

# 8

## Znaczenie symulacji procesów biznesowych dla projektowania odpornych łańcuchów dostaw

<https://doi.org/10.18559/978-83-8211-251-1/8>

 Anna Lewandowska-Ciszek

Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu  
anna.lewandowska-ciszek@ue.poznan.pl

### The importance of business process simulation in designing resilient supply chains

**Abstract:** Contemporary supply chains operating in a dynamic, and full of complex relationships global environment, must constantly seek ways to adapt to the specific requirements of the market. The ability to adapt has long since become an incredibly important attribute of contemporary supply chains. Currently, one of the key features of adaptive supply chains is also their resilience. Planning business processes in an unstable environment is not easy, because in addition to a thorough understanding of the process, it is essential to take into account the broader context in which it is embedded and the conditions that must be met for it to be implemented in the desired way that gives the expected effect. Managing operations and the supply chain in times of turbulence becomes a serious challenge. It is necessary to consider a large number of action options. Simulations, allowing to understand the consequences of possible decisions before they are made, enable the planning of the material flow process in a way that ensures its efficiency maximisation while taking into account the requirements of individual production environments. Within this activity, it is possible to plan actions in such a way as to enable their implementation in the face of unforeseen situations. The aim of the article is to define the role of simulation in shaping resilient supply chains.

**Keywords:** digital transformation, simulation, resilience, production line performance modeling, logistics, supply chains.

**Sugerowane cytowanie:** Lewandowska-Ciszek, A. (2025). Znaczenie symulacji procesów biznesowych dla projektowania odpornych łańcuchów dostaw. W: M. Szymczak (red.), *Logistyka i zarządzanie łańcuchem dostaw w czasach turbulencji, zakłóceń i niestabilnej gospodarki* (s. 141–159). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu. <https://doi.org/10.18559/978-83-8211-251-1/8>



Ta książka jest udostępniana na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowe

## Wstęp

Współczesne łańcuchy dostaw, funkcjonując w złożonym, dynamicznym i pełnym skomplikowanych relacji środowisku globalnym, muszą nieustannie poszukiwać sposobów dostosowania się do specyficznych wymogów rynku. Zdolność adaptacji już dawno stała się niezwykle ważnym atrybutem współczesnych łańcuchów dostaw. Obecnie jedną z ich kluczowych cech adaptacyjnych staje się dodatkowo odporność. Planowanie procesów biznesowych w niestabilnym otoczeniu nie jest łatwe, oprócz bowiem dogłębnej znajomości danego procesu niezbędne jest uwzględnienie szerszego kontekstu, w jakim jest on osadzony, i warunków, jakie muszą być spełnione, aby został zrealizowany w pożądanym sposób, dający oczekiwany efekt. Zarządzanie operacjami i łańcuchem dostaw w czasach turbulencji staje się poważnym wyzwaniem. Konieczne staje się rozpatrzenie dużej liczby wariantów działań. Symulacje, pozwalając zrozumieć konsekwencje możliwych decyzji jeszcze przed ich podjęciem, umożliwiają planowanie procesu przepływu materiałów w sposób zapewniający maksymalizację jego efektywności przy uwzględnieniu wymogów poszczególnych środowisk produkcyjnych. W ramach tego można zaplanować działania w taki sposób, aby umożliwić ich realizację w obliczu wystąpienia nieprzewidzianych sytuacji. Celem rozdziału jest określenie roli symulacji w kształtowaniu odpornych łańcuchów dostaw.

### 8.1. Istota symulacji

Jednym ze sposobów badania systemów społecznych oraz gospodarczych jest eksperymentowanie bezpośrednio na obiektach. Jednakże w wielu przypadkach jest to zbyt uciążliwe i kosztowne, a nierzadko nawet niemożliwe do przeprowadzenia (Winkowski, 1974, s10). Chcąc zatem w eksperymentach zastąpić rzeczywisty system, można do tego celu stworzyć model i na nim przeprowadzać badania, bez szkody dla obiektów. Model matematyczny to jeden z typów modeli, który za pośrednictwem symboli i relacji między nimi opisuje badaną rzeczywistość. Po jego utworzeniu należy określić sposoby jego adaptacji do różnych warunków, posługiwania się nim oraz metody interpretacji wyników. Zastosować można w tym przypadku rozwiązania analityczne.

Co jednak w przypadku systemów, wobec których metody analityczne okazują się bezradne i dla których nie mogą dostarczyć rozwiązania (Fishman, 1981, s. 27–32)? Co w przypadku wysoce złożonych systemów, których próba odwzorowania w zbyt uproszczonym modelu obniży wartość poznawczą i wiarygodność analizowanego przypadku (Mielczarek, 2009, s. 11–13)? Co w przypadku współczesnych przedsiębiorstw, które funkcjonując w burzliwym otoczeniu, same stają

się złożonym systemem, w którym współdziałają odpowiednio (Sargut i McGrath, 2011, s. 73–74):

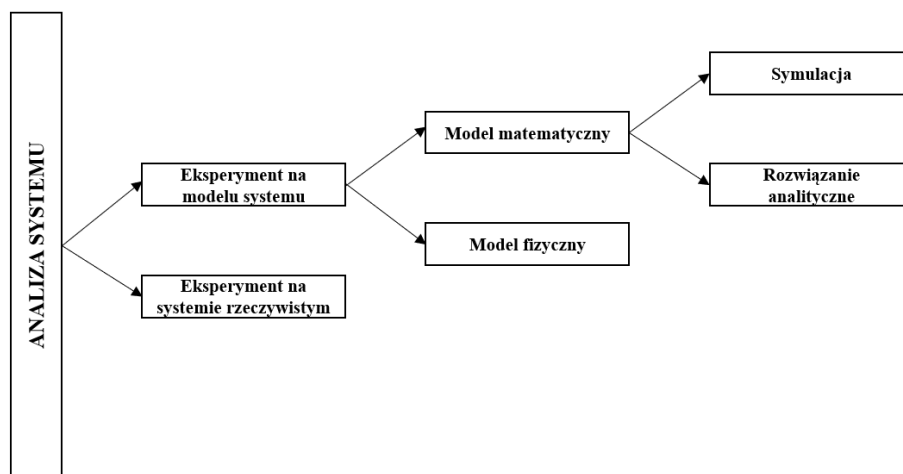
- określona liczba elementów (na przykład podmiotów gospodarczych),
- ich różnorodność,
- wzajemna współzależność,
- niepewność wynikająca z działania elementów, które w bardziej lub mniej regularny sposób zmieniają zależności systemowe?

W takich właśnie przypadkach symulacja może stanowić alternatywną i uzasadnioną technikę rozwiązania modeli matematycznych (rysunek 8.1). Oznacza ona eksperyment wykonywany na modelu matematycznym opisującym badaną rzeczywistość, zakodowanym w programie komputerowym, który może być alternatywą dla eksperymentu przeprowadzonego bezpośrednio na badanym obiekcie (Mielczarek, 2009, s. 11–13). Symulacja zatem jest możliwa do zrealizowania dzięki modelowi matematycznemu, a więc obiektowi, którym się manipuluje w trakcie badań symulacyjnych.

W zestawieniu z innymi technikami ilościowymi wspomagającymi procesy decyzyjne symulacja pozwala na eksperymentowanie na modelu poprzez:

- przeprowadzanie procesu obliczeniowego w wielu iteracjach,
- ciągłą obserwację systemu,
- interpretację uzyskanych wyników.

Zanim zostaną zaprezentowane rozważania na temat istoty symulacji procesów biznesowych dla projektowania odpornych łańcuchów dostaw, konieczne jest jednak



**Rysunek 8.1. Sposoby analizy systemów gospodarczych i społecznych**

Źródło: na podstawie (Mielczarek, 2009, s. 12)

Tabela 8.1. Definicje symulacji

| Autor   | Definicja  |
|---|--|
| G. Gordon   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- technika rozwiązywania problemów polegająca na śledzeniu w czasie zmian zachodzących w dynamicznym modelu systemu</li> <li>- metoda eksperymentalnego rozwiązywania zagadnień</li> </ul>  |
| T.H. Naylor                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- technika numeryczna służąca do dokonywania eksperymentów na pewnych rodzajach modeli matematycznych, które opisują przy użyciu maszyny cyfrowej zachowanie się złożonego systemu w ciągu długiego czasu</li> </ul>  |
| G.S. Fishman                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- metoda badania zachowania się systemów</li> <li>- zbiór technik, które zastosowane do analizy zdarzeń dyskretnych (<i>discrete events</i>) systemu dynamicznego, generują ciągi zwane trajektoriami procesu (<i>sample path</i>), określające jego zachowanie (<i>collection of techniques that, when applied to the study of a discrete-event dynamical system, generates sequences called sample paths that characterize its behavior</i>)</li> <li>- czynność przedstawiania systemu za pomocą modelu symbolicznego, którym można operować i na podstawie którego otrzymujemy wyniki numeryczne</li> </ul> |
| J. Winkowski                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- odtwarzanie następujących po sobie przebiegów procesu w kolejności zgodnej z wpływem czasu</li> <li>- przebiega według pewnego programu (algorytmu) imitującego mechanizm procesu</li> <li>- służy do badania zarówno istniejących, jak i projektowanych procesów</li> </ul>  |
| G.W. Evans, G.F. Wallace, G.L. Surtherland        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- zastosowanie modelu w celu chronologicznego wygenerowania historii stanów tegoż modelu, która jest uważana za historię stanów modelowanego systemu</li> <li>- proces lub czynność konstruowania w chronologicznym porządku opisów stanów tworzących historię stanów model;</li> </ul>   |
| R.F. Barton                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- działanie modelu systemu przedmiotowego, realizowane w jakimś określonym celu</li> </ul>  |
| J. Banks, J.S. Carson II, B.L. Nelson, D.M. Nicol | <ul style="list-style-type: none"> <li>- imitacja działania rzeczywistego procesu lub systemu w czasie (<i>the imitation of the operation of a real-world process or system over time</i>)</li> </ul>  |
| S. Robinson                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- eksperymentowanie (za pomocą komputera) z uproszczoną imitacją działania systemu, w celu lepszego zrozumienia i/lub ulepszenia systemu (<i>experimentation with a simplified imitation (on a computer) of an operations system as it progresses through time, for the purpose of better understanding and/or improving that system</i>)</li> </ul>  |
| M. Beaverstock, A. Greenwood, W. Nordgren         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- naśladowanie lub odtwarzanie na drodze eksperymentu, wykorzystując model (lub odwzorowanie) jakiegoś rzeczywistego systemu</li> </ul>   |

Źródło: na podstawie (Banks i in., 2010; Barton, 1974, s. 3; Beaverstock i in., 2019, s. 20; Evans i in., 1973, s. 19; Fishman, 2001, s. 27; Gordon, 1974, s. 33-34; Naylor, 1975, s. 21; Robinson, 2004, s. 4; Winkowski, 1974, s. 9).

doprecyzowanie pojęcia „symulacja”. Termin ten ma swoje źródło w języku łacińskim (*simulo, similis, simulacrum*) i oznacza: „udawać, przedstawiać, naśladować, imitować, podobny, podobieństwo”. Może być rozpatrywany w różnych kontekstach. W dotychczasowych badaniach naukowych i dokumentującej je literaturze zagadnienie to było rozpatrywane w następujących kontekstach (Diakun, 2023):

- w kontekście metody badawczej (metoda symulacyjna, *simulation method*),
- w kontekście przedsięwzięcia techniczno-organizacyjnego (badanie symulacyjne, projekt symulacyjny, *simulation study*),
- w kontekście procesu obliczeniowego (*simulation run*).

Definicje symulacji zaprezentowano w tabeli 8.1.

Bazując na powyższym zestawieniu, można wnioskować, że symulacja komputerowa, której narzędziem współcześnie jest przeważnie program komputerowy (Łatuszyńska, 2011; Mielczarek, 2009, s. 15):

- jest pewnym eksperymentem,
- jest techniką numeryczną,
- jest realizowana na dynamicznych modelach, które odzwierciedlają rzeczywiste systemy,
- pomaga w zrozumieniu, jak system poddany analizie zachowuje się w czasie.

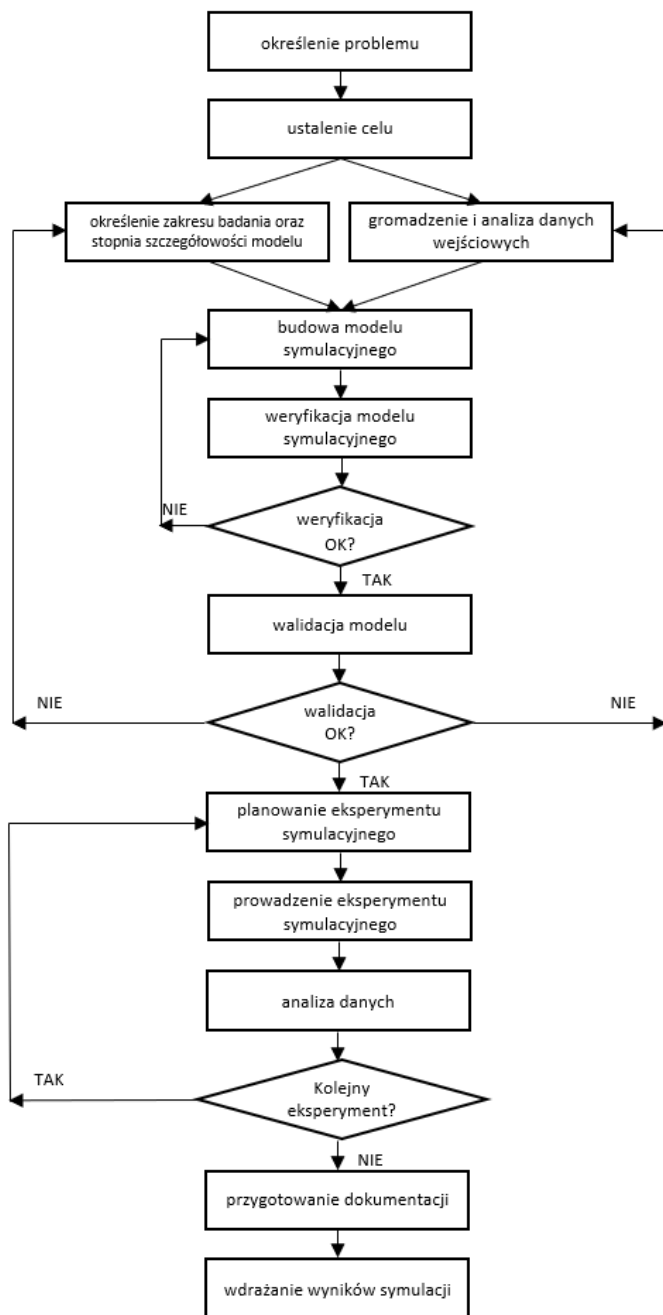
Etapy symulacji w kontekście badania symulacyjnego prezentowane są zwykle w literaturze przedmiotu w formie kroków, a także w formie schematu blokowego (rysunek 8.2).

Wyróżnia się następujące etapy badania symulacyjnego:

- określenie problemu,
- ustalenie celu,
- określenie zakresu badania oraz stopnia szczegółowości modelu,
- gromadzenie i analiza danych wejściowych,
- budowa modelu symulacyjnego,
- weryfikacja modelu,
- walidacja modelu,
- planowanie eksperymentu symulacyjnego,
- prowadzenie eksperymentu symulacyjnego,
- analiza danych,
- przygotowanie dokumentacji,
- wdrażanie wyników symulacji.

Symulacja jest atrakcyjnym narzędziem analizy ze względu na wiele swoich zalet (Fishman, 1981, s. 30–33). Badanie symulacyjne:

- może mieć zastosowanie do wysoce złożonych procesów,
- może dotyczyć nieistniejących jeszcze procesów,



**Rysunek 8.2. Etapy badania symulacyjnego**

Źródło: na podstawie (Banks i in., 2010, s. 13; Burduk, 2013, s. 69; Diakun, 2023; Mielczarek, 2009, s. 27).

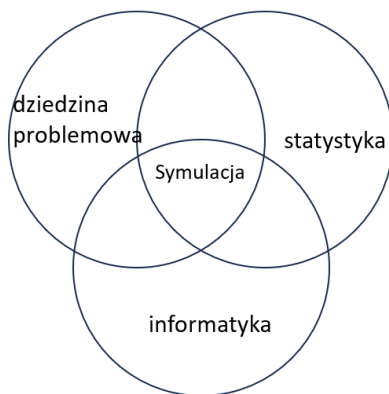
- może odnosić się do niebezpiecznych procesów,
- może przebiegać z wykorzystaniem niedostępnych zasobów,
- może dotyczyć rzeczywistych systemów, dla których zastosowane metody analityczne nie mogą dostarczyć rozwiązania,
- może ułatwić zrozumienie funkcjonowania analizowanych systemów rzeczywistych, pokazując wzajemne zależności systemowe,
- może uprościć podejmowanie decyzji w zakresie analizowanych fragmentów systemu,
- motywuje do usystematyzowania wiedzy o procesie, który poddano analizom,
- dzięki użyciu sterowników kontroli czasu pozwala zdefiniować liczbę jednostek czasu symulacji na sekundę czasu rzeczywistego, umożliwiając w ten sposób zarówno „skondensowanie czasu” działania systemu, jak i jego „rozszerzenie”,
- pozwala analizować powiązania między wejściem a wyjściem systemu oraz źródła zmienności systemu,
- można wielokrotnie powtórzyć.

Ponadto występujący w symulacji błąd pomiaru można skutecznie minimalizować. Zachowana jest także ciągłość badania, z możliwością wielokrotnego całkowitego przerywania eksperymentu na potrzeby prowadzenia analiz i następnie ponownego jego wznowiania z możliwością analizy wszystkich stanów. Dodatkowo obliczenia symulacyjne są tańsze i szybsze niż bezpośrednie obserwacje.

## 8.2. Opis procesu przed zmianą: charakterystyka problemu

Dokonującą się współcześnie rewizja wartości i przekonań w wielu obszarach życia społecznego i gospodarczego kreuje zmienione uwarunkowania działalności łańcuchów dostaw (Łupicka i Konecka, 2022). Jednoczesne oddziaływanie skutków kryzysu pandemicznego, agresji rosyjskiej na Ukrainę, wojen handlowych, a także intensyfikacja działań UE zmierzająca w stronę kreowania nowoczesnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej gospodarki sprawiają, że wymogiem dla współczesnych łańcuchów dostaw okazuje się „posiadanie fundamentalnej kompetencji sprawnego reagowania na istotne zmiany zakłócające osiągnięcie przyjętych planów bez popadania w długie kresy kryzysowe” (Banaszyk, 2022, s. 34). Tą kompetencją jest rezyliencja (odporność) rozumiana w tym badaniu jako zdolność adaptacyjna do zmniejszania prawdopodobieństwa wystąpienia nagłych zakłóceń o charakterze endo- lub egzogenicznym, przygotowania się na te zakłócenia, szybkiej reakcji na nie, przeciwdziałania rozprzestrzenianiu się zakłóceń, odbudowy po nich i w końcu powrotu do pierwotnej sytuacji lub do nowego, bardziej pożądanego stanu (Ali i in., 2017; Maryniak i in., 2021; Ocicka i in., 2022, s. 361; Szymczak, 2015, s. 39-54).

Badania symulacyjne łączące wiedzę z zakresu statystyki, informatyki oraz dziedziny problemowej (rysunek 8.3) są aktualnie wykorzystywane na potrzeby tworzenia cyberfizycznych łańcuchów dostaw, co w konsekwencji może się przyczynić do wzmocnienia odporności tych łańcuchów funkcjonujących w sieci skomplikowanych i dynamicznych powiązań procesowych oraz gospodarczych (Nowicka i Szymczak, 2020, s. 71).



**Rysunek 8.3. Interdyscyplinarność metody symulacyjnej**

Źródło: na podstawie (Diakun, 2023).

Przedstawione w tej części badanie wykorzystuje metody modelowania symulacyjnego do zwiększania odporności organizacji. Dzięki symulacjom możliwe jest przewidywanie skutków różnych decyzji oraz projektowanie bardziej odpornych systemów. Zastosowanie symulacji komputerowych pozwala przedsiębiorstwom nie tylko ograniczyć negatywne skutki kryzysów, ale także wykorzystać je jako szansę dla transformacji i rozwoju.

Omówiony poniżej proces rozbudowy systemu produkcyjnego dotyczy przodującego przedsiębiorstwa w badanym łańcuchu dostaw. Za przodującego uczestnika łańcucha uznano taki podmiot, którego działalność sprawia, że produkty finalne osiągają akceptowalną konkurencyjność rynkową za sprawą kluczowych kompetencji podmiotu i jego wyróżniających zdolności (Banaszyk i in., 2024, s. 42). Plany rozwojowe badanego podmiotu jako kluczowego ogniwa łańcucha dostaw mają bezpośredni wpływ na funkcjonowanie pozostałych przedsiębiorstw i stają się jednocześnie wyznacznikiem dalszego kierunku rozwoju dla nich.

Zaprojektowany dużo wcześniej układ postanowiono rozbudować o kolejną część, tj. nowy system transportu wewnętrznego wraz z doбором owijarki palet z wyrobem gotowym. Dane wyjściowe poszczególnych linii pakujących zaprojektowanego już systemu produkcyjnego, uwzględniające między innymi wydajność,



stały się jednocześnie danymi wejściowymi nowo projektowanego systemu transportu wewnętrznego.

Poddany analizie i zaprojektowany wcześniej system produkcyjny składał się z:

- czterech linii pakujących z paletami zawierającymi wyrób gotowy pakowany w paczki po 15 kg (linie: 1, 2, 3, 4),
- dwóch linii pakujących z paletami zawierającymi wyrób gotowy pakowany w paczki po 2 kg (linie: 5, 6),
- dwóch linii zasilających wszystkie linie pakujące w puste palety i opakowania (linie: puste palety i opakowania),
- jednej linii z paletami zawierającymi półprodukt w jednotonowych workach płóciennych, zwanych big bagami (linia BB),
- trzech linii dystrybuujących puste palety i opakowania pomiędzy linie 1 i 2, 3 i 4, 5 i 6 (linie: 12, 34, 56).

Wydajności poszczególnych linii produkcyjnych jeszcze przed rozbudową układu kształtowały się następująco:

- linia 1 – 19 palet na godzinę,
- linia 2 – 19 palet na godzinę,
- linia 3 – 19 palet na godzinę,
- linia 4 – 19 palet na godzinę,
- linia 5 – 7 palet na godzinę,
- linia 6 – 7 palet na godzinę,
- linia zasilająca wszystkie linie pakujące w puste palety – 7 palet na godzinę,
- linia zasilająca wszystkie linie pakujące w puste opakowania – 5 palet na godzinę,
- linia dystrybuująca puste palety i opakowania do linii 1 i 2 (linia 12) – 5 palet na godzinę,
- linia dystrybuująca puste palety i opakowania do linii 3 i 4 (linia 34) – 5 palet na godzinę,
- linia dystrybuująca puste palety i opakowania do linii 5 i 6 (linia 56) – 2 palety na godzinę.

Zamówienie inwestora – stanowiące podstawę dalszych rozważań – objęło rozbudowę zaprojektowanego już obszaru EOL (*End of Line*) i zawierało opracowanie koncepcji transportu wewnętrznego wraz z doborem owijarki palet z wyrobem gotowym na tym obszarze. Poszerzenie zaprojektowanego już systemu produkcyjnego o zautomatyzowany system transportu wewnętrznego wymagało:

- uwzględnienia złożonych zależności systemowych między kolejnymi liniami pakującymi a liniami zasilającymi je w materiały,
- uwzględnienia dynamicznych parametrów procesu,
- skoncentrowania wysiłków na scenariuszach przynoszących najwyższy zwrot z inwestycji przy najniższych kosztach kapitału.

Założeniem była zatem minimalizacja strat i tworzenie ciągłego przepływu na poziomie procesów. Źródłami marnotrawstwa mogły być wszelkie zakłócenia generujące przestoje, zbędne oczekiwania w przepływie oraz rozmaite nieregularności procesów.

### 8.3. Model symulacyjny

Opracowany scenariusz inwestycyjny przedstawiający nową koncepcję wraz ze sposobem jej realizacji zaprezentowano inwestorowi w oprogramowaniu do symulacji przepływu materiałów.

Decyzję o opracowaniu rozwiązania w oprogramowaniu symulacyjnym motywowano kategoriami korzyści, które miały objąć następujące etapy realizacji projektu biznesowego (Beaverstock i in., 2019, s. 43):

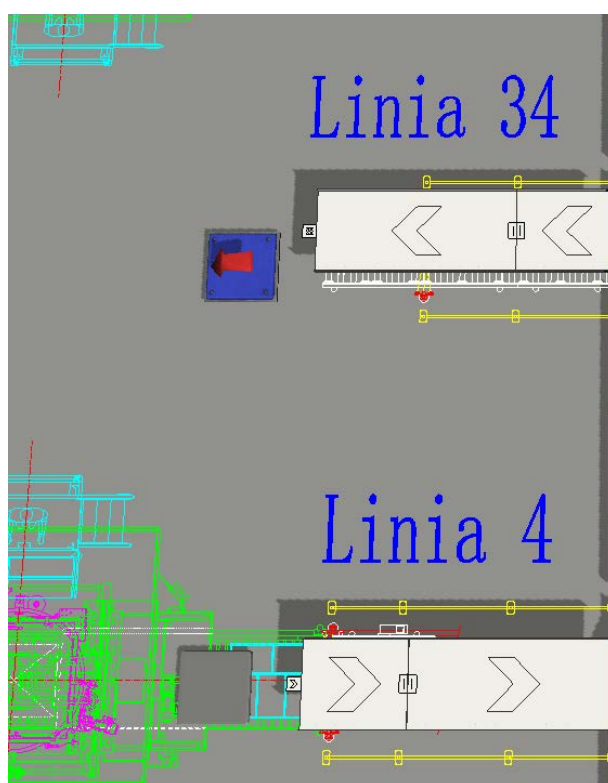
- stadium wykonalności,
- stadium unikania kosztów,
- stadium projektowania szczegółów,
- stadium weryfikacji bieżących procesów i operacji.

Wśród zalet korzystania z symulacji należy wymienić:

- identyfikację problemów jeszcze przed ich wystąpieniem,
- łatwość wprowadzania zmian,
- skrócenie czasu niezbędnego do oszacowania kosztów projektu,
- skrócenie czasu niezbędnego do oszacowania jego korzyści,
- możliwość skoncentrowania wysiłków na scenariuszach przynoszących najwyższy zwrot z inwestycji przy najniższych kosztach kapitału,
- minimalizację ryzyka opóźnień kolejnych etapów projektu,
- eliminację zbędnych zasobów,
- optymalizację infrastruktury i zasobów,
- minimalizację buforów międzyoperacyjnych,
- minimalizację powierzchni przeznaczanej na projektowany układ,
- równoważenie przepływu materiałów,
- możliwość ponownego wykorzystania zbudowanego modelu symulacyjnego w innych pracach projektowych,
- spójne projekty inżynierskie,
- obniżenie kosztów poniesionych z powodu błędów w projektowaniu,
- przyspieszone testowanie wprowadzonych zmian, zwłaszcza na współdzielonych zasobach,
- optymalne planowanie operacji,
- szybkie wdrożenie.

Badania symulacyjne procesów biznesowych mogą skutecznie rozwiązywać problemy i wspierać podejmowanie decyzji inwestycyjnych. Badane przedsiębiorstwo dążyło do identyfikacji możliwych usprawnień systemu dla już zaprojektowanej automatycznej linii pakującej poprzez redukcję działań, które nie generowały wartości dodanej. Aby zrozumieć ideę badań symulacyjnych, należy pamiętać, że poziom szczegółowości modelu zależy od celu, w jakim jest on tworzony. W zależności od konkretnego zadania, takiego jak symulacja produkcji, optymalizacja procesu produkcyjnego czy rozwiązywanie problemów ekonomicznych, wymagane są modele o różnej dokładności (Eberle, 2020).

W analizowanym przypadku wysiłki skupiono wyłącznie na budowie, analizie i doskonaleniu nowo powstającego modelu transportu wewnętrznego wraz z doborem owijarki na obszarze EOL i zaprezentowano go w formie trójwymiarowej wizualizacji. Zaprojektowana wcześniej część układu, której zapytanie inwestora nie dotyczyło, została zaprezentowana w postaci rysunków 2D (rysunek 8.4). Wydajności poszczególnych linii produkcyjnych potraktowano jako dane wejściowe nowo projektowanego układu.



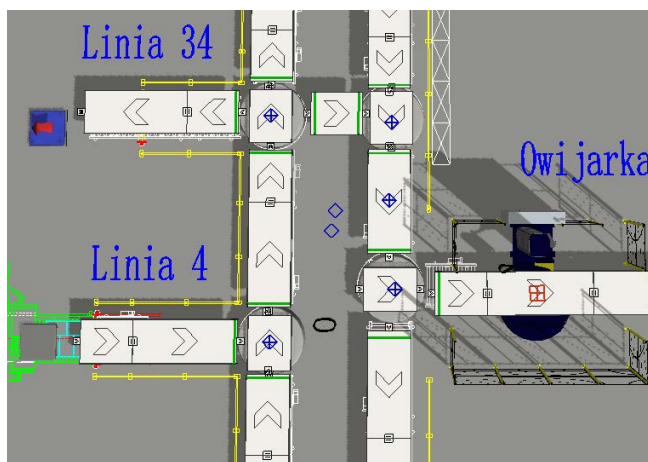
**Rysunek 8.4. Dane wejściowe do modelu**

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.

Na tym etapie realizacji projektu biznesowego wzięto pod uwagę:

- wymagania w zakresie wydajności poszczególnych linii,
- dostępną przestrzeń na obszarze EOL,
- możliwe utrudnienia, takie jak na przykład krzyżowanie tras zasilających linie pakujące w materiały z trasami przeznaczonymi do odbioru wyrobów gotowych,
- koszty inwestycji wynikające z długości przenośników.

W przeprowadzonym eksperymencie symulacyjnym zaproponowano rozmieszczenie przenośników w pętli, po której palety z towarem przemieszczały się zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara i kierowane były w stronę owijarki palet (rysunek 8.5).



**Rysunek 8.5. Pierwszy eksperyment symulacyjny**

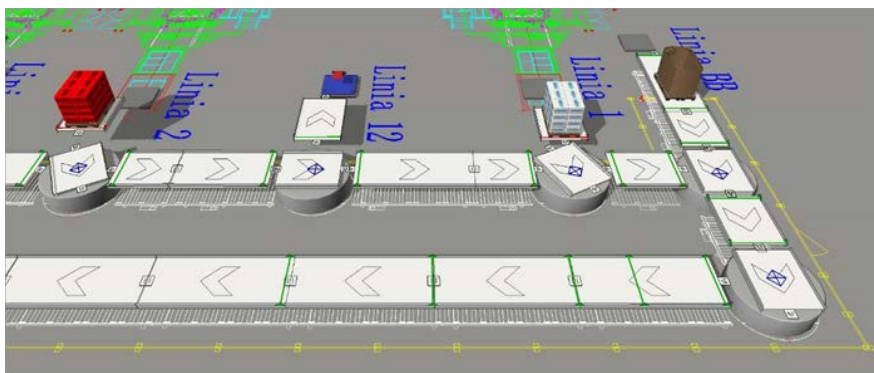
Źródło: materiały przedsiębiorstwa.

Zaprezentowany poniżej fragment systemu przepływu obejmuje wejścia do systemu, którymi są kolejno:

- linia BB transportująca palety z zapakowanym do płóciennych worków półproduktem w kierunku magazynu,
- linia 1 oraz linia 2 kierująca palety z towarem w kierunku owijarki palet.

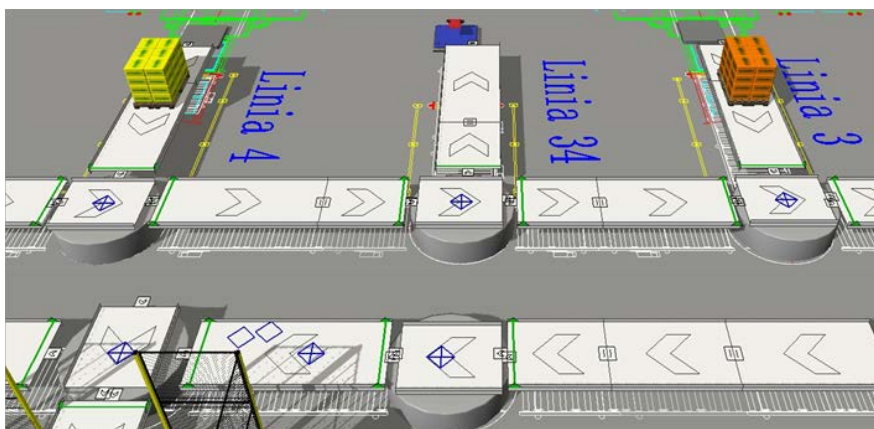
Między liniami 1 oraz 2 znajduje się linia 12, która zasila linie pakujące 1 i 2 w puste palety oraz opakowania (rysunek 8.6).

Podobnie linie 3 oraz 4 oraz 5 i 6 kierują produkty na paletach w stronę owijarki (rysunek 8.7). Z kolei linie 34 i 56 dystrybuują opakowania oraz puste nośniki do tych miejsc. Puste palety oraz opakowania dwu- i piętnastokilogramowe są dostarczane do całego układu dwiema liniami zwanymi „puste palety oraz opakowania” (rysunek 8.8).



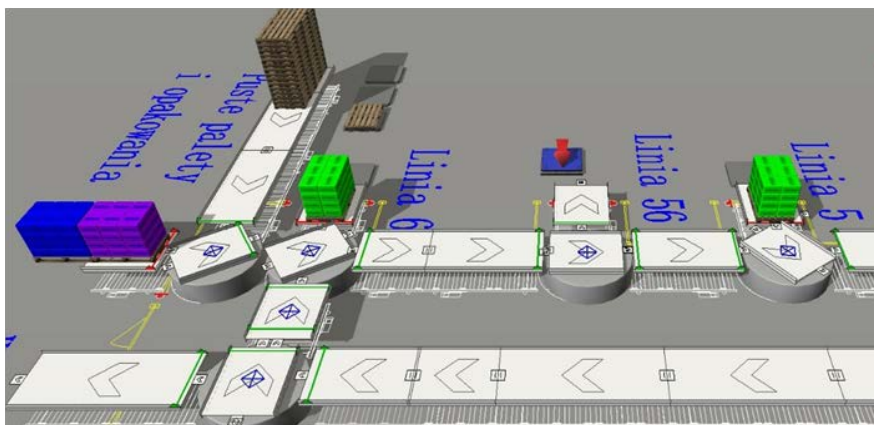
**Rysunek 8.6. Wejścia i wyjścia do i z systemu**

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.



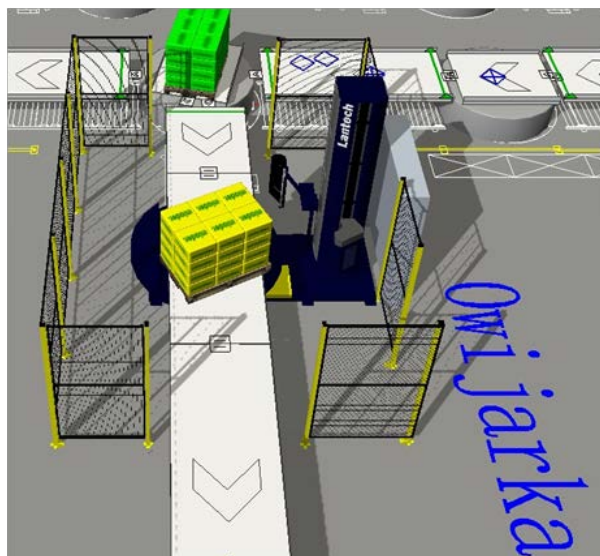
**Rysunek 8.7. Wejścia i wyjścia do i z systemu**

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.



**Rysunek 8.8. Wejścia i wyjścia do i z systemu**

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.



**Rysunek 8.9. Stanowisko owijarki palet**

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.

W zaprojektowanym układzie wszystkie palety z wyrobem gotowym kierowane są na stanowisko owijarki palet (rysunek 8.9).

Opracowane w oprogramowaniu do symulacji przepływu materiałów i zaprezentowane inwestorowi rozwiązanie miało na celu:

- tworzenie ciągłego przepływu na poziomie procesów, bez przestojów, zakłóceń i zahamowań,
- redukcję strat,
- równoważenie obciążeń stanowisk roboczych,
- minimalizację nieregularności procesów,
- skrócanie czasu realizacji zamówień klienckich.

Wobec powyższych założeń niezbędne było holistyczne spojrzenie na system oraz tworzenie scenariuszy zdarzeń i relacji, jakie mogły zachodzić w systemie poddanym analizie. Układ nie powinien być postrzegany jako zbiór niezależnych podsystemów, ale raczej jako jednolita całość (Goldratt i Cox, 2016, s. 175). Podejście holistyczne pozwala na kompleksowe zrozumienie, w jaki sposób powiązane elementy przyczyniają się do określenia siły całego łańcucha (Hamrol i in., 2015, s. 112–113). Ostatecznym celem każdej organizacji jest osiągnięcie sukcesu. Jednak w każdej działalności gospodarczej ograniczenia mogą utrudniać systemowi osiągnięcie jego pełnego potencjału. Te ograniczenia działają jak wąskie gardła, ograniczając przepustowość systemu. Teoria Ograniczeń (TOC) rozpoznaje wzajemne powiązania różnych elementów w systemie, podobnie jak w teorii sieci łańcuchów

(Moore i Scheinkopf, 1998), gdzie siła całej sieci jest określana przez najsłabsze ogniwo (Hamrol i in., 2015, s. 112). TOC koncentruje się na identyfikacji i zarządzaniu tymi ograniczeniami, zapewniając, że przepływ materiałów, produktów, informacji i zasobów ludzkich jest zgodny z możliwościami systemu. Podejście to pozwala organizacjom maksymalizować ich efektywność, ostatecznie otwierając drogę do trwałego sukcesu.

Uwzględniając wydajności poszczególnych linii pakujących, dobrano taki wariant owijarki, który zabezpieczał przepustowość całego systemu i nie stanowił ograniczenia w przepływie. Owijarka palet mogła owinąć do 120 palet w godzinę, podczas gdy zapotrzebowanie na jej prace wynosiło 96 palet na godzinę (tabela 8.2).

**Tabela 8.2. Wydajności poszczególnych linii**

|  | Palety / h |
|--|------------|
| Linia BB   | 6          |
| Linia 1  | 19         |
| Linia 12   | 2          |
| Linia 2  | 19         |
| Linia 3  | 19         |
| Linia 34   | 2          |
| Linia 4  | 19         |
| Linia 5  | 7          |
| Linia 56   | 1          |
| Linia 6  | 7          |
| Opakowania   | 5          |
| Wadliwe WG   | 2          |
| Rozładunek materiałów  | 2          |
| Puste palety Linia 12  | 3          |
| Puste palety Linia 34  | 3          |
| Puste palety Linia 56  | 1          |
| <b>Całkowita liczba palet, które mają zostać przesłane do owijarki</b> | <b>96</b>  |
| <b>Zawartość pętli</b>   | <b>122</b> |

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.

## 8.4. Rozwiązanie problemu: modelowanie wydajności linii produkcyjnej z wykorzystaniem symulacji – od wizji do rzeczywistości

W pierwszym stadium realizacji projektu biznesowego, tj. na etapie studium wykonalności projektu, inwestor podjął rozważania nad nowymi, alternatywnymi rozwią-

zianami i możliwościami ich zastosowania. Był to bowiem moment, kiedy można było jeszcze wprowadzić zmiany i uniknąć problemów w przyszłości.

Ponieważ uruchomienie linii 1 oraz linii 2 planowano dwa lata po rozpoczęciu produkcji na pozostałych liniach, przeprowadzono analizę kosztów i korzyści na podstawie opracowanego modelu symulacyjnego, by w rezultacie zastąpić istniejący model scenariuszem gwarantującym najwyższy zwrot z inwestycji przy najniższych kosztach kapitału. W następstwie powyższego podjęto decyzję o zakupie tańszej o 50% owijarki, która miała owijać 68 palet na godzinę, odbierając wyłącznie wyroby gotowe z linii 3, 4, 5 i 6, z wyłączeniem przez pierwsze dwa lata linii 1 oraz 2. Owijarka, gwarantując przepustowość całego systemu na poziomie 68 palet na godzinę, pozwoliła zwiększyć wydajności linii 3 oraz 4 z 19 palet na godzinę do 23 palet na godzinę (tabela 8.3).

**Tabela 8.3. Zwiększenie wydajności linii 3 i 4**

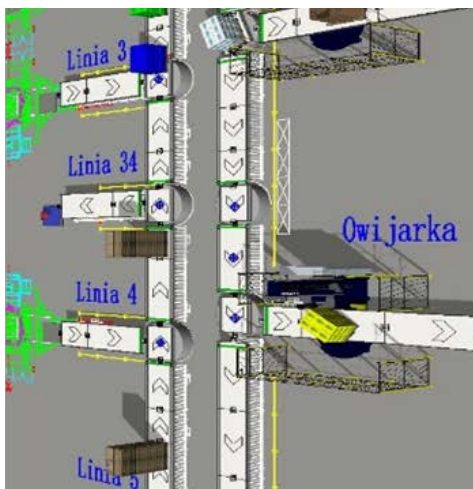
|  | Palety / h |  | Palety / h |
|--|------------|--|------------|
| Linia BB   | 6          | Linia BB   | 6          |
| Linia 1 - przyszłość   | 0          | Linia 1 - przyszłość   | 0          |
| Linia 12   | 2          | Linia 12   | 2          |
| Linia 2 - przyszłość   | 0          | Linia 2 - przyszłość   | 0          |
| Linia 3  | 19         | Linia 3  | 23         |
| Linia 34   | 2          | Linia 34   | 2          |
| Linia 4  | 19         | Linia 4  | 23         |
| Linia 5  | 7          | Linia 5  | 7          |
| Linia 56   | 1          | Linia 56   | 1          |
| Linia 6  | 7          | Linia 6  | 7          |
| Opakowania   | 5          | Opakowania   | 5          |
| Wadliwe WG   | 2          | Wadliwe WG   | 2          |
| Rozładunek materiałów  | 2          | Rozładunek materiałów  | 2          |
| Puste palety Linia 12  | 3          | Puste palety Linia 12  | 3          |
| Puste palety Linia 34  | 3          | Puste palety Linia 34  | 3          |
| Puste palety Linia 56  | 1          | Puste palety Linia 56  | 1          |
| <b>Całkowita liczba palet, które mają zostać przesłane do owijarki</b> | <b>58</b>  | <b>Całkowita liczba palet, które mają zostać przesłane do owijarki</b> | <b>66</b>  |
| <b>Zawartość pętli</b>   | <b>84</b>  | <b>Zawartość pętli</b>   | <b>92</b>  |

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.

Zaproponowane rozwiązanie pośrednie pozwoliło opracować rozwiązanie, w którym docelowo wszystkie linie mogły zwiększyć wydajność do 23 palet na godzinę, a system wyposażony został w dwie owijarki (rysunek 8.10, tabela 8.4).

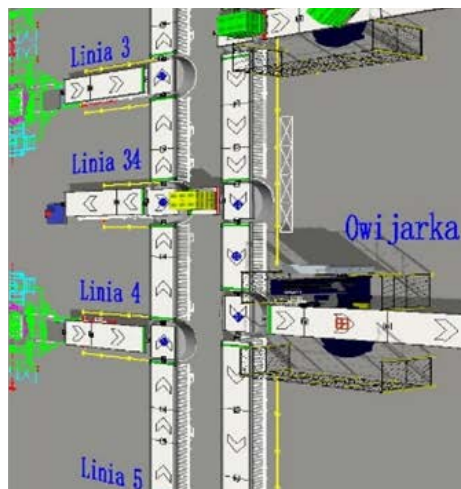
W ostatecznym i zatwierdzonym przez inwestora wariantcie dodano przenośnik, dzieląc jedną pętlę na dwie i skracając w ten sposób drogę z linii 4, 5 i 6 do owijarki (rysunek 8.11).





Rysunek 8.10. Wariant eksperymentu symulacyjnego

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.



Rysunek 8.11. Wariant eksperymentu symulacyjnego

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.

Tabela 8.4. Wydajności poszczególnych linii

|  | Palety / h |
|--|------------|
| Linia BB   | 6          |
| Linia 1 - przyszłość   | 23         |
| Linia 12   | 2          |
| Linia 2 - przyszłość   | 23         |
| Linia 3  | 23         |
| Linia 34   | 2          |
| Linia 4  | 23         |
| Linia 5  | 7          |
| Linia 56   | 1          |
| Linia 6  | 7          |
| Opakowania   | 5          |
| Wadliwe WG   | 2          |
| Rozładunek materiałów  | 2          |
| Puste palety Linia 12  | 3          |
| Puste palety Linia 34  | 3          |
| Puste palety Linia 56  | 1          |
| <b>Całkowita liczba palet, które mają zostać przesłane do owijarki</b> | <b>112</b> |
| <b>Zawartość pętli</b>   | <b>138</b> |

Źródło: materiały przedsiębiorstwa.

## Podsumowanie

Symulacja pozwoliła na zbudowanie trójwymiarowego modelu rzeczywistego systemu transportu wewnętrznego i analizę jego funkcjonowania. Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne ułatwiły zrozumienie inwestorowi konsekwencji możliwych decyzji jeszcze przed ich podjęciem, a opcja „co, jeśli” dostarczyła informacji zwrotnych dotyczących dopuszczalnych rozwiązań zidentyfikowanych problemów. Wykorzystana do tego celu symulacja stała się narzędziem do zaprezentowania, jak dzięki przeprowadzeniu procesu obliczeniowego w wielu iteracjach, ciągłej obserwacji projektowanego układu oraz jego bieżącej interpretacji można kształtować przepustowość projektowanego układu.

## Bibliografia

- Ali, A., Mahfouz, A. i Arisha, A. (2017). Analysing supply chain resilience: Integrating the constructs in a concept mapping framework via a systematic literature review. *Supply Chain Management*, 22(1), 16–39. <https://doi.org/10.1108/SCM-06-2016-0197>
- Banaszyk, P. (2022). Rezyliencja ekonomiczna i model biznesu przedsiębiorstwa logistycznego. W: S. Konecka i A. Łupicka (red.), *Logistyka gospodarki światowej* (s. 26–43). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu. <https://doi.org/10.18559/978-83-8211-106-4/2>
- Banaszyk, P., Kauf, S. i Szoltysek, J. (2024). *Logistyka zawiloci dziejów i nowe horyzonty*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Banks, J., Nelson, B. L., Carson, J. S. i Nicol, D. M. (2010). *Discrete-event system simulation*. Pearson.
- Barton, R. (1974). *Wprowadzenie do symulacji i gier*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Beaverstock, M., Greenwood, A. i Nordgren, W. (2019). *Symulacja stosowana: Modelowanie i analiza przy wykorzystaniu FlexSim*. InterMarium.
- Burduk, A. (2013). *Modelowanie systemów narzędziem oceny stabilności procesów produkcyjnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Diakun, J. (2023, 23 maja). *Różne oblicza i konteksty terminu „symulacja procesów” i związane z tym uwarunkowania dydaktyki tego zagadnienia na uczelni wyższej*. Modelowanie i doskonalenie procesów produkcyjnych i logistycznych z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego FlexSim – FlexSim InterMarium Tour. Poznań. Polska.
- Eberle, E. (2020, 6 grudnia). Process simulation – what can a digital twin do? *Control Engineering Europe*. <https://www.controlengurope.com/article/182444/Process-simulation-what-can-a-digital-twin-do-.aspx>
- Evans, G., Wallace, G. i Sutherland, G. (1973). *Symulacja na maszynach cyfrowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Fishman, G. (1981). *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.

- Fishman, G. (2001). *Discrete-event simulation: Modeling, programming, and analysis*. Springer.
- Goldratt, E. M. i Cox, J. (2016). *The goal: A process of ongoing improvement*. Routledge.
- Gordon, G. (1974). *Symulacja systemów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Hamrol, A., Gawlik, J. i Skołod, B. (2015). *Strategie i praktyki sprawnego działania: Lean, Six Sigma i inne*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Łatuszyńska, M. (2011). Metody symulacji komputerowej – próba klasyfikacji logicznej. *Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą*, 41.
- Łupicka, A. i Konecka, S. (2022). Ryzyko zakłóceń w łańcuchach dostaw w dobie kryzysów gospodarczych i pandemii COVID-19. W: S. Konecka i A. Łupicka (red.), *Logistyka gospodarki światowej* (s. 44–59). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu. <https://doi.org/10.18559/978-83-8211-106-4/3>
- Maryniak, A., Bulhakova, Y. i Lewoniewski, W. (2021). *Resilient supply chains 4.0 – a research review*. 2021 26th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications, APCC. Kuala Lumpur, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/APCC49754.2021.9609916>
- Mielczarek, B. (2009). *Modelowanie symulacyjne w zarządzaniu. Symulacja dyskretna*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Moore, R. i Scheinkopf, L. (1998). *Theory of constraints and lean manufacturing: Friends or foes*. Chesapeake Consulting.
- Naylor, T. (1975). *Modelowanie cyfrowe systemów ekonomicznych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Nowicka, K. i Szymczak, M. (2020). Logistyka i łańcuchy dostaw w obliczu czwartej rewolucji przemysłowej. *Studia BAS*, 3(63), 61–84. <https://doi.org/10.31268/StudiaBAS.2020.22>
- Ocicka, B., Mierzejewska, W. i Brzeziński, J. (2022). Correction: Creating supply chain resilience during and post-COVID-19 outbreak: The organizational ambidexterity perspective. *DECISION*, 49, 361. <https://doi.org/10.1007/s40622-022-00322-z>
- Robinson, S. (2004). *Simulation: The practice of model development and use*. John Wiley & Sons.
- Sargut, G. i McGrath, R. G. (2011). Learning to live with complexity. *Harvard Business Review*, 89(9), 68–76. <https://www.semanticscholar.org/paper/Learning-to-live-with-complexity.-Sargut-McGrath/c96d248a8b4f9b3b5722b1ae483c67ec24ebb686>
- Szymczak, M. (2015). Elastyczność, wrażliwość i odporność jako cechy adaptacyjnych łańcuchów dostaw. *Studia Oeconomica Posnaniensia*, 3(6), 39–54.
- Winkowski, J. (1974). *Programowanie symulacji procesów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.