

WYKORZYSTANIE DYSKRETNEJ SYMULACJI KOMPUTEROWEJ W ZARZĄDZANIU SYSTEMAMI WYTWÓRCZYMI MAŁYCH I ŚREDNICH PRZEDSIĘBIORSTW

Magdalena Jurczyk-Bunkowska^{1*}

¹ Politechnika Opolska, Wydział Ekonomii i Zarządzania, Polska

Streszczenie: W artykule pokazano, w jaki sposób symulacja komputerowa może wspierać zarządzanie systemami wytwórczymi w małych i średnich przedsiębiorstwach (MŚP). Możliwość jej wykorzystania otwiera się ze względu na postępujące upraszczanie narzędzi umożliwiających modelowanie i symulację komputerową. Rosnąca presja na szybkie dostosowanie się do sytuacji rynkowej i potrzeba oceny racjonalności wdrażania zmian sprawia, że MŚP widzą potrzebę wykorzystania rozwiązań bardziej wymagających niż intuicja i doświadczenie. Dlatego celem artykułu jest pokazanie potencjału wykorzystania symulacji komputerowej w praktyce zarządzania systemami wytwórczymi małych i średnich przedsiębiorstw. Cel zrealizowano na podstawie analizy czterech opublikowanych przykładów. Dwa z nich bazowały na własnych doświadczeniach polskich przedsiębiorstw zaliczanych do MŚP. Podstawą dwóch kolejnych były raporty z wykorzystania symulacji zdarzeń dyskretnych w średniej wielkości przedsiębiorstwie szwedzkim i małej firmie z Ekwadoru produkującej kanały deszczowe. Analiza zebranych w ten sposób spostrzeżeń pokazała z praktycznej strony efekty wykorzystania symulacji w zarządzaniu systemami wytwórczymi, ale także umożliwiła sformułowanie praktycznych wskazówek odnoszących się do zbierania danych dla opracowania modelu komputerowego, jego walidacji, a także planowania eksperymentów symulacyjnych.

Słowa kluczowe: małe i średnie przedsiębiorstwa (MŚP), podejmowanie decyzji, symulacja komputerowa, symulacja zdarzeń dyskretnych, system wytwórczy

Kod klasyfikacji JEL: M11, C63

¹ Magdalena Jurczyk-Bunkowska, dr inż., ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, Polska,
m.jurczyk-bunkowska@po.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4066-3605>

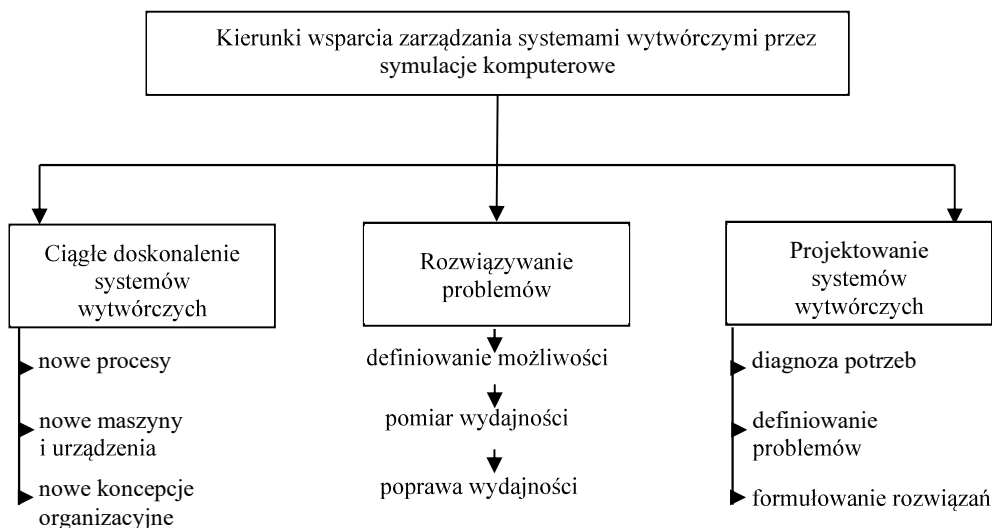
* Autor korespondencyjny: Magdalena Jurczyk-Bunkowska, m.jurczyk-bunkowska@po.edu.pl

Wprowadzenie

Małe i średnie przedsiębiorstwa (MŚP) w obecnej sytuacji rynkowej, uwarunkowanej okolicznościami geopolitycznymi, muszą być jeszcze bardziej elastyczne i umieć precyzyjnie dostosowywać się do zmian popytu. Postępy w zakresie technologii informacyjnych, zwiększające możliwości i dostępność różnego typu narzędzi informatycznych, oferują nowe sposoby wspierania decyzji zarządczych dla tej klasy przedsiębiorstw. Tendencje te są oznaką wchodzenia w erę Przemysłu 4.0 nie tylko dużych, ale też średnich i małych przedsiębiorstw. Tworzą ją technologie przetwarzania w chmurze, analityka wielkich zbiorów danych (Big Data), rozszerzona rzeczywistość, roboty autonomiczne, cyberbezpieczeństwo, pionowa i pozioma integracja cybersystemów. Symulacja jest postrzegana jako technologia mogąca pobudzić wdrażanie tych elementów w przedsiębiorstwach, także MŚP (Gasjek et al., 2019). Rosnąca moc obliczeniowa, wzrost dostępności oprogramowania i danych sprawiają, że symulacja komputerowa staje się coraz szerzej wykorzystywana w zarządzaniu, ponieważ umożliwia zrozumienie zachowania się systemu w różnych warunkach, co pozwala precyzyjnie przewidywać skutki decyzji (Calder et al., 2018). Dotyczy to także różnego typu decyzji w systemie wytwórczym, od drobnych usprawnień organizacyjnych, aż po zaawansowane innowacje technologiczne. Narzędzia cyfrowe znacznie usprawniają i skracają procesy planowania i rozwoju systemów wytwórczych. Możliwość przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych nabiera tym samym większego znaczenia, im bardziej złożony jest system. Duża złożoność i stochastyczność takich systemów ogranicza możliwości zastosowania klasycznych metod analitycznych bądź matematycznych. Skutkuje to często tym, że decyzje podejmowane są na podstawie przewidywań i intuicji zarządzającego. W takich przypadkach warto korzystać z symulacji komputerowej, która pozwala na badanie zachowania się systemu przy użyciu modeli, a więc bez zakłócania przebiegu produkcji. Wyniki analiz bazujących na symulacji komputerowej są wykorzystywane w zarządzaniu systemami wytwórczymi, w szerokim zakresie odnosząc się do decyzji strategicznych, taktycznych i operacyjnych (Mourtzis et al., 2014). Główne kierunki wsparcia projektowania i eksploatacji systemów wytwórczych przez symulacje komputerowe zostały przedstawione na Rysunku 1.

Wyróżnia się cztery główne techniki symulacji komputerowej: Monte Carlo (MC), symulacja zdarzeń dyskretnych (Discrete Event Simulation – DES), dynamika systemowa (System Dynamics – SD) i symulacja agentowa (Agent Based Simulation – ABS), których wybór zależy od rodzaju problemu. W modelowaniu i symulacji procesu produkcyjnego dobrze sprawdza się symulacja zdarzeń dyskretnych (DES) i dynamika systemowa (SD) (Łatuszyńska, 2015). W DES badany proces jest modelowany jako ciąg zdarzeń, przy czym zmiany stanu modelu pojawiają się w określonych punktach czasu, w momencie wystąpienia pewnych zdarzeń. Tak jak w urzędzie, gdzie pracownicy współdziałają ze sobą, żeby zapewnić klientom prawidłową obsługę. Przyjście klienta do urzędu generuje zdarzenie, które będzie wykonane w pewnym przedziale czasu. Zmieni to stan systemu w ten sposób, że zmieni się liczba dostępnej obsługi, aż do momentu zakończenia procedowania sprawy. Ten typ modelowania jest wykorzystywany głównie do podejmowania

decyzji na poziomie taktycznym i operacyjnym, znajdując zastosowanie we wsparciu decyzji dotyczących rozwoju systemów wytwórczych (Kampa et al., 2017). Dynamika systemowa (DS) jest techniką symulacji stosowaną głównie do analizy problemów słabo ustrukturalizowanych, o dużej liczbie współzależności między elementami. Operuje wysokim poziomem agregacji oraz zakłada ciągłość i nielosowość zmian, np. emisji odpadów z systemu produkcyjnego elektrowni. Dlatego ten model symulacji jest wykorzystywany dla wspomagania decyzji o charakterze strategicznym (Hoffmann & Protasowicki, 2013).



Rysunek 1. Symulacja komputerowa w zarządzaniu rozwojem i eksploatacją systemów wytwórczych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Mourtzis, 2020)

Pomimo szerokiej możliwości dyskretna symulacja komputerowa jest rzadko wykorzystywana w codziennych procesach decyzyjnych przedsiębiorstw, szczególnie tych małych i średnich. Podnoszonymi problemami są trudność modelowania (Sobottka et al., 2017), kosztowność i czasochłonność tworzenia modelu i eksperymentów symulacyjnych (Law & Kelton, 2000; Robinson, 2014). W modelowaniu DES wykorzystywany jest software różnego typu. Do najpopularniejszych wśród inżynierów przemysłowych należą: komercyjne systemy, takie jak: Tecnomatix Plant Simulation, ARENA, Enterprise Dynamics czy FlexSim. Coraz większą popularność uzyskują też systemy typu open source, takie jak: Salabim, JaamSim, których użyteczność jest porównywana do systemów komercyjnych (Lang et al., 2021).

W niniejszym artykule skoncentrowano się na decyzjach związanych z zarządzaniem systemami wytwórczymi, które są wspomagane przez symulację zdarzeń dyskretnych (DES). Celem artykułu jest pokazanie możliwości zastosowania DES, jako narzędzia wspomagającego decyzje zarządcze w systemach wytwórczych małych i średnich przedsiębiorstw. Ma to poszerzyć wiedzę teoretyczną i praktyczną na

temat stosowania DES i pomóc formułować warunki jego wykorzystania w procesach decyzyjnych MŚP. Dlatego pytanie badawcze koncentruje się na problemie: Jakie wyzwania i możliwości niesie ze sobą wykorzystanie symulacji zdarzeń dyskretnych w zarządzaniu systemem wytwórczym małego lub średniego przedsiębiorstwa. Ze względu na niewielką liczbę publikacji odnoszących się do tego problemu przeprowadzono badania, porównując własne doświadczenia w zakresie modelowania systemów wytwórczych z przykładami w dostępnych publikacjach. Wykorzystano cztery analizy przypadków, dwa z Polski (MŚP) oraz jeden ze Szwecji (średnie przedsiębiorstwo) i jeden przypadek z Ekwadoru (małe przedsiębiorstwo). W kolejnych częściach artykułu przedstawiono analizę literatury związaną z różnymi aspektami implementacji DES w zarządzaniu systemami wytwórczymi, omówiono metodykę badawczą, następnie przedstawiono wyniki badań oraz sformułowano wnioski.

Przegląd literatury

W systemie wytwórczym realizowana jest działalność produkcyjna polegająca na wytwarzaniu wyrobów lub świadczeniu usług spełniających potrzeby klientów. Przetwarzanie czynników wejścia na elementy wyjścia odbywa się w procesach, stanowiących zespół powiązanych działań uwzględniających pracę maszyn i ludzi. W tym ujęciu system wytwórczy jest w odpowiedni sposób zaprojektowanym i zorganizowanym układem powiązanych wzajemnie strumieni materiałów, informacji i energii (Lewandowski et al., 2014). Można go rozpatrywać jako zbiór wzajemnie powiązanych stanowisk roboczych, które biorą udział w zmianie właściwości przedmiotu pracy przez realizację procesów produkcyjnych podstawowych, pomocniczych i obsługowych (Pająk, 2006). System wytwórczy obok systemu dystrybucji oraz badań i rozwoju stanowi system produkcyjny przedsiębiorstwa.

Efektywne funkcjonowanie systemu wytwórczego zależy od odpowiedniego zaprojektowania oraz zorganizowania jego elementów i relacji między nimi, tak by móc osiągać postawione przed nim cele wynikające ze strategii przedsiębiorstwa. Zarządzanie systemem wytwórczym polega na nieustannym procesie planowania jego rozwoju w kontekście zmian czynników zewnętrznych, organizowania i kontrolowania relacji pomiędzy jego elementami z uwzględnieniem wektorów wejścia i wyjścia, sterowaniem strumieniami przepływów, a także motywowaniem pracowników.

Najważniejsze z perspektywy kosztów i trwałości wpływu na system wytwórczy są decyzje związane z jego planowaniem i organizowaniem. Typowe rozważane zagadnienia dotyczą: wyboru maszyn, zmian w technologii, procesach, materiałach oraz w konfiguracji stacji roboczych. Wiążą się one z rozważeniem kompromisów pomiędzy kosztem, jakością, elastycznością systemu wytwórczego. Zazwyczaj różne dostępne alternatywy zmian pociągają za sobą odmienne skutki, które determinują realizację celów strategicznych i konkurencyjność przedsiębiorstwa (Soosay et al., 2016). Dlatego decyzje związane z planowaniem i organizowaniem systemu wytwórczego wymagają rozważenia wpływu wariantów inwestycji na system jako całość. Umożliwiają to narzędzia modelowania i symulacji poprzez odwzorowanie systemu produkcyjnego, jego analizę i obserwację wpływu wprowadzanych zmian

na jego parametry. Pozwalają na ocenę różnych alternatyw konfiguracji systemu i strategii operacyjnych, dzięki czemu mogą wspomagać podejmowanie decyzji w projektowaniu systemów produkcyjnych (Negahban & Smith, 2014). Symulacja umożliwia analizę projektu dla nowych systemów produkcyjnych i przebudowę systemów istniejących (Jamil & Razali, 2015). Wykorzystanie symulacji zdarzeń dyskretnych pozwala zrozumieć i analizować systemy wytwórcze i w ten sposób wspierać decyzje związane z jego ulepszaniem zgodnie z cyklem: zdefiniuj, zmierz, przeanalizuj i ulepsz (DMAIC – Define, Measure, Analyze, Improve, and Control). Narzędzia te pozwalają zrozumieć zachowanie obecnego procesu stanu, zdefiniować ograniczenia oraz testować różne scenariusze proponowanych rozwiązań. W ten sposób menedżerowie mogą być wspomagani w podejmowaniu decyzji w celu opracowania bardziej efektywnych rozwiązań usprawniających, zgodnych z planami i celami strategicznymi (Hussain et al., 2019).

Symulacja zdarzeń dyskretnych (DES) jest stosowana zwłaszcza do modelowania i optymalizacji złożonych systemów produkcyjnych i linii montażowych, w których następują złożone i dynamiczne układy zdarzeń z pojawiającymi się losowo zakłóceniami. Umożliwia ona odzwierciedlanie charakterystycznych zmienności i losowości przy użyciu rozkładów prawdopodobieństwa (Prajapat & Tiwari, 2017). Dynamiczna charakterystyka systemu nie może być opisana równaniami matematycznymi, takimi jak równania różniczkowe, można wykorzystać jedynie diagram aktywności. Dlatego głównym celem symulacji zdarzeń dyskretnych jest analiza statystycznych charakterystyk zdarzeń systemowych (Qiao & Wang, 2021). Mimo tego, że symulacja zdarzeń dyskretnych jest uznanym narzędziem, złożoność modelowania sprawia, że wykorzystanie jej pełnego potencjału jest nadal niewielkie, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach (MŚP) (Sobottka et al., 2017). Podnoszone są argumenty o koszcie samych narzędzi do symulowania zdarzeń dyskretnych, czasochłonności, potrzebie specjalistycznej wiedzy (Robinson, 2014), a także o konieczności pozyskania wiedzy z różnych obszarów organizacji i umiejętności powiązania analizy ilościowej i jakościowej (Sturrock, 2011). Jednak rozwój oprogramowania DES, sposobu jego sprzedaży i wzrost kompetencji komputerowych sprawia, że warto weryfikować znaczenie tych argumentów.

Metodyka badawcza

Celem badań w naukach o zarządzaniu jest dążenie do poznawania i upowszechniania prawdy na temat badanej rzeczywistości organizacyjnej. Dotyczą one powstawania, funkcjonowania, przekształcania, rozwoju oraz współdziałania organizacji gospodarczych. Obejmują swoim zakresem zagadnienia, które mają wpływ na podejmowanie w organizacjach racjonalnych decyzji i sprawne funkcjonowanie organizacji, przyczyniając się do skutecznego osiągnięcia wytyczonych celów (Walczak, 2015). Jednym z głównych zadań naukowców w zarządzaniu jest opracowanie praktycznych dyrektyw dotyczących konkretnych decyzji (Romanowska, 2014), ponieważ w naukach stosowanych najważniejszą rolę odgrywa funkcja aplikacyjna (Sudoł, 2014). Aby rozpoznać wyzwania i możliwości wykorzystania symulacji zdarzeń dyskretnych w podejmowaniu przez MŚP decyzji dotyczących

zarządzania systemem wytwórczym, zastosowano metodę analizy krytycznej. Polega ona na wnikliwej obserwacji praktyki ukierunkowanej na dostrzeganie szczegółów i zagadnień, które nie zawsze są akcentowane w teoriach naukowych. Analiza krytyczna stara się identyfikować współzależności i mechanizmy funkcjonowania organizacji oraz motywy procesów decyzyjnych. W niniejszym opracowaniu oparto ją na obserwacji i porównaniu wykorzystania symulacji zdarzeń dyskretnych w czterech przedsiębiorstwach: dwóch małych i dwóch średnich. Dane do badań zebrano na podstawie własnych doświadczeń z opracowania modeli symulacyjnych oraz pozyskano z opublikowanych raportów. Schemat badań pokazano w Tabeli 1.

Tabela 1. Schemat badań pokazujących możliwości zastosowania DES we wspomaganii decyzji zarządczych w systemach wytwórczych MŚP

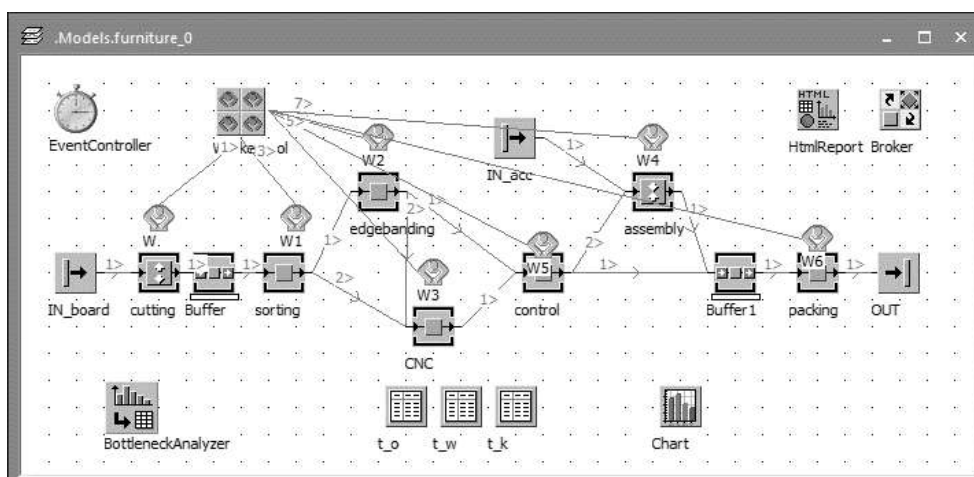
Problem badawczy	Jakie możliwości i jakie wyzwania wiążą się z wykorzystaniem symulacji zdarzeń dyskretnych dla wspierania decyzji zarządczych w systemach wytwórczych MŚP?			
Dane	Własne doświadczenia: – małe przedsiębiorstwo branży meblarskiej (Jurczyk-Bunkowska, 2020), – średnie przedsiębiorstwo, wytwórca okien dachowych (Jurczyk-Bunkowska, 2021).		Opublikowane „case studies”: – mała firma, produkcja i montaż kanałów deszczowych, Ekwador (Guerrero & Escobar, 2022), – średnie przedsiębiorstwo, produkty dla sektora energetycznego, Szwecja (Eriksson & Hendberg, 2021)	
Analiza danych	Zbieranie danych w celu opracowania modelu	Opracowywanie i walidacja modelu	Ekspertyzy symulacyjne	Efekty wykorzystania symulacji
Wnioski	Porównanie doświadczeń, zebranie dobrych praktyk			

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki badań

Zbieranie danych w celu opracowania modelu

Jak wskazuje literatura, postępowanie w akwizycji danych, zbieranych także w czasie rzeczywistym, zwiększa możliwości ich wykorzystania w tworzeniu modeli dla symulacji zdarzeń dyskretnych (Woo-Kyun et al., 2022). Żaden z badanych przypadków nie wykorzystywał takich rozwiązań. Na Rysunku 2 pokazano model systemu wytwórczego w małej firmie meblarskiej w Polsce produkującej meble na wyposażenie biur i ich zaplecza. Przedsiębiorstwo zatrudnia 10 pracowników produkcyjnych, przy czym w zamodelowanym warsztacie pracuje czterech, a pozostali tworzą dwa zespoły montujące meble u klientów. System wytwórczy jest zasilany przez dwa magazyny: płyt i blatów (IN_board) oraz akcesoriów (IN_acc), takich jak zawiasy, prowadnice, uchwyty itp. Model został wykonany przy wykorzystaniu oprogramowania Tecnomatix Plant Simulation v. 13.



Rysunek 2. Model systemu wytwórczego małego przedsiębiorstwa produkującego meble biurowe

Źródło: Opracowanie własne

Dane potrzebne do przygotowania modelu to: sposób powiązania poszczególnych stanowisk produkcyjnych i magazynów międzyoperacyjnych, czasy operacji technologicznych, czasy przygotowawczo-zakończeniowe (t_{pz}), liczba i czas trwania awarii, czas pobrania elementów z magazynu, pojemność magazynów międzyoperacyjnych, liczba braków kwalifikacji pracowników do obsługi poszczególnych stanowisk. Dane te znajdują się częściowo w dokumentach, takich jak np. karty technologiczne. Jednak małe i średnioseryjne przedsiębiorstwa wykazują niższy stopień formalizacji. Szczególnie przy małej i średnioseryjnej produkcji wykonują one często zlecenia zgodnie z ramowymi procesami technologicznymi według projektu i w dokumentacji nie można znaleźć potrzebnych danych. Technomatix Plant Simulation umożliwia zapisanie wartości np. czasu w postaci zmiennej pseudolosowej przypisywanej np. z rozkładu normalnego. Należy przyjmować zasadę, że im wyższy jest udział pracy ręcznej, tym większe odchylenie standardowe czasów operacji technologicznych oraz przebrojeń. Zbierając dane w celu opracowania modeli dla przedsiębiorstw w Polsce, wykorzystano obserwację systemu wytwórczego, analizę dokumentacji technologicznej (szczególnie w średniej wielkości przedsiębiorstwie), ale także nagrania wideo, które umożliwiły oszacowanie czasów czynności oraz przebrojeń na poszczególnych stanowiskach. Dodatkowo korzystano z wywiadów i wiedzy kierowników produkcji, szczególnie w trakcie walidacji i poprawiania modelu.

Raport z badań w szwedzkim przedsiębiorstwie wskazuje, że dane były gromadzone w bardziej formalny sposób – przede wszystkim z systemu ERP, ale także poprzez pliki Excela. W przedsiębiorstwie tym wiele procesów jest realizowanych w warunkach wysokiej automatyzacji, chociaż np. spawanie odbywa się ręcznie. Mimo to autorzy badań zwrócili uwagę na znaczne rozbieżności pomiędzy czasami planowanymi a raportowanymi. Żeby je przeanalizować, obliczono łączne czasy

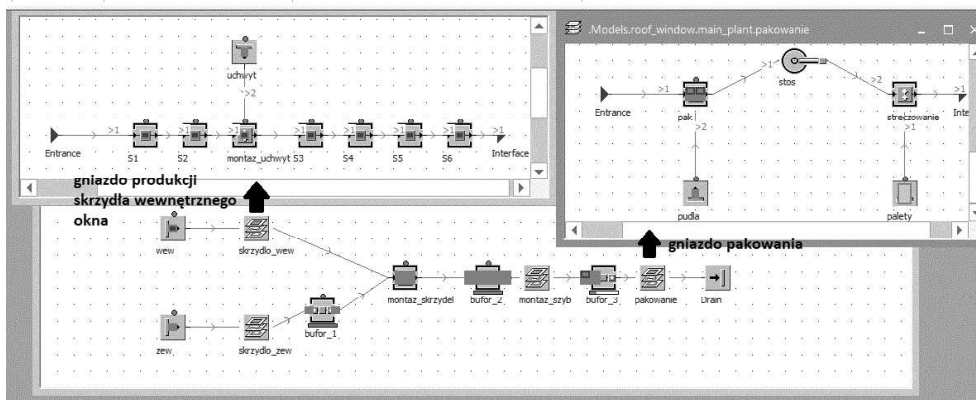
produkcji od rozpoczęcia nowego zamówienia do zakończenia jego realizacji. W tych czasochłonnych obliczeniach uwzględniono produkcję braków i czasy awarii, dzięki czemu wyjaśniono rozbieżności pomiędzy planowanymi czasami realizacji zlecenia z systemu ERP a raportowanymi przez operatorów maszyn. Wynikały one między innymi z operacji naprawy pierwotnie nieodpowiednio wykonanych elementów. Zwrócono też uwagę na ograniczoną dostępność specjalistycznego oprzyrządowania niezbędnego dla wykonania niektórych operacji.

Ciekawe rozwiązanie zastosowano, tworząc model przepływu produkcji w małym przedsiębiorstwie z Ekwadoru. Na podstawie obserwacji i wywiadu opracowano model w notacji BPMN (Business Process Model and Notation). Następnie uzupełniono go danymi zebranymi od operatorów i zweryfikowano na podstawie własnych obserwacji.

Opracowanie i walidacja modelu

Właściwe modelowanie polega na tym, by przetworzyć całą zdobytą wiedzę na temat systemu wytwórczego i odwzorować ją w modelu, zachowując w nim wzajemne relacje między elementami oraz ich charakterystykę. Model stanowi odwzorowanie najistotniejszych cech badanego lub projektowanego przedmiotu z punktu widzenia zadania, któremu służy w określonej rzeczywistości lub abstrakcji (Durlik, 2000). Musi on zatem być odpowiedni dla sformułowanego problemu – decyzji, którą ma wspomagać. Model jest tylko uproszczeniem systemu wytwórczego. Należy przeanalizować, w jaki sposób odwzorować go, by zachować relacje pomiędzy rzeczywistymi elementami z wymaganą dokładnością. W przypadku modelowania warsztatu (Rysunek 2), gdzie produkowane są meble, przyjęto, że wytwarzane są trzy typy wyrobów: małe, średnie i duże, oraz określono proporcje pomiędzy nimi. W rzeczywistości każde zlecenie jest inne i zawiera elementy małe, duże i średnie. Wielkość elementów determinuje czasy operacji technologicznych na tyle, że przyjmując to uproszczenie, można opisać je przedziałem, z którego wartości dobierane są losowo. Innymi często stosowanymi uproszczeniami są: przyjmowanie zbliżonych kwalifikacji dla pracowników produkcyjnych wykonujących prace ręczne, pomijanie czasów transportowych, zakładanie bezawaryjnej pracy magazynu. Zastosowane uproszczenia muszą być nieznaczące dla długości cyklu produkcyjnego. Większe rozbieżności spowodują nieadekwatność modelu oraz systemu wytwórczego i wykluczają wykorzystanie go dla wsparcia decyzji zarządczych. Dobrą praktyką, która ułatwia walidację, jest modułowa budowa modelu bardziej złożonych systemów wytwórczych, tak jak pokazano na Rysunku 3. Dzięki niej można obserwować przepływ pojedynczych detali, ale także powiązania pomiędzy bardziej złożonymi komórkami produkcyjnymi, takimi jak gniazda przedmiotowe czy technologiczne.

Zgodność odwzorowania systemu wytwórczego w modelu sprawdza się w ramach jego walidacji. Przeprowadza się ją w oparciu o dane testowe z rzeczywistego systemu, dla których znane są wyniki. Walidacja polega na sprawdzeniu, czy model odzwierciedla realny proces produkcyjny z odpowiednią zbieżnością i czy może być użyty, z pełnym zaufaniem, do wspomaganie decyzji dotyczących rzeczywistego procesu (Łatuszyńska, 2015).



Rysunek 3. Model systemu wytwórczego okien dachowych z pokazanymi modułami gniazda produkcji skrzydła wewnętrznego oraz modułem pakowania

Źródło: Opracowanie własne

W pierwszych dwóch badaniach walidację przeprowadzono, wykorzystując m.in. dane z nagrań wideo. Umożliwiło to dokładne prześledzenie miejsc ewentualnych niezgodności przebiegu procesu w zamodelowanym i rzeczywistym systemie. W każdym z analizowanych badań akceptacja modelu została dokonana przez pracowników przedsiębiorstwa. Testowanie i dopracowywanie modelu może być realizowane w kilku iteracjach. W badaniach przeprowadzonych w Polsce posłużono się trzema zbiorami danych testujących. Modyfikacjom mogą podlegać rozkłady zmiennych pseudolosowych, takich jak np. czas trwania awarii, czasy technologiczne i przebrojeń. Zwiększanie szczegółowości modelu nie zawsze idzie w parze z jego adekwatnością. Dopiero model, który został przetestowany i zatwierdzony, może służyć eksperymentom stanowiącym podstawę dla podejmowania decyzji zarządczych.

Prowadzone eksperymenty symulacyjne

Wykorzystanie DES wspiera optymalizację i ciągle doskonalenie wydajności procesów. Opracowanie modelu umożliwia jego wielokrotne wykorzystanie do prowadzenia różnych eksperymentów. Ich cele mogą być odmienne i dotyczyć decyzji o różnym znaczeniu. W analizowanych przykładach eksperymenty dotyczyły wypunktowanych poniżej zagadnień.

1. Analiza i eliminacja blokad w przepływie produkcji.
2. Wpływ redukcji czasów przebrojeń na przepustowość systemu wytwórczego.
3. Badanie możliwości wprowadzenia nowego produktu.
4. Ocena wymaganych wielkości buforów międzyoperacyjnych.
5. Ocena wpływu outsourcingu fazy procesu technologicznego na długość cyklu produkcyjnego.
6. Analiza możliwości zmiany przepustowości systemu wytwórczego.
7. Identyfikacja wąskich gardeł systemu wytwórczego.
8. Zmiana środków transportu międzystanowiskowego.

9. Ocena efektów zmiany podziału zadań pomiędzy stanowiskami (czyszczenia przedmiotu pracy, wykonania czynności związanych z przebrojeniem stanowiska).
10. Analiza efektów zwiększenia liczby pracowników produkcyjnych.
11. Badanie i ocena zmiany materiału wejściowego na długość cyklu produkcyjnego.

W każdym przykładzie zastosowano symulacje pulsacyjne (ang. terminating simulations), które zakładają rozpoczęcie i kończenie eksperymentu w określonych momentach odzwierciedlających sposób działania systemu, np. obejmując całą zmianę lub cały tydzień roboczy. Charakterystyką tego podejścia są opróżnione stanowiska w momencie rozpoczęcia eksperymentu.

Zarówno Technomatix Plant Simulation, jak i Flexsim posiadają rozwiązania w postaci histogramów i innych typów wykresów, które pozwalają na wizualizację wyników eksperymentów i tym samym ułatwiają ich analizę. Dodatkowo możliwa jest obserwacja zdefiniowanych wskaźników opisujących symulowany wariant przepływu systemu wytwórczego, np. przepustowość systemu, wielkość zużycia energii, efektywność wykorzystania poszczególnych stanowisk itp. W każdym przypadku przeprowadzone eksperymenty były uzupełnione analizą finansową, której cel stanowiła odpowiedź w kwestii opłacalności potencjalnej inwestycji.

Efekty wykorzystania symulacji

Opracowanie cyfrowego modelu systemu wytwórczego i możliwość przeprowadzania z jego wykorzystaniem eksperymentów symulacyjnych wspomaga zarządzanie. Podczas przygotowania modelu zbierane są dane dotyczące czasów realizacji operacji, liczby braków, awarii, a także analizowane są relacje pomiędzy elementami systemu. Staje się to w pewnym sensie elementem kontroli i pozwala na wykrycie i zdefiniowanie nieprawidłowości. Sytuacja taka wystąpiła w szwedzkim przedsiębiorstwie, gdzie wynikiem opracowywania modelu była identyfikacja przyczyn wysokiego poziomu robót w toku. Jedną z nich była nierzetelność podwykonawcy, która dotyczyła terminów, ale też jakości wykonania prac. Analiza danych wykazała, że w przypadku pierwszego badanego wariantu produktu 86% zamówień wymaga co najmniej jednej, ale często kilku operacji naprawczych i w drugim badanym wariantcie produktu 43% zamówień wymagało napraw. Symulacja pokazała znaczenie tych strat czasu, ponieważ nie tylko wydłużały one cykl produkcyjny, ale także dodatkowo obciążały zasoby systemu wytwórczego, w tym jego zasoby krytyczne, co wpływało na długość cyklu produkcyjnego pozostałych wariantów wyrobów. Jak deklarowali autorzy, był to pierwszy efekt badań, a kolejne dotyczyły decyzji zarządczych średnioterminowych prowadzących do skrócenia długości cyklu produkcyjnego.

Znacznie częściej symulacja komputerowa jest wykorzystywana do oceny efektów wdrożenia decyzji zarządczych. Najczęściej dotyczą one zmian o charakterze taktycznym, ale mogą też odnosić się do decyzji strategicznych. W tym zakresie symulacja komputerowa wspomaga planowanie i organizację systemu wytwórczego. Na przykład w średnim przedsiębiorstwie w Polsce (wytwórca okien dachowych)

efektem eksperymentów symulacyjnych było wskazanie maksymalnego wzrostu przepustowości systemu wytwórczego pod wpływem jednej z poniższych zmian:

1. dodania stanowiska montażowego;
2. skrócenia czasu montażu i przezbrojenia poprzez wprowadzenie standaryzacji pracy i premii motywacyjnej;
3. zatrudnienia asystenta montażu, wykonującego prace przygotowawczo-zakończeniowe;
4. zakupu robota wspierającego operację montażu;
5. wprowadzenia systemu wizyjnej automatycznej kontroli jakości montażu.

Wyznaczenie przyrostu przepustowości systemu wytwórczego umożliwiło obliczenie wskaźnika ROI dla każdego wariantu zmiany i wybór korzystniejszego ekonomicznie rozwiązania. Podobne znaczenie miała symulacja w małym warsztacie stolarskim w Polsce.

Efektom wykorzystania symulacji może być też przeprowadzenie swoistej analizy wrażliwości systemu wytwórczego. W małym przedsiębiorstwie w Ekwadorze symulowano przyrost marginalny produkcji przy zwiększającej się liczbie pracowników. Sprawdzano też, jaki wpływ będzie miała zmiana materiału na wskaźniki produkcyjne, np. zakup dłuższych profili, gdy skróci się czas łączenia, a wydłuży czas cięcia.

Pokazane efekty są tylko wycinkiem możliwości, jakie daje symulacja komputerowa przy wsparciu podejmowania decyzji zarządczych. Przede wszystkim pozwala szczegółowo analizować system wytwórczy, ujawniając jego blokady i wskazując obszary optymalizacji. Symulacja komputerowa dostarcza wiarygodnych danych umożliwiających weryfikację celów i założeń decyzji dotyczących planowania i organizacji, np. zmiany oprzyrządowania, inwestycji w nową maszynę czy stanowisko, ale także wprowadzenia kooperacji czy zmian w sposobie transportu wewnętrznego. Jej wykorzystanie zwiększa elastyczność przedsiębiorstwa, ponieważ zarządzający, weryfikując efekty potencjalnych zmian, mogą szybko dostosowywać się do aktualnej sytuacji rynkowej. Wreszcie symulacja komputerowa może wspomagać analizę strategiczną, określając możliwość wdrożenia nowych produktów czy daleko idących zmian w procesach produkcyjnych.

Podsumowanie i wnioski

Symulacja komputerowa jest narzędziem, które w znacznym stopniu ułatwia optymalizację systemów wytwórczych i planowanie ich rozwoju. Daje możliwość weryfikacji efektów rozważanych zmian, która najczęściej jest niemożliwa do przeprowadzenia w inny sposób. W żadnym z badanych przedsiębiorstw nie istniała wcześniej specjalistyczna wiedza na temat symulacji zdarzeń dyskretnych, nie wykorzystywano tych technologii w podejmowaniu decyzji zarządczych. Najważniejszym wnioskiem jest to, że wszystkie raporty wskazują na spostrzeżenie przez zarządzających w tych przedsiębiorstwach dużego potencjału we wspomaganie podejmowania decyzji. Zauważają oni możliwość dokładnego zrozumienia i diagnozy systemu wytwórczego, szybszego reagowania na wymagania rynkowe,

testowania wariantów zmian, co w efekcie wpływa na wydajność produkcji i konkurencyjność przedsiębiorstwa. Jednak tworzenie modelu symulacyjnego jest czasochłonne, co może zniechęcać do jego stosowania MŚP, które często nastawione są na szybkie działanie. Szczególnie gdy dane są wprowadzane ręcznie, a nie pobierane automatycznie lub półautomatycznie (np. za pośrednictwem arkusza kalkulacyjnego) z systemów informatycznych. Opracowanie modelu w MŚP wymaga zwrócenia uwagi na sprawną komunikację, ponieważ charakteryzują się one niższym stopniem formalizacji.

Trzeba również uwzględnić chęć „ukrywania” niewygodnych kwestii przez operatorów maszyn, a także innych pracowników. Natomiast pokazuje to też silną stronę symulacji, jako narzędzia obiektywizującego decyzje. Autorzy wszystkich badań podkreślają znaczenie interakcji międzyludzkich w interpretacji, wyjaśnianiu i analizowaniu danych.

Analizy prowadzone na różnych etapach symulacji: zbierania danych, walidacji modelu, projektowania i prowadzenia eksperymentów, mogą w konkretny sposób wpływać na zarządzanie systemem wytwórczym. Stają się w ten sposób katalizatorem ciągłej poprawy systemu wytwórczego. Jednak wymagają intensywnej współpracy i zaangażowania ze strony pracowników z różnych obszarów działalności przedsiębiorstwa. Warto zidentyfikować te osoby wcześniej i zapewnić chęć zaangażowania się przez nie w tworzenie modelu i testowanie go.

Wyniki analizy pokazują, że zbieranie danych do budowania modelu jest czasochłonne. Automatyzacja pobierania danych na potrzeby modelowania, która będzie możliwa w cybersystemach, znacznie uprości i skróci ten etap. Mniejsze znaczenie dla ograniczenia wykorzystania symulacji, niż wskazuje literatura, ma brak zaawansowanej wiedzy na temat symulacji. Nowoczesne oprogramowanie staje się coraz bardziej intuicyjne, a mechanizmy krokowej obserwacji symulacji znacznie ułatwiają eliminację błędów.

Literatura

- Calder, M. et al. (2018). Computational Modelling for Decision-Making: Where, Why, What, Who and How. *Royal Society Open Science*, 5, 172096. DOI: 10.1098/rsos.172096
- Durlik, I. (2000). *Inżynieria zarządzania, część I*, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa.
- Eriksson, K., & Hendberg, T. (2021). A Case Study Initiating Discrete Event Simulation as a Tool for Decision Making in I4.0 Manufacturing. W: *Lecture Notes in Business Information Processing* (s. 84-96). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-73976-8_7
- Gasjek, B., Marolt, J., Rupnik, B., & Lerher, T. (2019). Using Maturity Model and Discrete-Event Simulation for Industry 4.0 Implementation. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(3), 488-499. DOI: 10.2507/IJSIMM18(3)489
- Guerrero, N., & Escobar, L. (2022). Process Optimization with Discrete Event Simulation Software: An Experience in Ecuador Small Enterprise. W: M. Botto-Tobar, H. Cruz, A. Díaz Cadena, (Eds.), *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. CIT 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 931. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-08280-1_15
- Hoffmann, R., & Protasowicki, T. (2013). Metoda dynamiki systemowej w modelowaniu złożonych systemów i procesów. *Biuletyn Instytutu Systemów Informatycznych*, 12, 19-28.
- Hussain, A., Munive-Hernandez, J. E., & Campean, I. F. (2019). Developing a Discrete Event Simulation Methodology to Support a Six Sigma Approach for Manufacturing Organization – Case

- Study. *Proceedings of the 3rd European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management IEOM*, July 23-26, Pilsen, Czech Republic.
- Jamil, M., & Razali, N. M. (2015). Simulation of Assembly Line Balancing in Automotive Component Manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114(1), 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/114/1/012049.
- Jung, W.-K., Kim, H., Park, Y.-Ch., Lee, J.-W., & Suh, E.-S. (2022). Real-Time Data-Driven Discrete-Event Simulation for Garment Production Lines. *Production Planning & Control*, 33(5), 480-491. DOI: 10.1080/09537287.2020.1830194
- Jurczyk-Bunkowska, M. (2020). Using Discrete Event Simulation for Planning Improvement in Small Batch Size Manufacturing System. W: G. Królczyk, M. Wzorek, A. Król, O. Kochan, J. Su, J. Kacprzyk (Eds.), *Sustainable Production: Novel Trends in Energy, Environment and Material Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 198. (pp. 19-43) Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-11274-5_3.
- Jurczyk-Bunkowska, M. (2021). Tactical Manufacturing Capacity Planning Based on Discrete Event Simulation and Throughput Accounting: A Case Study of Medium Sized Production Enterprise. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(3), 335-347. DOI: 10.14743/apem2021.3.404.
- Kampa, A., Gołda, G., & Paprocka, I. (2017). Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems. *Computers*, 6(1):10. DOI: 10.3390/computers6010010.
- Lang, S., Reggelin, T., Müller, M., & Nahhas, A. (2021). Open-Source Discrete-Event Simulation Software for Applications in Production and Logistics: An Alternative to Commercial Tools?. *Procedia Computer Science*, 180, 978-987. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.349
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis* (3rd ed). McGraw-Hill, New York.
- Lewandowski, J., Skołod, B., & Plinta, D. (2014). *Organizacja systemów produkcyjnych*. PWE, Warszawa.
- Latuszyńska, M. (2015). Modelowanie i symulacja w zarządzaniu produkcją. *Przegląd Organizacji*, 12(911), 51-57. DOI: 10.33141/po.2015.12.07
- Mourtzis, D. (2020). Simulation in the Design and Operation of Manufacturing Systems: State of the Art and New Trends. *International Journal of Production Research*, 58(7), 1927-1949. DOI: 10.1080/00207543.2019.1636321
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *Procedia CIRP*, 25, 213-229. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.032
- Negahban, A., & Smith, J. S. (2014). Simulation for Manufacturing System Design and Operation: Literature Review and Analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241-261. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.12.007
- Pająk, E. (2006). *Zarządzanie produkcją*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Prajapat, N., & Tiwari, A. (2017). A Review of Assembly Optimisation Applications Using Discrete Event Simulation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(2-3), 215-228. DOI: 10.1080/0951192X.2016.1145812
- Qiao, D., & Wang, Y. (2021). A Review of the Application of Discrete Event Simulation in Manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1802(2), 022066. DOI: 10.1088/1742-6596/1802/2/022066
- Robinson, S. (2014). *Simulation the Practice of Model Development and Use* (2nd ed.). Palgrave Macmillan.
- Romanowska, M. (2014). Bariery efektywności badań naukowych z zakresu zarządzania strategicznego. *Prace Naukowe Wałbrzyskiej Wyższej Szkoły Zarządzania i Przedsiębiorczości*, 27(2), 101-107.
- Sobottka, T., Kamhuber, F., Henjes, J., & Sihn, W. (2017). A Case Study for Simulation and Optimization Based Planning of Production and Logistics Systems. W: W. K. V. Chan, A. D'Ambrogio, G. Zacharewicz, N. Mustafee, G. Wainer, & E. Page (Eds.), *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference, WSC'17*.
- Soosay, C., Nunes, B., Bennett, D. J., Sohal, A., Jabar, J., & Winroth, M. (2016). Strategies for Sustaining Manufacturing Competitiveness: Comparative Case Studies in Australia and Sweden.

Journal of Manufacturing Technology Management, 27(1), 6-37.

DOI: 10.1108/JMTM-04-2014-0043

Sturrock, D. T. (2011). Tips for Successful Practice of Simulation. W: S. Jain, R. R. Creasey, J. Himmelspach, K. P. White, & M. Fu (Eds.), *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, WSC'11.

Sudoł, S. (2014). Podstawowe problemy metodologiczne nauk o zarządzaniu. *Organizacja i Kierowanie*, 1, 11-36.

Walczak, W. (2015). Analiza krytyczna jako metoda poznawania prawdy w naukach o zarządzaniu, *e-Mentor*, 1(58), 22-32. DOI: 10.15219/em58.1153

Wkład autorów: Nie dotyczy.

Konflikt interesów: Nie dotyczy.

Źródła finansowania: Brak finansowania zewnętrznego.

THE USE OF DISCRETE COMPUTER SIMULATION IN MANAGEMENT OF MANUFACTURING SYSTEMS OF SMALL AND MEDIUM-SIZED ENTERPRISES

Abstract: The article shows how computer simulation can support the management of manufacturing systems in small and medium-sized enterprises (SMEs). These Opportunities for SMEs to use it are opening up due to the progressive simplification of modeling and computer simulation tools. The growing pressure to quickly adapt to the market situation and the need to assess the rationality of implementing changes encourage SMEs to use more advanced solutions than intuition and experience. Therefore, the article aims to show the potential of using computer simulation in managing SME manufacturing systems. The aim was achieved by analysing four published case studies. Two of them were based on the author's experience with Polish small and medium-sized enterprises. The next two were from reports on the use of discrete event simulations in a medium-sized Swedish company and from a small Ecuadorian company producing rainwater channels. The analysis of the observations collected in this way showed the practical effects of employing simulation in the management of manufacturing systems, but also made it possible to formulate practical guidelines relating to the collection of data for the development of a computer model, its validation, and the planning of simulation experiments.

Keywords: small and medium enterprises (SMEs), decision making, computer simulation, discrete event simulation (DES), manufacturing system

Articles published in the journal are made available under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. Certain rights reserved for the Czestochowa University of Technology.

