Natalia Bajerek
II rok, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Gabriela Janusz
II rok, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Jakub Kwiecień
II rok, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

ANALIZA I SYMULACJA LOGISTYCZNA NA WYBRANEJ TRASIE DLA KOLEI NISKICH CIŚNIEŃ HYPERLOOP

Wstęp

W XXI wieku przemysł transportowy powinien łączyć szybkość i dbałość o środowisko, co skłania do poszukiwania ekologicznych rozwiązań. Jednym z nich jest kolej niskociśnieniowa, zaproponowana przez Elona Muska. Aby stworzyć taki pociąg, potrzebne są liczne badania, w tym komputerowe modele symulacyjne. Poniżej przedstawiony model opracowany został w programie *FlexSim*, w celu zbadania czasu wsiadania i wysiadania pasażerów na stacjach. Praca skupia się na teoretycznym ujęciu kolei niskociśnieniowej, procesie modelowania symulacyjnego oraz na opisie i wynikach badań siedmiu wariantów modeli komputerowych.

1. Kolej niskociśnieniowa

Kolej niskociśnieniowa (*Hyperloop*) to projekt transportu, który łączy szybkość transportu lotniczego z przystępną ceną transportu drogowego[1]. Dzięki wykorzystaniu lewitacji magnetycznej oraz obniżeniu ciśnienia w rurach transportowych do 1% ciśnienia atmosferycznego prędkość, którą może osiągnąć, szacowana jest na około 1200 km/h[2].

[1] E. Musk, Hyperloop alpha, Space X, s. 3–4, artykuł na stronie internetowej https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf (dostęp: 03.03.2023).

[2] Wikipedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Hyperloop (dostęp: 03.03.2023).

2. Rys historyczny

W 2013 roku powstała koncepcja *Hyperloop*, co zainicjowało powstanie firm zainteresowanych tą technologią. Firma *SpaceX* przeprowadziła w 2015 roku konkurs „*Hyperloop Pod*" dla przedsiębiorstw inżynierskich i uczelni technicznych na plan konstrukcji kapsuły *Hyperloop*[3]. Najlepsze projekty miały możliwość sprawdzenia się na prostym torze testowym. Konkurs ten cieszył się ogromnym zainteresowaniem grup z całego świata do tego stopnia, że zadecydowano o jego kilku reedycjach, gdzie w ostatniej główne kryterium stanowiła prędkość, a zwycięska grupa osiągnęła wynik 463 km/h. W 2020 roku Koreański Instytut Badań Kolei doniósł o osiągnięciu przez pojazd zbudowany w ramach programu *Hyper-Tube* rekordowej prędkości[4]. Dzięki zastosowaniu technologii pola magnetycznego, wagon został rozpędzony w rurze do 1019 km/h.

W minionym, 2022 roku koło naukowe *Transpeed* AGH zakwalifikowało się do *European Hyperloop Week*– światowej rangi konkursu wśród zbiorowości akademickiej, prowadzącej badania nad środkiem transportu wysokich prędkości. W zawodach wzięło udział 421 osób, 35 zespołów z całego świata oraz 15 przedsiębiorstw zajmujących się pracami nad technologią *Hyperloop*. Zespół z Krakowa uplasował się w na podium w kategorii pełnowymiarowych badań socjo-ekonomicznych dotyczących rozwoju.

3. Modele symulacyjne

Niniejsza praca skupia się na modelach symulacyjnych jako narzędziach poznawczych systemu. Symulacja polega na sztucznym odtwarzaniu właściwości obiektu lub zjawiska za pomocą jego modelu, który jest definiowany, projektowany i konstruowany[5]. Obejmuje ona także działania związane z wizją przebiegu eksperymentu, opracowaniem i analizą danych wejściowych oraz interpretacją wyników badania[6]. Modele symulacyjne są często używane do podejmowania decyzji w badanym obszarze lub jako alternatywa dla zbyt złożonych i trudnych rozwiązań analitycznych.

Do stworzenia symulacji w poniższej pracy wybrany został program *FlexSim*. Jest to nowoczesne, bezpieczne narzędzie służące do symulacji komputerowych,

---

[3] *WP tech*, https://tech.wp.pl/spacex-hyperloop-elon-musk-rekord,6405300838975617a (2019) (dostęp: 01.03.2023).

[4] *Rynek kolejowy*, https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/koreanski-hyperloop-rozpedzil-sie-do-ponad-1000-kmh-99557.html (dostęp: 10.03.2023).

[5] *Słownik języka polskiego PWN*, Symulować https://sjp.pwn.pl/szukaj/symulowa%C4%87.html (dostęp: 05.03.2023).

[6] M. Beaverstock, A. Greenwood, W. Nordgren, *Symulacja stosowana: modelowanie i analiza przy wykorzystaniu FlexSim*, InterMarium, Kraków 2019, s. 19–21.

które ma zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, takich jak: produkcja, usługi i logistyka[7]. Program korzysta z technologii *OpenGL*, co umożliwia tworzenie realistycznych wizualizacji procesów.

3.1. Proces budowania modelu

Budowa odpowiedniego modelu symulacyjnego jest kluczowa dla podejmowania decyzji przez zarządzającego. Wymaga to odpowiednich narzędzi oraz przygotowania danych istotnych dla zbudowania modelu. Proces ten można podzielić na trzy etapy[8].

Początkowym etapem jest model koncepcyjny, w którym określa się problem, formułuje cele, analizuje dane dotyczące miar efektywności, spodziewanych skutków, ograniczeń i specjalnych wymagań, oraz buduje się konceptualny model systemu. Następnie tworzy się model symulacyjny, który jest sprawdzany i walidowany, a jeśli jego zachowanie jest niezgodne z rzeczywistością, następuje powrót do końcowej fazy etapu tworzenia modelu konceptualnego. Na końcu następuje zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów, a po osiągnięciu celu sporządza się raporty i dokumentacje, które są niezbędne do wprowadzenia zmian.

3.2. Model wsiadania

Pociąg niskociśnieniowy według projektu Muska mieści 28 pasażerów i osiąga prędkość 1200 km/h[9]. Model trasy kolei niskociśnieniowej wymaga stworzenia modelu wsiadania oraz modelu wysiadania. W przyjętym modelu założono, iż wsiadanie i wysiadanie pasażerów odbywa się przez 4 rury teleskopowe, przy czym ich ilość jest uzależniona od ilości wejść do kapsuły. W projekcie bazowym zakłada się, że są to 4 wejścia, co oznacza, że w każdej z rur jest 7 osób. Wsiadanie pasażerów obejmuje również kontrole celne, bezpieczeństwa i biletowe. Takich kontroli nie uwzględnia się w modelu, ponieważ nie wpływają one na czas trwania procesu wsiadania. Na podstawie badań wymiany pasażerskiej w autobusach zakłada się, że czas wsiadania wynosi około 16 sekund, a czas umieszczenia bagażu w luku pasażerskim mieści się w przedziale od 15 do 60 sekund na jednego pasażera[10].

Model stworzono w programie *FlexSim* z 5 źródeł, w tym 1 dotyczącym pociągów i 4 dotyczących ludzi. Pasażerowie są przypisywani do danych wejść i wyjść poprzez nadanie im odpowiedniego koloru. Wszystkie kolejki są połą-

---

[7] *FlexSim*, https://flexsim.pl/flexsim/ (dostęp: 06.03:2023).

[8] M. Karkula, *Modelowanie i symulacja procesów logistycznych*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013, s. 108.

[9] E. Musk, *Hyperloop alpha, Space X...*, s. 11.

[10] A. Sołtysiak, K. Migawa, R. Sołtysiak, P. Maćkowiak, *Analiza czasu wymiany potoków pasażerskich na przystankach autobusowych w Bydgoszczy*, „Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe" 2017, nr 6.

czone z maszyną o nazwie „stacja wsiadanie". Scala ona występujące elementy, symulując proces wsiadania pasażerów, po czym następuje odjazd kapsuły. Do wykonania symulacji samego przejazdu, w programie użyto narzędzia rolotok, który transportuje pociąg z pasażerami do kolejnej stacji.

3.3. Model wysiadania

Stacja wysiadania jest również ważnym elementem. Pociąg z pasażerami przyjeżdża na stację, a pasażerowie muszą przejść przez rurę teleskopową zabezpieczoną śluzami, aby wyjść. Tak jak w modelu wsiadania, istnieją 4 rury prowadzące do 4 wyjść, przy czym z każdego korzysta 7 pasażerów. Czas przyjęty do wysiadania również zawiera się w tym samym przedziale jak w przypadku wsiadania. Gdy pojazd opuszczą już wszyscy pasażerowie następuje odłączenie rury teleskopowej, które trwa 5 sekund, które uwzględniono w wynikach badanych wariantów w dalszej części pracy. W tym samym czasie pasażerowie kolejnego pociągu wchodzą do rury teleskopowej i czekają na otwarcie śluzy wejścia. Dopiero po opuszczeniu stacji przez pojazd, może nadjechać kolejny.

Symulacja godzinna pozwala na pozyskanie danych dotyczących czasu wysiadania z pojazdu oraz liczby pociągów i pasażerów, którzy przejechali trasę w ciągu godziny.

4. Model badanej trasy kolei niskociśnieniowej

Do przeprowadzenia symulacji czasowej, wybrano trasę Warszawa – Centralny Port Komunikacyjny – Łódź. Właśnie tutaj, ze względu na projekt rozwoju Warszawsko-Łódzkiego Obszaru Funkcjonalnego zaplanowano budowę kolei dużych prędkości[11]. Stację przesiadkową w projekcie stanowi Centralny Port Lotniczy, którego budowa planowana jest w okolicach gminy Baranów. Trasa wpisuje się również w Program Kolejowy Centralnego Portu Komunikacyjnego[12].

Tabela 2. Porównanie długości trasy Warszawa – CPK – Łódź

Długość trasy	Warszawa–CPK	CPK–Łódź	Warszawa–CPK–Łódź
Samochodem	48,5 km	95,5 km	144 km
Koleją niskociśnieniową	45 km	100 km	145 km

Źródło: opracowanie własne.

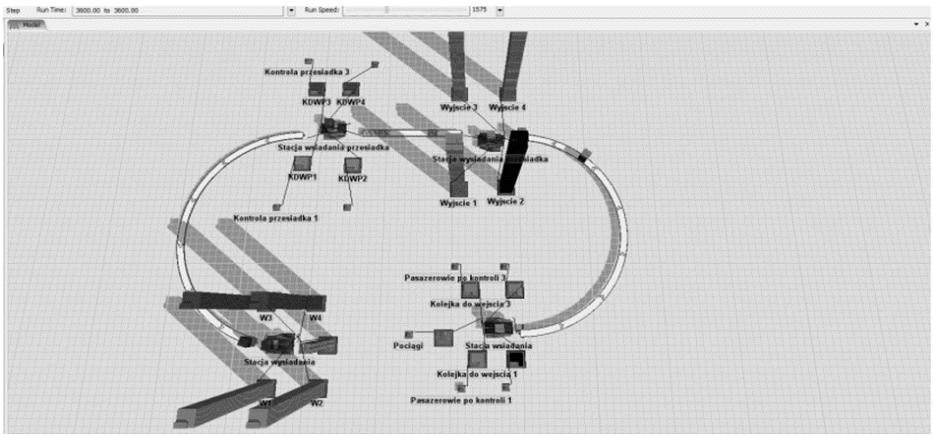
[11] T. Markowski, *Zintegrowana Strategia Rozwoju Warszawsko- Łódzkiego Obszaru Funkcjonalnego do roku 2030,* Katedra Zarządzania Miastem i Regionem, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2015, s. 20.

[12] *Centralny Port Komunikacyjny*, https://www.cpk.pl/pl/inwestycja/kolej (dostep: 10.03.2023).

Aby wykorzystać model symulacji czasowej dla KNC (Kolei Niskich Ciśnień), trasa dla niej musi zostać wydłużona, ze względu na brak możliwości skręcania kapsuły. W tabeli 1 przedstawiono porównanie odcinków trasy dla samochodu i kolei.

4.1. Model główny

Model główny oparty jest na wcześniej opisanych modelach wsiadania i wysiadania, które pełnią funkcję stacji początkowych i końcowych. Dodatkowo, istnieje stacja przesiadkowa, która składa się z modelu wysiadania i wsiadania z takimi samymi parametrami. Stacja wysiadania przesiadkowa jest oddzielona od stacji wsiadania przesiadkowej, aby zapewnić szybszą wymianę pasażerów. Model symuluje czas podróży na trasie Warszawa – CPK – Łódź, gdzie pasażerowie wsiadają w Warszawie. Wymiana pasażerów występuje na stacji przesiadkowej, a na stacji wsiadania CPK wsiada nowa grupa pasażerów. Na rysunku 1 można zauważyć, że wszyscy pasażerowie, którzy wsiedli na stacji początkowej, wysiedli na stacji przesiadkowej, a ci, którzy weszli na pokład pociągu na stacji przesiadkowej, wysiedli w punkcie końcowym.



Rysunek 5. Podstawowa wersja modelu symulacyjnego po przeprowadzeniu symulacji
Źródło: opracowanie własne.

Do symulacji czasu wsiadania i wysiadania pasażerów wykorzystano rozkład statystyczny beta z parametrami kształtu 2,5 i 2 oraz wartościami minimalnymi i maksymalnymi wynoszącymi odpowiednio 15 i 60. Oznacza to, że czas wsiadania i wysiadania pasażerów będzie mieścił się w zakresie od 15 do 60 sek. Natomiast parametry kształtu wskazują na asymetrię z większym prawdopodobień-

stwem wystąpienia wartości bliskich lewej części rozkładu[13]. Taki rozkład może sugerować, że istnieją pasażerowie, którzy potrzebują więcej czasu na wsiadanie lub wysiadanie z pociągu niż inni.

Po przygotowaniu modelu w okolicach odpowiednich miejscowości, wprowadzono dane wejściowe zgodnie z tabelą 1 oraz przeprowadzono godzinną symulację kolei, której wyniki zebrano w tabeli 2, przy czym sam przejazd występuje tylko w jedną stronę, począwszy od stacji wsiadania, kończąc na stacji wysiadania.

Tabela 3. Wyniki godzinnej symulacji pociągów

Pozycja	Maksymalny czas [s]	Pociągi, które przejechały trasę	Oczekujące pociągi
Stacja wsiadania	66	66	73
Stacja wsiadania przesiadka	68		
Stacja wysiadania przesiadka	67		
Stacja wysiadania	68		

Źródło: opracowanie własne.

Interpretując wyniki można uznać, iż najkrótszy czas wsiadania wynosił 66 sek. na pierwszej stacji, a najkrótszy czas odjazdu po procesie wysiadania wynosił 67 sek. na stacji przesiadkowej „Stacja wysiadania przesiadka", przy czym pasażerowie wsiadają/wysiadają pojedynczo. Pociągi opuszczały stację początkową średnio co 49,2 sek., a liczba pociągów, które przejechały trasę w ciągu godziny to 66, a kolejnych 73 pociągów wyruszyło w tym samym czasie.

Model podstawowy pozwala na zmianę danych i badanie różnych scenariuszy zachowania systemu. Taką zmianę reprezentuje kolejny podrozdział.

4.2. Zmiana parametrów – porównanie wyników

Przeprowadzono symulacje sześciu alternatywnych wariantów, w celu dokonania porównawczej analizy wyników oraz identyfikacji optymalnego scenariusza. W opisach wariantów wskazano cechy, które zmodyfikowano względem modelu głównego.

[13] A. Sołtysiak, K. Migawa, R. Sołtysiak, P. Maćkowiak, *Analiza czasu wymiany potoków...*

Tabela 4. Wyniki symulacji wariantów 1 i 2

Wariant pierwszy – zreformowano stację przesiadkową, aby połączyć dwa przystanki w jedną stację i usunąć rolotok między nimi. Oznacza to, że wymiana pasażerów następuje na jednej stacji.			
Pozycja	**Maksymalny czas [s]**	**Pociągi, które przejechały trasę**	**Oczekujące pociągi**
Stacja wsiadania	67	65	2
Stacja wsiadania przesiadka	61		
Stacja wysiadania przesiadka	63		
Stacja wysiadania	66		
Wariant drugi – stacja przesiadkowa jest identyczna z modelem głównym, ale następuje przesiadka 7 pasażerów z wejścia 1, którzy są zastępowani przez 7 nowych pasażerów z tego samego wejścia w stacji wsiadania przesiadkowego. Oznacza to, że pasażerowie z pozostałych wejść pokonują całą trasę.			
Pozycja	**Maksymalny czas [s]**	**Pociągi, które przejechały trasę**	**Oczekujące pociągi**
Stacja wsiadania	66	66	73
Stacja wsiadania przesiadka	68		
Stacja wysiadania przesiadka	67		
Stacja wysiadania	68		

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Wyniki symulacji wariantów 3, 4 oraz 5

Wariant trzeci – stacja przesiadkowa jest połączona (pełni rolę stacji wsiadania oraz wysiadania) oraz następuje przesiadka 7 pasażerów z wejścia 1, którzy zostaną zastąpieni przez 7 nowych pasażerów z tego samego wejścia. Wariant można więc traktować jako połączenie właściwości wariantu pierwszego oraz drugiego.			
Pozycja	**Maksymalny czas [s]**	**Pociągi, które przejechały trasę**	**Oczekujące pociągi**
Stacja wsiadania	68	66	72
Stacja wsiadania przesiadka	63		
Stacja wysiadania przesiadka	62		
Stacja wysiadania	64		
Wariant czwarty – pasażerowie wsiadają do pociągu przez mniejszą liczbę – 3 wejść/wyjść, odpowiednio: 1 wejście – 9 osób, 2–9 osób, 3–10 osób.			
Pozycja	**Maksymalny czas [s]**	**Pociągi, które przejechały trasę**	**Oczekujące pociągi**
Stacja wsiadania	66	66	73
Stacja wsiadania przesiadka	68		
Stacja wysiadania przesiadka	67		
Stacja wysiadania	68		

Tabela 4. dok.

Wariant piąty – pasażerowie wsiadają do pociągu podobnie jak w modelu głównym, tym razem w wejściu 1 oprócz 6 pasażerów, u których symulujemy wsiadanie oraz wysiadanie, będzie też jeden pasażer, u którego czas wsiadania jest lekko dłuższy 40–60 sek.			
Pozycja	**Maksymalny czas [s]**	**Pociągi, które przejechały trasę**	**Oczekujące pociągi**
Stacja wsiadania	68	66	73
Stacja wsiadania przesiadka	67		
Stacja wysiadania przesiadka	68		
Stacja wysiadania	68		

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5. Wyniki symulacji wariantu 6

Wariant szósty - pasażerowie pociągu wsiadają do pociągu przez wejścia 1-4 w następujących czasach: wejście 1 – 20–60 sek., wejście 2 – 15–40 sek., wejście 3 – 40–60 sek., wejście 4 – 35–60 sek. Oznacza to, że w praktyce, dla każdego wejścia istnieje różnica czasowa, w jakim pasażerowie wchodzą do pociągu. Może to wynikać z różnic w wieku, kondycji fizycznej czy posiadanych bagaży.			
Pozycja	**Maksymalny czas [s]**	**Pociągi, które przejechały trasę**	**Oczekujące pociągi**
Stacja wsiadania	66	66	73
Stacja wsiadania przesiadka	68		
Stacja wysiadania przesiadka	67		
Stacja wysiadania	68		

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki wskazują, iż najdłuższe czasy wsiadania zawierają się w przedziale 66–68 sek., a najdłuższe czasy wysiadania w przedziale 64–68 sek. Na stacjach przesiadkowych te czasy zmieniają się w lekko szerszym zakresie 61–68, a także 62–68 sek. W wariantach od drugiego do szóstego liczba pociągów, które przejechały trasę wynosi 66, również w wariancie pierwszym jest to bardzo podobna liczba 67. Skupiając się na pociągach, które w tym samym czasie rozpoczęły trasę ich liczba waha się w zakresie 72–73.

Podsumowanie

Zbudowany model umożliwił sprawdzanie różnych scenariuszy związanych z procesem wsiadania oraz wysiadania z pojazdu, które wpływają na jego czasy przyjazdu oraz odjazdu. Spośród sześciu różnych scenariuszy, najlepszy wynik co do czasu operacji wsiadania uzyskano w stacji przesiadkowej z wariantu pierwszego, w którym stacja przesiadkowa była połączona (służyła jednocześnie

do wsiadania oraz wysiadania). Najkrótszy czas wysiadania zapewnił wariant trzeci. Samo badanie czasów wspomnianych operacji miało na celu usprawnienie procesu tak, aby jak najwięcej pociągów mogło pokonać trasę. Symulacja FlexSim pozwoliła na przejrzystość wyników i oszczędność czasu w porównaniu z tradycyjnymi obliczeniami. Opracowana koncepcja jest koncepcją symulacji uproszczonej, przepływów potoków pasażerskich. Stworzenie takiego modelu stanowi solidne podstawy do przeprowadzenia dalszych badań, które pozwolą na rozwinięcie tego tematu w większym zakresie.

Bibliografia

Beaverstock M., Greenwood A., Nordgren W., *Symulacja stosowana: modelowanie i analiza przy wykorzystaniu FlexSim*, InterMarium, Kraków 2019.

Kaczmar I., (2019). „*Komputerowe modelowanie i symulacje procesów logistycznych w środowisku Flexsim"*, PWN, Warszawa 2019.

M. Karkula M., *Modelowanie i symulacja procesów logistycznych*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.

Markowski T., *Zintegrowana Strategia Rozwoju Warszawsko- Łódzkiego Obszaru Funkcjonalnego do roku 2030,* Katedra Zarządzania Miastem i Regionem, Wydział Zarządzania Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2015.

Musk E., Hyperloop alpha, Space X, s. 3–4, artykuł na stronie internetowej https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf.

Sołtysiak A., Migawa K., Sołtysiak R., Maćkowiak P. (2017*). Analiza czasu wymiany potoków pasażerskich na przystankach autobusowych w Bydgoszczy*, „Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe" 2017.

Źródła internetowe

Centralny Port Komunikacyjny, https://www.cpk.pl/pl/inwestycja/kolej.

Engineering, 2017, https://www.engineering.com/story/hyperloop---the-story-so-far.

FlexSim, https://flexsim.pl/flexsim/.

Rynek kolejowy, https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/koreanski-hyperloop-rozpedzil-sie-do-ponad-1000-kmh-99557.html.

Słownik języka polskiego PWN, Symulować https://sjp.pwn.pl/szukaj/symlowa%C4%87.html.

Strefa inwestorów, https://strefainwestorow.pl/wiadomosci/20191024/hyper-poland-zaprezentowal-najnowoczesniejsza-technologie-transportowa.

WP tech, https://tech.wp.pl/spacex-hyperloop-elon-musk-rekord,6405300838975617a (2019).

Streszczenie

Celem niniejszej pracy jest rozwiązanie problemu dotyczącego czasu wsiadania i wysiadania pasażerów oraz ich wpływu na przyjazdy i odjazdy kolei niskociśnieniowej, wykorzystując modelowanie w programie symulacyjnym *FlexSim*. Do wykonania powyższych badań stworzono siedem wersji modelów komputerowych, w tym model główny oraz sześć innych wariantów. Umożliwiły one analizę różnych scenariuszy związanych

z procesem wsiadania i wysiadania z pojazdu. Przeprowadzona symulacja dostarczyła wniosków, które mogą być wykorzystane w dalszych pracach projektowych. Badanie wykazało, że symulacja komputerowa w FlexSim zapewnia przejrzystość wyników. Tradycyjne obliczenia dotyczące czasu wsiadania, wysiadania i liczby pociągów zdolnych do pokonania trasy lub rozpoczęcia podróży byłby bardziej złożone i czasochłonne w tym przypadku.

Słowa kluczowe: transport, model symulacyjny, Hyperloop, KNC, kolej niskich ciśnień

ANALYSIS AND LOGISTIC SIMULATION ON A SELECTED ROUTE FOR THE HYPERLOOP LOW-PRESSURE RAILWAY

Summary

The aim of the work was to solve the problem related to the boarding and alighting time of passengers, and its impact on the arrivals and departures of a low-pressure railway using modeling in the simulation program FlexSim. To conduct the research, seven versions of computer models were created, including a main model and six other variants. They allowed for testing various scenarios related to the boarding and alighting process, which affect the arrival and departure times of the train. The simulation results can be used to draw conclusions for further project work. The conducted study demonstrates the transparency of the results obtained using the computer simulation FlexSim. In this case, traditional calculations regarding the boarding and alighting time and the number of trains that can travel the entire route or depart from it would be more complicated and time-consuming.

Keywords: transport, simulation model, Hyperloop, low-pressure railway