

Marek Melaniuk

Uniwersytet Łódzki

MODELOWANIE SYMULACYJNE STOCHASTYCZNYCH PROCESÓW LOGISTYCZNYCH

Streszczenie: Artykuł prezentuje zastosowanie modelowania symulacyjnego do optymalizacji funkcjonowania procesów logistycznych. Przedstawiona została problematyka procesów logistycznych, modelowania symulacyjnego oraz procesów stochastycznych. Pokazany został model symulacyjny, którego celem jest optymalizacja zapasów w przykładowej hurtowni. Jako narzędzie symulacji wykorzystany został arkusz kalkulacyjny (MS Excel). Przedstawiona w pracy sieć działań dla problemu symulacji pracy hurtowni może zostać wykorzystana do utworzenia program komputerowego w dowolnym języku programowania.

Słowa kluczowe: symulacja, modelowanie, procesy, logistyka, stochastyczność.

1. Procesy logistyczne

Istotę procesów stanowią czynności przekształcające mierzalne wejścia (informacje, materiały, metody) w mierzalne wyjścia (informacje, produkty, usługi). Określeniem bardziej potocznym jest przedstawienie procesu jako zbioru zdefiniowanych, powiązanych ze sobą działań służących osiągnięciu założonego celu. Celem tych procesów jest tworzenie wartości dodanej dla odbiorców (klientów).

Powyższe określenie wynika także z definicji procesu zawartej w normie ISO 9000:2000 pkt. 3.4.1. Norma ta stanowi również minimalne wymagania systemów zarządzania jakością.

Natomiast celem realizacji procesów biznesowych jest dążenie do osiągnięcia wyniku biznesowego, który może mieć charakter materialny, informacyjny lub finansowy [Bozarth, Handfield 2007]. Wśród istniejących wielu podziałów procesów na uwagę zasługuje model referencyjny procesów w postaci układu klasyfikacyjnego opracowanego i w dalszym ciągu rozwijanego przez International Benchmarking Clearinghouse, wchodzącego w skład APQC – American Productivity & Quality Center. Wyróżnione są tam kategorie procesów, grupy procesowe, procesy i czynności. Kategorią powiązaną z procesami logistycznymi jest kategoria 4 – Dostarczanie produktów i usług (*Deliver Products and Services*). Opracowana klasy-

fikacja procesów na potrzeby ich praktycznego wykorzystania w znacznym stopniu ułatwia identyfikację procesów w firmach.

Procesy logistyczne mogą przyjąć postać:

- decyzyjną, np. planowanie zaopatrzenia materiałowego od dostawcy do odbiorcy,
- fizyczną, np. transport materiałów do magazynu, rozmieszczenie ich w magazynie, wydanie materiałów do procesu produkcyjnego.

Pojęcie procesów logistycznych jest ściśle związane z łańcuchami dostaw. Łańcuch dostaw jest rozumiany jako działalność związana z przepływem produktów i usług – od jego oryginalnego źródła, przez wszystkie formy pośrednie, aż do postaci, w której produkty i usługi są konsumowane przez ostatecznego klienta. Natomiast łańcuch dostaw jako proces oznacza sekwencję zdarzeń związanych z przemieszczaniem dóbr. Zdarzenia takie prowadzą do zwiększenia wartości dodanej finalnego produktu.

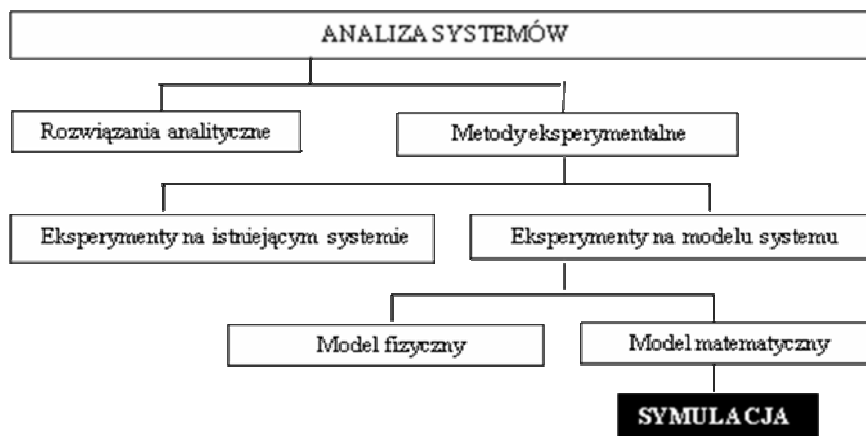
Pojawiają się pytania, jaką należy przyjąć strategię zarządzania procesami logistycznymi, jaką zastosować metodę optymalizacji zapasów. Rozwiązanie tego problemu będzie pokazane na przykładzie sterowania pracą hurtowni w warunkach losowego zajścia zdarzeń. W tym celu zostanie wykorzystana symulacja zdarzeń dyskretnych, a narzędziem jej wykonania będzie arkusz kalkulacyjny Excel.

2. Modelowanie symulacyjne

Modele symulacyjne zasadniczo zaliczane są do klasy modeli opisowych. Ich głównym celem jest naśladowanie zachowania się systemu rzeczywistego za pomocą utworzonego modelu jego funkcjonowania. Wyniki modelu symulacyjnego zawierają dwie części: diagnostyczną – informującą o dynamice działania systemu w kolejnych momentach czasowych, oraz część analityczną, w której znajdują się zbiorcze charakterystyki liczbowe. Modele symulacyjne można też wykorzystać do optymalizacji zachowania się systemu i dlatego mogą one również zostać zaliczone do klasy modeli normatywnych. Symulacja należy do eksperymentalnych metod analizy systemów. Miejsce symulacji jako narzędzia analizy systemów pokazano na rys. 1.

W zarządzaniu logistycznymi łańcuchami dostaw zmierzamy do optymalizacji przepływów materiałowych i informacyjnych. Systemy produkcyjne, w których występują technologiczne ciągi produkcji wyrobów, rozpatrywane są często jako klasa wielostanowiskowych i sekwencyjnych systemów masowej obsługi. Eksperymentowanie symulacyjne na modelach takich systemów umożliwia użytkownikowi optymalizację jego funkcjonowania ze względu na jedno z kilku możliwych kryteriów lub kilka kryteriów łącznie (problem wielokryterialności). Takimi kryteriami optymalizacji w systemach kolejkowych mogą być np.:

- minimalizacja czasów obsługi obiektów na poszczególnych stanowiskach obsługi,
- minimalizacja czasów oczekiwania obiektów na obsłudze,
- minimalizacja liczby stanowisk na danych etapach obsługi.



Rys. 1. Miejsce symulacji w analizie systemów

Źródło: na podstawie [Bitkowska 2009].

Powyższe podejście prowadzi w rezultacie do optymalnego sterowania pracą całego systemu.

Metodyka projektowania komputerowych systemów symulacyjnych charakteryzuje się szczególnymi cechami odróżniającymi ją od metodyk projektowania typowych systemów informatycznych. Do tych cech należy zaliczyć przede wszystkim:

1. Wyspecjalizowanie danych niezbędnych do przeprowadzenia symulacji – polegające na określeniu rozkładu prawdopodobieństwa na podstawie ciągu realizacji danej zmiennej. Powoduje to, że model symulacyjny umożliwi imitację funkcjonowania systemu rzeczywistego w warunkach przypadkowego oddziaływania zjawisk (szerzej ten problem omówiony jest w następnym punkcie referatu).

2. Model symulacyjny powinien uwzględnić tylko te czynniki, które w sposób istotny wpływają na zachowanie się systemu rzeczywistego. W procedurze eliminacji czynników nieistotnych można wykorzystać np. metody taksonomiczne.

3. Istotnym zagadnieniem dla efektywnej realizacji badań symulacyjnych jest wybór właściwych metod planowania eksperymentów. Polegają one m.in. na odpowiednim doborze zmiennych symulowanych, określeniu metod próbkowania i wyznaczaniu liczby niezbędnych przebiegów symulacyjnych. Metody planowania eksperymentów można podzielić na dwie grupy: metody redukcji rozmiarów próby, polegające na minimalizacji liczby eksperymentów przy zadanej dokładności wyników, oraz metody redukcji wariancji, polegające na zwiększaniu dokładności wyników przy zadanej liczbie eksperymentów. Do klasycznej literatury opisującej szczegółowo problem planowania eksperymentów symulacyjnych należy zaliczyć prace T. Naylor [Naylor 1975] i G. Fishmana [Fishman 1981].

Oprócz problemów metodycznych w zakresie projektowania eksperymentów symulacyjnych na uwagę zasługują stosowane techniki modelowania symulacyjnego. Wykorzystują one trzy główne podejścia:

- interakcję procesową (*process interaction*),
- planowanie zdarzeń (*event scheduling*),
- przeglądanie działań (*activity scanning*).

Zwłaszcza ta ostatnia technika jest ciekawa z algorytmicznego punktu widzenia i ma istotne walory dydaktyczne. Jednym z zasadniczych atrybutów obiektów w modelach dynamicznych, które podlegają symulacji, jest atrybut czasu. Stąd też wynika konieczność umiejętnego zarządzania czasem przebiegu symulacji. Jeżeli atrybut czasu danego obiektu wyniesie zero, oznacza to wystąpienie danego działania, np. nadejście obiektu do obsługi lub zakończenie pracy stanowiska. Czas większy od zera informuje, że za tyle jednostek czasowych nadejdzie następny obiekt lub przez tyle jednostek czasowych jeszcze będzie zajęte dane stanowisko. Procedura sterująca upływem czasu dokonuje przeglądu atrybutów czasu wszystkich obiektów w celu znalezienia najmniejszej dodatniej wartości czasu. Po znalezieniu atrybuty czasu każdego obiektu zostają pomniejszone o tę wartość. Jednocześnie wartość specjalnej zmiennej *zegar* zostanie zwiększona o ten najmniejszy przyrost czasu. Zmienna *zegar* pełni funkcję zegara symulującego upływ czasu rzeczywistego. Jeżeli zmienna ta osiągnie zadaną wartość, proces symulacyjny jest zakończony.

Typowym przykładem języka symulacyjnego wykorzystującego metodę przeglądania działań jest język CSL oraz jego nowsza wersja ECSL (*Extended Control and Simulation Language*).

3. Realizacja procesów stochastycznych

Procesy występujące w systemach gospodarczych charakteryzują się m.in. znaczną losowością ich funkcjonowania, np.:

- losowe odstępy czasu pomiędzy przychodzącymi klientami do sklepu oraz losowe czasy ich obsługi,
- losowość występowania awarii danego urządzenia.

W wielu metodach badań operacyjnych pomija się często czynnik losowości (np. w metodzie simpleks programowania liniowego), dzięki czemu algorytmy tych metod stają się mniej skomplikowane w praktycznym wykorzystaniu. Może to jednak stanowić zbyt daleko idące uproszczenie istniejącej rzeczywistości. Z drugiej strony nie byłoby żadnej potrzeby korzystania z modeli symulacyjnych, gdyby każdy problem mógł być rozwiązany za pomocą metod analitycznych (zob. rys. 1). Praktyczną realizację stochastyczności procesów gospodarczych w tworzonych modelach symulacyjnych stanowią generatory liczb losowych (a dokładniej – pseudolosowych) o zadanych rozkładach prawdopodobieństwa. Podstawą losowań jest zawsze programowy generator liczb losowych o rozkładzie równomiernym

(jednostajnym). Za pomocą różnych algorytmów (szeroko opisanych m.in. w pracach R. Zielińskiego [Zieliński 1970; 1972]) otrzymaną liczbę z rozkładu równomiernego przekształca się na rozkład o znanej postaci funkcyjnej lub dokonuje się losowania z rozkładu empirycznego. Metody te noszą często nazwę Monte Carlo.

Metody Monte Carlo wywodzą się z poszukiwań prowadzonych podczas II wojny światowej. Naukowcy z laboratorium w Los Alamos chcieli opisać, jak daleko neutrony przenikają przez różne materiały. Zagadnienie było niezmiernie ważne przy projektowaniu urządzeń nuklearnych, a nie istniały odpowiednie metody analityczne. Natomiast metoda prób i błędów byłaby zbyt czasochłonna i ryzykowna. Dlatego też naukowcy sięgnęli po technikę już co prawda znaną, ale w praktyce do tej pory nie używaną. Technika ta zakładała użycie znanych fizycznych właściwości danego obiektu i obserwowania prawdopodobieństw ich występowania w celu określenia wyniku eksperymentów. Oszacowanie wyniku było oparte na przeprowadzonej symulacji eksperymentu. Technice tej nadano tajny kryptonim Monte Carlo, gdyż opiera się ona na zasadach gry hazardowej.

4. Symulacyjny model optymalizacji zapasów

Przykład optymalizacji zapasów zostanie pokazany na podstawie pracy hurtowni.

Działalność hurtowni polega na zaopatrywaniu wielu odbiorców w towary. Założmy, że hurtownia zaopatruje w jeden określony rodzaj towaru tylko jednego odbiorcę. Odbiorca raz w ciągu zadanego okresu T (np. miesiąc) składa zamówienie na towar. Wielkość tego zamówienia jest zmienną losową o znanym empirycznym rozkładzie prawdopodobieństwa. Moment nadejścia zamówienia też jest zmienną losową, ale o rozkładzie równomiernym. Niech koszt magazynowania jednostki towaru w hurtowni wyniesie 100 zł w ciągu okresu T .

Jeżeli hurtownia nie może zrealizować zamówienia, wówczas za każdą niedostarczoną jednostkę towaru hurtownia wypłaca odbiorcy karę umowną w wysokości 1000 zł.

Problemem do rozwiązania jest określenie takiej wielkości zapasu towarów w hurtowni, aby koszt magazynowania był jak najniższy.

Założmy, że dany jest rozkład prawdopodobieństwa wielkości zamówienia (tab. 1):

Tabela 1. Rozkład prawdopodobieństwa wielkości zamówienia

Zamówienia (szt.)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Prawdopodobieństwo	0,01	0,05	0,08	0,12	0,16	0,16	0,18	0,14	0,08	0,02

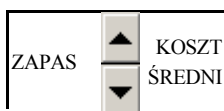
Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z tab. 1, prawdopodobieństwo zamówień na produkty znajdujące się w magazynie wynika z pewnego rozkładu empirycznego.

Tabela 2 przedstawia model takiego procesu zapisany w arkuszu kalkulacyjnym. Wykonano 1000 eksperymentów (pokazanych jest pierwszych 17 i ostatnich 6 eksperymentów). Losowana jest wielkość zamówienia z rozkładu empirycznego (wykorzystana funkcja WYSZUKAJ.PIONOWO – *VLOOKUP*) oraz czas nadejścia z rozkładu równomiernego. Zmienną decyzyjną jest wielkość zapasu, a kryterium wyboru – średni koszt magazynowania (koszt całkowity podzielony przez liczbę eksperymentów).

Tabela 2. Wyniki modelu symulującego pracę hurtowni – ustalanie optymalnej wielkości zapasów

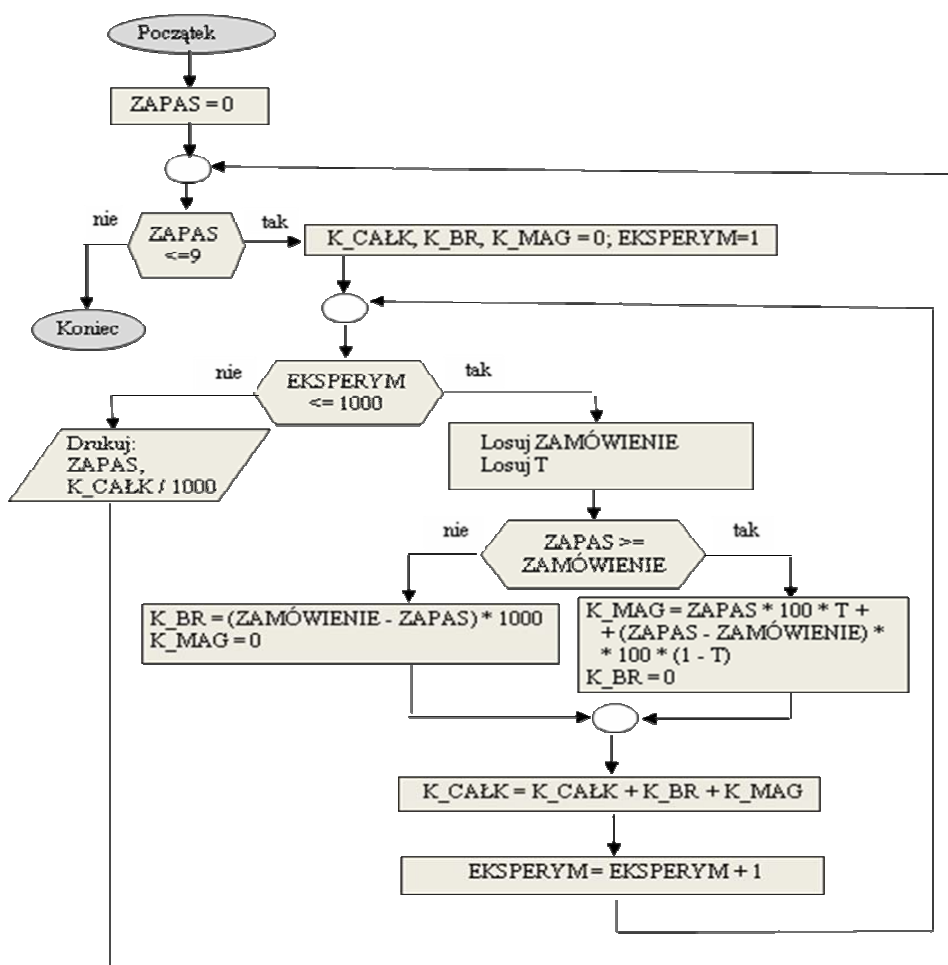
A	B	C	D	E	F	G	H	I
Częstość względna	Częstość skumulowana	ZAMÓWIENIE	Numer eksperymentu	Losuj ZAMÓWIENIE	Losuj CZAS NADEJŚCIA	Koszt BRAKU wykonania zamówienia	Koszt MAGAZYNOWANIA	Koszt CAŁKOWITY
0,01	0,00	0	1	6	0,34	-	305,32	305,32
0,05	0,01	1	2	7	0,66	-	459,84	459,84
0,08	0,06	2	3	4	0,50	-	499,43	499,43
0,12	0,14	3	4	6	0,68	-	506,36	506,36
0,16	0,26	4	5	6	0,75	-	550,30	550,30
0,16	0,42	5	6	2	0,21	-	541,60	541,60
0,18	0,58	6	7	3	0,08	-	422,90	422,90
0,14	0,76	7	8	1	0,99	-	699,29	699,29
0,08	0,90	8	9	9	0,29	2 000	-	2 000,00
0,02	0,98	9	10	8	0,36	1 000	-	1 000,00
1,00	1,00		11	7	0,09	-	63,44	63,44
			12	3	0,48	-	544,99	544,99
			13	5	0,38	-	392,42	392,42
			14	6	0,54	-	425,28	425,28
			15	7	0,94	-	656,17	656,17
			16	7	0,02	-	15,17	15,17
			17	7	0,69	-	480,93	480,93
			995	7	0,99	-	693,56	693,56
			996	3	0,55	-	565,88	565,88
			997	3	0,77	-	631,49	631,49
			998	5	0,16	-	279,29	279,29
			999	5	0,89	-	647,28	647,28
			1000	8	0,78	1 000	-	1 000,00
Sumaryczny koszt dla wszystkich eksperymentów								542 449,58



Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z tab. 2, kierownik hurtowni powinien podjąć decyzję, że optymalnym poziomem zapasu powinno być 7 sztuk towaru w magazynie przy koszcie 542,45 zł. Każde powtarne uruchomienie modelu klawiszem F9 może dać wyniki nieco różniące się ze względu na zastosowanie funkcji LOS(). W celu łatwiejszego ustalania optymalnego poziomu zapasu wykorzystany został przycisk pokręta (w wersji Excel 2007 wszystkie formanty znajdują się na pasku Deweloper, który po zainstalowaniu pakietu nie jest automatycznie aktywowany).

Na rys. 2 pokazany jest algorytm tego samego problemu w postaci sieci działań (schematu blokowego) przygotowanego do zakodowania w języku algorytmicznym.



Rys. 2. Sieć działań programu symulującego pracę hurtowni – ustalanie optymalnego poziomu zapasów

Źródło: opracowanie własne.

Oznaczenia zmiennych występujących na schemacie (rys. 2) są następujące:

Zmienna decyzyjna (symulowana):

ZAPAS (zapasy wyrobów w hurtowni).

Obiekty wyjściowe:

K_CAŁK (koszty całkowite podzielone przez liczbę eksperymentów).

Obiekty wejściowe:

EKSPERYM (zasadna liczba eksperymentów symulacyjnych),

ZAMÓWIENIE (wylosowana wielkość zamówienia z rozkładu empirycznego),

T (wylosowany moment nadejścia zamówienia – rozkład równomierny).

Obiekty robocze:

K_MAG (koszt magazynowania wyrobów znajdujących się w hurtowni),

K_BR (koszt braku wyrobów w hurtowni – kara umowna płacona odbiorcy).

5. Podsumowanie

Korzystając z dowolnego języka wizualnego ze środowiska Visual Studio (np. C#, VB.Net), można osiągnąć efekty symulacji zachowania się modelu systemu w formie graficznej. Podobne efekty można osiągnąć, wykorzystując również arkusz kalkulacyjny; prosty przykład jego zastosowania został przedstawiony w niniejszej pracy.

Przekonujące uzasadnienie wykorzystania arkuszy jako narzędzia edukacyjnego w dziedzinie symulacji przedstawione jest w pracy [Mielczarek 2008]. Na uwagę zasługują również opracowania [Evans; Ingolfsson, Grossman; Pecherska, Merkurjev], w których znajdują się liczne przykłady praktyczne modeli symulacyjnych oraz pokazane jest ujęcie metodyczne zastosowania arkuszy kalkulacyjnych jako narzędzia modelowania symulacyjnego systemów.

Literatura

- Bitkowska A., *Zarządzanie procesami biznesowymi w przedsiębiorstwie*, Vizja Press&IT, Warszawa 2009.
- Bozarth C., Handfield R., *Wprowadzenie do zarządzania operacjami i łańcuchem dostaw*, Helion, Gliwice 2007.
- Evans J., *Spreadsheets as a Tool for Teaching Simulation*, www.unalmed.edu.co/~faherrer/IBR/M3_Riesgo/LEC_Spreadsheets_as_a_Tool_for_Teaching_Simulation.pdf (15.02.2010).
- Fishman G., *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*, PWE, Warszawa 1981.
- Ingolfsson A., Grossman T., *Graphical Spreadsheet Simulation of Queues*, <http://archive.ite.journal.informs.org/Vol2No2/IngolfssonGrossman/> (15.02.2010).
- Mielczarek B., *Symulacja za pomocą arkusza kalkulacyjnego*, [w:] *Metody symulacyjne w badaniu organizacji i dydaktyce menedżerskiej*, red. A. Balcerak, W. Kwaśnicki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, s. 217-230.
- Naylor T., *Modelowanie cyfrowe systemów ekonomicznych*, PWN, Warszawa 1975.
- Pecherska J., Merkurjev Y., *Teaching Simulation with Spreadsheets*, www.comp.glam.ac.uk/ASMTA2005/Proc/pdf/edu-04.pdf (15.02.2010).
- Zieliński R., *Generatory liczb losowych*, WNT, Warszawa 1972.
- Zieliński R., *Metody Monte Carlo*, WNT, Warszawa 1970.

SIMULATION MODELLING OF STOCHASTIC LOGISTIC PROCESSES

Summary: This article outlines the problem of simulation modelling of stochastic processes. The author defines the issue of logistic processes, simulation modelling and stochastic processes. Then there is presented the simulation model of stock optimization in the warehouse. The simulation model is presented by means of spreadsheet (MS Excel) tool. This paper also shows a flowchart of simulation model that enables to build computer programme using any computer language.