

Jerzy Feliks, Marek Karkula, Katarzyna Majewska

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Polska

WYKORZYSTANIE SYMULACJI KOMPUTEROWEJ DO ANALIZY ODPORNOŚCI SIECI LOGISTYCZNYCH

Rękopis dostarczono: kwiecień 2018

Streszczenie: Sieci logistyczne są skomplikowanymi systemami, złożonymi z wielu elementów połączonych ze sobą często nieliniowymi relacjami. Właściwość ta sprawia, że badanie tych systemów tradycyjnymi metodami analitycznymi napotyka wiele trudności. W związku z tym symulacja komputerowa jest cennym narzędziem w praktycznych zastosowaniach modelowania struktury sieci logistycznej, relacji między jej składnikami oraz zasadami regulującymi jej funkcjonowanie. Model symulacyjny można uruchomić w celu odtworzenia działania rzeczywistego systemu w określonym przedziale czasu i analizowania jego zachowania przy różnych założeniach.

W artykule zaproponowano miary odporności dla sieci logistycznych i zaprezentowano podejście wykorzystujące różne metody symulacji komputerowej do analizy tej odporności. Proponowana koncepcja pozwala na określanie i sprawdzanie możliwości i sposobów budowania długoterminowej odporności sieci logistycznych na poważne zakłócenia. Zastosowanie modelu zilustrowano przykładem z branży hutniczej. Do implementacji wykorzystano oprogramowanie AnyLogic 8.2.

Słowa kluczowe: sieci logistyczne, symulacje komputerowe, odporność

1. WSTĘP

W momencie pojawienia się koncepcji Lean Management zaczęto wprowadzać nowe pomysły ograniczenia kosztów i minimalizacji strat także do projektowania i zarządzania łańcuchami dostaw. Podejście to było wiodącym nurtem w zarządzaniu logistycznym w poprzednich latach [21]. W ostatnim czasie natomiast zaczęto odchodzić od tej koncepcji, gdyż zauważono, że wyszczuplanie sprzyja zwiększeniu wrażliwości sieci logistycznych, a więc ich podatności na różnego rodzaju czynniki zakłócające i utratę ciągłości [4, 17, 27]. Na przykład zmniejszenie liczby dostawców według zasady "4S", planowanie dostaw dokładnie na czas JIT, czy minimalizacja poziomu buforów spowodowały znaczny wzrost poziomu ryzyka zakłócenia dostaw [11, 16, 19, 22]. W związku z powyższym obecnie wiodącym obszarem badawczym logistyki stała się odporność łańcuchów i sieci dostaw oraz sieci logistycznych [5].

Złożoność struktur sieci logistycznych, rozbudowa relacji aktorów na różnych poziomach sieci, skomplikowane i zróżnicowane, m.in. w zależności od lokalizacji, zasady funkcjonowania elementów składowych globalnych sieci logistycznych, zmiany rynkowe itp. uniemożliwiają stosowanie klasycznych metod optymalizacji, jako narzędzia wspomagającego zwiększenie efektywności działania łańcucha dostaw [1].

Aby sprostać rosnącym oczekiwaniom klientów, ale także zabezpieczyć się przed różnego rodzaju zakłóceniami, zaczęto opracowywać nowe narzędzia zmniejszające ryzyko w funkcjonowaniu sieci logistycznych. Jednym z takich obiecujących narzędzi jest symulacja komputerowa. Symulacja pozwala na stosunkowo tania, szybką i nie ingerującą w rzeczywisty system analizę jego zachowania w różnych, także krytycznych przypadkach. Jest to powodem, dla którego symulacje są powszechnie używane do badania dynamicznych systemów. Analiza typu „co-jeżeli” różnych możliwych scenariuszy i alternatyw decyzyjnych wspomaga zarządzanie wydajnością i umożliwia określenie strategii poprawiających odporność sieci logistycznych. Wykorzystując symulacje można badać wpływ m.in. następujących czynników na zachowanie się sieci: 1. błędów prognozowania popytu, 2. opóźnień w transporcie, 3. uszkodzeń i utraty towarów w transporcie, 4. wyczerpania zapasów na skutek błędnej polityki sterowania zapasami we własnym przedsiębiorstwie, ale także u partnerów, 5. awarii urządzeń, 6. zmian taryf, podatków, regulacji prawnych, 7. upadłości partnerów, 8. katastrof naturalnych i spowodowanych przez człowieka, 9. kryzysów ekonomicznych i politycznych.

Rezultatem badań symulacyjnych może być dostosowanie istniejącej lub projekt nowej sieci logistycznej minimalizującej możliwe straty i zwiększającej odporność łańcucha dostaw. W artykule zaproponowano podejście łączące trzy metody symulacji: metodę dynamiki systemowej, metodę zdarzeń dyskretnych oraz modelowanie agentowe.

2. ODPORNOŚĆ SIECI LOGISTYCZNEJ

Według Milgate [18] złożoność łańcucha dostaw może być analizowana m.in. w odniesieniu do niepewności. Niepewność może pochodzić od partnerów zarówno niższego, jak i wyższego rzędu i wzrasta wraz z liczbą poziomów łańcucha dostaw. Niepewność od partnerów wyższego szczebla przejawia się poprzez opóźnienia dostaw lub słabą jakość dostarczanych materiałów. Z drugiej strony niepewność pochodzi od nieprzewidzianych zmian popytu, co z kolei wpływa na planowanie dostaw i wytwarzania. Niepewność występuje w przepływach materiałowych, finansowych i informacyjnych pomiędzy aktorami łańcucha dostaw, spowodowana jest działalnością konkurencji, ekstremalnymi zmianami pogodowymi, klęskami żywiołowymi, terroryzmem, konfliktami politycznymi itp.

Istnieje kilka definicji odporności sieci logistycznych [12, 13, 24, 25]. W pracach [4, 6, 7] zaproponowano definicje podstawowych pojęć związanych z ciągłością procesów, w tym odporności:

Ciągłość jest to zdolność systemu do dostarczania produktów lub usług na akceptowalnym, wcześniej założonym poziomie wydajności w rzeczywistych warunkach (np. pomimo wystąpienia zakłóceń);

Zakłócenie jest to opóźnienie lub przerwanie ciągłości procesu (np. awaria systemu, katastrofa naturalna, błąd człowieka);

Odporność na zakłócenie jest to zdolność systemu do przeciwdziałania skutkom zakłóceń, a także do dalszego dostarczania produktów lub usług na akceptowalnym, wstępnie określonym, poziomie wydajności.

Miarami odporności na zakłócenie proponowanymi w niniejszym artykule są:

- O1. Poziom zaspokojenia popytu na produkt lub usługę w przypadku wystąpienia zakłóceń odniesiony do akceptowalnego, wcześniej określonego poziomu wydajności.
- O2. Sumaryczny czas podczas trwania zakłócenia, kiedy dostarczanie produktów lub usług jest na akceptowalnym, wstępnie określonym poziomie odniesiony do czasu trwania zakłócenia,
- O3. Procentowy wzrost popytu odniesiony do popytu prognozowanego, który może zostać zaspokojony.
- O4. Czas trwania zakłócenia, dla którego poziom zaspokojenia popytu nie spada poniżej założonej i akceptowalnej wartości.

W Rozdziale 3 omówiono dokładniej i wyznaczono w drodze symulacji dwie pierwsze miary dla badanego systemu logistycznego.

3. METODY SYMULACJI SIECI LOGISTYCZNYCH

Sieć logistyczna w ogólnym przypadku składa się z trzech grup podmiotów: dostawców, producentów i klientów kooperujących ze sobą. Każdy z tych podmiotów posiada autonomiczność, a wiele poziomowość i złożoność relacji między aktorami sieci logistycznej powoduje, że metody klasycznej optymalizacji stają się nieefektywne. Symulacje komputerowe umożliwiają bezpieczne testowanie działania sieci logistycznej dla różnych scenariuszy zdarzeń, różnych konfiguracji sieci, różnych polityk zarządzania zapasami, zasobami ludzkimi, czy remontami, co jest utrudnione lub nawet niemożliwe w przypadku stosowania narzędzi klasycznej analizy ryzyka. Eksperymenty wirtualne oszczędzają pieniądze i czas, umożliwiają obserwację zachowania systemu w dowolnej chwili czasu, uwzględnienia większej liczby detali niż w podejściu analitycznym, co zwiększa dokładność prognoz, a przede wszystkim dają możliwość prostej reprezentacji niepewności.

W literaturze można spotkać prace poświęcone symulacjom komputerowym w zastosowaniach logistycznych, w tym w analizie odporności łańcucha dostaw i sieci logistycznych. Przedstawiają one różne podejścia – od metody dynamiki systemowej [14, 15, 29], przez symulacje zdarzeń dyskretnych [10, 23, 28], do podejścia agentowego [3, 20, 26, 30], czy metod łączonych [8].

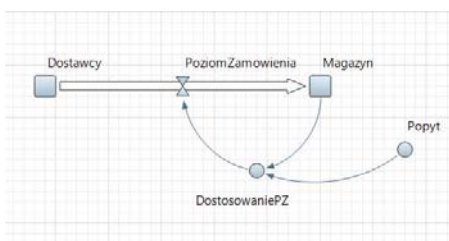
Ze względu na złożony charakter sieci logistycznych wykorzystanie jednej metody symulacji do ich analizy jest zazwyczaj niewystarczające. Ideą połączenia metod jest przewyżczenie wad poszczególnych sposobów i uzyskanie jak największej korzyści z zastosowania każdego z nich. Poniżej omówione zostaną pokrótce trzy metody symulacji stosowane w logistyce: metoda dynamiki systemowej, metoda zdarzeń dyskretnych oraz podejście agentowe.

3.1. METODA DYNAMIKI SYSTEMOWEJ

Metoda dynamiki systemowej (System Dynamics SD) pozwala uchwycić globalne połączenia między różnymi elementami w sieci i jest cenna dla strategicznych i taktycznych decyzji. Nie uwzględnia ona szczegółów poszczególnych elementów systemu (maszyn, produktów, zdarzeń), dlatego można ją stosować bez znajomości tychże. Podstawą koncepcją tej metody jest uwzględnienie sprzężeń zwrotnych między elementami, co pozwala ustanowić pętle przyczynowo-skutkowe, które mogą ukazywać zależności zarówno w ramach jednej firmy, jak i w ramach wielu organizacji. W związku z tym można badać jak zmiany w jednym węźle sieci wpływają na efektywność innego węzła. Poszukiwanie zależności pomiędzy punktami przepływu w badanych systemach i sprzężeń tam występujących jest istotą modelowania metodą dynamiki systemowej. Całkowanie, będące podstawą idei zastosowania w tego rodzaju modelowaniu, powoduje czasowy charakter zachowań w systemie, a także jest źródłem powstawania opóźnień między wpływającymi na nie strumieniami. Stanowi przez to o dynamicznym zachowaniu systemu.

Elementami składającymi się na model SD są *Zasoby* (Stocks), *Strumienie* (Flows), *Połączenia* (Connectors) oraz *Informacje*. *Zasoby* są elementami statycznymi kumulującymi fizyczne bądź ekonomiczne wielkości (materiały, personel, pieniądze, wyposażenie, zlecenia) lub informacje, natomiast *Strumienie* modelują zmiany wartości zasobów w czasie, czyli definiują dynamikę systemu. Połączenia reprezentują relacje między *Zasobami* i *Strumieniami* przekazując *Informacje*.

Na Rys. 1 przedstawiono przykład modelu dynamiki systemowej odzwierciedlającego przepływ materiałów od dostawcy do magazynu. Poziom zamówienia wpływa na stan magazynu, który z kolei, razem z popytem, reguluje poziom zamówienia.



Rys. 1. Przykład modelu z zastosowaniem podejścia SD

Źródło: opracowanie własne

W przypadku symulacji sieci logistycznych proponuje się zastosowanie tego podejścia do modelowania przepływów materiałowych, finansowych i informacyjnych.

Modelowanie procesów dynamicznych z wykorzystaniem dynamiki systemów niesie ze sobą pewne ograniczenia – nie możemy obserwować pojedynczego zdarzenia jakim jest np. nadejście zamówienia, pobranie towaru z magazynu, wydajność pracowników, czy obciążenie maszyn. Na poziomie operacyjnym, gdzie informacje bardziej szczegółowe są dostępne, z pomocą przychodzi nam metoda zdarzeń dyskretnych lub modelowanie agentowe.

3.2. SYMULACJE ZDARZEŃ DYSKRETNYCH

Symulacja zdarzeń dyskretnych (DES – Discret Event Simulation) umożliwia odzwierciedlenie realizacji sekwencji zdarzeń, w tym realizacji procedur w sytuacjach nadzwyczajnych, jak trzęsienie ziemi, pożar w magazynie itp.

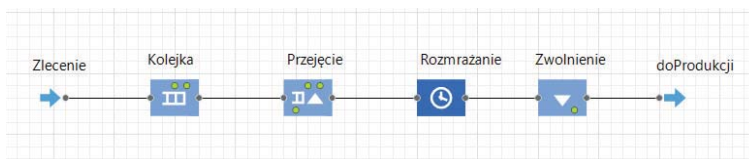
Jakkolwiek większość procesów wokół nas ma ciągłą naturę to możemy wyodrębnić w nich istotne momenty w postaci dyskretnych zdarzeń następujących po sobie w odpowiedniej kolejności (np. samochód dostawczy wyrusza od dostawcy, dociera do producenta, zostaje rozładowany i odjeżdża). W takim podejściu podróż samochodu modelowana jest dwoma zdarzeniami – wyjazd i przyjazd. Rzeczywisty ruch pojazdu modelowany jest jako czas potrzebny na pokonanie drogi.

W modelu zdarzeń dyskretnych (DES) istnieje wiele bloków konstrukcyjnych, m.in. takich jak: *Zdarzenia* (Events), *Zmienne stanu* (State Variables), *Atrybuty* (Attributes), *Zasoby* (Resources), *Działania* (Activities), *Opóźnienia* (Delays) i *Kolejki* (Queues). Ponadto występuje również zegar symulacji i listy zdarzeń [9].

Zmienne stanu zimieniają się tylko w dyskretnych punktach czasu, w których występują zdarzenia jako konsekwencje *Działań* i *Opóźnień*. Podmioty mogą konkurować o *Zasoby* ustawiając się w *Kolejce* w czekaniu na zwolnienie zasobu. *Działania* i *Opóźnienia* przetrzymują podmioty przez określony czas. Stan systemu jest aktualizowany przy każdym zdarzeniu wraz z przechwytywaniem i zwalnianiem zasobów.

Symulacje zdarzeń dyskretnych wydają się odpowiednie do modelowania zakłóceń występujących w systemach logistycznych. Zakłócenia mają często charakter losowy, należą do zdarzeń rzadko występujących, niemniej mają znaczący wpływ na sprawne działanie systemu logistycznego, szczególnie na jego poziomie operacyjnym. Uwzględnienie tego typu przypadków możliwe jest w metodzie zdarzeń dyskretnych w sposób uproszczony, czyli poprzez wywołanie zdarzenia i odliczanie czasu jego trwania lub w sposób bardziej złożony odwzorowujący poszczególne etapy wykonywania procedur na wypadek wystąpienia zakłócenia.

Na Rysunku 2 pokazano model DES dla procesu rozmrożenia surowca dla produkcji stali, sytuacji kryzysowej związanej ze zmianami pogody. Zlecenie najpierw trafia do kolejki, następnie partia surowca jest rozmrażana, a po rozmrożeniu trafia do składu materiałów przeznaczonych do produkcji. Zwolnienie zasobu (rozmrażalni) oznacza możliwość pobrania kolejnej partii surowca do rozmrożenia. Czas rozmrożenia może być stały, zależny od określonych parametrów (np. rodzaj materiału, temperatura zewnętrzna) lub losowy. Model ten umożliwi obserwację np. poziomu zajętości rozmrażalki, liczby przychodzących zleceń w różnych okresach czasu, co może wspomóc procesy decyzyjne.



Rys. 2 Proces rozmrażania modelowany DES

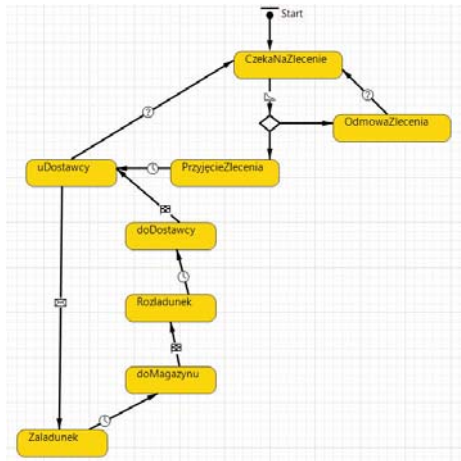
Źródło: opracowanie własne

Jeżeli chcemy modelować ogólne zależności, a nie interakcje poszczególnych elementów powinniśmy zastosować DS. Jeżeli interesuje nas z kolei zachowanie poszczególnych elementów systemu, ważne są stany w jakich mogą się one znajdować, najlepiej zastosować modelowanie agentowe.

3.3. PODEJŚCIE AGENTOWE

Inteligentny agent jest programem komputerowym lub urządzeniem, które działa samodzielnie w otwartym, rozproszonym środowisku i rozwiązuje pewien problem lub wykonuje określone zadanie [26]. Agent postrzega swoje środowisko i może na nie oddziaływać oraz cechuje się autonomicznością. Coraz częściej aplikacje opierają się na systemach wielu agentowych, czyli sieci luźno powiązanych agentów, którzy współdziałają, aby rozwiązać problemy leżące poza ich indywidualnymi zdolnościami i wiedzą. Zaletą tego podejścia jest szybkość działania (każdy z agentów ma do rozwiązania problem o mniejszej złożoności) oraz wykorzystanie większego zakresu wiedzy przy podejmowaniu ostatecznej decyzji (wiedza wielu agentów). Sterowanie w systemie wielu agentowym jest zdecentralizowane. Modele agentowe (Agent-Based Modeling ABM) mogą być używane na wszystkich poziomach – zarówno strategicznym, taktycznym jak i operacyjnym.

Za każdym razem kiedy ma być podjęta decyzja agent może wybrać z puli dostępnych dla siebie akcji. Optymalna decyzja w danej chwili zależy od działań jakie agent wykonał i planuje wykonać oraz wiedzy jaką agent zebrał do tej chwili i dotyczącej pożądaných efektów w przyszłości.



Rys. 3 Etapy przykładowego wykonania zlecenia przez agenta transportowego
Źródło: opracowanie własne

Na Rys. 3 przedstawiono przykład realizacji zlecenia przez agenta transportowego, który może należeć do puli zasobów magazynu, dostawcy, firmy przewozowej itp. Agent decyduje o tym czy przyjmie zlecenie (na podstawie odpowiednich informacji), jeżeli tak to przechodzi przez następujące stany: załadunek u dostawcy, jazda do magazynu, rozładunek w magazynie, powrót do dostawcy. Przejścia między etapami mogą być regulowane przez wysłanie wiadomości, opóźnienie, upływ czasu itp.

Podejście agentowe skupia się na pojedynczych komponentach systemu. Agentami mogą być ludzie, firmy, urządzenia, magazyny, samochody. Dynamika systemu zależy od zdefiniowanych interakcji między agentami działającymi w określonym środowisku. Na przykład magazyn może być postrzegany i modelowany jako agent w łańcuchu dostaw, natomiast wewnątrz działa zgodnie z podejściem procesowym. Podejście agentowe idealnie nadaje się do modelowania elementów sieci logistycznej.

3.4. SYMULACJE Z WYKORZYSTANIEM RÓŻNYCH METOD

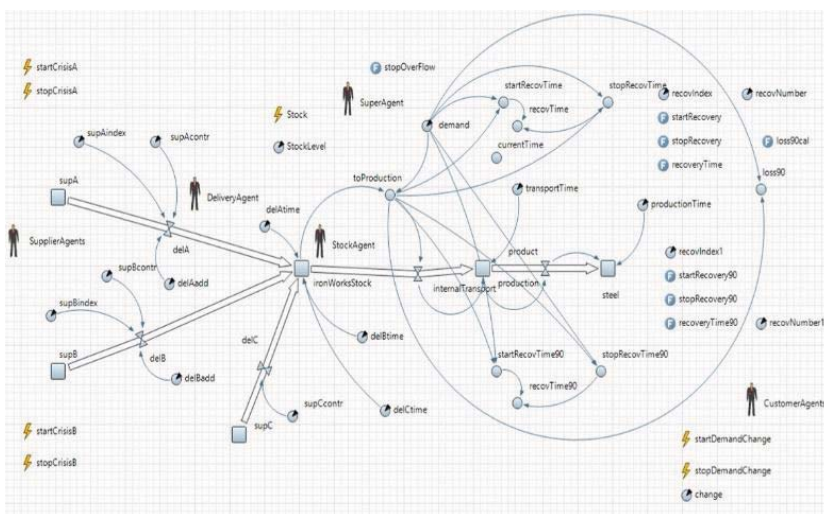
Złożoność sieci logistycznej wymaga kombinacji proponowanych metod symulujących w celu pełnego pomiaru i zarządzania jej odpornością.

W proponowanym podejściu poszczególne elementy sieci logistycznej powinny być modelowane jako agenci, gdyż jest to zbiór wielu indywidualnych, autonomicznych obiektów współpracujących ze sobą. Zakłócenia modelowane powinny być jako zdarzenia występujące w pewnych chwilach czasu i trwające przez pewien okres. Bardziej zaawansowane modelowanie zdarzeń dyskretnych może być zastosowane do analizy procesu eliminacji zakłócenia lub innych wpływających na odporność procesów wewnątrz przedsiębiorstw. Wreszcie rynek napędzający system oraz przepływy zasobów i informacji proponuje modelować się przy pomocy dynamiki systemowej.

4. WYNIKI EKSPERYMENTÓW

Obiektem badań jest łańcuch dostaw w przemyśle hutniczym. Głównym surowcem potrzebnym do produkcji stali jest ruda żelaza dostarczana w proporcjach 80% zapotrzebowania z Ukrainy oraz 20% zapotrzebowania z Brazylii. Zazwyczaj materiał dostarczany jest na czas, jednak ze względu na ryzyko spowodowane dużą odległością i transportem kombinowanym (Brazylia) lub sytuacją polityczną (Ukraina) dostawy mogą zostać wstrzymane na różnym odcinku sieci logistycznej. Dostarczenie surowca do produkcji może być zablokowane także po przybyciu surowca do huty na skutek mrozów i konieczności rozmrażania wagonów. Huta posiada możliwość zorganizowania alternatywnych dostaw w wysokości do 60% zapotrzebowania z Serbii, które mogą zostać uruchomione w momencie sytuacji kryzysowej. Zapotrzebowanie rynku jest dobrze prognozowalne dlatego m.in. huta nie posiada wysokiego poziomu zapasów. Popyt jednak może ulec zmianie w związku z tendencjami ogólnosiwiatowymi. Miesięcznie huta przerabia około pół miliona ton rudy.

Środowiskiem symulacji proponowanego systemu jest program AnyLogic, w którym możliwe jest połączenie trzech metod modelowania: agentowego (Agent Based Modeling), zdarzeń dyskretnych (Discret Event Simulation) oraz dynamiki systemowej (System Dynamics Modeling). Główną część modelu, odzwierciedlającą przepływ materiałów, przedstawiono na Rysunku 4. Został on w tej części zbudowany z elementów używanych w modelowaniu procesów dynamicznych i uwzględnia istotne opóźnienia logistyczne w przepływie materiałów. Zagrożenia wynikające z zakłóceń w ramach łańcucha dostaw zostały zamodelowane jako zdarzenia dyskretnie, natomiast sposoby zapobiegania niepożądanym zjawiskom zostały zamodelowane przy użyciu podejścia agentowego. Zadaniem agentów jest odpowiedź na możliwość wystąpienia lub obecność zakłóceń (uruchomienie dodatkowej dostawy i/lub zwiększenie zapasów) w celu utrzymania ciągłości produkcji, zapewniając wymaganą ilość surowców dostarczanych do zakładu produkcyjnego. Super agent posiada informacje aktualnym popycie dostarczane przez agenta reprezentującego klientów, o poziomie i stanie zapasów dostarczane przez agenta magazynowego. Agent odpowiadający za zaopatrzenie, współpracuje z dostawcami, posiada wiedzę o wystąpieniu oraz długości trwania zakłócenia poza hutą i w oparciu o informacje otrzymywane od super agenta może podjąć decyzję o uruchomieniu dodatkowej dostawy. Zakłócenia w postaci: 1. przerwy w dostawach, 2. wzrostu popytu modelowane były rozkładem normalnym o parametrach zawartych w Tabeli 1.



Rys. 4 Model systemu logistycznego w programie AnyLogic.

Źródło: opracowanie własne

W Tab. 2 przedstawiono wartości miar odporności O1 i O2 dla obiektu badań. Wyniki końcowe zostały uśrednione z przeprowadzonych 30 symulacji działania systemu przez okres 100 dni i odpowiadają trzem analizowanym scenariuszom:

- S1. Przerwa w dostawie surowca z Ukrainy (zakłócenie 1).
- S2. Nagły wzrost popytu (zakłócenie 2).

- S3. Przerwa w dostawie z Ukrainy podczas okresu wzrostu popytu (łącznie wystąpienie zakłóceń 1 i 2).
- oraz pięciu wariantom reakcji aktorów sieci:
- R1. Brak podjęcia jakichkolwiek działań – niski poziom zapasów (pokrywający jednodniową produkcję), brak dodatkowych dostaw.
 - R2. Ciągłe monitorowanie zapasów i uruchomienie dodatkowych dostaw z Serbii umożliwiających pokrycie bieżących różnic między popytem a produkcją.
 - R3. R2 oraz zapewnienie większego poziomu zapasu (pokrywającego 5-dniową produkcję) przed wystąpieniem zakłócenia S1 lub S2.
 - R4. R2 oraz uruchomienie dodatkowej dostawy z Serbii na poziomie dostaw z Ukrainy po wystąpieniu zakłócenia S1.
 - R5. Połączenie R2, R3 i R4.

Tablica 1

Parametry rozkładu normalnego przyjęte dla zakłóceń

		Parametr zakłócenia				
		Czas Zakł.1 [dni]	Czas Zakł. 2 [dni]	Poziom Zakł. 2 [%]	Początek Zakł. 1 [dzień]	Początek Zakł. 2 [dzień]
parametr rozkładu	μ	15	30	20	40	30
	σ	1	2	2	2	5

Źródło: opracowanie własne

Wskaźnik odporności O1 został opisany formułą:

$$O1 = \frac{P}{P_R} \cdot 100\% = \frac{P_R - S}{P_R} \cdot 100\%, \quad (1)$$

gdzie P_R – poziom popytu na stal, który chcemy zaspokoić w badanym okresie (w rozważanych przypadkach 100% popytu), P – poziom popytu, który przedsiębiorstwo zaspokaja, S – straty produkcji wynikające z zakłócenia w badanym okresie [w tonach].

Wskaźnik odporności O2 opisany jest formułą:

$$O2 = \frac{T_z - T_s}{T_z} \cdot 100\%, \quad (2)$$

T_z – czas trwania zakłócenia w dniach,

T_s – czas trwania okresu kiedy nie zaspokajamy przyjętego poziomu wydajności (w tym przypadku 100% popytu) w dniach.

Analizując Tab. 2 możemy ustalić politykę dostaw i poziom zapasu bezpieczeństwa dla zadawalającego nas poziomu realizacji zamówień. Żadna z proponowanych reakcji nie zapewniła 100% odporności systemu na analizowane zakłócenia przy przyjętym $P_R = 100\%$ popytu. Zakładając jednak akceptowalny poziom wydajności systemu niższy, np. $P_R = 95\%$ popytu, zapewnienie większego poziomu zapasów oraz uruchomienie dodatkowych dostaw zapewni stuprocentową odporność systemu. Natomiast przy akceptowalnym poziomie wydajności $P_R = 90\%$ możemy zrezygnować z jednego zabezpieczenia, tj.

utrzymywać wyższy poziom zapasu bezpieczeństwa lub uruchomić dodatkowe dostawy równe co do wielkości dostawom wstrzymanym. Z Tabeli 2 widać także, że dla reakcji R1 i R2 wskaźnik O2 przyjmuje wartości ujemne. Oznacza to, że zakłócenie spowodowało zmniejszenie produkcji poniżej akceptowalnego poziomu wydajności przez okres dłuższy niż czas trwania zakłócenia.

Tablica 2

Wartości wskaźnika O1 i O2 dla $P_R = 100\%$

	O1			O2		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
R1	88,1%	94,6%	83,3%	-44,8%	0,0%	-1,0%
R2	94,5%	98,8%	88,7%	-1,4%	63,1%	17,9%
R3	95,3%	98,9%	94,2%	31,6%	64,8%	53,2%
R4	96,1%	98,9%	95,0%	15,0%	66,2%	21,0%
R5	98,7%	99,1%	95,3%	78,2%	67,4%	54,9%

Źródło: obliczenia własne

5. PODSUMOWANIE

Proponowana koncepcja modelowania sieci logistycznych do analizy, oceny i poprawy ich odporności łączy trzy podejścia: dynamikę systemową, symulacje zdarzeń dyskretnych oraz podejście agentowe. Każda z tych metod umożliwi uchwycenie wydajności przedsiębiorstwa na określonym poziomie szczegółowości. Połączenie metod jest wymagane w celu zrozumienia jakie zależności panują w systemie na poziomie strategicznym, taktycznym i operacyjnym, zaobserwowaniu reakcji sieci na różnego typu zakłócenia i wyznaczeniu wskaźników odporności sieci logistycznej.

Przeprowadzone na prostym przykładzie eksperymenty pokazały, że możliwa jest ocena odporności sieci wg zaproponowanych miar. Badania scenariuszy dla dwóch zjawisk zakłócających – wstrzymania dostaw oraz wzrostu popytu – wykazały spadek wydajności produkcji w przypadku prowadzonej obecnie polityki sterowania zapasami i zaopatrzenia. Zaadaptowanie podjętych przez agentów działań może zmniejszyć lub wyeliminować straty w przyszłości. Zastosowanie proponowanego podejścia modelowania i symulacji może przyczynić się do obniżenia negatywnych skutków braku dostaw surowców i wzrostu popytu, bądź błędnego jego prognozowania poprzez wybranie najlepszej strategii zaopatrzenia i magazynowania. Na podstawie symulacji możliwe będzie określenie czynników decydujących o odporności sieci, takich jak krytyczne węzły, krytyczne zakłócenia oraz ustalenie strategii dla poszczególnych aktorów sieci zmniejszającej jej wrażliwość na zakłócenia.

W przyszłości planuje się badania sieci logistycznej o większej liczbie aktorów i zależności między nimi, występowania zakłóceń w różnych miejscach sieci oraz analizę odporności sieci z uwzględnieniem systemu dystrybucji w oparciu o wszystkie cztery zaproponowane wskaźniki odporności. Planuje się także wykorzystanie Systemem Informacji Geograficznej GIS [2], który umożliwi rozmieszczenie agentów na mapie terenu związanej z bazą informacji o połączeniach komunikacyjnych.

Bibliografia

1. Almeder Ch., Preusser M., A hybrid simulation optimization approach for supply chains, Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Hrsg. B. Zupancic, R. Karba, S. Blazic, 291-291. Slovenia: ARGESIM / ASIM - Verlag.
2. Bielecka E., Systemy Informacji Geograficznej – teoria i zastosowania, Wydawnictwo PJWSTK, Warszawa 2006.
3. Blos M.F., Da Silva R.M., Miyagi P.E. (2015). Application of an Agent-based Supply Chain to Mitigate Supply Chain Disruptions. IFAC-PapersOnLine 48-3, 640–645.
4. Bukowski L.A., Feliks J., Majewska K., Logistic system resilience modelling – a dynamic, multiagent, service engineering oriented approach, Risk, reliability and safety: innovating theory and practice, Lesley Walls, Matthew Revie, Tim Bedford. — Boca Raton ; [et al.] : CRC Press, cop. 2017, 2207–2214.
5. Bukowski, L., Feliks, J., Majewska, K.. Modelling and simulation of disruption risk in the complex logistic networks – a multimethod approach, Safety and Reliability of Complex Engineered Systems, Taylor & Francis Group, A Balkema Book, London 2015, 3911-3918.
6. Bukowski, L. Managing disruption risks in the global supply networks – a trans-disciplinary approach, Proceedings of International Conference on Industrial Logistics, Croatia 2014, 101-106.
7. Bukowski, L., Feliks, J. A unified model of systems dependability and process continuity for complex supply chains, Safety and Reliability: Methodology and Applications, Taylor & Francis Group, A Balkema Book, London 2014, 2395-2403.
8. Cagliano, A.C., Rafele, C. Simulation for Logistics Performance Management: Comparing Different Approaches. In Kersten, W. / Blecker, T. / Flamig, H. (Eds.), Global Logistics Management. Sustainability, Quality, Risks. Operations and Technology Management, Volume 9. Berlin (Germany): Erich Schmidt Verlag 2008, 423-442.
9. Carson, J.S. Modeling and Simulation World Views. In Evans, G.W./ Mollaghasemi, M./Russell, E.C./ Biles, W.E. (Eds.), Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference. Piscataway (NJ): Institute of Electrical and Electronics Engineers, 18-23.
10. Carvalho H., Barroso A. P., Machado V. H., Azevedo S., Machado V.C., Supply Chain Redesign for Resilience using Simulation. Computers & Industrial Engineering 62 (2012) 1, 329-341.
11. Cavinato, J.L. Supply chain logistics risks, International Journal of Physical Distribution and Logistics Management (2004), 34 (5), 383–87
12. M. Christopher, C. Rutherford, Creating Supply Chain Resilience through Agile Six Sigma, Critical Eye (2004), 24-28.
13. R. Duval, J. Elmeskov, L. Vogel, Structural Policies and Economic Resilience to Shocks. [online] OEECD Economics Department Working Paper 567, 2007, <http://ssrn.com/abstract=1002508>(10.04.2018)
14. Feng Y., System Dynamics Modeling for Supply Chain Information Sharing. Physics Procedia. 25. 1463-1469. 10.1016/j.phpro.2012.03.263.
15. Gronalt M., Mandl Ch., Modelling interrelationships between logistics and transportation operations – A system dynamics approach Article in Management Research Review, May 2015 DOI: 10.1108/MRR-11-2013-0271
16. Jüttner, U. Supply chain risk management, International Journal of Logistics Management (2005), 16 (1), pp 120–41
17. Kramarz W., Strategia podwykonawstwa w budowaniu odporności łańcuchów dostaw, Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska (2017), z. 101, 245-256.
18. Milgate, M. Supply chain complexity and delivery performance : an international exploratory study. Supply Chain Management: An International Journal, 2001, Vol.6 No.3, 106-118.
19. Natarajarathinam, M. et al. Managing supply chains in times of crisis: a review of literature and insights, International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, 39(2009), 535–573.
20. Nawarecki E., Koźlak J., Agentowy model systemu logistycznego, Automatyka 2009, tom 13, Zeszyt 2.
21. Samolejova A., Lenort R., Lampa M., Sikorova A., Specifics of Metallurgical Industry for Implementation of Lean Principles, Metalurgija 51 (2012) 3, 373-376.
22. Scarborough, J. Risks during Transportation, RPW Reports, London 2007.

23. Schmitt A.J., Singh M., A Quantitative Analysis of Disruption Risk in a Multi-echelon Supply Chain, *International Journal of Production Economics* 139 (2012) 1, 22-32.
24. Sheffi Y., Rice J., A Supply Chain View of the Resilient Enterprise, *MIT Sloan* 47 (2005) 1, 8-41.
25. Sheffi Y., Building a Resilient Supply Chain. *Harvard Business Review. Supply Chain Strategy* 1 (2005) 8, 1-4.
26. Swaminathan J., Smith S., Sadeh N., Modeling supply chain Dynamics: A multiagent approach, *Decision Sciences*, 29(3), 1998.
27. Waters, D. Supply chain risk management: vulnerability and resilience in logistics, Kogan Page Limited, London & Philadelphia 2007.
28. Wicher P., Staš D., Karkula M., Lenort R., Besta P., A computer simulation-based analysis of supply chains resilience in industrial environment, *Metalurgija*, 2015, 54(4), 703-706. ISSN 1334-2576.
29. Wilson, M.C. The impact of transportation disruptions on supply chain performance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* (2007), 43, 295-320.
30. Xu, M., Wang, X., & Zhao, L. Predicted supply chain resilience based on structural evolution against random supply disruptions. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* (2014), 1(2), 105-117.

THE USE OF COMPUTER SIMULATION FOR ANALYSING THE LOGISTICS NETWORKS RESILIENCE

Summary: Logistic networks are complex systems, composed of many elements connected through non-linear relations. This property makes it difficult to study these systems with traditional analytical methods. Therefore, computer simulation is a valuable tool in the practical applications of modeling the structure of the logistics network, the relationship between its components and the rules controlling its functioning. The simulation model can be run in order to imitate the operation of the actual system in a given time interval and analyze its behavior under different scenarios.

In the paper resilience measures for logistic networks are proposed and a multi-method approach of computer simulation for analysing their resistance is presented. The proposed concept allows determining and checking the possibilities ways of building long-term robustness of logistics networks for serious disturbances. The application of the model is illustrated by an example from the steel industry. AnyLogic 8.2 software was used for the implementation.

Keywords: logistics networks, computer simulation, resilience

Wydanie publikacji finansowane przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie (dotacja podmiotowa na utrzymanie potencjału badawczego).