

PORÓWNANIE ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ PRZENOŚNIKI TAŚMOWE W KOPALNI WĘGLA BRUNATNEGO. CZĘŚĆ 1. BADANIE ISTOTNOŚCI STATYSTYCZNEJ RÓŻNIC I KORELACJI

COMPARISON OF ELECTRICITY CONSUMPTION BY BELT CONVEYORS IN A BROWN COAL MINE. PART 1. STUDY OF STATISTICAL SIGNIFICANCE OF DIFFERENCES AND CORRELATIONS

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

Na podstawie czteroletnich obserwacji zbadano zużycie energii przez dwa wybrane, bliźniacze przenośniki pracujące w równoległych ciągach. Obserwując duże zróżnicowanie rejestrowanych czasów prac, przeniesionej masy i zużytej energii oraz obliczonej rzeczywistej wydajności i wskaźnika energii zużywanej na przeniesienie 1 Mg węgla na odległość 1 km w kolejnych miesiącach analizowanego okresu. Stwierdzono istotne statystycznie różnice w zużyciu energii pomiędzy przenośnikami. Wskazano, że przyczyną mogą być różnice w rzeczywistej średniej wydajności obu przenośników, bowiem wydajność przenośników jest ujemnie skorelowana z analizowanym wskaźnikiem zużycia energii. Podkreślono, że różnice w zużyciu energii na tym samym przenośniku są dużo większe niż różnice pomiędzy przenośnikami. Potencjalne przyczyny tych różnic będą analizowane

w kolejnych artykułach.

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

Based on four-year observations, the energy consumption of 2 selected twin conveyors operating in parallel lines was examined. There was a large diversity of recorded operating times, transferred mass of lignite and energy consumed as well as calculated actual capacity and the unit indicator of energy consumed for transfer 1 Mg of coal to a distance of 1 km in the subsequent months of the analyzed period. There were statistically significant differences in the energy consumption between conveyors. It was pointed out that the reason for these differences may be differences in the actual average capacity of both conveyors. It was found that the capacity of conveyors is negatively correlated with the analyzed index of energy consumption. It was emphasized that the differences in the consumption of the energy on the same conveyor are much greater than the differences between the conveyors. Potential reasons for these differences will be analyzed in subsequent papers.

Keywords: *electricity consumption, belt conveyors, brown coal mine*

Wprowadzenie

Przenośniki taśmowe są obecnie podstawowymi urządzeniami transportowymi stosowanymi w górnictwie odkrywkowym i podziemnym. Ich zastosowanie wykracza również poza górnictwo obejmując przemysł cementowy, chemiczny, elektrownie i porty. Transport taśmowy w górnictwie światowym charakteryzuje się ciągłym postępem technologicznym. Postęp ten jest szczególnie widoczny w konstrukcjach przenośników taśmowych dalekiego zasięgu. Dwa najważniejsze kierunki

rozwoju związane z przenośnikami taśmowymi to: zwiększanie wydajności przenośników oraz wydłużenie długości pojedynczych przenośników oraz wynikające z tego zwiększenie mocy zainstalowanych napędów. Przenośniki o dużych mocach zużywają znaczne ilości energii elektrycznej, co z kolei przy wzrastających cenach energii na świecie powoduje zwiększenie kosztów transportu. W ostatnich latach podjęto bardzo intensywne badania mające na celu zmniejszenie zużycia energii pobieranej przez napędy przenośników taśmowych. Badania teoretyczne i eksperymentalne prowadzone na szeroką skalę

wykazały możliwości oszczędności energii przez poszczególne elementy przenośnika [1, 2, 3, 6, 7, 8]. Jednym z kierunków tych badań była identyfikacja oporów przenośnika [3, 9]. Badania te dowodzą, że możliwości zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną związane są z właściwościami taśmy przenośnikowej. Szacuje się, że zastosowanie nowej taśmy energooszczędnej o odpowiednich parametrach gumowej okładki bieżnej pozwoli znacznie zmniejszyć opory główne przenośnika co w konsekwencji spowoduje zmniejszenie zużycia energii elektrycznej przez napędy przenośników.

Analiza systemu transportu taśmowego w polskich kopalniach węgla brunatnego pokazuje skalę powyższego zagadnienia. Przykładem jest kopalnia KWB „Bełchatów”, w której wydobywa się rocznie ponad 40 mln ton węgla i ponad 100 mln m³ nadkładu. Biorąc pod uwagę, że w KWB „Bełchatów” transport urobku przenośnikami taśmowymi o łącznej długości przekraczającej 160 km pochłania około 50% energii elektrycznej, można zauważyć jaką rangę ekonomiczną i ekologiczną ma aspekt optymalizacji rozwiązań technicznych przenośników taśmowych w celu obniżenia zużycia energii elektrycznej przez napędy przenośników [4, 5].

Największą składową oporów głównych przenośnika taśmowego jest opór toczenia taśmy po krążnikach. Poszukując optymalnych rozwiązań przenośnika należy przeanalizować przede wszystkim tę składową. Dla potrzeb badania oporów toczenia taśmy po krążnikach opracowano stanowisko pomiarowe z równią pochyłą, gdzie symulowane są warunki współpracy krążnika z taśmą [1]. Na stanowisku tym prowadzone są prace mające na celu ustalenie wpływu parametrów taśmy oraz różnych rozwiązań konstrukcyjnych krążników na opory ruchu przenośnika.

Najwięcej informacji na temat oporów ruchu przenośnika taśmowego dostarczają bezpośrednie pomiary na przenośniku, gdzie mierzona jest suma wszystkich składowych oporów głównych [15]. Badania nad energooszczędnością przenośników prowadzone były na specjalnie przygotowanym członie trasy przenośnika w PGE KWB Bełchatów S.A., na którym mierzono sumaryczne opory ruchu przypadające na pojedynczy zestaw krążników [10, 15].

Zużycie energii elektrycznej na przetransportowanie 1m³ urobku (ziemi lub węgla) zależy od stopnia załadowania taśmy. Glinka [11] przedstawił analizę zużycia energii elektrycznej przez napędy przenośnika nadkładowego o długości 363 m i wydajności znamionowej 1100 m³/h w jednej z polskich kopalń węgla brunatnego. Analiza ta bazowała na wynikach badań eksperymentalnych wydajności i zużycia energii elektrycznej, gromadzonych w okresie trzech miesięcy styczeń – marzec. W analizowanym przypadku udało się zmniejszyć zużycie energii o 62% przy regulacji ciągłej prędkości taśmy w funkcji wydajności i pełnym wypełnieniu taśmy.

W kolejnych pracach zostaną przedstawione wyniki pomiarów zużycia energii przez przenośniki zarejestrowane w kopalni. Są to więc wyniki badań w rzeczywistych warunkach w długim okresie obejmującym prawie 50 miesięcy.

Opis danych o zużyciu energii zarejestrowanych w kopalni

W okresie od stycznia 2014 r. do grudnia 2017 r. w kopalni PGE GiEK SA Oddział Bełchatów dla kilku wybranych przenośnikach transportujących węgiel do elektrowni rejestrowano

następujące parametry: czas pracy w miesiącu, przeniesioną masę oraz zużytą energię. Przenośniki miały prawie identyczną długość. Przenośniki oznaczono na potrzeby artykułu literą A – 1 012,6 metrów, i literą B – 1 018,5 m. Oba przenośniki miały taką samą teoretyczną wydajność objętościową $Q_v = 8\,000\text{ m}^3/\text{h}$ i masową $Q_m = 6\,400\text{ Mg}/\text{h}$. Gęstość usypowu węgla brunatnego przyjęto bowiem na poziomie $0,8\text{ Mg}/\text{m}^3$. Na obu przenośnikach A i B zainstalowano taśmę tego samego typu St 3150 o szerokości 1 800 mm, przy czym na przenośniku A po 6 miesiącach taśmę wymieniono na nową. W miesiącach od stycznia do lipca 2014 r. oraz od czerwca do października 2015 r. na przenośniku A nie rejestrowano przeniesionej masy, z uwagi na awarię wagi. Oba przenośniki nie miały więc identycznej liczby pomiarów (przenośnik A - 36 pomiarów, a przenośnik B - 48). Pomiary były prowadzone w tym samym czasie (poza ww. okresem bez rejestracji danych) dlatego można założyć, że ewentualne różnice w zużyciu energii nie wynikały z różnic w warunkach eksploatacji.

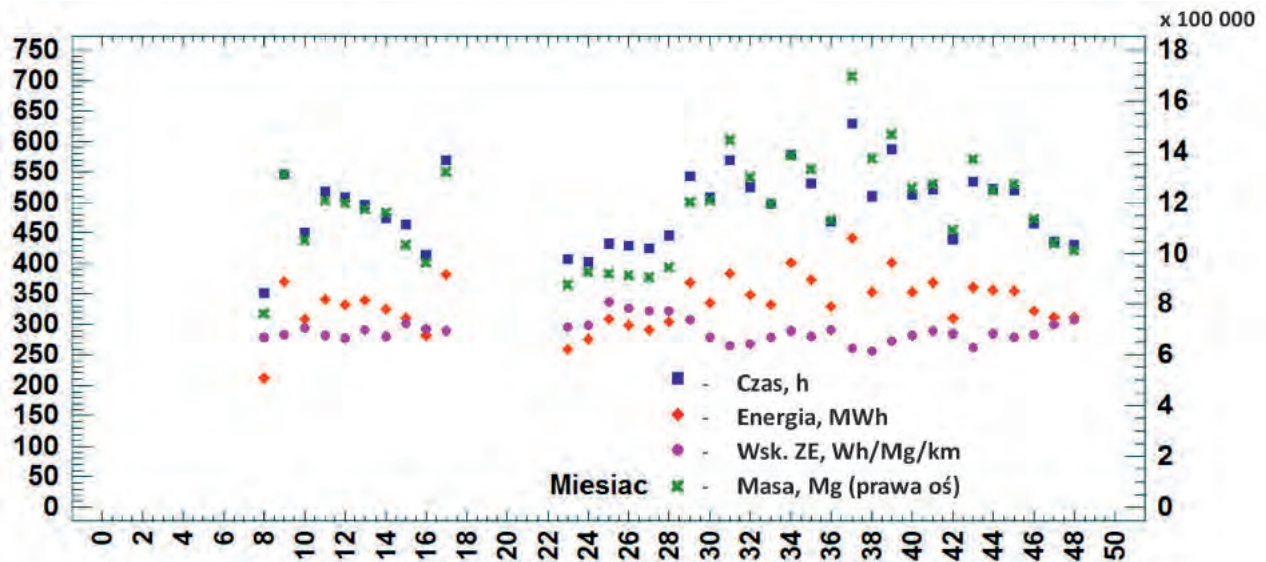
Analizowane przenośniki zlokalizowane były w równoległych ciągach węglowych. Utrudnia to porównanie, bo występowały znaczne różnice w przetransportowanej masie węgla oraz czasie pracy przenośników zarówno w poszczególnych miesiącach jak i globalnie. W efekcie, rzeczywista średnia wydajność ich pracy (iloraz przeniesionej w danym miesiącu masy i czasu ich pracy) były w poszczególnych miesiącach zróżnicowane. Ponadto pomiary na przenośniku A były krótsze o 12 miesięcy. Konieczne było więc wypracowanie metodyki porównywania danych o zużyciu energii, by jego wyniki były wiarygodne pomimo tych różnic.

Porównanie danych o zużyciu energii przez dwa przenośniki w kopalni

W okresie analizy od stycznia 2014 r. do grudnia 2017 r. w kopalni Bełchatów przenośnik A w ciągu 36 miesięcy przepracował łącznie 18 025 h (w rzeczywistości pracował dłużej, ale wszystkie parametry jego pracy zarejestrowano tylko w tym okresie). W tym czasie przeniósł 42 857 113 Mg węgla, na co zużył 12 270,4 MWh. Przenośnik B w tym okresie przepracował 48 miesięcy, przeniósł 46 964 732 Mg węgla na co zużył 14 134,70 MWh.

Porównywanie globalnych różnic w zużyciu energii nie ma sensu, bo czasy rejestracji danych się różniły (36 i 48 mies.), w każdym miesiącu każdy z przenośników przepracował efektywnie inny czas i przeniósł inną masę węgla. Sensowne wydaje się jednak porównywanie jednostkowego zużycia energii niezbędnej do przeniesienia 1 Mg węgla. Z uwagi, że długość obu przenośników wynosi ok. 1 km, można więc obliczyć jednostkowy wskaźnik zużycia energii na przeniesienie 1 Mg węgla brunatnego na odległość 1 km. Przenośnik A zużywał na to średnio 282,76 Wh, a przenośnik B 295,49 Wh. Różnice nie są znaczne i wynoszą 12,73 Wh/Mg/km. Przenośnik B w okresie analizy zużywał średnio o 4.5% energii więcej niż przenośnik A na przeniesienie 1 Mg węgla na odległość 1 km. Różnice powstały w okresie 3 – 4 lat, więc mogą być istotne. Trudno jednak powiedzieć, co jest przyczyną tych różnic, bo przenośniki wybrano do porównania dlatego, że nie różniły się długością, ani konstrukcją. Uznano je za bliźniacze. Istotność różnic w zużyciu energii można zweryfikować statystycznie, gdyż pomiary prowadzono osobno dla każdego miesiąca i można zbadać czy różnice obliczone dla danych globalnych z całego okresu są również zachowane w poszczególnych miesiącach.

Zarówno dane źródłowe (tabela 1) jak i rysunek 1 pokazują, że



Rys.1. Zmiany czasu pracy przenośników, przeniesionej masy, zużytej energii i jednostkowej energii na przeniesienie 1Mg węgla na 1 km w kolejnych miesiącach na przenośniku taśmowym A

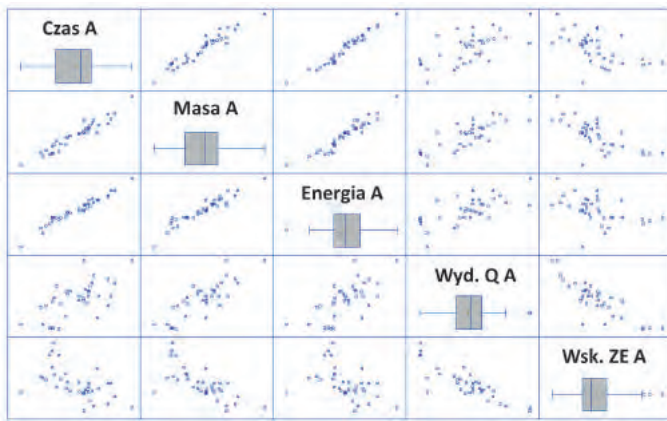
Fig.1. Changes in: belt conveyor operating time, the mass of lignite, consumed energy and unit energy for movement of 1Mg of lignite per 1 km in subsequent months on the belt conveyor labeled as A

w poszczególnych miesiącach wszystkie analizowane parametry zmieniały się dosyć znacznie. Utrudnia to porównanie. Dlatego wyznaczono wydajność (w Mg/h) oraz wskaźnik zużycia energii (ZE) na jednostkę masy i km trasy (Wh/Mg/km). Współczynnik zmienności dla obu obliczonych wskaźników okazał się znacznie mniejszy niż dla pozostałych zmiennych. Wyniósł on 6,19% dla wydajności Q i 6,3% dla wskaźnika ZE, podczas gdy dla czasu pracy w miesiącu 12,42%, dla przeniesionej masy 16,97%, a dla zużytej energii 13,1%. Na rysunku widać, że niektóre zmienne są ze sobą powiązane i zmieniają się w podobny sposób, co wpływa na stabilizację wyznaczonych wskaźników i zmniejsza ich fluktuację (rys. 1-3).

Czas, masa i zużyta energia są ze sobą wysoce i dodatnio skorelowane (rys. 2-3). Wydajność Q i wyznaczony wskaźnik zużycia energii ZE są słabiej skorelowane, przy czym dla wydajności korelacja jest dodatnia, a dla ZE jest ujemna. Dosyć silna jest korelacja ilości przeniesionej masy i wydajności, co nie dziwi, gdyż $ZE = \text{Energia} / \text{Masa}$, a $Q = \text{Masa} / \text{Czas}$. Korelacje wydajności Q z czasem i energią są na podobnym poziomie: 0,65 i 0,67 odpowiednio. Dosyć silna, ale ujemna jest korelacja wydajności Q i wskaźnika zużycia energii ZE (-0,84). Oznacza to, że im wyższa jest wydajność rzeczywista (osiągana w danym miesiącu), tym jednostkowy wskaźnik zużycia energii jest niższy. Jest to zgodne z powszechnym odczuciem i wynikami badań [1-11]. Dobrane

Tab.1. Statystyki dotyczące parametrów zarejestrowanych dla przenośnika A
Tab. 1 Statistics of parameters registered on the belt conveyor A

Statystyki	Czas pracy h	Masa Mg	Energia Wh	Wydajność Q Mg/h	Wskaźnik ZE Wh/Mg/km
Liczba pomiarów, szt.	36	36	36	36	36
Średnia	490.914	1.16935E6	334.956	2 370.56	288.573
Standardowe odchylenie	60.9836	198 752	43.881	146.622	18.1831
Współczynnik zmienności	12.4225%	16.9968%	13.1005%	6.18513%	6.30106%
Minimum	352.1	760 503	212.0	2 119.17	256.87
Maksimum	629.4	1.69516E6	441.6	2 693.29	336.35
Zakres zmian	277.3	934 653	229.6	574.12	79.48
Standardowa skosność	-0.00463629	0.440776	-0.604526	0.0436778	1.88461
Standardowa kurtოza	-0.369913	0.133116	1.32279	-0.0208721	0.843972



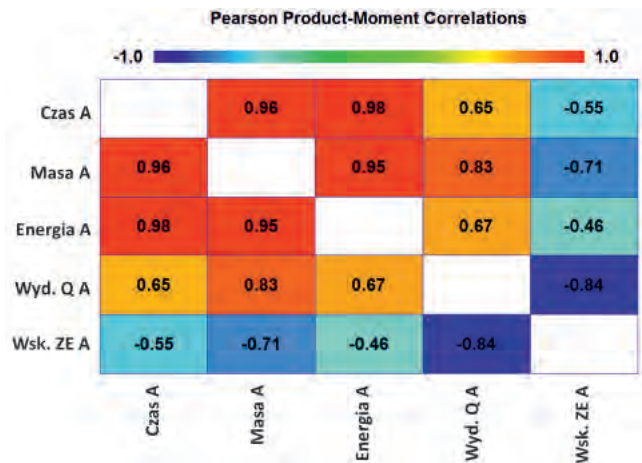
Rys. 2. Wykres kwartylowy i wykres punktowy pokazujący zależności pomiędzy zarejestrowanymi parametrami i obliczonymi wskaźnikami Q i ZE dla przenośnika A

Fig. 2 Box-and-Whiskers and scatter plots showing relations between registered parameters and calculated Q and ZE indicators for conveyor A

zależności mogą pokazać skalę zmian, a są one wiarygodne, gdyż wszystkie korelacje są istotne statystycznie.

Parametry zarejestrowane dla przenośnika B obejmowały 48 miesięcy (4 lata). Zmienność wielu parametrów była wyższa niż dla przenośnika A. Współczynnik zmienności dla czasu, masy i energii przekroczył 20%. Dla masy okazał się najwyższy (25,15%), a dla czasu pracy i energii był na podobnym poziomie: odpowiednio 21,74% i 21,6%. Najmniej, podobnie jak dla bliźniaczego przenośnika A, zmieniały się wydajność Q i wskaźnik zużycia energii ZE, dla których współczynnik zmienności wyniósł odpowiednio 6,19 i 6,3%. (rys. 4, tab. 2).

Podobnie jak poprzednio czas pracy, przeniesiona masa i zużyta energia są ze sobą wysoce i dodatnio skorelowane (rys. 5-6). Wyznaczone: wydajność Q oraz wskaźnik zużycia energii ZE na 1 Mg węgla nie są tak silnie skorelowane (najsilniej +/-0,61 z przeniesioną masą). Wydajność Q z wszystkimi zarejestrowanymi parametrami jest dodatnio skorelowana, a wskaźnik zużycia energii ZE jest skorelowany ujemnie. Występuje silna ujemna korelacja wydajności Q ze wskaźnikiem ZE (-0,85). Ważne jest, że wszystkie korelacje są istotne statystycznie. Oba wyznaczone wskaźniki zawierają wszystkie zarejestrowane dane: $Q=M/T$, a wskaźnik



Rys. 3. Wskaźniki korelacji Pearsona dla rejestrowanych i obliczonych parametrów dla przenośnika A

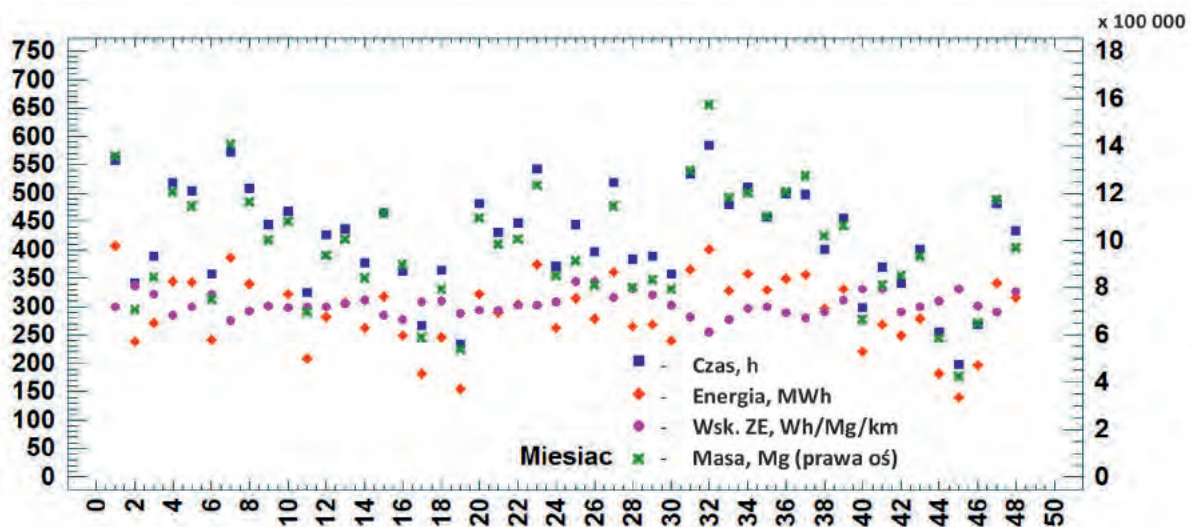
Fig. 3. Pearson correlation coefficients for registered and calculated parameters for conveyor A

zużycia energii $ZE=E/M$. Ich ujemna korelacja potwierdza, że wzrost wydajności pociąga spadek wskaźnika zużycia energii.

Ilościowy opis jednostkowego zużycia energii na obu przenośnikach A i B

W celu zbadania, czy różnice jednostkowego zużycia energii zidentyfikowane dla danych globalnych z całego okresu badania są zauważalne przeprowadzono badania porównawcze dwóch próbek w programie Statgraphics Centurion v.18.

Procedura porównywania miała na celu porównanie dwóch niezależnych próbek zmiennych losowych. Przeprowadzono testy mające na celu ustalenie, czy istnieją znaczne różnice między średnimi, wariacjami i medianami populacji, z których pobrano próbki. Zarejestrowane pomiary traktowano jako próbki niezależne, gdyż przenośniki pracowały w osobnych ciągach oraz nie we wszystkich miesiącach. Na przenośniku A rejestrowano dane o jego pracy. Dlatego zakładamy, że nie istnieje związek między wybraną obserwacją w jednej próbce a jakąkolwiek obserwacją w drugiej próbce. Gdyby przenośniki pracowały w jednym ciągu i próby byłyby równoliczne to czasy pracy i przeniesiona masa

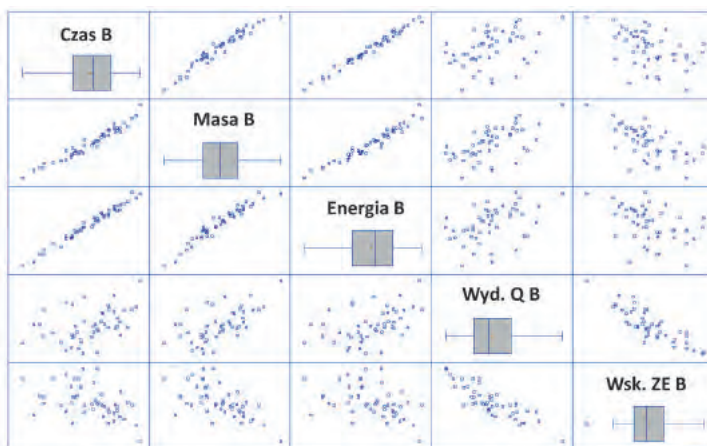


Rys. 4. Zmiany czasu pracy, przeniesionej masy, energii i energii na przeniesienie 1Mg węgla na 1 km w kolejnych miesiącach analizy na przenośniku taśmowym B

Fig. 4. Changes in: belt conveyor operating time, the mass of lignite, consumed energy and unit energy for movement of 1Mg of lignite per 1 km in subsequent months on the belt conveyor labeled as B

Tab. 2. Statystyki dotyczące parametrów zarejestrowanych dla przenośnika B
 Tab. 2. Statistics of parameters registered on the belt conveyor B

Statystyki	Czas pracy h	Masa Mg	Energia Wh	Wydajność Q Mg/h	Wskaźnik ZE Wh per 1Mg km
Liczba pomiarów	48	48	48	48	48
Średnia	419.829	969 584	291.542	2 296.89	303.579
Standardowe odchylenie	91.2759	243 846	62.9748	142.201	19.1201
Współczynnik zmienności	21.7412%	25.1495%	21.6006%	6.19105%	6.29825%
Minimum	198.6	424 723	140.7	2 045.89	254.7
Maksimum	584.7	1.57402E6	406.5	2 692.01	344.57
Zakres zmian	386.1	1.1493E6	265.8	646.12	89.87
Standardowa skosność	-1.12725	0.146169	-1.15943	1.1969	0.545528
Standardowa kurtოza	-0.405276	-0.315213	-0.344941	0.0789929	0.0916916



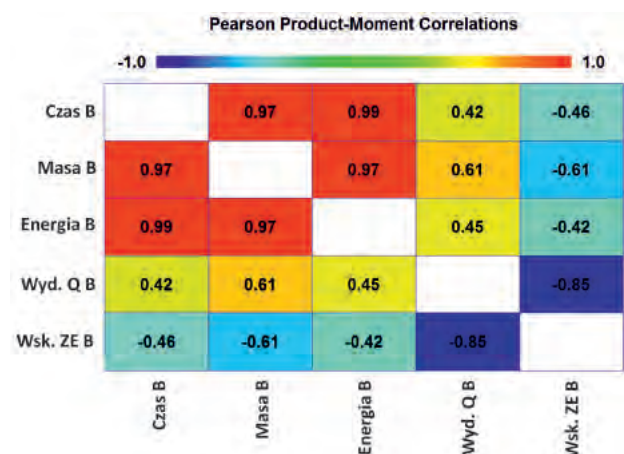
Rys. 5. Wykres kwartylowy i wykres punktowy pokazujący zależności pomiędzy zarejestrowanymi parametrami i obliczonymi wskaźnikami Q i ZE dla przenośnika B

Fig. 5. Box-and-Whiskers and scatter plots showing relations between registered parameters and calculated Q and ZE indicators for conveyor B

byłyby identyczne i można byłoby przeprowadzić test próbek dla zużycia energii w parach. Badaniu poddano by wtedy obliczone różnice w zużyciu energii w poszczególnych miesiącach. Niestety dane były niezależne, charakteryzowały się dużą zmiennością w poszczególnych miesiącach i porównanie jest znacznie trudniejsze. Badanie musi też dotyczyć jednostkowego zużycia energii agregującego w sobie zużyta energię i przeniesioną masę węgla.

Porównanie histogramów wskaźników zużycia energii dla obu przenośników przedstawiono na rysunku 7. Widać, że wartość modalna dla przenośnika A wypada nieco powyżej 280 Wh/Mg/km, a dla przenośnika B powyżej 300 Wh/Mg/km.

Rozkłady gęstości dla obu przenośników są więc względem siebie przesunięte, co potwierdza, że wskaźniki ZE są dla przenośnika A nieco niższe. Widać to dobrze na rysunku śladów gęstości

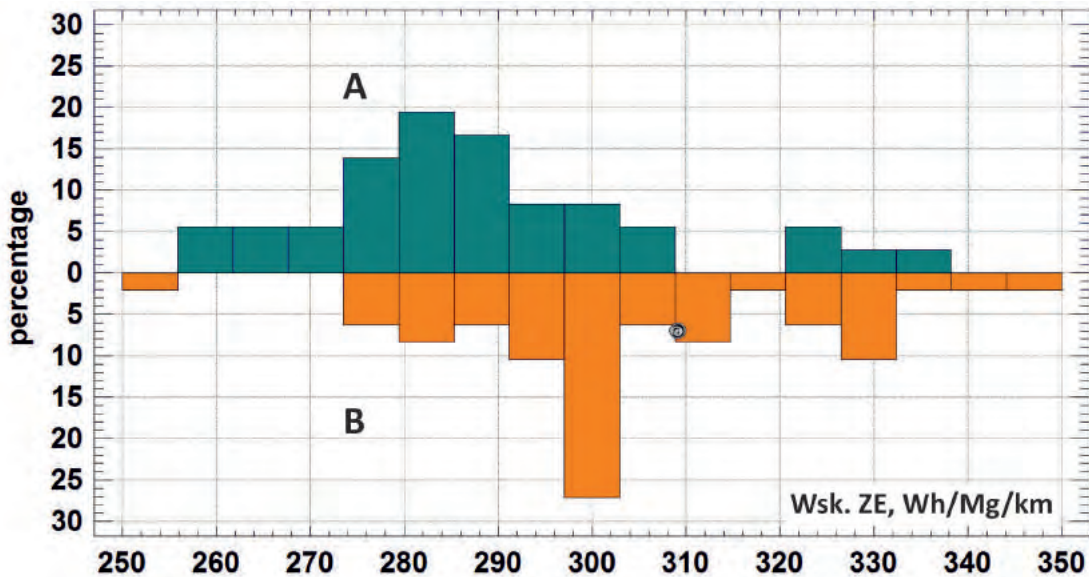


Rys. 6. Wskaźniki korelacji Pearsona dla rejestrowanych i obliczonych parametrów dla przenośnika B.

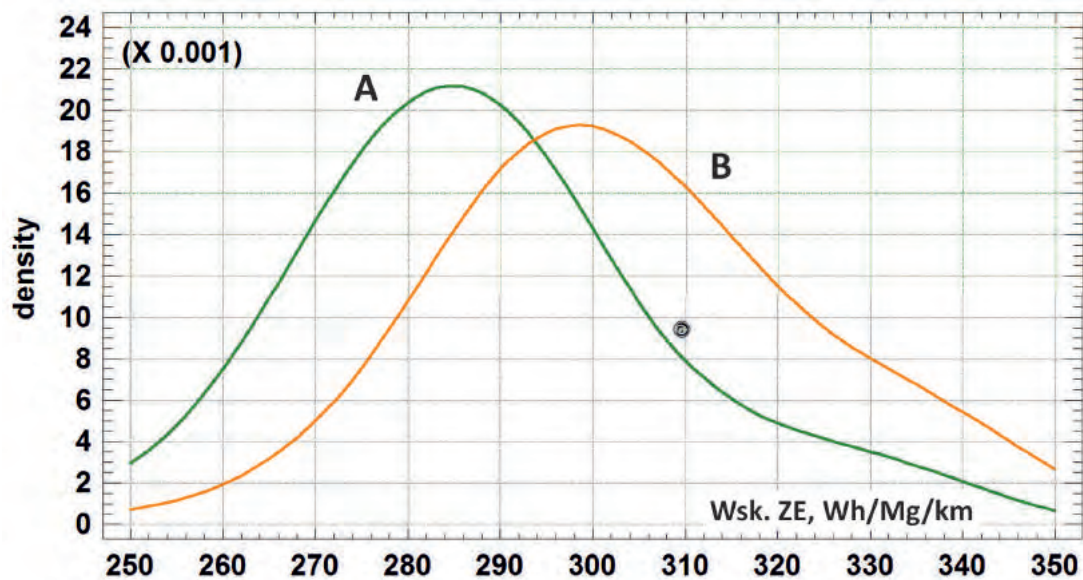
Fig. 6. Pearson correlation coefficients for registered and calculated parameters for conveyor B.

obu rozkładów (rys. 8). Ślad gęstości zapewnia nieparametryczne oszacowanie funkcji gęstości prawdopodobieństwa populacji, z których pobrano próbki danych. Jest on tworzony przez zliczanie liczby obserwacji, które mieszczą się w oknie o stałej szerokości przesuwany po całym zakresie danych. Zastosowanie funkcji cosinus prowadzi do wygładzenia wykresu, gdyż zmniejsza wagę obserwacji położonych dalej od środka okna.

W tabeli 3 zebrano szereg statystyk opisowych dla dwóch analizowanych zbiorów danych. Jak widać różne miary tendencji centralnej (średnie, mediana itp.) dla przenośnika A są mniejsze od tych miar na przenośniku B o ok. 5%. Najmniej różni się średnia harmoniczna (o 4,93%), a najwięcej mediana (o 5,19%). Miary dyspersji różnią się nieco bardziej. Wskaźniki zużycia energii ZE z przenośnika A są mniej rozproszone niż z przenośnika B,



Rys. 7. Porównanie histogramów wskaźników zużycia energii ZE dla przenośnika A i B
 Fig. 7. Comparison of histograms of energy consumption indicators ZE for conveyor A and B



Rys. 8. Porównanie śladów gęstości rozkładów wskaźników ZE dla przenośnika A i B
 Fig. 8. Density traces comparison of the energy consumption indexes ZE for conveyors A and B

co może wynikać z większej liczby pomiarów zebranych z tego drugiego. Najbardziej różni się wariancja. Dla przenośnika A jest o 9,56% niższa. Błąd standardowy zachowuje się odwrotnie, jest mniejszy dla przenośnika B (o -9,81%). Interesujące jest, że współczynnik zmienności dla wskaźników z obu przenośników jest identyczny i wynosi ok. 6,3%. Minima też są podobne. Dla przenośnika B wynosi 254,7 Wh/Mg/km i różni się o -0,85% od wskaźników z przenośnika A. Maksimum wskaźników ZE też jest najwyższe dla przenośnika B i wynosi 344,57 Wh/Mg/km (jest o 2,39% wyższe niż dla A). W efekcie zakres zmian wskaźników zużycia energii dla przenośnika B wynosi ok. 90 Wh/Mg/km i jest większy o 11,56% niż dla przenośnika A. Zapewne wynika to z większej liczby pomiarów. Interesujące jest, że dla przenośnika B, który charakteryzuje się wyższą energochłonnością (średnio o ok. 5%) odnotowano najniższy wskaźnik zużycia energii ZE, co podważa tę generalną i potwierdzoną obliczeniami tendencję. Tak niskie zużycie zarejestrowano w sierpniu 2016 roku. W tym czasie na przenośniku A zużycie energii wyniosło 268,75 Wh/Mg/km. Było więc o 5,5%

wyższe. Warto odnotować ten fakt, gdyż należy zastanowić się na przyczynach tej różnicy. Jest to istotna informacja, gdyż pokazuje, że jednostkowe zużycie energii na tym samym przenośniku może być niższe od maksymalnego o 26,08% (o 90 Wh/Mg/km) lub wyższe od minimalnego o 35,28%. Warto zbadać przyczyny tak znacznych różnic, bo znacznie przekraczają możliwe do osiągnięcia oszczędności z zastosowania taśm energooszczędnych, których potencjał oszczędności na podstawie badań laboratoryjnych [1, 6] szacuje się na 15-20%. W tym miejscu warto podkreślić, że na przenośniku A i B w okresie analizy pracowały taśmy standardowe tego samego typu i od tego samego producenta.

Inne statystyki pozycyjne (kwartyle i sekstyle) generalnie zachowują różnice odnotowane dla wartości centralnych, co świadczy o przesunięciu całego rozkładu dla wskaźnika, że dla przenośnika A o ok. 4-6% na lewo, w kierunku niższych wartości. Zakresy interkwartylowe i interesktylowe są jednak dużo dużej niż dla przenośnika A o 22,61% i 25,83%, co świadczy, że

Tab. 3. Statystyki opisujące wskaźniki ZE oraz ich różnice dla przenośników A i B
 Tab. 3. Statistics describing the ZE indicators and their differences for conveyors A and B

Statystyki opisowe:	A	B	Różnica absolutna	Różnica wzgl. %
Liczność	36	48	12	25.00%
Średnia	288.573	303.579	15.006	4.94%
Mediana	284.835	300.44	15.605	5.19%
Średnia geometryczna	288.03	302.991	14.961	4.94%
Średnia harmoniczna	287.5	302.404	14.904	4.93%
5% Trymowana średnia	287.827	303.427	15.6	5.14%
5% Winsorized średnia	288.407	303.776	15.369	5.06%
Wariancja	330.627	365.58	34.953	9.56%
Odchylenie standardowe	18.1831	19.1201	0.937	4.90%
Współczynnik zmienności	6.30%	6.30%	-2.8E-05	-0.04%
aWspółczynnik Giniego	-0.65099	0.035462	0.68645	
Standardowy błąd	3.03052	2.75975	-0.27077	-9.81%
Geometryczne odchylenie stand.	1.06384	1.06494	0.0011	0.10%
5% Winsorized sigma	18.3795	19.0744	0.6949	3.64%
Średnie absolutne odchylenie	0.046466	0.048382	0.001916	3.96%
MAD abs. odchylenie mediany	7.735	10.325	2.59	25.08%
Sbi	16.5719	19.2436	2.6717	13.88%
Minimum	256.87	254.7	-2.17	-0.85%
Maksimum	336.35	344.57	8.22	2.39%
Zakres	79.48	89.87	10.39	11.56%
Dolny kwartył	278.81	291.37	12.56	4.31%
Górny kwartył	296.15	313.775	17.625	5.62%
Zakres międzykwartyłowy	17.34	22.405	5.065	22.61%
1/6 sekstyl	275.385	286.345	10.96	3.83%
5/6 sekstyl	303.605	324.395	20.79	6.41%
Zakres intersekstylowy	28.22	38.05	9.83	25.83%
Skośność	0.769391	0.192873	-0.57652	
Stand. skośność	1.88461	0.545528	-1.33908	
Kurtoza	0.6891	0.064836	-0.62426	
Stand. kurtoza	0.843972	0.091692	-0.75228	
Suma	10388.6	14571.8	4183.2	28.71%
Suma kwadratów	3.01E+06	4.44E+06	1431420	32.23%

rozkład wskaźnika ZE dla przenośnika A jest bardziej wysmukły niż dla przenośnika B.

Potwierdzają to statystyki opisujące kształt rozkładu. Kurtoza jest dodatnia i wyraźnie wyższa dla przenośnika A niż dla B, dla którego jest bliska 0, co jest charakterystyczne dla rozkładu normalnego. Kurtoza dla przenośnika A nie przekracza jednak wartości 0,9 dlatego nie podważa to zasadności skorzystania ze statystycznych testów porównawczych obu prób losowych z dalszej części artykułu. Dopuszcza się bowiem odchylenia do ± 2 . Wyższa skośność dla przenośnika A wskazuje na większą prawostronną asymetrię tego rozkładu, co widać na rysunkach 7 i 8. Odchylenia są również w dopuszczalnych granicach ± 2 . Dla statystyk opisujących kształt rozkładu nie obliczano względnych różnic, bo nie niosą one istotnych informacji. Wartość absolutna tych statystyk determinuje kształt, a ten nie odbiega znacząco od rozkładu normalnego zwłaszcza dla danych z przenośnika B.

Istotność statystyczna różnic jednostkowego zużyciu energii na obu przenośnikach

Różnice widoczne wizualnie (rys. 7, 8) oraz zidentyfikowane różnymi statystykami opisowymi (tab. 3) mogą być przypadkowe, dlatego konieczne jest zbadanie ich istotności statystycznej. Przypadkowość jest wprawdzie mało prawdopodobna, bo różnice dotyczą nie tylko miar tendencji centralnej lecz również statystyk pozycyjnych i śladu gęstości rozkładu (rys. 8), który jest zdublowany, a oba ślady są równolegle przesunięte względem siebie na osi wskaźnika zużycia energii ZE. Niemniej wymaga to formalnego sprawdzenia.

W tym celu **porównano średnie** i wyznaczono dla nich 95% przedział ufności.

95,0% przedział ufności dla średniej wskaźników ZE dla przenośnika A:

$$288,573 \pm 6,1523 \quad [282,42; 294,725]$$

95,0% przedział ufności dla średniej wskaźników ZE dla przenośnika B:

$$303,579 \pm 5,55192 \quad [298,027; 309,13]$$

Wyznaczono również 95,0% przedział ufności dla różnic wskaźnika jednostkowego zużycia energii, przy założeniu równości wariancji:

$$-15,0058 \pm 8,21328 \quad [-23,219; -6,79249]$$

Z uwagi na to, że przedział ten nie zawiera 0, to istnieje statystycznie istotna różnica pomiędzy obu średnimi na poziomie istotności 95%.

Przeprowadzono również test t-Studenta istotności dwóch średnich służący do ich porównania. Testowano hipotezę zerową, że obie średnie są równe, przy hipotezie alternatywnej, że się różnią. Zakładając równe wariancje wyznaczono wartość statystyki $t = -3,63452$. Obliczona wartość P jest na poziomie 0,000484544. Ponieważ obliczona wartość P jest mniejsza niż 0,05, możemy odrzucić hipotezę zerową na korzyść hipotezy alternatywnej na poziomie istotności $\alpha = 95\%$.

Test można przeprowadzić, gdy wariancje dwóch próbek są równe. W analizowanym przypadku założenie to jest uzasadnione, gdyż wskazują na to wyniki testu F w celu porównania

odchyłeń standardowych.

Badano również **odchylenia standardowe** dla danych z obu przenośników A i B. Obliczono 95,0% przedział ufności

Standardowe odchylenie dla A: [14,748; 23,7188]

Standardowe odchylenie dla B: [15,9169; 23,9495]

Stosunek wariancji: [0,489773; 1,71932]

Testem F zbadano hipotezę zerową, że odchylenie standardowe w obu grupach jest takie samo ($\sigma_1 = \sigma_2$) przy alternatywnej hipotezie, że odchylenia się różnią ($\sigma_1 \neq \sigma_2$). Obliczono wartość statystyki $F = 0,90439$, przy wartości $P = 0,764154$.

Szczególnie interesujący jest przedział ufności dla stosunku wariancji, który rozciąga się od 0,489773 do 1,71932. Zawiera on wartość 1, co wskazuje, że nie ma statystycznie istotnej

Tab. 4. Porównanie odchyłeń standardowych dla wskaźnika ZE dla przenośników A i B

Tab. 4. Comparison of standard deviations for the ZE indicator for conveyors A and B

	Przenośnik A	Przenośnik B
Standardowe odchylenie	18.1831	19.1201
Wariancja	330.627	365.58
Df	35	47

Stosunek wariancji = 0.90439

różnicy między odchyleniami standardowymi obu próbek przy poziomie ufności 95,0%.

Test F może być również użyty do przetestowania konkretnej hipotezy o odchyleniach standardowych populacji, z których pochodzą dwie próbki. W tym przypadku test został skonstruowany w celu ustalenia, czy stosunek odchyłeń standardowych wynosi 1,0 w porównaniu z alternatywną hipotezą, że stosunek nie jest równy. Ponieważ obliczona wartość P dla testu F jest nie jest mniejsza niż 0,05, nie możemy odrzucić hipotezy zerowej.

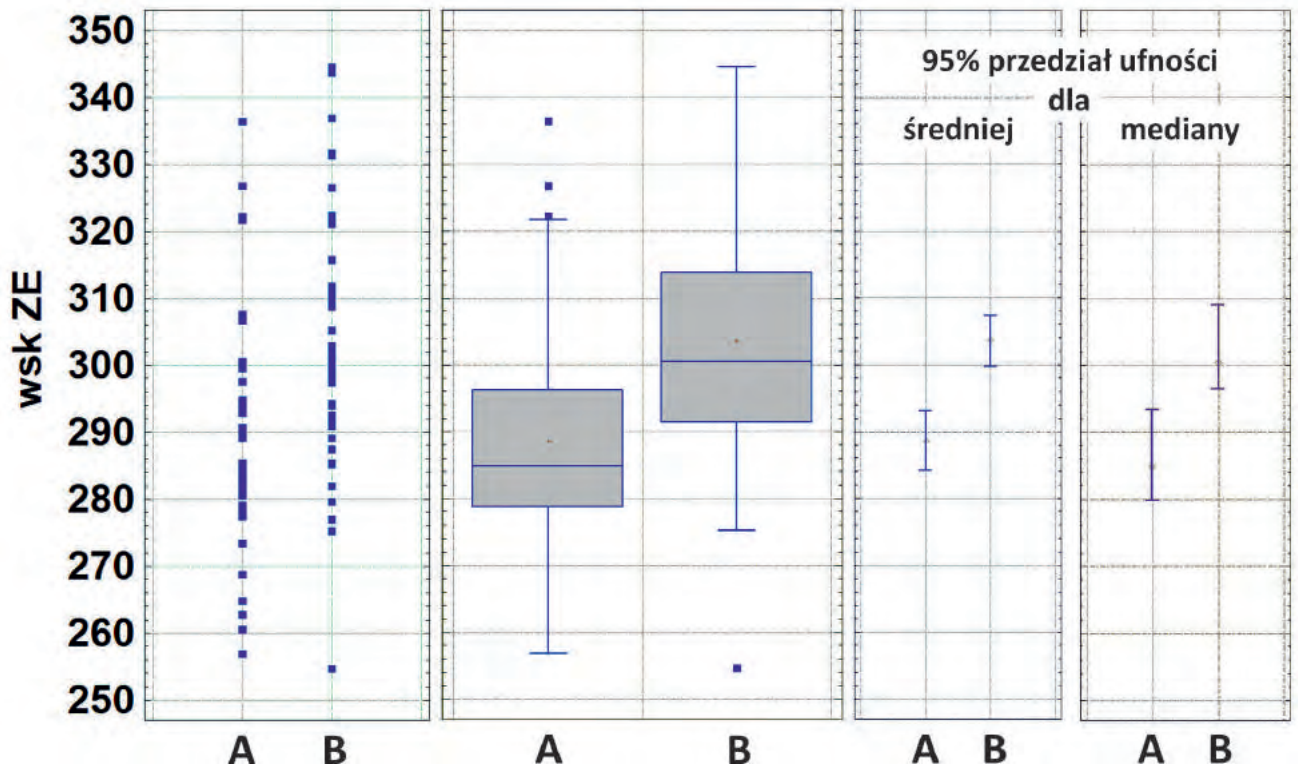
Przedstawione tu testy F i przedziały wyznaczono przy założeniu, że próbki pochodzą z normalnych rozkładów. Wartości wystandaryzowanej skośności (A: 1,88461 i B: 0,545528) oraz kurtozy (A: 0,843972 i B: 0,091692) mieszczą się w zakresie od -2 do +2, co wskazuje, że nie ma znaczących odstępstw od normalności. Nie ma więc podstaw do unieważnienia testów porównujących odchylenia standardowe.

Przeprowadzono również test równości median. Mediana dla wskaźnika ZE dla przenośnika A wyniosła 284,835 a dla przenośnika B: 300,44. Równość median badano testem Manna-Whitneya (Wilcoxon). Testowano hipotezę zerową, że obie mediany są równe, przy hipotezie alternatywnej, że nie są równe.

Wyznaczono średnie rangi dla próbki 1 (A): 31,0556 oraz dla próbki 2 (B): 51,0833 oraz wartość statystyki $W = 1276,0$ oraz wartość $P = 0,000199712$. Odrzucono hipotezę dla $\alpha = 0,05$.

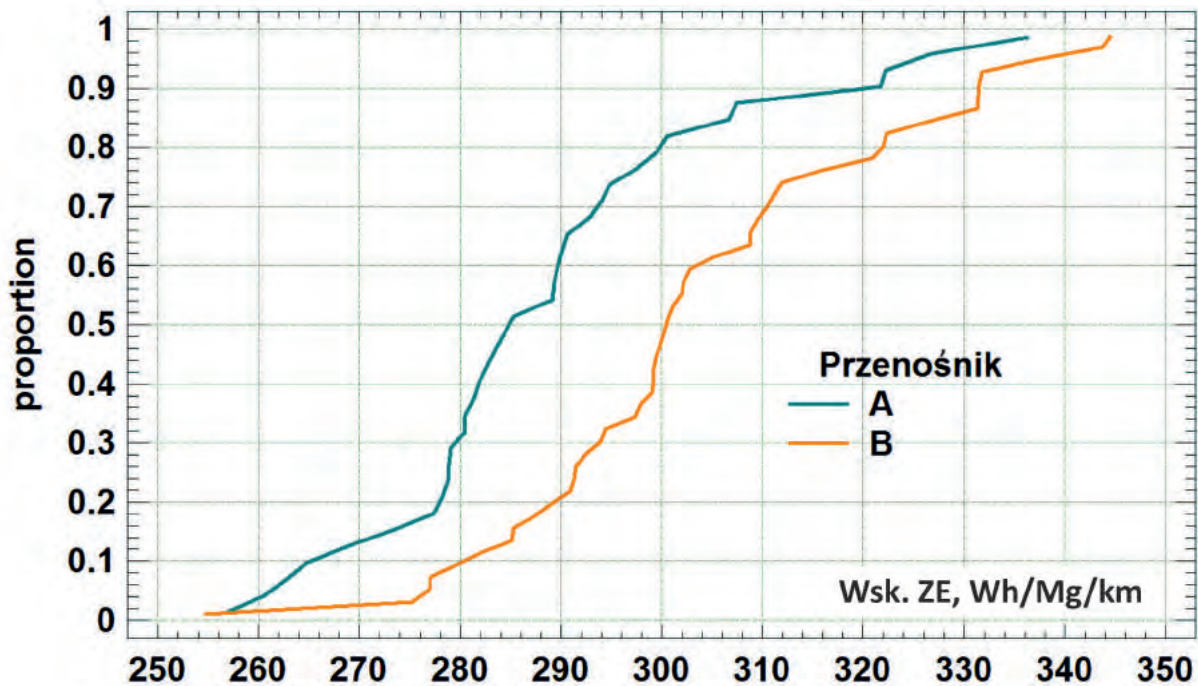
W teście tym próbki są łączone i wartości są sortowane od najmniejszej do największej. Porównywane są średnie rang dwóch próbek w połączonych danych. Ponieważ wartość P jest mniejsza niż 0,05, istnieje statystycznie znacząca różnica między medianami przy poziomie ufności 95,0%.

Na wykresie (rys. 9) porównano dane z obu przenośników wraz z prezentacją przedziałów ufności dla średnich i median. Widać, że stanowią one rozłączne przedziały i nie zachodzą na siebie.



Rys. 9. Porównanie wykresów punktowych, kwartylowych oraz przedziałów ufności dla średniej i mediany dla wskaźników zużycia energii ZE dla przenośników A i B

Fig. 9. Comparison of scatter and Box-and-Whiskers plots and confidence intervals for the mean and the median for energy consumption indicators ZE for conveyors A and B



Rys. 10. Wykres skumulowanych dystrybucji empirycznych dla jednostkowych wskaźników zużycia energii obliczonych dla przenośników A i B

Fig. 10. Graph of cumulative empirical distributions for the unit energy consumption indicators calculated for the A and B conveyors

Testem Kołmogorowa-Smirnowa badano zgodność rozkładów obu próbek. Obliczono statystykę $DN = 0,458333$ oraz $K-S = 2,0788$ wraz z przybliżoną wartością $P = 0,000352764$.

Test ten oblicza maksymalną odległość między skumulowanymi rozkładami dwóch próbek. W tym przypadku maksymalna odległość wynosi $0,458333$, co można zobaczyć wizualnie (rys. 10). Ponieważ wartość P jest mniejsza niż $0,05$, istnieje statystycznie znaczna różnica między dwoma rozkładami przy poziomie ufności $95,0\%$.

Wnioski

Przedstawione analizy jednoznacznie pokazują, że obliczone jednostkowe wskaźniki zużycia energii dla dwóch analizowanych przenośników A i B różnią się i te różnice są istotne statystycznie.

Przenośnik oznaczony literą A ma istotnie niższe zużycie energii niż przenośnik B. Jego średnie zużycie energii elek-

trycznej na przeniesienie 1 Mg węgla brunatnego wyniosło 288,573 Wh/Mg/km i było niższe w stosunku do przenośnika B o zużyciu 303,579 Wh/Mg/km.

Różnice zużycia energii pomiędzy przenośnikami nie są duże. Średnie wartości różnią się o ok. 15 Wh/Mg/km, co stanowi ok. 5%. Są jednak trwale i występują na wszystkich poziomach zużycia energii. Wykresy dystrybucji empirycznych są prawie równoległe przesunięte względem siebie (rys. 10). 15 Wh to niedużo, ale należy pamiętać, że rocznie transportowanych do elektrowni jest w PGE GiEK SA Oddział KWB Bełchatów ponad 40 milionów Mg węgla rocznie na sporą odelgłość, która wzrosnie po uruchomieniu odkrywki Złoczew.

Na tym etapie analizy nie stwierdzono przyczyn takiego stanu rzeczy. Stwierdzono jednak istotne statystycznie różnice i dokładnie je opisano.

Przenośniki do testów wybrane zostały jako bliźniacze. Oczekiwanym wynikiem porównania powinien więc być brak podstaw do stwierdzenia istotnych różnic. Okazało się jednak inaczej i należy to dokładniej zbadać.

Na podstawie zaprezentowanych danych można już wysunąć pewne przypuszczenia. Po pierwsze na obu przenośnikach rejestrowano w różnych miesiącach jednostkowe zużycia z przedziału 256,87-336,35 Wh/Mg/km. Od minimalnego do maksymalnego zużycia dla przenośnika A. Dla przenośnika B przedział ten był większy od 254,7 Wh/Mg/km do 344,57 Wh/Mg/km.

Zróznicowanie wyników na tym samym przenośniku jest więc dużo większe niż różnice pomiędzy nimi. Zakresy danych dla przenośnika A i B to 7,48 Wh/Mg/km i 89,87 Wh/Mg/km

odpowiednio. Są więc ponad pięciokrotnie większe niż różnice pomiędzy obu przenośnikami (15 Wh/Mg/km).

Możliwym wyjaśnieniem może być zależność zużycia energii od warunków pracy np. pór roku, temperatury, wilgotności. Opory ruchu przenośników od tego zależą [1-3, 6, 9]. Różnice warunków nie mogą jednak wytłumaczyć różnic pomiędzy przenośnikami A i B, gdyż pracowały one w identycznych warunkach.

Inną ważną przesłanką, którą należy zbadać jest wpływ wydajności na jednostkowe zużycie energii. W przypadku obu przenośników stwierdzono dosyć mocną, ujemną korelację wskaźnika ZE i średniej, rzeczywistej wydajności Q. Dla przenośnika A wskaźnik korelacji Pearsona wynosił -0,84 (rys. 3), a dla przenośnika B -0,85 (rys. 6). Widać to na wykresach (rys. 2 i 5). Istotne jest, że średnia wydajność na przenośniku A (2 370,6 Mg/h) była o 3,21% wyższa niż na przenośniku B (2 296,9 Mg/h). Przy ujemnej korelacji może to tłumaczyć zaobserwowane różnice. Badania zmienności strumienia urobku na przenośniku były już w Polsce prowadzone [16-20] i warto je kontynuować.

W kolejnych artykułach autorzy postarają się to wyjaśnić.

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

Literatura

- [1] Bajda M., *Influence of the rubber cover on the conveyor belt's rolling resistance over idlers*, Dissertation Wrocław University of Technology 2009
- [2] Geesmann F.O.: *Experimentale und theoretische Untersuchungen der Bewegungswiderstände von Gurtforderanlagen*. Dissertation Universität Hannover 2001
- [3] Gładysiewicz L., *A method of determining the primary resistance of a belt conveyor with a particular consideration of belt properties*. Wrocław University of Technology Press, 1990
- [4] Günthner W.A., Tilke Ch., Rakitsch S., *Energy Efficiency in Bulk Materials Handling*. Bulk Solids Handling, Vol. 30 (2010), No. 3, Pages 138 – 142
- [5] Harrison A., *A Comparison of Friction Models for Conveyor Design*. Bulk Solids & Powder – Science & Technology • Vol. 4 (2009) No. 1, p. 23-33
- [6] Hintz A.: *Einfluss des Gurtaufbaus auf dem Energieverbrauch von Gurtforderanlagen*. Dissertation Universität Hannover 1993
- [7] Jayne I. O'Shea, Craig A. Wheeler, Paul J. Munzenberger, Daniel G. Ausling, *The Influence of Viscoelastic Property Measurements on the Predicted Rolling Resistance of Belt Conveyors*. Journal of Applied Polymer Science, 2014
- [8] Lodewijks, G., *Determination of Rolling Resistance of Belt Conveyors Using Rubber Data: Fact or Fiction?* Beltcon 12, South Africa, 2003
- [9] Spaans C.: *The calculation of the mine motion resistance of belt conveyors*. Bulk Solid Handling 11 (1991) Nr 4, str. 809-826
- [10] Ryszard Fajer, Eugeniusz Idziak, Zbigniew Konieczka, Adam Mrówka, Leszek Orzechowski, Tomasz Szczepaniak, 2011. *Optymalizacja rozwiązań technicznych przenośników taśmowych w PGE GiEK SA Oddział KWB Bełchatów*. Górnictwo

- i Geoinżynieria, Rok 35, Zeszyt 3/1, str. 2011
- [11] Tadeusz Glinka, 2005. *Zużycie energii elektrycznej w układach napędowych przenośników taśmowych*. Zeszyty Problematyczne – Maszyny Elektryczne nr 73/2005, str. 37-42.
- [12] Gładysiewicz L., Kawalec W., Król R. (2016). *Selection of carry idlers spacing of belt conveyor taking into account random stream of transported bulk material* [Dobór rozstawu krążników górnych przenośnika taśmowego z uwzględnieniem losowo zmiennej strugi urobku]. *Eksploatacja i Niezawodność* 18(1), pp. 32-37
- [13] Gładysiewicz, L., Król, R., Kisielewski, W., & Kaszuba, D. (2017). *Experimental determination of belt conveyors artificial friction coefficient*. *Acta Montanistica Slovaca*, 22(2), pp. 206-214
- [14] Król, R. (2017). *Studies of the durability of belt conveyor idlers with working loads taken into account*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95(4) doi:10.1088/1755-1315/95/4/042054
- [15] Gładysiewicz L., Król R., Bukowski J.: *Tests of belt conveyor resistance to motion*. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 2011, nr 3, s. 17-25. <http://www.ein.org.pl/2011-03-03>
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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

Informacje kontaktowe

Adres e-mail:
zsmgig@pwr.edu.pl

Adres do korespondencji:
**Katedra Geotechniki, Hydrotechniki,
Budownictwa Podziemnego i Wodnego
Politechnika Wrocławska
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
fax: 71 328 4814
tel: 71 320 4127**

sekretarz Komitetu Naukowego:
adrian.rozanski@pwr.edu.pl, tel. 71 320 40 78

sekretarz Komitetu Organizacyjnego:
maciej.sobotka@pwr.edu.pl, tel. 71 320 41 27

rejestracja uczestników:
aneta.herbut@pwr.edu.pl

Sponsorzy i Wystawcy:
irena.baginska@pwr.edu.pl



Politechnika Wrocławska

Katedra Geotechniki, Hydrotechniki,
Budownictwa Podziemnego i Wodnego



Katedra Geomechaniki,
Budownictwa i Geotechniki



POLSKIE TOWARZYSTWO
MECHANIKI SKAL

XLII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii

