

Grzegorz BOCEWICZ
Politechnika Koszalińska
Robert WÓJCIK
Politechnika Wrocławska
Zbigniew BANASZAK
Politechnika Koszalińska

KOMPUTEROWO WSPOMAGANE WARIANTOWANIE ZROBOTYZOWANYCH SYSTEMÓW MONTAŻOWYCH

Streszczenie. Praca przedstawia propozycję metodyki zautomatyzowanego modelowania i oceny efektywności funkcjonowania zrobotyzowanych systemów montażowych realizujących wspólnie produkcję kilku różnych asortymentów. Przedstawiana metoda, wykorzystująca jej schemat, pozwala na szybkie prototypowanie rozwiązań takich systemów umożliwiając jednoczesną ocenę różnych alternatywnych wariantów, tak ich konfiguracji, jak i organizacji przepływu produkcji. W proponowanym podejściu zaproponowany został model referencyjny wspólnie przebiegającej produkcji wieloasortymentowej zaimplementowany w reprezentacji formalizmu teorii sieci Petriego. Jego istotę stanowią warunki ograniczające przestrzeń możliwych wariantów przepływu produkcji tylko do wariantów wolnych od zakleszczeń. Rozwiązanie takie gwarantuje, że każdy wariant systemu montażowego spełniał będzie przyjęte założenia produkcyjne, aczkolwiek z różną efektywnością. Ilustrację metody wykorzystującej opracowany model przedstawiono na przykładzie procesu prototypowania integrującego alternatywne warianty konstrukcji systemu montażowego z planowanym przebiegiem realizowanej w nim produkcji.

COMPUTER AIDED PROTOTYPING OF ROBOTIZED ASSEMBLY SYSTEMS

Summary. The paper presents a method of automated modelling and performance evaluation of concurrent production flows carried out in robotized assembly systems. The method allows for quick assessment of various variants of such systems, considering their structure and the organization of production flow of possible ways of their implementation is carried out. The reference model follows the Petri net theory formalism framework. Its essence is the conditions imposed on the designed model, limiting the space of possible variants of the production flow only to deadlock-free variants. The practical usefulness of the model implemented in the proposed method illustrates the example describing the simultaneous assessment of alternative variants of the assembly system's structure and the planned multi-assortment production.

1. Wprowadzenie

Przedmiotem artykułu jest propozycja modelu referencyjnego, którego implementacja w metodzie interaktywnego wariantowania elastycznego systemu produkcyjnego umożliwiłaby poszukiwanie odpowiedzi zarówno na pytanie, czy dana struktura systemu gwarantuje jego oczekiwane funkcjonowanie? jak i pytanie o to jaka struktura systemu gwarantuje jego oczekiwane funkcjonowanie? Rozważany model wyróżnia przepływy jednocześnie realizowanych partii produkcyjnych różnych wyrobów oraz konfiguracje zasobów wykorzystywanych do ich realizacji. Projektowanie Zrobotyzowanych Systemów Montażowych (ZSM) oraz planowanie zachodzących w nich procesów technologicznych generuje złożone, wielokryterialne problemy optymalizacyjne. Problemy te wiążą się z podejmowaniem decyzji w zakresie alokacji zasobów, harmonogramowania procesów oraz rozwiązywania konfliktów zasobowych procesów konkurujących o dostęp do współdzielonych zasobów. W rozwiązywaniu rozważanych problemów kluczową rolę odgrywają systemy wspomaganie decyzji wykorzystujące modelowanie online i symulację, a także systemy komputerowo wspomaganego podejmowania decyzji (*ang. Decision Support Systems - DSS*) [2, 6, 13]. Wykorzystywane w nich metody są zazwyczaj problemowo zorientowane, np. na projektowanie stanowisk montażowych, harmonogramowanie procesów technologicznych czy też planowanie produkcji (co zwykle ogranicza zakres ich możliwych zastosowań) [3, 4, 5, 20]. W szczególności, oznacza to potrzebę opracowania metod modelowania i oceny funkcjonowania ZSM wykorzystujących koncepcję cyfrowego bliźniaka (*ang. Digital Twin – DT*), oraz metod interaktywnego wariantowania ZSM w trybie online [2, 13].

Ponieważ w dyskretnych systemach produkcyjnych dominującą rolę odgrywają interakcje różnorodnych, jednocześnie przebiegających w nich procesów związanych m.in. z przepływem obrabianych części i podzespołów, wymianą narzędzi i usuwaniem wiórów, przepływami danych i energii, itp., naturalnym wyborem reprezentacji umożliwiającej modelowanie ich zachowania jest stosowanie formalizmu sieci Petriego [15, 16]. Modele implementowane w tej reprezentacji potwierdziły swoją przydatność na różnych etapach projektowania [8], programowania [8, 10, 11, 13, 19] i sterowania [3] systemów produkcyjnych. W wykorzystywanym dalej hierarchicznym, dwupoziomowym modelu zachowania ZSM (przedstawionym na rysunku 5), wyższy poziom sieci reprezentuje przepływ palet z montowanymi obiektami, natomiast niższy poziom modeluje wykonywanie trajektorii ruchów robotów realizujących poszczególne operacje montażowe. Model ten umożliwia jednoczesne poszukiwanie rozwiązania konfiguracji ZSM tworzących autonomiczne stanowiska montażowe i wybór robotów wykonujących na nich zadane operacje montażowe. Stanowi tym samym formalną podstawę metod realizujących zadania typowych DSS implementujących DT, tzw. systemów klasy DTDSS, wspierających w trybie online poszukiwanie rozwiązań spełniających oczekiwania użytkowników ZSM.

Pozostała część artykułu jest zorganizowana w następujący sposób: Sekcja 2 przedstawia ważniejsze fakty z literatury przedmiotu. Sekcja 3 wprowadza w zagadnienia planowania produkcji w rekonfigurowanych ZSM. Sekcja 4 przedstawia terminologię i ważniejsze zasady modelowania w reprezentacji sieci Petriego. Sekcja 5 omawia model referencyjny ZSM, a sekcja 6 przedstawia schemat metodyki budowy

metod implementujących koncepcję DTDSS, w szczególności metody zorientowanej na wariantowanie konfiguracji struktury i przepływu produkcji realizowanej w ZSM. Sekcja 7 przedstawia uwagi końcowe.

2. Przegląd literatury przedmiotu

Rosnącej różnorodności zastosowań Elastycznych Systemach Montażowych (*ang. Flexible Assembly System – FAS*), w szczególności ZSM, wykorzystywanych m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, AGD, elektrycznym i elektronicznym [12, 25, 28] towarzyszą nowe rozwiązania obejmujące zarówno innowacyjne rozwiązania struktur jak i sposoby organizacji produkcji realizowanej przy ich pomocy. Struktury linii montażowych, w zależności od charakteru przepływu realizowanej w nich produkcji, wyróżniają dwa typy: proste (oddające liniowy charakter przepływu) oraz w kształcie litery U umożliwiające jednoczesną produkcję różnych wyrobów. Można pokazać, że układ linii montażowej w kształcie litery U przewyższa rozwiązania układu liniowego, pozwalając na skrócenie czasu cyklu i obniżenie kosztów montażu [12].

Wielokryterialny charakter problemów planowania produkcji, złożoność tych problemów oraz potrzeba podejmowania decyzji online stymulują rozwój technik i metod budowy dedykowanych DSS [5, 6, 13, 15]. Oznacza to, że odpowiednie narzędzia DSS powinny być zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwić zintegrowaną, prowadzoną w trybie online, analizę alternatywnych scenariuszy realizacji zleceń produkcyjnych [1, 22]. Podobne oczekiwania dotyczą również rozwiązań zorientowanych na komputerowo wspomagane modelowanie dopuszczalnych wariantów struktur i realizowanych w nich przepływów produkcji, a także ocenę funkcjonowania procedur sterowania implementowanych w sterownikach przemysłowych czasu rzeczywistego [11].

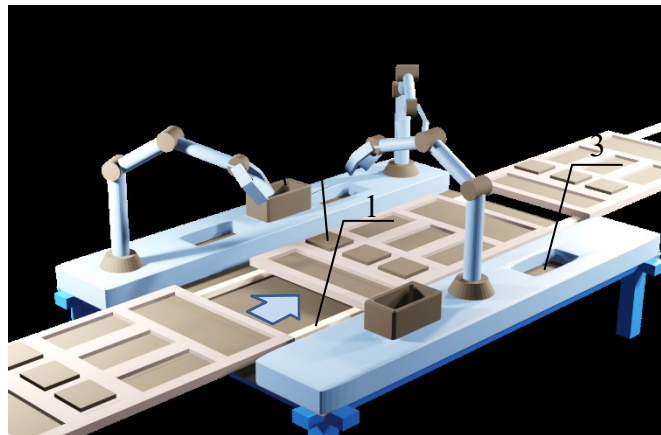
Ze względu na różnorodność problemów decyzyjnych produkcji, dużą liczbę charakteryzujących je zmiennych decyzyjnych oraz wielokryterialny charakter rozwiązywanych problemów, do ich rozwiązania najczęściej stosuje się metody symulacji komputerowej. Wiele artykułów z zakresu modelowania i symulacji przepływu produkcji, preferuje wykorzystanie modeli sieci Petriego, dedykowanych problemom projektowania struktury ZSM i planowania realizowanych w nich procesów produkcyjnych [18, 23, 32]. Niektóre z sieci, takie jak kolorowane, inhibitorowe, rozmyte, czasowe, hierarchiczne typu predykat-przejście, itd. stanowiące rozszerzenia klasycznych reprezentacja sieci Petriego zostały wykorzystane do modelowania i oceny efektywności funkcjonowania złożonych systemów różnej natury i charakteru [10, 22, 26]. Ich główną zaletę stanowi intuicyjna reprezentacja stanowiąca rodzaj rozproszonej struktury reguł IF...THEN... pozwalająca śledzić wybrane ich sekwencje modelujące przepływy sterowania (*ang. control flow*) i/lub procesów wykonywanych w modelowanych systemach. Procedury przepływu sterowania stanowią zwykle implementacje różnych reguł wyboru priorytetu (reguł sekwencjonowania zadań), takich jak: *Longest Processing Time*, *Shortest Processing Time*, *First in First Out*, *Last in First out*, *Earliest Due Date*, *Critical ratio*, itp. [14, 24, 30]. Główną wadą tego podejścia są stosunkowo duże nakłady czasu związane z zaprogramowaniem stosownego modelu. Konkurencyjnym w tym względzie jest rozwiązanie proponowane w niniejszej pracy a sprowadzające się do automatycznej syntezy modelu

referencyjnego dopuszczalnych (wolnych od zakleszczeń) wariantów przepływu produkcji wykorzystującej marszruty technologiczne modelowanych przepływów produkcji.

3. Przykład Zrobotyzowanego Systemu Montażowego

Rozważana klasa systemów ZSM obejmuje stanowiska montażowe (SM), w których wszystkie operacje technologiczne wykonywane są przez grupy robotów montażowych. Montowane obiekty, umieszczone na paletach wyposażonych w zasobniki montowanych detali, przesuwaną się na transporterach wzdłuż kolejnych Stacji Montażowych (SM). Przykład konfiguracji hipotetycznej SM przedstawia rysunek 1.

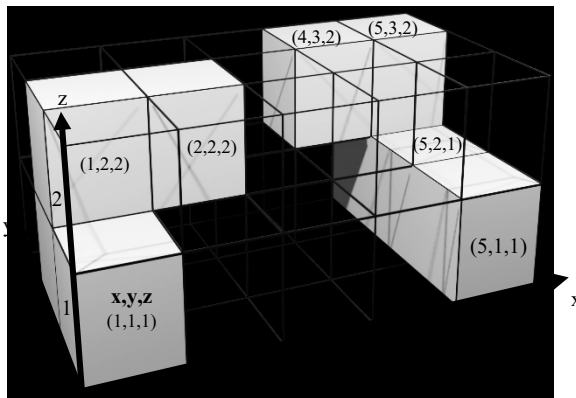
Przyjmuje się, że w ZSM na różnych paletach, w różnych SM, mogą być montowane jednocześnie różne wyroby. Zakłada się także, że każdy rodzaj wyrobu wykonywany jest wzdłuż marszruty przechodzącej przez wybrane SM. A ponadto różne operacje montażowe z różnych SM mogą być, w ogólności, wykonywane przez różne roboty. Oznacza to możliwość dodatkowego wykorzystania robotów, które ukończyły pracę w danej stacji, do zakończenia operacji na stacjach, na których montaż nie został jeszcze ukończony. Transportery zapewniają asynchroniczny przepływ palet, tzn. automatyczne przenoszenie palety z jednej stacji na drugą odbywa się zaraz po zakończeniu wszystkich operacji montażowych związanych z pierwszą stacją i zwolnieniu miejsca na następnej stacji.



Rys. 1. Zrobotyzowana stacja montażowa SM: R_i – i -ty robot montażowy, 1 – transporter palet, 2 – kasetka z montowanymi komponentami, 3 – magazyn głowic technologicznych, 4 – paleta montażowa

Operacje montażowe na poszczególnych SM wykonywane są przez roboty przemieszczające swoje głowice technologiczne wzdłuż trajektorii niezbędnych do wykonania danej operacji. Trajektorii głowicy montażowej robota zadawana jest przez podanie sekwencji podprzestrzeni (np. $[(1,1,1),(1,2,1),(1,2,2),(2,2,2)]$) strefy serwisowej stanowiska montażowego (obszar serwisowy SM – (SSM)), wzdłuż których głowica przemieszcza się podczas montażu (rys. 2). W ogólnym przypadku, specyfikację trajektorii manipulatora robota montażowego stanowi ciąg wektorów podprzestrzeni SSM, przez które przechodzi ramię robota wykonującego daną operację

montażu. Przyjmuje się, że podział strefy roboczej na podprzestrzenie jest dokonywany arbitralnie i nie ulega zmianom w trakcie eksploatacji systemu.



Rys. 2. Hipotetyczne trajektorie manipulatorów robotów montażowych w SSM

Trajektorie manipulatorów robotów determinują marszruty procesów przemieszczania się ich głowic. W ogólnym przypadku marszruty różnych robotów mogą przechodzić przez te same, wspólnie wykorzystywane podprzestrzenie SSM co może prowadzić do kolizji i/lub zakleszczeń związanych z nimi manipulatorów [7, 24]. Oznacza to, że różne jednocześnie wykonywane operacje montażowe wymuszają konieczność synchronizacji realizujących je robotów.

4. Sieci Petriego

Sieć Petriego (SP) definiuje szóstka: $PN = (P, T, E, W, K, M_0)$ [15, 16], gdzie:

$P = \{p_1, \dots, p_n\}$, $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ - skończone, niepuste zbiory miejsc p_i i przejść t_j takie, że $P \cap T = \emptyset$;

$E \subset (P \times T) \cup (T \times P)$ - relacja przepływu spełniająca warunek:

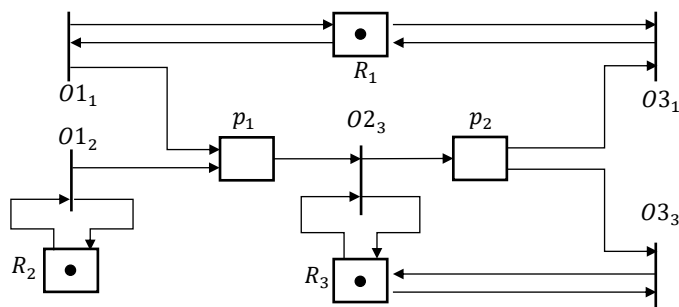
$$\text{dom}(E) \cup \text{cod}(E) = P \cup T;$$

$W: E \rightarrow \mathbb{N}$ - funkcja przepustowości (wagi łuku); brak oznaczenia wagi łuku oznacza, że jego przepustowość wynosi 1;

$K: P \rightarrow \mathbb{N}$ - funkcja pojemności miejsca;

$M_0: P \rightarrow \mathbb{N}_0$ - markowanie początkowe, $\forall p \in P, M_0(p) \leq K(p)$.

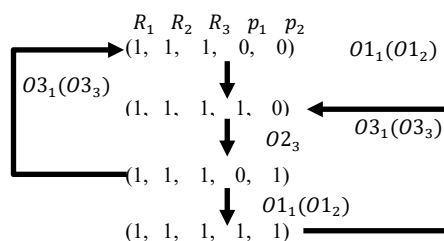
Miejsca SP zwykle reprezentują warunki lub zasoby modelowanego obiektu. Miejsca mogą zawierać żetony graficznie symbolizowane przez umieszczane w nich czarne krążki. Gdy miejsce reprezentuje zasób (maszynę), przyjmuje się, że obecny w nim żeton oznacza gotowość maszyny do działania. Przejścia reprezentują zdarzenia, które mogą być „odpalane” (aktywowane). Podczas odpalania przejścia $t \in T$ z jego miejsc wejściowych usuwane są żetony (w ilościach zdeterminowanych przez W) i przesuwane do jego miejsc wyjściowych, zgodnie z funkcją przepustowości łuków W . Przykład modelu SP marszruty produkcyjnej $[(O_{11}, R_1), (O_{12}, R_2)], [(O_{23}, R_3)], [(O_{31}, R_1), (O_{33}, R_3)]$, gdzie: $[(O_{ij}, R_j), \dots, (O_{ik}, R_k)]$ - oznacza i -tą operację montażu, która może być wykonana przez robota ze zbioru $\{R_j, \dots, R_k\}$, pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przykład sieci Petriego

Stan SP, inaczej markowanie SP, determinowany jest przez ilość żetonów zajmujących jej miejsca i oznaczony jest wektorem $M=(M(p_1), \dots, M(p_i), \dots, M(p_n))$, gdzie: $n=||P||$ - liczność zbioru P . Stany SP ulegają zmianie w wyniku odpalania jednego z przygotowanych w nich przejść. Odpalanie przejść odbywa się zgodnie z następującymi regułami:

- **Przygotowanie przejścia.** Przejście t jest przygotowane gdy spełnione są:
 - $M(p) \geq W(p, t)$, $\forall p \in t$,
 - $M(p) \leq K(p) - W(p, t) + W(t, p)$, $\forall p \in t \cup (t \cap t)$, gdzie: $t = \{p | (p, t) \in E\}$ – miejsca wejściowe przejścia, $t = \{p | (t, p) \in E\}$ – miejsca wyjściowe przejścia.
- **Odpalanie przejścia.** Przygotowane przejście t może zostać odpalane, w wyniku czego z każdego miejsca wejściowego $p \in t$ usuwane są żetony w ilości $W(p, t)$ i umieszczane, w ilościach $W(t, p) - W(p, t)$, w każdym jego miejscu wyjściowym $p \in t$.



Rys. 4. Graf osiągalności SP z rysunku 3. Etykieta $O3_1(O3_3)$ oznacza, że rozłączne alternatywne odpalenie jednego z dwóch przejść $O3_1$ lub $O3_3$ powoduje przejście do tego samego stanu

Przykładowo, w SP z rysunku 3, stan początkowy wynosi $M_0 = (1,1,1,0,0)$, ponieważ $M_0(R_1) = M_0(R_2) = M_0(R_3) = 1$, $M_0(p_1) = M_0(p_2) = 0$. Pozwala to na przygotowanie dwóch przejść $O1_1$ i $O1_2$. Odpalanie przejść jest losowe, a przejścia, które nie mają wspólnych miejsc, mogą być odpalane jednocześnie. W rozważanym przypadku, sytuacja taka nie zachodzi. Oznacza to, że oba jednocześnie przygotowane przejścia znajdują się w konflikcie, tzn. odpalenie jednego z nich uniemożliwia odpalenie pozostałego. O rozwiązaniu konfliktu rozstrzyga przyjęta reguła wyboru priorytetu. Zakładając, że przejście $O1_1$ ma wyższy priorytet po jego odpaleniu stan początkowy M_0 przechodzi do stanu $M_1 = (1,1,1,1,0)$.

Do analizy zachowania modeli SP wykorzystywany jest tzw. graf osiągalności, którego wierzchołki reprezentują zbiór stanów osiągalnych $R(M_0)$ w tej sieci.

Rysunek 4 przedstawia graf osiągalności SP z rysunku 3. Do analizy stanów osiągalnych w SP wykorzystywane jest również równanie stanu:

$$M' = M + e(i) C, \quad (1)$$

gdzie:

$e(i)$ – wektor jednostkowy o wymiarach $1 \times m$, którego wszystkie współrzędne za wyjątkiem i -tej, odpowiadającej przejściu t_i przygotowanemu w stanie M , przyjmują wartość 0,

$C = C^+ - C^-$ – macierz incydencji SP o rozmiarze $m \times n$, gdzie: $m = \|T\|$ i $n = \|P\|$, oraz

$$C^+ = (c_{ij})_{n \times m}, \quad c_{ij} = \begin{cases} W(t_i, p_j) \text{ for } (t_i, p_j) \in E \\ 0 \text{ w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

$$C^- = (c_{ij})_{n \times m}, \quad c_{ij} = \begin{cases} W(p_j, t_i) \text{ dla } (p_j, t_i) \in E \\ 0 \text{ w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

Reprezentacja macierzowa zapewnia algebraiczną formułę symulacyjnej analizy zachowania modelu SP. Łatwo zauważyć, że tą samą przestrzeń stanów (jak pokazano na rysunku 3) można wyznaczyć z macierzy C wykorzystywanej w równaniu stanu (1).

C^+	R_1	R_2	R_3	P_1	P_2
$O1_1$	1			1	
$O1_2$		1		1	
$O2_3$			1		1
$O3_1$	1				
$O3_3$			1		

$$C = C^+ - C^-$$

C^-	R_1	R_2	R_3	P_1	P_2
$O1_1$	1				
$O1_2$		1			
$O2_3$			1	1	
$O3_1$	1				1
$O3_3$			1		1

Przedmiotem analizy modeli SP są właściwości charakteryzujące: żywotność, osiągalność, zachowawczość, trwałość i ograniczoność, decydujące o jakości funkcjonowania modelowanych systemów (w szczególności systemów produkcyjnych). Definicje wybranych właściwości oraz opisy metod wykorzystywanych do ich analizy można znaleźć w pracach [15, 16]. Prowadzone w tym kontekście wariantowanie dopuszczalnych zachowań rozważanego modelu referencyjnego ma na celu poszukiwanie odpowiedzi na pytania: Czy zakładane zachowanie modelowanego systemu gwarantuje osiągalność oczekiwanych stanów? Czy zachowanie danego wariantu modelowanego systemu jest wolne od zakleszczeń? Odpowiedź na pierwsze pytanie wymaga wskazania sekwencji paleń przejść składających się na planowane zachowanie, sekwencji przeprowadzającej stan początkowy M_0 do oczekiwanego M_i . Odpowiedź na drugie pytanie, decydujące o żywotności systemu (tzn. gwarancji braku zakleszczeń realizowanych w nim procesów), warunkowane jest przyjęciem stosownych reguł wyboru priorytetu. Algorytmy implementujące takie reguły, w szczególności przyjmujące postać warunków wystarczających nie gwarantują ich maksymalnej permissywności (problem unikania zakleszczeń jest problemem NP-zupełnym [22, 29]), charakteryzuje wielomianowa złożoność obliczeniowa [21]. Jedną z takich reguł "zapobiegania zakleszczeniom" wykorzystuje możliwość dekompozycji marszrut produkcyjnych na strefy tworzone przez naprzemiennie skonfigurowane pary złożone z sekwencji zasobów współdzielonych i sekwencji pozostałych zasobów (niewspółdzielonych). Zasoby współdzielone są wykorzystywane przez więcej niż

jeden proces, podczas gdy pozostałe (niewspółdzielone) zasoby są wykorzystywane wyłącznie przez jeden proces. Przyjęcie reguły zabraniającej jednoczesnego wykorzystania zasobów w poszczególnych strefach (sekcjach) zasobów współdzielonych oraz reguły zabraniającej całkowitego zapełnienia procesami strefy zasobów niewspółdzielonych występującej w marszrucie po zajętej strefie zasobów powtarzalnych, uniemożliwia spełnienie jednego z czterech warunków koniecznych do wystąpienia zakleszczenia, warunku zamkniętego cyklu oczekiwań na dostęp do współdzielonych zasobów (istnieje gwarancja osiągnięcia stanu, w którym wykorzystywane są tylko zasoby znajdujące się w strefach zasobów niewspółdzielonych, który jest stanem pozwalającym na zakończenie wszystkich zadań). Łatwo zauważyć, że pozostawienie w tak rozumianych strefach zasobów oczekujących na procesy pozwala unikać zakleszczeń związanych z sytuacjami, w których wszystkie zasoby wszystkich stref są jednocześnie wykorzystywane [4].

5. Model referencyjny

Rozważany model referencyjny umożliwia ocenę skutków decyzji podejmowanych w zakresie tak parametrów struktury ZSM, jak i sposobów organizacji realizowanych w nim przepływów produkcji.

5.1. Przykład ilustracyjny

Rozważany problem wiąże się z wyznaczeniem struktury ZSM oraz realizowanego w nim procesu montażowego, które minimalizują długość cyklu produkcyjnego partii dwóch typów wyrobów. Marszruty technologiczne $MT1$ i $MT2$ określające liczbę oraz przeznaczenie rozważanych robotów montażowych, a także determinujące porządki operacji montażowych, definiujące sposób wykonania poszczególnych wyrobów, mają następującą postać:

$$MT1 = [(O1_1, R_1), (O1_2, R_2)], [(O2_3, R_3)], [(O3_1, R_1), (O3_3, R_3)],$$

$$MT2 = [(O4_2, R_2)], [(O5_3, R_3), (O5_4, R_4)], [(O6_4, R_4)],$$

gdzie:

$[(O_{i_j}, R_j), \dots, (O_{i_k}, R_k)]$ – oznacza i -tą operację montażową, do wykonania której może zostać wykorzystany jeden z alternatywnych (aktualnie dostępnych) robotów $\{R_j, \dots, R_k\}$;

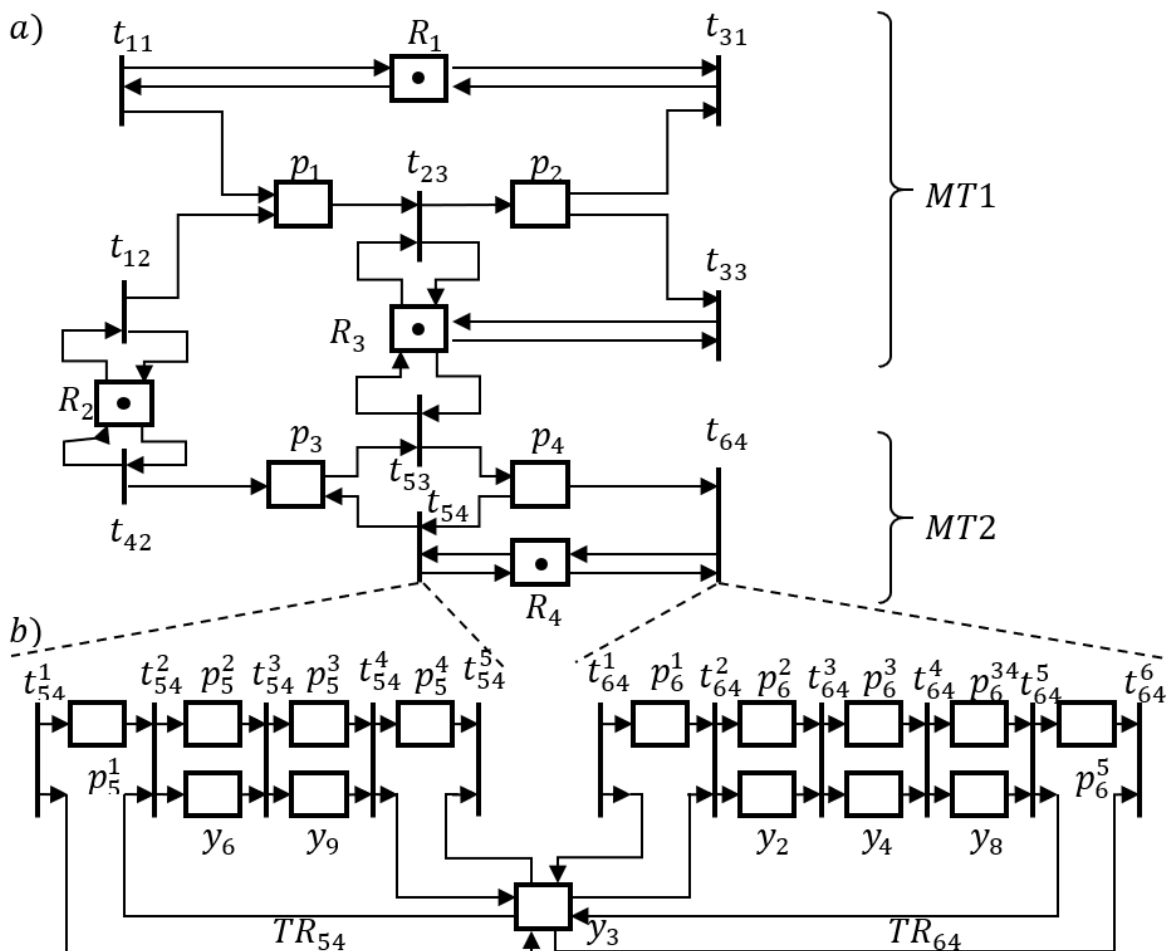
(O_{i_j}, R_j) – oznacza i -tą operację montażową wykonywaną przez robota R_j .

5.2. Poziom przepływu produkcji

Z przedstawionymi marszrutami łatwo skojarzyć odpowiadające im reprezentacje sieciowe (rys. 5a). Przejścia w przedstawionych modelach są interpretowane jako zdarzenia związane z wykonaniem odpowiednich operacji montażowych. Przykładowo przejścia t_{12} i t_{11} interpretowane są jako potencjalne alternatywne wykonania pierwszej operacji marszruty $MT1$ – odpowiednio z wykorzystaniem robotów R_1 i R_2 . Z kolei przejście t_{23} odpowiada wykonaniu drugiej operacji marszruty $MT1$, dla wykonania

której jest wykorzystywany robot R_3 . Przejścia t_{31} i t_{33} skojarzone są z alternatywnym wykonaniem ostatniej operacji w marszrucie $MT1$.

Miejsca R_i oznaczają stany wykorzystania poszczególnych robotów. W stanie początkowym M_0 , znakowania tych miejsc $M_0(R_i) = 1$ oznaczają dostępność (stan oczekiwania) poszczególnych zasobów. Pozostałe miejsca $p_1 \div p_4$ reprezentują stany realizacji procesów montażowych. Znakowania M i M' , w których $M(p_1) = 1$, $M(p_2) = 0$ oraz $M'(p_1) = 0$, $M'(p_2) = 1$ odpowiadają stanom realizacji pierwszego procesu odpowiednio po wykonaniu pierwszej i drugiej operacji marszrutu $MT1$. Aby rozważane modele ilustrowały wykonanie operacji montażowych związanych jednocześnie tylko z pojedynczymi paletami danego typu wyrobu, należy je uzupełnić o miejsca p_x i p_r takie że $p_x^* = \{t_{33}, t_{31}\}$, $^*p_x = \{t_{11}, t_{12}\}$ oraz $^*p_y = \{t_{42}\}$, $p_y^* = \{t_{64}\}$.



Rys.5. Zintegrowany model sieciowy możliwych realizacji procesów montażowych: a) modele sieciowe marszrut technologicznych, b) model sieciowy trajektorii robota R_5 związanych z wykonywaniem operacji O_{54} i O_{64}

5.3. Poziom operacji

Specyfikacje trajektorii robotów zadane są sekwencjami ruchów składających się na realizację planowanych operacji montażowych. W przypadku j -tego robota, wykonującego i -tą operację specyfikacja taka przyjmuje postać sekwencji $TR_{ij} = (O_i^1, y_{i1}), (O_i^2, y_{i2}), \dots, (O_i^k, y_{ik})$, gdzie: (O_i^k, y_{ik}) oznacza wykonywanie k -tego ruchu przez j -tego robota, wykonującego i -tą operację.

Rozważmy przykładowo następujące dwie specyfikacje trajektorii robota R_4 , związane z wykonaniem operacji O_{5_4} i O_{6_4} , występujących w drugim procesie montażowym:

$$TR_{34} = (O_5^1, y_{51}), (O_5^2, y_{52}), (O_5^3, y_9), (O_5^4, y_3)$$

$$TR_{64} = (O_6^1, y_3), (O_5^2, y_2), (O_6^3, y_4), (O_6^4, y_8), (O_6^5, y_3)$$

Modele sieciowe odpowiadające wymienionym specyfikacjom zostały przedstawione na rysunku 5b. Omawiając te modele należy zauważyć, że:

- miejsca oznaczone symbolami y_i oznaczają odpowiednie obszary przestrzeni SSM; w obszarach tych w kolejności wskazanej w specyfikacji TR_{ij} j -ty robot wykonuje i -tą operację montażową,
- założenie, że rozpoczęcie i zakończenie poszczególnych operacji montażowych (przypisanych danemu robotowi) odpowiada określonemu obszarowi SSM implikuje powtórzenia tych samych symboli pierwszego i ostatniego obszaru w specyfikacji każdej trajektorii,
- miejsca p_i^k oznaczają stany realizacji wykonania operacji montażowej,
- przejścia t_{ij}^k opisują k -te zdarzenia, związane z przemieszczaniem się j -tego robota od obszaru k -tego do $k+1$ -szego,
- sieci utworzone odpowiednio z przejść t_{54}^k oraz t_{64}^k stanowią rozwinięcia przejść t_{54} i t_{64} sieci z rys. 5a; oznacza to, że przejścia t_{54}^k modelują zdarzenia elementarne składające się na zdarzenie złożone t_{54} ; analogiczna uwaga odnosi się do przejścia t_{64}^k i t_{64} .

6. Ocena efektywności funkcjonowania

Powyższe rozważania potwierdzają przydatność przyjętego formalizmu SP do budowy hierarchicznego modelu zachowania ZSM. Wyższy poziom sieci (patrz rys. 5) reprezentuje przepływ palet z montowanymi przedmiotami. Z kolei jej niższy poziom modeluje wykonanie trajektorii ruchu manipulatorów robotów związanych z realizacją poszczególnych operacji montażowych. Model ten umożliwia sformułowanie zadań wyboru struktury ZSM (konfiguracji autonomicznych SM) oraz wyboru realizowanego procesu technologicznego (przydziału konkretnych robotów do realizacji poszczególnych operacji montażowych).

6.1. Wariantowanie alokacji zasobów ZSM

Sformułowanie pierwszego zadania można odnieść do wyższej warstwy przedstawionego modelu. Rozważając różne warianty organizacji ZSM związane z nowymi alternatywnymi wariantami marszrut technologicznych (wynikających np. z dokonywanych zmian i/lub uzupełnień operacji transportu palet pomiędzy SM),

naturalną staje się konieczność analizy odpowiednich wariantów niższej warstwy modelu. Warstwa ta (rys. 5b) umożliwia dokonanie oceny wzajemnych interakcji, występujących pomiędzy poszczególnymi robotami montażowymi w ZSM. Przedstawiony model umożliwia zatem jednoczesne rozwiązywanie obu zadań: tak dekompozycji ZSM na autonomiczne SM, jak i przydziału robotów w poszczególnych stacjach montażowych do realizacji konkretnych operacji. Aby zilustrować te możliwości, rozważmy następujące trzy opcje:

Wariant 1

$$MT_1^1 = [(O7, C1)], [(O1_1, R_1), (O1_2, R_2)], [(O2_3, R_3)], [(O3_1, R_1), (O3_3, R_3)], [(O8, C1)],$$

$$MT_2^1 = [(O9, C2)], [(O4_2, R_2)], [(O5_3, R_3), (O5_4, R_4)], [(O6_4, R_4)], [(O10, C2)]$$

Wariant 2

$$MT_1^2 = [(O7, C1)], [(O1_1, R_1), (O1_2, R_2)], [(O1_1, C1)], [(O2_3, R_3), (O3_1, R_1)], [(O3_3, R_3)], [(O8, C1)]$$

$$MT_2^2 = [(O9, C2)], [(O4_2, R_2)], [(O5_3, R_3), (O5_4, R_4)], [(O1_2, C2)], [(O6_4, R_4)], [(O10, C2)]$$

Wariant 3

$$MT_1^3 = [(O7, C1)], [(O1_1, R_1), (O1_2, R_2)], [(O1_1, C1)], [(O2_3, R_3)], [(O1_3, C1)], [(O3_1, R_1), (O3_3, R_3)], [(O8, C1)]$$

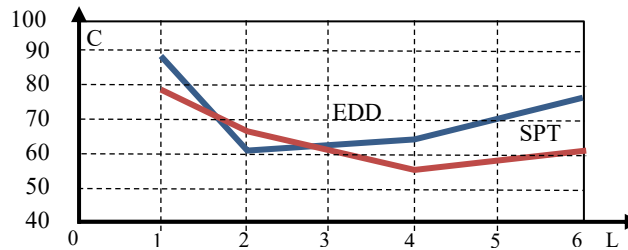
$$MT_2^3 = [(O9, C2)], [(O4_2, R_2)], [(O1_4, C2)], [(O5_3, R_3), (O5_4, R_4)], [(O1_2, C2)], [(O6_4, R_4)], [(O10, C2)]$$

W pierwszym wariantcie przyjęto, że ZSM składa się z dwóch stacji montażowych SM1 i SM2. W stacji SM1, obsługującej proces zadany przez MT_1^1 , wykorzystywane są roboty: R_1, R_2, R_3 . Operacje podawania i odbierania kolejnych palet z SM1 wykonywane są przez transporter C1. Z kolei w stacji SM2, obsługiwanej przez C2, wykorzystywane są roboty: R_2, R_3, R_4 . W wariantcie tym zakłada się, że roboty R_2 i R_3 realizują odpowiednie operacje montażu w obu stacjach. Kolejne warianty zakładają rozwiązania, w których ZSM składa się odpowiednio z 4 i 6 SM.

Przyjmując, że czasy wykonania poszczególnych operacji montażowych i operacji transportu międzystanowiskowego są znane i pozostają niezmiennic dla kolejnych wariantów, można dokonać oceny poszczególnych rozwiązań, porównując wyznaczone czasy cykli produkcyjnych. W przeprowadzonych, powtarzanych dla różnych reguł wyboru priorytetu eksperymentach, przyjęto tę samą wielkość partii produkcyjnych. Eksperymenty obejmowały szeregowanie i planowanie seryjnej (potokowej) produkcji dwóch wyrobów realizowanej zgodnie z dwiema regułami wyboru priorytetu: najwcześniejsza data ukończenia (*ang. earliest-due-date – EDD*) i najkrótszy czas przetwarzania (*ang. shortest processing time – SPT*). Konflikty zasobowe grożące kolizją robotów montażowych konkurujących w dostępie do współdzielonych obszarów SSM, we wszystkich SM, rozstrzygane były zgodnie z zasadą "pierwszy przyszedł pierwszy wyszedł" (FIFO).

Łatwo zauważyć, że porównując jednocześnie: różne warianty konstrukcji ZSM z różnymi wariantami alokacji robotów do wykonywanych operacji montażowych, możliwy jest wybór rozwiązania ekstremalizującego wartość przyjętego wskaźnika

jakości – długość cyklu produkcyjnego C . Ilustrację takiego wyboru, obejmującego konfigurację ZSM i wariant realizacji przepływu produkcji, przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Wyniki przykładowych eksperymentów symulacyjnych. Zależność długości cyklu produkcyjnego C od liczby składowych SM oraz reguły wyboru priorytetu

6.2. Koncepcja metodyki implementującej DTDSS

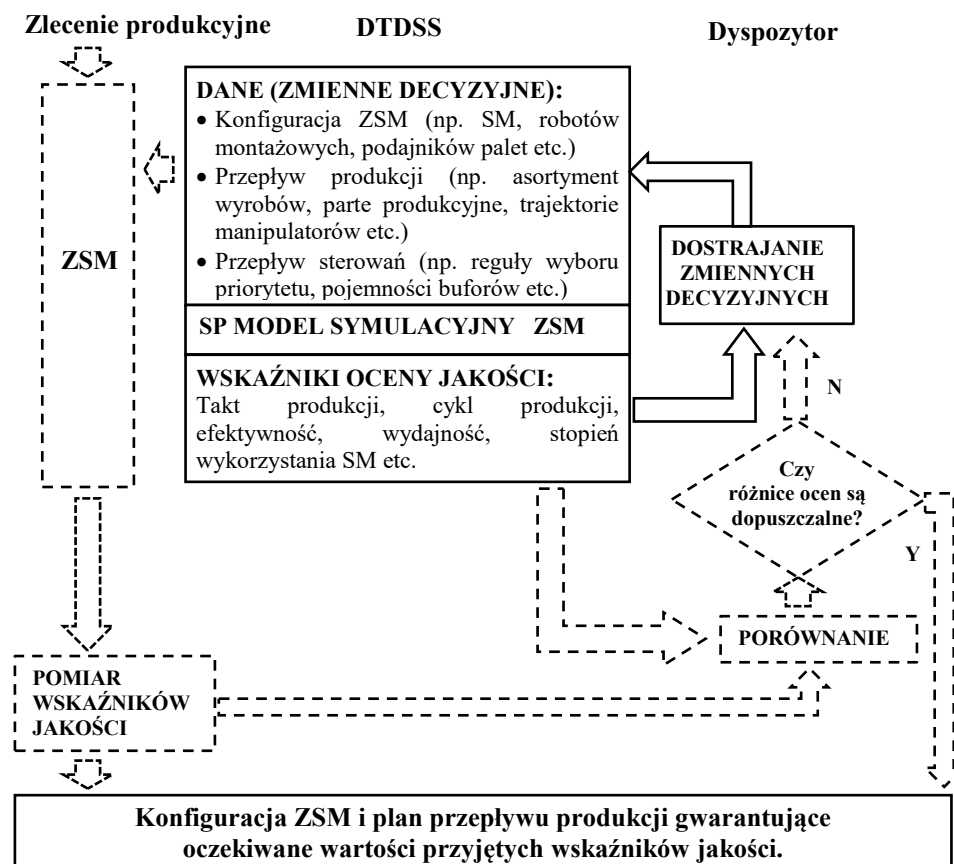
Przykłady rozwiązań systemów wspomagania komputerowego umożliwiających kompleksowe podejście do modelowania i oceny efektywności funkcjonowania zrobotyzowanych systemów montażowych przedstawione zostały w pracach [18, 20]. Przedstawione tam systemy wspomagają użytkownika w zadaniach:

- projektowania konstrukcji ZSM oraz bilansowania linii montażowych,
- doboru i rozmieszczania elementów SM,
- prototypowania wariantów konfiguracji i scenariuszy przepływu produkcji realizowanych w ZSM,
- alokacji zasobów (roboty, przenośniki paletowe) do poszczególnych zadań i operacji, a także oceny taktu i cyklu produkcji.

Oznacza to, że każda próba bardziej kompleksowego podejścia do modelowania ZSM, pozwalającego na jednoczesną analizę różnych wariantów rozmieszczenia jego elementów i akceptowalnych scenariuszy procesów montażowych w nich realizowanych, prowadzi do złożonych, nieliniowych problemów optymalizacji wielokryterialnej. Proponowane podejście osłabia te ograniczenia. Łatwo zauważyć, że wprowadzony model referencyjny, koncentrując się tylko na zasobach ZSM i sposobach realizacji przebiegających w nim procesów ogranicza możliwości wariantowania tylko do zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Gwarancja tego, że oceniane są tylko dopuszczalne warianty przepływu produkcji, skraca poszukiwanie rozwiązań spełniających postawione oczekiwania. Schemat iteracyjnego procesu naprzemiennie przeprowadzanej specyfikacji zmiennych decyzyjnych i oceny wynikających z niej skutków, procesu zorientowanego na poszukiwanie wariantu spełniającego wymagane kryteria oceny przedstawiono na rysunku 7.

Idea metodyki implementującej koncepcję DTDSS zasadza się w iteracyjnie uruchamianych etapach: planowania konfiguracji ZSM i planowania prowadzonej w nim produkcji, oraz korekty wdrożonego planu produkcji. Na pierwszym z tych etapów (elementy wyróżnione na rysunku 7 linią ciągłą) ustalany jest sposób rozmieszczenia elementów tworzących ZSM (w szczególności podsystemy transportu palet i komponentów) oraz wyznaczany jest plan realizacji zlecenia (obejmujący: takt i cykl produkcji, harmonogram przepływu produkcji, itp.). W kolejnym etapie (elementy wyróżnione linią przerywaną), na podstawie oceny przyjętych wskaźników jakości

realizowanej produkcji, podejmowana jest decyzja o ewentualnej korekcie wcześniej przyjętego planu.



Rys. 7. Schemat metodyki implementującej koncepcję DTDSS

Warto zauważyć, że w proponowanym procesie poszukiwania, oprócz wyboru procedur sterowania koordynujących współpracę robotów (reguł wyboru priorytetu) można również ocenić harmonogramy procesów towarzyszących przepływowi części, narzędzi, i głowic technologicznych. Przedstawione możliwości nie wyczerpują tak wszystkich wcześniej postawionych, pytań jak i wszystkich możliwych zastosowań podobnych narzędzi opartych na modelach SP.

7. Wnioski

Przedstawiona metodyka umożliwia kompleksowe podejście do wybranych zadań projektowania i eksploatacji (sterowania i zarządzania) ZSM. Proponowane podejście umożliwia poszukiwanie rozwiązań integrujących możliwości konfiguracji ZSM dedykowanych produkcji wieloasortymentowej z alternatywnymi scenariuszami realizowanych w nim przepływów produkcji. Oznacza to, że może być ono zaimplementowane w DSS wspierających planowanie operacyjne zleceń produkcyjnych, w szczególności w zadaniach alokacji zasobów, marszrutyzacji i harmonogramowania zleceń produkcyjnych, w tym także w wielu innych aplikacjach.

Niedostatkami proponowanego podejścia jest brak możliwości analizy procesów montażowych, w których przepływy montowanych wyrobów tworzą strukturę porządku częściowego (występującego np. w procesach montażu samochodów) oraz brak możliwości analizy wpływu zakłóceń losowych i/lub nieprecyzyjny (rozmyty) charakter danych. Kwestie te podejmowane będą w przyszłych badaniach.

LITERATURA

1. Alexopoulos K., Anagiannis I., Nikolakis N., Chryssolouris G. A quantitative approach to resilience in manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 2022, DOI: 10.1080/00207543.2021.2018519
2. Bahareh Vaisi. A review of optimization models and applications in robotic manufacturing systems: Industry 4.0 and beyond, *Decision Analytics Journal*, 2022, DOI: 10.1016/j.dajour.2022.100031
3. Bakar B.A., Henry R.M., Ali M. An alternative approach in batch process control implementation using hierarchical Petri nets, *World Scientific, Proc. of the International Conference on "Computer Integrated Manufacturing*, 1991, 171-174
4. Banaszak Z., Synchronisation of robots in flexible assembly systems, *Archiwum Budowy Maszyn*, Vol. 39, No. 1-2, 1992, 117-133
5. Banaszak Z., Skolud B., Zaremba M.B., Computer-aided prototyping of production flows for virtual enterprise, *J Intell Manuf*, Vol. 14, 2003, 83-106, DOI: 10.1023/A:102229131361
6. Bujari A., Calvio A., Foschini L., Sabbioni A., Corradi A., A Digital Twin Decision Support System for the Urban Facility Management Process. *Sensors* 2021, 21, 8460
7. Claes, D., Tuyls, K. Multi robot collision avoidance in a shared workspace. *Auton Robot*, Vol. 42, 1749–1770 (2018). DOI:10.1007/s10514-018-9726-5
8. Cutts G., Rattigan S., Using Petri nets to develop programs for PLC systems, *Application and Theory of Petri Nets (Red.)* K. Jansen, Springer Verlag, Berlin 1992, 368-378
9. Gang Y., Yi W., Zeyu M., Min H., Vijayan S., Ken W., A digital twin-based decision analysis framework for operation and maintenance of tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 116, 2021, 104125, DOI:10.1016/j.tust.2021.104125
10. Hatono I., Katoh N., Yamagata K., Tamura H., Modelling of FMS under uncertainty using stochastic Petri Nets, *Proc. of the 3rd International Workshop on Petri nets and performance models*, 1989, Kyoto, Japan, 122-130
11. Heiner M., Petri net based software validation (prospects and limits), Technical report No. TR-92-022, International Computer Science Institute, Berkeley, 1992
12. Janardhanan M.N., Li Z., Bocewicz G., Banaszak Z., Nielsen P.. Metaheuristic Algorithms for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent robot setup times. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 65, 2019, 256-270
13. Jensen K., Computer tools for construction, modification and analysis of Petri nets,

- Lecture Notes on Computer Science, No. 255, (Red.) W. Brauer, W. Reisig, G. Rosenberg, Springer Verlag, Berlin 1987, 4-19
14. Kumar K.K., Nagaraju D., Gayathri S., Narayanan S., Evaluation and Selection of Best Priority Sequencing Rule in Job Shop Scheduling using Hybrid MCDM Technique, *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 197, 2017, 012059 DOI:10.1088/1757-899X/197/1/012059
 15. Laemmle A., Gust S., Automatic layout generation of robotic production cells in a 3D manufacturing simulation environment, *Procedia CIRP*, Vol. 84, 2019, 316-321, DOI:10.1016/j.procir.2019.04.207
 16. Makris S., Michalos G., Chryssolouris G., "Virtual Commissioning of an Assembly Cell with Cooperating Robots", *Advances in Decision Sciences*, Vol. 2012, Article ID 428060, 11 pages, 2012. DOI:10.1155/2012/428060
 17. Peterson J., *Petri net theory and modelling of systems*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.Y., 1981
 18. Recalde L., Silva M., Ezpeleta J., Teruel E. Petri Nets and Manufacturing Systems: An Examples-Driven Tour. Desel J., Reisig W., Rozenberg G. (eds) *Lectures on Concurrency and Petri Nets*. ACPN 2003. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3098. 2022, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI:10.1007/978-3-540-27755-2_21
 19. Reisig W. Petri Net models of distributed algorithms. van Leeuwen J. (eds) *Computer Science Today. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1000, 1995 Springer, Berlin, Heidelberg. DOI:10.1007/BFb0015259
 20. Reisig W., *Petri nets*, Springer Verlag, Berlin 1982
 21. Reutenauer Ch., *The mathematics of Petri nets*, Englewood Cliffs, N.Y., 1988
 22. Seiche W., Abel D., Rake H. Synthesis of deadlock-free control structures using Petri nets, Preprint of the first IFAC Symposium on "Design Methods of Control Systems", 1991, ETH Zurich, Vol. 2 (Red.) D. Franke, F. Kraus, Pergamon Press, Oxford, N.Y., Tokyo, 697-702
 23. Silva M., Valette R., *Petri nets and flexible manufacturing*, *Lecture Notes on Computer Science*, No. 424, Springer Verlag, Berlin 1990, 374-415
 24. Silva, E.B., Costa, M.G., Silva, M.F., & Pereira, F.H. Evaluation of Production Sequencing Rules in Job Shop and Flow Shop Environment through Computer Simulation, 2012
 25. Smale D., Ratchev S., A Capability Model and Taxonomy for Multiple Assembly System Reconfigurations, *IFAC Proceedings*, Vol. 42, Issue 4, 2009, 1923-1928, DOI:10.3182/20090603-3-RU-2001.0556
 26. Van der Aalst W.M., *Timed coloured Petri nets and their application to logistics*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven 1992
 27. Viswandham N., Narahari Y., *Performance modelling of automated manufacturing systems*, Prentice-Hall, N.Y., 1992
 28. Wang, C. Layout designs for robotic PCB assembly. *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 7, 1996, 39-52. DOI:10.1108/09576069610125094

29. Yang B., Hu H., Maximally Permissive Deadlock and Livelock Avoidance for Automated Manufacturing Systems via Critical Distance, in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, DOI: 10.1109/TASE.2021.3138169
30. Zanchettin A.M. Robust scheduling and dispatching rules for high-mix collaborative manufacturing systems. Flex Serv Manuf J, 2021. DOI:10.1007/s10696-021-09406-x
31. Zaremba M.B., Jedrzejek K.J., Banaszak Z.A., Design of Steady-State Behavior of Concurrent Repetitive Processes: An Algebraic Approach, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems And Humans, Vol. 28, No. 2, 1998 199-212
32. Zhou KQ., Zain A.M. Fuzzy Petri nets, and industrial applications: a review. Artif Intell Rev, Vol. 45, 405–446, 2016, DOI:10.1007/s10462-015-9451-9
33. Meng C.Z.F., DiCesare, D.R. Control of a Flexible Manufacturing System Using Petri Nets, IFAC Proceedings, Vol. 23, Issue 8, Part 5, 1990, 47-52, DOI:10.1016/S1474-6670(17)51710-3
34. Zhou M.Ch., DiCesare F., Parallel and sequential mutual exclusions for Petri net modelling of manufacturing systems with shared resources, IEEE Trans, on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 4, 1991, 515-527