

KIERZKOWSKI Artur<sup>1</sup>

## MODEL CZASU OBSŁUGI NAZIEMNEJ STATKU POWIETRZNEGO

*W referacie przedstawiono probabilistyczny model czasu obsługi naziemnej statku powietrznego w porcie lotniczym. Model ten zostanie zaimplementowany w symulacji komputerowej odzwierciedlającej proces eksploatacji statków powietrznych, którego zadaniem będzie minimalizacja czasu obsługi technicznej statków powietrznych.*

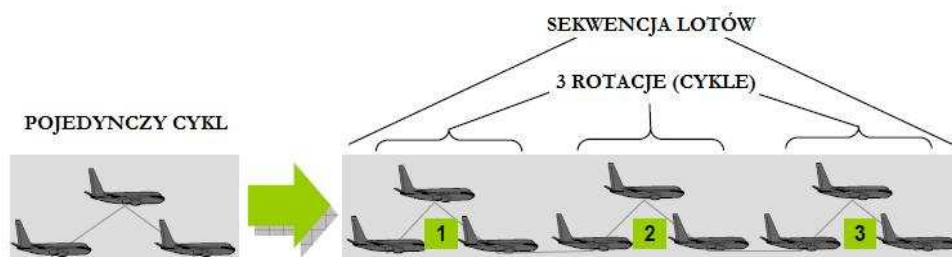
## MODEL FOR GROUND HANDLING TIME OF AIRCRAFT

*The paper presents probabilistic model time ground handling of aircraft. The model will be implemented in a computer simulation process that reflects the operation of aircraft, whose task will be to minimize the time maintenance aircraft.*

### 1. WSTĘP

Proces modelowania siatki połączeń przewoźnika lotniczego jest niezwykle skomplikowany. Z punktu widzenia pasażera lotniczego istotne jest terminowe wykonanie połączenia lub by czas opóźnienia był minimalny, a z punktu widzenia linii lotniczej istotne jest by koszty związane z wykonaniem połączenia były minimalne.

Kluczowe jest więc wcześniejsze zamodelowanie siatki połączeń oraz symulacyjne sprawdzenie poprawności jej funkcjonowania. Rysunek 1 przedstawia przykładowy cykl procesu użytkowania statku powietrznego.

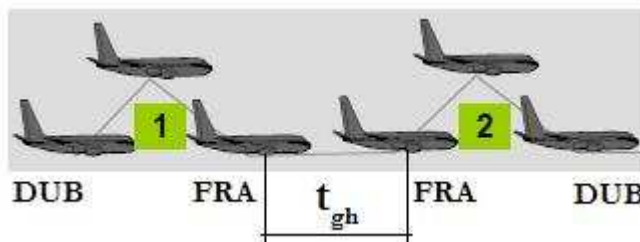


Rys.1. Cykl procesu użytkowania statku powietrznego.

<sup>1</sup>Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn  
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, artur.kierzkowski@pwr.wroc.pl

W zaprezentowanym przykładzie procesu użytkowania statku powietrznego przewoźnik posiadający pojedyncze cykle (połączenia zamodelował sekwencje lotów składającą się z trzech rotacji.

W przypadku istnienia dokładnych danych z procesu eksploatacji statków powietrznych, agencji żeglugi powietrznej przydatne jest zbudowanie modelu czasu pomiędzy połączeniami (rys. 2).



Rys.2. Dwie rotacje statku powietrznego z oznaczeniem czasu obsługi naziemnej.

W celu dokładnego oszacowania czasu obsługi naziemnej, który wykonuje się w celu sprawdzenia poprawności rozkładowego planu lotów, zastosować można teorie szeregów czasowych.

Zagadnienie rozpatrywane było już w latach 70 XX wieku, kiedy to A. Levin sprecyzował zagadnienie problemu odpowiedniego modelowania połączeń lotniczych oraz rotacji statków powietrznych. Zagadnienie to zostało opisane w [1]. Podobnym zagadnieniem w latach 90 XX wieku zajmował się G. Desaulniers, który zaprezentował niezwykle ciekawy model dziennego harmonogramowania procesu eksploatacji statków powietrznych [2]. Model optymalizacji procesu eksploatacji uwzględniający konieczność wykonywania przeglądów technicznych zaprezentowany został przez Sriram C. oraz Haghani A. w [3].

## 2. ANALIZA ORAZ MODELOWANIE SZEREGÓW CZASOWYCH

Istnieje wiele ogólnych modeli szeregów. Do najczęściej spotykanych zalicza się następujące trzy modele:

$$X_t = m_t + s_t + e_t$$

$$X_t = m_t \cdot s_t \cdot e_t$$

$$X_t = m_t \cdot s_t + e_t$$

gdzie  $m_t, s_t, e_t$ :

$m_t$  – składowa trendu (deterministyczna funkcja trendu)

$s_t$  – składowa sezonowości (deterministyczna funkcja sezonowości)

$e_t$  – błąd losowy (proces stacjonarny o średniej zero)

Pierwszy model nazywa się modelem addytywnym, drugi multiplikatywnym, natomiast trzeci modelem mieszanym. Odpowiednia transformacja (Boxa-Coxa) umożliwia sprowadzenie modelu multiplikatywnego i mieszanego do modelu addytywnego. W modelach eksploatacji statków powietrznych najczęściej funkcja trendu jest wielomianem stopnia nie większego niż 1, natomiast sezonowość ma okres 1 roku. Zdarzają się jednak procesy mające wielkości inne niż wyżej wskazane. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku procesów czasów opóźnienia statku powietrznego w porcie lotniczym gdzie sezonowość jest tygodniowa ponieważ zależy od natężenia ruchu w danym porcie lotniczym.

Procedura analizy i dopasowania jednowymiarowego szeregu czasowego składa się z następujących kroków:

1. Dokonuje się klasyfikacji szeregu czasowego na podstawie jego wykresu (czy jest addytywny czy multiplikatywny). Jeśli jest multiplikatywny sprowadza się go do postaci addytywnej, jeśli jest addytywny pozostawia się bez zmian. Ponadto przeprowadza się wizualną analizę wykresu szeregu czasowego pod kątem istnienia funkcji trendu i funkcji sezonowej oraz ich ogólnej charakterystyki.
2. Dokonuje się estymacji funkcji trendu (po wcześniejszym sprowadzeniu modelu do postaci addytywnej)  $\hat{m}_t$  i funkcji sezonowej  $\hat{s}_t$  (jeżeli istnieją). Możliwe jest też usunięcie tych składowych metodą różnicowania. Po estymacji tych funkcji tworzy się proces  $\hat{e}_t = e_t - \hat{m}_t - \hat{s}_t$ . Proces ten nazywany jest procesem residuów. Jeżeli prawidłowo została wykonana estymacja funkcji  $\hat{m}_t$ ,  $\hat{s}_t$ , to proces  $\hat{e}_t$  jest stacjonarny, w innym przypadku zabieg estymacji funkcji trendu i sezonowości należy powtórzyć.
3. Mając proces residuów testuje się czy jest on ciągiem niezależnych jednakowo rozłożonych zmiennych losowych (IID – szumem) jedną z metod:
  - sprawdzający czy wartość funkcji autokorelacji cząstkowej należy do przedziału  $\pm 1,96/\sqrt{n}$ , gdzie  $n$  jest liczbą obserwacji

- testem Junga-Boxa, gdzie wartość statystyki wynosi:  $Q = n \cdot \sum_{j=1}^h \hat{\rho}^2(j)$ ,

$\hat{\rho}(j)$  jest funkcja autokorelacji cząstkowej. Jeżeli  $Q > \chi_{1-\alpha}^2(h)$  hipotezę że proces residuów jest ciągiem niezależnych jednakowo rozłożonych zmiennych losowych (IID – szumem) odrzucamy w odwrotnym przypadku przyjmujemy ( $\chi_{1-\alpha}^2(h)$  - jest kwantylem rozkładu chi kwadrat z  $h$  stopniami swobody).

- testem rang

- sprawdzając czy proces ma rozkład normalny.

Jeżeli nie odrzuca się hipotezy zerowej, tzn. że proces residuów jest ciągiem niezależnych jednakowo rozłożonych zmiennych losowych (IID- szumem), to przyjmuje się, że estymowany proces ma postać  $\hat{X}_t = \hat{m}_t + \hat{s}_t + \hat{e}_t$ , gdzie  $\{\hat{e}_t\}$  jest IID – szumem. Należy jeszcze wyznaczyć jego wariancję.

4. Jeżeli proces residuów nie pochodzi z IID – szumu to dopasowuje się do niego proces stacjonarny typu AR(p) – autokorelacji rzędu p, lub proces MA(q) – średniej ruchomej rzędu q, lub proces ARMA(p,q) – proces mieszany autokorelacji i średniej ruchomej rzędu p i q odpowiednio. Metoda dopasowania tych procesów do danych jest opisana w rozdziale 5 [4]. Metoda dopasowania procesu do danych jest wielostopniowa. Końcowym etapem jest dopasowanie procesu do danych metodą największej wiarygodności. Jakość dopasowania procesu charakteryzowana jest przez wiele wskaźników. Jednym z nich jest wskaźnik AICC (rozdział 5.5. [4]). Im mniejszy jest ten wskaźnik tym lepszy jest stopień dopasowania procesu do danych.
5. Po dopasowaniu procesu do danych ponownie dokonuje się testowania residuów zgodnie z metodami zawartymi w rozdziale 1.6 [4]. Jeżeli proces residuów nie pochodzi z białego szumu, to znaczy że źle zostały wyestymowane  $\hat{m}_t$ ,  $\hat{s}_t$  lub niepoprawnie został dobrany jeden z procesów AR(p), MA(q), ARMA (p,q). Wtedy procedurę dopasowania szeregu czasowego należy powtórzyć.

### 3. MODEL CZASU OBSŁUGI NAZIEMNEJ STATKU POWIETRZNEGO

Istotnym elementem odwzorowania procesu eksploatacji statku powietrznego jest stworzenie modelu czasu obsługi naziemnej i postoju w transporcie lotniczym. Zagadnienie to można rozpatrywać na kilka sposobów. Pierwszym jest analiza przyczyn powstania zakłóceń w ruchu oraz wyznaczenie modelu z uwzględnieniem możliwych zdarzeń oraz skutków. Opóźnienie statku powietrznego w porcie lotniczym może być spowodowane kilkoma czynnikami:

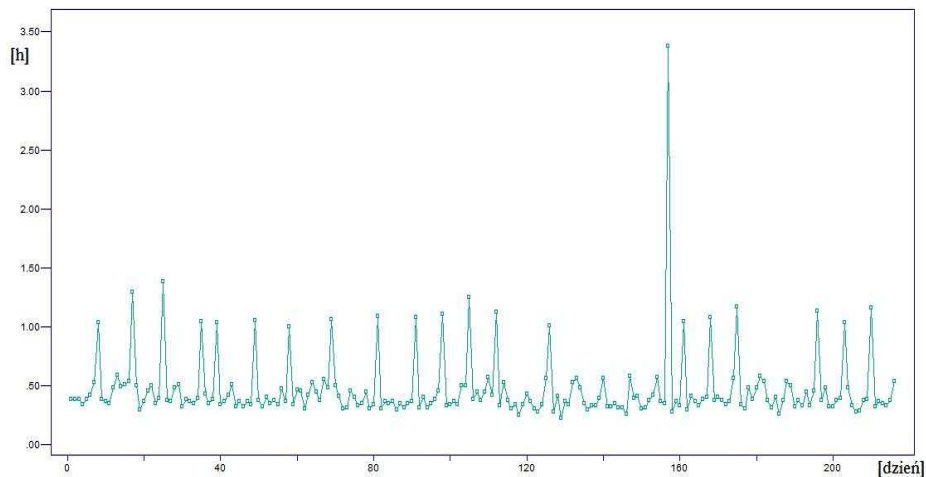
- dłuższym czasem wykonania obsługi naziemnej
- brakiem możliwości wykonania procedury startowej w porcie lotniczym
- brakiem możliwości wykonania procedury podejścia do lądowania
- brakiem wolnej przestrzeni powietrznej koniecznej do wykonania połączenia lotniczego.

Drugim ze sposobów jest estymacja szeregu czasowego, który w swojej naturze będzie zawierał wszystkie możliwe przyczyny powstania zakłóceń natomiast dostarczał nam informacje dotyczące oczekiwanego czasu pomiędzy połączeniami lotniczymi.

Kolejnym sposobem określenia czasu pomiędzy połączeniami lotniczymi jest wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa na podstawie historycznych danych.

#### 3.1 Model czasu obsługi naziemnej statku powietrznego z wykorzystaniem teorii szeregów czasowych

Rysunek 3 przedstawia czas pomiędzy połączeniami lotniczymi, gdy statek powietrzny przylatuje z portu A i odlatuje do portu B. Dane te zostały zgromadzone w czasie jednego okresu istnienia letniej siatki połączeń przewoźnika lotniczego. Przewoźnik wykonywał połączenia na danej trasie raz dziennie, każdego dnia tygodnia.

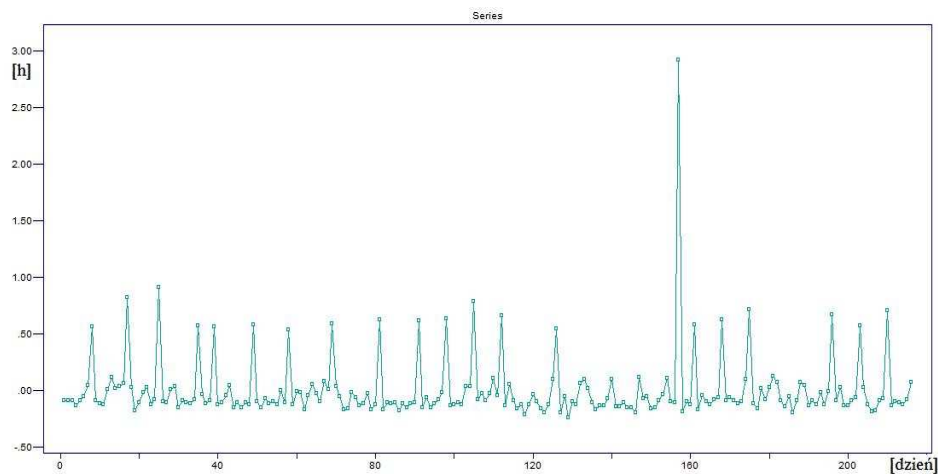


Rys. 3 Wykres czasu pomiędzy połączeniami lotniczymi dla połączenia z portu A do B.

Funkcja trendu dla takiego procesu będzie miała postać:

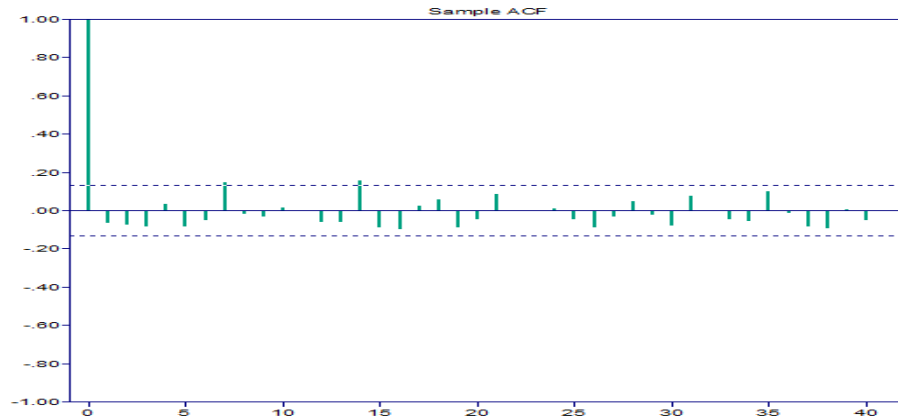
$\hat{m}_t = -0,00083396t + 0,47567$  i została ona wyznaczona zgodnie z procedurami przedstawionymi w rozdziale 1.5 [4].

Rysunek 4 przedstawia zmodyfikowany proces liczby przewiezionych pasażerów z usuniętym trendem  $X_t = (m_t - \hat{m}_t) + s_t + e_t$



Rys. 4. Zmodyfikowany proces liczby przewiezionych pasażerów z usuniętym trendem.

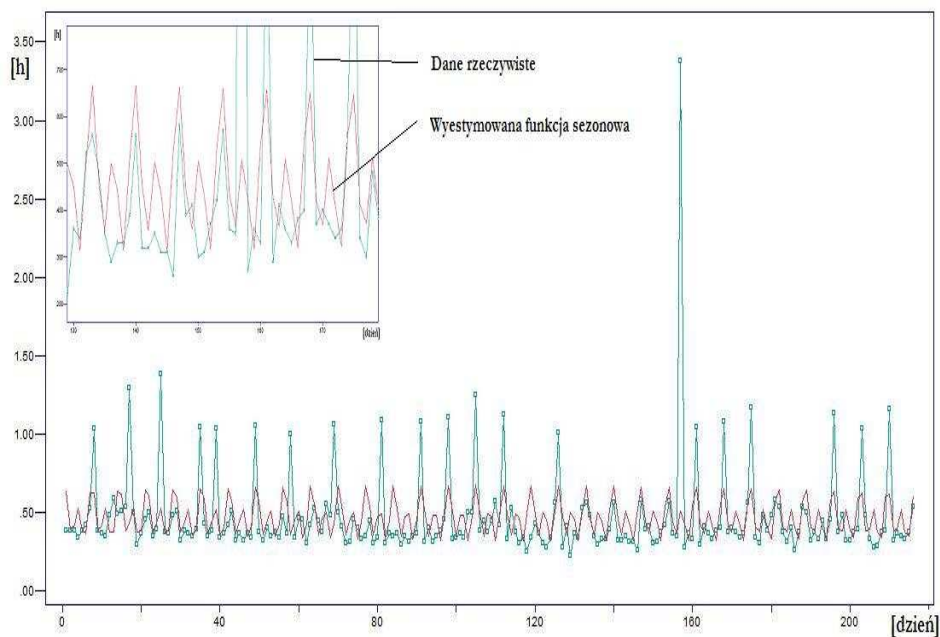
Funkcji autokorelacji cząstkowej procesu  $X_t = (m_t - \hat{m}_t) + s_t + e_t$  jest przedstawiona na rysunku 5.



Rys. 5. Funkcja autokorelacji cząstkowej dla procesu  $X_t = (m_t - \hat{m}_t) + s_t + e_t$ .

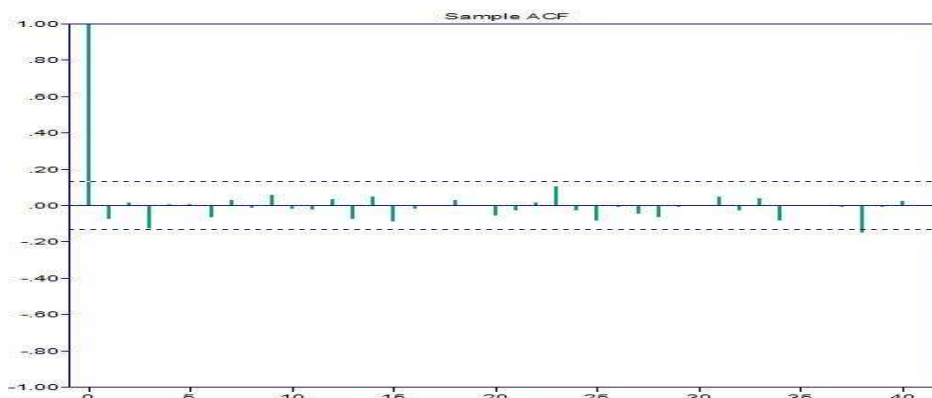
Z wykresu funkcji autokorelacji cząstkowej wynika, że proces posiada wyraźną składową sezonową o okresie równym 7. W transporcie lotniczym jest to dość naturalne zjawisko ponieważ siatka połączeń powtarza się cyklicznie co tydzień.

Wyestymowana funkcja sezonowa została przedstawiona na rysunku 6.



Rys. 6 Wyestymowana funkcja sezonowa.

Wykres funkcji autokorelacji dla danych procesu  $X_t = (m_t - \hat{m}_t) + (s_t - \hat{s}_t) + e_t$  został przedstawiony na rysunku 7.

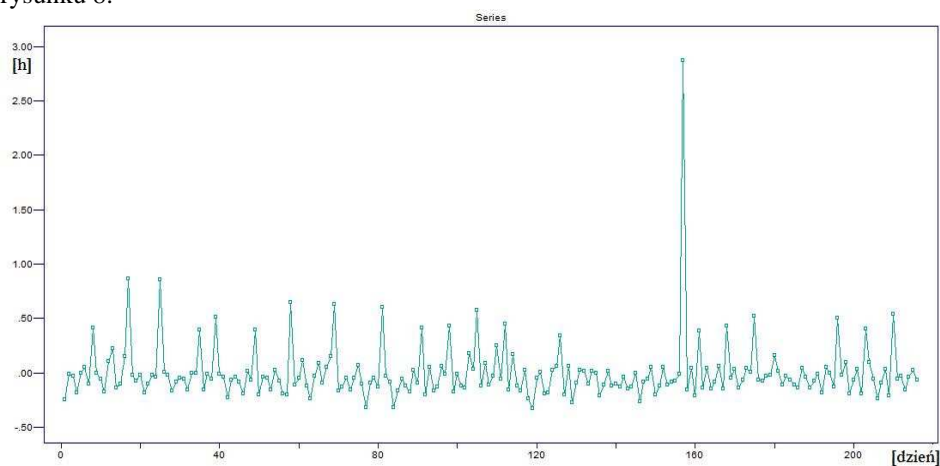


Rys. 7. Funkcja autokorelacji procesu  $X_t = (m_t - \hat{m}_t) + (s_t - \hat{s}_t) + e_t$ .

Wartość statystyki dla testu Ljunga Boxa wynosi  $Q_{LB} = 12,694$ , natomiast prawdopodobieństwo że jest to ciąg niezależnych zmiennych losowych wynosi 0,89. Proces ten, zakładając 90% poziom prawdopodobieństwa, nie jest ciągiem niezależnych zmiennych losowych.

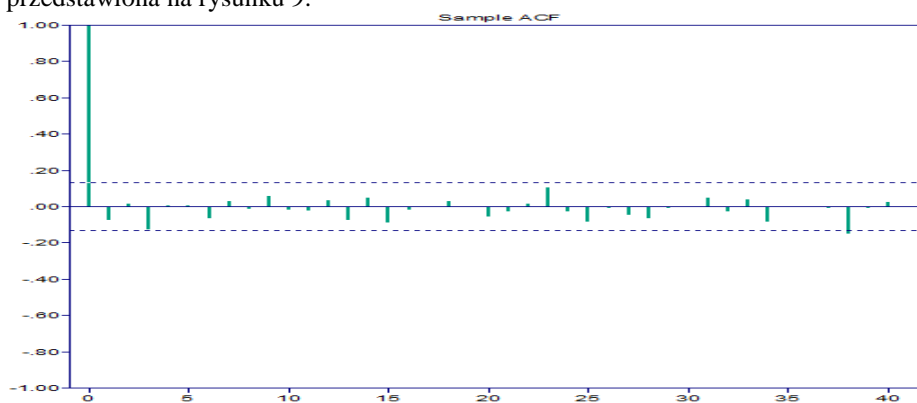
Proces ten nie jest białym szumem więc dopasowuje się do niego jeden z procesów AR(p), MA(q), ARMA(p,q). Procedurę tę wykonuje się zgodnie z rozdziałem 5.2. [1].  $X(t) = -0,07528 X(t-1) + 0,1150 X(t-2)$

Proces najlepiej dopasowany do danych (zgodnie z kryterium AICC) to proces AR(2)  $X_t = -0,07528X_{t-1} + 0,1150X_{t-2} + Z_t$ . Residua procesu przedstawione są na rysunku 8.



Rys. 8. Residua procesu  $X_t = -0,07528X_{t-1} + 0,1150X_{t-2} + Z_t$ .

Wartość funkcji autokorelacji dla procesu  $X_t = -0,07528X_{t-1} + 0,1150X_{t-1} + Z_t$  została przedstawiona na rysunku 9.

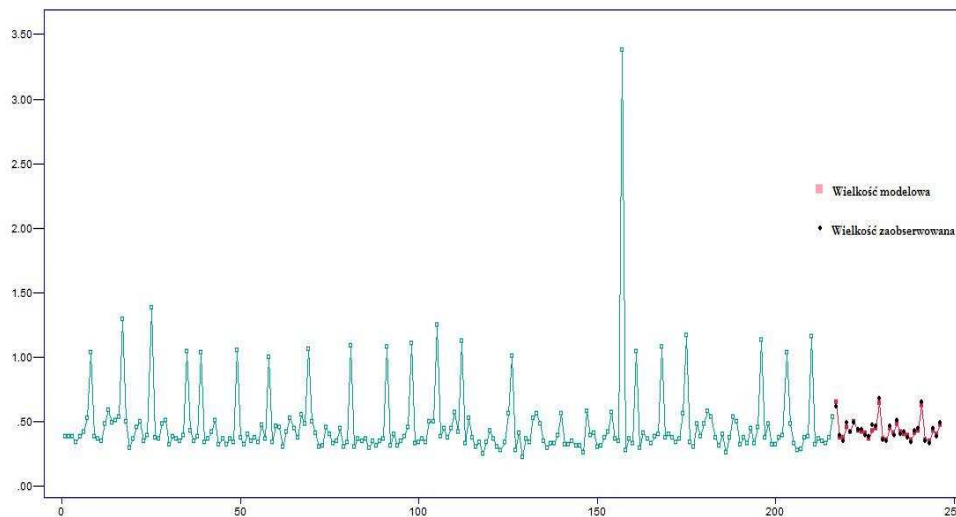


Rys. 9 Funkcja autokorelacji procesu  $X_t = -0,07528X_{t-1} + 0,1150X_{t-1} + Z_t$

Wartość statystyki dla testu Ljunga Boxa wynosi  $Q_{LB} = 10,923$ , natomiast prawdopodobieństwo że jest to ciąg niezależnych zmiennych losowych wynosi 0,94819. Proces ten więc jest ciągiem niezależnych zmiennych losowych.

### 3.2. Weryfikacja modelu szeregu czasowego czasu obsługi naziemnej

Dane zgromadzone na potrzeby modelu czasu pomiędzy połączeniami lotniczymi pochodziły z roku 2008. Weryfikacja tych danych wykonana zostanie za pomocą testu Chi-kwadrat porównując prognozowane wyniki (z modelu) z danymi rzeczywistymi uzyskanymi w 2009 roku. (rysunek 10)



Rys. 10 Porównanie prognozowanych danych z modelu z danymi rzeczywistymi



Jak można zauważyć na rysunku stopień zbieżności dla pierwszych 30 obserwacji jest bardzo wysoki, podobna sytuacja ma miejsce dla całego rozpatrywanego okresu. Dla poziomu istotności  $\alpha=0,95$  test zgodności Chi-kwadrat wykazuje że model posiada odpowiednie parametry.

#### 4. WNIOSKI

Zaprezentowany model będzie jednym z części modelu eksploatacji statków powietrznych. Celem referatu było wskazanie słuszności użycia modelu szeregu czasowego dla rozpatrywanego problemu.

Dalsze prace prowadzone będą w kierunku budowy programu komputerowego będącego integralną częścią zaproponowanego modelu szeregu czasowego. Przy zadanych parametrach operacyjnych portów lotniczych: dostępna przepustowość w danych przedziałach czasu, prawdopodobieństwo powstania zakłóceń ruchu w porcie lotniczym, jak również w strefach dolotowych lotnisk wynikających ze względów operacyjnych lub pogodowych, możliwe będzie przeprowadzenie symulacji procesu eksploatacji. Symulacja ta umożliwi wyznaczenie chwil powstawania zakłóceń. Użycie aplikacji umożliwi weryfikację planowanej siatki połączeń umożliwiając minimalizację pojawienia się zakłóceń przy jednoczesnej maksymalizacji popytu na usługi lotnicze.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



DOLNY  
ŚLĄSK

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Do powstania artykułu przyczynił się udział w Projekcie „Przedsiębiorczy doktorant- inwestycja w innowacyjny rozwój regionu”. Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego funduszu społecznego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Levin A., 1971. Scheduling and fleet routing models for transportation system. *Transportation Science* 5, 232-255.
- [2] Desaulniers. G., 1997. Daily aircraft routing and scheduling. *Management Science* 43, 841-855.
- [3] Sriram C., Haghani A., 2003. An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A* 37, 29-48.
- [4] Peter J. Brockwell, Richard A. Davis „Introduction to Time Series and Forecasting”, Springer, 1996.