

Problem dynamicznej przepustowości pasażerskiej portu lotniczego dla obsługi dużej imprezy masowej

Szymon Ziółkowski, Marek Malarski

Ostatnio odbyła się w Polsce wielka impreza sportowa EURO 2012. Przed imprezą przeprowadzono badania ruchu pasażerskiego. Szczegółowe pomiary parametrów ruchu przeprowadzono w Porcie Lotniczym im. Chopina w Warszawie. Ustalono model operacyjny ruchu: sieciowy model masowej obsługi. Przeprowadzono badania symulacyjne, uwzględniając parametry portów przygotowane na EURO. Obliczone symulacyjnie parametry portów lotniczych porównano z rzeczywistym ruchem w czasie EURO.



mgr inż.
Szymon Ziółkowski
Politechnika Warszawska
ziolkowski.szymon@gmail.com



Prof. dr hab. inż.
Marek Malarski,
Politechnika Warszawska,
Wydział Transportu

Operacje obsługi pasażerów

Głównym celem działania portu lotniczego jest bezpieczne, szybkie i tanie obsłużenie strumienia pasażerów i strumienia ruchu samolotów. Dla zapewnienia bezpieczeństwa transportu lotniczego, w porcie lotniczym realizowane są zadania kontroli bezpieczeństwa pasażerów, bagażu i ładunków. Podstawowa droga pasażerów przez stanowiska obsługi w porcie lotniczym prowadzi od wejście przez stanowisko odprawy biletowo-bagażowej ckin, kontrolę bezpieczeństwa sc, odprawę na pokład statku powietrznego brd. Część pasażerów przechodzi zmodyfikowaną odprawę biletowo-bagażową cex polegającą na zakupie dodatkowego biletu na nadbagaż (rzadziej) lub przepakowaniu części bagażu (częściej) w celu spełnienia limitu bagażu rejestrowego (rejsowego). Odprawa taka trwa znacznie dłużej. Niewielka część pasażerów (~3%) przechodzi kontrolę celną pzl.

Analiza procesu obsługi pasażerów w porcie lotniczym ma stosunkowo bogatą litera-

ture. Ponieważ procesy zgłoszeń pasażerów i niektóre procesy obsługi elementarnych nie są stacjonarne analiza analityczna lub przybliżona rozkładami teoretycznymi obciążona jest dużym błędem (do 300%) – praca [Joustra P.E., van Dijk N.M. (2001)]. Opracowane w ostatnich latach ogólne modele symulacyjne: europejskie OPTAS A, CAMACA, amerykański SIMMOD [Tosic V. (1992), EU OPTAS A (2000), Verbraeck A., Valentin E. (2002)], dają już lepsze przybliżenie rzeczywistej obsługi pasażerskiej. W tej analizie wykorzystano własny model typu masowej obsługi (*queuing model*) analizy czynnościowej elementarnych operacji obsługi [Malarski M. (2009)].

Dla celów modelowych operacje obsługi pasażerów zapisano jako losową sieć czynnościową operacji elementarnych. W sieci tej wyróżniono:

- łuki operacji **obsługi biletowo-bagażowej** (*ckin*) – łuki $u_i^{ckin}(\gamma^{ckin})$,
- łuki operacji **kontroli bezpieczeństwa** (*sc*) – łuki $u_i^{sc}(\gamma^{sc})$,
- łuki operacji **odprawy na pokład statku powietrznego** (*brd*) – łuki $u_i^{brd}(\gamma^{brd})$,
- łuki operacji **kontroli paszportowej** (*pas*) – łuki $u_i^{pas}(\gamma^{pas})$ – dla podróżnych udających się poza granicę Unii Europejskiej,
- łuki operacji **zmodyfikowanej obsługi biletowo-bagażowej** (*cex*) – łuki $u_i^{cex}(\gamma^{cex})$ – dla pasażerów u których stwierdzono nadbagaż: dodatkowy czas na opłatę za nadbagaż w kasie przewoźnika lotniczego lub przepakowanie bagażu.

W zapisie tym y odwzorowuje losowe warunki realizacji operacji: przykładowo γ^{ckin} - losowe warunki realizacji operacji check-in, ze zidentyfikowaną w przeprowadzonych pomiarach odpowiednią dystrybuantą czasów realizacji operacji obsługi. W implementacji modelowej [Malarski M. (2006), Malarski M. i zespół (2008)] łuki czynnościowe może więc modelować jako stanowiska masowej obsługi o odpowiedniej liczbie równoległych kanałów obsługi.

Dla modelowania operacji obsługi biletowo-bagażowej pasażerów naturalny jest więc model masowej obsługi

$$A / B^{ckin} / IA^{ckin} \quad (1)$$

gdzie: A – zgłoszenia o zidentyfikowanej funkcji gęstości prawdopodobieństwa $\nu(t_n)$ zmiennej losowej t_n (czasu zgłoszeń kolejnych pasażerów),

B^{ckin} – operacja obsługi biletowo-bagażowej pasażerów o zidentyfikowanej funkcji gęstości prawdopodobieństwa $\nu_{ckin}(\tau)$ zmiennej losowej τ_n^{ckin} (czasu wykonania obsługi biletowo-bagażowej ckin dla kolejnych pasażerów),

I^{ckin} – liczba dostępnych stanowisk obsługi biletowo-bagażowej.

Operację kontroli bezpieczeństwa (*sc*) przeprowadza się w celu zapobieżenia przedostaniu się materiałów niebezpiecznych na pokład statku powietrznego. Przykładowy schemat funkcjonalny stanowiska kontroli bezpieczeństwa przedstawia rys. 1 Model operacji kontroli bezpieczeństwa to

$$GI / B^{sc} / IA^{sc} \quad (2)$$

gdzie:

GI – zgłoszenia wynikające z zakończenia poprzednich operacji obsługi (*check-in*),

B^{sc} – operacja kontroli bezpieczeństwa o zidentyfikowanej funkcji gęstości prawdopodobieństwa $\nu_{sc}(\tau)$ zmiennej losowej τ_n^{sc} (czasu wykonania kontroli bezpieczeństwa sc kolejnych pasażerów),

IA^{sc} – maksymalna liczba równoległych stanowisk kontroli bezpieczeństwa.

Operacja **odprawy na pokład statku powietrznego** (*boarding*) - *brd* polega na odprawieniu pasażera z budynku dworca pasażerskiego na pokład statku powietrznego [Malarski M. (2006)]. Model masowej obsługi operacji boardingu przy analogicznych jak (2) oznaczeniach to

$$GI / B^{brd} / IA^{brd} \quad (3)$$

Analogiczny model masowej obsługi

operacji **zmodyfikowanej obsługi biletowo-bagażowej (cex)** – obsługi pasażerów w których stwierdzono nadbagaż to

$$GI / B^{cex} / IA^{cex} \quad (4)$$

Operację **kontroli paszportowej (pas)** przeprowadza się dla podróżnych przekraczających granicę Unii Europejskiej. Model tej operacji przy analogicznych oznaczeniach to

$$GI / B^{pas} / IA^{pas} \quad (5)$$

Sieć operacji obsługi pasażerów

Zgodnie z [Malarski M. (2006)] operacje obsługi pasażerów uporządkowane są zgodnie z następstwem z rysunku 2 (dla pasażerów odlatujących). Uporządkowanie to można zapisać w postaci grafu skierowanego, przechodniego, asymetrycznego

$$G^p(\Gamma) = \langle W, U^p(\Gamma), R \rangle \quad (6)$$

gdzie: W - zbiór wierzchołków grafu operacji obsługi pasażerów;

$U(\Gamma)$ - zbiór łuków grafu operacji obsługi pasażerów zdefiniowany

$$U(\Gamma) = \{u_i(\gamma^p) : i \in \{1, 2, \dots, I\}, p \in OP\}$$

$\Gamma = \{\gamma^p : p \in OP\}$ - zbiór charakterystyk na operacjach obsługi pasażerów; I - liczność zbioru operacji obsługi pasażerów (gałęzi); OP - zbiór indeksów operacji obsługi pasażerów,

R - odpowiednie odwzorowanie:
 $R: W \times U(\Gamma) \times W \rightarrow \{0, 1\}$, zdefiniowane

$$R(w_{j1}, u_i(\gamma^p), w_{j2}) = \begin{cases} 1 & \text{istnieje operacja (łuk) } u_i(\gamma^p) \text{ łącząca wierzchołek } w_{j1} \text{ z } w_{j2} \\ 0 & \text{nie istnieje operacja (łuk) } u_i(\gamma^p) \text{ łącząca wierzchołek } w_{j1} \text{ z } w_{j2} \end{cases}$$

Na grafie zdefiniowana jest sieć czynnościowa procesu obsługi pasażerów

$$S^p(\Gamma) = \langle G^p(\Gamma), \phi, \{\tau(\gamma^p)\} \rangle \quad (7)$$

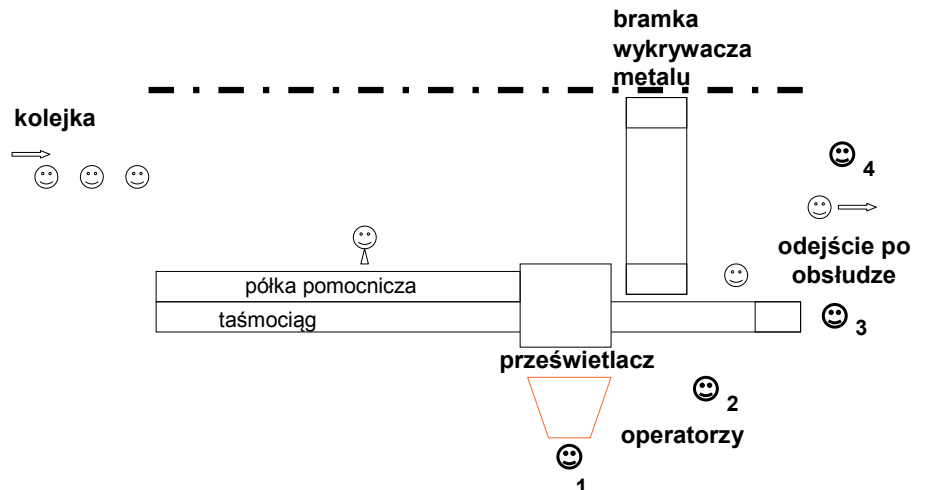
gdzie: ϕ - zbiór pusty - oznacza brak charakterystyk na wierzchołkach,

$\tau_i(\gamma^p) \in R^+$ - losowy czas wykonania p -tej operacji dla charakterystyki γ^p .

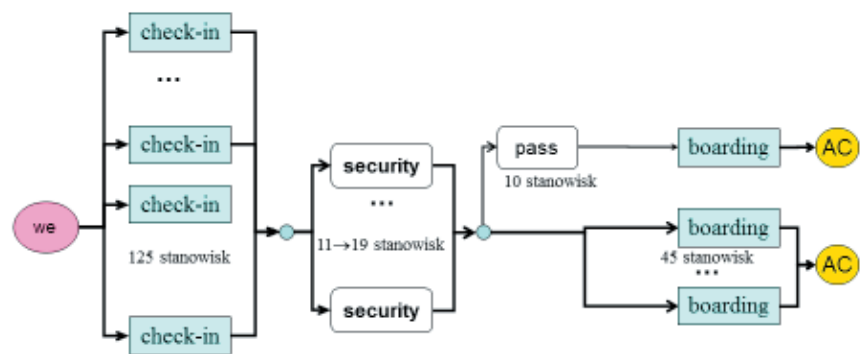
Realizacja obsługi pasażera jest drogą w skierowanej sieci czynnościowej operacji obsługi. Jako kryterium oceny operacji obsługi r -tego pasażera przyjmujemy łączny czas opóźnienia realizacji operacji jego obsługi (suma czasów oczekiwania w kolejce na obsługę na poszczególnych stanowiskach). Dla danej sieci czynnościowej realizacji procesu obsługi pasażera $S(\Gamma)$ czas ten określamy

$$\Delta t_r(S(\Gamma)) = \sum \Delta \tau_r(\gamma^p) \quad (8)$$

gdzie: $\Delta \tau_r(\gamma^p)$ - opóźnienie p -tej operacji



1. Schemat funkcjonalny stanowiska kontroli bezpieczeństwa [opracowanie własne]



2. Uproszczony schemat operacyjny obsługi pasażerów odlatujących [opracowanie własne]

r -tego pasażera.

Średni czas opóźnienia realizacji operacji dla strumienia pasażerów danego zidentyfikowaną funkcją gęstości prawdopodobieństwa

$$\Delta T_{v,r(t)}(S(\Gamma)) = \frac{1}{Np} \sum_{r=1}^{Np} \Delta t_r(S(\Gamma)) \quad (9)$$

gdzie: Np - liczność analizowanej próbki strumienia pasażerów o założonej lub zidentyfikowanej funkcji gęstości prawdopodobieństwa.

Zależność liczby obsłużonych pasażerów od średniego opóźnienia obsługi pasażera jest bazą do wyznaczenia przepustowości naziemnej portu lotniczego.

Symulacyjna realizacja modelu procesu obsługi pasażerów

Sieć czynnościową systemu obsługi pasażerów odlatujących (rys. 2) modelujemy jako sieć masowej obsługi. Dla „podstawowego” przebiegu procesu obsługi pasażerów model symulacyjny można zapisać jako

$$A / B^{ckin} / I^{ckin} \Rightarrow B^{sc} / I^{sc} \Rightarrow B^{brd} / I^{brd} \quad (10)$$

Podstawowym parametrem oceny organizacji pracy terminala pasażerskiego portu lotniczego jest jego przepustowość pasażerska (*airport landside capacity*). EUEOCONTROL wprowadziła definicję przepustowości dynamicznej w 2001 roku. Zdefiniowano wtedy, że godzinowa przepustowość naziemna portu lotniczego to liczba odprawionych / przyjętych pasażerów w ciągu godziny przy akceptowalnym czasie średniego opóźnienia obsługi (może być zdefiniowany lokalnie). Naturalnym modelem do wyznaczenia przepustowości pasażerskiej portu lotniczego jest więc model czynnościowy w którym dla każdej operacji wyznaczamy losową wartość jej opóźnienia.

Dalej podane są wyniki wyznaczania przepustowości landside portu lotniczego o zadeklarowanych parametrach stałych i parametrach losowych stanowisk obsługi:

- liczba stanowisk odprawy biletowo-bagażowej (*check-in*) – 125 (ekstra 125),
- liczba stanowisk kontroli paszportowej – 10 (ekstra 10),
- liczba stanowisk kontroli bezpieczeństwa \Rightarrow do poczekalni odlotowej – 11 (ekstra 19),
- liczba stanowiska kontroli celnej – 2 (ekstra 2),
- liczba stanowisk boardingu – 45 (ekstra 45),
- udział pasażerów w lotach wewnątrz strefy Schengen = 85.0%,
- udział pasażerów z nadbagażem = 3%,

Tabela 1. Fragment pomiarów czasu obsługi na stanowisku security
[czas podany w s - opracowanie własne]

lp.	t(s)	lp.	t(s)	lp.	t(s)	lp.	t(s)
1.	2,53	76.	6,83	151.	17,64	226.	31,22
2.	2,56	77.	6,91	152.	17,66	227.	31,4
3.	2,66	78.	7,16	153.	17,71	228.	32,1
4.	2,71	79.	7,32	154.	17,8	229.	32,31
5.	2,83	80.	7,33	155.	17,99	230.	32,41
...
56.	5,19	131.	13,87	206.	26,49	281.	80,97
57.	5,34	132.	14,03	207.	26,87	282.	81,5
58.	5,43	133.	14,26	208.	26,99	283.	111,18
59.	5,59	134.	14,67	209.	27,11	284.	132,11

Tabela 2. Przykładowa analiza danych ze stanowiska check – in [opracowanie własne]

Class	Lower Limit	Upper Limit	Midpoint	Frequency	Relative Frequency	Cumulative Frequency	Cum. Rel. Frequency
	at or below	9,51		1	0,0082	1	0,0082
1	9,51	21,5329	15,5214	3	0,0246	4	0,0328
2	21,5329	33,5557	27,5443	18	0,1475	22	0,1803
3	33,5557	45,5786	39,5671	34	0,2787	56	0,459
4	45,5786	57,6014	51,59	23	0,1885	79	0,6475
5	57,6014	69,6243	63,6129	12	0,0984	91	0,7459
6	69,6243	81,6471	75,6357	2	0,0164	93	0,7623
7	81,6471	93,67	87,6586	8	0,0656	101	0,8279
8	93,67	105,693	99,6814	5	0,041	106	0,8689
9	105,693	117,716	111,704	5	0,041	111	0,9098
10	117,716	129,739	123,727	2	0,0164	113	0,9262
11	129,739	141,761	135,75	5	0,041	118	0,9672
12	141,761	153,784	147,773	0	0	118	0,9672
13	153,784	165,807	159,796	1	0,0082	119	0,9754
14	165,807	177,83	171,819	1	0,0082	120	0,9836
15	177,83	189,853	183,841	0	0	120	0,9836
16	189,853	201,876	195,864	0	0	120	0,9836
17	201,876	213,899	207,887	1	0,0082	121	0,9918
18	213,899	225,921	219,91	0	0	121	0,9918
19	225,921	237,944	231,933	0	0	121	0,9918
20	237,944	249,967	243,956	0	0	121	0,9918
21	249,967	261,99	255,979	1	0,0082	122	1
	above	261,99		0	0	122	1

Tabela 3. Przykładowy fragment wyników symulacji pracy portu lotniczego w warunkach standardowych [opracowanie własne]

liczba obsłużonych pas./h	średnie opóźnienie obsługi pasażera [s]
321,50	0,00
...	...
772,00	16,94
822,50	19,71
894,00	21,68
969,50	25,16
1063,00	28,25
1183,50	39,37
1357,00	50,63
1590,50	81,59
1628,00	611,13
1633,50	1263,57
1639,50	1922,24

Dynamiczna przepustowość naziemna portu lotniczego określona została na podstawie danych zebranych od 1 stycznia 2012 roku do 1 marca 2012 w Porcie Lotniczym im. Chopina w Warszawie. Fragment pomierzonych danych przedstawiono w tabeli 1.

Analogiczne dane pomierzono na stanowiskach *check-in, boarding, pas*. Analizę danych przeprowadzono pakietem *Statgraphics Centurion*. Przykładowy wynik analizy pokazano w tabeli 2.

Na rys. 3, 4 i 5 przedstawiono przykładowo otrzymane histogramy czasów obsługi, funkcje gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty.

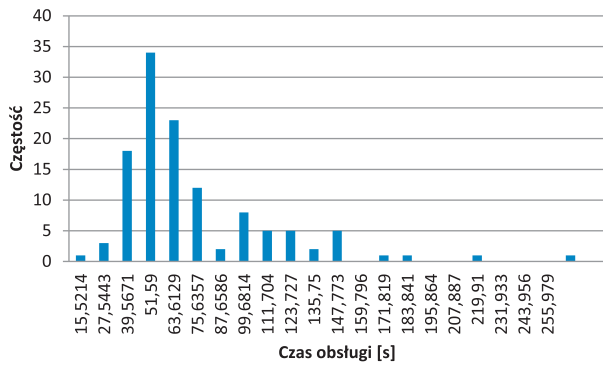
Wyznaczone dystrybuanty czasów obsługi operacji elementarnych wprowadzono do opracowanego specjalnie modelu symulacyjnego sieci masowej obsługi. Iteracyjnie zwiększano „gęstość” generowanego procesu losowego zgłoszeń pasażerów. Rejestrowano liczbę obsłużonych pasażerów i sumowano opóźnienia na poszczególnych stanowiskach. Fragmenty wyników przedstawiono w tabelach 3 i 4. Wyniki te przedstawiono graficznie na rysunkach 6 i 7.

Na rys. 6 można zauważyć, że liczba obsłużonych pasażerów rośnie ze wzrostem średniego opóźnienia obsługi pasażera, wykazując gwałtowny wzrost przy około 1 600 pasażerach na godzinę.

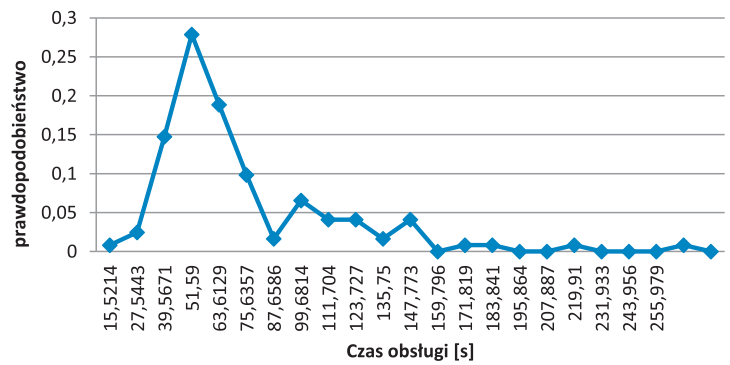
Na rysunku 7 można zauważyć, że liczba

Tabela 4. Przykładowy fragment wyników symulacji pracy portu lotniczego w warunkach ruchu ekstremalnego [opracowanie własne]

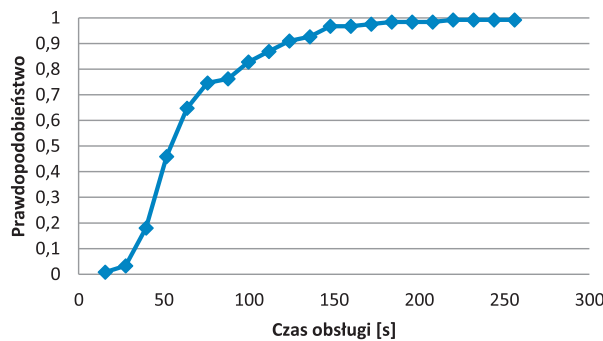
liczba obsłużonych pas./h	średnie opóźnienie obsługi pasażera [s]
321,50	0,00
...	...
465,50	0,27
...	...
619,50	9,72
654,50	12,86
689,00	11,70
727,50	14,89
772,00	16,93
822,50	19,70
894,00	21,65
969,50	25,01
1063,00	27,80
1184,50	38,36
1357,00	47,86
1592,50	50,24
1932,00	45,15
2503,00	53,00
2677,00	987,33
2678,50	2169,64



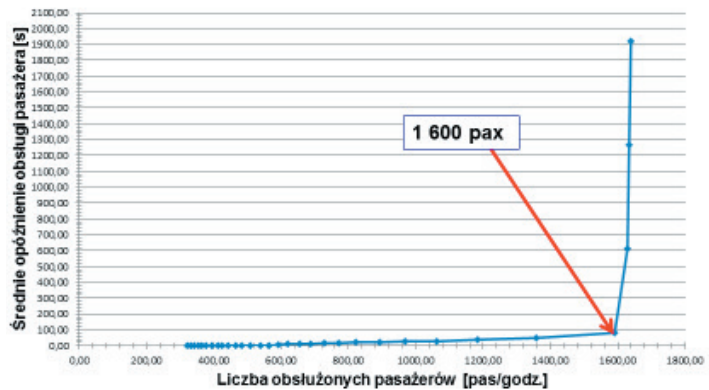
3. Histogram częstości czasów obsługi na stanowisku check-in [opracowanie własne]



4. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów obsługi na stanowisku check-in [opracowanie własne]



5. Dystrybuanta czasów obsługi na stanowisku check-in [opracowanie własne]



6. Liczba obsłużonych pasażerów w funkcji średniego opóźnienia obsługi przy standardowej pracy portu lotniczego [opracowanie własne]

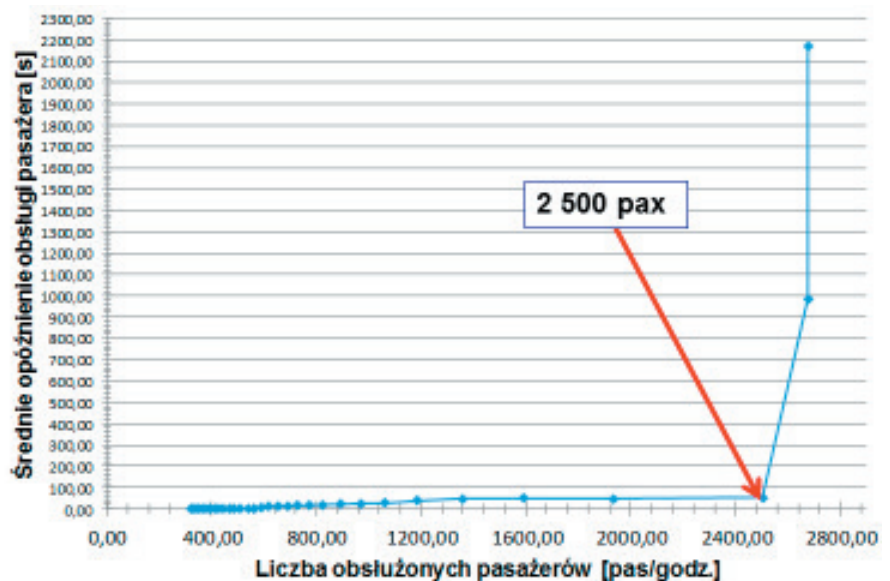
obsłużonych pasażerów wyraźnie wzrosła w porównaniu z wcześniejszymi parametrami pracy portu (rys. 6). „Nasycenie” wzrostu liczby obsłużonych pasażerów następuje tu przy około 2 500 pasażerach na godzinę.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analiza przepustowości Portu Lotniczego im. Chopina w Warszawie w warunkach standardowej pracy oraz w warunkach ekstremalnej pracy, wykazały, że w razie potrzeby port lotniczy jest w stanie zwiększyć swoją przepustowość pasażerską o ok. 900 pasażerów na godzinę. Rzeczywisty ruch pasażerski podczas EURO 2012 nie przekroczył 1600 pasażerów na godzinę. Analizowany port lotniczy był więc dobrze przygotowany do tej dużej imprezy masowej. ◀

Materiały źródłowe

[1] EU OPTAS A (2000), Final Report; Optimization of Airport Systems Part A, European Commission Under The Transport RTD Programme of The 4th Framework Programme.
 [2] Joustra P.E., van Dijk N.M. (2001), *Simulation of Check-In at Airports*, Winter Simulation Conference.



7. Liczba obsłużonych pasażerów w funkcji średniego opóźnienia obsługi przy ekstremalnej pracy portu lotniczego [opracowanie własne]

[3] Kraśnicki-Sokół M., Malarski M. (2005), Analiza parametrów procesu obsługi pasażerów w porcie lotniczym, ZN PŚI Transport z. 58, s. 233-240, Gliwice.
 [4] Malarski M. (2006), Inżynieria ruchu lotniczego, OW PW, Warszawa.
 [5] Malarski M. i zespół (2008), Analiza przepustowości Portu Lotniczego im. Fryderyka Chopina w Warszawie - model airtside dla TMA Warszawa, modele landside

dla terminali, ULC, Warszawa.
 [6] Malarski M., Skorpucki J. (2012), Problemy obsługi pasażerów w regionalnym porcie lotniczym, Przegląd Komunikacyjny nr 2/2012, s. 60-66.
 [7] Verbraeck A., Valentin E. (2002), Simulation Building Blocks for Airport Terminal Modeling, Proceedings of the Winter Simulation Conference 2002.