

WALDEMAR MAŁOPOLSKI*

MODELOWANIE I OPTYMALIZACJA SYSTEMÓW
WYTWARZANIA W PROGRAMIE ARENAMODELING AND OPTIMIZATION OF MANUFACTURING
SYSTEMS USING ARENA SOFTWARE

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę budowania modeli symulacyjnych dyskretnych systemów wytwarzania w programie Arena. Opisano metodę analizy funkcjonalnej systemu wytwarzania wspomagającą poprawną budowę modeli symulacyjnych. Zaprezentowano przebieg procesu optymalizacji systemu wytwarzania na podstawie symulacji komputerowej.

Słowa kluczowe: systemy wytwarzania, modelowanie, symulacja, optymalizacja

Abstract

In this paper the problem of building simulation models of discrete manufacturing systems in the Arena is presented. A method of functional analysis of manufacturing system supporting the correct building of simulation models is described. The optimization process of manufacturing system based on computer simulations is presented.

Keywords: manufacturing systems, modeling, simulation, optimization

* Dr inż. Waldemar Małopolski, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój gospodarczy w ostatnich latach, a szczególnie bardzo szybko postępująca globalizacja doprowadziła do wzrostu konkurencji wśród wytwórców dóbr konsumpcyjnych. Bezpośrednim efektem tych zmian jest dążenie do obniżenia kosztów produkcji i usług. W warunkach ogólnoświatowej globalizacji gospodarki optymalizacja kosztów wytwarzania jest często warunkiem przetrwania na rynku. Z tego względu coraz większą wagę przykłada się do wszelkich naukowych metod i narzędzi, które mogą być wykorzystane do poprawy wydajności produkcji, polepszenia jakości wyrobów i obniżenia kosztów wytwarzania. W ogólnym przypadku nadrzędnym celem jest znalezienie lepszego rozwiązania, a w zasadzie najlepszego z możliwych, czyli optymalnego. Kryterium optymalizacji może być różne i może zależeć od lokalnych uwarunkowań i potrzeb. Bardzo często takim kryterium może być najkrótszy czas, najniższa cena itp.

Metody naukowe pozwalające na poszukiwanie optymalnych rozwiązań są rozwijane od wielu lat. Są one m.in. przedmiotem tzw. badań operacyjnych, w ramach których powstało wiele metod analitycznych pozwalających na sprawne poszukiwanie optymalnych rozwiązań. Są to jednak metody mające wiele ograniczeń i rozwiązujące tylko określone problemy z różnych dziedzin. Ich zaletą jest możliwość znalezienia optymalnego rozwiązania, czyli najlepszego, w miarę prosty sposób. Jednak ze względu na różnorodność problemów i stopień skomplikowania bardzo często nie można znaleźć gotowych metod analitycznych, które można wykorzystać do poszukiwania optymalnego rozwiązania. W tych przypadkach, w których rozwiązania nie możemy znaleźć za pomocą metod analitycznych, mogą być wykorzystane chociażby metody heurystyczne [5], a w przypadku optymalizacji, np. algorytmy ewolucyjne [4]. W wielu przypadkach jedynym wyjściem jest jednak zastosowanie metod symulacyjnych.

Charakterystyczną cechą metod symulacyjnych, wychodząc od znaczenia łacińskiego słowa *simulatio*, jest udawanie rzeczywistego zachowania się badanego obiektu lub systemu. Jako obiekt rozumiany jest wyodrębniony element z otaczającej nas rzeczywistości o charakterze materialnym lub abstrakcyjnym. Możemy mówić o różnych rodzajach obiektów, np.: fizycznych, technicznych, matematycznych itp.

Jako system rozumiany jest wyodrębniony z otoczenia zbiór obiektów powiązanych ze sobą odpowiednimi relacjami opisującymi wzajemne oddziaływanie obiektów na siebie. Wyróżniamy systemy występujące w naturalny sposób w otaczającej nas rzeczywistości oraz systemy zbudowane przez człowieka. Podstawą umożliwiającą przeprowadzenie symulacji jest zbudowanie modelu badanego obiektu lub systemu. Sama zaś symulacja polega na uproszczonym odtwarzaniu zachowania się obiektu lub systemu poprzez jego model. Najważniejszym wymaganiem stawianym modelom symulacyjnym jest konieczność poprawnego naśladowania zachowania się ich oryginalnych pierwowzorów. W praktyce spotyka się zasadniczo dwa rodzaje modeli symulacyjnych, czyli modele fizyczne lub matematyczne. Modele fizyczne są często pomniejszone w odpowiedniej skali w stosunku do oryginału. Modele matematyczne bardzo często są zapisywane w postaci odpowiedniego programu komputerowego. W programie tym są zamodelowane najistotniejsze cechy systemu i jego oddziaływanie z otoczeniem. Badanie zachowania się modelu (modelowanego systemu) polega na zmianie oddziaływania otoczenia na model w postaci sygnałów wejściowych i zmianie zachowania się samego systemu w wyniku zmiany jego parametrów [10].

W zależności od cech modeli symulacyjnych, które często wynikają bezpośrednio z cech modelowanych systemów, modele możemy podzielić na:

- dynamiczne – w których stan systemu ulega zmianie w z upływem czasu,
 - interaktywne – reagujące na sygnały zewnętrzne,
 - nieinteraktywne – odizolowane od otoczenia,
- statyczne – w których czas nie ma wpływu na zmiany stanu systemu,
- deterministyczne – w których nie występują zmienne o charakterze losowym,
- stochastyczne – w których występują zmienne o charakterze losowym,
- z czasem dyskretnym – w których upływ czasu jest dyskretyzowany ze stałym krokiem,
- zdarzeń dyskretnych – w których czas podlega zmianom skokowym w zależności od zaistnienia zdarzeń dyskretnych.

Typ budowanego modelu symulacyjnego oraz poziom szczegółów, z jakim odzwierciedla on system rzeczywisty zależy w dużym stopniu od rodzaju symulowanego systemu oraz celu przeprowadzania symulacji. W ogólnym przypadku można dokonać podziału celów symulacji na dwie grupy. Pierwsza grupa obejmuje zastosowanie symulacji komputerowej do badania zachowania się systemów nieistniejących, które są w fazie projektowania. Druga grupa obejmuje symulacje zachowania się systemów istniejących, których przeprowadzenie na systemie rzeczywistym jest niemożliwe lub bardzo kosztowne. Koszt eksperymentu symulacyjnego, ma decydujący wpływ na wybór stosowanej metody symulacyjnej, a często w ogóle decyduje o rozpoczęciu prac w tym zakresie. Budowanie komputerowych modeli symulacyjnych wymaga odpowiedniego przygotowania merytorycznego, doświadczenia w danym zakresie tematycznym i odpowiednich narzędzi. Samo zbudowanie modelu może być bardzo kosztowne ze względu na konieczność zebrania wielu informacji i danych oraz przeprowadzenia dokładnej analizy, w jakim stopniu informacje te są istotne dla budowanego modelu.

Kolejnym etapem jest weryfikacja poprawności modelu symulacyjnego. Na tym etapie należy sprawdzić, czy zachowanie modelu symulacyjnego jest zgodne z zachowaniem systemu rzeczywistego. Bardzo często takie bezpośrednie porównanie jest niemożliwe, co bardzo utrudnia budowanie modeli symulacyjnych.

Kolejny etap, czyli przeprowadzenie eksperymentu symulacyjnego może być długotrwałe i kosztowne, szczególnie w przypadku symulacji systemów bardzo złożonych, gdy celem jest optymalizacja, która wymaga przeprowadzenia wielu symulacji. Ponadto możliwość poszukiwania optymalnych rozwiązań w oparciu o metody symulacyjne jest ograniczona. Wybór najlepszego rozwiązania może być dokonany tylko na podstawie przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych, których liczba jest ograniczona. Nie ma żadnych gwarancji, że kolejna symulacja z innymi parametrami nie dałaby lepszego rozwiązania.

Mimo opisanych powyżej trudności związanych z przygotowaniem i przeprowadzeniem eksperymentu symulacyjnego, metoda ta znajduje bardzo szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia.

2. Narzędzia do modelowania i symulacji komputerowej

Znaczący wzrost w ostatnich latach możliwości obliczeniowych komputerów, a szczególnie komputerów osobistych oraz rozwój metod i narzędzi programistycznych przyczynił się do dużego rozwoju programów symulacyjnych. W znaczący sposób wrosły możliwości

funkcjonalne tych narzędzi oraz ich wydajność. Wśród wielu programów przeznaczonych do symulacji komputerowej znaczącą grupę stanowią programy przeznaczone do modelowania i symulacji procesów dyskretnych. Modele tych procesów mają przeważnie charakter dynamiczny z elementami stochastycznymi, a czas podlega zmianom skokowym w zależności od zaistnienia zdarzeń dyskretnych. Zagadnieniom związanym z symulacją komputerową jest poświęconych wiele prac i konferencji.

Przy dużej liczbie dostępnych programów, powstaje pytanie, który program wybrać, który jest lepszy? Na to pytanie nie ma jednoznacznej odpowiedzi. Ważnym czynnikiem mającym wpływ na wybór odpowiedniego programu jest jego funkcjonalność w zakresie metody budowania modelu. Obecnie wiele programów posiada odpowiednie środowiska graficzne, w których budowanie modelu jest stosunkowo łatwe. Innym czynnikiem decydującym o wyborze programu mogą być jego możliwości w zakresie wymiany danych z innymi aplikacjami. Innym ważnym kryterium może być sposób przeprowadzania eksperymentu symulacyjnego oraz narzędzia do analizy wyników symulacji. Większość najpopularniejszych programów symulacyjnych ma możliwość rozbudowania modeli symulacyjnych o elementy wizualizacji i animacji. Bardzo często są to animacje 3D.

Mimo wielu udogodnień i wzrostu funkcjonalności programów symulacyjnych tworzenie modeli i przeprowadzanie symulacji wymaga dużej wiedzy. Jednak korzyści, jakie wynikają ze stosowania tych metod, są bardzo duże i ciągle wzrasta liczba zastosowań metod symulacyjnych w różnych gałęziach życia gospodarczego.

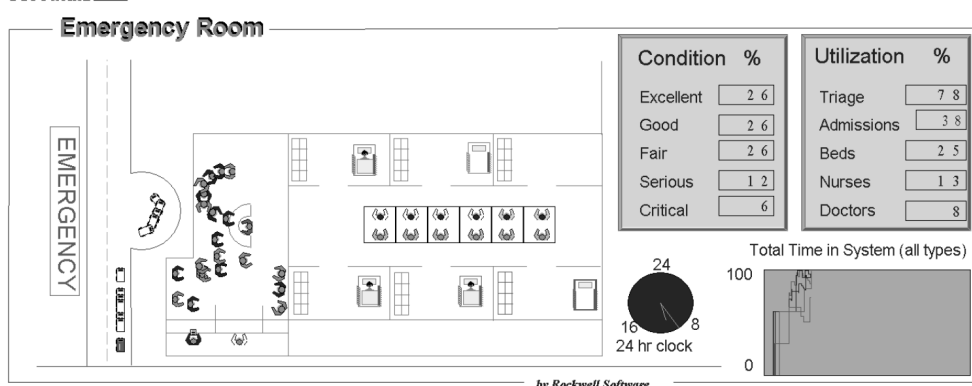
3. Podstawowe obszary zastosowań narzędzi do modelowania i symulacji procesów dyskretnych

Narzędzia do symulacji komputerowej znajdują bardzo szerokie zastosowanie. Trudno jednoznacznie określić granice, czy też wskazać, gdzie te metody nie mogą lub nie są stosowane. Łatwiej jest wskazać najbardziej popularne zastosowania. Jednym z takich obszarów gospodarki jest szeroko rozumiany przemysł wytwórczy [3, 11]. W różnych firmach produkcyjnych, jak też usługowych, wykorzystuje się metody symulacji komputerowej do optymalizacji różnego rodzaju procesów. Przykładem może być wykorzystanie programu Arena do optymalizacji procesu montażu laptopów w obrębie komórki produkcyjnej [2]. Innym bardzo ciekawym przykładem jest wykorzystanie symulacji komputerowej np. do planowania przydziału zadań dla pracowników przygotowujących towary do załadunku na ciężarówkę. Należy zauważyć, że metody symulacyjne są szczególnie przydatne do rozwiązywania problemów z zakresu zarządzania łańcuchem dostaw [6] oraz problemów związanych z systemami transportowymi i magazynowymi [1]. Wykorzystanie metod symulacji komputerowej do poszukiwania optymalnych rozwiązań w zakresie reorganizacji procesów biznesowych czy też odpowiedniej organizacji pracy, np. w telefonicznych centrach informacyjnych, może przynieść bardzo duże finansowe oszczędności, często liczone w milionach dolarów, w skali roku.

Symulacja komputerowa jest również wykorzystywana do zastosowań militarnych. Z oczywistych względów informacje na ten temat, a szczególnie informacje o efektach tych zastosowań nie są szeroko publikowane. Na uwagę zasługuje fakt wykorzystywania metod symulacji komputerowej do poszukiwania najlepszych rozwiązań organizacyjnych w służbie zdrowia [9, 8]. Na rysunku 1 przedstawiono przykład animacji modelu symulacyjnego izby przyjęć pogotowia ratunkowego w programie Arena.

4. Modelowanie systemów wytwarzania

Budowanie każdego modelu symulacyjnego wymaga odpowiedniej wiedzy o modelowanym obiekcie oraz dobrej znajomości narzędzi, które będą w tym procesie wykorzystywane. Z jednej strony należy dążyć do maksymalnego uproszczenia modelu a z drugiej model powinien z odpowiednią dokładnością opisywać działanie modelowanego obiektu.



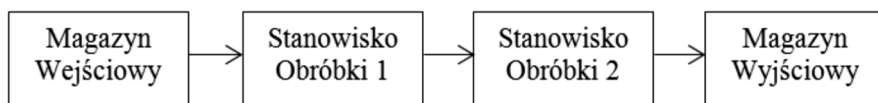
Rys. 1. Animacja modelu symulacyjnego izby przyjęć pogotowia ratunkowego (na podstawie przykładu dołączonego do programu Arena)

Fig. 1. Animation of simulation model of emergency room (based on the example attached to the Arena)

Zbyt duże uproszczenia mogą doprowadzić do błędnych wyników symulacji, odbiegających od zachowania się rzeczywistego obiektu w określonych warunkach. Zbyt duża dokładność modelu prowadzi do jego rozbudowania i może w znaczący sposób wpłynąć na czas trwania symulacji. Zatem budując model obiektu, należy dokładnie przeanalizować jego działanie i uwzględnić wszystkie istotne cechy, które decydują o jego zachowaniu. W celu przedstawienia poprawnej metody budowania modelu wykorzystany zostanie przykład prostego systemu wytwarzania.

4.1. Opis przykładowego systemu wytwarzania

Zaprezentowany na rysunku 2, w postaci schematu blokowego, system wytwarzania składa się z czterech obiektów. Jest w nim realizowany dyskretny proces obróbki jednego typu przedmiotów o nazwie *Przedmiot1* (**P1**). Z magazynu wejściowego (**M1**) przedmioty są transportowane na pierwsze stanowisko obróbki (**O1**). Ze względu na ograniczoną objętość artykułu uproszczono w modelu podsystem transportu i uwzględniono jedynie czas transportu międzystanowiskowego.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu wytwarzania

Fig. 2. Block diagram of the manufacturing system

Po obróbce na stanowisku pierwszym przedmioty są transportowane na stanowisko drugie (O2), z którego po zakończeniu obróbki są transportowane do magazynu wyjściowego (M2). Każde stanowisko obróbki jest obsługiwane przez jednego operatora (Ci), który zajmuje się załadunkiem i rozładunkiem obrabiarek oraz uruchamianiem odpowiedniego programu obróbki.

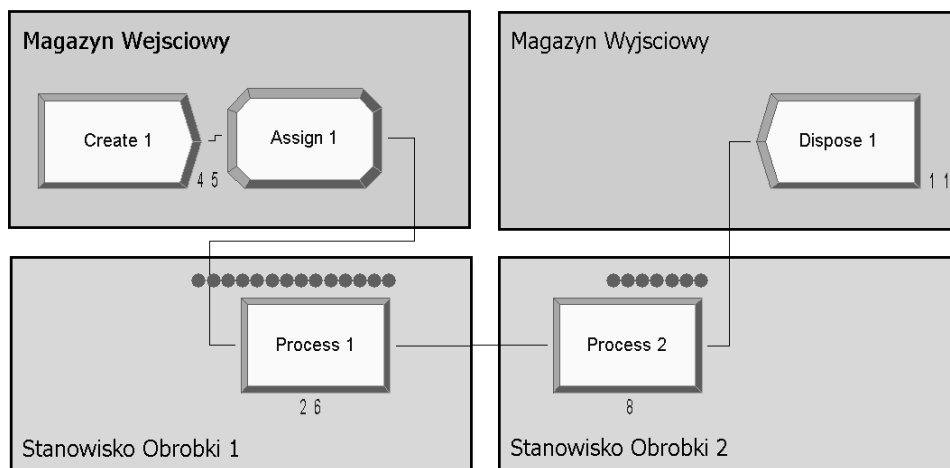
4.2. Wstępny model systemu wytwarzania

Na pozór może się wydawać, że zbudowanie modelu symulacyjnego tak prostego systemu wytwarzania jest bardzo łatwe. Aby to pokazać, wykorzystując program Arena, zbudowano z użyciem bloków funkcjonalnych prosty model (rys. 3). Blok *Create 1* jest odpowiedzialny za generowanie przedmiotów (jednostek) i wraz z modulem *Assign 1*, definiującym czas obróbki przedmiotów, tworzy model magazynu wejściowego. Pierwsze stanowisko obróbki zostało zamodelowane za pomocą bloku *Process 1*. Drugie w podobny sposób. Magazyn wyjściowy jest zamodelowany blokiem *Dispose 1*. Blok ten jedynie usuwa przedmioty z modelu symulacyjnego.

Na rysunku 4 przedstawiono szczegółowe parametry wybranych bloków funkcjonalnych. W bloku *Process* zdefiniowano zajęcie zasobu *Obrabiarka 1*, opóźnienie przejścia przedmiotu o czas obróbki *czas 1* i zwolnienie *Obrabiarki 1* po zakończeniu procesu. Pominięto chwilowo czynności wykonywane przez *Operatora*.

Czas trwania symulacji ustalono na 8 godzin i uruchomiono symulację. Na rys. 3 przedstawiono wybrany moment symulacji. Widoczne czarne kółka reprezentują przedmioty oczekujące na obróbkę na poszczególnych stanowiskach. Symulacja dobiegła końca, ale opracowany model nie jest poprawny i wyniki symulacji są błędne. W modelu nie uwzględniono jednej bardzo ważnej cechy rzeczywistych systemów wytwarzania, tzn. ograniczonej miejsca w przestrzeni. Na rzeczywistej obrabiarence w jednej chwili nie może znaleźć się więcej przedmiotów niż to zostało konstrukcyjnie przewidziane. Jeżeli w danym momencie na obrabiarence może znajdować się np. tylko jeden przedmiot, to we wszystkich blokach modelujących taką obrabiarkę, w każdej chwili symulacji, też może być tylko jeden przedmiot. Inaczej model nie będzie poprawnie odzwierciedlał zachowania się obiektu.

Innymi słowy, nie może być tak, że z magazynu jest transportowany przedmiot na *Stanowisko obróbki 1*, mimo, że jest ono zajęte. Takie działanie doprowadziłoby w rzeczywistości do kolizji i zniszczenia obrabiarki. Aby poprawić działanie modelu dokonano jego przebudowy (rys. 5). Bloki funkcjonalne *Process* zastąpiono trzema blokami podstawowymi: *Seize*, *Delay* i *Release*.



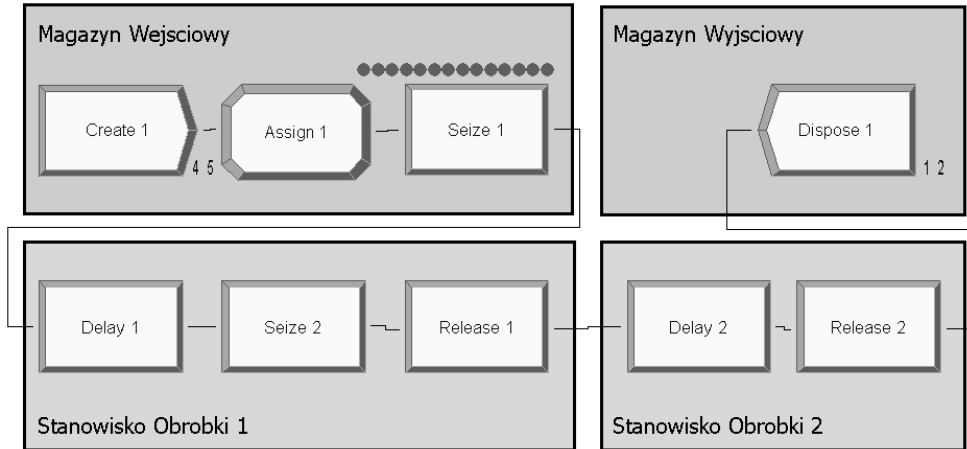
Rys. 3. Wstępny model systemu wytwarzania
Fig. 3. The initial model of manufacturing system

Rys. 4. Parametry bloków funkcjonalnych
Fig. 4. Functional block parameters

Przedmioty w bloku *Seize 1*, umieszczonym w obszarze magazynu, oczekują na zajęcie obrabiarki 1. Dopiero po jej zajęciu są na nią transportowane. Blok *Delay 1* opóźnia przejście przedmiotu o czas obróbki. W bloku *Seize 2* jest zajmowana obrabiarka 2 i dopiero po jej zajęciu przedmiot w bloku *Release 1* zwalnia obrabiarkę 1 i przechodzi na stanowisko obróbki 2. W podobny sposób zmodyfikowano model w obszarze stanowiska obróbki 2. Po

uruchomieniu symulacji kolejka przedmiotów gromadziła się jedynie w obszarze magazynu wejściowego (rys. 5). Niestety, ale tak zmodyfikowany model nie jest poprawny. Zajęcie zasobu przed rozpoczęciem przemieszczenia się na niego prowadzi do błędnych wyników. W takim rozwiązaniu czas transportu będzie wliczany do czasu pracy danego zasobu, co zafałszuje wyniki symulacji.

Jak widać proste rozwiązania nie zawsze są poprawne. Dlatego w kolejnym podpunkcie zaproponowano metodę analizy funkcjonalnej systemów wytwarzania, która ułatwia poprawne budowanie modeli symulacyjnych.



Rys. 5. Rozbudowany model system wytwarzania

Fig. 5. Extended model of manufacturing system

4.3. Analiza funkcjonalna systemu wytwarzania

Dla lepszego zilustrowania metody przyjęto, że w obrębie każdego stanowiska obróbki występują bufory wejściowe (**Bi1**) i wyjściowe (**Bi2**). Wprowadzenie buforów pozwala na lepsze wykorzystanie obrabiarek ze względu na transport międzystanowiskowy. Ponadto czynności załadunku i rozładunku są realizowane przez dwóch operatorów (**C1**, **C2**). Zwiększa to liczbę zasobów w systemie wytwarzania.

W proponowanej metodzie wszystkie zasoby systemu wytwarzania tworzą zbiór zasobów **Z**. Dla rozpatrywanego systemu wytwarzania z rysunku 2 elementy zbioru zasobów są następujące $Z = \{M1, B11, C1, O1, C1, B12, B21, C2, O2, C2, B22, M2\}$. Wszystkie obrabiane w systemie przedmioty tworzą zbiór przedmiotów **P**. W rozpatrywanym przykładzie zbiór przedmiotów jest jednoelementowy $P = \{P1\}$.

Dla każdego elementu ze zbioru **P** należy utworzyć tabelę przepływu przedmiotów **T** (tabela 1). Wymiar tabeli $n \times n$ jest równy liczbie elementów zbioru **Z**. Nazwy kolumn i nazwy wierszy odpowiadają nazwom obiektów zbioru **Z**. W tabeli tej wypełniamy te pola, które leżą na przecięciu kolumny i wiersza o nazwach odpowiadających zasobom, pomiędzy którymi występuje transport danego przedmiotu. W rozpatrywanym przypadku jest to przedmiot

P1. Wpisywana wartość powinna odpowiadać maksymalnej liczbie przedmiotów, jaka może znajdować się w zasobie docelowym. W opisywanym przykładzie, w pierwszym wierszu **M1** tabeli **T**, wpisano wartość „1” na przecięciu z kolumną **B11**. Oznacza to, że podczas transportowania przedmiotu **P1** z magazynu **M1** do bufora **B11** może trafić tylko jeden przedmiot. Innymi słowy w buforze **B11** jest tylko jedno miejsce na jeden przedmiot.

Podobna zależność występuje dla pozostałych zasobów. Posiadają one miejsce tylko na jeden przedmiot. Dla bufora **B22** wpisano w kolumnie **M2** znak „X”, ponieważ przyjęto założenie, że magazyn **M2**, jako wyjście dla obrobionych przedmiotów, nie ma ograniczonej liczby miejsc. Dla systemów bardziej złożonych układ wartości w tabeli będzie bardziej zróżnicowany.

Tabela 1

Tabela przepływu dla przedmiotu

P1	do	M1	B11	C1	O1	B12	B21	C2	O2	B22	M2
z											
M1			1								
B11				1							
C1					1	1					
O1				1							
B12							1				
B21								1			
C2									1	1	
O2								1			
B22											X
M2											

W przypadku ogólnym wartości w polach powinny odpowiadać liczbie miejsc na zasobach systemu rzeczywistego. Tabele przepływu należy utworzyć dla wszystkich elementów zbioru **P**. Przygotowanie tych tabel jest konieczne przed rozpoczęciem budowania modelu systemu wytwarzania. Bloki funkcjonalne, z których jest budowany model w środowisku Arena powinny być pogrupowane i odpowiadać elementom ze zbioru **Z**. Ze względu na specyfikę i różnorodność obiektów, jakie wchodzi w skład systemów wytwarzania, liczba bloków funkcjonalnych wykorzystana do modelowania tych obiektów może być różna. W związku z tym, w budowanym modelu systemu należy zaimplementować warunki, które będą sprawdzać przed rozpoczęciem czynności transportowej, czy miejsce docelowe jest wolne. W praktyce sprowadza się to do zliczenia wszystkich przedmiotów (jednostek), które występują w blokach modelujących dany zasób systemu. Aby czynność transportowa mogła być rozpoczęta, liczba tych jednostek musi być mniejsza od wartości w tabeli **T**. Opisana powyżej metoda analizy funkcjonalnej została wykorzystana do zbudowania poprawnego modelu systemu wytwarzania.

4.4. Poprawny model symulacyjny systemu wytwarzania

Na rysunku 6 przedstawiono rozbudowany model systemu wytwarzania. Stanowiska obróbkowe zostały rozbudowane o bufory wejściowe i wyjściowe. Załadunek i rozładunek obrabiarek jest realizowany przez operatorów. Aby zamodelowany system wytwarzania mógł zostać poddany optymalizacji, wprowadzono do modelu informacje o kosztach, jakie generują wszystkie zasoby podczas pracy i podczas postoju. Z każdego wyprodukowanego przedmiotu zliczany jest zysk brutto. Na zakończenie każdej symulacji, w grupie bloków *Kalkulacja kosztów*, obliczany jest zysk netto będący różnicą zysku brutto i kosztów generowanych przez wszystkie zasoby.

Do modelu wprowadzono zmienne, które zawierają informacje o liczbie przedmiotów znajdujących się na poszczególnych zasobach systemu. W grupie bloków *Parametry początkowe* wartości tych zmiennych są ustawiane na początku symulacji w oparciu o liczbę zasobów każdego typu zdefiniowanych w modelu.

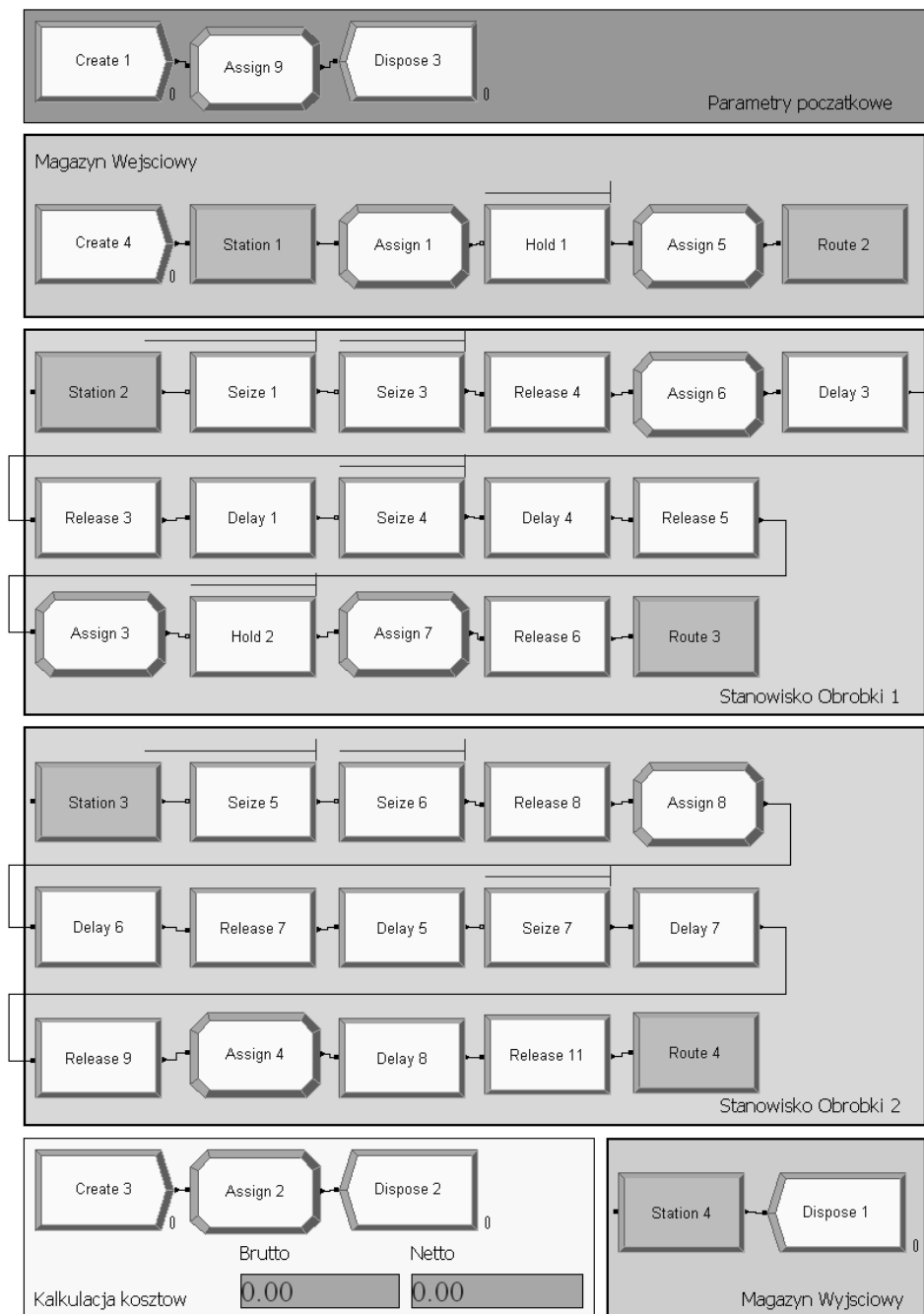
4.5. Weryfikacja poprawności modelu

Rozbudowany model symulacyjny systemu wytwarzania został poddany sprawdzeniu poprawności działania. W tym celu przeprowadzono wiele symulacji z różnym ustawieniem wartości parametrów. Na podstawie analizy przebiegu symulacji i raportów generowanych po zakończeniu każdej symulacji stwierdzono poprawne działanie modelu. Na rys. 7 pokazano liczbę zaharmonogramowanych zasobów w przykładowej symulacji. Na rys. 8 pokazano współczynniki wykorzystania poszczególnych zasobów systemu po 8 godzinach pracy. W trakcie tej symulacji z magazynu wejściowego zostało wydanych do obróbki 481 przedmiotów. Obrobionych w ciągu 8 godzin pracy systemu zostało tylko 130. Wynika z tego, że konieczna jest reorganizacja systemu w celu poprawienia jego wydajności. Zatem celem jest poprawienie wydajności oraz maksymalizacja zysku netto. Można to osiągnąć przez odpowiednie dobranie liczby poszczególnych zasobów.

5. Optymalizacja systemu wytwarzania

Po zbudowaniu modelu systemu wytwarzania i po zweryfikowaniu poprawności jego działania poprzez eksperymenty symulacyjne można przystąpić do jego optymalizacji. Do tego celu wykorzystano program OptQuest. Aby przeprowadzić optymalizację, konieczne jest zdefiniowanie i ustalenie wartości wielu parametrów mających wpływ na przebieg procesu optymalizacji, a przede wszystkim funkcji celu. W opisywanym przykładzie celem optymalizacji będzie maksymalizacja zysku netto generowanego przez system wytwarzania podczas realizacji zadanego procesu wytwórczego.

W pierwszej kolejności należy zdefiniować zmienne decyzyjne, które mają wpływ na wartość funkcji celu. Wartości tych zmiennych będą ustalane przed kolejnymi symulacjami, co pozwoli na sprawdzenie ich wpływu na funkcję celu, a tym samym umożliwi znalezienie najlepszego rozwiązania. Program OptQuest dopuszcza dwa rodzaje zmiennych decyzyjnych: zasoby i zmienne. W rozpatrywanym przykładzie zmiennymi decyzyjnymi są zasoby zdefiniowane w modelu symulacyjnym, czyli *bufory*, *obrabiarki* i *operatorzy* (rys. 9).



Rys. 6. Poprawny model symulacyjny systemu wytwarzania

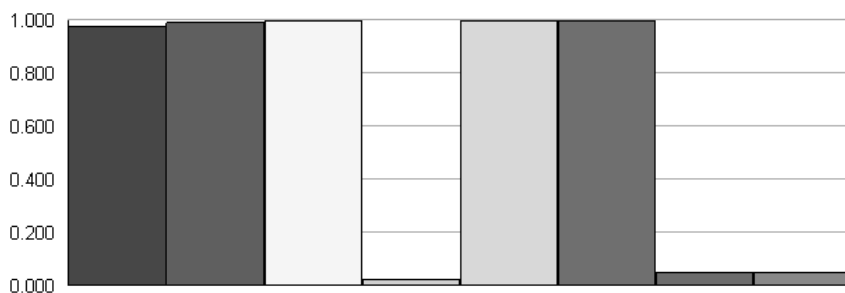
Fig. 6. Correct simulation model of manufacturing system

Number Scheduled	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Bufor 11	2.0000	(Insufficient)	2.0000	2.0000
Bufor 12	2.0000	(Insufficient)	2.0000	2.0000
Bufor 21	2.0000	(Insufficient)	2.0000	2.0000
Bufor 22	2.0000	(Insufficient)	2.0000	2.0000
Obrabiarka 1	3.0000	(Insufficient)	3.0000	3.0000
Obrabiarka 2	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Operator 1	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Operator 2	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000

Rys. 7. Liczba zaharmonogramowanych zasobów

Fig. 7. Number of scheduled resources

Scheduled Utilization	Value
Bufor 11	0.9700
Bufor 12	0.9866
Bufor 21	0.9916
Bufor 22	0.01792152
Obrabiarka 1	0.9955
Obrabiarka 2	0.9948
Operator 1	0.04728949
Operator 2	0.04543713



Rys. 8. Wykorzystanie zasobów

Fig. 8. Resources utilization

5.1. Definiowanie zmiennych sterujących

Oprócz wybrania odpowiednich zasobów, należy określić zakres, w jakim może zmieniać się ich liczba podczas kolejnych symulacji. W tym celu definiowana jest dolna i górna granica zakresu oraz sugerowana wartość początkowa.

W rezultacie optymalizacji zostaną określone wartości każdej zmiennej decyzyjnej, przy których zostanie osiągnięte najlepsze rozwiązanie ze względu na przyjętą funkcję celu.

5.2. Definiowanie zmiennych wyjściowych

Kolejnym krokiem przygotowania modelu do optymalizacji jest określenie zmiennych wyjściowych, które będą wykorzystane w funkcji celu (rys. 10). W omawianym przykładzie jest to zmienna wyjściowa *ZyskNetto*.

Resources Summary								
Included	Control /	Element Type	Type	Low B	Sugge	High	Step	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	Bufor 11	Resource	Discrete	1	2	3	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Bufor 12	Resource	Discrete	1	2	3	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Bufor 21	Resource	Discrete	1	2	3	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Bufor 22	Resource	Discrete	1	2	3	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Obrabiarka 1	Resource	Discrete	1	3	5	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Obrabiarka 2	Resource	Discrete	1	3	5	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Operator 1	Resource	Discrete	1	1	2	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Operator 2	Resource	Discrete	1	1	2	1	

Rys. 9. Definiowanie zmiennych decyzyjnych procesu optymalizacji

Fig. 9. Defining the decision variables in the optimization process

Variable Summary		
Included	Respon /	Response Type
<input type="checkbox"/>	vBufor11	Variable Value
<input type="checkbox"/>	vBufor21	Variable Value
<input type="checkbox"/>	ZyskBrutto	Variable Value
<input checked="" type="checkbox"/>	ZyskNetto	Variable Value

Rys. 10. Definiowanie zmiennych wyjściowych

Fig. 10. Defining output variables

5.3. Definiowanie ograniczeń

Po zdefiniowaniu zmiennych decyzyjnych i zmiennych wyjściowych można, a w zasadzie należy, zdefiniować ograniczenia nakładane na proces optymalizacji. Ponieważ przedmiotem optymalizacji jest system wytwarzania, to jednym z takich ograniczeń może być miejsce dla niego przeznaczone w hali produkcyjnej. Konsekwencją tego ograniczenia może być określona maksymalna liczba wszystkich obrabiarek, z których taki system może się składać. W omawianym przykładzie liczba obrabiarek każdego typu może zawierać się w zakresie od 1 do 5. Ponieważ występują dwa typy, to daje nam w sumie maksymalną liczbę obrabiarek równą 10. W rozpatrywanym przykładzie założono występowanie ograniczenia powierzchni i przyjęto dopuszczalną liczbę wszystkich obrabiarek na poziomie 8 sztuk, rys. 11.

5.4. Definiowanie funkcji celu i parametrów optymalizacji

Zdefiniowane uprzednio zmienne wyjściowe, w naszym przykładzie tylko jedna – *ZyskNetto*, są wykorzystywane do zbudowania funkcji celu. Jak już wspomniano, celem optymalizacji jest takie dobranie liczby poszczególnych zasobów, aby zmaksymalizować zysk netto. Na rys. 12 pokazano funkcję celu, która odpowiada temu założeniu.

Constraints Summary				
Included	Name	Type	Description	Expression
<input checked="" type="checkbox"/>	New Constraint	Linear		[Obrabiarka 1] + [Obrabiarka 2] <= 8

Rys. 11. Definiowanie ograniczeń

Fig. 11. Defining constraints

Objectives Summary					
Select	Name	Linear	Goal	Description	Expression
<input checked="" type="checkbox"/>	New Objective	NonLinear	Maximize		[ZyskNetto]

Rys. 12. Definiowanie funkcji celu

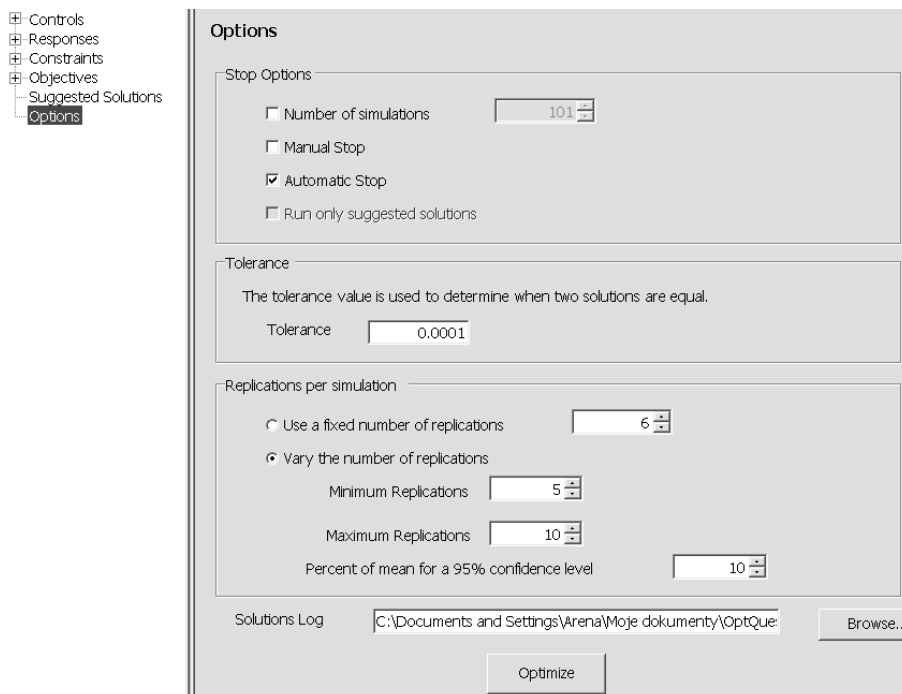
Fig. 12. Defining the objective function

Ostatnim etapem przygotowania modelu do optymalizacji jest ustawienie parametrów decydujących o przebiegu procesu optymalizacji (rys. 13). Pierwszym parametrem jest warunek zatrzymania poszukiwania kolejnych rozwiązań. Można wybrać jedną z trzech opcji: ustawienie konkretnej liczby symulacji, zatrzymanie ręczne lub automatyczne. Kolejny parametr określa wartość tolerancji, z jaką wyniki kolejnych symulacji są uznawane za takie same. Ostatnim ważnym parametrem jest określenie liczby powtórzeń dla każdej symulacji. Jest to istotne wtedy, gdy w modelu występują zmienne o charakterze stochastycznym. Po ustawieniu powyższych parametrów można rozpocząć proces optymalizacji.

Podczas optymalizacji program OptQuest dobiera wg wbudowanego algorytmu wartości zmiennych decyzyjnych i wykonuje kolejne symulacje. Po zakończeniu każdej symulacji rejestrowana jest wartość funkcji celu i dobierane są ponownie wartości zmiennych decyzyjnych dla kolejnej symulacji. Proces optymalizacji jest kontynuowany aż do spełnienia jednego z warunków jego zakończenia (rys. 14).

5.5. Optymalizacja systemu wytwarzania i analiza wyników

W efekcie przeprowadzonego procesu optymalizacji przykładowego systemu wytwarzania zostały ustalone wartości zmiennych sterujących, przy których zmienna wyjściowa *ZyskNetto* przyjmuje wartość maksymalną. Zgodnie z wynikami w systemie powinny być trzy obrabiarki typu 1 i cztery typu 2. Pozostałe zasoby powinny występować po jednej sztuce.

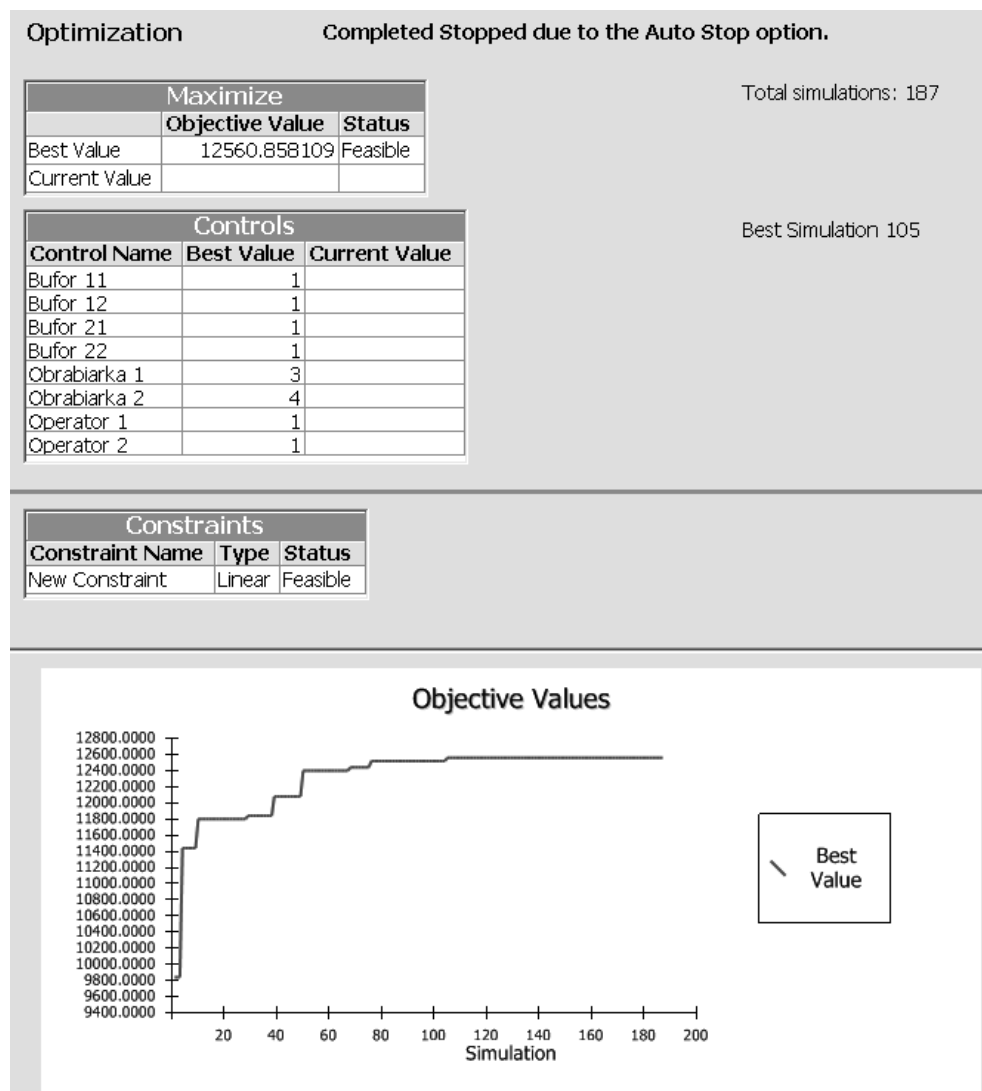


Rys. 13. Definiowanie parametrów symulacji

Fig. 13. Defining the parameters of the simulation

Należy jednak pamiętać, że rozwiązanie to może być najlepszym, czyli optymalnym, ale nie ma pewności, że takim jest. Zostało ono znalezione poprzez przeanalizowanie wyników skończonej liczby symulacji. W ten sposób zostały sprawdzone różne konfiguracje wartości zmiennych decyzyjnych, ale na ogół nie wszystkie. Problem narasta wraz ze wzrostem liczby zmiennych decyzyjnych i wzrostem ich zakresu zmienności. Dlatego należy zawsze z dużą ostrożnością podchodzić do oceny wyników optymalizacji. Mimo to, możemy z całą pewnością powiedzieć, że mamy znalezione najlepsze rozwiązanie ze 187 różnych możliwych. Możemy zatem przyjąć z pewnym przybliżeniem, że przy zadanej liczbie przedmiotów wysyłanych z magazynu do obróbki taka konfiguracja systemu wytwarzania da nam największy zysk netto.

Dla dokładniejszego przeanalizowania zaproponowanego rozwiązania dokonano ponownej symulacji modelu systemu wytwarzania, po uprzednim wprowadzeniu liczebności zasobów zgodnie z wynikami optymalizacji. W wyniku symulacji po 8 godzinach pracy systemu obrobiono 474 przedmioty na 481 przygotowanych do obróbki. Kilka przedmiotów pozostało w systemie (produkcja w toku). Na rys. 15 przedstawiono wartości współczynnika wykorzystania poszczególnych zasobów. Wykorzystanie obrabiarek, najdroższych w eksploatacji zasobów, jest na poziomie 82% i 91%. Znacznie gorzej jest z operatorami. Wykorzystanie na poziomie 16% jest niezadowalające. Być może należy rozważyć obsługę wszystkich obrabiarek przez jednego operatora. Podobnie jest z buforami. Bufory wejściowe wydają się być niepotrzebne.

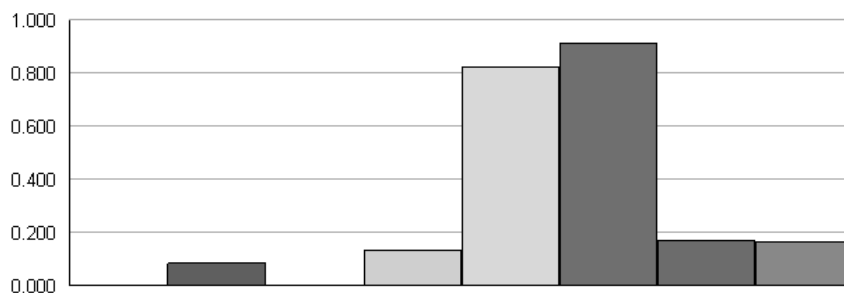


Rys. 14. Poszukiwanie optymalnego rozwiązania

Fig. 14. The search for the optimal solution

Największe straty są ponoszone ze względu na niedociążonych operatorów. Analiza wyników symulacji może, a nawet powinna, być pomocna przy modyfikowaniu struktury systemu wytwarzania tak, aby opracować możliwie najlepsze rozwiązanie.

Scheduled Utilization	Value	
Bufor 11	0.00	
Bufor 12	0.08306878	■ Bufor 11
Bufor 21	0.00	■ Bufor 12
Bufor 22	0.1317	□ Bufor 21
Obrabiarka 1	0.8206	□ Bufor 22
Obrabiarka 2	0.9092	□ Obrabiarka 1
Operator 1	0.1659	■ Obrabiarka 2
Operator 2	0.1647	■ Operator 1
		■ Operator 2



Rys. 15. Wykorzystanie zasobów

Fig. 15. The resource utilization

Zaprojektowanie odpowiedniego systemu wytwarzania może się składać z szeregu optymalizacji różnych wariantów konfiguracyjnych. W przypadku bardzo rozbudowanych modeli może być to proces długotrwały.

6. Wnioski

Zastosowanie metod symulacji komputerowej w różnych obszarach gospodarki może przynieść bardzo duże korzyści materialne. Jest to jednak uwarunkowane poprawnym zbudowaniem modeli i właściwym przeprowadzeniem eksperymentów symulacyjnych. Konieczna jest bardzo dobra znajomość narzędzi oraz dokładna i trafna analiza działania modelowanego obiektu lub systemu.

Zaproponowana w artykule metoda analizy funkcjonalnej systemów wytwarzania pozwala na odpowiednie usystematyzowanie informacji o systemie i ułatwia budowanie modelu. Dzięki jej zastosowaniu, w dość łatwy sposób można uniknąć wielu błędów w modelowaniu, które prowadzą do zafałszowania wyników. Mimo to wymagane jest bardzo duże doświadczenie projektanta modelu. Jest to szczególnie ważne na etapie weryfikacji poprawności działania modelu symulacyjnego.

Przeprowadzenie optymalizacji jest również procesem złożonym. Należy pamiętać o ograniczonej liczbie wariantów, które są poddawane symulacji. Uzyskane w ten sposób rozwiązanie może być zbliżone do najlepszego, ale nigdy nie mamy pewności, że jest optymalne.

Mimo wielu trudności i niedoskonałości, poszukiwanie optymalnych rozwiązań na drodze symulacji komputerowej bardzo często jest jedyną metodą, którą można zastosować. Z tego względu daje się ostatnio zauważyć intensywny rozwój możliwości funkcjonalnych narzędzi do modelowania, symulacji i optymalizacji procesów dyskretnych.

Literatura

- [1] Ekren B.Y., Heragu S.S., *Simulation based regression analysis for rack configuration of autonomous vehicle storage and retrieval system*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 2405-2413.
- [2] Ichikawa H., *Simulating an applied model to optimize cell production and parts supply (mizusumashi) for laptop assembly*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 2272-2280.
- [3] Liu Y., Takakuwa S., *Simulation-based personnel planning for materials handling at a cross-docking center under retail distribution environment*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 2414-2425.
- [4] Krenich S., *Optymalna alokacja obiektów z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych*, Logistyka, 3, Radom 2011, 1365-1375.
- [5] Krenich S., *Pewne metody hybrydowe w jednokryterialnej optymalizacji konstrukcji*, Czasopismo Techniczne, 4-M/2011/B, z. 7, 2011, 255-262.
- [6] Małopolski W., *Prototyp elastycznego modelu symulacyjnego systemu wytwarzania w języku SIMAN*, CEEPUS Research Reports, SOP'2008 CA Systems And Technologies, Cracow, Poland, 2008, 257-264.
- [7] Schmitt A. J., Singh M., *Quantifying supply chain disruption risk using monte carlo and discrete-event simulation*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 1247-1248.
- [8] Takakuwa S., Wijewickrama A., *Optimizing staffing schedule in light of patient satisfaction for the whole outpatient hospital ward*, Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 1500-1508.
- [9] Wynter S.A., Ivy J.E., *Simulating public health emergency response: a case study of the 2004 north carolina state fair e.coli outbreak*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 1957-1968.
- [10] Zdanowicz R., Świder J., *Modelowanie i symulacja systemów produkcyjnych w programie Enterprise Dynamics*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [11] http://www.arenasimulation.com/Solutions_Manufacturing.aspx.