

prof. nzw. dr hab. inż. Tadeusz Witkowski  
mgr inż. Arkadiusz Antczak  
mgr inż. Paweł Antczak  
Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

## **WPLYW TYPU PRODUKCJI I ELASTYCZNOŚCI MASZYN NA CZAS WYKONANIA ZADAŃ W SYSTEMIE PRODUKCYJNYM**

*W pracy omówiono wpływ typu produkcji i elastyczności maszyn w procesie wytwarzania na sumaryczny czas wykonania zadań produkcyjnych. Analizowany jest problem szeregowania w gniazdach z maszynami elastycznymi (rozszerzenie klasycznego problemu szeregowania w gniazdach), który jest bardziej zbliżony do warunków rzeczywistych. Do oceny czasu realizacji zadań wykorzystano algorytmy heurystyczne.*

### **THE INFLUENCE OF PROCESS TYPE AND FLEXIBILITY OF MACHINES TO MAKESPAN IN PRODUCTION SYSTEM**

*In the paper the influence of process types and flexibility of the machines in manufacturing operations to makespan is discussed. The flexible job shop scheduling problem (an extension of the classical job shop scheduling), which provides a closer approximation to real scheduling problems is analyze. To estimate makespan the heuristic algorithms were used.*

## **1. WPROWADZENIE**

Współczesny poziom rozwoju techniki i technologii wytwarzania charakteryzuje się szybszym niż poprzednio poziomem zmienności produkowanych wyrobów i ich większą złożonością. Te okoliczności wprowadzają pewną niepewność przy rozwiązywaniu wzajemnie zależnych zadań: z jednej strony, wyboru efektywnego wyposażenia technologicznego do określonego zbioru wyrobów, a z drugiej strony – doboru asortymentu produkcji w stosunku do istniejącego wyposażenia technologicznego. Zadania te należy rozwiązywać dla szerokiego zakresu wykorzystywanego wyposażenia, począwszy od obrabiarek konwencjonalnych (uniwersalnych) OU, aż do kompleksowych elastycznych systemów produkcyjnych (ESP) włącznie. Przy czym do rozwiązania ww. zadań wykorzystuje się wspólne podejście metodologiczne klasyfikacji wyrobów: części, podzespołów itp. Pozwala to na generowanie różnorodnych wariantów technologii i odpowiadającej jej wyposażenia, co w końcowym wyniku zapewnia wykonanie danego asortymentu wyrobów z najmniejszymi kosztami. W pracy do oceny sumarycznego czasu realizacji zadań w podsystemie wytwarzania wykorzystano algorytmy heurystyczne.

## **2. ZADANIE HARMONOGRAMOWANIA Z ELASTYCZNYMI MASZYNAMI**

Problemy decyzyjne dotyczące zagadnień planowania produkcji w systemach produkcyjnych (SP) charakteryzują się szczególnie dużym stopniem złożoności obliczeniowej. Podstawowe trudności w tzw. problemach krytycznych czasowo, polegają na precyzyjnym sformułowaniu procedury decyzyjnej tak, aby uwzględniała ona różnorodność możliwych do wystąpienia sytuacji, zdarzeń i okoliczności.

Podstawowe zagadnienia występujące w toku planowania produkcji elastycznych ESP, stanowiące kompleks powiązanych ze sobą problemów to m.in.: problem wyboru asortymentu wyrobów, problem grupowania stanowisk, problem mieszanki, problem przydziału zasobów pomocniczych SP, problem kolejności wprowadzania wyrobów do SP, problem przydziału operacji, problem harmonogramowania operacji i problem rozdziału operacji.

Z rys.1 widać, że rodzaje procesów technologicznych, formy organizacji procesów produkcyjnych oraz zakresy automatyzacji i elastyczności bazują na typie produkcji.

Techniczna baza elastycznych systemów produkcyjnych	maszyny uniwersalne				
	Zrobotyzowane kompleksy technologiczne				
	maszyny specjalizowane			obrabiarki typu CNC	
	maszyny specjalne				
Obszary automatyzacji produkcji	zautomatyzowane				zmechanizowane
	automatyczne				
Formy organizacji procesu produkcyjnego	gniazda przedmiotowo zamknięte				gniazda technologiczne
	linie potokowe				
Rodzaje procesów technologicznych	obrobka grupowa				
	technologia jednostkowa				
	technologia typowa				
Obszary adaptacji	Brak adaptacji	Efektywna adaptacja przedsiębiorstwa			
Wartość $k$	1÷3	3÷10	10÷30	30÷40	>40
Typ produkcji	masowa	wielkoseryjna	średnioseryjna	małoseryjna	jednostkowa

Rys. 1. Charakterystyka procesów/systemów produkcyjnych przy zmianie typu produkcji (źródło: opracowanie własne na podstawie [18] )

Jednak sam typ produkcji nie można rozpatrywać jako stale istniejący wynik, uwarunkowany pracochłonnością i wielkością produkcji konkretnej produkcji. Jest to systematycznie zmieniający się wynik, który odzwierciedla dynamikę wielu procesów i ich parametrów.

Poniżej przeanalizowano wpływ typu produkcji i elastyczności maszyn podsystemu wytwarzania na sumaryczny czas wykonania zadań produkcyjnych. Najczęściej stosowanym podejściem do rozwiązywania problemów harmonogramowania w ESP polega na zastosowaniu tzw. reguł priorytetu. Jednym z nowych narzędzi do rozwiązania zagadnień tego typu są metody heurystyczne [1, 3, 4-6, 10-11, 13, 16, 20, 24].

W naszych rozważaniach „elastyczna” maszyna” jest pojęciem umownym i nie wiąże się z konkretnym rodzajem wyposażenia technologicznego, podobnie jak to jest rozpatrywane w literaturze dotyczącej harmonogramowania w gniazdach z maszynami „elastycznymi” (flexible job shop scheduling problem). Jest to jedno z trudniejszych praktycznych zadań optymalizacji kombinatorycznej w zakresie planowania i sterowania produkcją dyskretną. Wiele podejść zaproponowano do rozwiązania tego problemu [5, 11, 14-16, 25-28].

Sformułowanie tego problemu jest następujące [27,28]. Należy wykonać  $N$  prac na  $M$  maszynach. Oznaczmy zbiór wszystkich maszyn jako  $U$ . Każda praca  $J_j$  zawiera  $n_j$  uszeregowanych operacji ze względu na kolejność ich realizacji (ograniczenia kolejności). Przerwanie operacji jest nie dozwolone. Wykonanie  $i$ -tej operacji  $j$ -tej pracy  $J_j$  (oznaczmy ją  $O_{ij}$ ) wymaga jednego zasobu lub maszyny wybranej ze zbioru wolnych (niezajętych) maszyn. Przydział operacji  $O_{ij}$  do maszyny  $M_k$  implikuje zajęcie tej maszyny w czasie okresu wykonania równym  $p_{ijk}$ . Tak więc, dla każdego FJSP problemu, my możemy określić tablicę czasów wykonania takich że:  $P_{FJSP} = \{p_{ijk} \in IN | 1 \leq i \leq N; 1 \leq k \leq n_j; 1 \leq k \leq M\}$ , przy czym dla problemu JSP mamy:  $P_{JSP} = \{p_{ijk} \in IN | 1 \leq i \leq N; 1 \leq k \leq n_j\}$ .

W problemie FJSP przyjmujemy następujące założenia: wszystkie maszyny są osiągalne na początku symulacji tj.  $t = 0$  i każda praca  $J_j$  może być rozpoczęta w czasie  $t = r_j$ . W danym czasie, maszyna może wykonywać tylko jedna operację. Na ogół rozwiązanie problemu FJSP składa się z dwóch etapów. Pierwszym etapem jest przydział każdej operacji  $O_{ij}$  do maszyny  $M_k$  (wybranej ze zbioru  $U$ ). Drugi etap polega na obliczeniu czasów początkowych  $t_{ij}$  oraz czasu zakończenia  $tf_{ij}$  każdej operacji  $O_{ij}$ . Najczęściej stosowanym kryterium optymalizacji jest minimalizacja czasu zakończenia wszystkich operacji  $C = \max_j \{tf_{n_i,j}\}$  - tzw. makespan. Tak więc sformułowany problem FJSP jest analogiczny do przedstawionego w [22]. Przykład opisujący dane dla problemu JSP i FJSP jest prezentowany w tab. 1.

Tab. 1. Dane dla problemu JSP i FJSP (opracowanie na podstawie [22])

Praca	Operacje	Problem JSP				Problem FJSP			
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$
$J_1$	$O_{11}$	*	*	*	1	1	3	4	1
	$O_{21}$	*	*	*	1	3	8	2	1
	$O_{31}$	3	*	*	*	3	5	1	7
$J_2$	$O_{12}$	*	1	*	*	4	1	1	4
	$O_{22}$	2	*	*	*	2	3	9	3
	$O_{32}$	*	1	*	*	9	1	2	2
$J_3$	$O_{13}$	*	*	3	*	8	6	3	5
	$O_{23}$	*	*	*	1	4	5	8	1

### 3. ANALIZA WSKAŹNIKA TYPU PRODUKCJI NA WARTOŚĆ MAKESPAN

#### 3.1. Charakterystyka wskaźnika typu organizacji produkcji

Znaczący wpływ na efektywność wykorzystania wyposażenia mają zasady organizacji produkcji. Jednym z głównych wskaźników odzwierciedlającym te zasady jest współczynnik detalooperacji  $K$ . Określa on stosunek liczby wszystkich operacji technologicznych, wykonywanych w podsystemie wytwarzania w ciągu miesiąca do liczby stanowisk roboczych. W ogólnym przypadku wartość  $K$  określa się na podstawie wzoru:

$$K = \sum_{i=1}^m P_{oi} / L_r = \sum_{i=1}^m P_{oi} F / \sum_{i=1}^m N_i t_i \tag{1}$$

gdzie  $\sum_{i=1}^m P_{oi}$  - ogólna liczba operacji technologicznych dla wszystkich  $i$ -ch wyrobów (części, podzespoły) wykonywana w podsystemie w ciągu miesiąca;  $L_r$  - liczba maszyn (miejsz pracy),  $F$  - miesięczny fundusz czasu pracy  $N_i$  - program miesięczny  $i$ -go wyrobu;  $t_i$  - pracochłonność  $i$ -tego wyrobu.

Z wzoru (1) widać, że  $K$  bezpośrednio zależy, po pierwsze - od wielkości produkcji i pracochłonności; po drugie - od technologii, organizacji procesu produkcyjnego, organizacji pracy i procesu sterowania. Współczynnik  $K$  podsystemu produkcyjnego (gniazda, wydziału) określa się przy uwzględnieniu sumarycznego oddziaływania detalooperacji, wykonywanych w podsystemie w ciągu określonego czasu. W stosunku do porównywanych okresów czasu (miesiąc, dekada, dni) wystąpienie konkretnego zbioru detalooperacji w produkcji seryjnej ma charakter losowy. Tak więc, współczynnik  $K$  jest wielkością losową. Podobnie jak każda wielkość losowa,  $K$  rozpatrywana w ciągu szeregu okresów będzie zmieniać się. W miarę przejścia od dni do miesiący zakres wahań zmienia się i wzrasta stabilność wskaźnika  $K$  systemu produkcyjnego.

Można stwierdzić to na przykładzie obliczenia średniego liniowego odchylenia  $\rho$  :

$$\rho = \sum |K - K_{SR}| / P_o \quad (2)$$

oraz współczynnika wariancji  $V\rho$

$$V\rho = \rho \cdot 100 / K \quad (3)$$

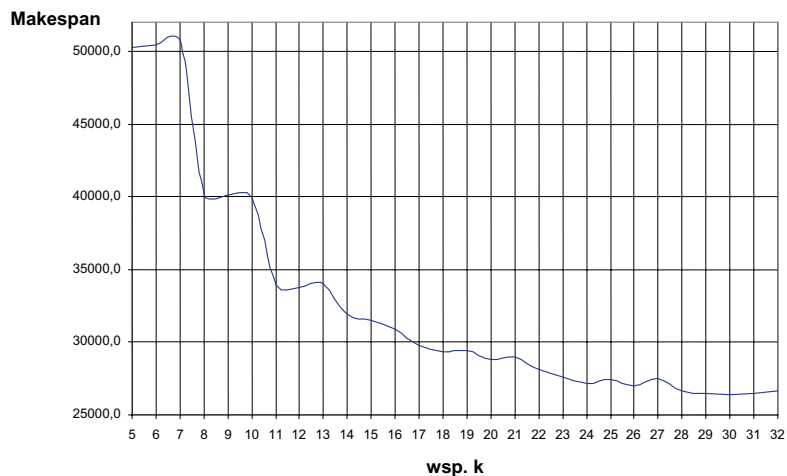
Znaczny rozrzut wielkości  $K$  związany jest przede wszystkim z okresami wdrożenia nowej wyrobów. Przejście do regularnej produkcji nowych wyrobów prowadzi do stopniowej stabilizacji wielkości  $K$ . Wystąpienie zmiany wielkości  $K$  w poszczególnych okresach czasu świadczy o jej wrażliwości na zmiany składu i struktury programu produkcyjnego, parametrów wyrobów itp. Zmiana wielkości partii wyrobów, okresu powtarzalności, długości cyklu produkcyjnego, wpływa na liczbę operacji technologicznych, częstość przebrożeń maszyn, wielkości produkcji w toku itp.

Zależność wartości makespan od wartości  $K$  dla przepływu szeregowego części określona na podstawie wykorzystania algorytmu GRASP [23] przedstawia tab. 2.

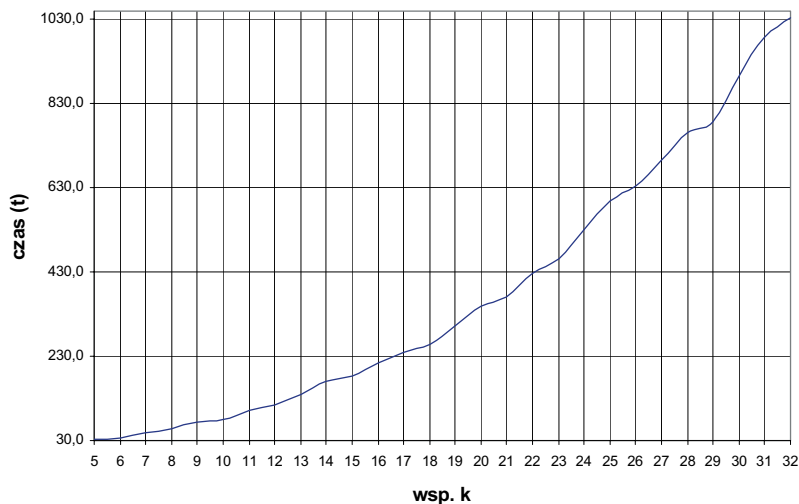
Tab. 2. Zależność wartości makespan od wartości  $K$  dla przepływu szeregowego części

Liczba prac	Liczba det-op.	k	Makespan / Czas [sec.] SZEREGOWY Alpha = 0,5 iter = 5000										Średni Makespan	Średni Czas
			1	t	2	t	3	t	4	t	5	t		
10	151	5	50242,2	32	50242,2	31	50242,2	31	50242,2	32	50242,2	32	50242,2	31,6
11	166	6	50275,0	36	50729,1	36	50242,2	36	50313,8	36	50464,3	36	50404,9	36,0
13	196	7	50242,2	50	50242,2	49	51124,9	49	51294,8	50	51178,7	50	50816,6	49,6
14	212	8	39677,9	58	40429,4	58	40328,7	57	39788,3	57	40533,6	57	40151,6	57,4
16	244	9	39724,8	73	40033,2	73	40290,6	74	40425,4	73	40033,3	73	40101,5	73,2
17	260	10	40085,1	81	39645,5	80	39091,3	80	40370,5	80	40548,9	80	39948,3	80,2
20	302	11	34068,4	102	34566,0	102	34260,8	102	34089,2	102	32749,4	102	33946,8	102,0
21	317	12	33473,7	114	34664,6	115	34025,5	114	32921,3	115	33725,0	115	33762,0	114,6
23	347	13	34400,4	141	34165,4	141	33937,9	141	33820,5	141	33884,1	141	34041,7	141,0
25	379	14	31704,3	170	32170,9	170	31806,6	171	31361,0	170	32635,4	170	31935,6	170,2
26	395	15	31222,4	183	32129,1	184	31070,2	183	31715,7	183	31511,0	183	31529,7	183,2
28	424	16	30390,2	214	31321,3	213	31207,8	214	31013,8	214	30689,6	213	30924,5	213,6
30	453	17	29795,3	239	29841,8	239	29745,1	239	29821,1	239	29796,0	239	29799,9	239,0
31	468	18	29236,2	259	29667,1	259	29081,1	259	29406,7	260	29297,8	259	29337,8	259,2
33	498	19	29698,1	303	29344,2	303	29553,7	303	29367,6	303	29245,8	304	29441,9	303,2
35	530	20	28586,5	349	28729,5	348	28143,2	348	29392,7	349	29200,6	349	28810,5	348,6
36	546	21	29267,4	370	29155,8	373	28531,7	373	28978,5	373	28993,2	373	28985,3	372,4
38	575	22	28096,7	426	28369,1	426	28221,3	427	28078,9	427	27802,4	427,0	28113,7	426,6
40	604	23	27666,3	461	27490,4	461	27350,4	460	27674,0	460	27649,2	460	27566,1	460,4
42	634	24	27202,9	531	27376,9	532	27228,5	532	27093,5	532	27062,8	533	27192,9	532,0
44	665	25	27742,8	601	27224,8	599	27090,8	597	27508,8	598	27596,2	599	27432,7	598,8
45	681	26	26668,9	636	27212,8	634	26798,7	633	27298,6	634	26847,6	629	26965,3	633,2
47	713	27	27384,7	694	27358,1	700	27582,0	696	27661,8	697	27631,7	697	27523,7	696,8
49	740	28	26848,0	762	26404,6	762	26700,9	762	26736,9	762	26633,9	761	26664,9	761,8
50	755	29	26757,2	790	26697,0	790	26055,3	784	26396,7	789	26353,8	789	26452,0	788,4
52	785	30	26710,2	899	26367,7	898	26102,2	894	26296,0	897	26453,4	897	26385,9	897,0
54	816	31	26552,3	994	26800,7	993	26208,1	984	26269,9	986	26752,1	984	26516,6	988,2
55	832	32	26337,2	1032	26654,5	1033	26774,9	1032	26774,9	1034	26864,9	1033	26681,3	1032,8

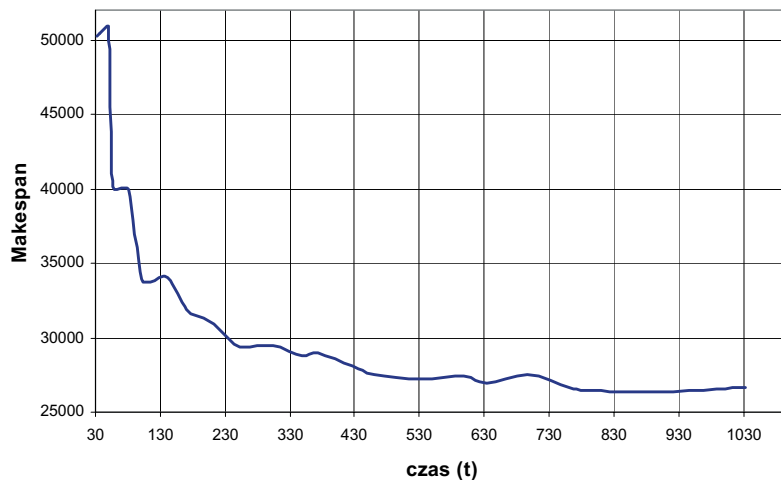
Rys. 2 i 3 przedstawiają zależności wielkości  $K$  od wartości makespanu i czasu pracy algorytmu GRASP, a rys. 4 zależność makespanu od czasu pracy algorytmu GRASP.



Rys. 2. Graficzne przedstawienie zależności wartości makespan od wielkości  $K$



Rys. 3. Zależność czasu pracy algorytmu od wartości współczynnika  $K$



Rys. 4. Zależność makespanu od czasu pracy algorytmu

### 3.2. Przejście z maszyn uniwersalnych na maszyny elastyczne

Jak pokazała praktyka, próby utworzenia zbioru detalooperacji w celu przejścia z obrabiarek uniwersalnych (OU) na obrabiarki NC poprzez losowy wybór tylko na podstawie cech konstrukcyjno-technologicznych wyrobów, prowadzi do nieprzewidywalnego wykorzystania w czasie obrabiarek NC i dużych kosztów. Celowość przeliczenia liczby detalooperacji z danych obrabiarek (np. OU) na obrabiarki NC, mimo czynników konstrukcyjno-technologicznych, określa się wielkością  $K_{ob}$  [18]:

$$K_{ob} = \sum_{i=1}^I T_{jed. OU} / T_{jed. NC} \quad (4)$$

gdzie:  $\sum_{i=1}^I T_{jed. OU}$  - sumaryczna pracochłonność operacji (1,...,I) wykonywanych na obrabiarkach OU przy obróbce partii części;  $T_{jed. NC}$  - pracochłonność wykonania operacji sumarycznej realizowanej na obrabiarce NC przy obróbce partii części;  $K'$  - współczynnik uwzględniający liczbę uruchomień partii wyrobów w roku.

Tak więc, przy niezgodności wielkości partii  $n_{NC} \neq n_{OU}$  należy wprowadzić współczynnik, określany z równości  $n_{NC} R_{NC} = n_{OU} R_{OU}$ , tj.  $K' = R_{OU} / R_{NC}$ , gdzie:  $R_{OU}$  i  $R_{NC}$  - odpowiednio liczba uruchomień danych partii wyrobów na maszynach OU i NC.

## 4. BADANIE WPLYWU STOPNIA ELASTYCZNOŚCI ELEMENTÓW SP

W elastycznych systemach produkcyjnych (ESP) mogą być stosowane różne techniki wytwarzania. Z pojęciem ESP wiążą się trzy podstawowe jego cechy: automatyzacja, integracja i elastyczność.

Automatyzacja oznacza, że SP zdolny jest realizować swe funkcje w ciągu określonego czasu bez udziału lub przy częściowym udziale człowieka. Integracja oznacza ogólnie sprzężenie bądź złączenie elementów w pewną całość (w ESP jest ona realizowana poprzez sprzężenie elementów SP podsystemami przepływu strumieni materialno-energetyczno-informacyjnych). W ESP elastyczność i integracja osiągane są dzięki automatyzacji, która jest realizowana głównie środkami techniki komputerowej.

Elastyczność jest własnością SP polegającą na łatwości dostosowania się do zmiennych zadań produkcyjnych przy ustalonym składzie i strukturze systemu. Jest ona determinowana zawsze określonymi czynnikami ekonomicznymi np. kosztami przezbrojeń. Główne źródła efektów większej elastyczności to: skrócenie długości cykli, lepsza terminowość produkcji, skrócenie czasu przezbrojeń, czy też łatwość przezbrojeń. Należy podkreślić, że zdolności produkcyjne ESP, określające górną granicę jego zadań produkcyjnych, nie są wyższe niż dla konwencjonalnych SP, lecz dzięki sterowaniu komputerowemu, możliwe jest natomiast osiągnięcie wysokiego poziomu zdolności produkcyjnych przy lepszym stopniu wykorzystania urządzeń technologicznych. Elastyczność SP określają dwie cechy [17]:

- wielostronność czyli liczba różnych wyrobów, które może produkować SP,
- zdolność adaptacji czyli zdolność SP do samodzielnego przystosowania się do produkcji nowych wyrobów w zmiennej kolejności ich zleceń.

Na elastyczność elementów SP składają się:

- wielostronność technologiczna (uniwersalność) określana zakresem możliwych do wykonania na niej zabiegów obróbkowych,
- elastyczność technologiczna polegająca głównie na łatwości zmiany narzędzi i przyrządów (przezbierania) potrzebnych do wykonania wyznaczonych operacji,
- elastyczność układu sterowania (spełniona całkowicie przez układy sterowania CNC),

- elastyczność urządzeń pomocniczych: urządzeń transportowych (podajników przedmiotów, uchwytów), urządzeń pomiarowo-kontrolnych i in.

Ze względu na wielostronność technologiczną maszyn można wyróżnić dwa rodzaje elastycznych SP:

- systemy z obrabiarkami uzupełniającymi się (specjalizowanymi), w których kolejność obróbki (przydział do stanowisk) części jest zdeterminowana przez marszrutę technologiczną,
- systemy z obrabiarkami zamiennymi, w których dowolna operacja każdej części produkowanej w SP może być wykonana na dowolnej obrabiarce (podstawowym elementem takich SP są obrabiarki wielofunkcyjne np. centra obróbkowe np. CNC).

ESP łączy dwie przeciwstawne właściwości:

- wysoką wydajność, taką jak w automatycznych liniach produkcyjnych przeznaczonych do wytwarzania jednego typu wyrobu,
- zróżnicowany asortyment produkcji, taki jak uzyskiwany w warsztatach mechanicznych.

Elastyczność wynika m.in. z uniwersalności maszyn, bardzo krótkich czasów przebrojeń maszyn (wymiany narzędzi, programów), niedługich czasów oczekiwania wytwarzanych części na kolejne operacje technologiczne i krótkich czasów transportu międzyoperacyjnego.

Elastyczność, która jest podstawową cechą ESP, jest definiowana na wiele sposobów. Ogólnie mówiąc, elastyczność SP jest miarą adaptowania się do zmieniających się wymagań rynku i samego procesu wytwórczego. Elastyczność można ocenić za pomocą dwóch czynników: szybkości reagowania na zmiany oraz kosztu reagowania na zmiany.

Rodzaje elastyczności, charakteryzujące ESP z różnych punktów widzenia są następujące [19]:

1. Elastyczność maszyn. Określa ona podatność SP na przeprowadzenie zmian niezbędnych przy produkcji danej rodziny typów części.
2. Elastyczność asortymentu produkcji. Jest to zdolność do szybkiego i ekonomicznego przejścia do produkcji nowego typu wyrobów.
3. Elastyczność wielkości produkcji. Jest to zdolność SP do rentownej produkcji przy różnych jej wielkościach.
4. Elastyczność procesu technologicznego. Jest to zdolność SP do produkowania danego zbioru typów części różnymi sposobami i przy użyciu różnych materiałów.
5. Elastyczność marszrut technologicznych. Elastyczność marszrut istnieje wtedy, gdy dany typ części można produkować wykorzystując różne marszrutę przepływu przez system lub gdy operację tego samego typu można wykonać na wielu maszynach. Przyjmuje się następującą miarę elastyczności marszrut:

$$EM = (\text{liczba wszystkich marszrut/liczba typów części}) - 1 \quad (5)$$

przy czym, jeżeli dla każdego typu części istnieje tylko jedna ustalona marszruta przepływu przez SP, to elastyczność  $EM = 0$  (przypadek dla konwencjonalnych SP).

6. Elastyczność rozwoju systemu. Jest to zdolność do łatwej i modularnej rozbudowy i rozwoju w miarę potrzeb.
7. Elastyczność ograniczeń kolejnościowych. Jest to zdolność do zmiany kolejności wykonywania pewnych operacji dla każdego typu części.
8. Elastyczność produkcji. Określa ogół typów części, które ESP może produkować.
9. Elastyczność wielkości personelu. Jest to zdolność do prowadzenia procesu produkcyjnego ze zmienną liczbą operatorów.

Poniżej przedstawimy przykład liczbowy [7] ilustrujący korzyści, jakie przynosi elastyczność SP, która jest podstawową cechą ESP. Jako miarę tej elastyczności najlepiej charakteryzującą

ESP przyjmujemy elastyczność marszrut EM. Dodatkową miarą elastyczności systemu jest wskaźnik

$$\gamma = (T_{1m} - T_{wm}) T_{1m} \quad (6)$$

gdzie:

$T_{1m}$ ,  $T_{wm}$  odpowiednio czas realizacji zamówienia w przypadku wykorzystania jednej ustalonej marszruty (wielu alternatywnych marszrut) dla każdego typu części  $EM = 0$  ( $EM > 0$ ).

Czas realizacji zamówienia obejmuje czasy wykonywania operacji technologicznych oraz czasy oczekiwania. Im krótszy jest ten czas, tym lepsze jest wykorzystanie potencjału wytwórczego SP. Im wyższa jest wartość wskaźnika  $\gamma$ , tym korzystniejszy jest rezultat wykorzystania systemu.

*Przykład* (ocena elastyczności marszrut technologicznych za pomocą wskaźnika EM).

Przyjmujemy, że elastyczny SP składa  $W_1$ , się z 5 - ciu maszyn  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$ , na których można wytwarzać 3 typy części:  $W_1, W_2$  i  $W_3$ . Wymagane operacje dla części każdego typu i odpowiadające im maszyny podano w tab. 3 (dla  $EM = 0$  - ustalone marszrutę oraz dla  $EM > 0$  - alternatywne marszrutę). Liczby w tab. 3 reprezentują czasy [min] wykonywania poszczególnych operacji.

Tab. 3. Dane dla ustalonych i alternatywnych marszrut (opracowanie na podstawie [7])

Wyr.	Oper.	Ustalone marszrutę ( $EM=0$ )				Alternatywne marszrutę ( $EM>0$ )			
		$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$
$W_1$		$M_1(11)$	$M_2(20)$	*	*	$M_1(11)$	$M_2(20)$	*	*
						$M_2(8)$	$M_3(15)$	*	*
$W_2$		*	$M_3(15)$	$M_4(10)$	$M_5(12)$	*	$M_2(20)$	$M_3(6)$	$M_5(12)$
						*	$M_3(15)$	$M_4(10)$	*
$W_3$		$M_1(11)$	$M_3(15)$	$M_4(10)$	$M_5(12)$	$M_1(11)$	$M_2(20)$	$M_3(6)$	$M_5(12)$
						$M_2(8)$	$M_3(15)$	$M_4(10)$	*

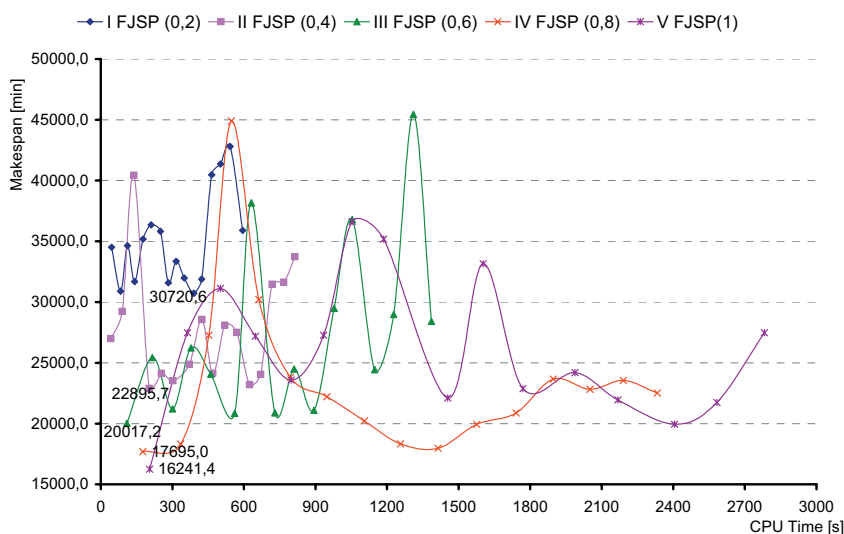
Jak wynika z tab. 3, dla każdej części typu  $W_1$  i  $W_2$  mamy po 4 możliwe marszrutę, a mianowicie dla części typu  $W_1$ : A- $\{M_1, M_2\}$ , B- $\{M_1, M_3\}$ , C- $\{M_2, M_3\}$ , D- $\{M_2, M_3\}$  oraz dla części typu  $W_2$ : E- $\{M_2, M_3, M_5\}$ , F- $\{M_2, M_4, M_5\}$ , G- $\{M_3, M_3, M_5\}$ , H- $M_3, M_4, M_5$ . Dla części  $W_3$  mamy 8 marszrut: I- $\{M_1, M_2, M_3, M_5\}$ , J- $\{M_1, M_2, M_4, M_5\}$ , K- $\{M_1, M_3, M_3, M_5\}$ , L- $\{M_1, M_3, M_4, M_5\}$ , M- $\{M_2, M_2, M_3, M_5\}$ , N- $\{M_2, M_2, M_4, M_5\}$ , O- $\{M_2, M_3, M_3, M_5\}$  oraz P- $\{M_2, M_3, M_4, M_5\}$ .

Tak więc elastyczność marszrut  $EM = [(4+4+8)/3]-1 = 4,3$ , tj. każda z 3-ch części może być wytwarzana przy zastosowaniu około 5-ciu różnych marszrut.

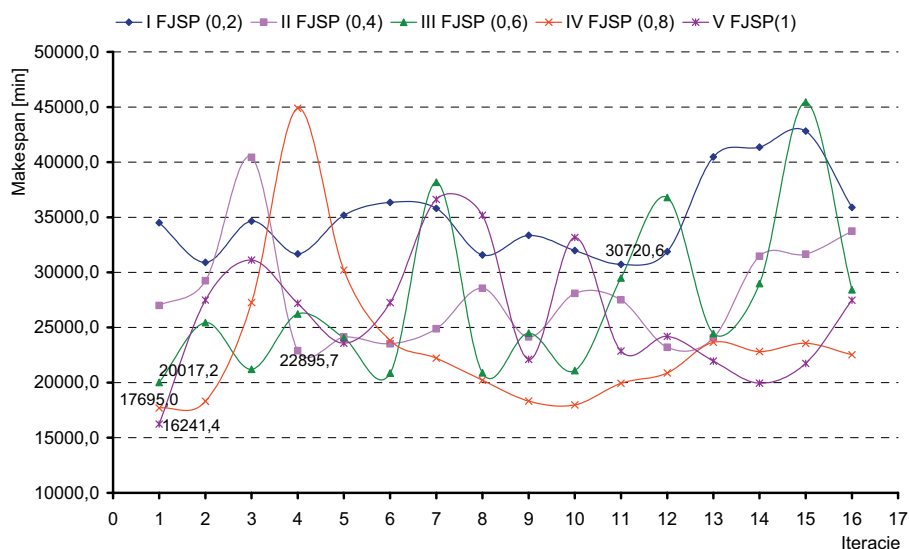
W pracy zbadano zależność sumarycznego czasu wykonania zadań w zależności od stopnia elastyczności i wydajności wyposażenia dla FJSP. Przy czym FJSP ( $\mu_1, \mu_2$ ) oznacza FJSP odpowiednio dla stopnia elastyczności i wydajności wyposażenia. Wyniki dla szeregowo-równoległego przepływu części z zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania (SA) przedstawiono w tab. 4 (w tym przypadku uwzględniono tylko stopień elastyczności maszyn). Rys. 5 przedstawia zależność makespan od czasu CPU, a rys. 6 od liczby iteracji algorytmu SA dla różnych stopni elastyczności maszyn.

Tab. 4. Zestawienie rezultatów eksperymentów dla różnego stopnia elastyczności maszyn

Iteracje	Stopień elastyczności									
	I FJSP (0,2)	CPU Time	II FJSP (0,4)	CPU Time	III FJSP (0,6)	CPU Time	IV FJSP (0,8)	CPU Time	V FJSP(1)	CPU Time
1	34509,6	45	26993,5	42	<b>20017,2</b>	109	<b>17695,0</b>	176	<b>16241,4</b>	205
2	30900,6	83	29231,9	90	25435,2	216	18307,1	335	27479,1	363
3	34639,6	112	40432,1	139	21213,4	301	27265,4	453	31119,1	501
4	31679,7	142	<b>22895,7</b>	203	26229,2	378	44887,7	548	27194,7	648
5	35174,4	177	24130,4	254	24065,0	461	30199,9	663	23574,1	798
6	36346,6	211	23525,6	303	20852,9	561	23812,0	795	27261,5	934
7	35814,3	250	24882,3	371	38169,5	631	22223,3	948	36624,8	1054
8	31582,5	283	28566,0	424	20889,6	730	20214,3	1105	35181,6	1186
9	33349,9	316	24132,0	470	24493,0	810	18327,2	1256	22106,9	1455
10	31986,5	350	28094,3	520	21095,7	894	17971,2	1414	33159,9	1603
11	<b>30720,6</b>	390	27497,5	570	29485,7	978	19934,6	1576	22868,3	1770
12	31887,6	423	23201,1	624	36784,1	1054	20873,6	1741	24196,2	1988
13	40472,7	465	24054,1	670	24439,6	1148	23662,2	1897	21948,5	2168
14	41360,5	502	31465,9	718	28983,7	1228	22818,7	2051	19944,9	2405
15	42809,9	542	31640,0	767	45447,2	1310	23557,7	2191	21738,6	2583
16	35891,4	595	33738,4	814	28419,6	1386	22519,0	2333	27474,7	2782



Rys. 5. Zależność makespan od czasu CPU dla różnego stopnia elastyczności maszyn



Rys. 6. Zależność makespan od liczby iteracji dla różnego stopnia elastyczności maszyn

**LITERATURA**

- [1] Aarts, E.H.L., Korst, J.H.M. Simulated Annealing and Boltzmann machines: a stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing; N. Y. 1989
- [2] Antczak A., Antczak P., Witkowski T., Algorytm symulowanego wyżarzania – efektywna metoda optymalizacji harmonogramów produkcji, Automation 2006, PIAP, Warszawa 2006.
- [3] Askin R.G., Goldeberg J. B., Design and Analysis of Lean Production Systems, Jon Wiley&Sons, Inc., New York, 2002
- [4] Binato S. i in., A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure For Job Shop Scheduling, AT&T Labs Technical Report, 2000 pp.1-19
- [5] Brandimarte P., Routing and scheduling in Flexible job shops by tabu search. Annals of Operations Research, 1993, 41, pp. 157-183.
- [6] Carlier J., An algorithm for solving the job shop problem. Management Science, 1989, vol. 35, pp. 164-176.
- [7] Chung C.H., Chen I.J., A systematic assessment of the value of flexibility for an FMS. W : K.E. Stecke i R.Suri (eds.), Proceedings of the Third ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems: Operations Research Models and Applications, Elsevier, Amsterdam, 1989, pp. 27-32
- [8] Durlik I., Inżynieria Zarządzania, Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, AW Placet, Warszawa 1995 (cz. 1)
- [9] Durlik I., Inżynieria Zarządzania, Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, AW Placet, Warszawa 1996 (cz. 2)
- [10] Feo T. i in., A GRASP For A Difficult Single Machine Scheduling Problem. Computers Ops. Res., Vol. 18, No 8, 1990, pp. 635-643.
- [11] Ho N.B., Tay J.C., GENACE: An Efficient Cultural Algorithm for Solving the Flexible Job-Shop Problem, Congres on Evolutionary Computation 2004 IEEE, vol. 2, pp. 1759-1766
- [12] Honczarenko J., Jałowicki S., Model symulacyjny elastycznego inteligentnego systemu wytwarzania. Mat. Konf. Nauko-Technicznej - Automation 2003, PIAP, Warszawa 2003, s. 129-138.
- [13] Janiak A., Wybrane problemy i algorytmy szeregowania zadań i rozdziału zasobów,. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1999.
- [14] Jansen K., Mastrolilli M., Solis-Oba R., Approximation Algorithms For Flexible Job Shop Problems, Proceedings of LATIN 2000, LNCS 1776, pp. 68-77.
- [15] Kacem I., Ordonnancement multicritere des jobshops flexibles: formalarion, bornes inferieures et approche evolutionniste cooperative, Ph. D. Thesis, Ecole Centrale de Lille, January 6<sup>th</sup>, 2003, France
- [16] Liouane N., Saad I., Hammadi S., Borne P., Ant systems & Local Search Optimization for flexible Job Shop Scheduling Production, International Journal of Computers, Communications&Control, 2007, vol. II, No2, pp. 174-184.
- [17] Santarek K., Strzelczak S., Elastyczne systemy produkcyjne, WNT, Warszawa 1989
- [18] Satanowskij R. L. Metody snizjenja proizvodstwiennych potier, Moskwa, Ekonomika, 1988.
- [19] Sawik T., Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych, WNT, Warszawa 1992
- [20] Smutnicki Cz., Algorytmy szeregowania, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2000.
- [21] Świć A. Elastyczne systemy produkcyjne. Technologiczno-organizacyjne aspekty projektowania i eksploatacji. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1998.
- [22] Witkowski T., Decyzje w zarządzaniu przedsiębiorstwem, WNT, Warszawa 2000
- [23] Witkowski T., Antczak A., Antczak P., Zastosowanie procedury GRASP do harmonogramowania małoseryjnej produkcji wieloasortymentowej, Automation 2005, PIAP, Warszawa 2005, s. 116 - 125.
- [24] Van Laarhoven P., Aarts E, and Lenstra J., Job shop scheduling by simulated annealing, Operations Research, 40,1992, pp. 113-125.
- [25] Vollmann T.E., Berry W.L., Whybark D.C. Manufacturing Planning and Control Systems, Irwin – McGraw-Hill, New York, 1997.
- [26] Zhang H., Gen M., Multistage-based genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problem, portal.acm.org/citation.cfm.id=1144293
- [27] Zribi N., Kacem I., El-Kamel A. , Borne P. Optimization by Phases for the Flexible Job-shop Scheduling Problem, ascc.2004.ee.mu.oz.au/proceedings/paper/P274.pdf
- [28] Zribi N., Kacem I., El-Kamel A., Borne P., Minimizing the total tardines in a flexible job-shop, wacong.org/wac2006/allpaper/isiac/isiac-45.pdf