

## HEURYSTYCZNE METODY PLANOWANIA PROCESU MONTAŻU MECHANICZNEGO

*W artykule rozważane są heurystyczne metody planowania montażu mechanicznego, które poprawiają elastyczność systemów montażowych. Prezentowane tu planowanie montażu polega na wyznaczeniu różnych wariantów kolejności przebiegu operacji oraz na ocenie tych wariantów pozwalającej ustalić sekwencję optymalną. W zakończeniu artykułu określono kierunki przyszłych badań.*

### HEURISTIC METHODS OF THE MECHANICAL ASSEMBLY PROCESS PLANNING

*In this article, we consider those heuristic methods which improve the flexibility of assembly systems in mechanical assembly planning. The assembly planning method demonstrated in the article consists in the determination of various options of operation sequences and the evaluation of such options that allows to establish an optimum sequence. The directions of future research are discussed in the conclusion of the article.*

#### 1. WPROWADZENIE

Celem planowania montażu jest wyznaczenie różnych wariantów kolejności przebiegu operacji montażowych oraz ocena tych wariantów pozwalająca ustalić sekwencję optymalną ze względu na najogólniej rozumiany koszt całego procesu. Wybór optymalnej sekwencji spośród sekwencji dopuszczalnych ze względu na geometryczne, topologiczne i technologiczne ograniczenia przy równoczesnym uwzględnieniu fizykalnych właściwości poszczególnych części i całego zmontowanego wyrobu jest zagadnieniem kombinatorycznie trudnym, gdyż liczba planów montażowych zależy wykładniczo od liczby części w wyrobie. Szczególnie ważne, ale i zarazem trudne, jest znalezienie wystarczająco dobrej sekwencji w planowaniu taktycznym i sterowaniu operacyjnym. Sama istota planowania taktycznego i sterowania operacyjnego narzuca konieczność podejmowania decyzji w bardzo krótkim czasie. Zastosowanie ścisłych metod generowania sekwencji montażowej opisane np. w [1, 3, 7] ograniczone jest do przypadków zespołów zbudowanych z kilkunastu, najwyżej dwudziestu części. Procesy montażowe liczniejszych struktur wyznaczane są metodami heurystycznymi dającymi bardzo szybko rozwiązania dobre – bliskie optymalnym.

W niniejszym artykule rozważane są takie metody planowania montażu mechanicznego, które umożliwiają poprawę elastyczności w elastycznych systemach montażowych. Elastyczność systemu to zarówno jego zdolność adaptowania się do zmiennych wymagań rynku, jak i do samego procesu wytwórczego. Elastyczność tę można zwiększyć m.in. poprzez pozostawienie swobody wyboru marszrut technologicznych.

W pracy dokonana została klasyfikacja heurystycznych metod generowania sekwencji montażowej. Metody podzielone zostały według kryterium ich przeznaczenia i skomplikowania montowanych produktów, dla których zostały zbudowane. Wydzielono więc:

- metody budowy sekwencji montażowej wyrobów o średniej liczbie części, dla których metody ściśle zawodzą ze względu na długość realizacji obliczeń;
- planowania montażu wyrobów o dużej liczbie części składowych; są to zwykle procedury wydzielające w pierwszej kolejności z produktu możliwe podzespoły lub metody stosujące zasady sztucznej inteligencji;
- metody uwzględniające przy budowie sekwencji obciążenie gniazda produkcyjnego. Metody te w sposób pośredni generują sekwencję montażową.

## 2. METODY STOSOWANE DLA PRODUKTÓW ZBUDOWANYCH Z UMIARKOWANEJ LICZBY CZĘŚCI (15-30 SZT.)

### 2.1. Hierarchiczna procedura według Gu

Poszukiwanie kierunku możliwych operacji montażowych bezpośrednio z bazy danych, często stosowane w planowaniu montażu, jest przedsięwzięciem wyjątkowo złożonym i czasochłonnym. P. Gu [5] położył wielki nacisk na oczywisty fakt, że produkt złożony – ten, który wymaga procesu montażowego – składa się z podzespołów i części. Z kolei każdy podzespół zawiera następne podzespoły i części. To stwierdzenie pozwoliło zbudować heurystykę generującą sekwencje montażowe w czterech etapach:

- utworzenie grafu powiązań na podstawie bazy danych,
- dekompozycja zespołu części w podgrupy przy użyciu grafu powiązań,
- generowanie sekwencji demontażu dla każdej podgrupy,
- generowanie końcowej sekwencji montażu poprzez syntetyzowanie sekwencji demontażu podgrup i odwracaniu głównej sekwencji demontażu.

Takie podejście znacznie zmniejszyło przeszukiwaną przestrzeń rozwiązań i tym samym przyspieszyło uzyskiwanie wyników. Wadą metody Gu, która znacznie ogranicza możliwości jej wykorzystania w planowaniu produkcji dla elastycznych systemów montażowych, jest uzyskiwanie tylko jednej wynikowej sekwencji operacji.

### 2.2. Metoda wykorzystująca rysunek eksplodujący

W metodzie wykorzystującej rysunek rozstrzelony [7] strukturę wyrobu przedstawia się za pomocą digrafu, którego wierzchołki odpowiadają częściom, łuki zaś relacji *powyżej*, relacji wprowadzającej porządek między wzajemnym położeniem stykających się części lub podzespołów w zmontowanym wyrobie. Łuk  $(a_i, a_j)$  dla  $i \neq j$  oznacza, że część  $a_i$  jest umieszczona *powyżej* części  $a_j$ , z którą styka się czołowo. Właśnie te czołowe powierzchnie styku są naturalnym ograniczeniem warunkującym kolejność montażu.

W pierwszym etapie, przy wykorzystaniu heurystycznych reguł, przekształca się digraf struktury montowanego wyrobu w graf struktury typu łańcuch. Dokonuje się tego poprzez eliminację rozgałęzień grafu prowadzących do pojawienia się wierzchołków wielokrotnych poprzedników i następników, wielokrotnych łuków, równoległych dróg i pętli a także niespójności. Reguły tych przekształceń są heurystyczne, gdyż przyjmuje się m.in., że montaż części wyższej lub zewnętrznej jest łatwiejszy niż części niższej lub leżącej wewnątrz niej.

Łańcuch struktury (graf rozstrzelenia) odpowiada rysunkowi eksplodującemu i właśnie on jest punktem wyjścia dla heurystyki generowania sekwencji montażowych.

W drugim etapie tworzy się sekwencje operacji za pomocą algorytmu, który w dużym uproszczeniu przyjmuje postać:

- Krok 1. Przyjmij do analizy dotychczas nie rozpatrywaną listę nazw części odpowiadającą rysunkowi eksplodującemu. Przejdź do kroku 2.
- Krok 2. Sprawdź możliwość utworzenia prostych, składających się tylko z pojedynczych części, sekwencji rozpoczynających się od góry oraz sekwencji rozpoczynających się od dołu. Gdy choć jedna z prostych sekwencji może być utworzona, to jest ona rozwiązaniem zadania. Gdy nie ma prostych sekwencji, idź do kroku 3.
- Krok 3. W kroku 2 natrafiono na część, która nie może być indywidualnie montowana. Próbuje się teraz konstruować podzespół zawierający tę część. Jeśli się to uda, do sekwencji wprowadzany jest podzespół, tzn. zastępuje się pojedyncze części z listy rozstrzelenia strukturą podzespołu. Procedura jest powtarzana tak długo, aż sekwencja montażowa będzie utworzona.
- Krok 4. Ustalenie sekwencji montażu podzespołów. Dla wszystkich podzespołów procedura krok 2., krok 3. musi być powtarzana aż do chwili otrzymania sekwencji składających się z pojedynczych części. Przejdź do kroku 5.
- Krok 5. Sprawdź, czy istnieją jeszcze nie rozpatrywane dotychczas listy. Jeśli są takie listy, przejdź do kroku 1. W przeciwnym wypadku zakończ obliczenia. W ten sposób proces planowania sekwencji montażowej osiągnął poziom pojedynczej części i może zostać zakończony.

Walorem tej metody jest znaczne zwiększenie, w porównaniu z innymi metodami, szybkości generowania sekwencji. Stosowana baza danych zawężona została do predykatów wewnętrznych, związanych z ograniczeniami narzuconymi przez geometrię części i ich wzajemne położenie, oraz do predykatów badających stabilność budowanych podzespołów. Bardzo łatwo do jej struktury dołączyć nowe predykaty, rozbudowywać ją o nowe relacje i funkcje.

Metoda, w której wykorzystano istotne walory rysunku eksplodującego zbudowana została dla zespołów części maszyn o specyficznej właściwości, jaką jest łatwo wyznaczana oś główna. W strukturach wieloosiowych, szczególnie wtedy, gdy występuje wiele osi w jednym kierunku liczba tworzonych sekwencji wzrasta i co za tym idzie, maleją także prędkości obliczeniowe – główny atut tej heurystycznej procedury.

### 3. PLANOWANIE MONTAŻU PRODUKTÓW O DUŻEJ LICZBIE CZĘŚCI SKŁADOWYCH

#### 3.1. Metoda wydzielenia podzespołów

W zespołach o dużej liczbie części zastosowanie znajdują heurystyki, które w pierwszym etapie procesu planowania montażu wyznaczają podzespoły [8, 12]. Procedura generowania sekwencji montażowych opisana w [9] wymaga zakodowania montowanego zespołu za pomocą digrafu, w którym wierzchołki modelują pojedyncze części, a łuki relacje styków, kolizji lub połączeń części. Macierze odpowiadające digrafom, można traktować jako macierze przyległości, w których wiersze i kolumny odpowiadają wierzchołkom grafu, a elementy o współrzędnych  $(i, j)$  wyrażają liczbę łuków łączących wierzchołki  $i$  z  $j$ . Macierz przyległości ma tę właściwość, że podniesiona do  $m$ -tej potęgi zawiera elementy przedstawiające liczbę dróg o długości  $m$  łączącej wierzchołki  $i$  z  $j$ . W podzespole, który wydzielił się z złożonego produktu drogi takie muszą istnieć między każdą parą części. Podzespoły można wyznaczyć, analizując macierz, która jest sumą wielokrotnie podnoszonej do potęgi macierzy przyległości struktury wyrobu.

Samo generowanie sekwencji montażowej polega na wyznaczeniu kolejnej części zdanej do demontażu. Znalezienie w macierzach opisujących relacje styków i kolizji zerowych wierszy lub kolumn jednoznacznie wskazuje na możliwość demontażu odpowiedniej części. Odwrócenie powstałej w ten sposób sekwencji operacji demontażowej daje dopuszczalną sekwencję montażową. Występowanie na tym etapie tworzenia sekwencji kilku wierszy lub kolumn zerowych wskazuje na możliwość równoczesnego demontażu tych części albo przeprowadzenie go w dowolnej kolejności. Często pociąga to za sobą powstanie zbyt wielu alternatywnych sekwencji. Konieczne staje się wówczas wprowadzenie oceny sekwencji operacji już na etapie analizy geometrii i topologii części oraz silne filtrowanie powstających sekwencji. Może temu służyć wskaźnik [9] oceniający zdolność każdej części w zespole do stabilizacji pozostałych części, który wyznaczony zostaje także dzięki analizie macierzy przyległości. Macierz ta i jej kolejne potęgi wyrażają liczbę ograniczeń pośrednich, możliwych kolizji podczas demontażu lub montażu części. Można je interpretować także jako liczbę sposobów pośredniej stabilizacji części  $j$  przez część  $i$  w określonym kierunku. Części, które mają najwyższe wskaźniki, powinny rozpoczynać sekwencje operacji montażowych.

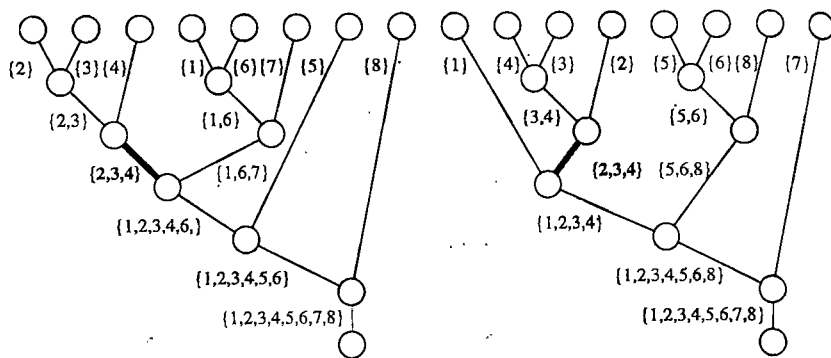
### 3.2. Algorytm ewolucyjny do poprawy dopuszczalnej sekwencji

Głównym powodem, dla którego wykorzystano ewolucyjne podejście do znajdowania sekwencji montażowej była analiza zbioru dopuszczalnych sekwencji montażowych rzeczywistych zespołów. Pozwoliła ona stwierdzić, że większość sekwencji montażowych danego produktu jest prawie identyczna. Różnice sprowadzają się między innymi do: odwrócenia fragmentu sekwencji, zamiany miejscami dwóch części lub podzespołów, wymiany fragmentów sekwencji między różnymi sekwencjami.

Sekwencje montażowe w proponowanym algorytmie planowania montażu [6] są chromosomami, geny tworzące chromosom to pojedyncze części montowanego wyrobu. Wymiana fragmentów sekwencji odpowiadać będzie operacji krzyżowania. Odwracanie fragmentów sekwencji czy wymiana dwóch składników to mutacje.

Populację pierwotną wypełniano na cztery sposoby: losowo ustalano postać sekwencji operacji montażowych, heurystyczną metodą wykorzystującą rysunek eksplodujący, generując sekwencje montażowe przy wykorzystaniu grafowego modelu struktury wyrobu lub poprzez bezpośrednie odwołanie się do wiedzy ekspertów. Ta ostatnia, najmniej sformalizowana metoda jest wyjątkowo skuteczna, ujmuje bowiem doświadczenie i zdolności planistów.

Warunkami krzyżowania się dwóch chromosomów reprezentujących sekwencje operacji montażowych są: występowanie w dwóch rozważanych chromosomach identycznych podzespółów, zróżnicowanie sekwencji powstawania tych podzespółów, zróżnicowanie pozostałych części chromosomów. Miejsce krzyżowania się chromosomów, czyli miejsce cięcia i szczepienia wyznacza krawędź grafu reprezentująca wspólny podzespół. Na przykład sekwencje pokazane na rysunku 1 mają wspólny podzespół, który za każdym razem jest składany w inny sposób. Krawędzie grafów opisane przez podzespół  $\{2, 3, 4\}$  są zaznaczone na rysunku grubą linią. Krzyżowanie sekwencji montażowych jest też w pewnym sensie także krzyżowaniem dwupunktowym, w którym chromosomy dzieli się na trzy części, po czym wymianie podlega fragment środkowy.



Sekwencja nr I  
 (((((2,3),4)|(1,6,7)),5),8)

Sekwencja nr II  
 (((1|((4,3),2)|((5,6),8)),7)

Rys. 1. Przykładowe sekwencje rodzicielskie

Można to zauważyć analizując zakodowaną postać chromosomów przedstawioną poniżej. Pionowe kreski w chromosomach oznaczają punkty krzyżowań.

sekwencje rodzicielskie

(((2,3),4)|(1,6,7)),5,8; ((1|((4,3),2)|((5,6),8)),7)

sekwencje potomków

(((4,3),2)|(1,6,7)),5,8; ((1|((2,3),4)|((5,6),8)),7)

Powstałe w wyniku krzyżowania osobniki potomne spełniają narzucone na proces montażowy ograniczenia, oczywiście przy założeniu, że ich sekwencje rodzicielskie też je spełniały. Wynika to z właściwości systemów kolejkowych Markowa, jakimi są sekwencje montażowe. Inna sytuacja powstaje po użyciu operatora mutacji.

Mutacja to lokalna zamiana umiejscowienia dwóch genów reprezentujących pojedynczą część lub podzespół. W drzewie sekwencji odpowiada to zamianie zawartości dwóch wybranych losowo wierzchołków. Mutacja zmienia sekwencję operacji w sekwencję jej bliską. Np.:

sekwencje rodzicielskie

(((2,3),4),((5,6),8)),1,7;

(((2,3),4),1),((5,6),8)),7)

sekwencje potomków

(((4,3),2),((5,6),8)),1,7;

(((2,3),4),((5,6),8)),1,7)

Efekt mutacji niekoniecznie musi reprezentować poprawną sekwencję montażową. Dla tego też po każdym użyciu operatora mutacji wynik jego działania jest sprawdzany pod względem dopuszczalności wykonania operacji występujących w nowo powstałej sekwencji.

Zadaniem funkcji dopasowania jest ukierunkowanie poszukiwań rozwiązania w stronę sekwencji najtańszych pod względem kosztów wykonania. Tak przyjęte ogólne kryterium optymalizacji jest oczywiście słuszne, ale jak do tej pory nie udało się go sformalizować. W omawianym systemie wartość dopasowania chromosomu była odwrotnością ważonej sumy liczby podzespołów występujących w sekwencji i liczby koniecznych zmian orientacji części lub podzespołów. Podobny skutek wywoływała ocena sekwencji oparta na spostrzeżeniu, że konkretne części są montowane zazwyczaj przy charakterystycznym dla nich położeniu w stosunku do położenia podzespołu już zmontowanego. Położenie to jest opisywane za pomocą uporządkowanej trójki liczb, które wyrażają wartości kątów obrotów względem kolejnych trzech głównych osi stanowiska montażowego. Wazona suma kątów obrotu wyznaczała wartość dopasowania chromosomu.

Stałe parametry algorytmu zostały dobrane zgodnie z propozycjami przez Michalewicza, Goldberga [4, 10]. Testowano pierwotne populacje składające się 20+100 osobników. Współczynnikiem proporcjonalności było prawdopodobieństwo reprodukcji równe 0.4, które zapewniło oscylowanie liczebności populacji wokół jej początkowej wartości. Parametr czasu życia chromosomu był ustalany podczas oceny sekwencji montażowej i pozostawał niezmienny podczas całego procesu ewolucyjnego. Przyjęto kilka wariantów wartości prawdopodobieństw krzyżowania i mutacji, wśród których wartości 0.85 dla krzyżowania i 0.015 dla mutacji wydawały się wystarczająco dobre i zapewniały wysoką sprawność proponowanego algorytmu.

Algorytmy ewolucyjne mają ogromną przewagę w szybkości działania nad metodami klasycznymi, jeśli poszukiwane są dobre rozwiązania, a nie najlepsze. Jeśli usiłujemy znaleźć wszystkie możliwe sekwencje montażowe, to stosowanie algorytmów ewolucyjnych może nie przynieść oczekiwanego efektu. Testy przeprowadzone dla losowo wybranej populacji pierwotnej okazywały się kilkakrotnie wolniejsze od testów startujących z dobrych sekwencji. Tak więc szczególnego znaczenia nabrało też uzyskanie dobrych populacji początkowych. Zaobserwowano też inną ważną cechę algorytmów ewolucyjnych. Przy chromosomach długich ta różnica w szybkości uzyskiwania zadawalających rezultatów zanika. Algorytm jest zatem sprawny także dla słabych populacji pierwotnych, ale tylko w przypadku chromosomów składających się dużej liczby genów. Podjęcie dalszych prac nad generowaniem sekwencji montażowej za pomocą algorytmów ewolucyjnych wydaje się uzasadnione. Prace nad algorytmem ewolucyjnym powinny się też skupić nad próbą połączenia problematyki generowania zbioru dobrych sekwencji montażowych z zagadnieniami harmonogramowania procesów montażowych. Takie równoczesne ewolucyjne rozwiązywanie problemów powinno przynieść istotne poprawienie szybkości osiągania zadawalających wyników (dobrych harmonogramów) w rzeczywistych procesach montażowych.

## 4. WYBRANE METODY UWZGLĘDNIAJĄCE OBCIĄŻENIE MASZYN

### 4.1. Metoda *tabu search*

Zaproponowany algorytm zbudowany jest z dwóch części [9]. W pierwszej części generowany jest zbiór dopuszczalnych pod względem technologicznym sekwencji montażowych. Metody tworzące taki zbiór zostały opisane w poprzednich rozdziałach. W drugiej części ze zbioru wygenerowanych sekwencji wybierana jest, za pomocą metody *tabu search*, sekwencja optymalna. Kryterium optymalności wyboru sekwencji stanowi

zrównoważenie obciążeń stacji montażowych wraz z minimalizacją przemieszczeń wyrobów między nimi wyrażone przez  $Q_{max}$  [9,11].

Implementacja algorytmu *tabu search* dla konkretnego problemu wymaga:

- zdefiniowania ruchów (zbioru  $G$  funkcji  $g$  oraz dla każdego ruchu jego dziedziny);
- zdefiniowania długości listy *tabu*  $LT$  i sposobu zapamiętywania zabronionych ruchów na tej liście;
- zdefiniowania funkcji kryterium kwalifikacji  $FK$ ;
- zdefiniowania pamięci długoterminowej i momentu jej użycia;
- określenia warunków zatrzymania algorytmu.

W zaproponowanym algorytmie rozwiązaniem  $x$  jest macierz  $[u_{ij}]$  przydziałów części składowych  $j$  do stacji  $i$ . Ruchem  $g$  jest zmiana przydziału pewnej części  $j$  do innej stacji  $i$  w stosunku do rozwiązania początkowego  $x_p$ , któremu odpowiadała macierz  $[u_{ij}^p]$ . Otrzymane w wyniku wykonania ruchu  $g$  nowe rozwiązanie  $[u_{ij}^g]$  z sąsiedztwa  $N([u_{ij}^p])$  generuje nową wartość funkcji celu  $f([u_{ij}^g]) = Q_{max}$  oznaczoną przez *New\_Solution*. Na listę *tabu*  $LT$  trafiają takie typy części, którym w trakcie kilku poprzednich iteracji zmieniono przydziały do stacji; mają więc one *status tabu*. *Status tabu* jest utrzymywany w ciągu określonej liczby iteracji, a liczba ta zależy od rozmiaru problemu, podobnie jak parametr *Max\_Iteration* określający maksymalną liczbę iteracji poszukiwania rozwiązania.

Wybór części  $j$ , która zostanie przydzielona do innej stacji  $i$ , polega na określeniu w danej iteracji stacji będącej *wąskim gardłem* w systemie. Następnie spośród wszystkich przydzielonych do tej stacji części  $j$  nie mających *statusu tabu* (tzn. które można przydzielić do innej stacji) wybierana jest ta, która po przydzieleniu do innej stacji może spowodować poprawienie wartości funkcji celu  $Q_{max}$ . Otrzymane nowe sekwencje montażowe powstałe w wyniku tej zamiany są dopuszczalne dla każdego wyrobu montowanego w systemie. W kolejnym kroku następuje aktualizacja wielkości związanych z listą *tabu* (*status tabu*, liczba iteracji, *Best\_Solution* itd.). Procedura jest powtarzana, dopóki nie ulegnie poprawie wartość funkcji celu *Best\_Solution* lub dopóki nie zostanie osiągnięta maksymalna liczba iteracji *Max\_Iteration*.

W trakcie wykonywania procedury, w przypadku gdy nie następuje poprawa wartości funkcji celu, a liczba iteracji nie osiągnęła liczby maksymalnej, używa się *funkcji kryterium kwalifikacji*. Funkcja ta pozwala na zmianę *statusu tabu* części składowej i możliwość przydziału do innej stacji pod warunkiem polepszenia wartości funkcji celu oraz uzyskania w wyniku zamiany dopuszczalnych sekwencji montażowych. W zaproponowanym algorytmie może być użyta pamięć długoterminowa w celu intensyfikacji i urozmaicenia poszukiwań rozwiązania optymalnego. Funkcją pamięci długoterminowej jest częstość przydzielania części składowych do poszczególnych stacji w trakcie wykonywania algorytmu. Użycie tej funkcji polega na przydzieleniu części składowych do stacji, zgodnie z informacjami zawartymi w tym module, pod warunkiem zgodności otrzymanych sekwencji ze zbiorami sekwencji dopuszczalnych, i powrocie do linii głównej algorytmu. Procedura ta jest uruchamiana w algorytmie w momencie, gdy nie istnieje możliwość poprawienia wartości funkcji celu, czyli wtedy, gdy  $New\_Solution > Best\_Solution$ , a liczba iteracji nie osiągnęła wartości maksymalnej *Max\_Iteration*. Algorytm jest wykonywany, dopóki nie zostanie osiągnięte rozwiązanie optymalne lub rozwiązanie nie ulega poprawie w ciągu liczby iteracji równej *Max\_Iteration*.

Zbudowany heurystyczny algorytm typu *tabu search* do krótkoterminowego planowania montażu udowodnił, że można zbudować system dostarczający wyniki bliskie optymalnym w czasie wielokrotnie krótszym niż to czynią metody ścisłe (np. pakiet rozwiązujący zadania programowania liniowego całkowitoliczbowego LINGO).

#### 4.2. Wieloagentowy system generowania sekwencji operacji

Równoczesność wielu procesów produkcyjnych zachodzących w elastycznych systemach montażowych i związane z tym trudności wyrażania i znajdowania optymalnej sekwencji montażowej, a także zachęcające wyniki wielu aplikacji wykorzystujących podejście agentowe do procesów informatycznych zachęcają do zastosowania koncepcji autonomicznego agenta w generowaniu sekwencji montażowej.

Agent może być rozumiany jako fizyczny i abstrakcyjny moduł, który jest zdolny do działania sam w sobie oraz w swoim środowisku, a posiada choć częściową reprezentację tego środowiska. Można przytoczyć ścisłą definicję autonomicznego agenta [2] jako uporządkowaną szóstkę

$$a = (M, Q, S, I, R, L) \quad (2)$$

- gdzie:
- $M$  – konfiguracja modeli otoczenia wchodzących w zakres wiedzy agenta;
  - $m$  – model pewnego otoczenia  $v$  agenta  $a$ ,  $m \in M$ ,  $v = (A, e)$ ;
  - $V$  – środowisko,  $V = (A, e)$ ;
  - $A$  – konfiguracja agentów,  $a \in A$ ;
  - $e$  – konfiguracja zasobów środowiska,  $e \in E$ ;
  - $E$  – zbiór konfiguracji zasobów;
  - $Q$  – konfiguracja celów agenta  $a$ ;
  - $q$  – wskaźnik jakości określających cele agenta  $a$ ,  $q \in Q$ ;
  - $S$  – konfiguracja możliwych strategii agenta  $a$ ;
  - $s$  – strategia określająca działania agenta  $a$ ,  $s \in S$ ;
  - $I$  – operator obserwacji otoczenia przez agenta  $a$ ;
  - $R$  – operacja realizacji strategii  $s$  agenta  $a$ ;
  - $L$  – operacja uczenia się agenta (tylko w pewnych zastosowaniach).

System sterowania dynamicznym generowaniem sekwencji montażowych może być przedstawiony jako system wieloagentowy przy następujących założeniach:

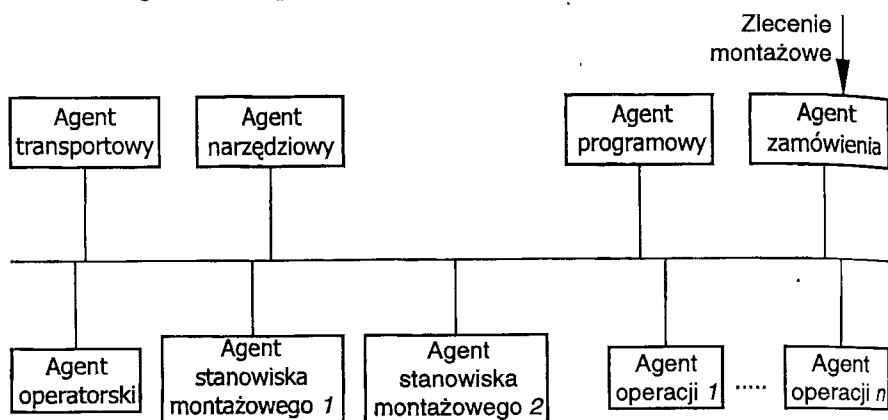
- każdy agent zarządza swoim stanem i steruje wykonywanymi przez siebie operacjami,
- każdy agent charakteryzuje się autonomicznym działaniem i wykonuje swe zadania równoległe z innymi agentami,
- agenci porozumiewają się między sobą poprzez lokalną sieć,
- agenci są uaktywniani za pomocą przesyłanej wiadomości lub sygnału pobudzenia.

Uproszczony wieloagentowy system generowania sekwencji montażowej zamieszczono na rysunku 2.

Wprowadzenie zamówienia na nowy produkt powoduje utworzenie zbioru potencjalnych operacji. Każda potencjalna operacja jest sterowana i reprezentowana przez własny moduł – *agenta operacji*. Podobnie każde stanowisko montażowe jest kierowane przez własny sterownik – *agenta*. *Agent transportowy* jest odpowiedzialny za magazynowanie i przemieszczanie palet w systemie. Stara się tak dobrać stanowiska montażowe, by czas przemieszczania był jak najkrótszy. Palety są kierowane do stanowisk na żądanie ich agentów. *Agent narzędziowy* steruje rozmieszczeniem narzędzi, chwytaków



w systemie i ich dostępnością w wymaganym miejscu i czasie. *Agent programowy* zarządza wszystkimi numerycznymi programami i w razie konieczności transmituje je do stacji montażowych. *Agent operatorski* działa tylko w wyjątkowych sytuacjach, a jego zadaniem jest zaoferowanie obsłudze sposobu działania zapewniającego wybrnięcie z kryzysowej sytuacji. Każdy agent realizuje własne zadania zgodnie z własnymi lokalnymi kryteriami. Końcowy przydział operacji montażowej do stanowiska odbywa się na zasadach dialogu w trakcie procesu montażu.



**Rys. 2.** Schemat wieloagentowego systemu montażowego z dwoma stanowiskami

Ta dynamiczna metoda generowania sekwencji montażowej, na podstawie bieżącego stanu zmontowania wyrobu oraz obciążenia wszystkich stanowisk ustala następny krok w sekwencji operacji. System wieloagentowy, jako dotychczas jedyny, dynamicznie (*on line*) generuje sekwencje operacji i przydziela poszczególne operacje do odpowiednich stanowisk. Jest to system najbardziej elastyczny, ale jeszcze dla produktów złożonych z wielu części stosunkowo wolny. Podkreślić jednak należy, że system agentowy nie tylko umożliwi bieżące, dynamiczne wyznaczenie następnej do wykonania operacji na danym stanowisku, ale także symulacyjnie wspomaga harmonogramowanie produkcji.

## 5. PODSUMOWANIE

Rozwiązanie problemu planowania montażu nie jest problemem zamkniętym i wymaga dalszych wszechstronnych prac. Przyszłe badania powinny obejmować m.in. cztery główne zagadnienia.

- 1) Usunięcie wstępnie wprowadzonych, pewnych założeń z poziomu planowania montażu. Konieczna jest eliminacja m.in. założenia, że wszystkie części i podzespoły są ciałami sztywnymi. Należy w procesie uwzględniać części, które znacznie utrudniają proces montażu i dotychczas były pomijane np. przewody elektryczne. Do modelu opisującego montowany wyrób powinno się włączyć wszystkie dodatkowe operacje pozwalające na testowanie i monitorowanie montażu.
- 2) Integracja systemów generowania sekwencji z systemem komputerowego projektowania wyrobu i systemem projektującym sterowanie stacjami montażowymi i podsystemem transportu.

- 3) Integracja systemów generowania sekwencji z ogólnymi systemami sterowania gniazda montażowego i systemem transportu.
- 4) Wprowadzenie do procesów planowania montażu zasad projektowania współbieżnego. Metoda równoczesnego rozwoju produktu w dziedzinie konstrukcji, technologii wytwarzania, projektowania dla montażu, projektowania i planowania zasobów, symulacji procesu montażowego, harmonogramowania i sterowania przepływem środków, sterowania produkcją i monitorowania w decydujący sposób skracający cykl powstawania produktu i znacznie obniża koszty przygotowania produkcji.

Na zakończenie należy stwierdzić, że rozwiązanie wszystkich tych problemów wymaga opracowania nowych modeli i algorytmów projektowania wieloagentowych procesów elastycznego montażu. Niezbędne staje się zbudowanie modeli wielokryterialnej optymalizacji dyskretnych koniecznych w procesie planowania i sterowania procesu technologicznego w elastycznych systemach montażowych.

## 7. LITERATURA

- [1] *CAD Method for Industrial Assembly*. Delchambre A. (Ed.), New York, J. Wiley & Sons 1996
- [2] Cetnarowicz E., Cetnarowicz K., Nawarecki E.: *Inteligentny zdecentralizowany system wieloagentowy i jego zastosowanie do realizacji systemów rozproszonych*. ZN AGH, Elektrotechnika, t. 14, 1995, 175–184
- [3] De Fazio T.L., Whitney D.E.: *Design-Specific Approach to Design for Assembly (DFA) for Complex Mechanical Assemblies*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, No. 5, 1999, 869–881
- [4] Goldberg D.E.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*. Warszawa, WNT 1996
- [5] Gu P., Yan X.: *CAD-directed Automatic Assembly Sequences Planning*. International Journal of Production Research, vol. 33, No. 11, 1995, 3069–3100
- [6] Łebkowski P.: *Evolution Algorithm for Mechanical Assembly Planning*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, vol. 22, nr 2, 2002, 203 – 212
- [7] Łebkowski P.: *Metody komputerowego wspomaganie montażu mechanicznego w elastycznych systemach produkcyjnych*. Kraków, UWND AGH 2000
- [8] Łebkowski P.: *Sieć Petri dla montażu i demontażu*. [w:] *Ekonomia – Informatyka – Zarządzanie. Teoria i praktyka*. [Red.] Z. Cięciwa, AGH, Kraków 2002, 133 – 143
- [9] Łebkowski P.: *Planowanie montażu mechanicznego w elastycznych systemach produkcyjnych. Wybrane metody i zagadnienia*. Kraków, UWND AGH 2002
- [10] Michalewicz Z.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. Warszawa, WNT 1996
- [11] Sawik T.: *Planowanie i sterowanie produkcji w elastycznych systemach montażowych*. Warszawa, WNT 1996
- [12] Żurek J., Ciszak O.: *Modelowanie oraz symulacja kolejności montażu części i zespołów maszyn za pomocą teorii grafów*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1999