

SYSTEM WIELOAGENTOWY DO BUDOWANIA ŁAŃCUCHÓW DOSTAW W BRANŻY KOMPUTEROWEJ¹

1. Wstęp

W ostatnich latach bardzo dużo nadziei pokłada się w zastosowaniu systemów wieloagentowych w elektronicznych łańcuchach dostaw. Niektórzy badacze przewidują nawet, że wykorzystywana do ich budowy technologia agentowa będzie podstawą nowej generacji oprogramowania przeznaczonego do zarządzania łańcuchem dostaw. W przyszłych systemach liczne agenty programowe mają być zaimplementowane do reprezentowania każdego ogniwa sieci przedsiębiorstw.

Agenty stanowią niewątpliwie remedium na gwałtowny wzrost informacji powstających w sieci przedsiębiorstw. Autonomiczne programy, działające w imieniu delegujących ich użytkowników lub innych agentów, w połączeniu z nowoczesnymi standardami tworzenia informacji, mogą filtrować dane pochodzące z różnych źródeł oraz dostarczać przedsiębiorstwom potrzebne i aktualne informacje. Przytoczone przesłanki i spostrzeżenia stały się motywacją do rozpoczęcia badań oraz napisania tej pracy. Celem opracowania było zaprojektowanie i zaimplementowanie modelu DyConSC, który bazuje na systemie wieloagentowym oraz teorii grafów. Ma on przede wszystkim umożliwić dynamiczne konfigurowanie łańcucha dostaw w branży komputerów osobistych, w szczególności dostarczać informacje dotyczące wszystkich członków sieci przedsiębiorstw, wspierać procesy decyzyjne lidera, a co najważniejsze, pomagać w wyborze optymalnego łańcucha dostaw.

2. Branża komputerowa i jej łańcuchy dostaw

Branża komputerowa jest częścią sektora elektronicznego. Z uwagi na bardzo dużą konkurencję i szybko zmieniający się popyt klientów, strategiczną bronią, a zarazem warunkiem przetrwania w tym sektorze, jest umiejętność konkurowania czasem. Długie cykle wprowadzania wyrobów na rynek i dostaw są niedopuszczalne w związku z wysokim stopniem innowacyjności nowych produktów oraz ich szybkim starzeniem się moralnym. Dostawy półprzewodników do producentów są realizowane zgodnie ze strategią just-in-time, a niskie stany zapasów są branżowym standardem [15]. Cechą charakterystyczną branży komputerowej są dość długie łańcuchy dostaw, które w głównej mierze wynikają z koncentracji produkcji w Azji, a sprzedaży na całym świecie. Nie oznacza to jednak, że te łańcuchy dostaw nie są elastyczne. W bardzo krótkim czasie są w stanie dostosować się do zmieniających się warunków rynkowych.

Branża komputerowa, podobnie jak branża motoryzacyjna, charakteryzuje się produkcją seryjną, która jest bardzo zin-

dywidualizowana. Każdy klient chciałby otrzymać komputer, który spełnia jego wymagania. Ma on bowiem swoje indywidualne preferencje odnośnie do monitora, twardego dysku czy urządzeń opcjonalnych, takich jak: drukarka, kamera internetowa itp. Jeśli producenci i dystrybutorzy mieliby składować wszystkie możliwe konfiguracje komputerów, to potrzebna byłaby większa przestrzeń magazynowa, co wiązałoby się z ogromnymi kosztami. W tej chwili ostateczna konfiguracja komputera jest odkładana do momentu złożenia zamówienia przez klienta (ang. *postponement*), po czym konkretne części, zgodnie z zamówieniem, są instalowane i wysyłane do zamawiającego. Oczywiście, aby klient był usatysfakcjonowany, wysyłka towaru musi nastąpić niedługo po złożeniu zamówienia i dotrzeć do niego w nienaruszonym stanie, bez opóźnień i z pokwitowaniem potwierdzającym dostawę oraz płatność.

Produkcją, projektowaniem i dystrybucją komputerów zajmują się najczęściej dostawcy drugiego rzędu, tak zwani ODM (ang. *Original Design Manufactures*). Do najbardziej znanych należą firmy: Compal, Quanta, Asustek. W większości mają one swoje siedziby na Tajwanie, skąd – według badań rynkowych firmy iSuppli z 2006 roku – pochodziło 82,6% wyprodukowanych notebooków na świecie.

Przedsiębiorstwa flagowe (FC, ang. *Flagship Company*), które są właścicielami takich marek jak: Dell, HP, Apple, Toshiba, Acer, kontrolują zakupy kluczowych komponentów niezbędnych do produkcji komputerów przez ODM, a te z kolei są odpowiedzialne za zakupy od dostawców trzeciego rzędu [4].

Przepływ informacji i realizację procesów handlowych między FC a ODM wspomagają systemy zarządzania przedsiębiorstwami (ERP) i łańcuchami dostaw (SCM). Między firmami odbywa się również elektroniczna wymiana danych (EDI). Spora część firm używa także standardów RosettaNet. Natomiast współpraca między ODM i ich dostawcami ma charakter mniej formalny – jej podstawą są dobre relacje międzyludzkie, zaufanie, a głównymi narzędziami komunikacji są telefon i faks. Tylko nieliczni dostawcy trzeciego rzędu inwestują w technologie informacyjne. Dostawcy ci mają silne powiązania nieformalne z dostawcami czwartego rzędu. Takie właśnie nieformalne powiązania i charakterystyka prowadzonego biznesu w Azji stanowią ryzyko dla poprawnego funkcjonowania łańcuchów dostaw. Autorzy raportu *Technology and Organizational Factors in the Notebook Industry Supply Chain* wskazują, że największym problemem jest brak pełnej automatyzacji wymiany informacji między wszystkimi członkami sieci przedsiębiorstw [6]. Uniemożliwia to bieżącą kontrolę łańcucha dostaw przez firmy flagowe. Również

¹ Niniejszy artykuł został opracowany na podstawie pracy doktorskiej, która zdobyła II nagrodę w ogólnopolskim konkursie na najlepszą pracę doktorską, zorganizowanym przez **Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją** w roku 2009.

charakterystyczna dla tej branży produkcja na zlecenie (ang. *configure-to-order*, *assemble-to-order*), która musi być bardzo szybka i elastyczna, jest przez to utrudniona.

Dodatkowo, branża komputerowa, jak wspomniano wcześniej, cechuje się dużą „wrażliwością czasową”. Kiedy popyt klientów oraz linie produkcyjne i sieć dystrybucji często się zmieniają, to konieczne jest umożliwienie każdemu ogniwiu z sieci przedsiębiorstw samodzielnego dostosowania jego planów, które będą wykonalne zarówno w pojedynczej firmie, jak i w całym łańcuchu dostaw. W praktyce jednak trudno jest to osiągnąć. Wynika to między innymi z braku istnienia kompleksowych rozwiązań w tym zakresie. Zazwyczaj przedsiębiorstwo składa zapytania ofertowe kilku podmiotom, a następnie wybiera najbardziej interesującą propozycję. Niestety jest to bardzo czasochłonne zadanie i wymaga sprawnego systemu przepływu informacji oraz analizy danych. Szybko zmieniające się warunki współpracy oraz otoczenie biznesowe powodują, że oferta podmiotu, która była atrakcyjna kilka tygodni temu, może być dzisiaj niedostępna lub mniej korzystna.

Kolejnym problemem tej branży, jak również wielu innych, jest to, że przedsiębiorstwa, które dobierają partnerów do realizacji transakcji nie biorą pod uwagę efektywności całego łańcucha dostaw. Bazując one często na tzw. optymalizacji lokalnej i rozważają tylko kwestię współpracy z najbliższymi dostawcami i odbiorcami (np. kierując się kryterium najniższej ceny i najwyższej zyskowności). W efekcie tak konstruowany łańcuch dostaw nie musi być najtańszy czy najbardziej efektywny z perspektywy całej sieci przedsiębiorstw. Wynika to między innymi z powodu niechęci dzielenia się informacjami ze wszystkimi uczestnikami sieci i braku odpowiednich systemów informatycznych.

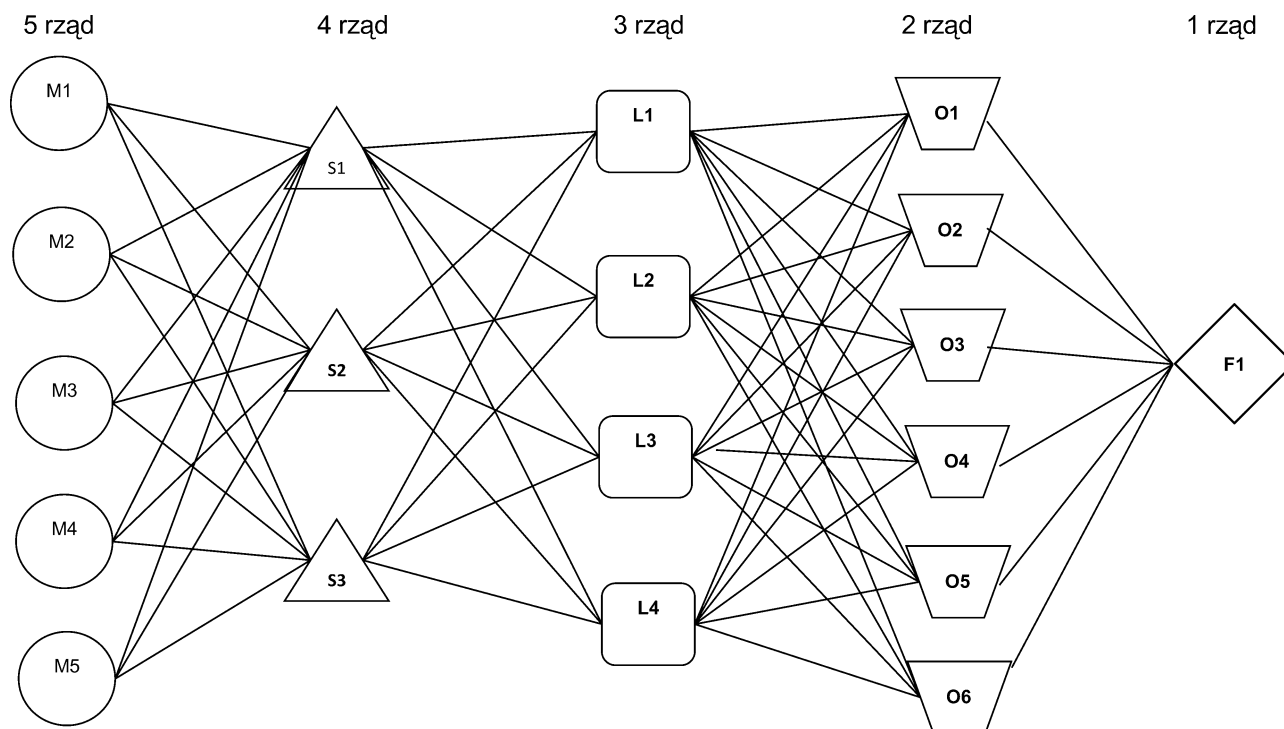
Niezależnie od opisanych wyżej problemów i wspomnianego braku pełnej automatyzacji wymiany informacji, to jest to jednak jedna z nielicznych branż, której procesy bizneso-

we są tak bardzo ustandaryzowane, i która ma stosunkowo dobrze rozwiniętą architekturę informatyczną w porównaniu do innych (głównie za sprawą konsorcjum RosettaNet, zajmującym się rozwojem, wdrażaniem i promocją otwartych standardów elektronicznej gospodarki dla branży technologii informacyjnych). Z tego powodu stała się ona przedmiotem badań autora.

3. Konfigurowanie łańcuchów dostaw z wykorzystaniem teorii grafów

W danej sieci przedsiębiorstw branży komputerowej istnieje bardzo dużo połączeń między dostawcami kolejnych rzędów, co w efekcie daje możliwość powstawania wielu łańcuchów dostaw. Dzieje się tak, ponieważ przedsiębiorstwo flagowe może współpracować z kilkudziesięcioma dostawcami, nawet w jednej grupie asortymentowej, a ci z kolei z dostawcami kolejnych rzędów itd. Poszczególne dostawcy mogą uczestniczyć w więcej niż jednym łańcuchu dostaw, które mogą być względem siebie konkurencyjne. Na rysunku 1. przedstawiono obraz takiej sieci. W celu uproszczenia dalszej analizy przyjęto, że w sieci występują tylko powiązania pionowe (między dostawcami i odbiorcami). Rozpatrując tę sieć w kontekście jednej z dziedzin matematyki – teorii grafów, można stwierdzić, że sieć ta (oznaczymy ją jako G) ma postać grafu warstwowego (kolejne rzędy dostawców są ze sobą połączone), w którym można wyróżnić wierzchołki (poszczególne przedsiębiorstwa) i krawędzie (przepływy między przedsiębiorstwami). Taka sieć ma n źródeł (w tym przypadku liczba dostawców piątego rzędu) i m ujść (liczba dostawców pierwszego rzędu).

W sieci między poszczególnymi wierzchołkami odbywa się przepływ wzdłuż krawędzi (i, j) . Każda taka krawędź ma swoją maksymalną przepustowość c_{ij} i związany jest z nią określony przepływ f_{ij} oraz koszt jednostkowy przesyłu d_{ij} .



Rys. 1. Przykładowa sieć przedsiębiorstw branży komputerów osobistych składającej się z kolejnych rzędów dostawców

Ten „koszt” może reprezentować dowolną miarę zależną od zastosowań (czas przejazdu, zużycie paliwa, ocena syntetyczna współpracy z dostawcą itp.).

Powołując się na jedną z definicji łańcucha dostaw [10], można przyjąć, że konfigurowanie łańcucha dostaw jest układem powstającym w grafie, w ramach którego odbywa się przepływ od źródła s do ujścia t . Należy więc znaleźć taki przepływ (lub przepływy) o wartości θ (zwany docelowym przepływem) z punktu s do t , który spełnia zadane kryteria. Najczęściej szuka się przepływu θ , który ma sumarycznie najmniejszy koszt.

Do znalezienia odpowiedniego przepływu z najmniejszymi kosztami potrzebne jest sprowadzenie tego zagadnienia do tzw. problemu najtańszego przepływu. Problem ten można rozwiązać ogólnymi metodami programowania liniowego (np. metodą przeglądu zupełnego), jednakże ze względu na jego sieciową strukturę, jest to nieefektywne [1]. Warto na to zwrócić uwagę, gdyż obecnie za jeden z problemów systemów informatycznych uważa się czas obliczeń. Kryterium czasu jest szczególnie ważne w systemach, które na bieżąco przetwarzają pojawiające się nowe dane, aktualizują ich strukturę i dostarczają aktualne informacje wspomagające podejmowanie decyzji. „W takim przypadku reakcja systemu na zmieniające się warunki rynkowe musi być natychmiastowa – inaczej opracowana ekspertyza będzie nieaktualna już w momencie dostarczenia jej użytkownikowi” [12]. W związku z tym do rozwiązania problemu najtańszego przepływu o określonej wartości ze źródła s do ujścia t w sieci pomocny jest odpowiedni algorytm, taki jak na przykład algorytm Busackera-Gowena [2].

Działanie algorytmu Busackera-Gowena polega na zwiększaniu przepływu wzdłuż kolejnych ścieżek o jak największą ilość (równą ich przepustowości). Kolejność wyznaczania ścieżek zależy od ich długości, którą w tym przypadku są koszty jednostkowe [1]. W pierwszym kroku algorytmu znajdowana jest najtańsza ścieżka z s do t (stosuje się tu osobny algorytm wyznaczania najkrótszych dróg – patrz dalej). Jeśli zrealizowano przepływ o wartości θ , to cel całego zadania został osiągnięty. Jeśli nie, to sieć jest modyfikowana z uwzględnieniem dotychczas znalezionej przepływu. W zmodyfikowanej sieci G^* (zwanej też siecią rezydualną) szuka się ponownie najtańszej ścieżki z s do t i przesyła się nią możliwie najwięcej jednostek. Warto jednak zauważyć, że koszty jednostkowe odpowiadające nowopowstałym krawędziom są wyznaczone zgodnie z równaniem $d_{ij}^* = -d_{ji}$. Te dwa kroki są na przemian powtarzane tak długo, aż otrzymany zostanie przepływ o docelowej wartości θ albo bieżąca sieć nie zawiera już ścieżki z s do t [15].

Jak zauważono wyżej, aby znaleźć najtańszą ścieżkę z s do t trzeba zastosować algorytm znajdowania najkrótszych dróg. Wśród najbardziej rozpowszechnionych można wymienić algorytmy Dijkstry i BMEP. Jednakże ten pierwszy stosuje się tylko wtedy, gdy wagi krawędzi są nieujemne. Jest to znacznym utrudnieniem, ponieważ modyfikując sieć zgodnie z algorytmem Busackera-Gowena, koszty odpowiadające krawędziom mogą przybierać zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne. Problem ten rozwiązuje jednak algorytm BMEP (autorstwa czterech naukowców: Bellman’a, Moore’a, d’Escopo’go, Pape’go). W tym algorytmie w każdym kroku sprawdza się, czy można skrócić ścieżkę do jakiego-

kolwiek wierzchołka przez zmianę jego poprzednika na dotychczasowej najkrótszej ścieżce. Wierzchołki, które należy jeszcze sprawdzić, są przechowywane w kolejce [16].

4. Model symulacyjny DyConSC

W dalszej części artykułu zostanie przedstawiony model symulacyjny DyConSC (ang. *Dynamic Configuration of Supply Chain*), który bazuje na opisanych wcześniej algorytmach teorii grafów oraz metodyce konfigurowania łańcucha dostaw [9] i technologii agentowej [7, 12].

Zgodnie z proponowaną metodyką [9], najpierw budowana jest sieć przedsiębiorstw, która powstaje z wyodrębnienia większej sieci gospodarczej. W modelu DyConSC wyróżniono pięć rzędów dostawców (por. rys. 1). Do pierwszego rzędu należy przedsiębiorstwo flagowe (FC), do drugiego firmy ODM, a za nimi kolejno dostawcy (SUPS, ang. *suppliers*), poddostawcy (SUBBS, ang. *subsuppliers*) i fabryki (MINES, ang. *mines*). Przykładowo, w proponowanym modelu FC zajmuje się sprzedażą produktów pod własną marką wyprodukowanych przez inne firmy, natomiast ODM buduje komputery, SUPPS dostarcza podzespoły (np. płyta główna, procesor, pamięć RAM, twardy dysk, karta graficzna, monitor, klawiatura, myszka), z kolei SUBBS produkuje elementy tych podzespołów (np. części plastikowe, śrubki, przełączniki, kondensatory, rezystory), a MINES surowce do tych elementów (np. plastik, żelazo). W modelu DyConSC celowo skupiono się na tzw. produkcyjnym łańcuchu dostaw i pominięto dalszą część sieci łączącą przedsiębiorstwo flagowe z dystrybutorami, dystrybutorami ze sprzedawcami, a sprzedawców z ostatecznym klientem. Sieć dystrybucyjna gotowych produktów jest bowiem o wiele mniej ustrukturyzowana niż sieć produkcyjna. Dodatkowo, coraz częściej pomija się rolę pośredników w sprzedaży gotowych komputerów. Klient może bowiem zamówić bezpośrednio komputer w firmie flagowej przez stronę internetową (np. www.dell.com). Dlatego też w modelu przyjęto, że sieć zaczyna się na FC, a kończy na dostawcy piątego rzędu (MINES).

Miedzy kolejnymi rzędami odbywają się przepływy rzeczy, informacji i środków finansowych. Wszystkie dostawy rzeczy realizowane są sekwencyjnie od dostawcy ostatniego rzędu do dostawcy pierwszego rzędu (w rzeczywistości sieci FC mogą pomijać ODM i kupować bezpośrednio od dostawców trzeciego rzędu, podobnie ODM może zaopatrywać się w pewne materiały u dostawcy czwartego rzędu). Przepływ informacji jest możliwy dzięki agentom programowym. Autonomiczne agenty reprezentujące różne przedsiębiorstwa współpracują ze sobą, koordynują i negocjują warunki, aby osiągnąć wspólny cel, podczas gdy każdy agent może próbować zapewnić własny interes delegującego go użytkownika. Natomiast przepływ środków finansowych odbywa się w kierunku przeciwnym do przepływu rzeczy.

5. Założenia modelu DyConSC

Należy zauważyć, że konfigurowalna sieć powinna być samodopasującym się i prężnym systemem, reagującym na zmiany w poszczególnych jego częściach. Planowanie potrzeb materiałowych i produktowych z wielotygodniowym

wyprzedzeniem jest w praktyce mało efektywne. W dynamicznie zmieniających się warunkach prognoza szybko się dezaktualizuje. Jest to szczególnie widoczne w produktach kupowanych na zamówienie. Dlatego informacje o bieżącej sytuacji w sieci muszą być ciągle aktualizowane i przechowywane w jednym, dostępnym dla wszystkich zainteresowanych, miejscu. Takim miejscem jest rejestr publiczny, który jest utrzymywany na dedykowanym serwerze.

Na czele danej sieci przedsiębiorstw stoi FC, które kształtuje zakres swojej działalności zgodnie z koncepcją kluczowych kompetencji. Steruje ono w czasie rzeczywistym całym procesem tworzenia wyrobu od momentu pozyskania surowców do dostarczenia ich do ostatecznego klienta. FC buduje łańcuch dostaw w ramach danej sieci przedsiębiorstw. Taki łańcuch powstaje na potrzeby konkretnej transakcji, która jest wywoływana popytem klienta (np. przez złożenie zamówienia klienta za pomocą przeglądarki internetowej). FC zajmuje się również optymalizacją istniejących już łańcuchów dostaw i kontrolą ich sprawnej realizacji, tak aby sprostać oczekiwaniom klientów pod względem jakości obsługi, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów. Jednakże, zgodnie z przyjętym założeniem delegowania zadań przez FC realizatorom procesu, przedsiębiorstwa na każdym poziomie są bezpośrednio odpowiedzialne za organizację oraz koordynację strumieni (rzeczowych, informacyjnych i finansowych) generowanych przez dostawców i odbiorców kolejnego rzędu [20]. FC zarządza siecią dzięki swojej sile przetargowej. Bardzo dobrze zna strukturę kosztową wyrobów oraz wszystkich jego składowych i dzięki temu może decydować o kształcie produktu dostarczanego ostatecznemu użytkownikowi, sposobie jego wytwarzania i dystrybucji oraz komunikacji w sieci [17].

FC dysponuje narzędziem, które umożliwia wizualizację sieci składającej się ze wszystkich dostawców i odbiorców, relacji zachodzących między nimi oraz przegląd całego procesu produkcyjnego. Ma ono również informacje, które z ogniw charakteryzują się największą rentownością, co umożliwia wybranie najbardziej efektywnego przepływu (czyli łańcucha dostaw). Jest to możliwe dzięki zastosowaniu teorii grafów i technologii agentowej.

Zasadniczym założeniem proponowanego podejścia jest więc przyjęcie modelu rozważanej rzeczywistości w postaci grafu warstwowego, w którym poszczególne wierzchołki i krawędzie reprezentowane są przez agenty programowe. W modelu symulacyjnym DyConSC przyjęto również szereg dodatkowych założeń, które są niezbędne do prawidłowego jego zrozumienia i działania. Zakłada się, że:

- Każdy członek sieci przedsiębiorstw jest reprezentowany przez agenta programowego.
- Wszyscy dostawcy mają taki sam lub bardzo podobny proces produkcyjny.
- FC ma dostęp do informacji o cenach, jakości itp. oraz podaży wyrobów (zdolności produkcyjnych) oferowanych przez wszystkich uczestników sieci przedsiębiorstw.
- Pojedyncze zamówienia klientów są zbierane i konsolidowane w określonych odstępach czasu (np. raz na dzień), a następnie przekazywane do realizacji poszczególnym członkom skonfigurowanego łańcucha dostaw.

- Dla każdego zamówienia zbiorczego budowane są osobne grafy, w których reprezentowane są bieżące powiązania między przedsiębiorstwami.
- W całej sieci stosuje się jednolitą strukturę materiałową (BOM, ang. *Bill of Materials*). BOM dostarcza niezbędnych informacji do obliczania wielkości zleceń produkcyjnych i zaopatrzeniowych, dzięki temu dostawcy kolejnych rzędów wiedzą, jakie i w jakich ilościach dostarczać produkty, półprodukty, podzespoły, poszczególne elementy, surowce, aby wyprodukować komputer [13]. Przykładowo, notebook składa się z płyty głównej, karty graficznej, 2 kostek pamięci RAM itd., do tego potrzebne są 4 części plastikowe, 48 śrubek, 10 kondensatorów, 4 przełączniki itp., które natomiast są wyprodukowane z 500 gramów plastiku, 200 gramów żelaza.
- Odbiorca udostępnia swojemu dostawcy wykaz stosowanych półproduktów, podzespołów, surowców z określeniem wymogów (warunków brzegowych) dotyczących wielkości opakowania, czasu pierwszej dostawy, minimalnego zapasu, okresu gwarancji, ceny itp.
- Transport między kolejnymi rzędami dostawców odbywa się w jednolitych jednostkach ładunkowych (np. na europaletach).
- Realizacją przepływów między dostawcami i odbiorcami może zająć się samo przedsiębiorstwo lub zewnętrzny usługodawca (np. operator logistyczny, firma kurierska).
- „Koszt przesyłu d_{ij} ” z grafu G jest wypadkową oceny syntetycznej współpracy odbiorcy z dostawcą. Agent programowy każdego odbiorcy przeprowadza oceny swoich bezpośrednich dostawców, biorąc pod uwagę zestaw kryteriów, i następnie umieszcza je na serwerze rejestru publicznego. Te informacje są na bieżąco uaktualniane.
- Suma przepływów f_{ij} wychodzących od danego dostawcy do jego odbiorców jest równa wielkości podaży (zdolności produkcyjnych) danego dostawcy.
- Przedsiębiorstwa w sieci działają na zasadzie otwartych ksiąg (dzięki zastosowaniu rachunku kosztów działań ABC). Umożliwia to łatwiejszą identyfikację strat oraz zysków powstających w przepływach między kolejnymi dostawcami i odbiorcami.
- Sieć bazuje na strategii pull. Jak już wspomniano, to klient inicjuje konfigurację łańcucha dostaw przez złożenie zamówienia. Także kolejne rzędy, dzięki ścisłym powiązaniom, mogą z powodzeniem stosować tą strategię.
- Standaryzacja procesów i systemów informatycznych wszystkich firm biorących udział w sieci jest niezmierznie ważna, ale nade wszystko nie powinna ona ograniczać procesów twórczych i innowacyjnych.

6. Eksperymenty symulacyjne

W dalszej części tego artykułu zastosowano symulację komputerową, której nadrzędnym celem jest przedstawienie przebiegu konfigurowania łańcucha dostaw w sieci przedsiębiorstw branży komputerowej z wykorzystaniem modelu DyConSC. Za pomocą specjalnego oprogramowania, w którym zaimplementowano model, zbadano również wpływ zmiany parametrów wejściowych na zachowanie i charakterystykę konfigurowanych łańcuchów dostaw.

6.1. Środowisko symulacji

Możliwości i efektywność modelu DyConSC sprawdzono za pomocą *NetLogo*, które jest zintegrowanym środowiskiem symulacji, ale jednocześnie językiem programowania. *NetLogo* jest wykorzystywane zarówno w badaniach naukowych, jak i dla celów edukacyjnych. Szczególnie dobrze sprawdza się w modelowaniu złożonych systemów rozwijających się wraz z upływem czasu. Może być użyte jako narzędzie do pozyskiwania zasobów na giełdach elektronicznych, budowania modeli ruchu drogowego i ich symulacji [8], zarządzania odnawialnymi zasobami [5] i innych celów. Modele zaimplementowane w *NetLogo* mają również coraz częściej zastosowanie w praktyce, przykładowo australijski departament obrony wykorzystuje to środowisko do modelowania walki zbrojnej [18].

W *NetLogo* osoba modelująca może dać instrukcje wielu niezależnie działającym agentom, które mogą wzajemnie na siebie oddziaływać i wykonywać wieloaspektowe zadania [19]. Dzięki temu możliwe jest zbadanie związku pomiędzy zachowaniem pojedynczych osobników i prawidłowości wynikających z interakcji pomiędzy nimi. Agenty mogą być ze sobą połączone za pomocą linków (ang. *links*), które (podobnie jak agenty) są również programowalne. Ponadto *NetLogo* umożliwia wizualizację tego, co modelujący zaprogramował. Jest to bardzo istotne, ponieważ w literaturze przedmiotu dostrzega się problem nadzorowania przez firmę flagową rozbudowanej sieci, w której mogą być tysiące elementów podzespołów i materiałów, setki wyrobów gotowych itp. [17] *NetLogo* rozwiązuje ten problem, oferując bardzo czytelną i zrozumiałą dla decydentów prezentację zaprojektowanego modelu. Warto również dodać, że wizualizacja jest możliwa w technice trójwymiarowej (ang. *3D*).

Program ten ma rozbudowany mechanizm importu i eksportu danych. Dzięki temu zaimplementowany model może być zasilany danymi z zewnętrznych systemów informatycznych (ERP, SCM itp.), jak również sam może zasilac danymi te systemy.

6.2. Założenia symulacji

Poszczególne przedsiębiorstwa (reprezentowane przez agenty) współpracują ze sobą i wymieniają między sobą informacje (np. zapytanie o zdolności produkcyjne, cenę produktu) niezbędne do prawidłowego skonfigurowania łańcucha dostaw. Jak zaznaczono wcześniej, w modelu DyConSC wyróżniono pięć rzędów. W *NetLogo* są one reprezentowane przez pięć typów (ang. *breed*) agentów:

- *breed [flagships flagship]* reprezentuje dostawcę pierwszego rzędu,
- *breed [odms odm]* reprezentuje dostawców drugiego rzędu,
- *breed [supps supp]* reprezentuje dostawców trzeciego rzędu,
- *breed [subbs subb]* reprezentuje dostawców czwartego rzędu,
- *breed [mines mine]* reprezentuje dostawców piątego rzędu.

Dzięki takiemu podziałowi można poszczególnym typom agentów przypisać osobno różne zachowania i określić założenia, w zależności od roli, jaką pełnią w sieci.

Układ sieci w zaimplementowanym modelu DyConSC jest generowany losowo. Jeśli wierzchołki grafu (przedsiębiorstwa) nie mają odpowiednich połączeń ze swoimi poprzednikami (z wyjątkiem dostawców piątego rzędu) i następnikami (z wyjątkiem dostawców pierwszego rzędu), to są one eliminowane z sieci i nie są brane pod uwagę przy konfigurowaniu łańcucha dostaw przeznaczonego do realizacji zbiorczej transakcji biznesowej. W tym przypadku link między nimi również nie jest tworzony. Taki zabieg przyspiesza działanie algorytmów Busackera-Gowena i BMEP. Nie oznacza to jednak, że te wierzchołki nie będą rozpatrywane przy realizacji kolejnej transakcji, szczególnie, gdy będą miały odpowiednie połączenia.

Warto zauważyć, że liczby w *NetLogo* powstają zgodnie z algorytmem generatora liczb losowych *Mersenne Twister* za pomocą polecenia „random”. Generator ten daje stosunkowo szybko „wysokiej jakości” liczby i niweluje wady charakteryzujące starsze algorytmy [13].

W zaimplementowanym modelu przyjęto liczbę potencjalnych przedsiębiorstw w każdym rzędzie (poza pierwszym) między 1 a 100. Ta liczba może być zwiększana lub zmniejszana za pomocą suwaka (ang. *slider*), który jest dostępny w interfejsie użytkownika i określony jako *nodes-num* (rys. 2). W pierwszym rzędzie występuje tylko jedno przedsiębiorstwo (FC), które może konkurować z przedsiębiorstwami flagowymi reprezentującymi inne sieci.

Inne parametry, które mogą być również zmieniane za pomocą suwaka, to:

- *supply chain-demand* - popyt przedsiębiorstwa flagowego, który równa się całkowitemu popytowi łańcucha dostaw (jest on zmieniany od 100 do 1000 jednostek),
- *supply-ind* - wskaźnik zmienności podaży poszczególnych przedsiębiorstw z wyjątkiem FC (jest on zmieniany od 0.1 do 1.0).

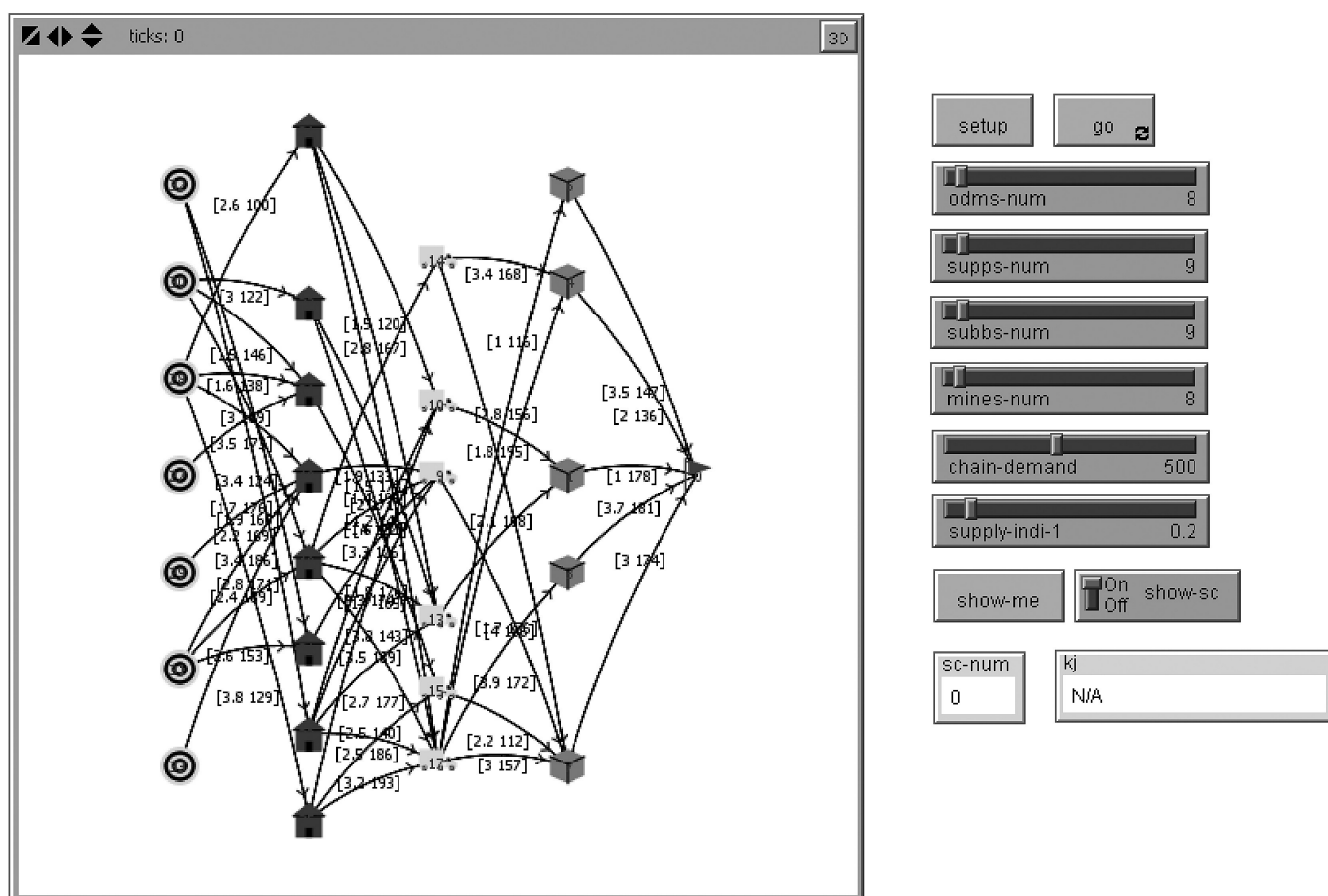
W przeprowadzonym eksperymencie popyt dostawcy pierwszego rzędu (*supply chain-demand*) został ustalony na poziomie 500 jednostek. Parametry linków (krawędzi) między poszczególnymi ogniwami (wierzchołkami) były generowane losowo (w praktyce dane mogą być pobierane z innych systemów informatycznych przedsiębiorstw) jako dwójka zmiennych [*cost l-supply*]:

- *cost* - koszt (w modelu symulacyjnym DyConSC rozumiany szerzej jako średnia ważona oceny współpracy odbiorcy z dostawcą),
- *l-supply* - przepustowość (podaż dostawcy/zdolności produkcyjne).

Ta pierwsza zmienna jest obliczana w programie w następujący sposób: $set\ cost\ (10 + random\ 31)/10$, co daje wartość między 1.0 a 4.0 (zwiększaną o 0.1).

Natomiast *l-supply* jest ustalana według formuły: $supply\ chain-demand * supply-ind + random\ (chain-demand * supply-ind)$. Przykładowo, jeśli *supply chain-demand* = 500 i *supply-ind* = 0.1, wtedy *l-supply* wynosi nie mniej niż 50 i nie więcej niż 99 jednostek.

Popyt FC może być zaspokojony w całości lub w części przez jeden lub kilka łańcuchów dostaw. Zależy to od wielkości podaży poprzedzającego go ogniwa, czyli w tym przypadku ODM. Podobnie zaspokojenie popytu ODM zależy od podaży poprzedzających go ogniw, czyli dostawców trzeciego rzędu. Analogicznie jest z dostawcami kolejnych rzędów.



Rys. 2. Interfejs wraz z widokiem modelu DyConSC w środowisku NetLogo

Aby znaleźć najtańszą ścieżkę (łańcuch dostaw) w sieci, uruchamiane są opisane wcześniej algorytmy Buskackera-Gowena i BMEP (rys. 3). W sieci takich łańcuchów może istnieć bardzo wiele (w zależności od zmienności popytu i podaży). Na rysunku 4. pokazano przykład, w którym zostały skonfigurowane tylko dwa łańcuchy dostaw.

Głównym celem przeprowadzonych symulacji było określenie wpływu zwiększenia liczby przedsiębiorstw w danym rzędzie (*nodes-num*) oraz wskaźnika zmienności ich podaży (*supply-ind*) na średnią liczbę łańcuchów dostaw (*sc-num*) i średni koszt (ocena syntetyczna dostawców) przesłania rzeczy przez łańcuch dostaw (*avg-cost*). Z uwagi na bardzo dużą liczbę zaplanowanych eksperymentów użyto narzędzia *BehaviorSpace*, będącego integralną częścią środowiska NetLogo, które umożliwia eksportowanie danych z przeprowadzonych symulacji do zewnętrznych plików. Wszystkie zebrane dane były analizowane w pakiecie oprogramowania statystycznego Statistica i arkusza kalkulacyjnym MS Excel.

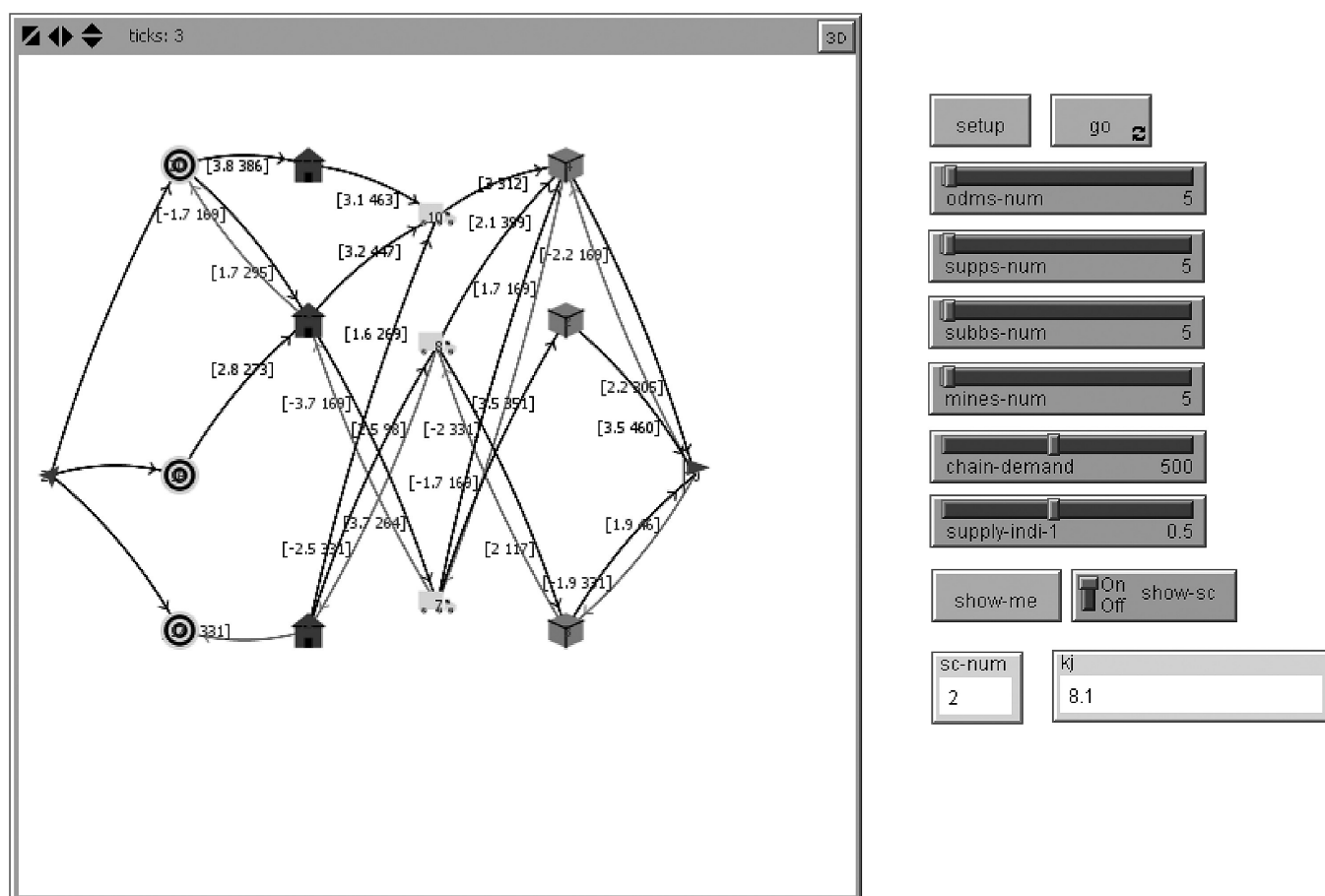
6.3. Wyniki i wnioski z przeprowadzonych eksperymentów

W pierwszej części badania wykonywane były symulacje, w których zmieniano liczbę przedsiębiorstw w poszczególnych rzędach (*nodes-num*) o 10 jednostek, z 10 do 100, przy zachowaniu stałości liczby przedsiębiorstw w innych rzędach i założeniu, że *supply-ind* = 0.2 i *supply chain-demand* = 500. Symulacje przeprowadzono 1000 razy dla każdego przypadku, co dało 10 000 symulacji dla każdego rzędu dostawców, czyli w sumie 40 000 dla całej sieci.

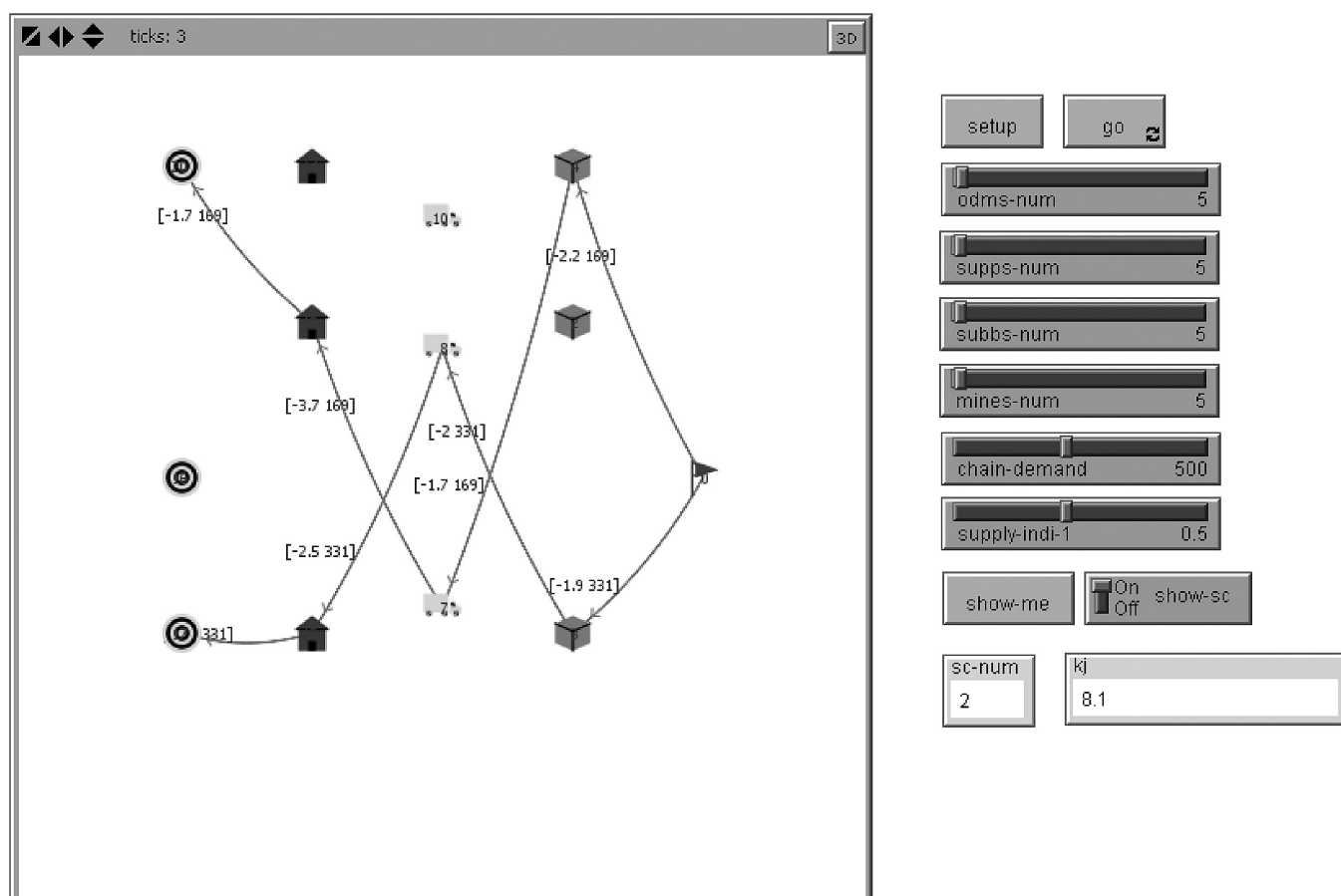
Wyniki symulacji pokazują, że wraz ze wzrostem *nodes-num*, zmienia się średnia liczba łańcuchów dostaw (*sc-num*) (rys. 5). Ta zmiana jest jednak nieproporcjonalna. Przykładowo, zmieniając liczbę dostawców czwartego rzędu (*subbs*) 10-krotnie (z 10 do 100), średnia liczba łańcuchów zmniejszyła się tylko o 7%, w przypadku dostawców drugiego rzędu (*odms*) liczba ta spadła o 4,5%, natomiast zwiększając liczbę dostawców trzeciego rzędu (*supps*) wystąpił nawet wzrost *sc-num* o 2,5%. Można więc stwierdzić, że zmiana liczby dostawców w poszczególnych rzędach nie wpływa istotnie na liczbę konfigurowanych łańcuchów dostaw.

Inaczej jest w przypadku *avg-cost*, gdzie te zmiany są bardziej widoczne (rys. 6). Średni koszt (wraz ze wzrostem *nodes-num*) spada przeciętnie o 16%, a najszybciej dla dostawców drugiego rzędu (*odms*) - o 20%. Tę zależność można tłumaczyć tym, że im więcej jest firm w danym rzędzie, tym ich oferty są bardziej konkurencyjne i klienci mają większy wybór dostawców. W efekcie konfigurowane są bardziej efektywne łańcuchy dostaw, składające się z najlepszych przedsiębiorstw. Ponadto, analizując wykres na rysunku 6., można zauważyć, że im więcej jest ogniw bliżej FC (czyli kolejno *odms*, *supps*, *subbs* i *mines*), tym niższy jest średni koszt, przy założeniu, że *supply-ind* jest stałe.

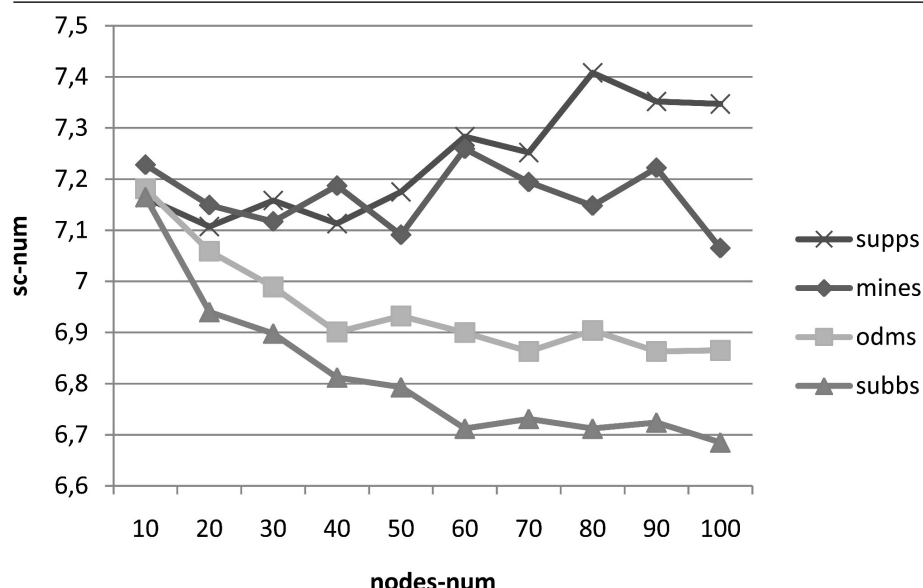
W drugiej części eksperymentu zbadany został wpływ zmiany wskaźnika zmienności podaży poszczególnych przedsiębiorstw (*supply-ind*) na *sc-num* i *avg-cost*, przy założeniu niezmiennych *num-nodes* (po 10 dla każdego rzędu). W tej grupie symulacji zmieniano *supply-ind* o 0.1, z 0.1 do 1.0. Popyt FC (*supply chain-demand*) równał się 500, więc podaż



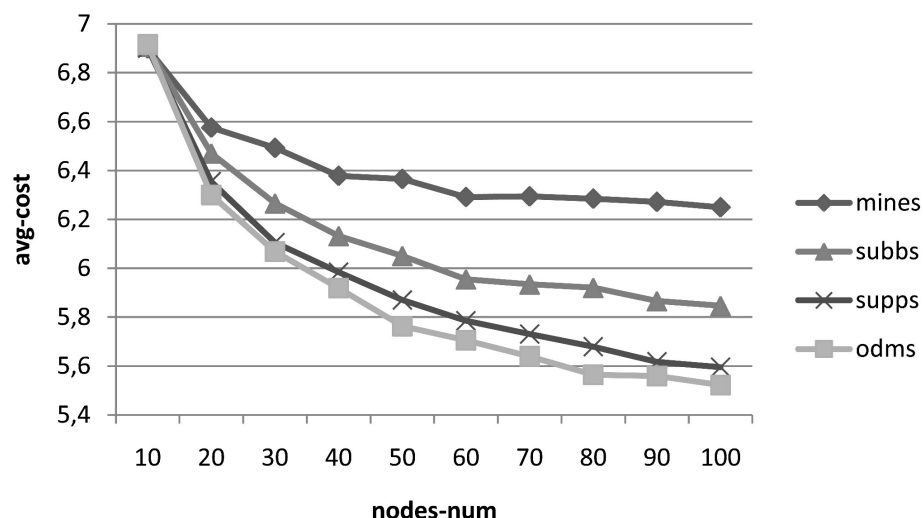
Rys. 3. Model DyConSC w środowisku NetLogo po uruchomieniu algorytmów Busackera-Gowena i BMEP



Rys. 4. Skonfigurowane łańcuchy dostaw wraz z wielkościami przepływów w modelu DyConSC w środowisku NetLogo



Rys. 5. Wpływ zmiany liczby przedsiębiorstw w poszczególnych rzędach na średnią liczbę konfigurowanych łańcuchów dostaw w sieci przedsiębiorstw



Rys. 6. Wpływ zmiany liczby przedsiębiorstw w poszczególnych rzędach na średni koszt konfigurowanego łańcucha dostaw w sieci przedsiębiorstw

przedsiębiorstw z pozostałych rzędów (*l-supply*) wynosiła od (50 + random 50) do (500 + random 500). Eksperyment, podobnie jak w poprzednim przypadku, był uruchamiany 1000 razy. Wyniki przeprowadzonej symulacji pokazują, że wraz ze wzrostem *supply-ind* średnia liczba łańcuchów dostaw gwałtownie spada z 17 do 1, czyli o 94%. Co ciekawe, zwiększając dwukrotnie *supply-ind* z 0.1 do 0.2, średnia liczba łańcuchów, które mogą szybciej zaspokoić popyt FC, spada z 17 do 7, czyli o 58%. Dalszy wzrost *supply-ind* nie wpływa tak bardzo na spadek *sc-num*. W wyniku wzrostu *supply-ind* obniża się *avg-cost* o 26%. Największy spadek (o 14%) można odnotować w przypadku zmiany tego parametru z 0.1 na 0.2 (rys. 7).

Analizując przedstawione dane, potwierdza się oczywista zależność, że bardziej opłaca się współpracować z przedsiębiorstwami, które mają większe zdolności produkcyjne (*l-supply*), czyli mogą zaoferować większą ilość produktów. Taka współpraca skraca też znacznie liczbę powstających

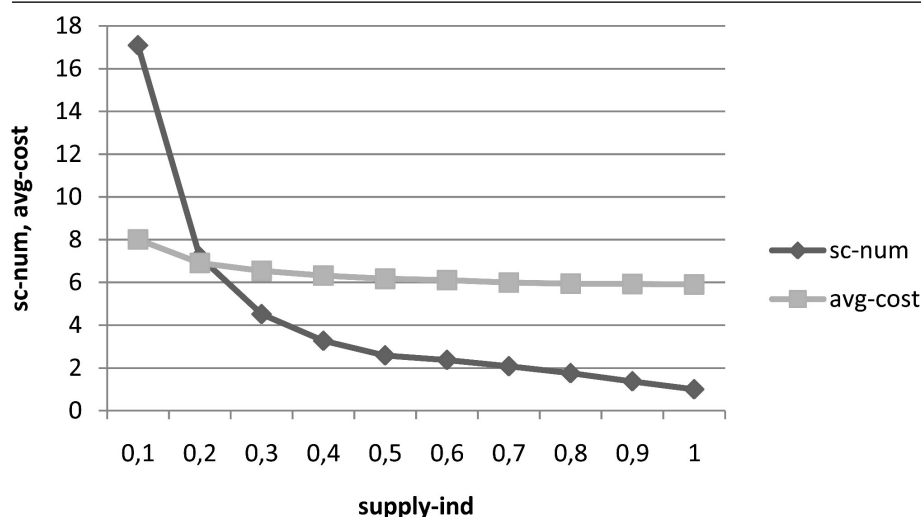
łańcuchów dostaw. Mimo że liczba łańcuchów dostaw w prezentowanym modelu nie wpływa znacząco na średni koszt jednostkowy przysyłanej rzeczy, to warto jednak pamiętać, że im większa liczba łańcuchów w sieci, tym większe rozdrobnienie dostaw, czyli więcej pracy i więcej potencjalnych problemów (rys. 7).

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono model systemu wieloagentowego DyConSC, który bazuje na teorii grafów. Ułatwia on przede wszystkim dynamiczne konfigurowanie łańcucha dostaw w branży komputerów osobistych. Prototyp modelu posłużył też do przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych, których nadrzędnym celem było przedstawienie przebiegu konfigurowania łańcucha dostaw w sieci przedsiębiorstw oraz zbadanie wpływu zmian parametrów wejściowych na zachowanie i charakterystykę konfigurowanych łańcuchów dostaw.

Literatura:

- [1] Anholcer M.: *Przepływy w sieciach*, [w:] *Badania operacyjne*, red. W. Sikora, Wydawnictwo PWE, Warszawa 2008.
- [2] Busacker, R.G., Gowen, P.J.: *A Procedure for Determining a Family of Minimal-Cost Network Flow Patterns*, O.R.O. Technical Report No. 15, Operational Research Office, John Hopkins University, Baltimore, MD 1961.
- [3] Chiu M., Lin G.: *Collaborative supply chain planning using the artificial neural network approach*, „Journal of Manufacturing Technology Management”, Vol. 15, No. 8/2004.
- [4] Dudzik M.: *Technologiczne i organizacyjne determinanty łańcucha dostaw w branży komputerów osobistych*, „Gospodarka Materialowa i Logistyka”, 2006, nr 5.
- [5] Damaceanu R. C.: *An agent-based computational study of wealth distribution in function of resource growth interval using NetLogo*, „Applied Mathematics and Computation” 2008, vol. 201, no. 1-2.
- [6] Foster W., Cheng Z.: *Technology and Organizational Factors in the Notebook Industry Supply Chain*, CAPS, USA 2006.
- [7] Fuks K., Kawa A., Wiczerzycki W.: *Dynamic Configuration and Management of e-Supply Chains Based on Internet Public Registries Visited by Clusters of Software Agents*. [w:] *HoloMAS 2007*, LNAI, Springer-Verlag 2007.



Rys. 7. Wpływ zmiany wskaźnika zmienności podaży poszczególnych przedsiębiorstw na średnią liczbę łańcuchów dostaw i ich średni koszt

- [19] Wilensky U.: *NetLogo itself*, NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL 1999.
- [20] Witkowski J.: *Logistyka w organizacjach sieciowych*, „Gospodarka Materiałowa i Logistyka” 2000, nr 7-8.

MULTI-AGENT SYSTEM TO SUPPLY CHAIN CONFIGURATION IN COMPUTER INDUSTRY

Abstract:

There are two main contributions of the work presented in this paper. The

first one is a particular approach to adapting multi-agent system and graph algorithms to the supply chain configuration in personal computer industry. The DyConSC model is described. The next contributions are the simulation experiments carried out in the NetLogo platform.

The DyConSC (Dynamic Configuration of Supply Chain) model is based on the software agents. This model is adapted from [7] and extended here with the graph theory. It is mainly aimed at building dynamic and flexible temporary supply chains. Nowadays it is especially important because customer demand, production lines and distribution network frequently change. This model enables each entity of the supply chain to independently adjust their plans in such a way that they become optimal both within one enterprise and the whole supply chain. Such a supply chain may be successfully realized by agent oriented systems. Agents representing various enterprises from particular tiers cooperate with one another, coordinate and negotiate conditions to achieve the common goal whereas every agent may try to attain the target of the individual user delegating it. Thanks to that optimizing supply chains holistically and obtaining significant benefits for the final customer become attainable, even if supply chain partners have differing objectives, perspectives and processes [3].

In order to check the capabilities of supply chain configuration and its effectiveness the simulations of the DyConSC model in the NetLogo (a cross-platform multi-agent programmable modeling platform) were carried out. The assumptions and environment of the modeling system are discussed. The experiment simulations are described, too. In the last section of this paper the results of the simulations and the findings are provided.

Dr Arkadiusz KAWA

Katedra Logistyki i Transportu
Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu
Al. Niepodległości 10
61-875 Poznań
arkadiusz.kawa@ue.poznan.pl

- [8] Janota A., Rastochny K., Zahradnik J., *Multi-agent approach to traffic simulation in NetLogo environment – level crossing model*, [w:] *Transport systems Telematics TST'05*, Zeszyty Naukowe, „Transport”, Politechnika Śląska, Gliwice 2005.
- [9] Kawa A.: *Metody konfigurowania łańcuchów dostaw w sieci przedsiębiorstw*, [w:] *Zarządzanie łańcuchami dostaw*, red. M. Ciesielski, Wydawnictwo PWE, Warszawa 2010 (w druku).
- [10] Kawa A., *Łańcuch dostaw*, [w:] *Strategie łańcuchów dostaw*, red. M. Ciesielski, J. Długosz, Wydawnictwo PWE, Warszawa 2010.
- [11] Kawa A.: *Zastosowanie technologii agentowej w konfigurowaniu łańcucha dostaw*, praca doktorska, promotor prof. dr hab. inż. Waldemar Wiecezrzycki, Wydział Zarządzania, Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, wrzesień 2009.
- [12] Korczak J., Lipiński P.: *Systemy agentowe we wspomaganiu decyzji na rynku papierów wartościowych*, [w:] *Rozwój informatycznych systemów wieloagentowych w środowiskach społeczno - gospodarczych*, red. M. Ganzha, M. Paprzycki, H. Sroka, S. Stanek, Wydawnictwo Placet, Warszawa 2008.
- [13] *Mersenne Twister Home Page*, [on-line]. Dostępny w Internecie: <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/emt.html>
- [14] Reid R., Sanders D., Nada R.: *Operations Management*, John Wiley&Sons, 2002.
- [15] Rutkowski K.: *Rola operatorów logistycznych w restrukturyzacji globalnych łańcuchów dostaw*, „Gospodarka Materiałowa i Logistyka” 2005, nr 12.
- [16] Sysło M.M., Deo N., Kowalik J.S.: *Algorytmy optymalizacji dyskretnej z programami w języku Pascal*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [17] Urbańczyk T.: *Sieci dostaw*, [w:] *Logistyka w biznesie*, red. M. Ciesielski, Wydawnictwo PWE, Warszawa 2006.
- [18] Wheeler S.: *On the Suitability of NetLogo for the Modelling of Civilian Assistance and Guerrilla Warfare*, DSTO Systems Sciences Laboratory, Australia 2005.