

Edward Nawarecki\*, Jarosław Koźlak\*

## Agentowy model systemu logistycznego\*\*

### 1. Wprowadzenie

We współczesnej gospodarce, przy dużych zależnościach pomiędzy producentami i dużych możliwościach konkurencji pomiędzy nimi istotne jest dodatkowe wspomaganie procesów decyzyjnych dotyczących planowania produkcji, zapasów magazynowych, poszukiwania potencjalnych kooperantów, prognoz rynkowych oraz innych decyzji wpływających na efektywność przedsiębiorstwa.

Dla tej klasy problemów użyteczne wydaje się zastosowanie podejścia agentowego. Przy tym podejściu można przyjąć, że podmioty posiadają swoją autonomię, jednak równocześnie podlegają pewnym powiązaniom. Stosując podejście agentowe, można badać różne rozwiązania problemów decyzyjnych i interakcyjnych. Są to na przykład protokoły negocjacji, aukcji, targów, planowania, maszynowego uczenia się czy też działania przy niepełnej informacji. Prowadzono szereg badań w dziedzinie systemów agentowych dotyczących modelowania i optymalizacji łańcuchów dostaw. Przykładowo w [9] prezentowane jest środowisko agentowe do modelowania dynamiki łańcuchów dostaw. Przewidziano dużą różnorodność agentów modelujących poszczególne elementy łańcucha.

W celu analizy różnych możliwych strategii działań agenta reprezentującego przedsiębiorstwo wprowadzono zawody pomiędzy takimi agentami, tzw. *Trading Agent Competition* [1, 3], oraz rozgrywkę TAC – *Supply Chain Management* [4].

W [6, 7] znajduje się przegląd rodzajów problemów związanych z modelowaniem łańcuchów dostaw, które są rozwiązywane przy użyciu podejścia agentowego oraz charakterystyka używanych technik. Oddzielną grupę stanowią zagadnienia związane z samą budową systemów agentowych. Tworzenie oprogramowania jest procesem złożonym, obciążonym ryzykiem popełniania błędów na wielu etapach. Istnieje szereg różnych metodologii tworzenia oprogramowania, których dobór zależy od specyfiki realizowanych projektów.

---

\* Katedra Informatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

\*\* Niniejsza praca jest częściowo finansowana przez Katedrę Informatyki AGH, umowa numer 11.11.120.865, a częściowo z grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego numer N N516 366236

Metodologie tworzenia systemów agentowych można rozpatrywać z punktu widzenia dwóch aspektów: jako sposób tworzenia systemów informatycznych oraz jako sposób tworzenia systemów spełniających specyficzne funkcje systemów agentowych. W [2] przedstawione jest porównanie podejścia komponentowego i agentowego, zwrócona jest uwaga na większe możliwości, które są wynikiem koncepcji obecnych w systemach agentowych, w szczególności możliwości odwołania się do celów, dla jakich poszczególne akcje danych agentów/komponentów są wywoływane.

W niniejszym artykule starano się przedstawić metodykę postępowania dostosowaną do tworzenia modeli łańcuchów produkcyjnych, uwzględniających charakterystyczne dla tego obszaru aspekty.

## 2. Model systemu agentowego

Z funkcjonalnego punktu widzenia problem projektowania systemu agentowego rozwiązać można w wielu wariantach, przy czym wydaje się, że jako charakterystyczne wskazać można:

- projektowanie systemu, którego rola polegać będzie na współdziałaniu z istniejącym już systemem rzeczywistym, w celu rozpoznawania jego właściwości, usprawniania działania lub wspomagania tam procesów decyzyjnych;
- projektowanie systemu agentowego, który działając w wirtualnym środowisku obliczeniowym, ma dostarczyć informacji dotyczących działania pewnego systemu rzeczywistego, umożliwi bliższe poznanie zachodzących w nim procesów i powiązań, stwarzając w ten sposób podstawę do poprawy jego działania, oceny strategii decyzyjnych, ewentualnie zbadania możliwości wystąpienia pewnych anomalii i sytuacji kryzysowych oraz sposobów reagowania w takich sytuacjach.

Należy zwrócić uwagę, że choć funkcjonalność projektowanego systemu agentowego różni się w powyższych przypadkach, to sam proces ich projektowania, a częściowo i realizacji, zawiera szereg elementów wspólnych. I tak, w obu przypadkach, konieczne jest:

- posiadanie pewnej wiedzy *a priori* o procesie rzeczywistym, do którego adresowany jest system agentowy;
- stworzenie koncepcji zadań (ról) realizowanych przez poszczególnych agentów, z uwzględnieniem własności środowiska (rzeczywistego lub wirtualnego), w którym mają działać;
- zaprojektowanie samych agentów, odpowiednio do zadań, które zostały im przypisane;
- zaprojektowanie struktury sprzętowej i programistycznej, umożliwiającej realizację budowanego systemu.

Natomiast istotną różnicę dla tych przypadków stanowi fakt, że w pierwszym z nich system agentowy dostosowany zostaje do istniejącego już środowiska i struktury realnego

procesu, natomiast w drugim istnieje znaczna swoboda w kształtowaniu środowiska agentów. Ponadto, inaczej musi być rozwiązany problem monitoringu, a w konsekwencji przesyłania i wstępnego przetwarzania danych.

Równocześnie, w drugim przypadku, kluczowym staje się problem stworzenia modelu, który nie tylko wspomaga procesy decyzyjne, lecz przede wszystkim umożliwia symulacyjne badanie zachowań podmiotowego systemu rzeczywistego.

Rozważania prowadzone z niniejszej pracy skierowane będą głównie na drugi przypadek użycia systemu agentowego, tj. skonstruowanie modelu umożliwiającego badanie zachowań systemu rzeczywistego w różnych warunkach jego działania i przy różnorodnych strategiach agentów wchodzących w jego skład.

Ogólny model systemu, wzorowany na podejściu proponowanym w [7], prezentuje wyrażenie:

$$\text{Sys} \equiv \langle \text{Ag}, \text{Env}, \text{Res}, \text{Com}, \text{Org} \rangle \quad (1)$$

gdzie:

*Ag* – zbiór agentów,

*Env* – środowisko,

*Res* – zasoby dostępne w środowisku,

*Com* – komunikacja,

*Org* – organizacja określająca relacje pomiędzy agentami oraz między agentami a środowiskiem.

Na poziomie systemu rozważane będą zewnętrzne modele agentów [], umożliwiające sprecyzowanie ich ról, wzajemnych relacji oraz relacji ze środowiskiem.

$$A_i \equiv \langle X_i, T_i, R_i \rangle, A_i \in \text{Ag} \quad (2)$$

gdzie:

$X_i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i\}$  – zbiór akcji (działań) *i*-tego agenta,

$T_i = \{t_1^i, t_2^i, \dots, t_m^i\}$  – cele *i*-tego agenta,

$R_i = \{r_1^i, r_2^i, \dots, r_m^i\}$  – zasoby agenta  $A_i$ ,  $R_i \subseteq \text{Res}$ .

Model agenta dopełnia miara (ocena) jakości, czyli funkcja przypisana do danego celu  $t_k^i \in T_i$ :

$$F_i(t_k^i) = F_i^{t_k^i}(x_j^i(n)), n = 1, \dots, N, t_k^i \in T_i, x_j^i \in X_i \quad (3)$$

Opis środowiska (*Env*) zależy w sposób istotny od własności modelowanego systemu rzeczywistego, dlatego też przedstawienie go w postaci ogólnej napotyka na trudności.

Dla prowadzonych dalej rozważań dogodnie wydaje się określenie środowiska w postaci:

$$\text{Env} \equiv \langle E, Y : Y \rightarrow \text{Res} \rangle \quad (4)$$

gdzie:

$E$  – przestrzeń (metryczna, grafowa) reprezentująca strukturę możliwych powiązań między agentami  $E = (Ag \times Ag) \rightarrow \{0, 1\}$ ,

$Y$  – relacja odwzorująca lokalizację w przestrzeni  $E$ , określająca dostępność zasobów  $Res$ :  $Y = (Ag \times R) \rightarrow \{0, 1\}$ ,

$R = \{R_1, \dots, R_n\}$  – poszczególne typy zasobów dostępnych w systemie.

Podobnie opisana być może komunikacja rozumiana jako możliwość wymiany informacji pomiędzy agentami.

Istotną rolę odgrywa skonstruowanie opisu organizacji ( $Org$ ) systemu agentowego. Tu również można tworzyć dużą różnorodność formalizmów, dostosowanych do specyfiki rozważanego systemu. Dla danej klasy procesów proponuje się przyjęcie reprezentacji organizacji systemu w postaci trójki:

$$Org \equiv \langle B(Res), D(Com), M(Ag) \rangle \quad (5)$$

gdzie:

$B(Res)$  – relacja określająca zasady dostępu do zasobów,

$D(Com)$  – relacja określająca warunki dostępu do komunikacji,

$M(Ag)$  – zbiór (kolekcja) relacji wzajemnych między agentami.

Relacje między agentami można ogólnie zapisać w postaci:  $M(Ag) \equiv (Ag \times Ag) \rightarrow M$ , czyli jest to odwzorowanie par  $(A_i, A_j)$  w zbiór możliwych relacji wzajemnych. Można to zapisać również:  $M(A_i, A_j) \rightarrow m_{ij}$ , gdzie  $m_{ij}$  relacja wzajemna między agentami  $A_i$ , oraz  $A_j$ . Wśród możliwych relacji ( $m_{ij}$ ) jako charakterystyczne wskazać można: neutralność (niezależność), dominację (częściową i pełną), współzależność (sąsiedztwo, kooperacja, konkurencja), antagonizm. Przykładowo współzależność i dominację można zdefiniować jak poniżej:

$$A_i \diamond A_j \rightarrow \exists (t_k^i, t_m^j) : \begin{cases} F_i^{t_k} (x_j^i, x_m^j) \\ F_j^{t_m} (x_j^i, x_k^j) \end{cases} \quad (6)$$

czyli obaj agenci ( $A_i, A_j$ ) posiadają wzajemny wpływ na wartości ich wskaźników jakości.

$$A_d > A_j \rightarrow \exists (t_k^i) : F_j^{t_k} (x_j^i, x_k^d) \quad (7)$$

co oznacza, że jedynie agent dominujący ( $A_d$ ) posiada wpływ na wskaźnik jakości agenta zdominowanego ( $A_j$ ).

Wspomniane powyżej relacje pomiędzy agentami pozwalają na sprecyzowanie odpowiadających im strategii działania. Występowanie określonych relacji posiada również wpływ na sposób formułowania globalnego kryterium jakości funkcjonowania systemu, które można zapisać w postaci:

$$G(S) \equiv G(X, R, T) \quad (8)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} X &= (X_1, X_2, \dots, X_n) - \text{przestrzeń akcji agentów,} \\ R &= (R_1, \dots, R_m) - \text{zasoby systemu,} \\ T &- \text{globalny cel działania systemu.} \end{aligned}$$

Wykorzystując wprowadzone pojęcia, można przystąpić do opisu działania systemu agentowego oraz związanych z nim procesów (lokalnych i globalnych). Działanie agenta określone jest jego strategią:

$$\text{Str}A_i \equiv \{x_j^i(n)\}, x^i \in X_i, n = 1, \dots, N \quad (9)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} x_i(n) &- \text{akcje } i\text{-tego agenta w kolejnych etapach działania systemu } n \in \{1, \dots, N\}, \\ N &- \text{przyjęty horyzont planowania.} \end{aligned}$$

W zależności od specyfiki modelowanego procesu, działania (akcje) agenta mogą być optymalizowane krok po kroku, względnie optymalizowana jest cała strategia  $n \in [1, n]$ , co prowadzi oczywiście do stosowania algorytmów optymalizacji dynamicznej. Poszukiwanie najkorzystniejszych wariantów z punktu widzenia kryterium globalnego ( $G$ ), odbywa się najczęściej przez symulacyjne badanie różnych wersji rozwiązań lokalnych.

### 3. Modelowanie systemu zarządzania i optymalizacji łańcuchów dostaw

Skonstruowanie modelu symulacyjnego łańcucha dostaw obejmującego grupę współdziałających przedsiębiorstw jest zadaniem bardzo złożonym, wymagającym obszernej dokumentacji. Dlatego, dążąc do zilustrowania naszkicowanej metodologii, ograniczono się do zaprezentowania ról agentów oraz zachodzących pomiędzy nimi relacji dla pojedynczego przedsiębiorstwa, przyjmując daleko idące uproszczenia. Jako najważniejsze, wyróżniono następujące role pełnione przez agentów:

*Planowanie strategiczne* ( $A_{st}$ ) określa ogólną strategię produkcji, opartą na prognozach rynkowych i zawartych porozumieniach (kontraktach). Ze strategii tej wynikają ramowe zadania związane z planowaniem i realizacją produkcji, gromadzeniem zapasów magazynowych, a także wskazania dotyczące zaopatrzenia i zbytu.

*Planowanie produkcji* ( $A_{pp}$ ) sprowadza się do określenia zadań produkcyjnych odniesionych do przyjętego horyzontu czasowego ( $N$ ), z uwzględnieniem uśrednionych mocy produkcyjnych oraz posiadanych i nabytych zapasów magazynowych.

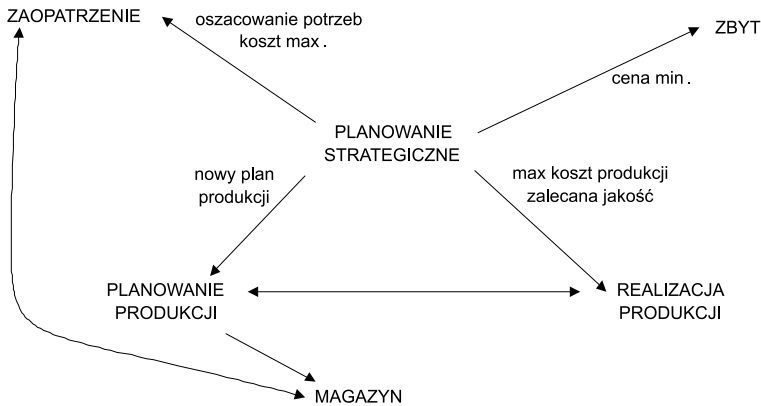
*Realizacja produkcji* ( $A_{rp}$ ) obejmuje przyporządkowanie planom produkcyjnym zadań realizowanych na poszczególnych etapach, z uwzględnieniem stanu technicznego maszyn i urządzeń (remonty), ich wydajności oraz kosztów produkcji.

*Magazyn* ( $A_{mg}$ ) prowadzi gospodarkę zasobami magazynowymi, dążąc do optymalnego wykorzystania przestrzeni oraz utrzymywania niezbędnego stanu zapasów.

*Zaopatrzenie* ( $A_{zp}$ ) pozostając w kontakcie z magazynem oraz znając strategię produkcji, dąży do zapewnienia wymaganego stanu zaopatrzenia na możliwie najkorzystniejszych warunkach finansowych.

*Zbyt* ( $A_{zb}$ ) dąży do realizacji zobowiązań przedsiębiorstwa oraz oferuje sprzedaż produkowanych wyrobów, starając się zapewnić jak najlepsze efekty finansowe.

Przedstawiony opis ról, stanowi oczywiście pewną opcję, która może być modyfikowana w zależności od konkretnych uwarunkowań i zamierzeń. Dla tak określonych ról można skonstruować schemat relacji pomiędzy odpowiednimi agentami przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat relacji pomiędzy agentami

Jako charakterystyczne dla tego schematu wskazać można występowanie następujących relacji dominacji:

$$A_{st} > A_{pp}, \quad A_{st} > A_{rl}, \quad A_{st} > A_{zp}, \quad A_{st} > A_{zb} \quad (10)$$

Dominacja ta wynika oczywiście z podporządkowania poszczególnych agentów przyjętym planom strategicznym. Często, ingerencja agenta dominującego wyrazić się może w postaci narzucania ograniczeń, których przykłady podano na rysunku 1. Jak łatwo uzasadnić, pomiędzy niektórymi agentami występują również relacje współzależności, dla rysunku 1 są to:

$$A_{zp} \diamond A_{mg}, \quad A_{pp} \diamond A_{rl}, \quad A_{pp} \diamond A_{mg} \quad (11)$$

W równoważnym przykładzie, jako kryterium globalne (8) przyjęto wyrażenie:

$$G(X) = F_{zb} - F_{rl} - F_{zp} - F_{mg} \quad (12)$$

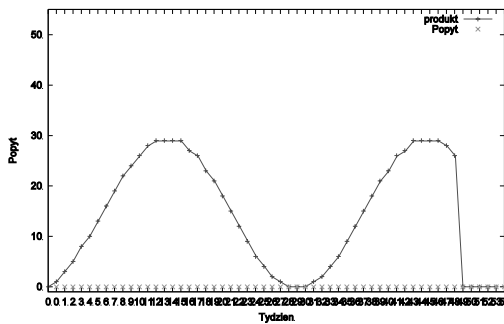
gdzie:

$F_{zb}$  – dochód uzyskany ze sprzedaży wyrobów,

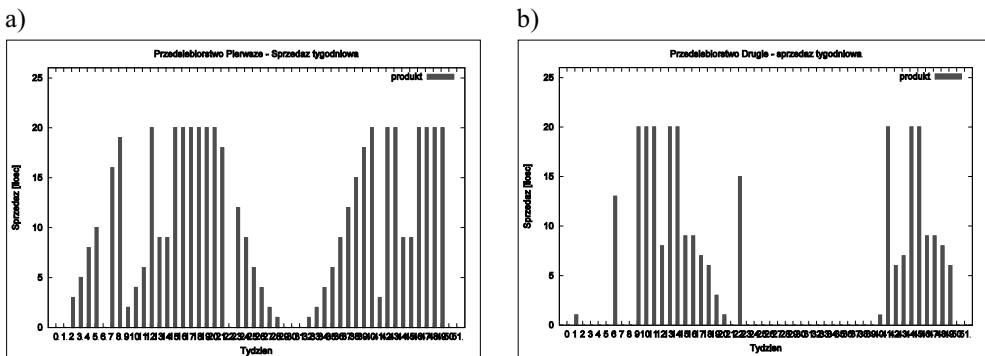
$F_{rl}$ ,  $F_{zp}$ ,  $F_{mg}$  – odpowiednio koszty produkcji, zaopatrzenia oraz magazynowania.

Formułując odpowiednio wskaźniki jakości dla poszczególnych komponentów tego wyrażenia, przeprowadzono szereg symulacji, przy zastosowaniu zrealizowanej platformy obliczeniowej [5].

Jako przykład uzyskanych rezultatów, na rysunkach 2, 3a i 3b przedstawiono serię wykresów uzyskanych przy symulacji dwu wariantów strategii produkcji. Przyjmując dość wyrafinowany przebieg charakteryzujący zmiany popytu w czasie (rys. 2), określono zmiany dochodów uzyskanych przy bardziej zachowawczej strategii (rys. 3a) – przedsiębiorstwo zapewnia szybszy czas dostawy kosztem możliwie nieco wyższej ceny – oraz strategii obciążonej ryzykiem (rys. 3b) – przedsiębiorstwo zapewnia niższą cenę, jednak ryzykuje dłuższy czas dostawy towaru. Jak widać, w tym drugim przypadku sytuacja przedsiębiorstwa okazała się mniej korzystna, trend ten nasilił się w drugiej części symulacji, gdy klienci zaczęli przywiązywać większą wagę do czasu dostawy niż do ceny.



Rys. 2. Popyt na produkt finalny



Rys. 3. Sprzedaż przedsiębiorstwa o strategii zachowawczej (a) i obciążonej ryzykiem (b)

## 4. Podsumowanie

W artykule rozważano problem agentowego modelowania łańcuchów dostaw, szkicując koncepcję formalizacji projektowania tej klasy systemów. Podano również przykład modelowania pewnych fragmentów systemu produkcyjnego.

Przeprowadzone rozważania pokazują, że rozwiązanie postawionego zadania wymaga dużego nakładu zarówno prac koncepcyjnych jak też programistycznych. Równocześnie jednak, uzyskanie interesujących rezultatów, chociażby przy daleko posuniętych założeniach upraszczających, uznać należy za całkowicie realne.

## Literatura

- [1] Trading Agent Competition – TAC SCM Game Description. <http://www.sics.se/tac/>.
- [2] Bergenti F., Gleizes M.-P., Zambonelli F. (red), *Methodologies and Software Engineering for Agent Systems. The Agent-Oriented Software Engineering Handbook*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] Collins J., Arunachalam R., Sadeh N., Eriksson J., Finne N., Janson S., *The supply chain management game for 2007 trading agent competition*. Technical Report CMU-ISRI-07-100, 2007.
- [4] He M., Rogers A., Luo X., Jennings N.R., *Designing a successful trading agent for supply chain management*. AAMAS '06: Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, New York, NY, USA, 2006, ACM.
- [5] Kolarz P., Marszałek J., *Opracowanie i realizacja 'srodowiska agentowego do modelowania procesu produkcji*. Praca dyplomowa-magisterska, Katedra Informatyki AGH, 2007.
- [6] Moyaux Th., Chaib-draa B., D'Amours S., *Supply Chain Management and Multiagent Systems: An Overview*. [w:] Brahim Chaib-draa, Jorg Muller, (red.), *Multiagent based Supply Chain Management*, Studies in Computational Intelligence, vol. 28, Springer-Verlag, 2006.
- [7] Nawarecki E., Koźlak J., *Building multi-agent models applied to supply chain management*. Control and Cybernetics, 2009, przyjęte do publikacji.
- [8] Weiming Shen, Douglas H. Norrie., *Agent-based systems for intelligent manufacturing: A state-of-the-art survey*. Knowl. Inf. Syst., 1(2), 1999.
- [9] Swaminathan J., Smith S., Sadeh N., *Modeling supply chain dynamics: A multiagent approach*. Decision Sciences, 29(3), 1998.