

PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE PODEJŚCIA MULTIMODALNEGO W MODELOWANIU SYMULACYJNYM SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH I MONTAŻOWYCH

Paweł PAWLEWSKI

Streszczenie: Artykuł przedstawia rezultaty badań realizowanych w ostatnich latach w obszarze modelowania i symulacji systemów produkcyjnych i montażowych. Głównym celem artykułu jest pokazanie praktycznego zastosowania podejścia multimodalnego w modelowaniu symulacyjnym systemów produkcyjnych i korzyści z tego wynikające. W artykule opisano zagadnienia modelowania symulacyjnego w kontekście przemysłu 4.0, oraz przedstawiono wielopoziomowy model zachowań systemu procesów cyklicznych, który stanowi szkielet podejścia multimodalnego. Zasadniczą część artykułu stanowi koncepcja zastosowania podejścia multimodalnego w modelowaniu symulacyjnym oraz przykład jej zastosowania.

Słowa kluczowe: modelowanie symulacyjne, procesy cykliczne, montaż

1. Wstęp

Artykuł przedstawia rezultaty badań realizowanych w ostatnich latach w obszarze modelowania i symulacji systemów produkcyjnych i montażowych. W badaniach tych wykorzystywano oprogramowanie symulacyjne oparte na symulacji zdarzeń dyskretnych (ang. DES Discrete Event Simulation). Zebrane doświadczenia i obserwacje pozwoliły na zidentyfikowanie luki badawczej w modelowaniu symulacyjnym. Luka ta już wcześniej została przez autora dostrzeżona [1], co zaowocowało z jednej strony koncepcją opisu procesów realizowanych w systemie produkcyjnym z wykorzystaniem podejścia multimodalnego, z drugiej strony skłoniło autora do dalszych prac. Efekt tych prac opisany jest w tym artykule.

Głównym celem artykułu jest pokazanie praktycznego zastosowania podejścia multimodalnego w modelowaniu symulacyjnym systemów produkcyjnych i montażowych oraz korzyści z tego wynikające.

Najważniejsze punkty artykułu to przedstawienie oryginalności tego podejścia w kontekście tradycyjnych metodyk budowania modeli symulacyjnych, zaproponowanie mechanizmu opisu procesów cyklicznych oraz pokazanie modelu zbudowanego w opisywany sposób.

Głównym wkładem autora jest zdefiniowanie metodyki modelowania symulacyjnego w oparciu o procesy cykliczne – podejście multimodalne oraz podejście do modelowania z wysokiego poziomu gdzie podstawowym obiektem jest stanowisko robocze.

Artykuł jest podzielony na 4 rozdziały. Rozdział pierwszy wprowadza w zagadnienia modelowania symulacyjnego w kontekście przemysłu 4.0. W rozdziale drugim opisany jest wielopoziomowy model zachowań systemu procesów cyklicznych, który stanowi szkielet podejścia multimodalnego. Rozdział trzeci opisuje koncepcję zastosowania podejścia

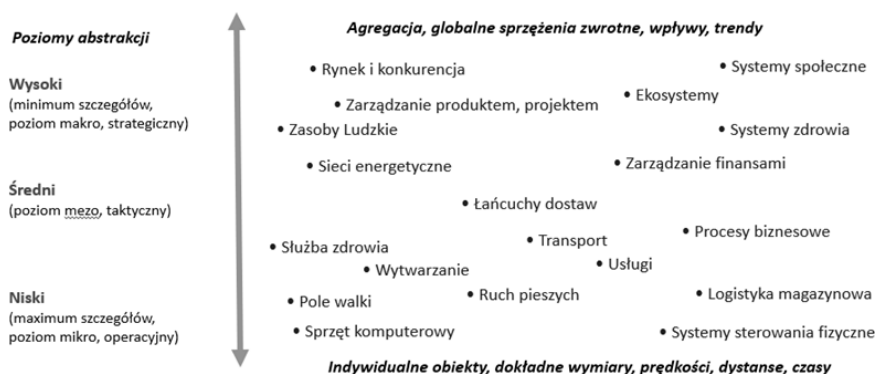
multimodalnego w modelowaniu symulacyjnym a w rozdziale czwarty przedstawiono wnioski oraz zarys dalszych prac badawczych.

2. Modelowanie symulacyjne systemów produkcyjnych i montażowych

Metody symulacyjne stosowane są już od kilkudziesięciu lat. Wykorzystuje się je do opisu, badania i projektowania systemów gospodarczych i społecznych. Aktualnie stanowią jedną z kluczowych technologii w ramach koncepcji przemysłu 4.0 [2]. Koncepcja ta powstała w Niemczech i definiuje nową organizację fabryk (zwaną inteligentnymi fabrykami), pozwalającą na lepszą obsługę klientów poprzez ogromną elastyczność oraz optymalizację zasobów. Kluczowe zasady przemysłu 4.0 to:

- fabryka staje się cyfrowa i elastyczna co oznacza ciągłą i natychmiastową komunikację pomiędzy różnymi stanowiskami roboczymi i narzędziami, zintegrowanymi w linie produkcyjne i łańcuchy dostaw;
- wykorzystanie narzędzi symulacyjnych i przetwarzania danych do zbierania i analizy danych z linii montażowych, które są używane do modelowania i testowania; jest to wielka wartość dla pracowników, którzy chcą lepiej poznać warunki przemysłowe i procesy;
- fabryki stają się oszczędne w wykorzystaniu energii i zasobów poprzez wykorzystanie sieci komunikacyjnych do wymiany informacji w sposób ciągły i natychmiastowy do koordynacji potrzeb i dostępności.

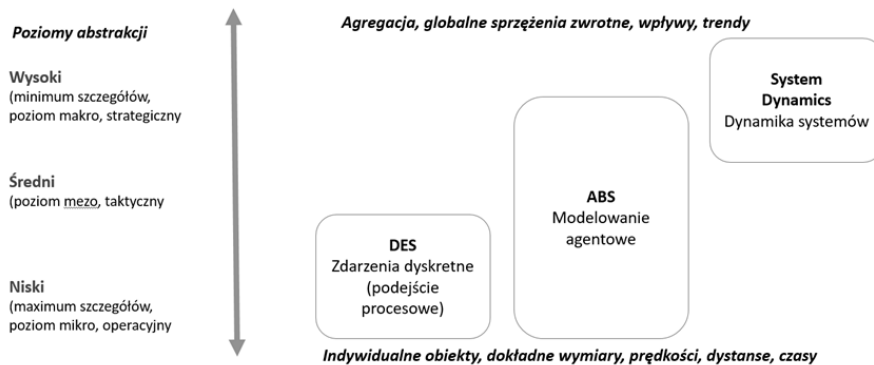
Symulacja z jednej strony to modelowanie czyli odwzorowanie systemu rzeczywistego, zrozumienie zachowań systemu, wirtualne (i wizualne) ocenianie możliwych konsekwencji działań a z drugiej strony to analiza – eksperymentowanie i testowanie pomysłów i alternatyw przed podjęciem decyzji o działaniach i zaangażowaniu zasobów [3]. Symulacja to zbiór metod i technik do których zaliczamy symulację dyskretną, symulacje ciągłą (w tym dynamika systemów), metodę Monte Carlo (w tym symulacje statyczne w arkuszu kalkulacyjnym), gry kierownicze, symulacja jakościowa, agentowa i inne. W pracy [4] przedstawiona zakresy aplikacji według poziomów abstrakcji (rys. 1) i odpowiadające im metody modelowania symulacyjnego (rys. 2).



Rys. 1 Zakresy aplikacji w odniesieniu to poziomów abstrakcji

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4]

Istotą dynamiki systemów jest myślenie w kategoriach sprzężenia zwrotnego (ang. feedback). Podejście to zostało opracowane w latach pięćdziesiątych poprzedniego wieku



Rys. 2 Metody modelowania symulacyjnego w odniesieniu do poziomów abstrakcji
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Borshchev [4]

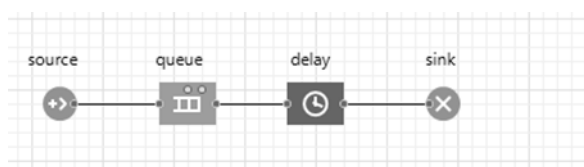
przez Forrestera [5]. Zalicza się je do symulacji ciągłej, dla aplikacji na wysokim poziomie abstrakcji – strategicznym. Na rynku dostępne jest oprogramowanie wspierające modelowanie dynamiki systemów np. Vensim (www.vensim.com), PowerSim (www.powersim.com).

Z punktu widzenia obszaru badań opisywanego w tym artykule interesujące są metody oparte o zdarzenia dyskretne oraz modelowanie agentowe, ponieważ stosowane są na poziomie taktycznym i przede wszystkim na poziomie operacyjnym. Generalnie można stwierdzić, że podejście oparte o zdarzenia dyskretne jest podejściem procesowym a modelowanie agentowe można porównać do podejścia sterowanego zadaniami [6].

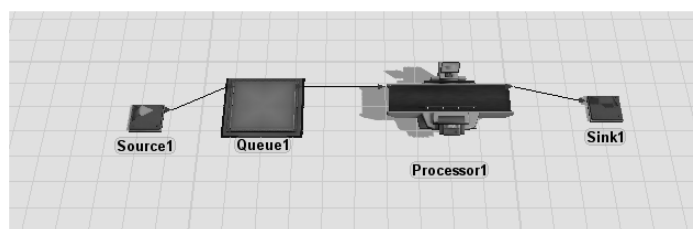
Narzędzia symulacyjne oparte o zdarzenia dyskretne wykorzystują podejście oparte na procesach, w którym przepływ części między procesami lub krokami procesu powoduje zapotrzebowanie na zasoby. Część przechodząc do kolejnego kroku procesu żąda zasobu i jeżeli go otrzyma to krok ten jest realizowany natomiast jeżeli go nie otrzyma to czeka aż do momentu kiedy ten zasób będzie dostępny. Tworzą się wtedy kolejki. Chociaż ta metodologia jest dobra dla niektórych aplikacji, jednak nie pozwala na modelowanie sytuacji, w których zasoby mają do wykonania zadania, które nie są związane z przepływem. W takich sytuacjach podejście oparte na zadaniach zapewnia, że miejsca pracy mogą być realizowane w realistyczny sposób, np. operator/transporter (zasób mobilny) ma za zadanie wykonanie zestawu inspekcji niewykorzystanego sprzętu, jeśli nie jest zaangażowany w inny sposób w pracę procesową. Podejście oparte na zadaniach pozwala na tworzenie działań dla operatora/transportera (zasoby mobilne), które są całkowicie niezależne od czynności przetwarzania i pozwalają mu zaangażować się w zestaw zadań, które mogą wymagać od niego przemieszczania, pobrania narzędzi i pozostania "zajętym" przez pewien czas. Ponadto, stosując podejście oparte na zadaniach, zasoby mogą zawierać własną "inteligencję", aby zdecydować, jakie zadania będą wykonywać i kiedy. Należy jednak mieć na uwadze, że niektórzy autorzy uważają że podejście zadaniowe nie można utożsamiać z modelowaniem agentowym [7].

Dostępne na rynku oprogramowanie oparte o modelowanie agentowe (np. Swarm, NetLogo, Repast, ASCAPE) jest przede wszystkim oprogramowaniem nastawionym na modelowanie zachowań socjalnych – interakcji między obiektami. Zastosowanie ich w modelowaniu systemów produkcyjnych nie jest istotne.

Dostępne oprogramowanie symulacyjne na rynku dedykowane do modelowania symulacyjnego systemów produkcyjnych i montazowych (np. FlexSim, Arena, Tecnomatix, Anylogic, Witness itd.) oparte jest na zdarzeniach dyskretnych ale zapewnia również możliwość sterowania zadaniami. Jednak głównym ich zadaniem jest modelowanie tzw. „proces flow” czyli przepływu procesu - skupieniu się na tym co przez proces płynie. Typowy, najprostszy model procesu to model składający się ze źródła (generatora) elementów przepływu, bufora (w którym może powstać kolejka elementów przepływu), procesora (realizującego operację) oraz spływu czyli miejsca zakończenia procesu - rysunek 3 i 4.



Rys. 3 najprostszy model procesu – widok w programie AnyLogic 8 University 8.2.3
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4 najprostszy model procesu – widok w programie FlexSim 2017
Źródło: opracowanie własne

3. Podstawy podejścia multimodalnego

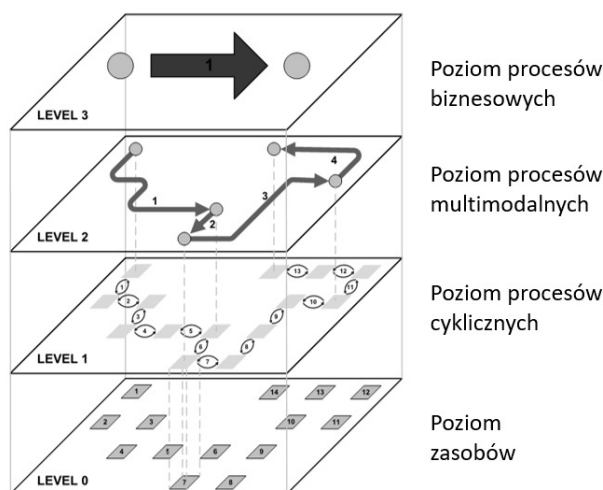
Początki myślenia multimodalnego można znaleźć w definicji multimodalnego systemu transportu. Zgodnie z Konwencją o międzynarodowym multimodalnym transporcie towarów [8] multimodalny system transportu definiowany jest jako wewnętrznie zintegrowany system przewożenia towarów wzdłuż (łańcucha dostaw) z towarzyszącymi usługami świadczonymi przy użyciu co najmniej dwóch rodzajów transportu na podstawie multimodalna umowa transportowa. Multimodalna umowa transportowa jest prowadzona przez jednego multimodalnego przewoźnika, który przyjmuje pełną ogólną odpowiedzialność za wykonanie zamówienia. W przypadku transportu intermodalnego uczestniczą również co najmniej dwa rodzaje transportu, jednak jego szczególną cechą jest to, że na całym pasie towarowym wykorzystywane jest tylko jedno obciążenie jednostkowe. Krótko mówiąc, możemy założyć, że intermodalny łańcuch dostaw jest specyficznym rodzajem multimodalnej logistyki, która charakteryzuje się jednolitą jednostką ładunkową, stałą w całej linii towarowej. W praktyce logistycznej najczęściej stosowanymi rozwiązaniami multimodalnymi są transport morsko-powietrzny oraz transport kolejowy i lotniczy. Multimodalność w transporcie wynika z rozwoju konteneryzacji: różne rodzaje transportu stały się bardziej powiązane ze względu na to, że sposoby transportu, magazynowania i załadunku ujednoliconych jednostek ładunkowych

musiały stać się podobne. Główne jednostki transportu multimodalnego to: kontener JTI, nadwozie wymienne UTI, naczepa ITU. Podsumowując, multimodalność logistyczna charakteryzuje się następującymi cechami:

- korzystanie z co najmniej dwóch rodzajów transportu,
- umowa o pojedynczym ładunku,
- jeden wykonawca odpowiedzialny za dostawę towarów,
- cena całościowa za usługę dostawy towarów,
- ładowanie i manipulowanie całym urządzeniem ładunkowym (np. pojemnikiem, transporterem lub środkiem transportu).

W kontekście sieci transportowych sieć multimodalna to taka, w której modelowane są dwa lub więcej rodzajów środków transportu (takich jak chodzenie, jazda pociągiem lub prowadzenie samochodu). Alternatywnie, w sieciach użytkowych sieć multimodalna może składać się z różnych systemów transmisji i dystrybucji [9].

Rozszerzając to myślenie można zdefiniować procesy multimodalne jako procesy realizowane wzdłuż dróg składających się z dróg lokalnych procesów [10, 11]. Opracowano wielowarstwowy model zachowań układu współbieżnych procesów cyklicznych – rysunek 5.



Rys. 5. Wielowarstwowy model zachowań układu współbieżnych procesów cyklicznych
Źródło: [11]

4. Zastosowanie podejścia multimodalnego w modelowaniu symulacyjnym

W poprzednich częściach artykułu opisano modelowanie symulacyjne systemów produkcyjnych oraz podejście multimodalne. Jaki jest związek między nimi? Tradycyjnie do modelowania przepływu produkcji stosuje się podejście procesowe tworząc model zgodnie z regułą „top-down” z góry do dołu przybliżając w każdym kroku budowany model symulacyjny. Oczywiście modele symulacyjne buduje się aby odpowiedzieć na stawiane przez inżyniera pytanie, aby rozwiązać konkretny problem. W wielu przypadkach takie podejście jest właściwe i wystarczające. W literaturze przedmiotu można znaleźć zalecenia aby projekt symulacyjny zacząć od zbudowania mapy strumienia wartości [3]. W takich przypadkach wykorzystuje się podejście procesowe w którym przedstawiany jest

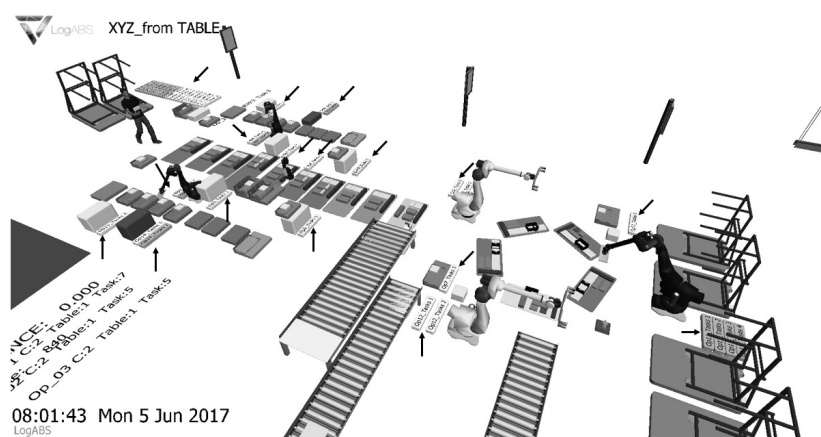
przepływ części przez system produkcyjny [12]. To podejście jest również opisywane w literaturze dotyczącej modelowania symulacyjnego. Takie podejście jest również zalecane przez producentów oprogramowania symulacyjnego np. Simio, Anylogic, Arena, Tecnomatix, FlexSim. Można się jednak temu przyjrzeć głębiej, ponieważ można przyjąć, że to podejście jest przybliżone w związku z regułą „top-down” czyli modelowania na wysokim poziomie abstrakcji i schodząc w dół – uwzględniając więcej szczegółów w zależności od potrzeb. Jest to zgodne z klasyczną metodą Artura Hall’a [13].

Jednak budując model symulacyjny budujemy go z elementów. Elementy te (zwane również obiektami) odzwierciedlają lub przybliżają system rzeczywisty. Elementy te są abstrakcyjnymi obiektami (np. graficznymi ikonami) lub obiektami, którym przypisane są pewne zachowania. Graficzne ikony są elementami języków graficznego modelowania np. VSM (Value Stream Mapping) [14], IDEF0 [15] czy też OFD (Object Flow Diagram) [16]. Z kolei obiekty, którym przypisane są pewne zachowania stanowią podstawę budowania modeli w programach symulacyjnych – np. źródło, bufor, procesor, operator itd. Elementy te są używane w modelowaniu na różnych poziomach abstrakcji w zależności od potrzeb [3, 4].

Wydaje się interesujące podjęcie próby zmiany tego sposobu myślenia. Można podjąć próbę analizy modelowanego systemu w taki sposób aby idąc „z góry na dół” zejść jak najniżej i wrócić z powrotem. Niniejszy artykuł przedstawia obserwacje i wnioski z takiej „podróży”. Przeanalizowano i zamodelowano system wytwarzania w przemyśle samochodowym. Proces wykonywany jest na kilku stanowiskach spawalniczych, gdzie kolejno są realizowane operacje spawania a następnie jest realizowana operacja montażu i pakowania wyrobu. Jest to produkcja potokowa. Podjęto próbę zamodelowania przepływu części. Części płyną w pojemnikach. Wniosek jaki się pojawił to taki, że należy skupić się na przepływie pojemników. W analizowanym systemie obszar przepływu zdefiniowano od tzw. supermarketu gdzie są już przygotowane pojemniki z częściami do bufora z pojemnikami wyrobów gotowych, który znajduje się przed magazynem wyrobów gotowych. Nie analizowano i nie modelowano przepływów magazynowych przed supermarketem i za buforem pojemników z wyrobami gotowymi.

Pojemniki „płynęły” z supermarketu na pola odkładcze stanowisk roboczych, gdzie realizowana była operacja spawania, następnie zespół (w pojemnikach lub na wózku logistycznym) „płynął” do następnego stanowiska roboczego, aż do bufora przed magazynem wyrobów gotowych. Operacje montażu zostały zamodelowane uwzględniając czas montażu (opisany stosownym rozkładem statystycznym), zakłócenia (awarie) i planowane przerwy. Skupiono się na przepływie. Pojemniki same nie płyną przez system – zawsze jest jakiś mechanizm powodujący ten przepływ. Pojemniki jak znajdują się w supermarketcie to są statyczne – nie mają inicjatywy aby płynąć (nie jest to zgodne z podejściem procesowym). W efekcie skupiono się na tym w jaki sposób jest realizowany i prowokowany przepływ. Mechanizm, który realizuje przepływ jest doskonale znany wszystkim - są to w przypadku przepływu nieautomatycznego operatorzy, którzy wykorzystują różne środki transportu takie jak paleciaki, wózki logistyczne, wózki jezdniowe, pociągi logistyczne a w przypadku przepływu automatycznego to roboty, przenośniki, wózki agv. Generalnie w literaturze przedmiotu jest to rozpatrywane odrębnie jako transport wewnętrzny. Zarządzanie przepływem produkcji to zarządzanie mechanizmami, które realizują ten przepływ. Opisywane mechanizmy zwykle pracują w cyklu: podejź do pola odkładczego (może to być wyróżnione miejsce na podłodze, półka regału), pobierz pojemnik, przesuń się do docelowego pola odkładczego, odłóż pojemnik, powtórz cykl (lub zmień cykl). Pojawił się pomysł aby skupić się na tych mechanizmach i

spróbować je zamodelować w taki sposób aby były one użyteczne. Podejmując taką próbę skojarzono, że bardzo dobrym modelem teoretycznym i praktycznym jest podejście multimodalne opisywane w poprzednim rozdziale tego artykułu. Procesy cykliczne opisują mechanizmy, które tworzą przepływ natomiast proces multimodalny opisuje sam proces przepływu. Pojawiło się pytanie czy istnieje możliwość zbudowania modelu symulacyjnego systemu wytwarzania, w którym modeluje się jedynie mechanizmy przepływu używając przede wszystkim procesów cyklicznych. W trakcie realizacji projektu symulacyjnego dla klienta z branży „automotive” podjęto udaną próbę zbudowania modelu symulacyjnego w opisywany sposób. Zidentyfikowano główny przepływ na podstawie BOM’u (ang. Bill of Materials – struktury wyrobu), opracowano tablicę tzw. PFEP (ang. Plan for Every Part – Plan dla każdej części) przypisująca część, zespół, wyrób do pojemników, zbudowano marszruty (procesy cykliczne) dla każdego operatora, robota – wykonawcy, realizatora przepływu. Marszruty zostały opisane w specjalnym języku dla którego przygotowano interpretator w programie symulacyjnym. Całość zaimplementowano w środowisku programu symulacyjnego FlexSim traktując go jak tzw. SOS (ang. Simulation Operating System – symulacyjny system operacyjny). Program FlexSim wybrano ze względu na możliwość bezpośredniej pracy w 3D oraz otwartość tego systemu czyli możliwość adaptacji mechanizmów dla własnych potrzeb i ingerencji w ten system. Rysunek 6 przedstawia model symulacyjny gdzie czarnymi strzałkami zaznaczone są miejsca w których realizowane są procesy cykliczne.



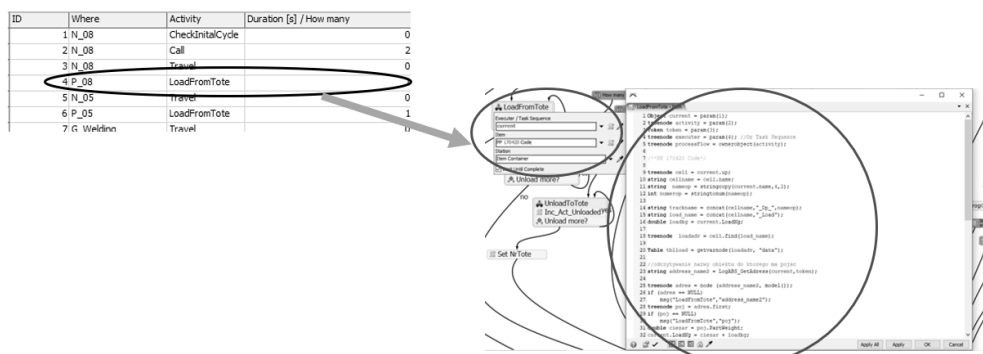
Rys. 6. Model symulacyjny z zaznaczonymi miejscami realizacji procesów cyklicznych
Źródło: opracowanie własne

W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że w każdym programie symulacyjnym można zbudować taki system montażowy – wykorzystując podejście procesowe i zadaniowe. Jednak za każdym razem robi się to od początku. Poziom szczegółowości oferowany przez programy symulacyjne np. FlexSim, Anylogic itd. jest zbyt głęboki. Język funkcji dostępny na tym poziomie obejmuje kilkaset funkcji. Do zrealizowania modelu opartego na podejściu multimodalnym zdefiniowano język składający się z 57 instrukcji, które okazały się wystarczające.

Jedna instrukcja – na przykład „Pobierz Część z Pojemnika”, która realizuje pobranie części z pojemnika znajdującego się w określonym polu odkładczym ma postać:

P_08 LoadFromTote 1

P_08 oznacza identyfikator miejsca odkładczego w którym znajduje się pojemnik z częściami, LoadFromTote to nazwa instrukcji a 1 jest liczbą określającą ile części należy pobrać (w tym przypadku jedna część). Ta prosta instrukcja w programie symulacyjnym FlexSim jest rozpisana na szereg instrukcji pokazanych na rysunku 7.



Rys. 7. Realizacja instrukcji opracowanego języka opisu procesów cyklicznych w programie FlexSim
Źródło: opracowanie własne.

5. Zakończenie

W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie podejścia multimodalnego w modelowaniu symulacyjnym systemów wytwarzania. Zbudowany w oparciu o to podejście model symulacyjny a raczej sposób jego budowy skłania autora do kontynuacji tych prac. Obiecująca jest reakcja osób z przemysłu, którym przedstawiany jest opisywany w artykule sposób myślenia. Kierunki dalszych prac to:

- dokończenie pracy nad językiem opisującym czynności realizowane przez procesy cykliczne, zwłaszcza, że dotychczas opracowane instrukcje tego języka są zrozumiałe i akceptowane przez inżynierów produkcji i logistyków,
- przygotowanie środowiska do modelowania symulacyjnego opartego o procesy cykliczne (wykorzystując dostępne oprogramowanie symulacyjne jako odpowiednik systemu operacyjnego),
- opracowanie elementów składowych modelu na poziomie stanowiska roboczego,
- opis formalny całości – wykorzystując aparat formalny oferowany przez autorów prac z obszaru modeli multimodalnych procesów cyklicznych,
- przygotowanie technologii gromadzenia i przygotowania danych w przedsiębiorstwie dla modelowania symulacyjnego.

Głównym celem tych prac jest przygotowanie technologii, która odpowiada na pytanie jak przygotować dane w przedsiębiorstwie, aby zbudować model symulacyjny szybko i bez posiadania głębokiej wiedzy na temat modelowania symulacyjnego w danym narzędziu oferowanym na rynku. Celem wykorzystanie tej technologii jest rozwiązywanie problemów z obszaru produkcji i montażu dotyczących: projektowania i modyfikacji layoutu zakładu produkcyjnego/przestrzeni produkcyjnej, projektowania i przeprojektowywania (usprawniania) procesów intralogistyki (Milk Run), balansowania pracy i analiz Yamazumi.

Literatura

1. Pawlewski P.: Multimodal Approach to Modeling of Manufacturing Processes *Procedia CIRP*, Volume 17, 2014, Pages 716–720 *Variety Management in Manufacturing — Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2014
2. Schwab K.: *The Fourth Industrial Revolution*, Crown Business, 2017
3. Beaverstock M., Greenwood A., Lavery E., Nordgren W. : *Applied Simulation. Modeling and Analysis using Flexsim*, Flexsim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Orem, USA, 2011
4. Borshchev A.: *The Big Book of Simulation Modeling*, Anylogic North America, 2013
5. Forrester, Jay W.: *Industrial Dynamics*. Pegasus Communications, 1961
6. Siebers PO, Macal CM, Garnett J, Buxton D and Pidd M - Discrete-Event Simulation is Dead, Long Live Agent-Based Simulation!. *Journal of Simulation*, 4(3) pp. 204-210, 2010
7. Weimer Ch. W., Miller J.O., Hill R.R.: *Introduction to Agent Based Modeling*, Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and S. E. Chick, eds. 2016
8. United Nations Convention on International Multimodal Transport of Goods (Genewa, 24 mai 1980 r.); 1980
9. Hoel EG, Heng WL, Honeycutt D.: *High Performance Multimodal Networks*. In: *Bauzer Medeiros C. et al. (Eds.): SSTD 2005, LNCS 3633, , Springer-Verlag Berlin Heidelberg ; 2005. p. 308 – 327*
10. Bocewicz G, Nielsen P, Banaszak Z, Quang VQ.: *Cyclic Steady State Refinement: Multimodal Processes Perspective*. In: *Advances in Production Management Systems*, series: *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Bjørge J. F. et al. (Eds.), Vol. 384, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg; 2012. p. 18-27
11. Pawlewski P.: *Multimodal Approach to Model and Design Supply Chain*, In: *Proceedings of IFAC MIM Conference*, St. Petersburg, 2013
12. Małopolski W.: *Modelowanie i optymalizacja systemów wytwarzania w programie Arena*, Technical Transaction, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej zeszyt 22, 2012
13. Hall A. D.: *A Methodology for Systems Engineering*, Princeton N.J., 1962
14. Rother M., Shook J.: *Learning to see. Value-Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda*, The lean Enterprise Institute, Inc., 2003
15. Santarek K.: *Organisational problems and issues of CIM systems design*. *Journal of Materials Processing Technology* 76; 1998. p. 219-226
16. Greenwood A., Pawlewski P., Bocewicz G.: *A Conceptual Design Tool to Facilitate Simulation Model Development: Object Flow Diagram*. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, and M. E. Kuhl eds, 2013

Dr hab. inż. Paweł PAWLEWSKI
Katedra Zarządzania Produkcją i Logistyki
Wydział Inżynierii Zarządzania
Politechnika Poznańska
60-965 Poznań, ul. Strzelecka 11
tel./fax: 507 037 708
e-mail: pawel.pawlewski@put.poznan.pl