

**Mariusz Kostrzewski**

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

## **ZASTOSOWANIE METOD SYMULACYJNYCH W BADANIU WYBRANYCH PROCESÓW MAGAZYNOWYCH W MAGAZYNIE WYSOKOREGAŁOWYM**

Rękopis dostarczono: marzec 2016

**Streszczenie:** Niniejszy artykuł ma na celu omówienie zastosowania metod symulacyjnych w badaniu procesów magazynowych, w głównej mierze w magazynie wysokoregałowym. W szczególności dotyczy to analizy wyników symulacji procesu komisjonowania. Badanie realizowane było dla stochastycznie zróżnicowanej liczby pozycji w wierszu zlecenia na komisjonowanie. W pracy dokonano analizy mającej prowadzić do określenia czy badanemu przypadkowi przepływu materiałów możliwe jest przyporządkowanie teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa, którym można by opisać wyniki uzyskane z prób. Poprzez wyniki rozumiane są wartości czasów trwania procesu komisjonowania. Model symulacyjny został przygotowany z myślą o badaniu procesu komisjonowania w ujęciu stochastycznym. Model został poddany walidacji w celu porównania jego działania z metodą obliczania czasów procesów komisjonowania w praktyce inżynierskiej.

**Słowa kluczowe:** magazyn wysokoregałowy, model symulacyjny, proces komisjonowania

### **1. WSTĘP**

W jakim celu stosowane są symulacje w logistyce? Autorzy [51, s. 35], [56., s. 333] wyróżniają następujące zastosowania, wydzieliwszy uprzednio cztery ich grupy, tj.: planowanie, sterowanie procesem, szkolenia oraz badania i rozwój. W artykule rozpatrzeniu podlega ostatnia grupa.

Modelowanie szeroko pojmowanych procesów transportowych obejmuje swym zasięgiem między innymi modelowanie procesów magazynowych. W obrębie modelowania procesów magazynowych rozpatrywane są pojemności (wyrażone w liczbie jednostek ładunkowych, np. paletowych) czy usytuowanie obszarów funkcjonalnych magazynów, w tym obszarów buforowych umożliwiających regulację przepływu materiałów wewnątrz magazynu (rzadziej regulację przepływu informacji – tutaj należałoby dodatkowo rozpatrywać zagadnienia skupione wokół technologii informacyjnej). Ponadto w obrębie modelowania procesów magazynowych przeprowadzana może być analiza układów transportowych lokalizowanych na krańcach

obiektów logistycznych jakimi są magazyny tj. na wejściu do nich i wyjściu z nich. A wreszcie może być opracowane i przeanalizowane kolejowanie przyjęć i odbioru ładunków (szczególnie w przypadku magazynów, które uchodzą za „niewydolne” czyli nie będące w stanie obsłużyć zadanego przepływu materiałów i przepływu informacji towarzyszącemu przepływowi materiałów). Jako że procesy magazynowe to uporządkowany łańcuch operacji związanych z obsługą ładunków w obrębie obiektu logistycznego typu magazyn, wyróżnia się ich sześć podstawowych rodzajów: proces kontroli i przyjęcia ładunku, proces wprowadzenia ładunku do strefy składowania, proces składowania, proces wprowadzenia ładunku ze strefy składowania do strefy komisjonowania, proces komisjonowania (z uwzględnieniem operacji kompletacji, sortowania i pakowania), proces wydania/wysyłki ładunku itd.

Niniejszy artykuł ma na celu omówienie analizy wyników symulacji uzyskanych w efekcie wykorzystania uprzednio opracowanego modelu symulacyjnego. Model symulacyjny przygotowany został dla procesu komisjonowania (w zasadzie operacji wchodzącej w jego skład, tj.: kompletacji) w obrębie strefy składowania magazynu wysokoregalowego. Badanie realizowane było dla stochastycznie zróżnicowanej liczby pozycji w wierszu zlecenia, co zostanie poddane omówieniu w dalszej części pracy. Proces komisjonowania jest uważany za jeden z najważniejszych przedmiotów badań logistyki z racji faktu, że angażuje najwięcej zasobów spośród wszystkich możliwych procesów, [1]. Autorzy szacują koszty procesu komisjonowania odniesione w stosunku do całkowitych kosztów operacyjnych magazynu na poziomie 55% wg [61], tudzież 65% wg [16, 17].

Definiując za [5-7] „symulacja stanowi imitację systemów i procesów występujących w rzeczywistości.” I kontynuując: symulacja „obejmuje generowanie historii systemu i obserwację tej historii wraz z odpowiednim wyciąganiem wniosków dotyczących charakterystyki pracy układu rzeczywistego, który reprezentuje.” Autor pracy [56, s. 330] symulację definiuje jako „naśladowanie procesu dynamicznego, zachodzącego w pewnym systemie, za pomocą nadającego się do eksperymentów modelu, aby uzyskać informacje, które są możliwe do przeniesienia w obszar rzeczywistości.” Te i wiele innych definicji symulacji wskazują, że jest to imitacja czy naśladownictwo rzeczywistości. Istotne jest tu przyjęcie odpowiednich założeń, aby owa imitacja była adekwatna wobec rzeczywistości.

W artykule, przy okazji wyżej wymienionych efektów prac dokonano także analizy mającej prowadzić do określenia czy dla badanego przypadku przepływu materiałów możliwe jest przyporządkowanie teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa, którym można opisać wyniki uzyskane z prób (wartości czasów trwania procesu komisjonowania).

## 2. PROCEDURA POSTĘPOWANIA

Modele symulacyjne stosowane są na ogół wówczas, gdy nie jest możliwe lub jest bardzo utrudnione uzyskanie rozwiązania analitycznego badanego problemu. Dotyczy to na przykład analizy dynamicznego zachowania systemów i procesów logistycznych. Jak wspomniano powyżej, w badaniach posłużono się metodami symulacyjnymi. Procedura postępowania w przypadku wykorzystania metod symulacyjnych w badaniach dotyczących przepływów materiałów w magazynach przedstawiona została w [44, s. 273], zatem

w artykule pominięty zostaje jej opis. Pominięte zostają też podstawowe treści nt. teorii symulacji – autor odsyła czytelnika do prac [38, 39, 43], w których wskazano główne rodzaje symulacji, zalety i wady stosowania metod i modeli symulacyjnych itd.

Znane są liczne narzędzia komputerowe służące do konstruowania i analizowania modeli symulacyjnych, a zatem wspierające realizację badań metodami symulacyjnymi. Z punktu widzenia logistyki czy produkcji największą przydatnością charakteryzują się pakiety symulacyjne, których struktura operacyjna wykorzystuje koncepcję modułowych implementacji graficznych [43, s. 87], a modelowanie następuje jako ciąg zdarzeń dyskretnych [13]. Wśród tego typu pakietów komputerowych wyróżnić można: *Dosimis-3* (np. w [9-12, 19, 23, 24, 29, 31-34, 50]), *Arena* (np. w [36]), *Automod* (np. w [14]), *Promodel* (np. w [27]), *Quest*, *Witness* (np. w [8]), *Mosys*, *Taylor*, *Enterprise Dynamics*, *FlexSim* (np. w [22]), *OL09* (np. w [42, 45, 46]), a wreszcie *Plant Simulation* (np. w [18, 30, 37, 41-44, 47, 48]). *Plant Simulation* znajduje coraz szersze zastosowanie w badaniach naukowych i przemysłowych, głównie w logistyce i produkcji. Pierwsze prace autora pojawiły się w 2007 r. [41, 42]. *Plant Simulation* wykorzystany został do przeprowadzenia omawianych badań. W pracy [43, ss. 87-88] omówiono narzędzie wykorzystywane do modelowania procesu komisjonowania wraz z opisem funkcjonalności oprogramowania.

Klasyfikację metodyki podejścia wobec konstruowania modeli systemów i procesów wskazano w [40, s. 3139], [49, s. 348] na podstawie [25, 28], [30, s. 63], [35, s. 114], [52]. Modele symulacyjne, występujące w tej klasyfikacji, zależnie od cech czyli atrybutów modeli opisujących stan systemu w danej chwili czasowej, można podzielić na cztery typy, [48, 66], [65, ss. 46-48]: dynamiczne, statyczne, stochastyczne, deterministyczne.

W przypadku modeli dynamicznych czynnik czasu ma istotne znaczenie. Stan systemu zmienia się wraz z upływem czasu symulacyjnego. Autorka pracy [54] za przykłady podaje wszelkiego rodzaju modele działania systemów obsługi, produkcji, transportu itp. W przeciwieństwie do modeli dynamicznych, w przypadku modeli statycznych upływ czasu nie ma wpływu na wynik symulacji, w związku z czym zegar symulacji nie jest potrzebny. W przypadku modeli stochastycznych duże znaczenie mają występujące w nim zmienne losowe, mające istotny wpływ na zachowanie procesów. Nie istnieje linearny schemat występowania zdarzeń w procesach składających się na dany model symulacyjny. Ważnym elementem przy konstruowaniu takiego modelu jest dobór odpowiedniego generatora wartości losowych, na ogół pseudolosowych. W modelach deterministycznych z kolei nie występują zmienne losowe. Cechy obiektów są predefiniowane, bądź też obliczane wg zadanych wcześniej funkcji matematycznych.

Rozpatrywany w pracy model symulacyjny jest modelem typu stochastycznego.

### 3. OBLICZENIE CZASÓW CYKLI KOMISJONOWANIA

Wstępnie, przed konstruowaniem modelu symulacyjnego, policzono czasy procesu komisjonowania. Obliczenia wykonane zostały przy wykorzystaniu tradycyjnych metod stosowanych w praktyce inżynierskiej, [20, 21].

Dla badanego przypadku wprowadzono określone parametry i ograniczenia:

1. czasy jednostkowe pobrane z norm *Method Time Measurement*:

- a. średnia wartość czasu przyspieszenia lub zatrzymania  $A = 0,0475$  [min],
  - b. czas pobrania pustej palety  $t_{01} = 0,4674$  [min],
  - c. czas odstawienia jednostki ładunkowej paletowej skompletowanej  $t_{02} = 0,4534$  [min],
  - d. czas przekazywania informacji  $t_{pro} = 0,0852$  [min],
  - e. czas przekazywania informacji  $t_{ro} = 0,1180$  [min],
  - f. czas wybierania (pobierania) jednego artykułu  $t_{pl} = 0,1164$  [min],
2. długość korytarza roboczego  $L = 90$  [m],
  3. prędkość środka transportu  $F1 = 0,0079$  [min/m],
  4. liczba wierszy w zleceniu na komisjonowanie  $w = 4$ ,
  5. liczba pozycji artykułu w wierszu zlecenia – zmienna od 1 do 10,  $p \in \{1, 10\}$ ,  $p \in \mathbb{N}$ ,
  6. problem rozpatrywany jest w obrębie pojedynczego korytarza roboczego.

Dla tak określonych parametrów i ograniczeń obliczono czasy trwania procesów komisjonowania ujmując przy tym zmienność parametru  $p$  (liczba pozycji w wierszu). Rezultatem obliczeń są wyniki zestawione w kolumnie 2 tab. 1. Otrzymane wyniki posłużyły do walidacji realizowanego z wykorzystaniem oprogramowania *Plant Simulation* modelu procesu komisjonowania w korytarzu roboczym w strefie składowania.

## 4. BUDOWA MODELU SYMULACYJNEGO

Symulacyjny model rozważany w artykule został opracowany zgodnie z wytycznymi specyfikacji i struktury modelowania zdarzeń dyskretnych (DEVS). Struktura DEVS jest określona w [63]. Formalizm tej struktury stanowi uporządkowana siódemka, której elementy określono poniżej:

$$M^{DEVS} = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, t \rangle \quad (1)$$

gdzie:

$X$  – zbiór zmiennych wejść,

$S$  – zbiór zmiennych stanów,

$Y$  – zbiór zmiennych wyjść,

$\delta_{int}$  – funkcja przejścia wewnętrzna  $\delta_{int} : S \rightarrow S$ ,

$\delta_{ext}$  – funkcja przejścia zewnętrzna  $\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$  gdzie  $Q$  to zbiór stanów na wyjściu,  $Q = \{(s, e) / s \in S, 0 \leq e \leq t(s)\}$ , przy czym  $e$  to czas, który upłynął od ostatniego przekształcenia (przejścia),

$\lambda$  – funkcja wyjściowa  $\lambda : S \rightarrow Y$ ,

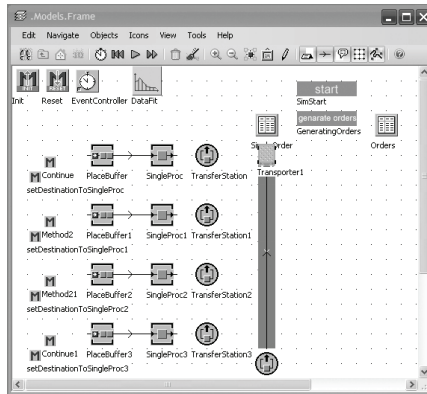
$t$  – postępująca funkcja czasu  $t : S \rightarrow \mathbf{R}^+$ .

Istnieje wiele pakietów komputerowych, które korzystają z wymienionego modelu DEVS w swojej strukturze realizacyjnej. Jest nim też *Plant Simulation 10.1*.

Dla potrzeby przeprowadzenia badań wykorzystano narzędzie *Plant Simulation 10.1*, bazując na [2-4, 62]. Na rys. 1. znajduje się wizualizacja fragmentu uproszczonego modelu

symulacyjnego, przy użyciu którego przeprowadzono analizy (warto tu jednak zauważyć, że autorzy [59] uznają modelowanie procesów magazynowych nie poddanych automatyzacji za trudniejsze, bardziej skomplikowane, dlatego też zaproponowano uproszczenia w modelu symulacyjnym, co da się spostrzec na rys. 1.; z kolei autor [57] nadmienia, że w ramach przeprowadzania procesów komisjonowania „wyraźnym trendem jest coraz częstsze korzystanie z wózków wielofunkcyjnych, potrzebujących stosunkowo wąskiego korytarza roboczego”. Takż wobec tego zastosowano.

Model ten pozwala na wygenerowanie dowolnej liczby zleceń na komisjonowanie (na potrzeby niniejszych badań zainicjowano 100 lub 1 000 zleceń) o liczbie wierszy wynoszącej  $w = 4$  każde i dowolnej liczbie pozycji przypadających na wiersz zlecenia na komisjonowanie (z przedziału  $p = 1 \div 10$ ). Zlecenia zostają wygenerowane w wyniku inicjacji procedury *Generate orders*. Procedura wprowadza do tabeli *Orders*, zawierającej wszystkie zlecenia, wartości pozycji dla każdego z 4 wierszy w każdym ze stu lub tysiąca zleceń. Przy generowaniu losowej liczby pozycji w wierszu pojedynczego zlecenia zastosowany został rozkład jednorodny dyskretny, ponieważ używa się go gdy wszystkie wartości od minimalnej do maksymalnej są równouprawnione. Jest to rozkład jednorodny dyskretny, w którym jednakowe prawdopodobieństwo przypisane jest do  $n$  różnych liczb rzeczywistych  $k_1, \dots, k_n$ , przy czym  $k_1, \dots, k_n$  to liczby całkowite z przedziału  $[1, 10]$ .



Rys. 1. Wizualizacja symulacyjnego modelu procesu komisjonowania, fragment

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem *Plant Simulation 10.1*.

Na podstawie zapisów wygenerowanych do tabeli *Orders* model przesyła wskazaną w rekordach tabeli liczbę artykułów z generatorów ładunków (procedur, zwanych w oprogramowaniu metodami, generujących liczbę artykułów wg zlecenia) do punktu zbiorczego dla jednostek ładunkowych paletowych kompletowanych. Pod hasłem „generator ładunków” kryją się w modelu pary procedur znajdujących się po lewej stronie od elementów *PlaceBuffer* przedstawione na wizualizacji fragmentu formatki modelu symulacyjnego (rys. 1). Ich zadaniem jest sczytanie liczby pozycji oraz określenie kolejnej lokacji, do której środek transportu powinien dotrzeć celem pobrania określonej w zleceniu liczby artykułów z tej lokacji. Z kolei poprzez punkty zbiorcze rozumiane są elementy o nazwie *TransferStation*. Pełnią one funkcję pracownika lub urządzenia komisjonującego,

pozbierającego ładunki z jednostek ładunkowych paletowych i odstawiającego je na jednostkę ładunkową paletową kompletowaną.

Obiekt *SingleOrder* to tabela, do której każdorazowo wprowadzane jest jedno, kolejne z cyklu zlecenie na komisjonowanie.

Tabela *OrderPickingTimes* zawiera czasy procesu komisjonowania odpowiednie do realizowanego zlecenia. Stanowi ona podstawę do badań nad rozkładem prawdopodobieństwa, o którym była mowa we wprowadzeniu do artykułu. W dalszej części artykułu zawartość tego typu tabeli traktowana jest jako próba o licznosci 1 000 w ramach eksperymentu nr 1 oraz próba o licznosci 100 w ramach eksperymentu nr 2. Każda próba jest badana we wbudowanym w pakiet komputerowy narzędziu *DataFit*.

## 5. WALIDACJA MODELU SYMULACYJNEGO

Przed przystąpieniem do przeprowadzenia eksperymentów na modelu symulacyjnym dokonana została jego walidacja. Walidacja oznacza rozstrzygnięcie, czy model przygotowany w środowisku komputerowym ma – w swojej dziedzinie zastosowań – wystarczający poziom trafności, [32, s. 718].

W przypadku opracowanego modelu walidacja służyła sprawdzeniu czy wyniki uzyskane z modelu zgodne są z obliczeniami wg metod inżynierskich, [20, 21].

Tablica 1

### Porównanie obliczeń i uogólnionych wyników w ramach przeprowadzania walidacji modelu

$p$	Wyliczony $t_{ckom}$ [min]	Wartość średnia z próby $t_{ckom}$ [min]	Odchylenie standardowe z próby $t_{ckom}$ [min]	Różnica między kolumnami 2 i 3 [%]
1	2	3	4	5
1	7,6031	7,898439337	0,001029865	3,74
2	11,6031	11,729403000	0,001029865	1,08
3	15,6031	15,915816900	0,001029865	1,96
4	19,6031	19,738881680	0,001029865	0,69
5	23,6031	23,719924330	0,001029865	0,49
6	27,6031	26,658312960	0,001029865	-3,54
7	31,6031	31,839987520	0,001029865	0,74
8	35,6031	35,189118640	0,001029865	-1,18
9	39,6031	39,746780570	0,001029865	0,36
10	43,6031	43,719924330	0,001029865	0,27

Walidacji dokonano poprzez przetestowanie działania modelu symulacyjnego na stałych wartościach parametru  $p$  i porównaniu ich wartości średnich oraz odchyłeń standardowych z wartościami wyliczonymi w poprzednim rozdziale. Można przyjąć, iż wyniki są porównywalne na poziomie 96,26% (wzięto pod uwagę procentową różnicę o największej wartości – tab. 1., kolumna 5, wiersz 1.). Zastosowana tu forma walidacji to walidacja zdarzeniowa (ang. *event validity*): zdarzenia generowane w modelu symulacyjnym są porównywane ze zdarzeniami zachodzącymi w modelu analitycznym, [32, s. 719].

## 6. EKSPERYMENTOWANIE NA MODELU SYMULACYJNYM WRAZ Z ANALIZĄ WYNIKÓW

Na zwalidowanym modelu symulacyjnym badanego procesu komisjonowania w pierwszej kolejności przeprowadzono eksperyment na próbie liczącej 1 000 zleceń. Na rys. 2. znajduje się histogram wartości czasów cyklu komisjonowania obliczonych w eksperymencie. Na osi odciętych znajduje się 100 klas przewidzianych w modelu symulacyjnym dla wartości czasów cyklu komisjonowania obliczonych w eksperymencie (obserwowanych wartości), a na osi rzędnych częstości ich występowania. W tab. 2. zestawiono podstawowe parametry statystyczne wyznaczone przez narzędzie *DataFit*, a na rys. 3. wyniki i parametry dla testów zgodności, dzięki którym dokonano sprawdzenia czy uzyskana próba przynależy do jednego z teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa: normalnego, trójkątnego, logarytmicznie normalnego, jednorodnego, wykładniczego.

Tablica 2

Podstawowe statystyki wyznaczone przez narzędzie *DataFit*, (eksperymenty nr 1, 2)

Parametr	Wartość (eksperyment nr 1)	Wartość (eksperyment nr 2/4)
1	2	3
Wielkość próby	1000	100
Wartość minimalna	1272,45	1087,15
Wartość maksymalna	1471,39	1366,07
Wartość średnia	1377,92	1310,36
Moda	1373,46	1356,83
Odchylenie standardowe	12,51	55,17
Wariancja	156,43	3043,27
Kwartył dolny	1371,71	1263,61
Mediana	1376,43	1344,12
Kwartył górny	1386,68	1353,62
Skośność	1,53	-1,16
Współczynnik kurtozy	18,74	1,13
Współczynnik wariacji	0,01	0,04

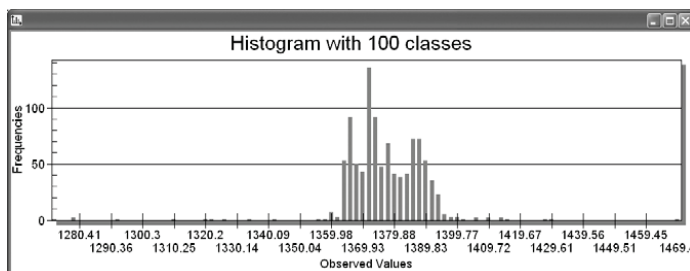
Celem eksperymentu było stwierdzenie czy wartości czasu procesu komisjonowania dla zróżnicowanych parametrów  $p$  i  $w$  można opisać danym rozkładem teoretycznym.

Narzędzie *DataFit* automatycznie dokonało wyboru testów na podstawie wprowadzonych danych. Proces komisjonowania został przebadany dla rozkładów wskazanych w tab. 3. Rozkłady te zostały wybrane przez oprogramowanie bez ingerencji użytkownika. Wykorzystane testy zgodności to testy: Chi-kwadrat, Kołmogorowa-Smirnowa, Andersona-Darlinga. Warto zauważyć, że zaniechano dalszych faz eksperymentu nr 1, jako że jest to przykład próby dużej, w przypadku której testy zgodności Kołmogorowa-Smirnowa, Andersona-Darlinga nie znajdują zastosowania. Wobec tego w eksperymencie nr 2 zmniejszono licznosc próby do 100 zleceń.

W ramach eksperymentu nr 2 przeprowadzono 100 uruchomień modelu symulacyjnego. Za przykład na rys. 4.-5. posłużyły wyniki uruchomienia nr 4 w ramach eksperymentu nr 2. Na rys. 4. znajduje się histogram wartości wspomnianych czasów. W tab. 5. podano podstawowe parametry statystyczne wyznaczone przez narzędzie *DataFit*, a na rys. 5.

wyniki i parametry testów zgodności sprawdzających czy uzyskana próba mogłaby być opisana jednym z teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa.

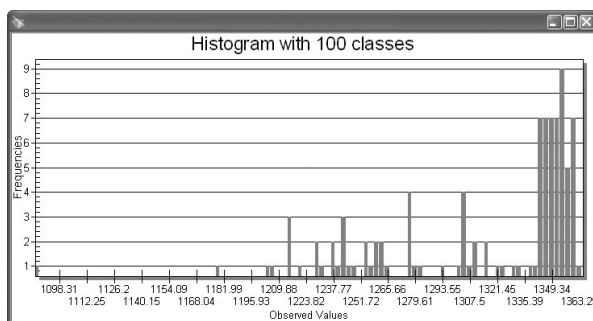
W tab. 3. podano liczbę eksperymentów, których wyniki można opisać danym rozkładem teoretycznym przy rozróżnieniu, z którego testu zgodności korzystano przy opracowywaniu prób.



Rys. 2. Histogram uzyskanych wyników (eksperyment nr 1)  
Źródło: opracowanie własne, *Plant Simulation 10.1*.

.Models.Frame.DataFit.Ranking															
File Edit Format Navigate View Tools Help															
634,2667															
string	string	real	real	boolean	real	real	boolean	real	real	boolean	real	real	string	string	string
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Distribution	Chi statistic	Chi value	Result Chi	KS statistic	KS value	Result KS	AD statistic	AD value	Result AD	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
1	Normal	634,2667	120,9950	false						1413,42	13,60		$\mu = 1413$	$\sigma = 13,6$	
2	Triangle	3467,0000	119,8771	false						1409,90	1279,09	1499,01	$c = 1409,9$	$a = 1279,1$	$b = 1499$
3	Uniform	6992,0000	120,9950	false						1279,09	1499,01		Start = 127	Stop = 1499	
4	Negexp	64950,2000	122,1139	false						1413,42			Beta = 1413		

Rys. 3. Wyniki i parametry dla testów zgodności, (eksperyment nr 1)  
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem *Plant Simulation 10.1*.



Rys. 4. Histogram uzyskanych wyników (eksperyment nr 2 / uruchomienie nr 4)  
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem *Plant Simulation 10.1*.

Narzędzie *DataFit* dokonało wyboru testów zgodności na podstawie danych w rozpatrywanym modelu symulacyjnym. Proces komisjonowania został przebadany dla rozkładów wskazanych w tab. 3. Rozkłady te, jak poprzednio, zostały wybrane przez oprogramowanie bez ingerencji użytkownika.



string 0	real 1	real 2	boolean 3	real 4	real 5	boolean 6	real 7	real 8	boolean 9	real 10	real 11	real 12	string 13	string 14	string 15
string Distribution	Chi statistic	Chi value	Result: Chi	KS statistic	KS value	Result: KS	AD statistic	AD value	Result: AD	Parameter1	Parameter2	Parameter3	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
1 Normal	140.8819	24.9967	false	2.4069	1.3580	false	5.8508	2.4920	false	1310.36	54.89		Mu = 1310.	Sigma = 54.9	
2 Triangle	152.4429	23.6854	false	3.8933	1.3580	false	32.4448	2.4920	false	1356.63	1087.15	1366.07	c = 1356.8	a = 1087.2	b = 1366.1
3 Lognorm	178.5129	24.9967	false	2.3981	1.3580	false	5.9422	2.4920	false	1310.38	56.44		Mu = 1310.	Sigma = 56.4	
4 Uniform	266.7333	24.9967	false	4.4173	1.3580	false	64.0322	2.4920	false	1087.15	1366.07		Start = 108	Stop = 1366.1	
5 Negexp	682.8000	27.5885	false	5.9150	1.3580	false	42.4285	2.4920	false	1310.36			Beta = 1310		

Rys. 5. Wyniki i parametry dla testów zgodności, (eksperyment nr 2 / uruchomienie nr 4)  
 Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem *Plant Simulation 10.1*.

Tablica 3

**Wyniki testów zgodności dla rozkładów**

Test zgodności	Chi-kwadrat		Kolmogorowa-Smirnowa		Andersona-Darlinga	
	Liczba prób opisywanych rozkładem	Liczba prób nie opisywanych rozkładem	Liczba prób opisywanych rozkładem	Liczba prób nie opisywanych rozkładem	Liczba prób opisywanych rozkładem	Liczba prób nie opisywanych rozkładem
1	2	3	4	5	6	7
Trójkątny	0	100	0	100	0	100
Normalny	2	98	2	98	54	46
Log. normalny	2	98	2	98	54	46
Wykładniczy	0	100	0	100	0	100
Jednorodny	0	100	0	100	0	100

W ramach analizy wyników dodatkowo omówione zostają: skośność i kurtoza, [58].

W przypadku eksperymentu nr 1 występuje rozkład dodatnio-skośnym, a w przypadku czwartego uruchomienia eksperymentu nr 2 rozkład ujemno-skośny. Błąd standardowy współczynnika skośności ma wartość: w przypadku eksperymentu nr 1:  $SE_{SKE1} = 0,018257$ , natomiast w przypadku eksperymentu nr 2 / uruchomienia 4:  $SE_{SKE2} = 0,057758$ .

Przyjmuje się, że dla współczynnika kurtozy o wartości z przedziału od 0 do 6 występuje koncentracja danych wokół wartości średniej populacji, [15, 55]. W przypadku eksperymentu nr 1 ma się tu do czynienia z rozkładem typu leptokurtycznego, o danych będących skoncentrowanymi wokół wartości średniej próby, mimo wartości  $K = 18,71$  (kwestia ta wymaga dalszych analiz). W przypadku eksperymentu nr 2 na ogół był to rozkład typu platokurtycznego.

## 7. WNIOSKI

Liczba obserwacji w przypadku rozpatrywanego problemu pozwala na wykluczenie 2 testów zgodności: Kolmogorowa-Smirnowa i Andersona-Darlinga. Są one przewidziane dla prób o małej liczności. Dodatkowo należy zauważyć, że test zgodności Kolmogorowa-Smirnowa przewidziany jest dla rozkładu normalnego. Wobec tych faktów oprogramowanie „dokonało” nieprawidłowego wyboru testów zgodności. Uwzględniło

jednak również test zgodności Chi-kwadrat, przy wykorzystaniu którego możliwe było realizowanie badania. Test w przypadku eksperymentu nr 2 wykazał, że żaden z wziętych pod uwagę teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa nie opisuje rozkładu czasu trwania procesu badanego przy ograniczeniach ujętych w badaniach. Tylko dla 2 prób rozpoznano przynależność wyników do rozkładów normalnego i 2 do rozkładu logarytmiczno-normalnego (tab. 3). Biorąc pod uwagę, iż przeprowadzono 100 eksperymentów wyniki te można potraktować jako błąd statystyczny. Wyniki uzyskane były na poziomie istotności 0,05.

Jednocześnie można podejrzewać, że próby duże (eksperyment nr 1) będą mogły być opisane rozkładem normalnym, co należy sprawdzić w ramach kontynuacji badań. Podstawą ku temu wnioskowi jest rys. 2., który może nasuwać podejrzenie, że histogram dla pojedynczej próby o licznosci 1 000 opisuje wartości rozkładu normalnego. Prace będą kontynuowane. Rozważa się także prace nad wpływem podatności na awarie poszczególnych urządzeń i środków transportu na wydolność modelowanego systemu (magazynu). Pozwoli to na poddanie rozpatrzeniu wrażliwość parametrów pracy systemu na zmiany w nim zachodzące i wpływ tych zmian na realizację celów działania systemu (gdzie przez zmiany rozumie się np.: awarie układnic regałowych, wózków widłowych, przenośników itp.), identyfikacja węzłów krytycznych w obiekcje logistycznym, tzw. „wąskich gardeł” w zakresie przebiegu procesu.

## Bibliografia

1. Aliche K., Arnold D., Knöss A., Töpfer F.: *Optimierung von manuellen Kommissionierbereichen*, Logistik für Unternehmen, No. 1-2, VDI-Springer, Düsseldorf 2011.
2. Anon.: *Plant Simulation 10 Step-by-Step Help*, Product Lifecycle Management Software Inc. 2010.
3. Bangsow S.: *Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk Usage and Programming with Examples and Solutions*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2010.
4. Bangsow S. [red.]: *Use Cases of Discrete Event Simulation Appliance and Research*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2012.
5. Banks J. [red.]: *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, John Wiley, New York 1998.
6. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., Nicol D.M.: *Discrete Event System Simulation*, Prentice-Hall 2000.
7. Banks J.: *Discrete Event Simulation*, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Farrington P.A., Nembhard H.B., Sturrock D.T., Evans G.W. [red.], 1999, ss. 7-13.
8. Briano E., Caballini C., Mosca R., Revetria R.: *Using WITNESS simulation software as a validation tool for an industrial plant layout*, Proceedings of the 9th WSEAS ICOSSE'10, Fujita H., Sasaki J. (red.), Stevens Point, Wisconsin, USA, 2010, ss. 201-206.
9. Bukowski L., Karkula M.: *Modelling and simulation of production processes using modular-oriented simulators*, [w:] Proceeding of the 15<sup>th</sup> Inter. Conf. on System Science, vol. 2, OWPW, Wrocław 2004.
10. Bukowski L., Karkula M.: *Reliability assurance of integrated building automation system by applying the redundancies*, Proc. of 3<sup>rd</sup> Inter. Congress on Intelligent Buildings Systems, OW TEXT, Kraków 2004.
11. Bukowski L., Karkula M.: *Symulacja przepływu materiałów i informacji w zautomatyzowanych centrach dystrybucyjnych*, [w:] Systemy logistyczne. Teoria i praktyka, OWPW, W-wa 2005.
12. Bukowski L., Karkula M.: *The simulation of logistics processes using DOSIMIS-3 simulator*, Finanční a logisticke řízení v kontextu vstupu České republiky do Evropské unie: sborník referátů z mezinárodní konference, Srdec Beskyd, VŠB - Technická univerzita Ostrava., ss. 296-300.
13. Carson J.S.: *Modeling and Simulation World Views*, Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, 1993, ss. 18-23.
14. Chen Z., Jiang C.: *Simulation of a Flexible Manufacturing System with AutoMod Software*, Intelligent Information Management, vol. 3, No. 5, 2011, ss. 186-189.

15. Chudzikiewicz A., Kostrzewski M.: *Analiza sygnałów wibroakustycznych w procesie monitorowania stanu zawieszona pojazdów szynowych oraz toru*, Pojazdy Szynowe 1/2013, ss. 10-17.
16. Coyle J.J., Bardi E.J., Langley C.J.: *The Management of Business Logistics*, 6th ed., West Publishing, St Paul, MN 1996.
17. Coyle J.J., Bardi E.J., Langley C.J.: *Zarządzanie logistyczne*, PWE, W-wa 2007.
18. Danilczuk W., Cechowicz R., Gola A.: *Analiza konfiguracji linii produkcyjnych na podstawie modeli symulacyjnych*, [w:] Informatyczne systemy zarządzania, tom 5, [red:] Bzdrya K., Politechnika Koszalińska, Koszalin 2014, ss. 25-42.
19. Feliks J., Puchała J.: *Modeling of service logistic processes with the usage of the DOSIMIS 3,0® package on the basis of the example of selected tourists attractions in the Limanowa district location*, Forum Scientiae Oeconomia, Vol. 3, No. 2/2015, ss. 43-54.
20. Fijałkowski J.: *Technologia magazynowania, wybrane zagadnienia*, OWPW, W-wa 1995.
21. Fijałkowski J.: *Transport wewnętrzny w systemach logistycznych*, OWPW, W-wa 2002.
22. Gelenbe, E., Guennouni H.: *FLEXSIM: a flexible manufacturing system simulator*, European Journal of Operational Research, vol. 53, issue 2, 1991, ss. 149-165.
23. Grabara J.K., Dima I.C., Kot S., Kwiatkowska J.: *Case on in-house logistics modeling and simulation*, Research Journal of Applied Sciences, vol. 6 (7-12), Medwell Journals 2011, ss. 416-420.
24. Grabara J.K., Kot S.: *New tools of engineering education for logistics training*, International Conference on Engineering Education, Norwegia, Oslo 2001, ss. 7-9.
25. Gutenbaum J.: *Modelowanie matematyczne systemów*, Instytut Badań Systemowych PAN, W-wa 2003.
26. Haller M., Nemmer M.: *Anforderungsgerechte Modellbildung zum projektbegleitenden Einsatz der Materialfluß-Simulation*, Fortschritte in der Simulationstechnik, Vieweg, Braunschweig 197.
27. Harrell C.R., Price R.N.: *Simulation modeling using PROMODEL technology*, Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2002, vol.1, ss.192-198.
28. Homburg, C.: *Betriebswirtschaftslehre als empirische Wissenschaft – Bestandsaufnahme und Empfehlungen*, Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, vol. 56 (7)/2007, ss. 27-60.
29. Karkula M.: *Analiza wybranych procesów transportowych obsługi magazynu metodami symulacyjnymi*, Logistyka 4/2010, ss. 1-11 (CD).
30. Karkula M.: *Modelowanie i symulacja procesów logistycznych*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2013.
31. Karkula M.: *Selected aspects of simulation modelling of internal transport processes performed at logistics facilities*, Archives of Transport, vol. 30, issue 2/2014, ss. 43-56.
32. Karkula M.: *Weryfikacja i walidacja dynamicznych modeli symulacyjnych procesów logistycznych*, Logistyka 2/2012, ss. 717-726.
33. Karkula M., Bukowski L.: *Computational intelligence methods - joint use in discrete event simulation model of logistics processes*, Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, Laroque C., Himmelspach J., Pasupathy R., Rose O., Uhrmacher A.M. [red.], ss. 1285-1296.
34. Karkula M., Jurczyk K., Bukowski L.: *Nondeterministic factors in simulation models of logistics processes*, Carpathian Logistics Congress 2012, Ostrava, Jeseník, Republika Czeska, ss. 1-6.
35. Kemme N.: *Design and Operation of Automated Container Storage System*. Physica-Verlag, a Springer Company, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013.
36. Kelton W.D., Sadowski R.P., Sturrock D.T.: *Simulation with Arena*, Fourth Edition, McGraw-Hill International Edition, 2007.
37. Kłós S., Kuc P.: *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych w oparciu o oprogramowanie Tecnomatics Plant Simulation*, [w:] Inżynieria produkcji. Planowanie. Modelowanie. Symulacja, Patalas-Maliszewska J., Jakubowski J., Kłós S., [red.], Zielona Góra 2015, ss. 19 -30.
38. Korzeń Z.: *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania*, tom 1, ILiM, Poznań 1998.
39. Korzeń Z.: *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania*, tom 2, ILiM, Poznań 1998.
40. Kostrzewski M.: *Analytic way of research on dynamics in a logistics process – mathematical model*, Logistyka 3/2014, ss. 3138-3148.
41. Kostrzewski M.: *Jak stworzyłem projekt magazynu*, Euro Logistics, nr. 2 (39) / 2007, ss. 38-39.
42. Kostrzewski M.: *Optimization of warehouse project with using a simulation tool*, [w:] Engineering Sciences, Proceeding of 6<sup>th</sup> International Conference of PhD Students, Miskolc, Węgry 2007, ss. 63-68.
43. Kostrzewski M.: *Porównanie metod projektowania magazynu - projektowanie wg procedury analitycznej oraz przy użyciu narzędzia symulacyjnego*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Modelowanie Procesów Transportowych i Logistycznych cz. II, vol. 70, W-wa 2009, ss. 85-96.

44. Kostrzewski M.: *Symulacyjne badanie dynamiki przepływu materiałów w magazynie*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, vol. 97, W-wa 2013, ss. 271-278.
45. Kostrzewski M.: *Symulacyjne badanie geometrii magazynu przy wykorzystaniu pakietu komputerowego OL09*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, vol. 77, W-wa 2011, ss. 59-73.
46. Kostrzewski M.: *Symulacyjne badania geometrii magazynu*, Logistyka, nr 4/2010, Poznań 2010, ss. 1-8.
47. Kostrzewski M.: *Simulation method in research on material-flow in a warehouse*, Logistics and Transport, nr 1(21)/2014, ss. 21-32.
48. Kostrzewski M.: *Simulation research of order-picking processes in high-bay warehouses*, Logistics and Transport, nr 4(20)/2013, ss. 5-12.
49. Kostrzewski M., Kostrzewski A.: *Klasyfikacja metod stosowanych w realizacji projektów naukowych podejmowanych w ramach dyscypliny naukowej transport (...)*, GM&L, 5/2015, PWE, ss. 346-355.
50. Kubiński W., Kubińska-Jabcoń E., Niekurzak M., *Symulacja logistycznego systemu produkcji z wykorzystaniem pakietu Dosimis-3. Cz. 2*, Logistyka No. 2/2012, ss. 7-9.
51. Kuhn A.: *Simulation im Aufwind - Möglichkeiten und Probleme für ein neues Instrumentarium*, Zeitschrift für Logistik, nr 8 (10)/1987, ss. 33-37.
52. Law A.M., Kelton W.D.: *Simulation modelling and analysis*, Boston, MA: McGraw Hill 2000.
53. Leszczyński J.: *Modelowanie systemów i procesów transportowych*, OWPW, W-wa 1999.
54. Lipiec-Zajchowska M.: *Metody symulacji komputerowej w prognozowaniu makroekonomicznym*, PWE, W-wa 1990.
55. Moszczyński L.: *Interpretacja współczynnika kurtozy w analizie danych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 79, nr 9(1)/2003, Wydawnictwo SIGMA-NOT, ss.558-560.
56. Pfohl H-Ch.: *Zarządzanie logistyką : funkcje i instrumenty : zastosowanie koncepcji logistyki w przedsiębiorstwach*, ILiM, Poznań 1998.
57. Ratkiewicz A.: *Analiza przydatności zastosowania antresoli w budynku wielokubaturowym projektowanym z przeznaczeniem na wynajem*, Logistyka 2/2014, ss. 2353-2362.
58. Sadowski W.: *Statystyka matematyczna*, PWE, W-wa 1965, 1969.
59. Takukuwa S., Takizawa H, Kumiko I., Hiraoka S.: *Simulation and analysis of non- automated distribution warehouses*, [w:] Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conf., 2000, ss. 1177-1184.
60. Taylor J.R.: *Wstęp do analizy błędu pomiarowego*, PWN, W-wa 1999.
61. Tompkins J.A., White J.A., Bozer Y.A., Frazelle E.H., Tanchoco J.M.A., Trevino J.: *Facilities Planning*, John Wiley & Sons, New York 2003.
62. UGS Corp.: *Plant Simulation Product Description*, UGS Corp, 2006.
63. Zeigler B.P.: *Teoria modelowania i symulacji*, PWN, W-wa 1984.

## SIMULATION METHODS APPLICATION IN THE RESEARCH ON SELECTED WAREHOUSE PROCESSES IN HIGH-BAY WAREHOUSE

**Summary:** This paper aims to discuss the use of simulation methods in the research on warehouse processes, mainly in high-bay warehouse. In particular, it concerns analysis of simulation results of order-picking process. The research was conducted for stochastically varied orders in picking lists. The analysis in the paper leads to determine whether the sample of data could be assigned as theoretical probability distribution. The sample data are durations of order-picking process. A simulation model was developed in order to study the process of picking as stochastic approach. The model was validated in order to compare its performance with classic method of order-picking time calculating in engineering practice.

**Keywords:** high-bay warehouse, simulation model, order-picking process