



***Analiza i ocena procesów przeładunkowych w morskich terminalach kontenerowych z wykorzystaniem teorii kolejek***

**Dr Aleksandra Bartosiewicz  
Uniwersytet Łódzki**



## Cel i opis problemu badawczego

- opracowanie wzorów przydatnych przy oszacowywaniu czasów trwania poszczególnych czynności przeładunkowych;
- implementacja opracowanych wzorów do modelu masowej obsługi;
- budowa narzędzia wspomagającego podejmowanie decyzji przy planowaniu operacji przeładunkowych na terenie morskich terminali kontenerowych:
  - wielokanałowy model kolejkowy ( $M/M/s_{\infty, \infty}$ ).
- dostarczenie wniosków z badań i rekomendacji dotyczących:
  - odpowiedniego planowania operacji przeładunkowych zachodzących na terenie morskich terminali kontenerowych;
  - rozważenia zakupu konkretnych udogodnień możliwych do zastosowania na danym terminalu w ramach funkcjonującego TOS (*Terminal Operating System*).

**Aby zminimalizować czas i koszty postoju statków w porcie, czynności przeładunkowe muszą trwać jak najkrócej.**

## Przyjęte założenia

W modelu założono m.in., że:

- raz zacumowany przy kei statek pozostaje na nabrzeżu aż do ukończenia wszystkich operacji statkowych;
- **suwnice nabrzeżowe pracują jednocześnie ze zbliżoną wydajnością;**
- kontenery mają standardową wysokość, a kontenery 20-stopowe przenoszone są przez suwnice nabrzeżowe i placowe pojedynczo;
- **suwnice nabrzeżowe i placowe nie wykonują nieefektywnych ruchów (tzw. *rehandles*);**
- podczas rozładunku statku ciągnik IMV przewozi kontener z nabrzeża na plac składowy i wraca pod suwnicę STS bez ładunku, aby pobrać kolejny pojemnik intermodalny;
- podczas załadunku statku ciągnik IMV przewozi kontener z placu składowego na nabrzeże i wraca pod suwnicę RTG bez ładunku, aby pobrać kolejny pojemnik intermodalny;
- w czasie przeładunku statku nie dochodzi do nieprzewidzianych zdarzeń, jak opóźnienie wpłynięcia statku do portu, awaria urządzeń przeładunkowych lub części systemu.

Przyjęte założenia cd.

Łącznie przeładowanych zostało 2402 kontenerów (24 kontenery 40-stopowe wzdłuż, 17 kontenerów wszerz oraz do 6 kontenerów wwyż).

Do przeładunku przydzielone zostały 4 ganki (1 suwnica nabrzeżowa STS, 3 suwnice placowe RTG, 5 ciągników terminalowych IMV, pracownicy).

Wszystkie kontenery przeznaczone do przeładunku znajdowały się lub umieszczane były na pokładzie statku.

Plac składowy składa się z 32 sektorów. Suwnice placowe RTG składają kontenery równoległe do nabrzeża w blokach składowych o szerokości do 7, długości do 22 i wysokości od 1–5 warstw kontenerów 20-stopowych (TEU, *Twenty-foot Unit*).



## Opracowane wzory

Czasy rozładunku ( $T_1$ ) i załadunku ( $T_6$ ) kontenerów na nabrzeżu są wyliczane w podobny sposób, jako suma następujących składowych:

$$T_1 = T_6 = t_Z^L + t_P^L + t_O^W + t_O^L + t_P^W + t_O^C$$

gdzie:

$t_Z^L$  – czas potrzebny na zaczepienie ładunku;

$t_P^L$  – czas podniesienia ładunku;

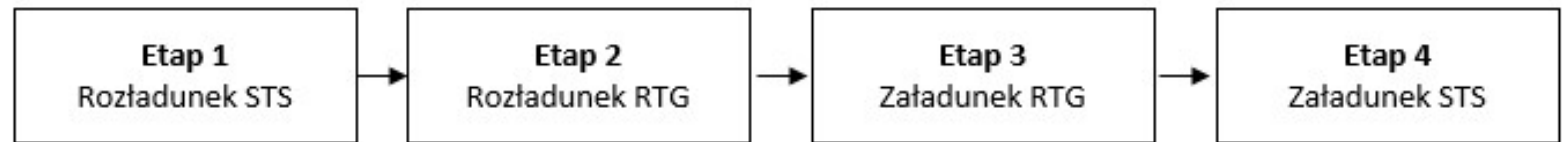
$t_O^W$  – czas jazdy wózka wciągarki i opuszczania ładunku;

$t_O^L$  – czas potrzebny na odzepienie ładunku;

$t_P^W$  – czas podnoszenia chwytaka i jazdy wózka wciągarki;

$t_O^C$  – czas opuszczania chwytaka.

*Analogicznie wyznaczono sumaryczne czasy rozładunku ( $T_3$ ) i załadunku ( $T_4$ ) kontenerów na placu składowym.*



Po zacumowaniu statku przy nabrzeżu suwnice kontenerowe (kanały obsługi) rozpoczynają rozładunek statku zgodnie z regulaminem kolejki LIFO (**etap 1**). Ciągniki terminalowe przewożą kontenery najkrótszą drogą na plac składowy.

Na składowisku (**etap 2**) ciągniki IMV są zleceniami obsługiwanymi przez suwnice placowe RTG (kanały obsługi) - regulamin kolejki FIFO, stopa zgłoszeń napływających do systemu zależy od stopy zgłoszeń poprzedniego etapu.

**W etapie 3** ciągniki IMV pobierają kontenery z placu składowego i przewożą je na nabrzeże. Suwnice placowe (kanały obsługi) pobierają kontenery z bloków składowych zgodnie z regulaminem kolejki LIFO.

**W etapie 4** ciągniki terminalowe (zlecenia) przewożą kontenery na nabrzeże, gdzie podejmowane są one przez kanały obsługi (suwnice STS) - regulamin kolejki FIFO, stopa zgłoszeń zależy od przepustowości etapu 3.

**Na każdym z rozpatrywanych etapów strumień wejściowy zgłoszeń oraz czasy obsługi jednego zgłoszenia podlegają rozkładowi wykładniczemu (Poissona), kolejka ma teoretycznie nieograniczoną długość, a zgłoszenia nie rezygnują z czekania na obsługę przez system.**

## Dodatkowe założenia

Do analizowanego modelu wprowadzono dodatkowe założenie: **Pojazdy terminalowe mogą zatrzymywać się na nabrzeżu na jednym z czterech różnych torów podjazdowych pod suwnicami STS.** W pierwotnym wariantcie przyjęto, iż pojazd terminalowy zatrzymuje się na nabrzeżu na torze, który zlokalizowany jest możliwie najbliżej burty statku (L=15 m).

Wariant	Operacja	$t_o$	$t_d$	$t_p$
L=18	Jazda wózka i opuszczanie ładunku	35	49	61
L=21		36	49	62
L=24		37	50	63
L=18	Podnoszenie chwytaka i jazda wózka	17	26	34
L=21		18	27	35
L=24		19	28	36

Wariant	Operacja	Czas
L=18	Przeniesienie kontenera ze statku na ciągnik terminalowy	103,5±5,18
L=21		104,8±5,18
L=24		106,8±5,18

Wariant	Operacja	$t_o$	$t_d$	$t_p$
L=18	Jazda wózka i opuszczanie ładunku	16	21	26
L=21		16	22	27
L=24		17	23	28
L=18	Podnoszenie chwytaka i jazda wózka	13	18	24
L=21		14	19	25
L=24		15	20	26

Wariant	Operacja	Czas
L=18	Przeniesienie kontenera z ciągnika terminalowego na statek	87,00±3,66
L=21		88,83±3,74
L=24		90,83±3,74

## Dodatkowe założenia

W modelu przyjęto ponadto, że rozładowywane kontenery znajdują się w *bay'ach* nr 3–22, a suwnice STS będą musiały zmienić swoje ustawienie na nabrzeżu pięciokrotnie. Przed rozpoczęciem operacji załadunkowych suwnice nabrzeżowe przesuną się o dwa rzędy w bok, załadowując kontenery do *bay'ów* nr 5–20. Oznacza to, że w czasie załadunku będą one zmieniały swoje położenie czterokrotnie.

Ponieważ suwnice STS pracują na nabrzeżu równoległe, ale każda z suwnic przeładowuje jeden kontener w różnym czasie, w praktyce w prezentowanym modelu wielokanałowym całkowity czas przeładunku statku równy jest najdłuższemu czasowi obsługi przez jedną z czterech suwnic STS:

$$T_S = \max\{\sum_{i=1}^4 T_S^1, \sum_{i=1}^4 T_S^2, \sum_{i=1}^4 T_S^3, \sum_{i=1}^4 T_S^4\}$$

gdzie:

$T_S^i$  – całkowity czas pracy suwnicy nabrzeżowej nr  $i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ .





Tabela 3. Czasy (w godzinach) rozładunku i załadunku kontenerów

Rozładunek (1,401 kontenerów, 11.11h)													
Kontenery/STS	102	PMS	85	PMS	68	PMS	51	PMS	34	PMS	17	4	3
STS 4 (L=24)	3.09		2.58		2.06		1.55		1.03				(0.09)
STS 1-4		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06			
STS 3 (L=21)											0.50		
STS 1 (L=15)												(0.11)	
Załadunek (1,001 kontenerów, 6.77h)													
Kontenery/STS	85	PMS	68	PMS	51	PMS	34	PMS	17	8	7		
STS 4 (L=24)	2.18		1.74		1.31		0.87					(0.18)	
STS 1-4		0.06		0.06		0.06		0.06					
STS 3 (L=21)									0.43				
STS 1 (L=15)										(0.19)			

\*PMS – przesunięcie mostu suwnicy.

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3 przedstawia łączne czasy przeładunku kontenerów przy założeniu, że maksymalna liczba rzędów to 17, a maksymalna liczba warstw to 6. Tabela 3 pokazuje tylko czasy dla tych suwnic STS, które pracowały najdłużej. Czasy podane w nawiasach nie wpływają na całkowity czas przeładunku statku. Wartości te podano jedynie, aby pokazać, które suwnice były zaangażowane w obsługę ostatnich kontenerów na pokładzie statku.

Wyniki cd.



**Statek przeładowany zostałby w czasie całkowitym 17 godzin 53 minuty ( $\pm 3$  godziny), a każda suwnica STS wykonałaby przeciętnie 38 ruchów na godzinę ( $\pm 1$  ruch). Do całkowitego czasu przeładunku należy dodać łączny czas przerw, które następują po ok. ośmiogodzinnym czasie pracy każdej z suwnic. Wtedy **suma czasu pracy wszystkich suwnic liczona od pierwszego do ostatniego ruchu chwytaka wyniesie 66 godzin 29 minut.****

W rzeczywistości przeładunek 2402 kontenerów z pokładu statku MSC Antonia zajął na terminalu BCT Gdynia **75 godzin 48 minut, czyli o ok. 9 godzin dłużej.** Różnica ta wynika przede wszystkim z faktu, iż suwnice nabrzeżowe nie pracowały równolegle. Ponadto, część kontenerów znajdowała się pod pokładem statku, co wydłużyło czas przeładunku. Wreszcie rzeczywisty czas obsługi statku na nabrzeżu jest z reguły dłuższy ze względu na konieczność wykonywania przez operatorów suwnic tzw. ruchów nieefektywnych (*rehandles*), które w opisywanym modelu nie były brane pod uwagę.



## Podsumowanie

1. Rozbicie głównych operacji na kilka podstawowych czynności, zastosowanie rozkładu trójkątnego i metody PERT **umożliwia sprawdzenie, który etap przeładunku kontenera pochłania najwięcej czasu i generuje największe koszty:**
  - najbardziej czasochłonne czynności **podczas rozładunku** obejmują przewóz na plac i z powrotem (**czas przejazdu IMV**), jazdę wózka wciągarki i opuszczanie ładunku (**cykl STS**) lub jazdę suwnicy i wózka wciągarki (**cykl RTG**);
  - **podczas załadunku** jednego kontenera na terminalu, managerowie terminalu powinni zwracać szczególną uwagę na takie aspekty jak czas przewozu kontenera przez **IMV**, czy czas potrzebny suwnicom **STS i RTG** na podniesienie, opuszczenie i odpięcie ładunku.
2. Stosowanie zaproponowanego modelu w praktyce **pozwała zidentyfikować wąskie gardła**, które mogą powstać podczas przeładunku statku (w podziale na cykle pracy STS, RTG i jazdy IMV):
  - nawet przy odpowiednio zaplanowanej pracy suwnic STS i RTG istnieje duże prawdopodobieństwo, że **nabrzeże stanie się wąskim gardłem opisywanych procesów**.
3. Opisany problem, mimo swojej złożoności, może być dalej rozwijany i łatwo dostosowywany do różnych systemów.



## Przykładowe rekomendacje dla decydentów zarządzających analizowanym terminalem

### 1. Czas przejazdu IMV:

- analiza różnych wariantów przejazdu pojazdów terminalowych i wybranie najbardziej odpowiedniego z nich;
- rozpatrzenie alternatywnych wariantów zatrzymywania się pojazdów IMV na nabrzeżu (tory podjazdowe):
  - ograniczenie kolejki pojazdów IMV oczekujących na nabrzeżu do obsługi przez jedną z suwnic STS.
- rozważenie zakupu czujników ułatwiających pozycjonowanie pojazdów IMV na nabrzeżu.

### 2. Cykl pracy STS i RTG:

- ewentualny zakup czujników umożliwiających detekcję kontenera przez pracujące na nabrzeżu i placu składowym suwnice:
  - potencjalne oszczędności czasu przy podnoszeniu oraz opuszczaniu ładunku.

3. **Ponoszenie dodatkowych kosztów** na zakup/uruchomienie dodatkowych suwnic STS, RTG lub pojazdów IMV wydają się nieuzasadnione ekonomicznie.



## Przykładowa literatura

Bartosiewicz A. (2020), *Transport morski kontenerów. Rola i znaczenie intermodalnych terminali przeładunkowych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2020.

Bartosiewicz A. (2015), *Planowanie tras przewozu ładunków z nabrzeża na plac składowy w morskim terminalu kontenerowym w Gdańsku*, „Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach”, nr 235, s. 18–33.

Canonaco P., Legato P., Mazza R.M., Musmanno R. (2008), *A queuing network model for the management of berth crane operations*, “Computers and Operations Research”, vol. 35, s. 2432–2446.

Dhingra V., Kumawat G.L., Roy D., Koster de R. (2018), *Solving semi-open queuing networks with time-varying arrivals: an application in container terminal landside operations*, “European Journal of Operational Research”, vol. 267, s. 855–876.

Filipowicz B. (1996), *Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych. Analiza i synteza systemów obsługi i sieci kolejkowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Gulić M., Maglić L., Valčić S. (2018), *Nature Inspired Metaheuristics for Optimizing Problems at a Container Terminal*, “Scientific Journal of Maritime Research”, vol. 32, s. 10–20.

Han Y., Lee L.H., Chew E.P., Tan K.C. (2008), *A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub*, “OR Spectrum”, vol. 30, s. 697–720.

Jacyna M. (2009), *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

Ku D., Arthanari T.S. (2016), *Container relocation problem with time windows for container departure*, “European Journal of Operational Research”, vol. 25(3), s. 1031–1039.

Lajjam A., El merouani M., Tabaa Y., Medouri A. (2014), *A new approach for sequencing loading and unloading operations in the seaside area of a container terminal*, “International Journal of Supply and Operations Management”, vol. 1(3), s. 328–346.

Mašće, I., Singolo, R., & Jurišić, I. (2018). *Network planning method in optimizing vessel utilization – laytime calculation*, „Nase More”, vol. 65(3), s. 146–150.

Petering, M. E. H., Murty, K. G. (2009), *Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal*, „Computers and Operations Research”, vol. 36(5), s. 1711–1725.

Razouk C., Benadada Y. (2017), *Optimization and Simulation Approach for Empty Containers Handling*, “International Journal of Advanced Computer Science and Applications”, vol. 8(11), s. 520–525.

Stojaković M., Twrdy E. (2016), *A decision support tool for container terminal optimization within the berth subsystem*, “Transport”, vol. 31(1), s. 29–40.