

Badania parametrów statystycznych sygnałów hydroakustycznych

Streszczenie. W pracy zajmowano się badaniami wybranych parametrów statystycznych sygnałów informacyjnych po przejściu przez kanał hydroakustyczny. Przeprowadzone analizy miały na celu zbadanie dynamiki zmian tych parametrów oraz określenie na tej podstawie czy proces transmisji danych w kanale hydroakustycznym można uznać za ściśle stacjonarny lub stacjonarny w wąskim sensie.

Abstract. The study examined selected statistical parameters of information signals after passing through the hydroacoustic channel. The analyses carried out were aimed at studying the dynamics of changes in these parameters, and determining on this basis whether the data transmission process in the hydroacoustic channel can be considered strictly stationary or stationary in a narrow sense. (**Studies of statistical parameters of hydroacoustic signals**).

Słowa kluczowe: komunikacja podwodna, stacjonarność i ergodyczność sygnałów hydroakustycznych, parametry statystyczne sygnałów.

Keywords: underwater acoustic communication, stationarity and ergodicity of hydroacoustic signals, statistical parameters of signals.

Wstęp

Komunikacja podwodna za pomocą fal mechanicznych UAC (Underwater Acoustic Communication) jest ważną, dynamicznie rozwijającą się dziedziną techniki mającą współcześnie wiele zastosowań, zarówno cywilnych jak i militarnych. W szczególności komunikacja podwodna może być wykorzystana do sterowania dronów podwodnych, przekazywania informacji w środowisku wodnym a także do transmisji sygnałów mowy i komunikatów pomiędzy pracującymi nurkami. Może także być stosowana do akwizycji danych z różnego typu sensorów umieszczonych pod powierzchnią wody. Współczesne systemy UAC zwykle wykorzystują transmisje sygnałów cyfrowych. Realizacja transmisji cyfrowych w kanale hydroakustycznym, ze względu na fizyczne uwarunkowania, należy do zagadnień trudnych i wymagających szeroko zakrojonych badań. W kanale tym występuje całe spektrum zjawisk, które mają istotny wpływ na jakość transmisji. Należy tutaj przede wszystkim wymienić efekt Dopplera, zjawisko wielodrogowości oraz długi czas pamięć kanału. Aby uzyskać zadawalające szybkości transmisji przy akceptowalnym poziomie błędów konieczne jest precyzyjne określenie parametrów kanału transmisyjnego oraz dynamiki zmian tych parametrów w czasie. Badaniami kanałów hydroakustycznych w szczególności odpowiedzi impulsowych takich kanałów zajmowano się w pracach [1-4]. Konkurencyjną metodą pozwalającą na ocenę stacjonarności kanału hydroakustycznego jest analiza parametrów statystycznych odbieranych sygnałów. W artykule zajęto się badaniami wybranych parametrów statystycznych sygnałów informacyjnych po przejściu przez kanał hydroakustyczny. Zasadniczym celem analiz było określenie na podstawie dynamiki zmian parametrów statystycznych, zakresu stacjonarności i ergodyczności odbieranych sygnałów.

Stacjonarność i ergodyczność procesów

W badaniach przyjęto metodologię postępowania typowo stosowaną w analizie procesów stochastycznych. Korzystając z tej metodologii podjęto próbę zbadania stacjonarności i ergodyczności ciągów sygnałów informacyjnych po przejściu przez kanał hydroakustyczny. Zgodnie z ogólnie przyjętymi definicjami proces nazywamy słabo stacjonarnym lub stacjonarnym w szerszym sensie gdy wartość średnia $\mu_x(t_1)$ jest stała a funkcja autokorelacji zależy tylko od przesunięcia τ . To znaczy, że $R_x(t_1, t_1 + \tau) = R_x(\tau)$ [5]. Jeżeli przyjmiemy, że $\{x_k(t)\}; k = 1, \dots, N$ jest

zbiorem wszystkich funkcji losowych (wszystkich realizacji procesu stochastycznego) to wartość średnią procesu obliczamy z wyrażenia:

$$(1) \quad u_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1),$$

natomiast funkcję autokorelacji na podstawie wzoru:

$$(2) \quad R_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau).$$

gdzie: t_1 – wybrany moment czasu.

Dla procesu losowego można obliczyć nieskończony zbiór momentów wyższych rzędów i momentów łącznych. Ich pełen zbiór opisuje rozkład probabilistyczny procesu. Gdy wszystkie możliwe moment oraz momenty łączne nie zależą od czasu to proces stochastyczny nazywamy ściśle stacjonarnym lub stacjonarnym w węższym sensie. Kolejnym ważnym zagadnieniem jest ergodyczność procesów stochastycznych. Proces stacjonarny nazywamy ergodycznym jeżeli wartości średnia $u_x(k)$ określona wzorem:

$$(3) \quad u_x(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_k(t) dt$$

oraz funkcja autokorelacji $R_x(\tau, k)$ opisana zależnością:

$$(4) \quad R_x(\tau, k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_k(t) x_k(t + \tau) dt$$

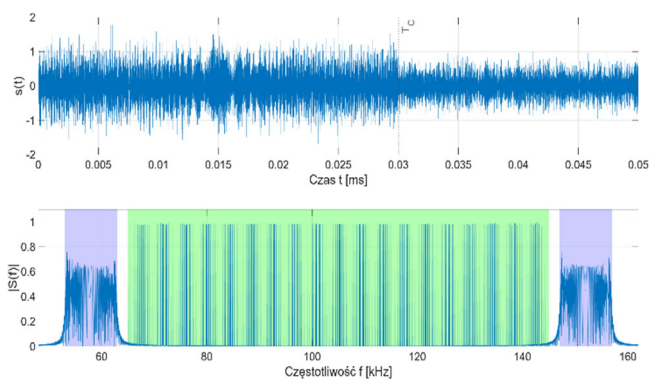
są jednakowe dla różnych realizacji (k jest numerem realizacji procesu losowego) [5].

W przypadkach procesów ergodycznych uśrednianie po zbiorze realizacji w kolejnych chwilach czasu można zastąpić uśrednianiem po czasie dla poszczególnych realizacji. W praktyce jednak często zachodzi konieczność określenia stacjonarności lub niestacjonarności procesu na podstawie jednego przebiegu obserwowanego sygnału. W takim przypadku stosuje się nieco odmienne pojęcie stacjonarności, które oznacza zazwyczaj, że parametry statystyczne wyznaczone dla krótkich przedziałów czasu nie zmieniają się „znacznie” (nie więcej niż 50%) dla kolejnych podprzedziałów. Wyrażenie „znacznie” stosuje się aby podkreślić, że obserwowane zmiany są zauważalnie większe niż by to wynikało z typowych fluktuacji procesu losowego. W ogólności jeżeli wielkości określone wzorami (3) i (4) zmieniają się znacznie dla różnych chwil

początkowych t_1 , to obserwowany sygnał należy uważać za niestacjonarny. Natomiast gdy wielkości określone wzorami (3) i (4) nie zależą znacznie od wyboru czasu początkowego t_1 , to sygnał losowy uważa się za stacjonarny. Należy podkreślić, że ergodyczność procesu losowego implikuje jego stacjonarność, zatem jeżeli założenie o ergodyczności jest uzasadnione to stwierdzenie stacjonarności jednej realizacji obserwowanego procesu losowego może stanowić przyczynek dla założenia o stacjonarności i ergodyczności procesu losowego, do którego należy obserwowany przebieg. W celu określenia stacjonarności procesów związanych z przesyłaniem sygnałów hydroakustycznych analizowane były estymatory funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowych, estymatory funkcji autokorelacji i korelacji wzajemnej oraz momenty zwykle pierwszego rzędu i centralne drugiego rzędu. Dodatkowo w celu potwierdzenia hipotezy o stacjonarności procesu zastosowano rozszerzony test Dickeya-Fullera [6].

Metodyka analiz

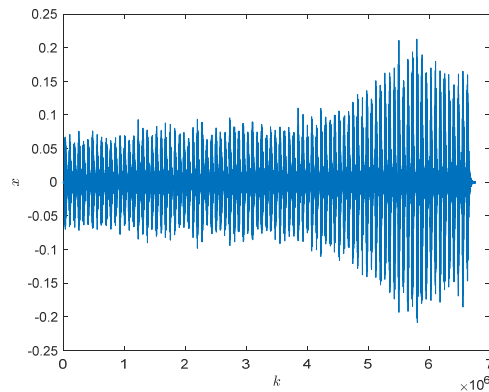
Przeprowadzone analizy dotyczyły transmitowanego sygnału informacyjnego w pasmie 65 kHz – 145 kHz. Zastosowano modulację MFSK (Multiple Frequency-Shift Keying). Odstęp pomiędzy bitami wynosił 320 Hz. Analizowany sygnał był próbkowany z szybkością równą 500 kps. Równoległe z sygnałem informacyjnym przesyłane były sygnały chirpu umieszczone w pasmach 53 kHz - 63 kHz oraz 147 kHz – 157 kHz, których zadaniem było zapewnienie wykrywania transmisji oraz określenie przesunięcia Dopplera. Nadajnik poruszał się w kierunku hydrofonu odbiorczego z prędkością $v = 1,5$ m/s. Opis stanowiska laboratoryjnego do pomiarów hydroakustycznych z podanymi zależnościami geometrycznymi zamieszczono w pracy [1]. Nadawany sygnał, odpowiadający za przesłanie jednego symbolu oraz jego widmo amplitudowe zamieszczone jest na rysunku 1.



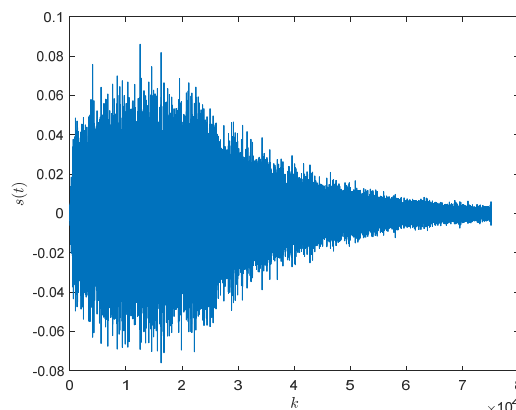
Rys. 1. Przebieg czasowy nadawanego sygnału oraz jego widmo amplitudowe

Analizie poddawano ciąg próbek sygnału po przejściu przez kanał hydroakustyczny, którego czas pamięci oszacowano na 100 ms. Widoczny na rysunku 2 przebieg odpowiada za transmisję 89 symboli. Szczegółowej analizie statystycznej poddano podciąg próbek sygnału odpowiadający za wybrany symbol. Nie stwierdzono dużych fluktuacji parametrów statystycznych ciągów przypisanych do różnych symboli. Wzrost amplitudy obserwowanego sygnału wynika z przybliżania się hydrofonu nadawczego do odbiornika. Na rysunku 3 przedstawiono podciąg próbek sygnału z rysunku 2 odpowiadający za transmisję 44 symboli. Składa się on z 75 000 próbek, pierwsze 15 000 to sygnał z chirpem, kolejne 10 000 to dane bez sygnału

chirpu a za resztę próbek odpowiada echo kanału hydroakustycznego.

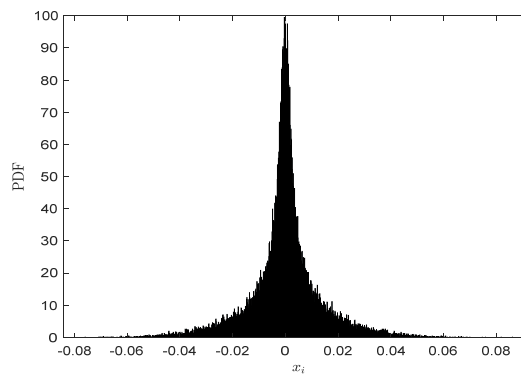


Rys. 2. Zarejestrowany przebieg odebranego sygnału (za cały czas transmisji)



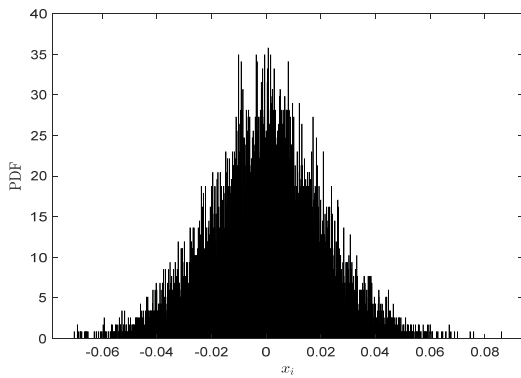
Rys. 3. Podciąg sygnału odpowiedzialny za transmisję pojedynczego symbolu (symbol 44I)

Na rysunku 4 przedstawiono estymator funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowej sygnału z rysunku 3.

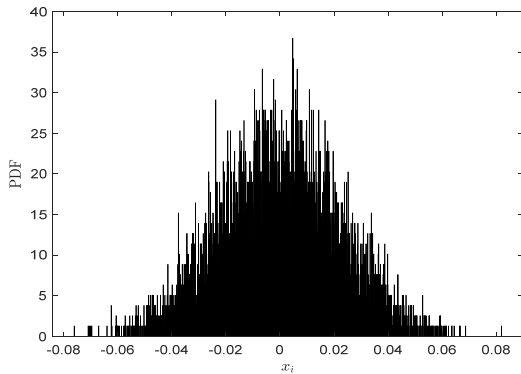


Rys. 4. Estymator funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowej sygnału

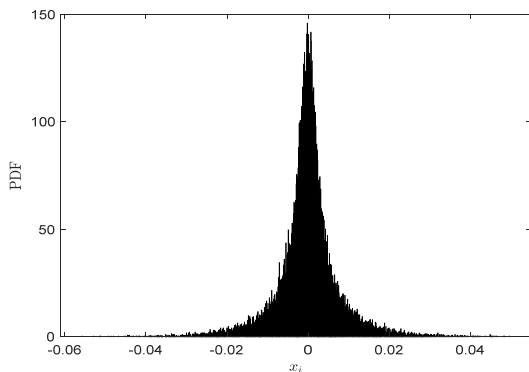
Korzystając z informacji o sposobie tworzenia sygnału, odpowiadającego za przesłanie symbolu, ciąg próbek podzielono na trzy części dla których oddzielnie obliczono estymatory funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych. Estymator widoczny na rysunku 5 odpowiada pierwszej części sygnału a więc sygnałowi zawierającemu użyteczną informację oraz chirp. Na rysunku 6 analizowany jest ciąg zawierający dane użyteczne a na rysunku 7 zamieszczono wyniki analiz echa kanału hydroakustycznego. Estymatory z rysunku 5 i rysunku 6 mają zbliżone kształty natomiast estymator z rysunku 7 odbiega od nich kształtem.



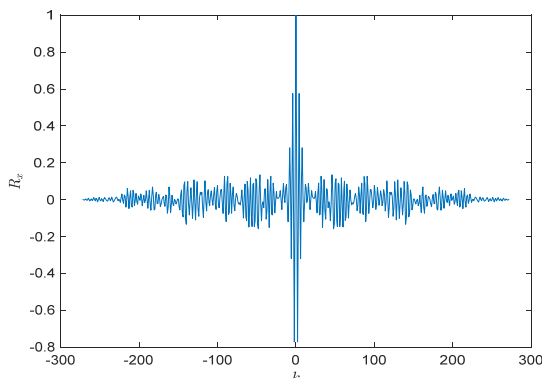
Rys. 5. Estymator funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowej (sygnał informacyjny oraz sygnał chirpu)



Rys. 6. Estymator funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowej (sygnał informacyjny)



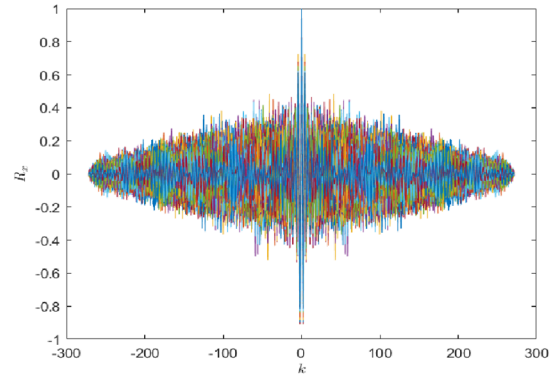
Rys. 7. Estymator funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowej echa kanału hydroakustycznego



Rys. 8. Estymator funkcji autokorelacji dla 266 realizacji

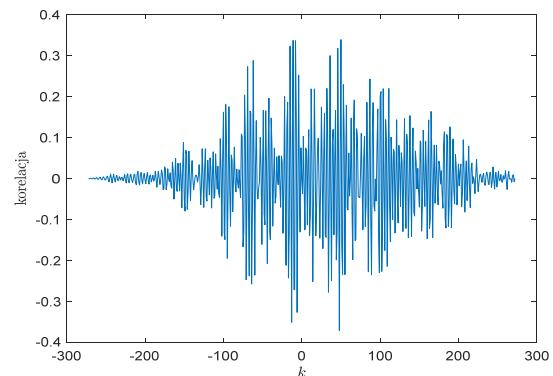
Analizy parametrów statystycznych sygnału przeprowadzono w środowisku MatLAB, gdzie wykonano podstawowe obliczenia statystyczne. Zastosowano metodykę analiz polegającą na podziale ciągu czasowego,

widocznego na rysunku 3, na 274 części, z których każda zawiera 273 próbki. W konsekwencji otrzymano 74 802 próbek zapisanych w macierzy o rozmiarach 274x273. W dalszej części artykułu będzie stosowane nazewnictwo określające poszczególne wiersze macierzy jako realizacje procesu. Na rysunku 8 przedstawiono wykres estymatora funkcji autokorelacji wybranej realizacji (266), a na rysunku 9 przedstawiono zbiorczy wykresy funkcji autokorelacji wszystkich realizacji.

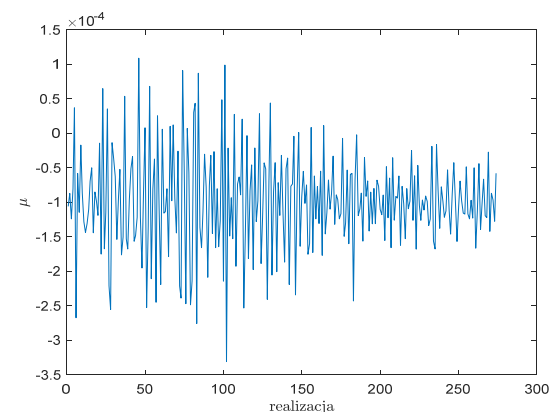


Rys. 9. Estymator funkcji autokorelacji dla wszystkich realizacji

Wykonano także obliczenia estymatora funkcji korelacji wzajemnej pomiędzy wybranymi realizacjami. Przykładowy wynik dla 1 i 10 realizacji przedstawiono na rysunku 10.



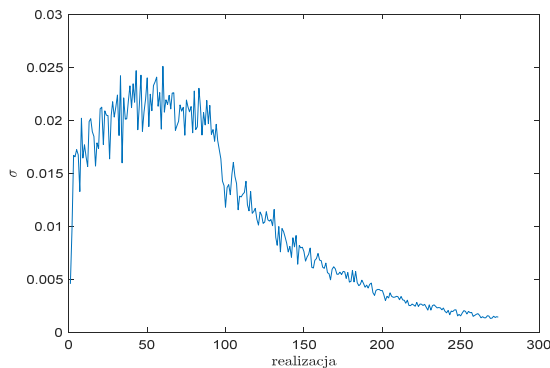
Rys. 10. Estymator funkcji korelacji wzajemnej (realizacje 1- 10)



Rys. 11. Estymator wartości średniej poszczególnych realizacji

Dla wszystkich realizacji, odpowiadających za transmisję 44 symbolu, obliczono wartości średnie oraz odchylenia standardowe. Biorąc pod uwagę sposób generacji sygnału informacyjnego w uzyskanych wynikach można wyróżnić trzy części: dane z chirpem (realizacje od 0 do 55), same dane (realizacje od 56 do 91) oraz echo kanału hydroakustycznego (pozostałe realizacje). Przebieg

zmian estymatora wartość średniej analizowanego sygnału dla poszczególnych realizacji przedstawiono na rysunku 11 a przebieg estymatora odchylenia standardowego na rysunku 12. Można zauważyć spadek wartości estymatora odchylenia standardowego w czasie gdy do odbiornika dochodzi sygnał pochodzący od echa kanału hydroakustycznego.



Rys. 12. Estymator odchylenia standardowego

Na podstawie analizy przebiegu zmian estymatora odchylenia standardowego można oszacować moment czasu w którym zanika odbiór bezpośredni sygnału a do odbiornika docierają sygnały echa kanału hydroakustycznego.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że badany proces można uznać za stacjonarny w szerszym sensie lub słabo stacjonarny. Wynika to z niezmienności estymatora funkcji autokorelacji dla różnych realizacji oraz ze stałości wartości średniej procesu. Dodatkowo, potwierdzenie tej hipotezy uzyskano stosując zaimplementowany w środowisku programistycznym Matlab rozszerzony test Dickeya-Fullera [6]. Test ten jest typowo wykorzystywany do badania stacjonarności szeregów czasowych. Podjęto także próbę zbadania czy analizowany proces można uznać za ściśle stacjonarny. Dla procesu losowego można obliczyć nieskończony zbiór momentów wyższych rzędów i momentów łącznych. Pełen zbiór tych momentów określa rozkład probabilistyczny procesu. Gdy wszystkie momenty oraz momenty łączne nie zależą od czasu to proces losowy nazywamy ściśle stacjonarnym lub

stacjonarnym w węższym sensie. W przypadku badanego procesu hipoteza o ścisłej stacjonarności procesu wydaje się niepotwierdzona. Analiza przebiegu estymatora odchylenia standardowego przeczy takiemu stwierdzeniu gdyż widoczne są zmiany wartości tego estymatora w funkcji czasu. Także estymatory funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowej wykazują istotne różnice w zależności od wyboru analizowanego przedziału czasowego. Wydaje się zatem zasadne stwierdzenie, że analizowane sygnały na wyjściu kanału hydroakustycznego wykazują cechy słabej stacjonarności natomiast nie są stacjonarne w ścisłym sensie.

Praca naukowa finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu DOB-SZAFIR/01/B/017/04/2021.

Autorzy: dr inż. Wiesław Citko, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: w.citko@we.umg.edu.pl; dr inż. Damian Hallmann, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: d.hallmann@we.umg.edu.pl; mgr inż. Łukasz Wojewódka, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: l.wojewodka@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Czapiewska A., Luksza A., Studanski R., Zak A., Analysis of Impulse Responses Measured in Motion in a Towing Tank, *Electronics*, (2023), 22, 3819.
- [2] Mizeraczyk J., Studanski R., Zak A., Czapiewska A., A Method for Underwater Wireless Data Transmission in a Hydroacoustic Channel under NLOS Conditions, *Sensors*, (2021) 21, 7825.
- [3] Czapiewska A., Luksza A., Studański R., Wojewódka Ł., Zak A., Analiza przykładowych odpowiedzi impulsowych kanału hydroakustycznego pomierzonych w ruchu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 9, (2023), 234-237.
- [4] Zak A., Kaczorek P., Studański R., Data transmission in the hydroacoustic channel - experimental researches, *Journal of Marine Engineering and Technology*, 16, (2017), 1-7.
- [5] Bendat J. S., Piersol A. G., *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley&Sons, Inc, New York 2000.
- [6] Dickey D. A., Fuller W. A., Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root, *Journal of the American Statistical Association*, 74, (1979), 427-431.