

Wdrożenie metody obliczeń statycznych i dynamicznych wybranych parametrów trakcyjnych kolejek podwieszonych w warunkach PG Silesia

Implementation of a method for making static and dynamic calculations of selected traction parameters of suspended monorails in the conditions of PG Silesia



*Dr inż. Łukasz Boloż**



*Mgr inż. Zbigniew Ciepliński***



*Mgr inż. Roman Knapski***

Treść: Z eksploatacją surowców nierozłącznie związany jest transport kopalniany. W ostatnich latach kolejki podwieszane (podwieszane) stosowane są coraz częściej, a zgodnie z rozporządzeniem Ministra Energii dokumentacja układu transportu kolejką podwieszoną musi uwzględniać obliczenia trakcyjne. Brak jest jednak szczegółowych wytycznych dotyczących obliczeń potwierdzających prawidłowy dobór środków transportowych, zwłaszcza w zakresie obciążenia pojedynczych odrzwi oraz sił dynamicznych. W rozporządzeniu Ministra Energii podanych jest jedynie kilka ogólnych wytycznych. W związku z tym opracowano metodę obliczeń statycznych i dynamicznych wybranych parametrów trakcyjnych kolejek podwieszonych w warunkach PG SILESIA. Metoda została opracowana w Katedrze Inżynierii Maszyn i Transportu AGH przy ścisłej współpracy z Działem Przygotowania Produkcji i Inwestycji PG SILESIA. W artykule przedstawiono krótko tę metodę obliczeń oraz zaprezentowano przykład jej wdrożenia dla wybranego wyrobiska. Metodę wdrożono w kwietniu 2020 roku i jest stosowana do przeprowadzenia obliczeń dla wszystkich wyrobisk. Do października 2020 roku została zastosowana do przygotowania dokumentacji obliczeniowej dla tras w kilkunastu wyrobiskach.

Abstract: The exploitation of raw materials is inextricably linked with mine transport. In recent years, the use of suspended monorails has become increasingly common, and according to the ordinance of the Minister of Energy, the documentation of the suspended monorail transport system must take into account traction calculations. However, there are no detailed guidelines for calculations confirming the correct selection of the means of transport, especially with regard to the load of individual frames and dynamic forces. The regulation of the Minister of Energy contains only a few general guidelines. Therefore, a method for making static and dynamic calculations of selected traction parameters of suspended monorails in the conditions of PG SILESIA has been developed at the Department of Machine Engineering and Transport of AGH in close cooperation with the Department of Investments and Production Preparation at PG SILESIA. The article briefly describes this calculation method and presents an example of its implementation for a selected excavation. The method was implemented in April 2020 and used to carry out calculations for all the workings. Until October 2020, it was used to prepare calculation documentation for several excavations.

Słowa kluczowe:

kolejki podwieszane, kolejki podwieszane, obliczenia trakcyjne, metodyka obliczeń

Keywords:

suspended monorail system, traction calculations, computing methodology

*) AGH w Krakowie, Katedra Inżynierii Maszyn i Transportu

**) PG „SILESIA” Sp. z o.o.

1. Wstęp

Transport kopalniany jest niezbędnym elementem procesu wydobywczego każdego zakładu górniczego. W stosunku do transportu spągowego, transport kolejkami podwieszonymi (zwane również podwieszanymi) zastosowany został stosunkowo późno. Ze względu na sposób realizacji, kolejki podwieszane, zwane również podwieszanymi, są bardziej wymagające. Zestaw transportowy porusza się po szynie (odcinki o określonej długości), podwieszanej na łańcuchach zawieszonych do obudowy łukowej podatnej wyrobiska chodnikowego, popularnie zwanej i oznaczanej ŁP. Współczesne kolejki posiadają własny napęd spalinowy bądź elektryczny, wyposażone są w niezbędne elementy, między innymi wózki nośne, napędy, wózki hamowania awaryjnego (wózki hamulcowe, wózki awaryjne), maszynownię, kabinę operatora, jak również różnego typu belki transportowe (Antoniak 1980).

Belki transportowe różnego rodzaju przeznaczone są do przewozu materiałów, a po zastosowaniu łąw, do przewozu ludzi. Elementy zestawu połączone są ze sobą ciągłami. Zestaw transportowy o określonej długości i masie elementu obciąża obudowę wyrobiska. W zależności od konkretnej lokalizacji, wyrobisko może być poziome lub nachylone. Obciążenie wypadkowe działające na obudowę, w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez szynę pochodzi głównie od ciężaru elementów zestawu oraz od siły hamowania.

Prawidłowo przygotowana dokumentacja układu transportu kolejką podwieszoną, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Energii (w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych z dnia 23.11.2016, Dz.U. z 2017 poz. 1118 wraz ze zmianami) § 630 pkt 5 zawiera m.in: obliczenia trakcyjne, czyli dróg hamowania oraz maksymalnych transportowanych ciężarów użytecznych z uwzględnieniem dopuszczalnych obciążeń elementów złączanych, nośnych i zabezpieczających. Obliczenia te stanowią dla służb kopalnianych przygotowujących dokumentację transportu największy problem. Powodem tego stanu rzeczy jest konieczność używania do obliczeń wzorów ogólnych, gdyż w polskim prawodawstwie górniczym temat kolejek podwieszonych z napędem własnym oraz tras dla ich układów transportu jest potraktowany w sposób bardzo ogólny. Podane są wymagania, brak jest natomiast jasnych wytycznych co do sposobów wyliczenia kluczowych wartości.

Transport kolejkami podwieszonymi oraz same maszyny i urządzenia są zagadnieniami znanymi i opisanymi w literaturze dosyć dawno (Antoniak 1980). Tematem szeregu artykułów naukowych był rozwój transportu kopalnianego, kolejek podwieszonych lub wybranych aspektów tego transportu, jak rozwój napędów spalinowych czy elektrycznych (Pieczora 2008, Pieczora, Suffner 2013, Pieczora, Suffner 2017). W zakresie obciążeń statycznych i dynamicznych występujących w przypadku zastosowania kolejek podwieszonych znaleźć można kilka pozycji literaturowych. W jednym z artykułów autorzy przedstawili wyniki badań MES (FEM) wpływu prędkości jazdy na obciążenie obudowy oraz zachowanie transportowanych osób (Tokarczyk, Kania 2016). W kolejnym, jeden z autorów również przy wykorzystaniu obliczeń MES (FEM) przedstawił wpływ wybranych parametrów związanych z hamowaniem na transportowane osoby (Tokarczyk 2016). Następna publikacja dotyczy badań empirycznych sił w zawiesiach szyn i przyspieszeń działających podczas przejazdu i hamowania kolejek podwieszonych (Tokarczyk i in. 2020). W najnowszej literaturze znaleźć można również wyniki badań laboratoryjnych wytrzymałości elementów obudowy wyrobiska poddanej obciążeniu wynikającemu z zastosowania kolejek podwieszonych (Pytlik 2019).

Najszerzą pracą traktującą o parametrach zestawów kole-

jek podwieszonych jest opracowanie, w którym przedstawiono autorskie rozwiązanie komputerowego wspomaganie doboru kolejek. Oprogramowanie pozwala na konfigurację wymaganych elementów oraz sprawdzenie zgodności parametrów, zwłaszcza w zakresie wymaganej siły pociągowej i masy całkowitej, jak i użytecznej zestawu (Tokarczyk, Dudek 2020).

Analiza literatury w przedmiotowym zakresie oraz rozmowy przeprowadzone z pracownikami kopalń wykazały, że nie ma obecnie dostępnego opracowania dotyczącego obliczeń parametrów trakcyjnych zgodne z obowiązującymi w Polsce przepisami.

2. Opis systemu transportowego PG Silesia

Dla zapewnienia transportu materiałów i załogi, w Przedsiębiorstwie Górniczym „SILESIA” Sp. z o.o. (dalej PG Silesia) wykorzystuje się kolejki podwieszane. Kolejki w zależności od prowadzonego transportu, mają różne konfiguracje i występują w opcji z 4, 5 lub 6 napędami ciernymi, czasami z dołączanymi napędami zębatymi oraz 3, 4, 5 lub 6 belkami transportowymi, które w przypadku jazdy ludzi posiadają 8-osobowe łąwy. Do transportu sekcji obudowy zmechanizowanej stosuje się belkę ciężką oraz wózki hamulcowe. Wszystkie ciągniki przystosowane są do pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych niemietanowych i metanowych oraz do pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych zaliczonych do stopnia „a”, „b” lub „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu. Silniki kolejek przystosowane są do pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych zaliczonych do klasy „A” lub „B” zagrożenia wybuchem pyłu węglowego. Ciągniki spełniają ponadto wymogi aktualnie obowiązujących norm i przepisów w zakresie stosowania w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny (Bołoz 2020).

Zestawy transportowe kolejek podwieszonych ciernych poruszają się po torze jezdny z szyn kolejki podwieszanej wykonanych z profilu I155 wg PN lub I140E wg DIN o długości do 2000 mm. Podwieszane są do obudowy na zaczepach typu MB 1051/3.1, TRS-75/50 firmy „Scharf”, ZD 24C/120, V/KS firmy „PIOMA”, VDS firmy „DREMEX”, „Wostal” lub na zawiesiach firmy „STALPOL” – S51. Tor jezdny, po którym porusza się zestaw transportowy kolejki podwieszanej cierno-zębatej złożony jest z elementów toru BWTU 50/130. Trasa kolejki podwieszanej wykonana została z elementów firmy „PIOMA” i „Dremex” lub kompatybilnych z nimi elementów jezdnych innych wytwórców np. „SCHARF”, „WOSTAL” oraz „BECKER-WARKOP” (trasa dla kolejek podwieszonych z napędem zębatym oraz ciernym).

W PG Silesia transport kolejkami podwieszonymi stosowany jest zarówno do przewozu materiałów jak i ludzi. Stosowane są systemy transportowe firm FERRIT (Ferrits.r.o., Ferrit Poland Sp. z o.o.), SCHARF (SMT Scharf AG, SMT Scharf Polska Sp. z o.o.) oraz BECKER-WARKOP (Becker-Warkop Sp. z o.o.). W powyższych wymienionych systemach kolejek podwieszonych stosowane są lokomotywy spalinowe (ciągniki spalinowe) cztero-, pięcio- lub sześćo-napędowe.

3. Obowiązujące przepisy i wymagania

W Rozporządzeniu Ministra Energii w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych z dnia 23 listopada 2016 roku (Dz.U. 2017 poz. 1118) podano jedynie ogólne wymagania, jakie muszą zostać spełnione dla prowadzenia transportu kolejkami podwieszonymi. Nie podano jednak w jaki sposób obliczenia te należy wykonywać.

Na podstawie analizy przytoczonego rozporządzenia wraz z załącznikami zebrano wszystkie informacje dotyczące kolejek podwieszonych:

§ 122 pkt 4.

Maksymalna siła wypadkowa pochodząca od kolejki wraz z ładunkiem i obciążeniem pochodzącym od innych urządzeń, jaką można obciążyć pojedyncze odrzwia obudowy nie przekracza 40 kN. Stosowanie większych obciążeń jest dopuszczalne pod warunkiem przeprowadzenia obliczeń potwierdzających zachowanie stateczności obudowy wyrobiska.

§ 651. pkt 1.

Przewóz osób kolejkami podwieszonymi oraz spągowymi z prędkością większą niż 2 m/s jest niedopuszczalny.

Załącznik nr 4, pkt 4.9.8.

Wózki hamulcowe działają samoczynnie po przekroczeniu o 50%, jednak nie więcej niż o 1 m/s maksymalnej prędkości dopuszczalnej napędu podanej przez jego producenta w dokumentacji techniczno-ruchowej, i mają współczynnik statycznej pewności hamowania nie mniejszy niż 1,5 w stosunku do maksymalnej siły staczającej transportowany zespół, określonej w dokumentacji układu transportowego.

Załącznik nr 4, pkt 4.9.9.

Zestaw transportowy z napędem własnym jest wyposażony w urządzenie zabezpieczające przed przekroczeniem dopuszczalnej prędkości. Urządzenie to działa samoczynnie, również w przypadku zaniku zasilania, po przekroczeniu o 50%, jednak nie więcej niż o 1 m/s, maksymalnej prędkości dopuszczalnej napędu podanej przez jego producenta w dokumentacji techniczno-ruchowej o współczynniku statycznej pewności hamowania nie mniejszym niż 1,5 w stosunku do maksymalnej siły staczającej transportowany zestaw, określonej w dokumentacji układu transportowego, oraz zapewnia opóźnienie hamowania nie mniejsze niż 1 m/s² i nie większe niż 10 m/s².

Załącznik nr 4, pkt 4.9.19.

Napędy własne kolejek podwieszonych i spągowych, przeznaczone do stosowania w wyrobiskach pochyłych o nachyleniu nie większym niż 45° wykazują współczynnik pewności hamowania, wyznaczony jako stosunek maksymalnej siły hamownia do maksymalnej siły pociągowej napędu własnego, nie mniejszy niż 1,5 oraz powodują, że opóźnienie hamowania zestawu transportowego wynosi nie mniej niż 1 m/s² i nie więcej niż 10 m/s².

4. Założenia do metody obliczeń

W PG Silesia, jak również w pozostałych Zakładach Górniczych używane kolejki podwieszane mają coraz więcej napędów hydraulicznych (kiedyś normą były 4, obecnie 6, czasami z dodatkowym napędem zębatym). Schodząc głębiej z eksploatacją i uwzględniając nachylenie złoża, kolejki muszą poruszać się po coraz dłuższych odcinkach wyrobisk o znacznym nachyleniu. Po wprowadzeniu w życie przywoływanych powyżej przepisów odpowiedzialność za zatwierdzenie różnych dokumentacji związanych z układami transportu spoczywa na Kierowniku Ruchu Zakładu Górniczego. Brak jest łatwo dostępnych wytycznych dotyczących wykonywania obliczeń niezbędnych dla potwierdzenia prawidłowości doboru środków transportowych w szczególności dotyczących obciążeń dynamicznych (w tym jazdy ludzi), a literatura fachowa w tym zakresie nie jest bogata. Powyższe powody legły u podstaw nawiązania współpracy pomiędzy PG Silesia a Katedrą Inżynierii Maszyn i Transportu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, której celem było opracowanie nowej metodyki obliczeń. Jako dane wejściowe do projektu wykorzystano parametry stosowanych układów transportowych,

nachylenia wyrobisk oraz szeroko pojęte warunki i stosowane technologie górnicze w PG Silesia. Założono, że w efekcie powstać ma metodyka obliczeń oraz oparte na niej narzędzie informatyczne. Narzędzie informatyczne po wprowadzeniu danych wejściowych ma podawać gotowe wyniki oraz porównywać je do wartości wynikających z przepisów, podając informację o spełnieniu bądź niespełnieniu wymaganych warunków (Bołoz 2020).

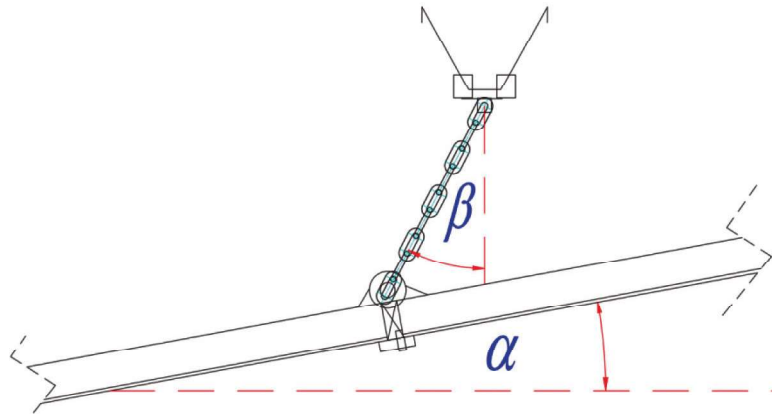
Zgodnie z wymaganiami opracowanie miało dotyczyć wybranych obliczeń trakcyjnych kolejek podwieszonych oraz obliczeń sił obciążających pojedyncze odrzwia obudowy. Kluczowymi elementami metody było obliczenie:

- obciążenia użytecznego,
- obciążenia kolejki dla zadanego kąta α na podstawie nomogramu lub tabeli obciążeń (zgodnie z DTR kolejki),
- siły staczania grawitacyjnego kolejki dla zadanego kąta α przy maksymalnym dopuszczalnym obciążeniu,
- prędkości rozpoczęcia hamowania przy zadanym kącie α , czasie wyzwolania ograniczników prędkości oraz ograniczenia prędkości dla zadziałania hamulców, wózków hamulcowych,
- energii hamowania,
- efektywnej siły hamowania dla całości kolejki, pojedynczego napędu lub wózka/ów hamulcowych z uwzględnieniem wytrzymałości wzdłużnej szyn trasy kolejki podwieszonej,
- drogi hamowania dla maksymalnie obciążonej kolejki podwieszanej dla hamulców kolejki oraz kolejki wyposażonej w wózki hamulcowe,
- opóźnienia hamowania dla maksymalnie obciążonej kolejki podwieszanej,
- współczynnika pewności hamowania,
- obciążenia dynamicznego działającego na obudowę podczas hamowania obciążonej kolejki podwieszanej, rozkładającego się na rozpory pomiędzy łukami obudowy,
- ciężarów użytecznych dla zadanego kąta α (zgodnie z DTR kolejki),
- obliczenia dopuszczalnej prędkości jazdy obciążonej kolejki podwieszanej (zgodnie z DTR kolejki),
- pionowej siły statycznej od kolejki z materiałem na pojedyncze odrzwia obudowy przy zadanym kącie α i β (nachylenie trasy oraz odchylenie łańcucha zawiesia trasy od pionu) oraz siły dynamicznej od hamującej kolejki z materiałem na pojedyncze odrzwia obudowy przy zadanym kącie α i β (nachylenie trasy oraz odchylenie łańcucha zawiesia trasy od pionu jak pokazano na rys. 1).

Opracowana metodyka obliczeń została oparta o szereg założeń, wymagań i warunków dotyczących tylko i wyłącznie transportu w PG Silesia. Sprecyzowano szereg wymagań, wynikających z warunków górniczo-geologicznych, stosowanych technologii oraz obowiązujących przepisów.

Zgodnie z technologią zabudowy obudowy łukowej podanej w PG Silesia, zakłada się, że odrzwia obciążone są masą zawiesia z łańcuchem, szyny, masą własną zestawu oraz masą transportowaną (materiał, załoga włącznie z operatorem). Dodatkowe wyposażenie wyrobiska montowane jest do odrzwi, na których nie jest podwieszona trasa kolejki. W opracowanej metodzie uwzględniono jedynie maszyny i urządzenia stosowane i transportowane w PG Silesia.

Ustawodawca w odniesieniu do podanej wartości granicznej 40 kN obciążenia wypadkowego na pojedyncze odrzwia, nie precyzuje współczynników bezpieczeństwa ani procedury obliczeń. W związku z tym przyjęto, że wypadkowa wartość obliczeniowa, przy uwzględnieniu sprecyzowanych i uzgodnionych założeń, nie może być większa od wartości podanej, niezależnie od kierunku i zwrotu. Podana powyżej wartość graniczna, zgodnie z rozporządzeniem może zostać



Rys. 1. Schemat pomiaru i oznaczenie kąta nachylenia trasy i odchylenia łańcucha (PG Silesia)

Fig. 1. Diagram of measurement and determination of the inclination angle and chain deviation (PG Silesia)

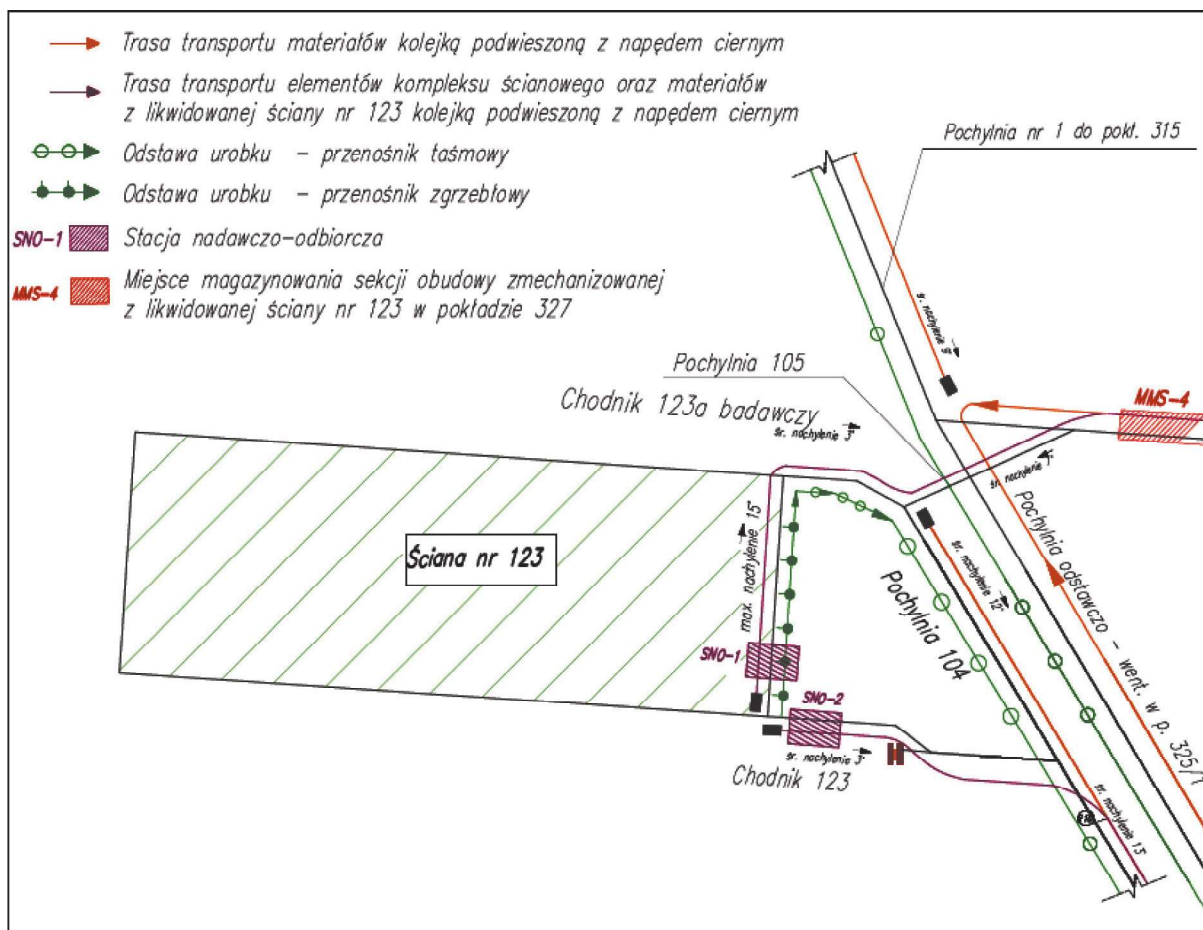
zwiększona, jednak wymaga to potwierdzenia obliczeniami. Ze względu na warunki występujące w PG Silesia oraz doświadczenia kopalni związane z transportem ciężkich ładunków uzgodniono, że obliczenia, jeżeli są przeprowadzane, to do wartości 50 kN.

5. Metoda obliczeń na przykładzie wybranego wyrobiska

Należy zwrócić uwagę na praktyczny wymiar opracowanej metody. PG Silesia używa arkusza obliczeniowego

do wykonania obliczeń trakcyjnych we wszystkich nowo opracowywanych dokumentacjach układów transportu kolejką podwieszoną. Obliczenia w opisywany sposób wykonywane są od maja 2020 r. Do października 2020 roku przeprowadzono kilkanaście obliczeń na potrzeby dokumentacji układu transportu kolejką podwieszoną. Sposób prowadzenia obliczeń oraz możliwości arkusza kalkulacyjnego przedstawiono na przykładzie układu transportu z likwidowanej ściany nr 123 (rys. 2).

Do arkusza wprowadzono między innymi podstawowe dane wyrobiska:



Rys. 2. Fragment schematu układu transportu z likwidowanej ściany nr 123

Fig. 2. Fragment of the diagram of the transport system from the decommissioned longwall No. 123

- nachylenie: maksymalne lokalnie 15° w obcince likwidacyjnej ściany nr 123,
- typ kolejki: Ferrit DLZ 210 F-II z 6 napędami ciernymi,
- belka transportowa: hydrauliczna belka transportowa ZAMPRA HPM TDS 6/10 w konfiguracji QUADRO (oznaczona jako belka wysokoobciążalna SGL),
- wózki awaryjne: Typu WHR-1/N/78 w układzie TRIO,
- transport kompletnych sekcji obudowy zmechanizowanej typu:
 - FAZOS 14/41-2x3380 (sekcje liniowe) o masie 19 860 kg (bez UH),
 - FAZOS 14/41-2x3380-1 (sekcje skrajne) o masie 20 861 kg (bez UH).

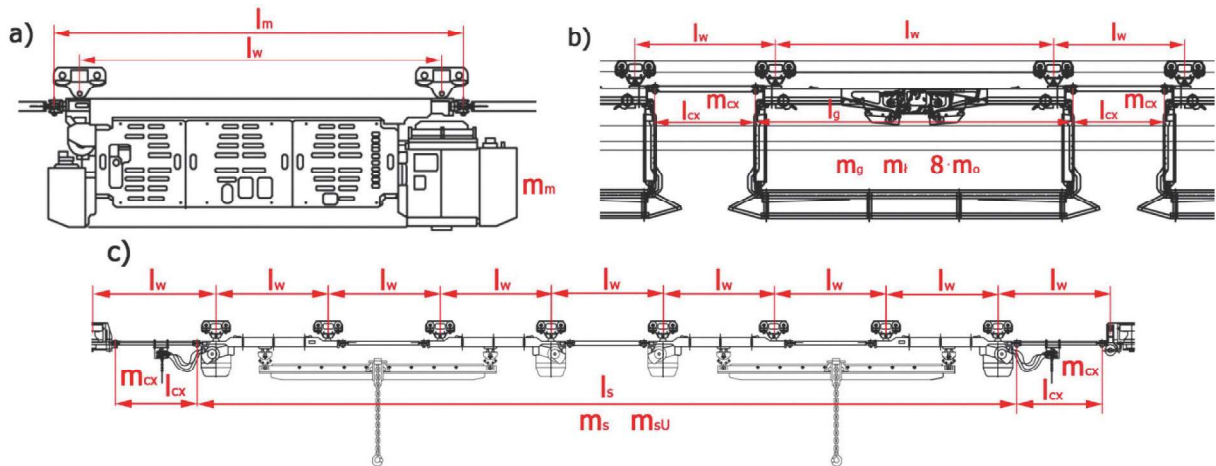
Do obliczeń przyjęto jako ciężar masy transportowanej 21 000 kg. Zrzut z arkusza kalkulacyjnego z obszaru podstawowych parametrów jazdy z kompletnymi danymi analizowanego systemu transportowego oraz wstępnymi obliczeniami przedstawiono na rys. 3.

Schemat dla oznaczeń długości i masy elementów oraz rozstawu wózków pokazano na przykładzie części maszynowej oraz belki GHB z ławą do przewozu ludzi, jak również uwzględnionej w obliczeniach belki wysokoobciążalnej SLG. Na podstawie wprowadzonych danych arkusz sprawdza kolejne warunki: masę użyteczną (lub własną) oraz siłę pociągową w odniesieniu do wartości dopuszczalnych dla danego zestawu oraz dopuszczalną wartość kąta nachylenia wyrobiska. Następnie wprowadzana jest informacja o transporcie ludzi (wartości tak/nie) oraz dane z nomogramu lokomotywy, na podstawie których obliczane i sprawdzane są dopuszczalne prędkości jazdy.

Dalsza część obliczeń, przedstawiona na rys. 5, dotyczy obciążenia generowanego na łańcuchach przez poszczególne elementy zestawu transportowego. Każdy z elementów zestawu w zależności od masy działa określoną reakcją na wózek poruszający się po szynie. W efekcie wybierany jest najmniej korzystny przypadek obciążający pojedyncze odrzwia (siły P_1

AGH		PG SILESIA				KIMIT	
		Obliczenia statyczne i dynamiczne wybranych parametrów trakcyjnych kolejek podwieszonych w warunkach PG Silesia					
		Kolejka nr 12 - Ferrit 210F-II,6 napędów + HPM TDS				AGH, KIMIT 2020, v3	
		Masa i długość zestawu					
	symbol	masa własna m [kg]	długość l [m]	liczba i [-]	masa użyteczna m [kg]		
PODSTAWOWE PARAMETRY JAZDY	Kabina z wózkiem nośnym	k	727,0	1,8	2		
	Operator	op	200,0				
	Część maszynowa z napędem	m	3 250,0	3,7	1		
	Napęd cierny	n	475,0	0,8	6		
	Napęd zębaty	z	0,0	0,0	0		
	Jednostka pomocnicza	p	710,0				
	Wózek hamulcowy	h	207,0	0,7	3		
	Belka nośna z 2 wózkami (np. GHB)	z (g)	0,0	0,0	0	0,0	
	Belka nośna z 8 wózkami (np. SLG)	8 (s)	3 500,0	14,4	1	21000,0	
	Ława do przewozu osób	ł	0,0		0		
	Przewóz osób	o			0	0,0	
	Belka dodatkowa	d	0,0	0,0	0	0,0	
	Cięgło 1	c1	22,0	0,5	3		
	Cięgło 2	c2	22,0	0,3	3		
	Cięgło 3	c3	22,0	1,2	4		
	Cięgło 4	c4	22,0	1,0	3		
	Długość zestawu	l_{zest}	38,9	[m]			WARUNEK m_{zest}
	Masa zestawu	m_{zest}	33871,0	[kg]			nie dotyczy
Masa własna	m_w	8885,0	[kg]			WARUNEK m_u	
Masa użyteczna	m_u	24986,0	[kg]			OK	
Masa transportowana	m_T	21000,0	[kg]				
Wartości dopuszczalne masy i prędkości				WARUNEK (kąt, siła)			
Kąt nachylenia wyrobiska	α	15,0	[deg]			OK	
Siła pociągowa	F_{poc}	165,0	[kN]			OK	
Maksymalna siła pociągowa	F_{pocmax}	165,0	[kN]				
Prędkość minimalna	v_{min}	0,0	[km/h]				
Prędkość maksymalna	v_{max}	7,5	[km/h]				
Nomogram dotyczy masy użytecznej	-	T	T / N				
Jazda ludzi	-	N	T / N				
Wartość odczytanej masy	m_{max}	45,00	[Mg]			masa użyteczna	
Prędkość odczytana z nomogramu	v_{max}	2,00	[km/h]			$v_{min} < v < v_{max}$	
Prędkość z uwzględnieniem min/max	v	0,56	[m/s]			przyjęto v	
Rzeczywista transportowana masa	m_T	21 000,00	[Mg]				
Prędkość z uwzględnieniem rzeczywistej masy	v_T	3,2	[km/h]				
Prędkość z uwzględnieniem min/max	v_T	0,89	[m/s]			$v_{min} < v < v_{max}$	
Końcowa wartość transportowej prędkości jazdy	v_T	0,89	[m/s]			material	

Rys. 3. Pierwsza strona arkusza z wprowadzonymi danymi oraz obliczeniami wstępnymi
 Fig. 3. First page of the spreadsheet with the entered data and preliminary calculations



Rys. 4. Schemat dla wprowadzania mas i długości: a) część maszynowa, b) belka GHB z ławą do przewożenia ludzi, c) belka wysokoobciążalna SLG

Fig. 4. Diagram for entering the masses and lengths: a) machine part, b) GHB beam with a bench for transporting people, c) SLG high-load beam

Obciążenie wózków nośnych elementów kolejki			
Przyspieszenie ziemskie	g	9,81	[m/s^2]
Cięgło części maszynowej	m_{cm}	0,0	[kg]
Cięgło belki z 8 wózkami (np. SLG)	$m_{cb} (m_{ca})$	22,0	[kg]
Cięgło belki z 2 wózkami (np. GHB)	$m_{cb} (m_{cb})$	0,0	[kg]
Cięgło belki dodatkowej	m_{cd}	0,0	[kg]
Obciążenie wózka część maszynowej	P_m	15,94	[kN]
Obciążenie wózka belki z 8 wózkami (np. SLG)	$P_8 (P_8)$	30,15	[kN]
Obciążenie wózka belki z 8 wózkami bez ciągnięcia	$P_8 (P_8)$	30,04	[kN]
Obciążenie wózka belki z 2 wózkami (np. GHB)	$(P_2) P_2$	0,00	[kN]
Obciążenie wózka belki z 2 wózkami i z ławą	P_l	0,00	[kN]
Obciążenie wózka belki dodatkowej	P_d	0,00	[kN]
Obciążenie wózka innym elementem	P_{dw}	0,00	[kN]
Wybrana wartość obciążenia	P_1	30,15	[kN]
Wybrana wartość obciążenia	P_2	30,15	[kN]

Maksymalna pionowa siła od ciężaru zestawu obciążająca łańcuch			
Długość szyny	l_{sz}	2,00	[m]
Rozstaw wózków nośnych	l_w	2,00	[m]
Położenie wózka nośnego $\langle 0, l_{sz} \rangle$	x_v	2,000	[m]
Niekorzystne położenie wózka	x_v	2,000	[m]
Siła reakcji na początku szyny	R_1	0,00	[kN]
Siła reakcji na końcu szyny	R_2	30,15	[kN]
Maksymalna siła obciążająca łańcuch	F	30,15	[kN]

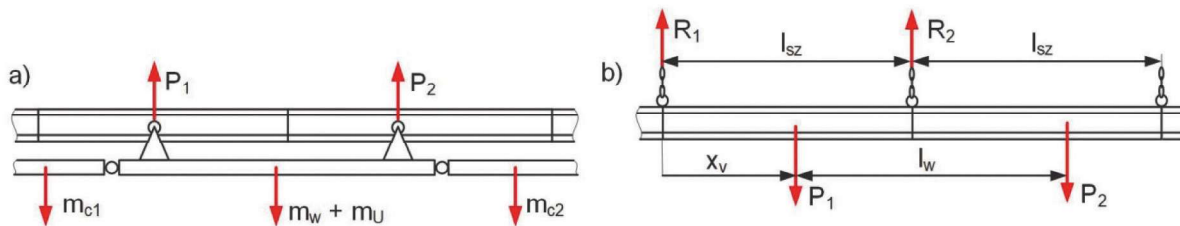
Opory ruchu zestawu			
Promień zewnętrzny krążka wózka nośnego	R_k	59,0	[mm]
Współczynnik tarcia tocznego	f	0,05	[mm]
Siła oporów ruchu zestawu	F_{tr}	0,27	[kN]

Siła staczania grawitacyjnego			
Siła staczania grawitacyjnego	F_h	85,7	[kN]

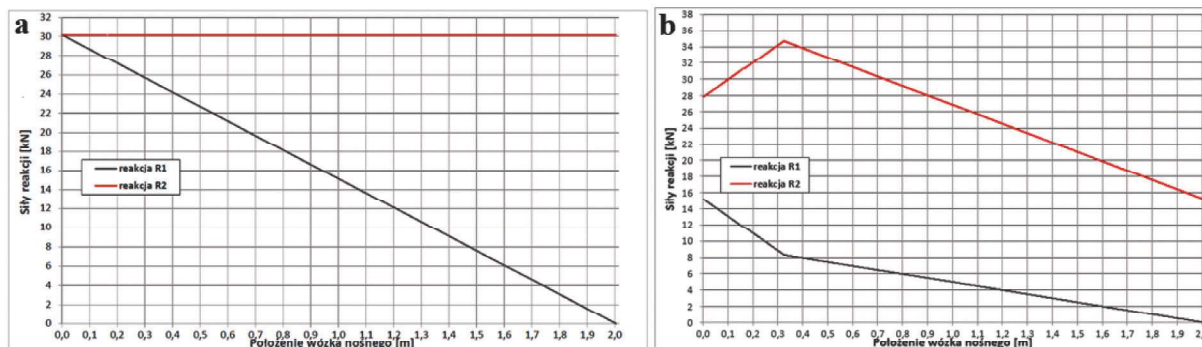
Rys. 5. Druga strona obliczeń podstawowych parametrów jazdy
Fig. 5. Second page of basic parameters calculations

i P_2), co pokazano na rys. 6a. W analizowanym przypadku najmniej korzystne jest obciążenie wynikające z wózków belki SLG, gdyż obciążenie od części maszynowej jest niemal dwukrotnie mniejsze. Obciążenie przekazywane z wózków na łańcuch i odrzwia obudowy zależy od odległości między poszczególnymi wózkami. Na rys. 6b pokazano schemat obciążenia, przy czym poszukiwana jest największa wartość reakcji R_2 , która zmienia się podczas przejazdu zestawu w funkcji odległości x_v . Uwzględniając powyższe, arkusz przedstawia na wykresie (rys. 7a) przebieg wartości siły R_2 podczas przejazdu zestawu. Do dalszych obliczeń uwzględniane jest najmniej korzystne położenie zestawu względem odrzwia. W analizowanym przypadku najgorszą sytuacją jest położenie wózka na łączeniu szyn (rys. 7a), natomiast zdarza się, że najmniej korzystny przypadek występuje w innym położeniu, co pokazano na rys. 7b. Następnie obliczane są opory ruchu zestawu oraz siła staczania grawitacyjnego (rys. 5, rys. 8a).

Kolejna część arkusza (rys. 9) dotyczy obliczeń i warunków podczas hamowania napędami. Najpierw obliczane są wielkości związane z efektywną siłą hamowania, wytrzymałością wzdłużną złączy szyn, siłą w łańcuchu oraz obciążeniem wzdłużnym



Rys. 6. Schemat obciążenia: a) elementy kolejki obciążają wózki, b) wózki obciążają zawiesia obudowy
 Fig. 6. Load pattern: a) monorail components are loaded by cars b) monorail cars load the support slings



Rys. 7. Przebieg reakcji R_2 w łańcuchu podczas przejazdu zestawu: a) analizowany przypadek, b) przykład nietypowego przebiegu wartości siły reakcji w łańcuchu

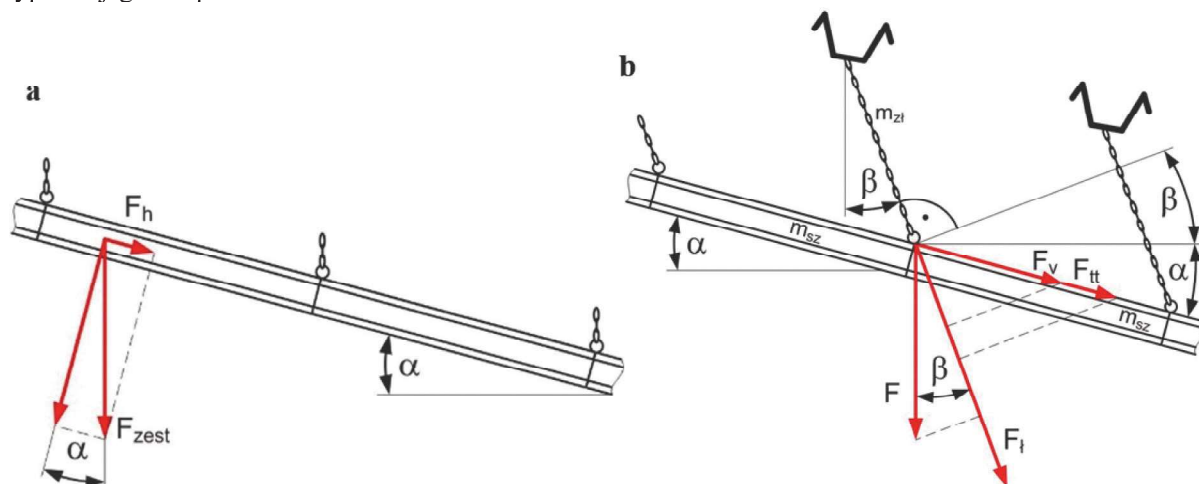
Fig. 7. Course of the R_2 reaction in the chain during the run of the set: a) analysed case, b) example of a non-typical course of the reaction force in the chain

rozpór. Arkusz informuje o spełnieniu kolejnych warunków, gdzie najważniejsze jest całkowite obciążenie odrzwi, nieprzekraczające 40 kN (rys. 8b). W przypadku konieczności zmienić można wartość dopuszczalną obciążenia odrzwi, co wymaga dołączenia do dokumentacji dodatkowych obliczeń dla wartości 50 kN. Po podaniu prędkości uruchomienia hamulców oraz zwłoki zadziałania hamulców obliczany jest szereg wielkości, takich jak opóźnienie hamowania, efektywna siła hamowania, droga i czas hamowania, jak również energia hamowania. Arkusz sprawdza czy opóźnienie hamowania mieści się w wymaganym zakresie. Dodatkowo dla hamowania wózkami hamulcowymi weryfikowana jest wartość prędkości zadziałania wózków hamulcowych w stosunku do maksymalnej prędkości lokomotywy. Arkusz sprawdza również warunek występowania hamowania i informuje w przypadku jego niespełnienia.

Ostatnia część obliczeń (rys. 10) dotyczy analogicznych obliczeń, jednak dla hamowania awaryjnymi wózkami hamulcowymi. W przypadku awaryjnego hamowania nie ma konieczności sprawdzania prędkości hamowania. Ostatnią część obliczeń podaje również podsumowanie obliczeń, wskazując czy spełnione są wszystkie warunki łącznie z informacją o zastosowaniu awaryjnych wózków hamulcowym.

Należy również zwrócić szczególną uwagę na fakt, iż arkusz kalkulacyjny sprawdza czy spełnione są wszystkie warunki w nim zawarte (łącznie 19 warunków) oraz, co jest ważne, wskazuje, czy konieczne są obliczenia rzeczoznawcy dla możliwości obciążenia pojedynczych odrzwi obudowy siłą większą niż dopuszczone przez przepisy 40 kN.

W przypadku gdy niespełnione są wszystkie warunki, arkusz informuje, w miejscu gdzie zapisano dany warunek, co zostało przekroczone oraz podaje w podsumowaniu liczbę



Rys. 8. Schemat do wyznaczenia: a) siły staczania, b) obciążenia wypadkowego łańcucha i obudowy
 Fig. 8. Diagram for determining: a) rolling force, b) resultant load of the chain and housing

HAMOWANIE NAPĘDAMI				
Siła hamowania				WARUNEK ($F_{vh} \geq 1,5F_{th}$)
Siła hamowania pojedynczego napędu	F_{Bh}	42	[kN]	OK
Liczba hamulców	i_{Bh}	8	[-]	WARUNEK ($F_{vh} \geq 1,5F_{pocMAX}$)
Siła hamowania zestawu napędami	F_{vh}	336	[kN]	OK
HAMOWANIE NAPĘDAMI				
Siła wzdłużna obciążająca złącze szyny				
Dopuszczalna siła wzdłużna w złączu szyny	F_{zszMAX}	165	[kN]	
Liczba złączy szyn na długości zestawu	l_{zsz}	19	[-]	WARUNEK ($F_{zszh} \leq F_{zszMAX}$)
Siła wzdłużna obciążająca złącze szyny	F_{zszh}	17,7	[kN]	OK
HAMOWANIE NAPĘDAMI				
Wypadkowa siła obciążająca obudowę				
Wykonano obliczenia obudowy na 50 kN	-	N	T/N	
Dopuszczalne obciążenie wypadkowe obudowy	F_{BMAX}	40	[kN]	zgodnie z rozporządzeniem
Kąt odchylenia tańcucha od pionu	β	10	[deg]	
Masa zawiesia i tańcucha	m_{zt}	15	[kg]	
Masa szyny	m_{sz}	80	[kg]	
Liczba złączy szyn na długości zestawu	l_z	20	[-]	WARUNEK ($F_{th} \leq F_{BMAX}$)
Wypadkowa siła obciążająca obudowę	F_{th}	37,73	[kN]	OK
HAMOWANIE NAPĘDAMI				
Siła obciążająca rozpory				
Siła całkowita na kierunku rozpory	F_{rozh}	15,95	[kN]	
Dopuszczalna siła w rozporze	F_{rozMAX}	40	[kN]	WARUNEK ($i_{rozhMIN} \leq 2$)
Wymagana liczba rozpór	$i_{rozhMIN}$	0,40	[-]	OK
HAMOWANIE NAPĘDAMI				
Pozostałe wielkości podczas hamowania napędami				
Prędkość uruchomienia hamulców	v_h	3,02	[m/s]	
Zwłoka zadziałania hamulców	t_{zh}	0,50	[s]	WARUNEK ($1 < a_{hh} \leq 10$)
Opóźnienie od siły hamowania	a_{hh}	9,92	[m/s ²]	OK
Opóźnienie wypadkowe	a_{wh}	7,39	[m/s ²]	
Efektywna siła hamowania	F_{wh}	250,27	[kN]	
Prędkość zestawu przy zadziałaniu hamulców	v_{ph}	4,29	[m/s]	
Droga zestawu przy zadziałaniu hamulców	s_{oh}	1,83	[m]	
Droga hamowania	s_{hh}	3,07	[m]	
Czas hamowania	t_{hh}	1,08	[s]	
Energia hamowania	E_{hh}	364,466	[kJ]	
				HAMOWANIE WYSTĘPUJE

Rys. 9. Strona trzecia arkusza – obliczenia dla hamowania napędami

Fig. 9. Third page of the sheet – calculations for braking with drives

niespełnionych warunków. Na rys. 11 przedstawiono przykładowe obliczenia dla sytuacji, gdzie nie zostały spełnione niektóre warunki oraz wymagane jest wykonanie obliczeń dla podwyższonej dopuszczalnej wartości obciążenia obudowy.

6. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych prac i obliczeń powstała metoda obliczeń statycznych i dynamicznych wybranych parametrów trakcyjnych kolejek podwieszonych w warunkach PG Silesia, w której zawarty został precyzyjny opis wykonywania niezbędnych obliczeń. Na podstawie opracowania przygotowany został arkusz kalkulacyjny, w którym wszystkie niezbędne obliczenia wykonywane są automatycznie po

wprowadzeniu dokładnych danych wejściowych. Arkusz dodatkowo sprawdza i informuje o spełnieniu wszystkich wymaganych warunków, których łącznie jest 19.

Osoby projektujące układy transportu kolejkami podwieszonymi muszą zmierzyć się z trzema głównymi problemami, to jest coraz większą siłą uciążu generowaną przez napędy (również ich większą ilością) oraz masą transportowanych maszyn i urządzeń i zwiększającymi się nachyleniami wyrobisk. Należy również zwrócić uwagę na szczególne zasady bezpieczeństwa przy transporcie pracowników. Wykonywanie obliczeń dla kilku zestawów transportowych poruszających się w układzie transportowym było dotychczas pracochłonne oraz dodatkowo obciążone możliwością popełnienia błędu. Dodatkowo obliczenia obciążeń dynamicznych (np. podczas hamowania) obciążone były możliwością popełnienia błędu

HAMOWANIE WÓZKAMI HAMULCOWYMI					
Siła hamowania					
Siła hamowania pojedynczego wózka	F_{hw}	78	[kN]		
Liczba wózków	i_{hw}	3	[-]	WARUNEK ($F_{vw} \geq 1,5F_h$)	
Siła hamowania zestawu wózkami	F_{vw}	234	[kN]	OK	
HAMOWANIE WÓZKAMI HAMULCOWYMI					
Siła wzdłużna obciążająca złącze szyny				WARUNEK ($F_{zszw} \leq F_{zszwMAX}$)	
Siła wzdłużna obciążająca złącze szyny	F_{zszw}	12,32	[kN]	OK	
HAMOWANIE WÓZKAMI HAMULCOWYMI					
Wypadkowa siła obciążająca obudowę				WARUNEK ($F_{tw} \leq F_{tMAX}$)	
Wypadkowa siła obciążająca obudowę	F_{tw}	35,58	[kN]	OK	
HAMOWANIE WÓZKAMI HAMULCOWYMI					
Siła obciążająca rozpory					
Siła całkowita na kierunku rozpory	F_{rozw}	15,03	[kN]	WARUNEK ($i_{rozwMIN} \leq 2$)	
Wymagana liczba rozpór	$i_{rozwMIN}$	0,38	[-]	OK	
HAMOWANIE WÓZKAMI HAMULCOWYMI					
Pozostałe wielkości podczas hamowania napędami				$v_w \leq 1,5v_{max}$ - WARUNEK - $v_w \leq v_{max}+1$	
Prędkość uruchomienia hamulców	v_w	3,00	[m/s]	OK	
Zwłoka zadziałania hamulców	t_{zw}	0,70	[s]	WARUNEK ($1 < a_{hw} \leq 10$)	
Opóźnienie od siły hamowania	a_{hw}	6,91	[m/s ²]	OK	
Opóźnienie wypadkowe	a_{wvw}	4,38	[m/s ²]	HAMOWANIE WYSTĘPUJE	
Efektywna siła hamowania	F_{efw}	148,27	[kN]		
Prędkość zestawu przy zadziałaniu hamulców	v_{pw}	4,77	[m/s]		
Droga zestawu przy zadziałaniu hamulców	s_{pw}	2,72	[m]		
Droga hamowania	s_{hw}	5,32	[m]		
Czas hamowania	t_{hw}	1,79	[s]		
Energia hamowania	E_{hw}	497,431	[kJ]		
WSZYSTKIE WARUNKI SĄ SPEŁNIONE:					TAK
LICZBA NIESPEŁNIONYCH WARUNKÓW:					Wszystkie spełnione
CZY WYMAGANE SĄ OBLICZENIA NA 50 kN:					NIE
CZY WYMAGANE SĄ WÓZKI HAMULCOWE:				TAK	
CZY ZASTOSOWANO WÓZKI HAMULCOWE:				TAK	

Rys. 10. Strona czwarta arkusza – obliczenia dla hamowania wózkami z podsumowaniem obliczeń
 Fig. 10. Page four of the worksheet – calculations for monorail car braking with a summary of the calculations

wynikającego z rozpatrywania działania siły wzdłuż składu na jego długości. Dzięki opisywanej metodzie i narzędziu informatycznemu znacznie skrócony został czas wykonywania obliczeń, a do dokumentacji dołączany jest gotowy wydruk z wynikami obliczeń. Ze względu na zastosowane w arkuszu zabezpieczenia możliwe jest jedynie wprowadzanie danych wejściowych zgodne z założonymi zakresami. Pozostała część arkusza jest zablokowana. Jednocześnie użytkownik ma łatwość identyfikacji pól (w podziale na wprowadzenie danych, wybór parametrów, wartości obliczone). Daje to pewność, że za każdym razem obliczenia wykonywane są

według takiej samej metodyki. Dodatkowo uwzględniono w arkuszu (zgodnie z § 122 pkt.4 rozporządzenia Ministra Energii) możliwość obciążenia odrzwi obudowy siłą większą od 40 kN. Należy zwrócić uwagę, iż w większości przypadków producenci deklarują nośność złącza szyn na poziomie 50 kN. Oczywiście zwiększenie dopuszczalnego obciążenia odrzwi odbywa się za zgodą i na warunkach określonych przez Kierownika Działu Górniczego.

Posiadanie opracowania, które wskazuje metodykę obliczeń przy bardzo skąpych zapisach w przepisach oraz niewielkim zasobie literatury fachowej pozwala na projek-

Siła hamowania				WARUNEK ($F_{vh} \geq 1,5F_h$)
Siła hamowania pojedynczego napędu	F_{Bh}	42	[kN]	za mała siła hamowania
Liczba hamulców	i_{Bh}	5	[-]	WARUNEK ($F_{vh} \geq 1,5F_{pocMAX}$)
Siła hamowania zestawu napędami	F_{vh}	210	[kN]	OK
HAMOWANIE NAPĘDAMI				
Siła wzdłużna obciążająca złącze szyny				
Dopuszczalna siła wzdłużna w złączu szyny	F_{zszMAX}	1	[kN]	
Liczba złączy syn na długości zestawu	l_{zsz}	170	[-]	WARUNEK ($F_{zsz} \leq F_{zszMAX}$)
Siła wzdłużna obciążająca złącze szyny	F_{zszh}	1,2	[kN]	za duża siła wzdłużna
HAMOWANIE NAPĘDAMI				
Wypadkowa siła obciążająca obudowę				
Wykonano obliczenia obudowy na 50 kN	-	T	T/N	
Dopuszczalne obciążenie wypadkowe obudowy	F_{MAX}	50	[kN]	wymagane potwierdzenie!
Pozostałe wielkości podczas hamowania napędami				
Prędkość uruchomienia hamulców	v_h	0,70	[m/s]	
Zwłoka zadziałania hamulców	t_{zh}	0,70	[s]	WARUNEK ($1 < a_{hh} \leq 10$)
Opóźnienie od siły hamowania	a_{hh}	1,26	[m/s ²]	OK
Opóźnienie wypadkowe	a_{wh}	-1,26	[m/s ²]	BRAK HAMOWANIA
Efektywna siła hamowania	F_{efh}	błąd	[kN]	
Prędkość zestawu przy zadziałaniu hamulców	v_{ph}	błąd	[m/s]	
Droga zestawu przy zadziałaniu hamulców	s_{oh}	błąd	[m]	
Droga hamowania	s_{hh}	błąd	[m]	
Czas hamowania	t_{hh}	błąd	[s]	
Energia hamowania	E_{hh}	błąd	[kJ]	
HAMOWANIE WÓZKAMI HAMULCOWYMI				
Pozostałe wielkości podczas hamowania napędami				$v_w \leq 1,5v_{max}$ - WARUNEK - $v_w \leq v_{max}+1$
Prędkość uruchomienia hamulców	v_w	10,00	[m/s]	nie wym. nie wym.
Zwłoka zadziałania hamulców	t_{zw}	0,70	[s]	WARUNEK ($1 < a_{hw} \leq 10$)
Opóźnienie od siły hamowania	a_{hw}	0,00	[m/s ²]	nie jest wymagane
Opóźnienie wypadkowe	a_{ww}	-2,53	[m/s ²]	nie jest wymagane
Efektywna siła hamowania	F_{efw}	błąd	[kN]	
Prędkość zestawu przy zadziałaniu hamulców	v_{pw}	błąd	[m/s]	
Droga zestawu przy zadziałaniu hamulców	s_{ow}	błąd	[m]	
Droga hamowania	s_{hw}	błąd	[m]	
Czas hamowania	t_{hw}	błąd	[s]	
Energia hamowania	E_{hw}	błąd	[kJ]	
WSZYSTKIE WARUNKI SĄ SPEŁNIONE:				NIE
LICZBA NIESPEŁNIONYCH WARUNKÓW:				3
CZY WYMAGANE SĄ OBLICZENIA NA 50 kN:				TAK
CZY WYMAGANE SĄ WÓZKI HAMULCOWE:				NIE
CZY ZASTOSOWANO WÓZKI HAMULCOWE:				NIE

Rys. 11. Przykładowe zrzuty z arkusza w przypadku niespełnienia warunków

Fig. 11. Examples of spreadsheet screenshots in case of failure to meet the conditions

towanie układów transportowych kolejkami podwieszonymi z zachowaniem wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Należy zaznaczyć, że przedmiotowa metoda oraz arkusz kalkulacyjny dowodzą poprawności przeprowadzonych w kopalni obliczeń w przypadku kontroli układów transportu i dokumentacji z nimi związanych przez organy nadzoru górniczego. Przedmiotowa metoda obliczeń wskazuje tylko jeden właściwy sposób ich wykonywania. Taka sytuacja ogranicza wszelkie wątpliwości w zakresie bezpieczeństwa użytkowania układów transportu kolejkami podwieszonymi. Oczywiście sama metoda nie zwalnia użytkowników z obowiązków wynikających z innych przepisów lub po prostu sztuki górniczej, czyli na przykład regularnej kontroli trasy lub stanu technicznego obudowy ze szczególnym uwzględnieniem zastosowanych wzmocnień.

Ważną częścią pracy, już po wykonaniu obliczeń, jest kontrola czy posiadane urządzenia, które stanowią części układu transportowego są odpowiednio dobrane i spełniają wymogi wynikające z wykonanych obliczeń.

Opracowanie metody obliczeń statycznych i dynamicznych wybranych parametrów trakcyjnych kolejek podwieszonych w warunkach PG Silesia to modelowy przykład ukierunkowanej współpracy jednostki naukowo-badawczej z przedsiębiorstwem górniczym w celu rozwiązania konkretnego problemu ruchowego. Pomyślnie efekty takiej współpracy przemawiają za kontynuowaniem współpracy w najbliższych latach.

Literatura

ANTONIAK J. 1980 - Maszyny Górnicze, cz. III, Transport kopalniany, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.

- BOŁOZ Ł. 2020 - Opracowanie metody obliczeń statycznych i dynamicznych wybranych parametrów trakcyjnych kolejek podwieszonych w warunkach PG Silesia. Sprawozdanie z realizacji projektu – niepublikowane, Kraków
- PIECZORA E. 2008 - Forecast of development of rail transportation systems used in hard coal mine underground. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral resources management*, Volume 24, Issue 1, pp. 221-232.
- PIECZORA E., SUFFNER H. 2013 - Rozwój lokomotyw do kopalnianych kolei podziemnych. *Maszyny Górnicze*, Volume 31, Issue 2, pp. 45-54.
- PIECZORA E., SUFFNER H. 2017 - Development of mine underground transportation with use of suspended monorails. *Mininig - Informatics Automation and Electrical Engineering*, Volume 55, Issue 4, pp. 96-106.
- PYTLIK A. 2019 - Tests of steel arch and rock bolt support resistance to static and dynamic loading induced by suspended monorail transportation. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Volume 41, Issue 2, pp. 1-12.
- TOKARCZYK J. 2016 - Method for identification of results of dynamic overloads in assessment of safety use of the mine auxiliary transportation system. *Archives of Mining Sciences*, Volume 61, Issue 4, pp. 765-777.
- TOKARCZYK J., DUDEK M. 2020 - Methods for computer aiding the configuration and assessment of auxiliary mine transportation means. *Management Systems in Production Engineering*, Volume 28, Issue 4, pp. 268-275.
- TOKARCZYK J., KANIA J. 2016 - Systems and tracks of self-powered suspended monorails for transportation of people in horizontal workings and workings with inclination up to 45°. *Mininig - Informatics Automation and Electrical Engineering*, Volume 54, Issue 3, pp. 31-39.
- TOKARCZYK J., ROTKEGEL M., PYTLIK A., NIEDWOROK A. 2020 - Research on the impact of forces and acceleration during the riding and braking of a suspended monorail. *Archives of Mining Sciences*, Volume 65, Issue 2, pp. 399-414.

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2020
Artykuł akceptowano do druku – 27.11.2020