

Szymon DAMEK¹, Andrzej NOWAK²

Opiekun naukowy: Andrzej NOWAK²

IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA STABILNOŚĆ LOTU BSL

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych, mających na celu identyfikację czynników wpływających na zachowanie się bezzałogowego statku latającego (BSL) podczas lotu autonomicznego. Analizowano wpływ trzech czynników: stopień złożoności trasy przelotu, prędkość oraz ustawienie BSL względem jego chwilowego kierunku lotu. Oceniano zgodność trasy przelotu z zadaną trajektorią.

Słowa kluczowe: BSL, przelot autonomiczny, stabilność przelotu autonomicznego

IDENTIFICATION OF FACTORS AFFECTING BSL FLIGHT STABILITY

Summary: The article presents the results of experimental studies, carried out under laboratory conditions, aimed at identifying the factors influencing the behaviour of an unmanned aerial vehicle (UAV) during autonomous flight. The influence of three factors were analysed: complexity of the route of flight, speed and setting of the UAV in relation to its momentary flight direction. The compatibility of the route of flight with the given trajectory was assessed.

Keywords: BSL, autonomous flight, autonomous flight stability

1. Wprowadzenie

W warunkach terenowych na zachowanie się bezzałogowego statku latającego (BSL) podczas lotu wpływa wiele czynników. Wśród nich można wyróżnić, m.in.: wysokość, na której odbywa się przelot, prędkość poruszania się BSL, zawirowania generowane przez obroty śmigieł, przepływ strug powietrza wokół urządzenia, położenie środka ciężkości, itd. Ostatni z wymienionych czynników jest szczególnie istotny, gdyż ma bezpośredni wpływ na stabilność konstrukcji BSL – jeżeli środek ciężkości będzie usadowiony możliwie blisko środka geometrycznego całego układu,

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Transportu / Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Planowanie i bezpieczeństwo w transporcie / Informatyka, email: sd050181@student.ath.edu.pl

² dr hab.inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Transportu, email: anowak@ath.bielsko.pl

to wówczas BSL będzie bardziej stabilny, ale równocześnie pogorszeniu ulegnie mobilność układu [1]. Z kolei zawirowania generowane przez śmigła oraz prędkość przelotu BSL, w powiązaniu z jego usytuowaniem w stosunku do chwilowego kierunku lotu, mają związek z kierunkiem i intensywnością strug powietrza opływającego urządzenie. Z tych powodów autor, przystępując do badań, postawił sobie za cel zbadanie trzech hipotez, tj. uzyskanie odpowiedzi na trzy pytania. Po pierwsze, jaki wpływ ma średnia prędkość na dokładność przelotów BSL? Po drugie, czy złożoność zaprojektowanej trasy wpływa na dokładność przelotu? I po trzecie, czy przelot BSL frontem do chwilowego kierunku lotu na trasie (tzn. urządzenie będzie wykonywało obroty wokół własnej osi przy każdorazowej zmianie kierunku lotu) będzie rzutowało na dokładność przelotu (dokładność przelotu jest tu rozumiana jako zgodność zmierzonych trajektorii przelotu z założoną, zaprogramowaną trajektorią przelotu).

Wszystkie wykonywane przeloty zostały wykonane autonomicznie, przy użyciu bezpłatnego oprogramowania DronBloks [5], które wykorzystywało programowanie blokowe. Istotnym aspektem dla monitorowania lotu jest to, by kontroler BSL znał swoją pozycję, a w przypadku lotów autonomicznych tę wiedzę posiadał nie tylko pilot, ale też sam BSL. Aktualnie najpopularniejszą metodą do ustalania położenia oraz nawigacji jest system GPS (ang. *global positioning system*) [2], ale również wykorzystywane są systemy takie, jak: TACAN, nawigacji inercyjnej [3, 4], śledzenia radia, nawigowania według punktów.

2. Badania eksperymentalne

Eksperymenty badawcze zrealizowano w dużym pomieszczeniu zamkniętym (jedno z większych audytoriów). Pozwoliło to na wyeliminowanie części czynników mających wpływ na stabilność lotu BSL (np. wpływ warunków atmosferycznych, stanu powietrza atmosferycznego, itp.). Pojedynczy eksperyment polegał na zarejestrowaniu zachowania się BSL podczas wykonywania w pełni autonomicznego lotu. Rejestrowano chwilowe: położenie i prędkość BSL. Eksperyment powtarzano wielokrotnie dla przyjętego wariantu trasy i badanej zależności (hipotezy).

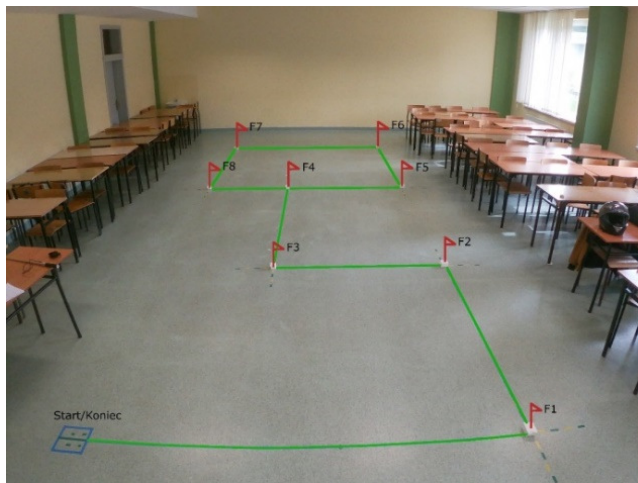
Zanim jednak przystąpiono do właściwych badań, wykonano szereg przelotów testowych, na podstawie których przyjęto, że lot autonomiczny można uznać w badanym punkcie trasy za zgodny z zadaną trajektorią, jeżeli odchylenie w tym punkcie jest nie większe niż 40 cm.

2.1. Stanowisko badawcze

Jak już wspomniano, stanowisko badawcze przygotowano w jednej z większych sal wykładowych w budynku L znajdujących się w kampusie Akademii Humanistyczno-Technicznej w Bielsku Białej. Na wyposażeniu poligonu badawczego znalazły się:

- chorągiewki (do oznaczania punktów pomiarowych),
- taśmy (wyznaczenie toru lotu BSL),
- BSL DJI Tello,
- kamera,
- smartfon (do uruchomienia aplikacji programowania lotu).

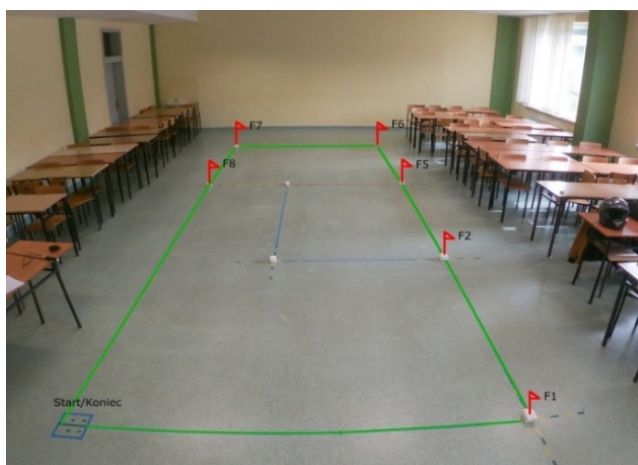
Przygotowano dwa warianty torów badawczych: „Kręty” (rys. 1) oraz „Prostokąt” (Rys. 2). Przebieg wykonywanego lotu po torze „Kręty” był następujący: Start-F1-F2-F3-F4-F5-F6-F7-F8-F4-F3-F2-F1-Start.



Rysunek 1. Trasa badawcza w wariacie: "Kręty"

Na tym torze wykonywano 4 warianty autonomicznych lotów, różniące się wartościami średniej prędkości przelotu BSL (dwie prędkości średnie: 60 cm/s oraz 100 cm/s) oraz położeniami chwilowymi BSL względem chwilowego kierunku lotu (dwa położenia: przelot BSL frontem do wyznaczonej trasy z obrotami oraz przelot BSL w ustalonej pozycji bez obrotów na wykonywanej trasie).

Natomiast przebieg wykonywanego lotu po torze „Prostokąt” był następujący: Start-F1-F2-F5-F6-F7-F8-Start (Rys. 2.). Również w tym przypadku analizowano 4 warianty przelotu, takie same jak opisane w przypadku toru „Kręty”.



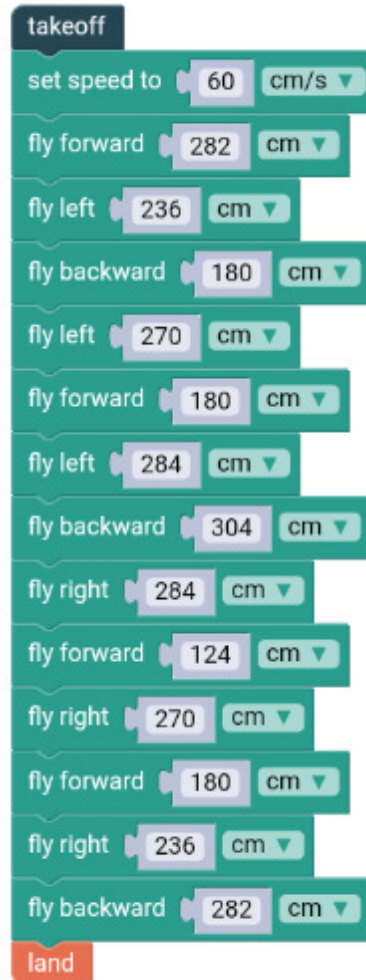
Rysunek 2. Trasa badawcza druga "Prostokąt"

W eksperymencie użyto BSL DJI Tello Boost Combo (rys. 3). Jest to urządzenie małych rozmiarów, co pozwala na badania przelotów autonomicznych w pomieszczeniach zamkniętych o nawet bardzo małych powierzchniach użytkowych. Jak już wspomniano, uzyskano przez to pewną idealizację warunków przelotu, a mianowicie wyeliminowano podmuchy wiatru, które mogłyby powodować zafalszowanie wyników prowadzonych badań. Masa BSL wynosiła 80 g – umożliwiło to realizację badań bez posiadania wymaganych dokumentów do pilotowania BSL. Urządzenie pokonywało wcześniej zaprogramowaną trasę. Programowanie lotu autonomicznego odbyło się przy użyciu smartfona, na aplikacji DronBlocks. Aplikacja pozwala na zaprogramowanie lotu przy pomocy programowania blokowego. Jest dedykowana dla BSL marki DJI, ale też umożliwia samodzielne formułowanie poleceń dla urządzeń badawczych oraz rekreacyjnych z wykorzystaniem istniejących w programie bibliotek.



Rysunek 3. BSL DJI Tello

Po opracowaniu trasy przelotowej dla BSL, wykonano kod dla przelotu autonomicznego dla każdej z założonych konfiguracji przelotu. Przykładowy kod trasy przelotowej ze średnią prędkością 60 cm/s, bez wykonywania obrotów BSL zgodnie z chwilowym kierunkiem lotu, przedstawiono na rys. 4.

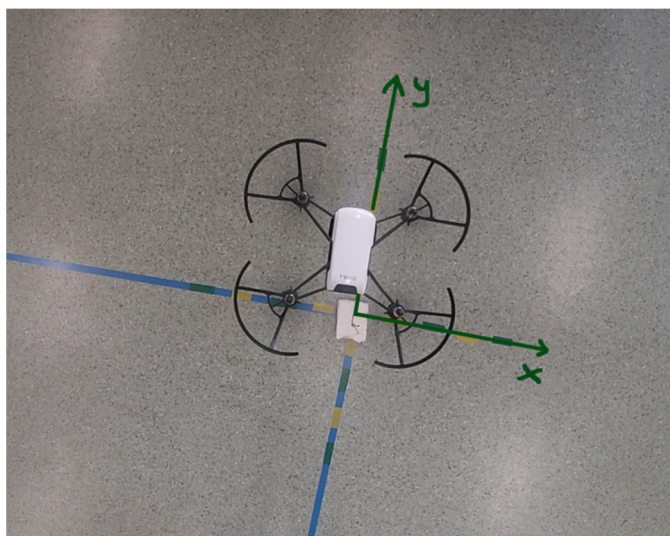


Rysunek 4. Program trasy przelotu „Kręta” bez wykonywania obrotów (prędkość średnia lotu: 60 cm/s)

2.2. Opracowanie i analiza wyników badań

Przeloty BSL na trasie były rejestrowane przez kamerę prowadzoną nad lecącym BSL. Po zrealizowaniu wszystkich zaplanowanych przelotów dane, aby je można było wykorzystać do dalszych analiz, poddano obróbce i weryfikacji.

W pierwszej kolejności wydzielono stopklatki z nagranych przelotów. To pozwoliło na zmierzenie w punktach pomiarowych wartości odchylenia trasy przelotu BSL od założonej trajektorii (rys 5).



Rysunek 5. Zdjęcie z nad BSL w punkcie pomiarowym

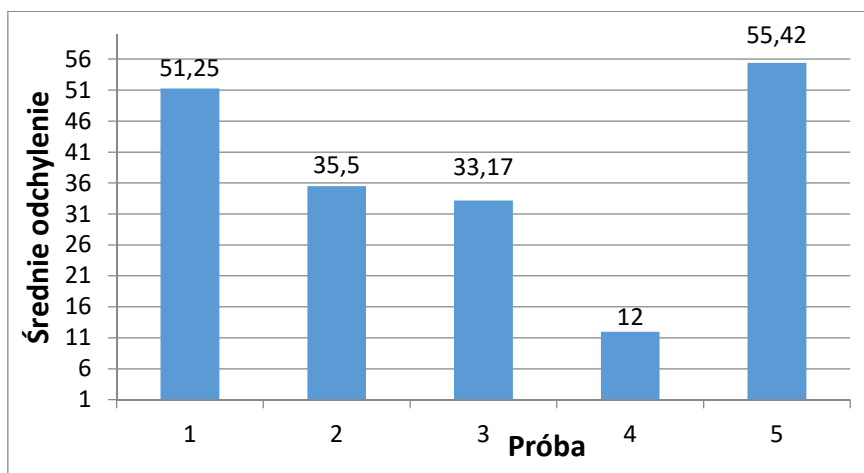
Na rys. 5 przedstawiono przykładowe ujęcie, pokazujące w jaki sposób zostały wykonane odczyty. Wokoło punktu pomiarowego zostały odmierzone odległości co dziesięć centymetrów oznaczone kolejno: żółty-zielony-żółty-zielony, dzięki czemu otrzymano cztery odcinki czterdziestocentymetrowe z każdej strony punktu pomiarowego. Na podstawie tak przygotowanych miarek dziesięciocentymetrowych, odczytywano odchylenia trajektorii lotu BSL, a następnie zapisywano pomiary do arkusza kalkulacyjnego Excel. Widoczne na rys. 5 linie zostały zinterpretowane jako oś x i oś y układu odniesienia, wykorzystanego w celu obliczania chwilowego położenia BSL w przestrzeni. Wykorzystano tu twierdzenie Pitagorasa (1):

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (1)$$

gdzie:

- a – współrzędna y chwilowego położenia BSL,
- b – współrzędna x chwilowego położenia BSL,
- c – szukane położenie BSL (chwilowa odległość BSL od punktu pomiarowego).

Następnie dla każdego pomiaru otrzymanego podczas próby badawczej analizowanego wariantu przelotu, uzyskane wyniki pomiarów odchyłeń (x , y) podstawiano do wzoru (1). Obliczenia te pozwoliły na wyznaczenie średniego odchylenia dla próby na całej długości trasy przelotu (rys. 6).



Rysunek 6. Średnie odchylenie od zadanej trajektorii dla przykładowej trasy

Z wykresu można odczytać, że próba 4. charakteryzuje się najmniejszymi odchyleniami zarejestrowanej trajektorii od zadanej trasy. W dopuszczalnym przedziale wartości odchyłeń mieszczą się również próby 2. i 3. Natomiast odchylenia przy próbie 1. i 5. zdecydowanie wykraczają poza przyjęte kryterium 40 cm. Należy przypomnieć, że każdy z przelotów BSL wykonywał w warunkach prawie idealnych (w sensie: bezwietrznych) oraz startował z tego samego położenia początkowego.

Podsumowując, biorąc pod uwagę wszystkie analizowane przypadki przelotów, średnie odchylenie mieści się w dopuszczalnym przedziale – średnia z pięciu prób wyniosła 37 cm, zatem jest mniejsza niż 40 cm.

Po skompletowaniu wszystkich danych oraz wykonaniu wstępnych obliczeń, zbadano trzy warianty zależności:

- wariant 1: wyznaczenie zależności pomiędzy prędkością a dokładnością przelotu,
- wariant 2: wyznaczenie zależności pomiędzy poziomem skomplikowania trasy a dokładnością przelotu,
- wariant 3: wyznaczenie zależności pomiędzy kierunkiem lotu (frontem do trasy) a dokładnością przelotu.

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem metod statystycznych, a mianowicie za pomocą analizy dwuwymiarowej zmiennej losowej [6]. Metoda ta pozwoliła na wyznaczenie współczynnika korelacji liniowej P , określonego wzorem:

$$P = \frac{ConvXY}{\sqrt{VarX \cdot VarY}} \quad (2)$$

gdzie: $ConvXY$ – kowariancja dwuwymiarowej zmiennej losowej (X, Y) ,

$VarX$ – wariancja zmiennej X ,

$VarY$ – wariancja zmiennej Y .

Następnie obliczono kowariancja dwuwymiarowej zmiennej losowej (X, Y) :

$$ConvXY = EXY - (EX \cdot EY) \quad (3)$$

gdzie: EXY – wartość oczekiwana dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,Y) ,

EX – wartość oczekiwana zmiennej X ,

EY – wartość oczekiwana zmiennej Y .

Kolejno obliczono wartość oczekiwaną dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,Y) :

$$EXY = \sum_i \sum_j (x_i (y_j p_{i,j})), \quad (4)$$

gdzie: x_i – przedział odległości (klasa),

y_j – wariant,

$p_{i,j} = P(X = x_i, Y = y_j)$.

Następnie wyznaczono wartości oczekiwane zmiennych X oraz Y :

$$EX = \sum_i x_i p_j, \quad (5a)$$

$$EY = \sum_j y_j p_j, \quad (5b)$$

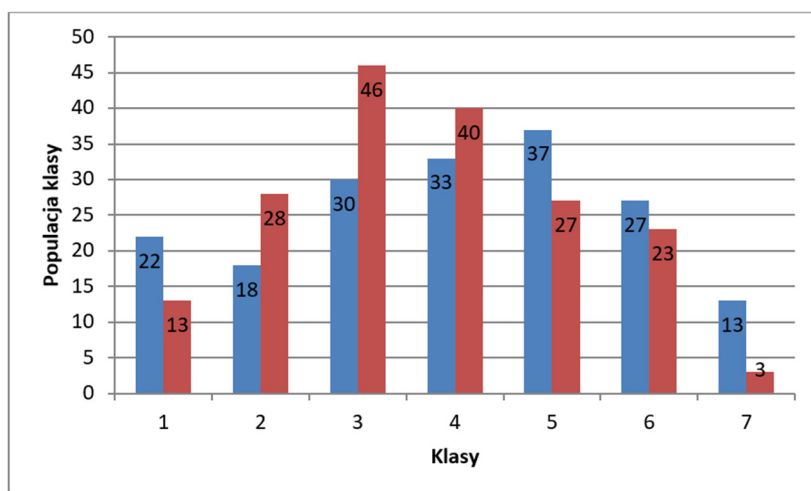
gdzie: p_i, p_j – wartości brzegowe zmiennych, odpowiednio X i Y .

Wariancję zmiennej X oraz wariancję zmiennej Y wyznaczono ze wzorów:

$$VarX = EX^2 - (EX)^2, \quad (6a)$$

$$VarY = EY^2 - (EY)^2. \quad (6b)$$

W każdym z trzech badanych przypadków opracowano populację klas. Na rys. 7 pokazano populację klas dla pierwszej hipotezy, według której zakładano, że dokładność lotu po zadanej trajektorii zależy od prędkości przelotu.



Rysunek 7. Populacja klas dla hipotezy pierwszej („dokładność realizacji zadanej trajektorii zależy od prędkości przelotu”) – kolor niebieski: $v=60\text{cm/s}$, kolor czerwony: $v=100\text{cm/s}$

Analiza danych (rys. 7) wskazuje na fakt, że przeloty posiadały zbliżone odchylenia w poszczególnych klasach. Najczęściej przeloty były realizowane w klasach 3÷5, co

oznacza loty z odchyleniem od założonej trajektorii o wartościach z przedziału 20÷49 cm. Wartość korelacji liniowej dla badanej hipotezy wyniosła $P = 0,01$. Oznacza to, że na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono słabą zależność dokładności realizacji zadanej trajektorii od średniej prędkości przelotu BSL.

W podobny sposób analizowano pozostałe dwie hipotezy. W przypadku badania zależności pomiędzy stopniem skomplikowania trasy a dokładnością przelotu stwierdzono nieco mocniejszą zależność – wartość korelacji wyniosła tu $P = 0,08$. W trzecim przypadku, w którym badano w jakim stopniu dokładność przelotu zależy od braku bądź występowaniu obrotów BSL przy zmianie jego chwilowego kierunku ruchu stwierdzono, że wprowadzanie obrotów BSL w trakcie lotu przekłada się na zmniejszenie wartości odchylenia trajektorii lotu od zadanej trasy.

3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań, bazując na analizie porównawczej wyników pomiarów w trzech wariantach eksperymentu, wykluczono prędkość przelotu jako czynnik mający istotny wpływ na dokładność przelotu BSL po zadanej trasie. W warunkach naturalnych, gdzie na lot wpływa dużo czynników zewnętrznych takich, jak na przykład wiatr, odchylenia dla oktokoptyerów byłyby niewielkie przy dużej prędkości przelotowej.

Przeprowadzone badania wskazują natomiast, że w warunkach laboratoryjnych (a takim był poligon badawczy w sali dydaktycznej), najistotniejszą spośród badanych okazała się zależność dokładności realizacji zadanej trajektorii od stopnia skomplikowania trasy lotów autonomicznych. Badania wykazały, że dokładniejsze przeloty wykonywane były dla tras, gdzie trudność przelotu była niska, jak w przypadku trasy „Prostokąt”. W odniesieniu do realnie wykonywanych lotów, zalecane byłoby programowanie takich tras, gdzie na trasie przelotu znajdowałoby się jak najmniej przeszkód oraz BSL pokonywałby raczej na trasach odcinki długie i proste. Ostatnią badaną zależnością było sprawdzenie wpływu ustawienia BSL w stosunku do jego chwilowego kierunku lotu na dokładność przelotu po zadanej trajektorii. Badania wskazują, że w przypadku BSL używanego w eksperymencie, obroty przez niego wykonywane w trakcie zmian kierunku ruchu zwiększają dokładność utrzymania zadanej trajektorii.

Badania zrealizowane w warunkach laboratoryjnych powinny teraz zostać odwzorowane w środowisku naturalnym, gdzie przeprowadzono by takie same testy, ale z uwzględnieniem czynników zewnętrznych (np. kierunek i prędkość wiatru). Kolejnym elementem przyszłych badań, dzięki któremu stałyby się one bardziej wiarygodne, byłoby ich przeprowadzenie przy użyciu kilku różnych modeli BSL.

LITERATURA

1. Strona internetowa Gannet – dlaczego wyważanie drona do łowiectwa jest ważne: <https://BSLe-fishing.com/blogs/news/why-is-balancing-the-BSLe-for-BSLe-fishing-so-important>, 8 maja 2020.
2. El-RABBANY A.: Introduction to GPS: The Global Positioning System, ArtechHouse Publishers 2006.

3. SCHWARTZ C.E., BRYANT T.G., COSGROVE J.H., MORSE G.B., NOONAN J. K.: A radar for unmanned air vehicles, The Lincoln Laboratory Journal, 3(1990)1.
4. AUSIN REG: Unmanned aircraft systems, UAVS design, development and deployment, John Wiley & Sons Ltd published 2010, British library.
5. Strona internetowa DroneBlok informacje ogólne - <https://learn.BSLblocks.io/p/membership>, 9 sierpnia 2020,
6. KRYSYCKI W., BARTOS J., DYSZKA W., KRÓLIKOWSKA K., WASILEWSKI M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach część I. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999