its value in 10°C

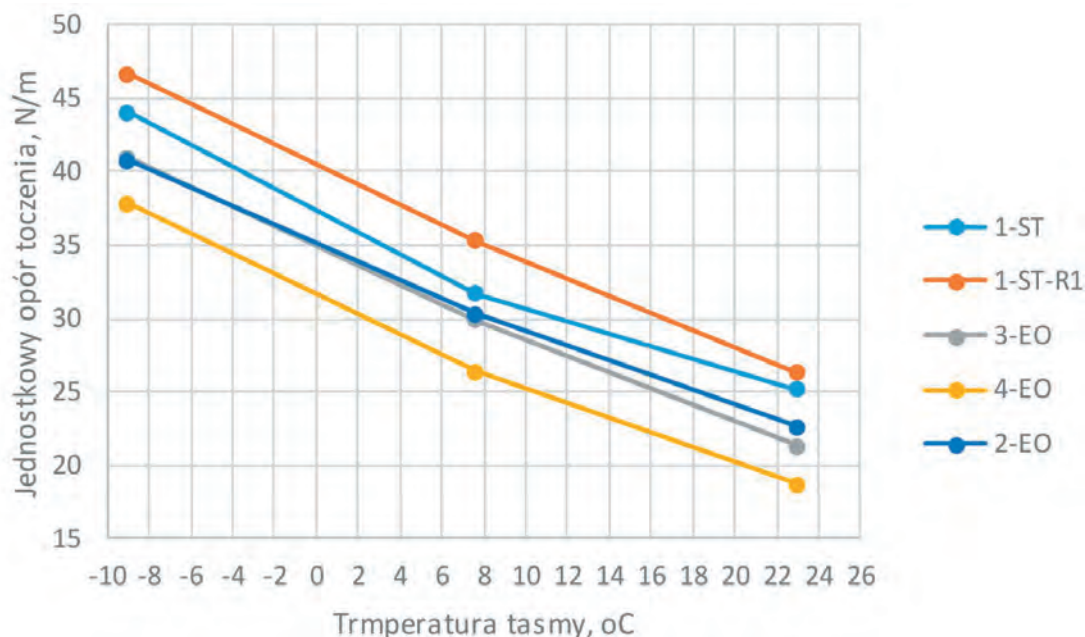
modułu sprężystości taśmy (równanie 4), to w efekcie, wraz ze spadkiem temperatury wyraźnie wzrasta wartość współczynnika D_g .

2. Wraz ze spadkiem temperatury od $+40^\circ\text{C}$ do -30°C , na skutek zmian właściwości dynamicznych gumy, wzrasta wartość współczynnika D_g , przy czym wzrost tego współczynnika przy spadku temperatury do 0°C jest niewielki. W temperaturach ujemnych następuje istotny wzrost jego wartości co także powoduje wzrost wartości oporu toczenia taśmy po krążnikach, a to już bezpośrednio wpływa na zużycia energii elektrycznej przez napęd przenośnika znacznie zwiększając jej zapotrzebowanie.

3. Ze względu na istotny wpływ zmiany temperatury na opory toczenia taśmy po krążnikach, przy doborze mieszanki gumowej na okładkę bieżną taśmy powinno uwzględniać się warunki temperaturowe, w jakich przenośnik będzie pracował.

Wpływ temperatury na taśmę, badania oporów toczenia taśmy – badania w skali półprzemysłowej

Aby wyznaczyć wartości oporów toczenia taśmy po krążnikach na Politechnice Wrocławskiej skonstruowano specjalne stanowisko badawcze [1]. Na tym stanowisku odwzorowano zjawisko toczenia się krążnika po taśmie. Mając na względzie



Rys. 7. Zmiany jednostkowego oporu toczenia w zależności od temperatury
 Fig. 7. Temperature - dependent changes in unit rolling resistance

Tab. 2. Podsumowanie wyników badań oporów toczenia w zależności od temperatury dla nacisku jednostkowego 2,3 kN/m, odpowiadającemu średniorocznemu obciążeniu przenośnika taśmowego w polskich kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego

Symbol taśmy	Temperatura °C	Jednostkowy opór toczenia taśmy po krążnikach przy nacisku jednostkowym krążnika 2,3kN/m, N/m	Średni jednostkowy opór toczenia taśmy po krążnikach N/m	Spadek oporów toczenia taśmy po krążnikach w odniesieniu do taśmy 1-ST	
				N/m	%
1-ST	-9,0	44,00	33,6	0	0
	7,6	31,68			
	23,0	25,17			
1-ST-R1	-9,0	46,60	36,0	-2,4	-7,1
	7,6	35,28			
	23,0	26,27			
2-EO	-9,0	40,75	31,2	2,4	7,1
	7,6	30,31			
	23,0	22,59			
3-EO	-9,0	40,90	30,7	2,9	8,9
	7,6	29,87			
	23,0	21,31			
4-EO	-9,0	37,80	27,6	6,0	17,8
	7,6	26,34			
	23,0	18,72			

zależność oporów toczenia od obciążenia, krążnik zastąpiono wózkiem składającym się z dwóch krążników i ramy, który można dodatkowo dociążyć. Znając dokładne wartości obciążenia, prędkości początkowej wózka, opory obracania krążnika oraz jego moment bezwładności oraz opór związany z pokonywaniem przez wózek wysokości (ponieważ część pomiarowa stanowiska jest umieszczona pod kątem 4,98°) można dokonać obliczeń wartości jednostkowych oporów toczenia się krążnika po taśmie [1].

W badaniach porównano opory toczenia taśm standardowych, które pracują na przenośnikach taśmowych w kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego, z taśmami energooszczędnymi, to jest takimi, których okładki bieżne charakteryzują się niższymi wartościami współczynnika D_g . Na rysunku 7 przedstawiono zależność oporów toczenia w funkcji temperatury, przy nacisku jednostkowym 2.3 kN/m dla pięciu przykładowych taśm: standardowej (1-St), standardowej po pierwszej regeneracji (1-St-R1) i trzech energooszczędnych (2-EO, 3-EO i 4-EO).

Z rysunku odczytano wartości oporów toczenia przy jednakowej temperaturze dla wszystkich taśm wynoszącej -9°C, 7.6°C i 23°C. Na ich podstawie sporządzono tabelę 2, w której zamieszczono obliczone średnie opory toczenia oraz wielkość spadków oporów toczenia w odniesieniu do taśmy 1-ST jako reprezentanta taśm standardowych w zwykłym wykonaniu.

Taśma 2-EO w porównaniu do taśmy standardowej 1-ST, cechuje się mniejszym o 7,1% oporem toczenia po krążnikach, a taśma 3-EO ma opór mniejszy o 8,6%. Taśma 4-EO ma opór mniejszy aż o 17,8%. Taśma ta ma najniższy opór z wszystkich przebadanych taśm (linia żółta, położona jest najniżej). Taśma standardowa po regeneracji (1-ST-R1) ma większy opór toczenia po krążnikach o 7,1% (linia pomarańczowa leżąca powyżej innych). Jak widać regeneracja zwiększa te opory.

Przeprowadzone badania wykazały, że możliwe jest stosowanie taśm z linkami stalowymi produkcji krajowej, które

cechują się mniejszymi oporami toczenia po krążnikach nawet o kilkanaście procent w porównaniu do taśm zwykłych, czego dowodzą badania taśmy energooszczędnej 4-EO. Do regeneracji taśm powinno się stosować materiały ulepszone poprzez zastosowanie gumy okładkowej energooszczędnej.

W prowadzonej w tym artykule analizie nie badamy wprawdzie wpływu zastosowania taśm energooszczędnych, gdyż będzie to przedmiotem następnej publikacji. Niemniej niezależnie od rodzaju okładek wpływ temperatury na opór toczenia taśmy po krążnikach, czy właściwości dynamicznej gumy jest bezsporny. Dlatego trudno pominąć ten wpływ w modelu zmian jednostkowego zużycia energii (Wsk. ZE), skoro w różnych miesiącach w ciągu roku temperatura ta istotnie się zmieniała. Jej zmiany mogły wpływać na rozproszenie wyników prognozy i cykliczne zmiany reszt. Jak widać (Rys.7) opory toczenia się taśm po krążnikach zmieniają się właściwie liniowo, dlatego taka korekta modelu zostanie wprowadzona. Jak się okaże współczynnik determinacji poprawiony zostanie o ok. 10 punktów procentowych. Dzięki tej modyfikacji R^2 wzrośnie z ok. 74% do poziomu 84%.

Wpływ temperatury otoczenia na opory ruchu przenośnika, w tym właściwości dynamiczne gumy okładkowej oraz opory toczenia taśmy po krążnikach (wgniatania) potwierdziły też inne liczne badania krajowe [13,26,28] i zagraniczne [5,9,10,11,12,14,16,24,25]. Liniowość jego wpływu w zakresie zmian średniej temperatury (od 0 do 24 °C) wydaje się dobrym przybliżeniem.

Modyfikacje modelu prognozy zmian jednostkowego wskaźnika zużycia energii o liniowy wpływ temperatury

Jak przedstawiono w pracy [3] w przypadku danych z obu przenośników A i B model hiperboliczny (odwrócony model liniowy, $Y=1/(a+b*X)$) okazał się trzecim najlepszym po modelu hiperbolicznym z logarytmem i hiperbolicznym

Tab. 3. Estymowane wyniki
Tab. 3. Estimated results

		Asymptotyczny	Asymptotyczny	95.0%
		Standardowy Błąd	Przedział	Ufności
Parametry	Oszacowania		Dolna granica	Górna granica
c	-0.795719174	0.1432473654	-1.082460497	-0.508977851
a	0.00024399378	0.0000187889092	0.000206383618	0.000281603943

Tab. 4. Analiza wariancji
Tab. 4. Analysis of variance

Źródło	Suma kwadratów	D_f	Średnie kwadraty
Model	5372137.102	2	2686068.551
Reszty	3575.180954	58	61.64105092
Razem	5375712.283	60	
Razem (Corr.)	22936.58249	59	

$R^2 = 84.4128\%$

R^2 (dopasowany do d.f.) = 84.144 %

Standardowy błąd est. = 7.8512

Średni błąd absolutny = 5.411

Statystyka Durбина-Watsona = 1.55555

Autokorelacja pierwszego rzędu = 0.190491

z pierwiastkiem. Współczynnik korelacji wyniósł $R=0.86312$, a wskaźnik $R^2=74.49761\%$. Równanie regresji (1) wyjaśnia 74.4976 % zmienności wskaźnika zużycia energii (Wsk.ZE) przez przenośniki. Poziom współczynnika korelacji (ponad 0.86) wskazuje na umiarkowanie silną zależność między zmiennymi. Odchylenie standardowe reszt, czyli średni standardowy błąd estymacji wyniósł 0.000114476.

Korektę modelu hiperbolicznego ($wsk.ZE(Q)=1/(a+bQ)$) wprowadzono na dwa sposoby. W pierwszym do estymowanych wartości dodano składnik liniowo zależny od temperatury (T10):

$$wsk.ZE(Q,T10)=1/(a+bQ)+cT10 \quad (5)$$

a w drugim przypadku składnik ten umieszczono w liczniku:

$$wsk.ZE(Q,T10)=(1-cT10)/(a+b*Q) = 1/(a+bQ) - cT10/(a+bQ) \quad (6)$$

Ponieważ wartość estymowanego współczynnika a (w równaniu liniowym $a + bQ$) nie była określona precyzyjnie (nie była istotna statystycznie, gdyż wartość $P=0.1129$ była wyższa od 0.05) modele wzbogacono o dobranie tego współczynnika metodami statystycznymi w analizie nieliniowej przy pozostawieniu wartości b na tym samym poziomie co w modelu (1).

W pierwszej wersji skorygowanego modelu równanie regresji przyjęło poniższą formę:

$$wsk.ZE(Q,T10) = 1/(0.0002439937805 + 0.000001315294469*Q) - 0.795719174*T10 \quad (7)$$

Statystyka R^2 pokazuje, że dopasowany model wyjaśnia 84.41276 % zmienności wsk.ZE (o niecałe 10 punktów procentowych więcej niż dla modelu poprzedniego). Skorygowany R^2 (statystyka, która jest bardziej odpowiednia do porównywania modeli z różną liczbą zmiennych niezależnych) wyniósł 84,144%. Standardowy błąd oszacowania pokazuje odchylenie standardowe reszt wynoszące 7,85118. Ta wartość może być

Tab. 5. Analiza reszt
Tab. 5. Residual analysis

	Oszacowanie
N	60
MSE	61.64105092
MAE	5.410993133
MAPE	1.829441191
ME	0.09228319584
MPE	-0.0172280475

Tab. 6. Nietypowe reszty dla wsk.ZE

Tab. 6. Unusual residues for wsk.ZE

	Prognoza		Studentyzowana	
Rząd	Y	Y	Reszta	Reszta
11	299.14	319.318	-20.1785	-2.74
12	300.28	315.495	-15.2155	-2.02
56	278.76	308.369	-29.6094	-4.44
60	277.36	295.455	-18.0949	-2.43

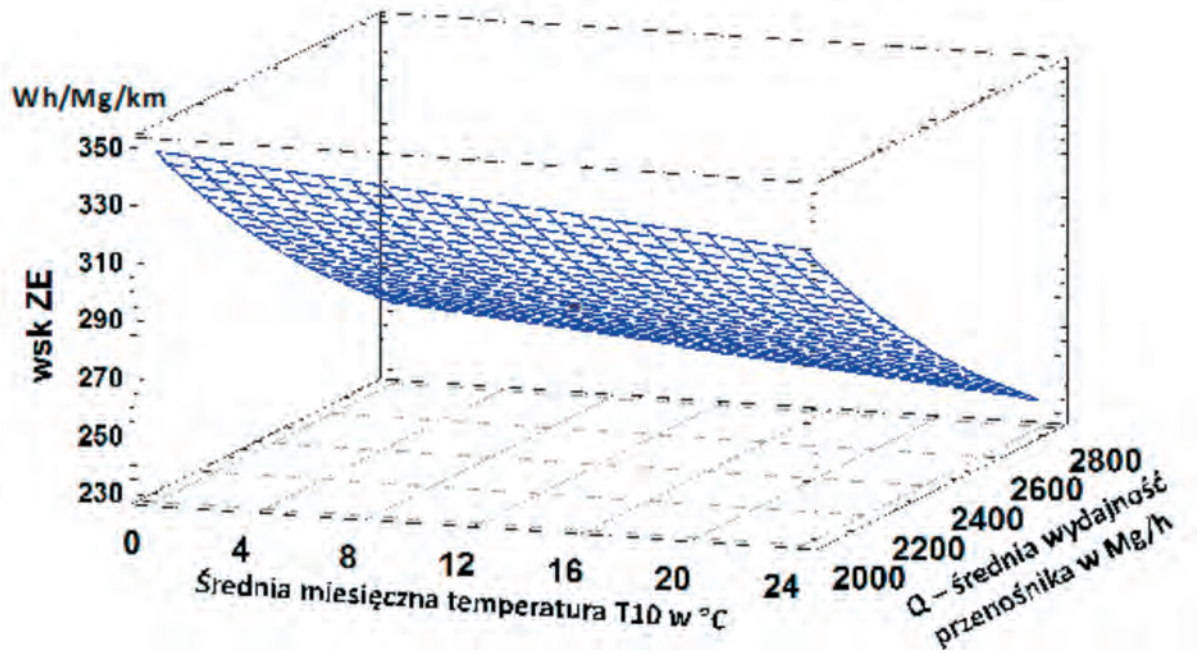
używana do konstruowania limitów predykcji dla nowych obserwacji. Średni błąd bezwzględny (MAE) wynoszący 5,41099 jest średnią wartością reszt. Statystyka Durбина-Watsona (DW) testuje reszty w celu ustalenia, czy istnieje jakakolwiek istotna korelacja oparta na ich kolejności, w jakiej występują w pliku danych. Ponieważ jej wartość jest bliska 2 nie ma podstaw do twierdzenia, że ich rozkład nie jest losowy. Poprzednio wartość tej statystyki wynosiła ok. 1, a wartość P była bliska 0, co wskazywało na istnienie nielosowej składowej, która nie została usunięta przez model. Wartość autokorelacji pierwszego rzędu wynosząca 0.19 też jest niższa niż poprzednio (0,47).

Dane wyjściowe pokazują również asymptotyczne 95% przedziały ufności dla każdego z nieznanymi parametrów. Można ustalić, czy oszacowanie jest statystycznie istotne, badając czy zawierają one zero. Przedziały je zawierające odpowiadają współczynnikom, które można usunąć z równania modelu bez znacznego pogorszenia dopasowania. Jak widać, żaden z nich zer nie zawiera i dlatego oba estymowane parametry są istotne.

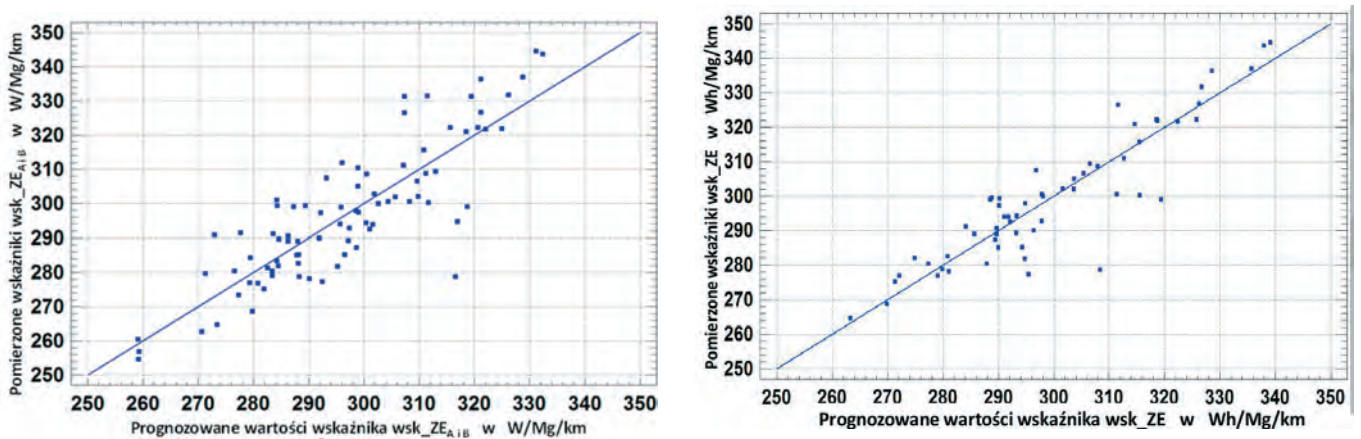
Wyniki testów nieliniowej regresji przeprowadzonych w programie Stagraphics Centurion XVIII zawarte są w tabelach 3-5.

Na rysunku 8 przedstawiono powierzchnię reprezentującą oszacowane wartości jednostkowego wskaźnika zużycia energii wsk.ZE w zależności od zmian średniej wydajności przenośnika Q i średniej miesięcznej temperatury T10 (7). Można zauważyć, że wskaźnik maleje ze wzrostem wydajności oraz temperatury.

Wpływ temperatury, zgodnie z przyjętym modelem estymacji (5) jest liniowy i w zakresie zmian od 0 do 24 stopni Celsjusza obniża wartość wskaźnika wsk.ZE o 19 Wh/Mg/km. Na każdy stopień wzrostu temperatury energochłonność spada o ok 0.8 Wh/Mg/km.



Rys. 8. Estymowane zmiany jednostkowego wskaźnika zużycia energii wskZE w zależności od zmian wydajności i temperatury dla modelu 7
 Fig. 8. Estimated changes in the specific energy consumption index of wskZE according to capacity and temperature changes for model 7



Rys. 9. Estymowane zmiany jednostkowego wskaźnika zużycia energii wskZE w zależności od zmian wydajności Q i temperatury T10
 Fig. 9. Estimated changes in the specific energy consumption index of wskZE depending on changes in capacity Q and temperature T10

Tab. 7. Estymowane wyniki
 Tab. 7. Estimated results

				95.0%
				Ufności
Parametry	Oszacowania	Asymptotyczny Standardowy Błąd	Przedział Dolna granica	Górna granica
C	-0.00273524195	0.000461258142	-0.00365855226	-0.00181193163
A	0.753561896	0.059362679	0.634734349	0.872389444

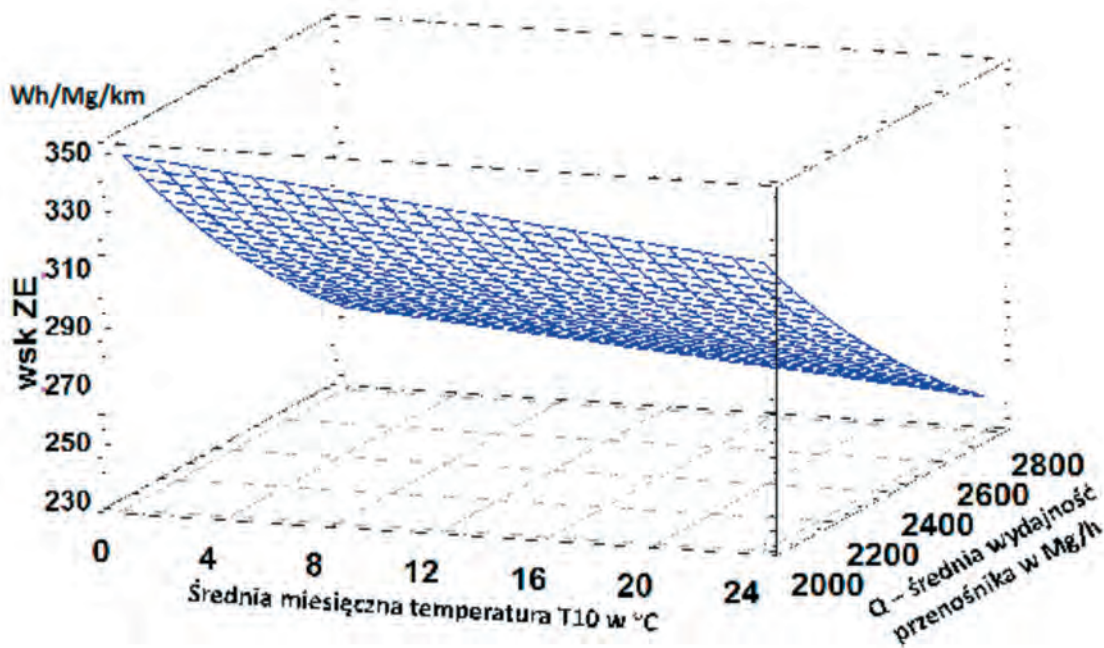
Tab. 8. Analiza wariancji
 Tab. 8. Analysis of variance

Źródło	Suma kwadratów	D_f	Średnie kwadraty
Model	5372231.15	2	2686115.57
Reszty	3481.13479	58	60.0195654
Razem	5375712.28	60	
Razem (Corr.)	22936.5825	59	

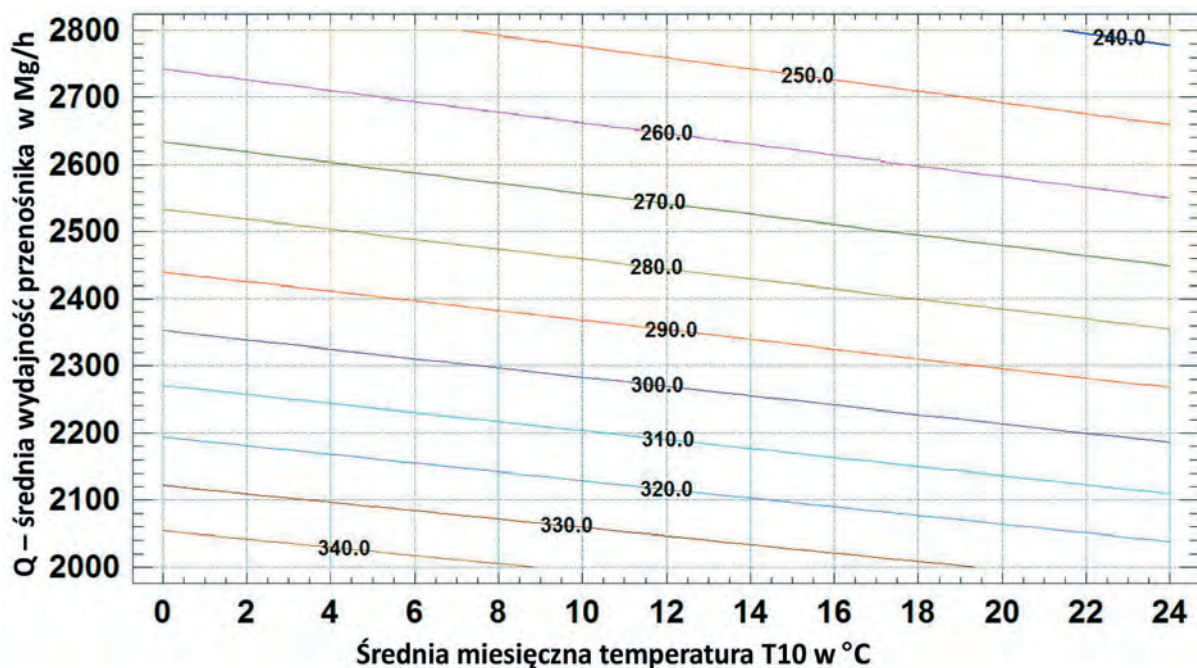
Tab. 9. Analiza reszt
 Tab. 9. Residual analysis

	Oszacowanie
N	60
MSE	60.0195654
MAE	5.41475241
MAPE	1.8275146
ME	0.054111755
MPE	-0.0346929233

$R^2 = 84.823\%$
 R^2 (dopasowany do d.f.) = 84.561%
 Standardowy błąd est. = 7.747
 Średni błąd absolutny = 5.415
 Statystyka Durbina-Watsona = 1.527
 Autokorelacja pierwszego rzędu = 0.206



Rys. 10. Estymowane zmiany jednostkowego wskaźnika zużycia energii wskZE w zależności od zmian wydajności i temperatury dla modelu 8
 Fig. 10. Estimated changes in the specific energy consumption index of wskZE according to capacity and temperature changes for model 8



Rys. 11. Wykres poziomicowy zmian wsk.ZE w funkcji Wydajności Q i temperatury T10
 Fig. 11. Contour chart of changes in the wsk.ZE in the function of Performance Q and temperature T10

Zestawienie prognoz i pomiarów (Rys. 9) dla modelu bez uwzględnienia i z uwzględnieniem wpływu temperatury pokazuje, że rozrzut wokół przekątnej jest istotnie mniejszy po uwzględnieniu wpływu temperatury. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że nie dla wszystkich miesięcy dysponowano temperaturą T10. W pierwszym modelu analizowano 84 pomiarów, w drugim jedynie 60, co wizualnie zmniejszyło rozproszenie wyników. Niezależnie od tego widać jednak znacznie więcej punktów na i tuż obok przekątnej, co potwierdza lepsze dopasowania modelu do realnych pomiarów zużycia energii przez przenośniki po uwzględnieniu wpływu temperatury. Wzrost wskaźnika R² o ok.10 punktów procentowych potwierdzony jest też wizualnie.

Kilka odstających punktów (Tab. 6) (zwłaszcza punkt 56

o wartości bezwzględnej studentyzowanej reszty większej niż 3) wymagają dokładniejszej weryfikacji w źródłach.

Druga wersja korekty dała nieco lepsze dopasowanie modelu do danych. Współczynnik R² osiągnął wartość 84.823 i był o 0.4 wyższy niż poprzednio. Równanie regresji przyjęło formę:

$$\text{wsk. ZE} = (1 - 0.002735242 \cdot T10) / (0.000239399498 + 0.00000131529447 \cdot Q) \quad (8)$$

Statystyka R² pokazuje, że dopasowany model wyjaśnia 84.823 % zmienności wsk.ZE (o 10 punktów procentowych więcej niż dla modelu poprzedniego). Skorygowany R² (statystyka, która jest bardziej odpowiednia do porównywania mo-

Tab. 10 Nietypowe reszty dla wsk.ZE
Tab. 10. Unusual residues for wsk.ZE

Rząd	Prognoza		Studentyzowana	
	Y	Y	Reszta	Reszta
11	299.14	318.935	-19.7949	-2.72
12	300.28	315.622	-15.3422	-2.07
56	278.76	307.022	-28.2623	-4.27
60	277.36	295.765	-18.4051	-2.51

deli z różną liczbą zmiennych niezależnych) wyniósł 84,56%. Standardowy błąd oszacowania pokazuje odchylenie standardowe reszt wynoszące 7,747. Ta wartość może być używana do konstruowania limitów predykcji dla nowych obserwacji. Średni błąd bezwzględny (MAE) wynoszący 5,414 jest średnią wartością reszt. Statystyka Durбина-Watsona (DW=1.527) jest bliska wartości 2, więc nie ma podstaw do twierdzenia, że rozkład reszt nie jest losowy. Wartość autokorelacji pierwszego rzędu wyniosła 0.206.

Asymptotyczne 95% przedziały ufności dla każdego z nieznanymi parametrów modelu nie zawierają zera.

Wyniki testów nieliniowej regresji zawarte są w tabelach 7-9.

Na rysunku 10 przedstawiono powierzchnię reprezentującą oszacowane wartości jednostkowego wskaźnika zużycia energii wskZE w zależności od zmian średniej wydajności przenośnika Q i średniej miesięcznej temperatury T10 dla modelu (8). Można zauważyć, że wskaźnik maleje ze wzrostem wydajności oraz temperatury, podobnie jak poprzednio. Wpływ temperatury nie jest jednak już liniowy. Widać to po ukośnym przebiegu poziomic dla wsk.ZE (rys. 11). Najniższą wartość jednostkowego wskaźnika zużycia energii wsk.ZE (ok. 240 Wh/Mg/h) można osiągnąć na analizowanych przenośnikach dla wydajności 2800 Mg/h (43.75% Q_{teor}) w temperaturze przekraczającej 21.5°C. Najwyższą energochłonność ma transport urobku z wydajnością poniżej 2075 Mg/h (32.4 % Q_{teor}) w temperaturze poniżej 9°C.

Wnioski

Opracowane wcześniej modele hiperboliczne prognozy jednostkowego zużycia energii w funkcji średniego, miesięcznego obciążenia przenośników ($wsk.ZE(Q)=1/(a+bQ)$) został skorygowane poprzez uwzględnienie wpływu temperatury.

Temperatura ma bowiem istotny wpływ na właściwości dynamiczne gumy oraz na opory toczenia, a te przekładają się na zmiany zużycia energii przez napędy przenośników.

Korektę przeprowadzono dodając składnik liniowo zależny

od temperatury jako samodzielny element w modelu hiperbolicznym ($wsk.ZE(Q,T)=1/(a+bQ)+cT$) oraz modyfikując licznik w tym modelu ($wsk.ZE(Q,T)=(1-cT)/(a+b*Q)$).

Obie modyfikacje zapewniły wzrost wskaźnika R^2 o ok. 10 punktów procentowych z poziomu 74% aż do 84%. Zredukowano w ten sposób nieokreśloność zmienności modelu z poziomu 26% do 16%. W przypadku pomiarów przemysłowych jest to istotna poprawa możliwości prognozy rzeczywistych zmian. Wprawdzie nie można ekstrapolować uzyskanych rezultatów poza obszar zebranych danych. Modele zostały bowiem dobrane metodami statystycznymi i nie mają oparcia w fizycznych procesach pokonywania oporów ruchu przenośnika. Niemniej nawet dla zarejestrowanych różnic w średnich obciążeniach przenośników zarejestrowanych dla przenośników z dwóch różnych ciągów węglowych potencjał oszczędności wydaje się obiecujący. Poszukiwania modelu fizycznego zużycia energii przez przenośniki są ważne, bo estymacje z jego użyciem powinny obowiązywać dla pełnego zakresu zmiennych (a nie dla zakresu zebranych danych) i uwzględniałyby np. wpływ nachylenia trasy [27].

W obszarze zarejestrowanych danych maksymalna różnica w jednostkowym zużyciu energii na transportu 1 Mg na odległość 1 km (przenośnikiem o tej długości) szacowana skorygowanym modelem uwzględniającym wpływ temperatury wyniosła 100 Wh/Mg/km, a więc stanowiła 30% maksymalnego zużycia.

Skala potencjalnych oszczędności jest więc bardzo duża i warto zastanowić się, w jaki sposób ten potencjał oszczędności tkwiący w zmianach średniej wydajności przenośnika można wykorzystać w praktyce. Temperaturą nie da się wprawdzie sterować, można jednak sterować obciążeniem ciągów przenośników, gdyż odpowiednimi narzędziami dysponuje dyspozytor w COKR [22,23]. Prognozując zużycie energii przez poszczególne ciągi przenośników z wykorzystaniem opracowanych modeli można wspomóc dyspozytora informacjami o kosztach różnych wariantów decyzyjnych i ułatwić podejmowanie racjonalnych decyzji w zakresie podziału strumienia węgla. Wraz z malejącym stopniem wykorzystania maszyn z uwagi na pierwszeństwo odbioru energii z OZE rośnie potrzeba optymalizacji wykorzystania maszyn. Rozsądne wykorzystanie czasu pracy maszyn i przenośników oraz obniżenie kosztu jednostkowego zużycia energii eksploatacji i transportu każdej tony nadkładu i węgla staje się nagłym priorytetem. Opracowane model i pokazanie skali oszczędności powinno w tym pomóc.

Autorzy serdecznie dziękują kopalni za udostępnienie szczegółowych danych o zużyciu energii analizowanych przenośników i zezwolenie na publikację wyników badań.

Literatura

- [1] Bajda M., 2009. *Wpływ okładki gumowej na opory toczenia taśmy przenośnikowej po krążnikach*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Wrocław, 2009 (niepublikowana)
- [2] Bajda M., Jurdzia 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
- [3] Bajda M., Jurdzia 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
- [4] Fajer R., Idziak E., Konieczka Z., Mrówka A., Orzechowski L., Szczepaniak T., 2011. *Optymalizacja rozwiązań technicz-*

- nych przenośników taśmowych w PGE GiEK SA Oddział KWB Belchatów. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 35, Zeszyt 3/1, str. 2011
- [5] Geesmann F. O., 2001. *Experimentale und theoretische Untersuchungen der Bewegungswiderstände von Gurtforderanlagen*. Dissertation Universität Hannover 2001
- [6] Glinka T., 2005. *Zużycie energii elektrycznej w układach napędowych przenośników taśmowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 73/2005, str. 37-42
- [7] Gładysiewicz L., 1990. *Metody wyznaczania oporów głównych przenośnika taśmowego ze szczególnym uwzględnieniem własności taśmy*. Prace Naukowe CPBP 02.05. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990
- [8] Gładysiewicz L., 2003. *Przenośniki taśmowe, teoria i obliczenia*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003
- [9] Greune A., 1989. *Energiesparende Auslegung von Gurtforderanlagen*. Dissertation Universität Hannover 1989.
- [10] Hager M., 1993. *Conveyor belt research at the University of Hannover*. *Bulk Solids Handling* 1993, Vol.13, No.1, pp. 141-144
- [11] Hager M., Greune A., 1990. *Energy-Saving Design of Belt Conveyor Systems*. *Braunkohle* 8/1990, pp.28-32.
- [12] Hager M., Overmeyer L. et al., 2005. *Beitrag zur Bestimmung des Eindruckrollwiderstandes von Gurtförderern*. *Schutgut*, Vol.11, 2005, Nr 4, s.232-239
- [13] Hardygóra M., Bajda M., Gładysiewicz L., 2003. *Wpływ parametrów mieszanek gumowych na energochłonność transportu przenośnikowego*. *Transport Przemysłowy* 2007 nr 3 s. 12-15.
- [14] Hintz A., 1993. *Einfluss des Gurtaufbase auf dem Energieverbrauch von Gurtforderanlagen*. Dissertation Universität Hannover 1993
- [15] <https://www.merrid.com.pl/pl/oferta/systemy/system-wydobywczy/>
- [16] Jonkers C.O., 1993. *The indentation Rolling resistance of belt conveyors*. *Fordern und Heben* 30 (1980), nr 4, str. 312-318
- [17] Jurdziak L. 2005a., *Analiza strumienia urobku podawanego przez koparkę kołową pod kątem obniżenia mocy napędu długich przenośników*. Szkoła Ekonomiki i Zarządzania w Górnictwie, Krynica 2005. Publikacje Naukowe AGH w Krakowie. s. 195-209. ISBN: 83-908853-8-7
- [18] Jurdziak L., 2005b. *Reaktywacja modelu rozkładu urobku na taśmie przenośnika*. *Górnictwo i geologia VIII*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 113, Seria: Studia i materiały Nr 31, s. 99-109, Wrocław 2005, ISSN 0370-0798
- [19] Jurdziak L., 2006a. *Methodology of BWE efficiency analysis for power reduction of conveyor drives*. *8th International Symposium Continuous Surface Mining, ISCSM 2006*. Proceedings, Aachen, September 24th-27th 2006. Aachen: Mainz, p. 125-131
- [20] Jurdziak L., 2006b. *Wykorzystanie teorii wartości ekstremalnych do wymiarowania przenośników współpracujących z koparkami kołowymi*. *Transport Przemysłowy*. 2006, nr 3, s. 38-43. ISSN: 1640-5455
- [21] Jurdziak L., 2008. *Application of extreme value theory for joint dimensioning of BWEs and long distance belt conveyors in lignite mines*. *Int.Conf. Bulk Europe 2008*, Prague, Czech Republic, 11-12.09.2008. Wurzburg: Vogel Industrie Medien
- [22] Jurdziak L., Błażej R., Bajda M., 2018. *Cyfrowa rewolucja w transporcie przenośnikowym - taśma przenośnikowa 4.0*. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*. 2018, nr 2, s. 6-18, ISSN: 1899-5489
- [23] Jurdziak L., Błażej R., Bajda M., 2019. *Conveyor belt 4.0. Intelligent systems in production engineering and maintenance*. Springer, cop. 2019. s. 645-654, ISBN: 978-3-319-97489-7, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, ISSN 2194-5357; vol. 835, Lokalizacja elektroniczna: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97490-3_61
- [24] Kaliske M. et al., 2003. *Material damping simulation of rolling structures*. *Kautsch Gummi Kunststoffe* 56. Jahrgang, Nr. 10/2003
- [25] Kamal K., Bhowmick K.: *High-strain hysteresis of rubber vulcanizates over a range of compositions, rates and temperatures*. *Rubber Chemistry and Technology* 1997, pp.1429-1439
- [26] Markusik S., Pypno C., 1994. *Zachowanie się taśm przenośnikowych w różnych temperaturach pracy*. *X Szkoła Jesienna: Podstawowe Problemy Transportu Kopalnianego*, Politechnika Wrocławska 1994, str. 219-226
- [27] Suchorab N., 2019. *Specific Energy Consumption – The Comparison of Belt Conveyors*, *Mining Science*, vol. 26, 263–274
- [28] Woźniak D., Gładysiewicz L., Konieczna M., 2018. *Experimental tests of the impact of selected parameters on the indentation rolling resistances*. *E3S Web of Conferences* 29, 00002 (2018), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182900002>
- [29] <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182900002>