

Mariusz Kostrzewski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

ZASTOSOWANIE WYBRANEGO GENERATORA LICZB PSEUDOLOSOWYCH W ANALIZIE PROCESU KOMISJONOWANIA

Rękopis dostarczono: kwiecień 2017 r.

Streszczenie: Celem niniejszego artykułu jest dokonanie weryfikacji wybranego generatora liczb pseudolosowych w modelu symulacyjnym wybranego obiektu logistycznego. Uszczegóławiając, generator ten – w badaniu omawianym w artykule – zastosowany został w celu nadania stochastycznego charakteru modelowi symulacyjnemu przeznaczonemu do analizy procesu komisjonowania w magazynie wysokoregałowym. Stochastyczny charakter nadawany jest zmiennym w każdym kolejnym eksperymencie symulacyjnym, w tym: liczbom pozycji w wierszu zlecenia na komisjonowanie oraz samym liczbom wierszy zleceń na komisjonowanie. Na podstawie szeregu przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych, przeanalizowane zostały wartości czasów trwania procesu komisjonowania uzyskane przy zastosowaniu metod symulacyjnych z wartościami wyliczonymi według zależności analitycznych. W celu dokonania badania oraz owego porównania zaproponowano zastosowanie systemu wieloagentowego (ang. *multi-agent system*).

Słowa kluczowe: magazyn wysokoregałowy, model symulacyjny, generator PRNG

1. WPROWADZENIE

Proces komisjonowania jest uważany za jeden z najważniejszych przedmiotów prac badawczych dotyczących logistyki wewnętrznej. Jest to związane z faktem, że angażuje największą zasobów spośród wszystkich procesów zachodzących w obiektach logistycznych, czego potwierdzenie można znaleźć m.in. w pracach [1, 21]. Ponadto proces ten uważany jest za najbardziej czasochłonny, podając m.in. za [16] oraz [19], a przy tym jest wysoce kosztochłonny. Autorzy [4] szacują kosztochłonność procesu komisjonowania, stwierdzając przy tym, że koszty poniesione w trakcie realizacji procesu komisjonowania wynoszą 55-75% całkowitych kosztów poniesionych na wszelkie procesy logistyczne zachodzące w obiektach logistycznych typu magazyn, [6]. Autorzy [2, 8, 9, 13] podają z kolei, że koszty te plasują się między 55-65% wspomnianych kosztów całkowitych. Jak wynika z powyższej treści, na przestrzeni lat koszty poniesione w trakcie realizacji procesu komisjonowania wciąż oscylują wokół połowy do trzech czwartych całkowitych kosztów operacyjnych poniesionych na wszelkie procesy logistyczne zachodzące w obiektach logistycznych typu magazyn. A zatem z jednej strony można by stwierdzić, że albo obniżenie tych kosztów w

w warunkach rzeczywistych jest trudne bądź też sugerowane przez prace naukowe zmiany nie są wdrażane. Natomiast z drugiej strony tym bardziej powinny być prowadzone kolejne badania podejmujące taką tematykę, celem ciągłego i wieloaspektowego doskonalenia procesu. Zakres tematyczny prac dotyczących tych procesów jest bardzo szeroki. Autorzy zajmują się np. strategiami stosowanymi wobec osiągnięcia efektywnie przeprowadzanego procesu komisjonowania (np. [9, 18]), szacowaniem kosztów w oparciu o bardzo szczegółowe i zhierarchizowane modele analityczne czy też numeryczne, a także redukcją czasu trwania tych procesów (lub pośrednio, poprzez redukcję pokonywanych odległości jak np. w pracach [16, 17]), jego optymalizacją w wyniku zastosowania ścisłych metod z grupy badań operacyjnych lub subopptymalizacją w wyniku wdrażania metod heurystycznych. Liczne publikacje dotyczą zagadnień związanych z analizą czasów procesów logistycznych i transportowych zachodzących w obiektach logistycznych typu magazyn. Autorzy [3], [15] analizują czas procesu transportowania ładunku w magazynie, z uwzględnieniem procesu komisjonowania, stosując w tym celu teorię kolejek i organizując tak strefę kompletacji, aby ustawienie ładunków było aranżowane pod kątem klientów o podobnych charakterystykach i oczekiwaniach wobec zamawianych ładunków. Estymacją czasu trwania procesu komisjonowania i próbą jego redukcji poza wyżej wymienionymi zajmowano się także m.in. w [5, 10]. Tematyka dotycząca czasu trwania procesu komisjonowania wciąż budzi zainteresowanie, czego efektem jest także ów artykuł.

Prace poddane omówieniu w niniejszym artykule zrealizowano z wykorzystaniem metod symulacyjnych. Omówienie potencjału stosowania metod symulacyjnych oraz narzędzi umożliwiających budowę modeli symulacyjnych odnaleźć można w pracach [12, 14, 22]. A zatem treści te zostają w artykule pominięte. Istotne jest jednak, aby podkreślić fakt, iż rozpatrywany w niniejszej pracy model symulacyjny jest modelem typu stochastycznego. Ważnym elementem przy konstruowaniu takiego modelu jest dobór generatora wartości pseudolosowych.

Celem niniejszego artykułu jest dokonanie weryfikacji stosowalności wybranego generatora liczb pseudolosowych w modelu symulacyjnym wybranego obiektu logistycznego. Uszczegóławiając, generator ten zastosowany został w celu nadania stochastycznego charakteru modelowi symulacyjnemu przeznaczonemu do analizy procesu komisjonowania w magazynie wysokoregutowym. Omówienie generatorów liczb pseudolosowych odnaleźć można m.in. w [22]. Na podstawie szeregu przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych, w artykule przeanalizowano wartości czasów trwania procesu komisjonowania, uzyskane przy zastosowaniu metod symulacyjnych, z wartościami wyliczonymi według zależności analitycznych na podstawie [7].

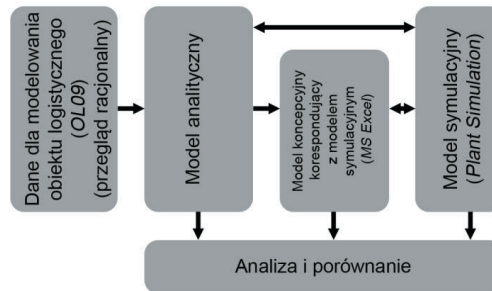
2. MODELE ANALITYCZNY, KONCEPCYJNY I SYMULACYJNY

Modele symulacyjne stosowane są na ogół wówczas, gdy nie jest możliwe lub utrudnione jest uzyskanie rozwiązania analitycznego badanego problemu, bądź też gdy wskazane jest porównanie rozwiązań analitycznych i symulacyjnych. Ostatnie z uwarunkowań dotyczy

niniejszego artykułu. Procedura postępowania w przypadku wykorzystania metod symulacyjnych w badaniach dotyczących magazynów przedstawiona została w pracy [14]. Z tego powodu jej opis zostaje tu pominięty. Pominięte zostają także podstawowe treści nt. teorii symulacji – w [12, 22] wskazano główne rodzaje symulacji, zalety i wady stosowania metod i modeli symulacyjnych itd.

Na podstawie doświadczeń autorów pracy [13] stwierdza się, że w ponad 80% wszystkich obiektów logistycznych w Europie Zachodniej, w których zachodzą procesy komisjonowania, procesy te realizowane są poprzez zatrudnionych pracowników. Tymczasem literatura naukowa skupiona jest bardziej na kompletacji z wykorzystaniem systemów AS/RS. Z tego powodu podjęto decyzję o zastosowaniu w niniejszej pracy innych środków transportu niż zautomatyzowane, celem uwzględnienia czynnika ludzkiego. Zastosowanym środkiem transportu jest EKV515k [11].

Zbudowany model symulacyjny pozwala na wygenerowanie dowolnej liczby zleceń na komisjonowanie (na potrzeby niniejszych badań zainicjowano 100 zleceń w każdym eksperymencie symulacyjnym) o liczbie wierszy wynoszącej $w = 1 \div 10$ każde i dowolnej liczbie pozycji przypadających na wiersz zlecenia na komisjonowanie (z przedziału $p = 0 \div 10$). Budowa modelu symulacyjnego omawianego w artykule poprzedzona została dokonaniem opisu modelu koncepcyjnego, jako że bazuje on na wspomnianych zależnościach analitycznych i stanowi formę pośrednią pomiędzy modelem analitycznym a symulacyjnym. Korespondencja pomiędzy modelami analitycznym, koncepcyjnym i symulacyjnym wskazana została na rys. 1. Badania zrealizowano wykorzystując ideę systemu wieloagentowego (ang. *multi-agent system*) tj., w przypadku omawianego zagadnienia, systemu złożonego z komunikujących i współpracujących między sobą programów komputerowych, realizujących wspólne cele. Dane dotyczące obiektu logistycznego pochodzą z autorskiego oprogramowania *OL09*. Wybrane parametry determinujące uzyskane pomiary zostają podane w nawiasach w ramach wypunktowania odnoszącego się do weryfikacji modelu symulacyjnego w kolejnym rozdziale. Model koncepcyjny, bazujący na modelu analitycznym, zaimplementowano w oprogramowaniu *MS Excel*, które współpracuje z narzędziem symulacyjnym *Plant Simulation*.



Rys. 1. Schemat korespondencji pomiędzy poszczególnymi etapami badań i wykorzystywanym oprogramowaniem

Źródło: opracowanie własne

W dalszej części artykułu zamieszczono elementy matematycznych modeli analitycznego (właściwie koncepcyjnego, bazującego na analitycznym) i symulacyjnego.

Przyjmuje się tu, że W to zbiór j -liczb wierszy w zleceniu na komisjonowanie, gdzie j jest numerem eksperymentu w próbie stuelementowej, a w_j jest liczbą wierszy w przypadku j -tego eksperymentu w próbie (jeden eksperyment jest tu tożsamy z przeprowadzeniem procesu komisjonowania dla jednego zlecenia na komisjonowanie) i w modelu symulacyjnym jest to zliczona liczność liczb pozycji/pobrań p_{ij} o wartościach większych od zera. Powyższe zapisać można wedle formuły (1).

$$W = \{w_1, \dots, w_j, \dots, w_J\}, \quad w_j = \text{count}(p_{ij} | p_{ij} > 0), \quad j = \overline{1, J} = \overline{1, 100}, \quad i = \overline{1, I} = \overline{1, 10}, \\ w_j \in N^+ + \{0\}, \quad p_{ij} \in N^+ + \{0\} \quad (1)$$

P to zbiór liczb pobrań artykułów o i -tych numerach przypadających na j -ty eksperyment w próbie (j -ty numer zlecenia na komisjonowanie). Zapis dla tego zbioru podano w postaci formuły (2). W przypadku modelu analitycznego należy posługiwać się $\overline{p_j}$ czyli uśrednioną wartością z wszystkich liczb pobrań i -tych rodzajów artykułów przypadających na j -ty eksperyment (j -ty numer zlecenia na komisjonowanie, formuła (3)), a jako że jest to wartość uśredniona brak jest i w indeksie $\overline{p_j}$. Na owe $\overline{p_j}$ składają się zatem p_{ij} czyli każdorazowo liczba pobrań artykułu i -tego rodzaju przypadająca na j -ty eksperyment (j -ty numer zlecenia na komisjonowanie), jest to wielkość stochastyczna $X(e_p)$, losowana w oparciu o zaproponowany statystyczny rozkład danych. W modelu symulacyjnym nie ma konieczności stosowania $\overline{p_j}$, pozwala on na posługiwanie się p_{ij} .

$$P = \{p_{11}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{IJ}\}, \quad p_{ij} = X(e_p), \quad i = \overline{1, I} = \overline{1, 10}, \quad j = \overline{1, J} = \overline{1, 100}, \quad p_{ij} \in N^+ + \{0\} \quad (2)$$

$$\overline{p_j} = \left[E(p_{1j}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{Ij}) \right], \quad i = \overline{1, I} = \overline{1, 10}, \quad j = \overline{1, J} = \overline{1, 100} \quad (3)$$

Zbiór czasów trwania procesu komisjonowania T_{EX} podano tu pod postacią formuły (4). Jest to zbiór elementów $t(j, w_j, \overline{p_j}, EX)$ przeprowadzonych w zbiór dodatnich liczb rzeczywistych, gdzie j odpowiada numerowi eksperymentu w próbie, w_j jest liczbą wierszy w przypadku j -tego eksperymentu w próbie, $\overline{p_j}$ jest uśrednioną wartością z wszystkich liczb pobrań i -tego rodzaju artykułów przypadających na j -ty eksperyment, natomiast EX oznacza, że model matematyczny zaimplementowany został w postaci arkusza kalkulacyjnego w oprogramowaniu *MS Excel*. Model ten bazuje na klasycznym sposobie obliczania czasu trwania procesu komisjonowania wskazanym w pracy [7] i podanym w postaci formuły (5) (nieobjaśnione parametry omówiono w pracy [7]).

$$T_{EX} = \left\{ t(1, w_1, \overline{p_1}, EX), \dots, t(j, w_j, \overline{p_j}, EX), \dots, t(J, w_J, \overline{p_J}, EX) \right\}, \quad j = \overline{1, J} = \overline{1, 100}, \\ t(j, w_j, \overline{p_j}, EX) \in T_{EX} \rightarrow \mathfrak{R}^+ \quad (4)$$

$$\forall p_{ij} \in \mathbf{P} \quad \forall w_j \in \mathbf{W} \quad \forall j = \overline{1, J} \quad \forall i = \overline{1, I} : t(j, w_j, \overline{p_j}, EX) = (w_j + 1) \cdot A + L \cdot (F_1 + F_3) + (n \cdot H + h_2) \cdot (U + D) + 6 \cdot N + t_{pro} + w_j \cdot (t_{ro} + \overline{p_j} \cdot t_{pl}) \quad (5)$$

Zbiór czasów trwania procesu komisjonowania T_{PS} podano tu jako formułę (6). Jest to zbiór elementów $t(j, w_j, p_{1j}, p_{ij}, p_{lj}, f, MTTR, PS)$ przeprowadzonych w zbiorze dodatnich liczb rzeczywistych, gdzie j odpowiada numerowi eksperymentu w próbie, w_j liczbie wierszy w przypadku j -tego eksperymentu w próbie, p_{1j}, p_{ij}, p_{lj} odpowiadają liczbom pobrań artykułów i -tych rodzajów przypadająca na j -ty numer eksperymentu, f oznacza szacunkowy procent czasu symulacyjnego, w trakcie trwania którego może nastąpić przestój środka transportu obsługującego proces komisjonowania, $MTTR$ to średni czas naprawy w przypadku gdy nastąpi przestój środka transportu obsługującego proces komisjonowania, natomiast PS oznacza, że model matematyczny zaimplementowany został w oprogramowaniu *Plant Simulation*. Model ten bazuje na klasycznym sposobie obliczania czasu trwania procesu komisjonowania wskazanym w [7], jednak uwzględnia pełne informacje o zleceniach na komisjonowanie (wygenerowanych losowo), a nie tylko uśrednione: liczbę wierszy w zleceniu na komisjonowanie i liczbę pozycji wybranego artykułu, oraz przewiduje losowo generowane przestoje w pracy środków transportu. Model ten podany zostaje w formie ogólnej w postaci formuły (7).

$$T_{PS} = \left\{ \begin{array}{l} t(1, w_1, p_{11}, p_{i1}, p_{l1}, f, MTTR, PS), \\ t(j, w_j, p_{1j}, p_{ij}, p_{lj}, f, MTTR, PS), \\ t(J, w_J, p_{1J}, p_{iJ}, p_{lJ}, f, MTTR, PS) \end{array} \right\}, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (6)$$

$$t(j, w_j, p_{1j}, p_{ij}, p_{lj}, f, MTTR, PS) \in T_{PS} \rightarrow \mathfrak{R}^+$$

$$\forall p_{ij} \in \mathbf{P} \quad \forall w_j \in \mathbf{W} \quad \forall j = \overline{1, J} \quad \forall i = \overline{1, I} : t(j, w_j, p_{1j}, p_{ij}, p_{lj}, f, MTTR, PS) \quad (7)$$

Do porównania modeli posłużyły statystyczne testy zgodności dla dwóch średnich, zatem każdorazowo dla stuelementowego ciągu eksperymentów odpowiadających sobie wzajemnie należy obliczyć średnie wartości czasów trwania procesów komisjonowania zarówno w przypadku modelu zaimplementowanego w *MS Excel* (modelu koncepcyjnego bazującego na modelu analitycznym) jak i *Plant Simulation* (modelu symulacyjnego). Średnia wartość czasu trwania procesu komisjonowania wg modelu koncepcyjnego określona została jako $\overline{t(EX)}$ i podana w postaci zależności (8). Natomiast średnia wartość czasu trwania procesu komisjonowania wg modelu symulacyjnego określona została jako $\overline{t(PS)}$ i podana w postaci zależności (9).

$$\overline{t(EX)} = E(t(j, w_j, \overline{p_j}, EX)), \quad j = \overline{1, J} \quad (8)$$

$$\overline{t(PS)} = E \left(\begin{array}{l} t(1, w_1, p_{11}, \dots, p_{i1}, \dots, p_{I1}, f, MTTR, PS), \\ t(j, w_j, p_{1j}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{Ij}, f, MTTR, PS), \\ t(J, w_J, p_{1J}, \dots, p_{iJ}, \dots, p_{IJ}, f, MTTR, PS) \end{array} \right), \quad j = \overline{1, J} = \overline{1, 100}, \quad i = \overline{1, I} = \overline{1, 10} \quad (9)$$

Rozrzut poszczególnych pomiarów wokół wartości średniej w przypadku modelu koncepcyjnego oznaczony jest jako $s_{t(EX)}$, a w przypadku modelu symulacyjnego $s_{t(PS)}$. Natomiast średni błąd kwadratowy wartości średniej, wskazujący stopień dokładności wyznaczenia wartości średniej oznaczone są jako $s_{\overline{t(EX)}}$ i $s_{\overline{t(PS)}}$.

3. WERYFIKACJA MODELU SYMULACYJNEGO

Pośród warunków umożliwiających praktyczne stosowanie modeli symulacyjnych są m.in. walidacja i weryfikacja. Za cel walidacji uznaje się sprawdzenie czy model symulacyjny, we wskazanej dziedzinie zastosowań, jest charakteryzowany wystarczającym poziomem trafności, [20]. Znaczy to, że należy porównać uzyskane wyniki będące konsekwencją stosowania modelu symulacyjnego z wynikami, których źródłem jest funkcjonujący system rzeczywisty, dla którego model symulacyjny stanowi implementację. Weryfikacja modelu symulacyjnego jest z kolei warunkiem koniecznym, jednak nie wystarczającym, do uznania modelu symulacyjnego za zwalidowany. Na jej podstawie stwierdzić można trafność transformacji jednej formy modelu w drugi, a konkretniej rzecz ujmując można orzec, czy model symulacyjny jest trafną reprezentacją modelu koncepcyjnego, [20]. Weryfikując model symulacyjny uznaje się zatem czy występuje zgodność między aspektami teoretycznymi, formułami matematycznymi i założeniami wskazanymi w modelu koncepcyjnym i modelu symulacyjnym, bez uwzględnienia istnienia systemu rzeczywistego. Walidacja tylko wówczas jest możliwa, gdy system rzeczywisty jest poddany eksploatacji, w innych przypadkach należy czynić porównanie względem systemu rzeczywistego o podobnych parametrach, np. technicznych albo polegać jedynie na weryfikacji. W ramach niniejszych badań system rzeczywisty jest fikcyjny, możliwa do przeprowadzenia jest zatem jedynie weryfikacja. Celem weryfikacji modelu obliczono przykładowy czas według procedury analitycznej, według zależności omówionych m.in. w [7], dla danych:

- liczba wierszy (artykułów do pobrania) w zleceniu na komisjonowanie, $w = 10$;
- średnia wartość czasu przyspieszenia lub zatrzymania, $A = 0,0475$ [min] ([7]);
- długość regału, $L = 150$ [m];
- średni czas jazdy wózka do przodu lub do tyłu na 1 [m] przy opuszczonej kabinie z widłami, $F_1 = 0,0079$ [min/m] ([11]);
- średni czas jazdy wózka do przodu lub do tyłu na 1 [m] przy podniesionej kabinie z widłami, $F_3 = 0,0116$ [min/m] (z braku danych w katalogu [11] podano wg [7]);
- wysokość regału magazynowego, $H = 14,5$ m;
- wolny skok wideł, $h_2 = 0,8$ [m] (na podstawie [11]);

- średnia wartość czasu podnoszenia, $U = 0,0833$ [min/m] ([11]);
- średnia wartość czasu opuszczania, $D = 0,0417$ [min/m] ([11]);
- średnia wartość czasu wysuwu i obrotu wideł, $N = 0,13$ [min] ([7]);
- czas przekazywania informacji, $t_{pro} = 0,0852$ [min] ([7]);
- czas odczytu informacji, $t_{ro} = 0,118$ [min] ([7]);
- liczba pozycji wybieranego artykułu (w 1 wierszu), $p = 10$;
- czas wybierania (pobierania), $t_{pi} = 0,1164$ [min], ([7]).

Wymienione powyżej wartości, z wyjątkiem p oraz w z uwagi na szczególny charakter ich zmienności, zostały zaimplementowane w modelach analitycznym, koncepcyjnym i symulacyjnym jako wartości stałe. Dodatkowo szacunkowy procent czasu symulacyjnego, w trakcie trwania którego może nastąpić przestój środka transportu obsługującego proces komisjonowania przyjęto jako $f = random(0;0,1)$, a średni czas naprawy (określający średni czas od momentu wystąpienia awarii do naprawy uszkodzonego urządzenia) $MTTR = 2$ [min] w przypadku pracy zastosowanych środków transportu oraz $MTTR = 1$ [min] w przypadku realizacji operacji pobierania produktów. Zróznicowanie parametrów f (rozumianego jako szacunkowy procent czasu symulacyjnego, w trakcie trwania którego może nastąpić uszkodzenie lub procent czasu nieprawidłowej pracy systemu bądź jej całkowity brak, dotyczący maszyny, komputera, serwera lub dostępności usługi) i $MTTR$ (średni czas naprawy – określa średni czas od momentu wystąpienia awarii do naprawy uszkodzonego urządzenia lub zakończenia przestoju niekoniecznie spowodowanego awarią systemu/układu) świadczy na korzyść modelu symulacyjnego w badaniach, jako że urealnia model w stosunku do obliczeń analitycznych w czystszej formie.

W wyniku zastosowania zależności analitycznych uzyskano czas cyklu komisjonowania: $t(EX) = 19,85142$ [min].

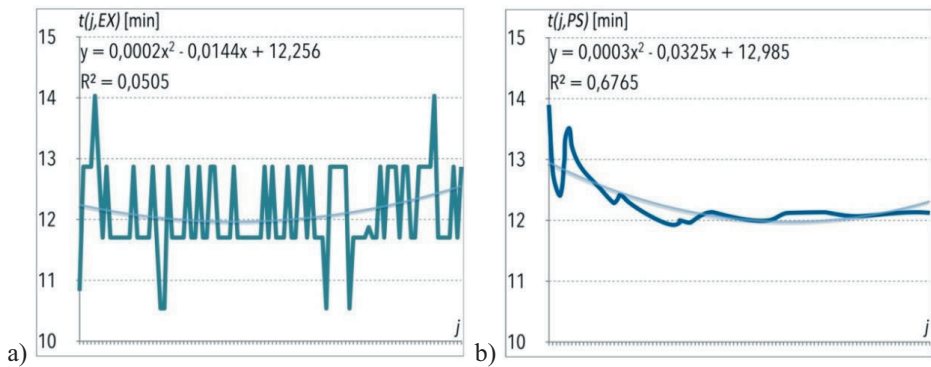
Dla identycznych danych przeprowadzono 100 eksperymentów symulacyjnych i otrzymano średni czas trwania cyklu komisjonowania $\overline{t(PS)} = 19,16077$ [min] (skrót PS oznacza, że wynik uzyskano przy zastosowaniu modelu symulacyjnego zaimplementowanego z wykorzystaniem oprogramowania *Plant Simulation*). Dla próby weryfikacyjnej (pod pojęciem próby weryfikacyjnej rozumiane jest przeprowadzenie 100 eksperymentów symulacyjnych tj. 100 uruchomień modelu symulacyjnego), rozrzut poszczególnych pomiarów wokół wartości średniej, który wynosi $s_{t(PS)} = 0,298428237$ [min], a także średni błąd kwadratowy wartości średniej, wskazujący stopień dokładności wyznaczenia wartości średniej, który wynosi $s_{\overline{t(PS)}} = 0,0298428237$ [min] (różnica tej wartości w stosunku do wartości rozrzutu poszczególnych pomiarów wokół wartości średniej dokładnie o rząd wielkości spowodowana jest liczbą przeliczeń J w ramach eksperymentu wynoszącą $J = 100$, a w mianowniku zależności na średni błąd kwadratowy wartości średniej występuje \sqrt{J}).

Różnica pomiędzy $\overline{t(EX)}$ oraz $\overline{t(PS)}$, czyli około 3,5%, jest nieznaczną (porówn. [14]) i wynika m.in. z implementacji występowania potencjalnych awarii sprzętu i potencjalnych chwilowych przestojów w procesie, związanych np. z zachowaniem ludzkim, potrzebami fizjologicznymi operatorów środków transportu itp.

4. TESTOWANIE GENERATORA LICZB LOSOWYCH

Zagadnienie omówione zostaje na przykładzie $p_{ij} = X(e_p) = z_weibull(10, 2.26, 3.9)$. Parametry rozkładu Weibulla, podane w linii powyżej, odnoszą się do charakterystyki zastosowanej w programie *Plant Simulation*: $z_weibull(Stream:<integer>, Alpha:<real>, Beta:<time>)$. Dla takiego generatora losowych liczb pobrań w procesie komisjonowania przeprowadzono 10 prób, w skład których każdorazowo wchodzi 100 eksperymentów (100 zleceń na komisjonowanie).

Testowanie zaproponowanej postaci generatora liczb losowych przeprowadzone zostało przy zastosowaniu testu zgodności dla dwóch średnich, służącego do wnioskowania o równości dwóch średnich w dwóch populacjach o rozkładach normalnych. Hipotezę zerową podano jako $H_0 : \bar{t}(EX) - \bar{t}(PS) = 0$, alternatywną jako $H_\alpha : \bar{t}(EX) - \bar{t}(PS) \neq 0$.



Rys. 2. Przebieg czasów trwania procesu komisjonowania w eksperymencie o próbie nr 8:
a) wg modelu analitycznego, b) wg modelu symulacyjnego

Poziom istotności w badaniu wynosi $\alpha = 0,05$. W wyniku obliczenia kwantyl rzędu α wynosi $u_{1-\alpha/2} = 1,95996$, a obszar krytyczny to: $u = (-\infty; -1,95996) \cup (1,95996; \infty)$, natomiast statystyki testujące dla hipotezy zerowej H_0 podano w kolumnie 8 tab. 1.

Dla każdej z prób wykonano wykresy przebiegu czasów trwania procesu komisjonowania, przykład wskazano na rys. 2. Do każdego wykresu opracowano linię trendu (jaśniejsza linia na wykresach) o możliwie najwyższym współczynniku determinacji. W przypadku modelu symulacyjnego większość prób charakteryzuje się dopasowaniem zadowalającym. Płynność przebiegów w przypadku tego modelu jest efektem wyrównywania przepływu materiałów w strefie komisjonowania poprzez opracowanie odpowiednich procesów umożliwiających wyrównanie przepływów, a pośrednio wpływa na ów fakt występowanie w modelu zmiennych f , $MTTR$.

5. PODSUMOWANIE

W pracy [14] testowany był generator losowych liczb pobrań $round(z_uniform(1,0,10))$ opracowany w oparciu o rozkład jednorodny zdefiniowany w oprogramowaniu *Plant Simulation* jako $z_uniform(Stream:<integer>,Start:<real>,Stop:<real>)$. Wyniki nie były satysfakcjonujące.

Jak wynika z tab. 1., model można z powodzeniem stosować w dalszych badaniach i może stanowić punkt wyjścia dla konstrukcji pełnego symulacyjnego modelu magazynu, w ramach którego możliwe będzie jego badanie na realnych, nieuśrednionych charakterystykach zamówień czy też zleceń na komisjonowanie, w przeciwieństwie do projektowania magazynów wg klasycznych metod analitycznych.

Tablica 1

Zestawienie wyników zastosowania testu zgodności dla dwóch średnich w przypadku 10 prób

Nr	$t(EX)$	$S_{t(EX)}$	$S_{\overline{t(EX)}}$	$t(PS)$	$S_{t(PS)}$	$S_{\overline{t(PS)}}$	Statystyka testująca	H ₀ ?
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	12,115422	0,702531	0,0702531	12,22798	0,285667	0,0285667	-1,48413387	TAK
2	12,153210	0,643185	0,0643185	12,34420	0,390649	0,0390649	-2,53804731	NIE
3	12,132174	0,662681	0,0662681	12,15382	0,308191	0,0308191	-0,29623270	TAK
4	12,115422	0,702531	0,0702531	12,20716	0,321333	0,0321333	-1,18743951	TAK
5	12,115422	0,702531	0,0702531	12,20716	0,321333	0,0321333	-1,18743951	TAK
6	12,115422	0,702531	0,0702531	12,20716	0,321333	0,0321333	-1,18743951	TAK
7	12,115422	0,702531	0,0702531	12,28137	0,347300	0,0347300	-2,11757386	TAK
8	12,115422	0,702531	0,0702531	12,21580	0,327419	0,0327419	-1,29510705	TAK
9	12,115422	0,702531	0,0702531	12,20840	0,321774	0,0321774	-1,20330753	TAK
10	12,115422	0,702531	0,0702531	12,20716	0,321333	0,0321333	-1,18743951	TAK

Konieczne są jednak dalsze prace nad zagadnieniem, jako że model symulacyjny zwraca powtarzalne wyniki, np. dla prób nr 4, 5, 6, 10. Przy czym na korzyść modelu symulacyjnego warto zauważyć, biorąc pod uwagę wartości $t(EX)$, że model analityczny pozwolił na wygenerowanie wyników odmiennych od pozostałych jedynie w przypadku prób nr 2 i 3.

Wskazane jest także dalsze opracowanie modelu symulacyjnego w postaci takiej, aby współczynnik determinacji charakteryzowało wyższe dopasowanie.

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. Bartholdi J. J. III, Hackman Steven T.: *Warehouse & Distribution Science*, <http://www2.isye.gatech.edu/~spyros/courses/IE6202/Fall-2002/Bartholdi-Hackman.pdf> (dostęp on-line 8 marca 2016 r.) 2002
3. Chew E. P., Tang L. Ch.: *Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse*, EJOR, Vol. 112, Is. 3, 1999, pp. 582-597, DOI: 10.1016/S0377-2217(97)00416-5.
4. Chiang, D.M.-H., Lin, C.-P., Chen, M.-C.: *The adaptive approach for storage assignment by mining data of warehouse management system for distribution centres*, Enterprise Information Systems, vol. 5, is. 2, 2011, pp. 219-234. DOI: 10.1080/17517575.2010.537784

5. Davarzani H., Norrman A.: *Toward a relevant agenda for warehousing research: Literature review and practitioners' input*, Logistics Research, Vol. 8, Is. 1, 2015, pp. 1-18.
6. Drury J.: *Towards more efficient order picking*, IMM Monograph No. 1, Report, The Institute of Materials Management, Cranfield, U.K. 1988.
7. Fijałkowski J.: *Technologia magazynowania, wybrane zagadnienia*, OWPW, Warszawa 1995.
8. Frazelle E. H.: *World-Class Warehousing*, Logistics Resources International, Atlanta, GA 1996.
9. Gałązka M., Jakubiak M.: *Simulation as a method of choosing the order-picking concept*, Logistics and Transport, Vol. 2(11), 2010, pp. 81-88.
10. Gibson D. R., Sharp G. P.: *Order batching procedures*, EJOR, Vol. 58, Is. 1, 1992, pp. 57-67.
11. Jungheinrich, 2011, *Electric order picker/ tri-lateral stacker (1250-1500 kg)*, <http://www.centralgroup.co.nz/site/centralfor/files/EKX513.pdf> (dostęp on-line 14 marca 2017 r.)
12. Karkula M.: *Modelowanie i symulacja procesów logistycznych*, Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2013.
13. Koster R. de, Le-Duc T., Roodbergen K. J.: *Design and control of warehouse order picking: a literature review*, EJOR, Vol. 182, Is. 2, 2007, pp. 481-501, DOI: 10.1016/j.ejor.2006.07.009.
14. Kostrzewski M.: *Zastosowanie metod symulacyjnych w badaniu wybranych procesów magazynowych w magazynie wysokoregalowym*, Prace Naukowe PW. Transport, Vol. 111, 2016, pp. 301-312.
15. Le-Duc T., de Koster R.M.B.M.: *Travel time estimation and order batching in a 2-block warehouse*, EJOR, Vol. 176, Is. 1, 2007, pp. 374-388, DOI: 10.1016/j.ejor.2005.03.052.
16. Lu W., McFarlane D., Giannikas V., Zhang Q.: *An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations*, EJOR, Vol. 248, Is. 1, 2016, pp. 107-122, DOI: 10.1016/j.ejor.2015.06.074.
17. Pan J.Ch.-H., Shih P.-H., Wu M.-H.: *Storage assignment problem with travel distance and blocking considerations for a picker-to-part order picking system*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 62, Is. 2, 2012, pp. 527-535, DOI: 10.1016/j.cie.2011.11.001.
18. Quader S., Castillo-Villar K. K.: *Design of an enhanced multi-aisle order-picking system considering storage assignments and routing heuristics*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, pp. 1-17, DOI: 10.1016/j.rcim.2015.12.009.
19. Roodbergen K. J., de Koster R.: *Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle*, European J. of Operational Research, Vol. 133, Is. 1, 2001, pp. 32-43, DOI: 10.1016/S0377-2217(00)00177-6.
20. Schlesinger, S., Crosbie, R.E., Gagne, R.E., Innis, G.S., Lalwani, C.S., Loch, J., Sylvester, R.J., Wright, R.D., Kheir, N., Bartos, D.: *Terminology for model credibility*; [w:] Simulation, 1979; pp. 103-104.
21. Ulbrich A., Galka S., Günthner W.A.: *Simulation of multi-level order-picking systems within rough planning for decision making*, http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Ulbrich_Galka_G%C3%BCnthner_Simulation%200f%20Multi-Level%20Order-Picking%20Systems%20Within%20Rough%20Planning%20For%20Decision%20Making.pdf, dostęp on-line 21 marca 2016 r., pp. 1-6.
22. Zeigler B.P.: *Teoria modelowania i symulacji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1984.

APPLICATION OF SELECTED PSEUDO-RANDOM NUMBER GENERATOR IN THE ORDER-PICKING PROCESS ANALYSIS

Summary: The purpose of this paper is to verify the applicability of selected pseudo-random number generator in a simulation model of a selected logistics facility. More precisely, this generator – in the study discussed in the paper – is applied in order to express the stochastic nature of the simulation model destined to analyse the process of picking in a high-bay warehouse. Stochastic character is assigned to variables in each subsequent simulation experiment. And these variables include: quantities of goods (products of one type) to take per one row in a picking-list and quantities of rows in picking-lists *per se*. Based on the numerous conducted simulation experiments, durations of the order-picking process obtained with use of simulation methods were analysed and compared to values computed according to pre-defined analytic formulas. In order to make these study and comparison, multi-agent system were proposed.

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