

ZASTOSOWANIE TEORII GIER W PLANOWANIU PRODUKCJI Z WYKORZYSTANIEM ZAAWANSOWANYCH SYSTEMÓW SYMULACYJNYCH

1. Wprowadzenie

Zmieniające się gusta klientów i ich oczekiwania, postęp technologiczny, nowe technologie oraz zachowania konkurentów są wyznacznikami działań dla przedsiębiorstw, które muszą dynamicznie reagować na to, co dzieje się na rynku. Wprowadzenie nowego produktu bądź ulepszenie już istniejącego wiąże się z wieloma zmianami nie tylko na płaszczyznach zasobów ludzkich czy kapitału, ale i na płaszczyźnie związanej z organizacyjnym przygotowaniem samego procesu wytwarzania. Nowoczesne przedsiębiorstwo musi być na tyle elastyczne, aby mogło skutecznie podejmować działania dostosowujące swoje systemy produkcyjne do wytwarzania wielu wariantów produktów w zmiennych partiach produkcyjnych. Wymagane jest zatem wprowadzanie innowacyjnych i inteligentnych technologii oraz zmian w strukturze organizacyjnej, w celu zwiększenia elastyczności w dostosowywaniu posiadanego parku maszynowego do wpływających zleceń produkcyjnych. Odpowiedni dobór zasobów produkcyjnych dla wymaganych operacji produkcyjnych wraz z analizą możliwych do realizacji marszrut alternatywnych, zapewnić może z jednej strony zrównoważone wykorzystanie dostępnych zasobów, z drugiej zaś wygenerowanie jak najlepszego wyniku finansowego. Problemy te związane są ściśle z możliwością realizacji koncepcji przedsiębiorstw wirtualnych (*Virtual Enterprise* – VE), dla których dostępne zasoby produkcyjne są rozproszone w wielu organizacjach. Osiągnięcie zakładanych wskaźników produkcyjnych (poziom wykorzystania zasobów, koszty produkcji, terminy realizacji zleceń itd.) zależą zatem od poziomu sprawnej synchronizacji działań dla różnych dostępnych zasobów, przydzielanych już na etapie planowania. Podobne podejście wykorzystywane jest w najnowszych koncepcjach dynamicznych sieci produkcyjnych (*Dynamic Manufacturing Network* – DMN) [11], których celem jest wzajemna współpraca w udostępnianiu łańcucha wartości do prowadzenia wspólnej produkcji, poprzez stałą lub czasową kooperację obejmującą systemy produkcyjne geograficznie rozproszonych małych i średnich przedsiębiorstw.

Rozpatrywane w tym artykule problemy, występujące w obszarze planowania i sterowania produkcją związane są z wyborem z dostępnego zbioru marszrut alternatywnych, marszruty do realizacji w systemie, a więc związane z przydziałem odpowiednich zasobów produkcyjnych do realizacji określonych w planie zleceń produkcyjnych. Problemy te na poziomie operacyjnym zaliczane są do klasy zadań o dużej złożoności kombinatorycznej. Ich złożoność rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem liczby zasobów alternatywnych i zleceń produkcyjnych, wynikających z programu

produkcyjnego. Poszukiwanie rozwiązań optymalnych w rozpatrywanym obszarze należy do klasy problemów NP-trudnych. Z tego względu w procesie wspomaganego podejmowania decyzji często są stosowane metody heurystyczne lub analityczne, w których świadomie odchodzi się od poszukiwania rozwiązań optymalnych na rzecz wyznaczenia rozwiązania dopuszczalnego lub zbioru rozwiązań spełniających założone ograniczenia, bez wskazania rozwiązania optymalnego. Prowadzone badania naukowe w tym obszarze związane są: z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych, poszukiwaniem rozwiązań dopuszczalnych, uzyskanych metodami analitycznymi lub heurystycznymi, metodami wykorzystującymi systemy eksperckie, sieciami neuronowymi, algorytmami genetycznymi czy immunologicznymi [1, 15]. W omawianym obszarze coraz częściej stosowane są także metody wykorzystujące zaawansowane narzędzia komputerowego modelowania i symulacji dyskretnej. Obserwowany rozwój technik wspomaganego komputerowego [5, 8, 12], dzięki którym możliwe stało się przygotowywanie oraz analizowanie coraz bardziej złożonych modeli, wpływa na zwiększanie popularności dyskretnych systemów symulacyjnych. To z kolei spowodowało, iż stosowanie narzędzi symulacyjnych i wizualizacyjnych staje się skutecznym narzędziem weryfikacyjnym i analitycznym do wspomaganego procesu podejmowania decyzji na poziomie operacyjnym planowania produkcji. Do tej pory wykorzystywanie dyskretnych systemów symulacyjnych było ograniczone głównie do analizy i weryfikacji koncepcji przepływu produkcji, reguł sterowania czy ergonomii w nowo projektowanych zakładach produkcyjnych, a więc problemów należących do poziomów taktycznego oraz strategicznego.

Kolejnym podejściem, które jest szeroko wykorzystywane w obszarach związanych ze wspomaganym podejmowaniem decyzji jest teoria gier, której podstawą jest teoria sytuacji strategicznych. Jest to dziedzina matematyki zajmująca się rozwiązywaniem problemów optymalizacji interaktywnych. Teoria gier składa się z serii strategii, które są stosowane w różnych sytuacjach. Klasyczne podejście związane było z zastosowaniem teorii gier w ekonomii, a jej rozwój zaowocował stworzeniem koncepcji równowagi (Nash), gier z niekompletną informacją (Kuhn) i gier kooperacyjnych (Aumann, Shubika). Modele teorii gier są wysoce abstrakcyjnymi reprezentantami klas rzeczywistych sytuacji, co pozwala na zastosowanie ich do badania w bardzo szerokim zakresie zjawisk [2]. Modele te stosowane są np. w ekonomii jako narzędzie do badania sposobu funkcjonowania firm na rynku, rozwiązywania problemów strategicznych związanych z podejmowaniem decyzji o wyborze partnerów rynkowych, strategiach konkurencyjnych, a ostatnio

także do wspomagania rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich w obszarach komunikacji, sieci, systemów zasilania czy współpracy przy projektowaniu produktu [10]. Teoria gier znalazła także szerokie zastosowanie w biologii, socjologii, naukach politycznych oraz w informatyce. Najczęściej stosowanymi strategiami w teorii gier to strategia Pareto, strategia Nasha oraz strategia Stackelberga. Strategia Pareto jest rozwiązaniem wykorzystywanym do współpracy pomiędzy dwoma agentami. W strategii Nasha, każdy gracz musi wykonać szereg decyzji, które są racjonalne dla niego, zakładając reakcję innego gracza. Strategia Stackelberga jest rozwiązaniem typu przywódca-zwolennik, które dobrze sprawdza się w sytuacji, w której jeden gracz dominuje nad drugim w procesie podejmowania decyzji. Ze względu na swoje korzenie narzędzia teorii gier wykorzystywane były głównie w obszarze planowania produkcji na poziomach planowania strategicznego i taktycznego w procesach podejmowania decyzji związanych m.in. z wyborem dostawców i partnerów strategicznych, poszukiwaniem strategii biznesowych w odpowiedzi na zachowania innych graczy rynkowych, zarządzaniem łańcuchem dostaw itp. [2, 4, 6, 10].

Ostatnio, ze względu na stosunkowo prosty aparat matematyczny oraz mnogość istniejących modeli i strategii wspomagających podejmowanie decyzji oraz jej uniwersalność, obserwuje się rosnące zainteresowanie naukowców wykorzystaniem teorii gier w obszarze planowania, sterowania i harmonogramowania produkcji na poziomie operacyjnym. W tym przypadku pojęcie gracza zastępowane jest pojęciem agenta lub obiektu, który reprezentuje (nie jednostkę lub osobę jak to ma miejsce w podejściu klasycznym) dane zlecenie produkcyjne, proces produkcyjny lub pakiet zleceń (lub odpowiadającego im gracza rynkowego – zleceniodawcę). Narzędzia wykorzystujące modele i strategie zaczerpnięte z teorii gier w tym obszarze, proponowane przez badaczy, wykorzystywane są niezależnie lub jako uzupełnienie już stosowanych metod, m.in. metod sztucznej inteligencji [2, 10, 11, 14, 16, 17]. W tym artykule przedstawiona została koncepcja wykorzystania modeli

teorii gier wspomagana zaawansowanymi systemami symulacyjnymi do rozwiązywania problemu wyboru marszrut z dostępnych marszrut alternatywnych w systemach produkcji wieloasortymentowej z zasobami współdzielonymi. W kolejnych rozdziałach przedstawiono szczegółowo rozpatrywany problem oraz sformułowano model systemu produkcyjnego oraz model sytuacji decyzyjnej. Przedstawiono również modele symulacyjne i przeprowadzone eksperymenty oraz sformułowano wnioski końcowe.

2. Zastosowanie teorii gier w planowaniu produkcji

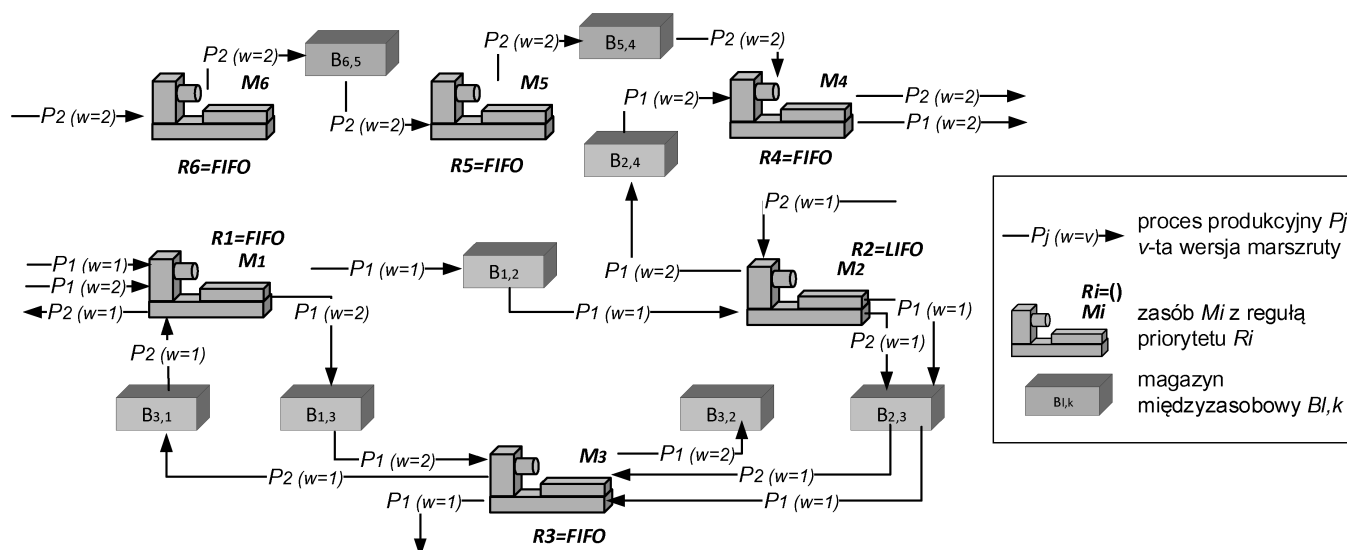
2.1. Sformułowanie problemu

Rozważany jest problem planowania przepływu produkcji w systemach należących do klasy współbieżnych dyskretnych procesów produkcyjnych [3, 7, 9, 13]. W rozważanej klasie systemów produkcyjnych, na współdzielonych zasobach produkcyjnych M_i współbieżnie realizowane są w trybie wzajemnego wykluczania procesy dyskretnie P_j . Realizacja operacji na zasobach prowadzona jest w trybie wzajemnego wykluczania. Sekwencje operacji technologicznych procesów realizowanych na zasobach współdzielonych regulują reguły priorytetu R_j , przydzielane na etapie planowania dla każdego zasobu (rys. 1). Każdy proces produkcyjny realizowany może być w oparciu o jedną z marszrut wybraną ze zbioru marszrut alternatywnych. Marszruty mogą przebiegać przez dowolne zasoby bez nawrotów. Dla każdego zasobu zdefiniowany jest koszt jednostkowy związany z udziałem tego zasobu w realizacji operacji technologicznej. Formalnie system współbieżnych procesów definiowany jest jako:

$$S = (M, CPP, B, R), \tag{1}$$

gdzie:

- $M = \{M_i\}, i = 1, 2, \dots, m$ – zbiór zasobów produkcyjnych,
- $C = [c_p, c_2, \dots, c_m]$ – wektor kosztów zasobów produkcyjnych,
- $PP = (P, MP, N)$ – struktura procesów produkcyjnych,



Rys. 1. System współbieżnych dyskretnych procesów produkcyjnych

gdzie:

$P = \{P_j\}, j = 1, 2, \dots, n$ – zbiór procesów produkcyjnych,
 $MP = \{MP_j^w\}, j = 1, 2, \dots, n; w = 1, 2, \dots, v_j$ – zbiór macierzy procesów produkcyjnych, n – liczba procesów produkcyjnych, v_j – liczba wersji marszrut j -tego procesu produkcyjnego:

$$MP_j^w = \begin{bmatrix} mp_{11} & mp_{12} & \dots & mp_{1h} & \dots & mp_{1H_j^w} \\ mp_{21} & mp_{22} & \dots & mp_{2h} & \dots & mp_{2H_j^w} \\ mp_{31} & mp_{32} & \dots & mp_{3h} & \dots & mp_{3H_j^w} \end{bmatrix},$$

macierz w -tej marszrut j -tego procesu, gdzie:

h – numer kolejny operacji (zgodnie z kolejnością operacji określonych przez marszrutę),

H_j^w – liczba operacji w w -tej marszrucie j -tego procesu,

mp_{1h} – nr zasobu, na którym realizowana jest h -ta operacja,

mp_{2h} – czas jednostkowy h -tej operacji,

mp_{3h} – czas przygotowawczo-zakończeniowy h -tej operacji.

N_j – wielkości serii produkcyjnych zlecenia j -tego,

$B = \{B_l, k\}, l = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, m; m = k$ – zbiór magazynów międzypasobowych przydzielonych do zasobów sąsiadujących (M_l, M_k),

$R = \{R_i\}, i = 1, 2, \dots, m$ – zbiór reguł priorytetu przydzielonych do zasobów systemu.

W odniesieniu do wspomagania planowania produkcji w przedsiębiorstwach wirtualnych rozpatrywane zasoby systemu mogą należeć do różnych producentów wchodzących w skład przedsiębiorstw tworzących organizację wirtualną.

Planowanie przepływu produkcji dla danego zbioru marszrut alternatywnych procesów produkcyjnych sprowadza się do problemu wyznaczenia marszrut do realizacji dla każdego procesu produkcyjnego, dla których poziom wskaźników produkcyjnych (poziom wykorzystania zasobów, koszty produkcji, terminy realizacji zleceń) dla przyjętych reguł priorytetu będzie zadowalający z punktu widzenia właściciela systemu produkcyjnego.

2.2. Model sytuacji decyzyjnej

Problem wyboru marszrut ze zbiorów marszrut alternatywnych dla zbioru n zleceń produkcyjnych mających być współbieżnie realizowanych w systemie produkcyjnym dla zadanych reguł priorytetu odpowiada scenariuszowi sytuacji decyzyjnej w postaci n -osobowej gry niekooperacyjnej z informacją kompletną o niezerowej sumie. Poszczególne procesy produkcyjne, wchodzące w skład zlecenia produkcyjnego, traktowane będą jako obiekty graczy [10, 16, 17], które podejmują decyzję dotyczącą realizowanej przez siebie strategii. Wybór strategii związany jest z wyborem jednej z możliwych do realizacji marszrut ze zbioru możliwych marszrut alternatywnych, aby osiągnąć cel, jakim jest wykonanie zadania w terminie przy jak najmniejszych kosztach związanych z wykorzystaniem zasobów produkcyjnych wchodzących w skład marszrut. Czasy i koszty realizacji procesów, jako elementy funkcji wypłat, muszą być znane, a ponieważ zmiany wartości kosztów oraz czasów dla poszczególnych procesów nie są zazwyczaj proporcjonalne (zmiana marszrut powodująca skrócenie czasów realizacji jednego z procesów nie powoduje wydłużenia realizacji

innych procesów o taką samą wielkość) będzie to gra o sumie niezerowej. Zgodnie z terminologią teorii gier [6] poszczególni gracze dokonują wyboru ze zbioru strategii czyściej odpowiadających zbiorom marszrut alternatywnych dla każdego procesu produkcyjnego. Można wyznaczyć tę grę jako grę planowania produkcji, która wyraża się jako trójka:

$$G = (N, S^j, U^j), \quad (2)$$

gdzie:

$N = \{N_j, j = 1, 2, \dots, n\}$ – zbiór graczy, odpowiadających procesom produkcyjnym (P_j),

$S^j = (s^j)$ – zestaw zbiorów strategii,

$s^j = s^j_w, w = 1, 2, \dots, v_j$ – zbiór strategii gracza N_j, v_j – liczba strategii dla j -tego gracza,

$U^j = (u^j)$ – zestaw n -wskaźnikowych macierzy wypłat v_j -tego stopnia,

$u^j = [u_{i_1 i_2} \dots i_n], i_j = 1, 2, \dots, v_j, j = 1, 2, \dots, n$ – wartości macierzy wypłat – zależne od poziomu wskaźników produkcyjnych dla danego scenariusza.

Wartość wypłaty u dla poszczególnych strategii, dla danego gracza (procesu produkcyjnego), zależy oczywiście od wybranej strategii dla pozostałych graczy (procesów) i jest funkcją wskaźników produkcyjnych istotnych z punktu widzenia producenta:

$$u^j = f(Tc_j, C_j, T_j^t, C_j^t, \dots), \quad (3)$$

gdzie:

Tc_j – termin zakończenia wykonywania j -tego procesu,

C_j^t – koszt wykonania operacji technologicznych na zasobach produkcyjnych zgodnie z wybraną marszrutą j -tego procesu,

T_j^t – czas opóźnienia zakończenia j -tego procesu,

C_j^t – koszt opóźnienia realizacji j -tego procesu.

Wyznaczenie wartości dla zaprezentowanych formalizmów matematycznych jest etapem związanym z przygotowaniem modelu opisanej sytuacji decyzyjnej. Wyznaczone wartości macierzy wypłat będą informacją wejściową do kolejnego kroku, jakim jest poszukiwanie strategii równowagi dla konkretnego przypadku. Poszukiwane rozwiązania powinny zostać przetestowane (ze względu na brak wcześniejszych prac w tym obszarze w odniesieniu do problemów wyboru marszrut produkcyjnych) zarówno dla strategii czystych, jak i mieszanych. Elementy zbioru strategii s^j , nazywa się strategiami czystymi. Natomiast w strategiach mieszanych następuje połączenie poszczególnych strategii czystych – wybranie każdej z dostępnych strategii czystych z pewnym prawdopodobieństwem. Ma to o tyle duże znaczenie, iż w przypadkach, gdy nie jest możliwe wyznaczenie równowagi Nasha dla strategii czystych, to równowaga taka może istnieć w konkretnym przypadku dla strategii mieszanych. Tak więc rozpoczęcie badań nad możliwością zastosowania jednej ze strategii do rozwiązania konkretnego problemu decyzyjnego, związanego z podejmowaniem decyzji o wyborze zestawu marszrut dla zbioru zleceń produkcyjnych czekających na realizację w systemie produkcyjnym, przedstawioną metodą, wymaga uprzedniej znajomości elementów macierzy wypłat dla wszystkich graczy.

W praktyce, ze względu na charakter rozpatrywanych systemów współbieżnej dyskretnej produkcji wieloasortymentowej, w których występują zasoby współdzielone (procesy wzajemnie wpływają na siebie), a więc w trakcie bieżącej pracy systemu występują konflikty zasobowe, które rozwiązywane są w oparciu o przyjęte (dla danego przypadku) reguły wyboru priorytetu, niezmiernie trudno byłoby sformułować zależności analityczne pozwalające na wyznaczenie wartości wypłat obejmujące wszystkie przypadki. Zależności te poza zmiennością reguł priorytetu, zmiennością marszrut dla poszczególnych strategii, wzajemnego oczekiwania procesów na zakończenie operacji technologicznych, musiałyby także uwzględniać wzajemny wpływ strategii pozostałych graczy na wyniki dla wybranej strategii gracza, dla którego wyznaczana jest dana wartość wypłaty. Wymuszałyby to każdorazowe wyznaczanie zależności funkcji wypłat dla konkretnego przypadku. Jest to jeden z powodów, dla których dotychczasowe prace w tym obszarze [10, 14, 16, 17] bazują na stosunkowo prostych wskaźnikach wartości wypłat oraz algorytmach heurystycznych poszukiwania uszeregowania operacji (dla których wyznaczone są parametry, m.in. całkowity czas wykonania zadań, od których uzależniona jest wartość wypłaty) lub modele teorii gier stanowią tylko uzupełnienie innych metod.

Aby wyeliminować powyższe problemy w ramach prac badawczych prezentowanych w tym artykule sięgnięto po metody symulacji komputerowej, wykorzystywanej często właśnie w przypadkach, w których nie jesteśmy w stanie wyznaczyć rozwiązania drogą analityczną. W kolejnych rozdziałach zaprezentowany zostanie przykład wyznaczania wartości wypłat z wykorzystaniem zaawansowanych systemów symulacyjnych.

3. Systemy symulacyjne we wspomaganii metod teorii gier

Wykorzystanie systemu symulacyjnego do przeprowadzania eksperymentów, których wyniki mogą posłużyć jako dane pozwalające na wyznaczenie wartości wypłat dla zbioru strategii prostych (marszrut alternatywnych) poszczególnych graczy (procesów produkcyjnych), uzależnione jest od możliwości odpowiednio elastycznej parametryzacji modelu symulacyjnego oraz automatyzacji procesu przeprowadzania poszczególnych przebiegów symulacji. Wykonany komputerowy model symulacyjny danego systemu produkcyjnego, ze względu na specyfikę przedstawionego problemu decyzyjnego – wybór marszruty z dostępnego zbioru marszrut alternatywnych dla zbioru zleceń produkcyjnych czekających na realizację w systemie produkcyjnym – musi posiadać możliwość zdefiniowania marszrut, czasów trwania operacji czy wielkości partii produkcyjnych w postaci zmiennych parametrów modelu, aby wyeliminować konieczność każdorazowej budowy modelu dla poszczególnych zestawów strategii (odpowiadających poszczególnym marszrutom produkcyjnym w systemie). Podobnie wymagane jest wykonanie poszczególnych przebiegów symulacji dla każdej kombinacji strategii dla wszystkich graczy, których liczba dla modelu formalnego podanego w rozdziale 2 wyznaczona może zostać z iloczynu:

$$\prod_{j=1}^n v_j, \quad (4)$$

gdzie:

j – zbiór graczy, odpowiadających procesom produkcyjnym,

v_j – liczba wersji marszrut j -tego procesu produkcyjnego odpowiadająca poszczególnym strategiom dla graczy.

Takie możliwości posiadają zaawansowane dyskretne komputerowe systemy symulacyjne, do których należą przodujące na rynku rozwiązania komercyjne *Enterprise Dynamics*, *Witness*, *ProModel* czy *FlexSim* [12]. Do przeprowadzenia badań wybrano system *Enterprise Dynamics*, posiadający moduł *Experiment Wizard* automatyzujący przeprowadzanie eksperymentów bez konieczności uruchamiania każdego przebiegu z osobna.

3.1. Model symulacyjny

Przedstawienie możliwości zastosowania nowoczesnych zaawansowanych systemów symulacyjnych do określania wskaźników modelu sytuacji decyzyjnej przedstawionej w rozdziale 2 rozpoczęto od budowy modelu dla przykładowego systemu produkcyjnego wybranego do przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych.

Dany jest system produkcyjny składający się z dziewięciu zasobów $M1 - M9$, w którym mają być realizowane współbieżnie dwa procesy produkcyjne $P1$ oraz $P2$. Każdy z procesów może być realizowany w systemie według jednej z trzech marszrut alternatywnych – dane dotyczące marszrut oraz czasów realizacji operacji zapisano w postaci macierzy procesów:

$$\text{proces } P1: MP_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 9 & 13 & 17 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, MP_1^2 = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 8 \\ 12 & 7 & 11 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, MP_1^3 = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 9 \\ 10 & 6 & 15 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

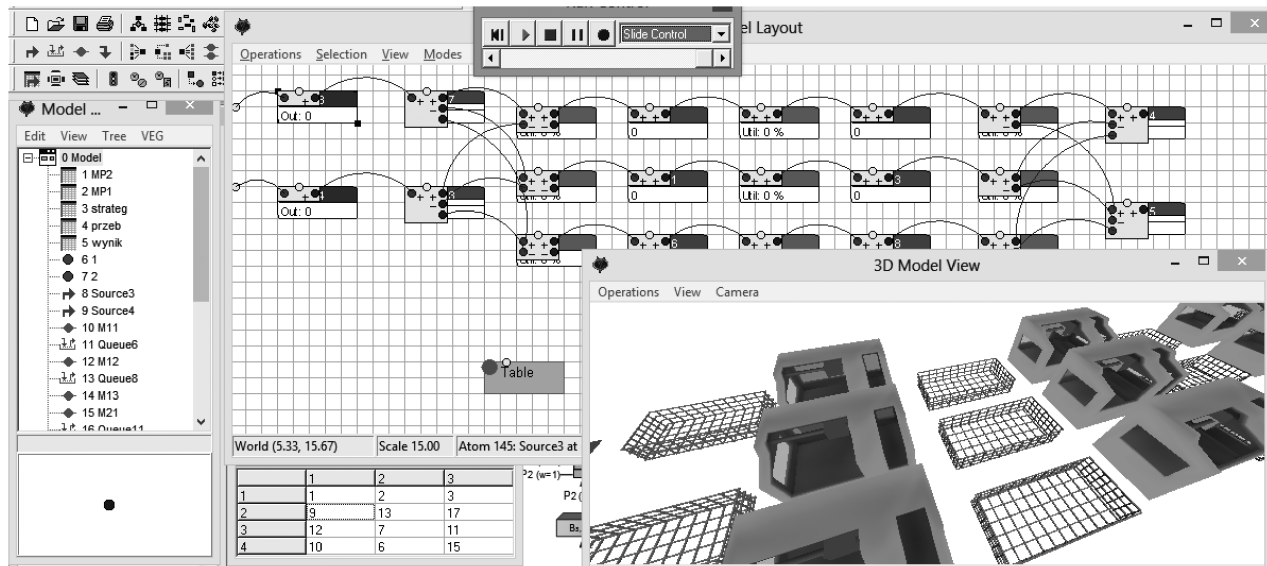
$$\text{proces } P2: MP_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 \\ 9 & 5 & 8 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, MP_2^2 = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 8 \\ 15 & 8 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, MP_2^3 = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 9 \\ 9 & 18 & 12 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Wielkości serii produkcyjnych dla obu procesów N_1 i N_2 wynoszą 100 sztuk, natomiast zasoby dzielone dopuszczają procesy do realizacji według reguły FIFO.

Uściślając sytuację decyzyjną w postaci gry, można powiedzieć, że w danym przypadku mamy do czynienia z modelem dwuosobowej gry strategicznej niekooperacyjnej, w której każdy z graczy może wybierać pomiędzy trzema strategiami czystymi reprezentowanymi przez poszczególne marszruty produkcyjne. W tym przypadku dla każdego gracza mamy do czynienia z macierzą wypłat dwuwskaznikową kwadratową 3×3 . Można z nich utworzyć macierz wypłat zbudowaną z podwójnych elementów (tzw. bimacierz).

Dla powyższych danych przygotowano model symulacyjny w systemie *Enterprise Dynamics* pokazany na rysunku 2. W modelu odwzorowano zarówno zasoby techniczne (maszyny produkcyjne, magazyny, produkty) w postaci tzw. „atomów”, jak również elementy informacyjne zawierające dane zapisane w tabelach.

Wykonany model odwzorowuje w pełni założone przepływy procesów przez zasoby produkcyjne wraz z parametryzowanymi regułami sterowania – reguły można w każdym



Rys. 2. Model symulacyjny w systemie Enterprise Dynamics

momencie zmienić bez potrzeby wykonywania innych zmian w modelu. Marszrutę procesów wraz z czasami realizacji operacji wprowadzono w specjalnie do tego celu przygotowanych tablicach, tak by wybór aktualnie realizowanej marszrutę wymagał jedynie zmiany parametru w tablicy *strateg* – tam także zapisano wszystkie z dziewięciu możliwych kombinacji strategii graczy (rys. 3). Wiersze odpowiadają poszczególnym kombinacjom, w pierwszej kolumnie podano numer wersji marszrutę dla procesu *P1*, w drugiej kolumnie wersje marszrutę dla *P2*. Przygotowany model symulacyjny, dla którego wykonano eksperymenty przedstawione w tym artykule jest dostępny do pobrania pod adresem http://imms.home.pl/rapidsim/TG_2014.mod.

3.2. Eksperymenty symulacyjne

Dla przygotowanego modelu symulacyjnego przeprowadzono eksperymenty symulacyjne składające się z poszczególnych przebiegów symulacji dla wszystkich kombinacji strategii dla każdego z dwóch graczy z wykorzystaniem modułu *Experiment Wizard*. Ponieważ możliwe scenariusze dla poszczególnych strategii zapisano nie na stałe jako parametry modelu, lecz jako dane w tablicy, z których to dane pobierane były każdorazowo przy rozpoczynaniu symulacji, dla poszczególnych przebiegów wystarczyło odczytanie kolejnego numeru scenariusza w modelu (rys. 4a). Kolejnym elementem parametryzacji modułu było określenie wskaźników produkcyjnych istotnych z punktu widzenia producenta, których wartości będą niezbędne do wyznaczenia wartości wypłaty *u* dla poszczególnych strategii. W prezentowanym przykładzie są to wartości czasów wykonania całej serii produkcyjnej dla poszczególnych procesów produkcyjnych (graczy) oraz całego zlecenia – *wynikP1*, *wynikP2*, *wynikC* (rys. 4b).

Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły na określenie poszukiwanych wartości parametrów produkcyjnych dla wszystkich kombinacji strategii obu graczy. Wyniki można wyeksportować w postaci tabelarycznej lub w postaci graficznej umożliwiającej obserwację zmienności parametrów w poszczególnych przebiegach (rys. 5).

Macierze zawierające wyniki symulacji dla omawianych eksperymentów są następujące:

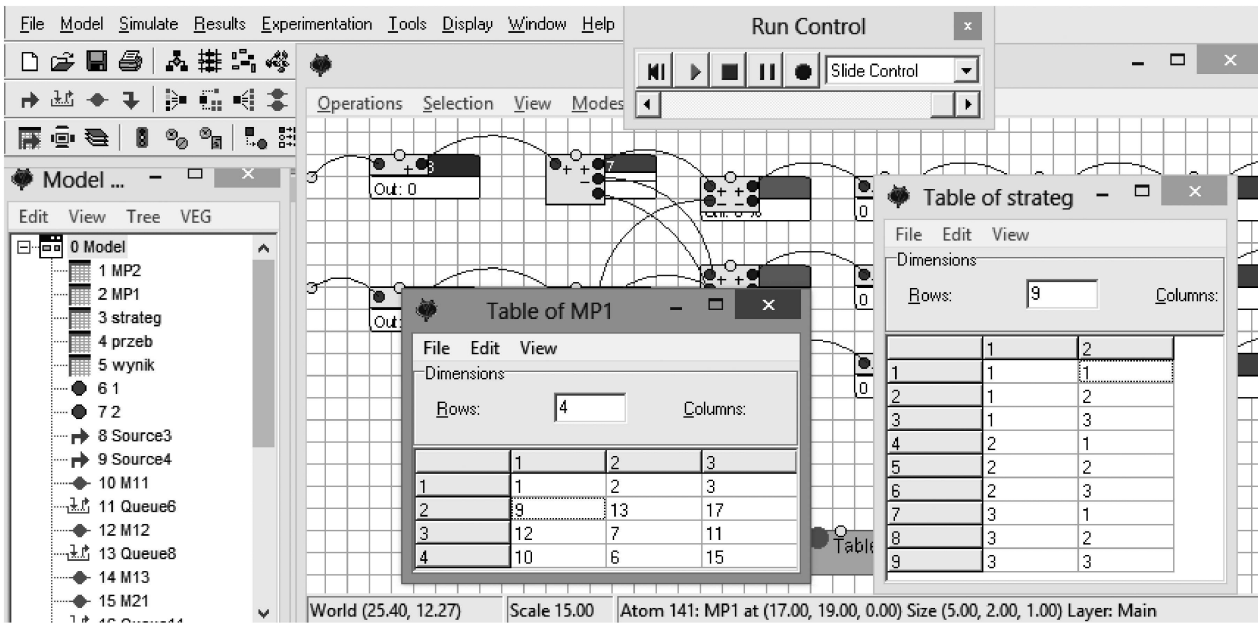
$$P_1 = \begin{matrix} & MP_2^1 & MP_2^2 & MP_2^3 \\ \begin{matrix} MP_1^1 \\ MP_1^2 \\ MP_1^3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2515 & 1722 & 1722 \\ 1218 & 2703 & 1218 \\ 1516 & 1516 & 2715 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P_2 = \begin{matrix} & MP_2^1 & MP_2^2 & MP_2^3 \\ \begin{matrix} MP_1^1 \\ MP_1^2 \\ MP_1^3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2523 & 913 & 913 \\ 1513 & 2713 & 1513 \\ 1821 & 1821 & 2727 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

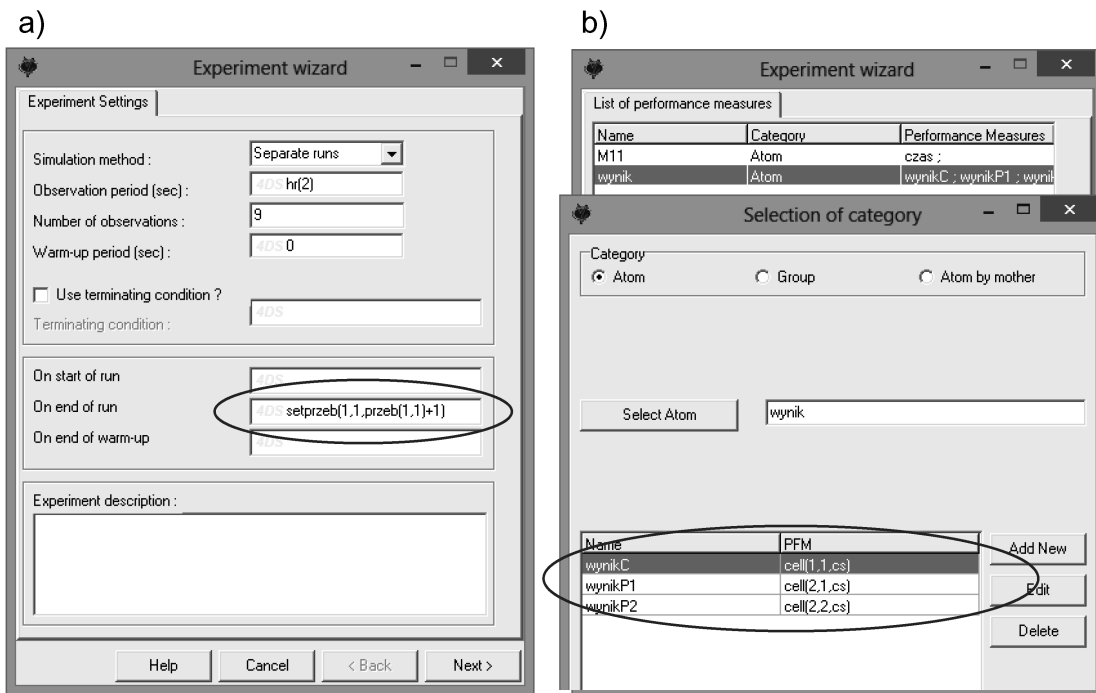
Wartości w uzyskanych macierzach odpowiadają czasom realizacji dla procesów *P1* i *P2* dla wszystkich dziewięciu strategii (kombinacji marszrutę). W nagłówkach oznaczono informacyjnie macierz procesu MP_j^w dla danej kombinacji. Należy podkreślić, że uzyskane wartości nie są tożsame z wartościami w macierzach wypłat u_j , a jedynie wartościami, które będą mogły być wykorzystane jako zmienne niezależne funkcji wypłat do określenia wartości wypłat dla każdego z graczy. W szczególnym przypadku, w którym funkcja wypłat zależna byłaby jedynie od wartości czasów realizacji procesów produkcyjnych macierz wypłat stanowiłaby połączenie w bimatrycz powyższych macierzy.

4. Podsumowanie i wnioski

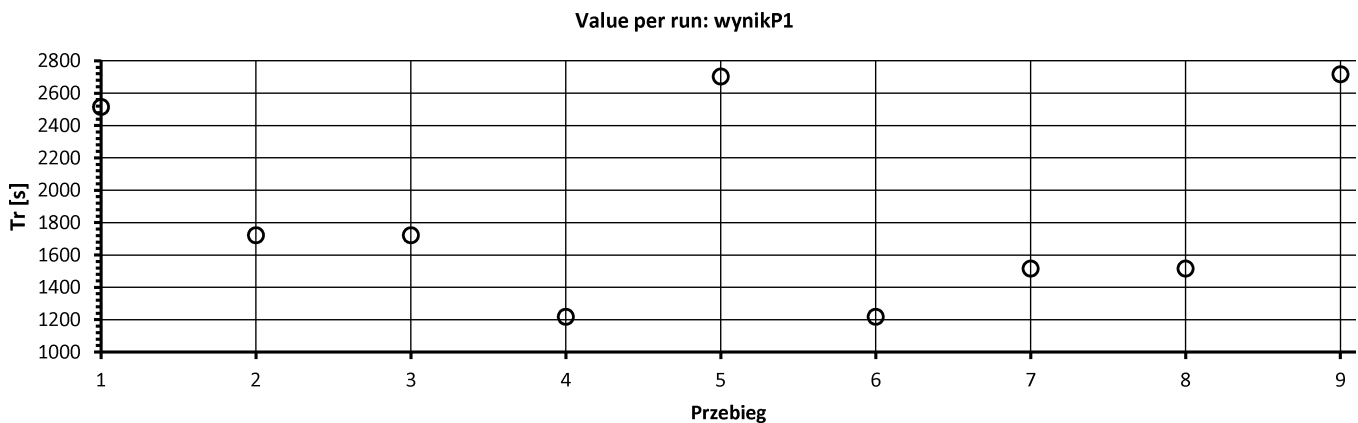
W artykule przedstawiona została koncepcja wykorzystania metod i modeli teorii gier do wspomagania rozwiązywania problemów planowania produkcji dotyczących wyboru najbardziej korzystnej w danych warunkach marszrutę z dostępnego zbioru marszrutę alternatywnych w systemach dyskretniej produkcji wieloasortymentowej. Sformułowano model systemu i zlecenia produkcyjnego oraz model sytuacji decyzyjnej i związany z nim aparat matematyczny zgodnie z formalizmem zapożyczonym z teorii gier. Pokazano także, iż zaawansowane systemy symulacyjne wraz z przygotowanymi modelami mogą być skutecznymi i sprawnymi narzędziami wyznaczania argumentów funkcji wypłat dla wszystkich graczy, które ze względu na charakter



Rys. 3. Parametryzacja modelu



Rys. 4. Parametryzacja modułu Experiment Wizard



Rys. 5. Czasy realizacji Tr procesu P1 dla poszczególnych przebiegów

rozpatrywanych systemów produkcyjnych, nie dają się wyznaczyć w prosty sposób z wykorzystaniem zależności analitycznych. Przedmiotem kolejnych prac badawczych w prezentowanym obszarze będzie wyznaczenie wartości macierzy wypłat oraz poszukiwanie strategii równowagi zarówno dla strategii czystych, jak i mieszanych wraz z analizą możliwości zastosowania jednej ze strategii do rozwiązania konkretnych klas omawianego problemu oraz porównanie uzyskiwanych rezultatów z innymi stosowanymi do tej pory metodami wspomagającymi proces decyzyjny.

Literatura:

- [1] Akyol D. E., Bayhan G. M.: *A review on evolution of production scheduling with neural networks*. "Computers & Industrial Engineering", Vol. 53, No. 1 2007, pp. 95-122.
- [2] Argoneto P., Perrone G., Renna, P., Lo Nigro G., Brucoleri M., Noto La Diega S.: *Production Planning in Production Networks*. Springer, London 2008.
- [3] Banaszak Z., Majdzik P., Wójcik R.: *Procesy współbieżne: modele efektywności funkcjonowania*. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2008.
- [4] Bubnicki Z. (red.): *Teoria i algorytmy sterowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- [5] Jahangirian M. et al.: *Simulation in manufacturing and business: A review*. "European Journal of Operational Research", Vol. 203, No. 1 2010, pp. 1-13.
- [6] Kałuski J.: *Teoria Gier*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [7] Krenczyk D.: *Data transformation for production planning and control systems integration*. "Journal of Machine Engineering", Vol. 11, No. 1-2, 2011, pp. 171-180.
- [8] Krenczyk D.: *Integracja systemów planowania produkcji z dyskretnymi systemami symulacyjnymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [9] Lewandowski J., Skołud B., Plinta D.: *Organizacja systemów produkcyjnych*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2014.
- [10] Li W.D., Gao L., Li X.Y., Guo Y.: *Game Theory-based Cooperation of Process Planning and Scheduling*. Computer Supported Cooperative Work in Design, 2008. CSCWD 2008. pp. 841-845.
- [11] Papakostas N., Efthymiou K., Georgoulas K., Chrysosouris G.: *On the configuration and planning of dynamic manufacturing networks*. "Logistics Research" 2012, Vol. 5, issue 3-4, pp. 105-111.
- [12] Pawlewski P., Dossou P.E., Golinska P.: *Using Simulation Based on Agents (ABS) and DES in Enterprise Integration Modelling Concepts*. "Trends in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems" Vol. 157, Springer, Berlin – Heidelberg 2012, pp. 75-83.
- [13] Skołud B.: *Approaches to the production flow scheduling and control, Intelligent manufacturing for industrial business process*. "Journal of Machine Engineering" 8(2), 2008, pp. 5-13.
- [14] Sun D., He W., Zheng L., Liao X.: *Scheduling flexible job shop problem subject to machine breakdown with game theory*. "International Journal of Production Research", Volume 52, Issue 13, 2014, pp. 3858-3876.
- [15] Yu H., Liang W.: *Neural network and genetic algorithm-based hybrid approach to expanded job-shop scheduling*. "Computers & Industrial Engineering", Vol. 39, No. 3-4, 2001, pp. 337-356.
- [16] Zheng X., Zhang J., Gao Q.: *Application of non-cooperative game theory to multi-objective scheduling problem in the automated manufacturing system*. "Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)", pp. 554-557.

- [17] Zhou G., Jiang P., Huang G.Q.: *A game-theory approach for job scheduling in networked manufacturing*. "International Journal Of Advanced Manufacturing Technology", 2009, Vol. 41, No. 9-10, pp. 972-985.

APPLICATION OF GAME THEORY IN PRODUCTION PLANNING WITH THE USE OF ADVANCED SIMULATION SYSTEMS

Key words:

production planning, game theory, simulation, model, decision support.

Abstract:

Modern companies must be flexible enough so that they can effectively act in order to adapt their production systems to manufacture many variants of products in variable production batches. Therefore, the introduction of innovative technologies and implementation of changes in the organizational structure – flexibility in adapting of owned resources to incoming production orders with the analysis of feasible alternative routes is required. These problems are closely connected with the ability of realization of Virtual Enterprises (VE) concept, for which the available production resources are scattered through many organizations. A similar approach is found in the latest concepts of Dynamic Manufacturing Networks (DMN), where the goal is a mutual cooperation in the process of value chain sharing in order to conduct joint production through a permanent or temporary cooperation involving geographically dispersed production systems of small and medium-sized enterprises. In the paper the concept of implementation of methods and models from game theory to solve problems connected with production planning is presented. Considered problems, commonly met in the area of production planning and control are related to the selection of the route for the implementation in the system from the available set of alternative routes – the allocation of adequate resources to meet specific production orders from the production plan. The production system and order model and the decision-making model with the associated mathematical apparatus according to the formalism borrowed from game theory is also being formulated. Particular processes are treated as objects of players, which shall decide according to the strategies implemented by them – one of the possible routes for the implementation from a set of possible alternative routes shall be selected in order to reach the goal. The purpose of this is to perform the task within the time limit at the lowest costs related to the use of productive resources represented on the route. The possibilities of using advanced simulation systems, which, together with prepared models can be an effective and efficient tool for determining the value of payments for all players have been shown on the example. The subject of further research work in the presented area will be the determination of the values of the payoff matrix and the search for equilibrium strategies for both pure and mixed strategies, together with an analysis of the applicability of one of the strategies to solve specific classes of the problems and comparison of the obtained results with the other presently used methods of the decision-making process support.

Dr inż. Damian KRENCZYK
mgr inż. Małgorzata OLENDER

Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
damian.krenczyk@polsl.pl
malgorzata.olender@polsl.pl