

mgr inż. Tomasz Witek
prof. nzw. dr hab. inż. Tadeusz Witkowski
Politechnika Warszawska

OKREŚLENIE WPLYWU MAKSYMALNEJ WIELKOŚCI ZLECENIA PRODUKCYJNEGO NA CZAS REALIZACJI WSZYSTKICH ZLECEŃ

Artykuł przedstawia zastosowanie Teorii Ograniczeń (TOC) do rozwiązania problemu harmonogramowania z technologicznie zamiennymi maszynami. Przeanalizowano wpływ maksymalnej wielkości zlecenia produkcyjnego na czas realizacji zbioru wszystkich zleceń. Przeprowadzono eksperymenty komputerowe z użyciem oprogramowania typu APP oraz opisano wyniki i wnioski.

THE INFLUENCE OF MAXIMUM ORDER QUANTITY FOR PRODUCTION ORDER ON TOTAL PRODUCTION TIME FOR JOBS

The paper presents the application of the Theory of Constraints (TOC) which was used to solve flexible job-shop scheduling problem (FJSP). The influence of maximum order quantity for production order on total production time for jobs were investigated. The computer experiments with using APP software and achieved results and conclusions have been described.

1. WPROWADZENIE

Problem szeregowania stanowi przedmiot wielu studiów i badań. Wynika to z kilku różnych powodów. Pierwszy powód to praktyczne wykorzystanie algorytmów np. do rozwiązywania praktycznych problemów optymalizacji występujących w dyskretnych procesach produkcyjnych czy elastycznych systemach wytwarzania. Powód drugi prowadzenia badań to trudności związane ze skonstruowaniem efektywnych algorytmów, które mogłyby być zastosowane w praktyce. Większość problemów planowania i sterowania jest formułowana jako zagadnienia optymalizacji, w których wszystkie zmienne decyzyjne (lub ich część) przyjmuje wartości dyskretne, całkowitoliczbowe lub binarne. Zadania takie należą do klasy problemów wyjątkowo pracochłonnych z obliczeniowego punktu widzenia i zaliczamy je do NP-trudnych. Bezpośrednią konsekwencją tego jest to, że czas obliczeń odpowiedniego algorytmu komputerowego jest funkcją wykładniczą od rozmiaru rozwiązywanego problemu. Często w celu zminimalizowania tego czasu zamiast rozwiązywać problem dokładnie wyznaczane jest rozwiązanie przybliżone. W grupie metod dokładnych, w zależności od przynależności problemu do klasy złożoności obliczeniowej są: efektywne algorytmy dedykowane, metody oparte o schemat podziału i ograniczeń (B&B), metody oparte o schemat programowania dynamicznego (PD), metody oparte na programowaniu liniowym całkowitoliczbowym (PLC), metody oparte na programowaniu liniowym binarnym (PLB), metody subgradientowe. Metod przybliżonych jest o wiele więcej niż metod dokładnych, zwykle są one problemowo związane. Do bardziej znanych należą: algorytmy priorytetowe, aproksymacyjne, genetyczne, poszukiwania lokalne, metoda przesuwne wąskiego gardła, symulowane wyżarzanie, poszukiwanie z zakazami, sieci neuronowe [1-3, 10-12, 15-16]. W pracy do rozwiązania tego problemu zastosowano TOC [4-9, 13, 18-19].

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU HARMONOGRAMOWANIA

Podsystem produkcyjny (gniazdo, wydział) ma do realizacji zbiór zamówień $z = \{z_i\}$, $i \in J$, gdzie: $J = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ – dopuszczalny zbiór typów części (zespołów) i $S = \{S_k\}$, ($k = 1, 2, 3, \dots, m$) – zbiór wykonawców (maszyn, miejsc pracy). Każde zamówienie z_i dotyczy wykonania liczby części d_i – tego asortymentu wyrobów. Jeżeli operacje procesu technologicznego i -tej części (zespołu) oznaczymy przez $\{O_{ij}\}_{j=\mathfrak{S}_i}$, wtedy dla z_i możemy zapisać $z_i = (P_i \{O_{ij}\}_{j=\mathfrak{S}_i}^{\aleph_i})$, gdzie:

P_i	– wielkość zamówienia i -tej części asortymentu produkcji,
$O_{ij} = (G_{ij}, t_{ij(N)})$	– j -ta operacja wykonana i -tej części,
\mathfrak{S}_i	– numer operacji procesu technologicznego, z której należy rozpocząć obróbkę i -tej części,
\aleph_i	– numer ostatniej operacji wykonywanej z i -tą częścią
G_{ij}	– grupa technologicznie zamiennych maszyn dla O_{ij} ,
G_i	– przebieg procesu technologicznego i -tej części,
\overline{G}	– zbiór wszystkich grup maszyn, występujących w $\ \{z_i\}\ $
$t_{ij(N)}$	– elementarna pracochłonność j -tej operacji i -tej części O_{ij} , wykonywanej na określonej maszynie z grupy lub konkretnie dla N -tej maszyny (na szczególnych operacjach),
t'_{ij}	– pracochłonność przezbrajania maszyny przed wykonaniem operacji O_{ij} ,
$M = \max \aleph_i$	– gdzie M – liczba “wspólnych” operacji,
N_{gr}	– liczba wszystkich grup maszyn.

Rozwiązanie zadania polega na opracowaniu harmonogramu H^* w postaci macierzy $\{t_{ij}^p, S_{ij}, t_{ij}^k\}$, gdzie t_{ij}^p i t_{ij}^k – odpowiednio początek i koniec operacji O_{ij} , S_{ij} – konkretna maszyna dla operacji O_{ij} .

Poszukiwanym suboptymalnym harmonogramem H^* będzie taki, dla którego spełnione jest wyrażenie $F(H^*) \leq F(H)$ dla wszystkich lub prawie wszystkich $H \in \Psi$, gdzie $F(H)$ – funkcja celu wyboru harmonogramu. W pracy jako kryterium przyjęto minimalny całkowity czas wykonania pełnego zbioru zamówień produkcyjnych (makespan) [14].

W ten sposób operacja O_{ij} jednoznacznie scharakteryzowana jest przez indeks (ij) , grupę technologicznie zamiennych maszyn G_{ij} oraz elementarną pracochłonność wykonania j -tej operacji technologicznej i -tej części $t_{ij}(N)$, która zależy od grupy (a dla niektórych operacji także od numeru maszyny N w grupie). Poszczególne maszyny mogą należeć do różnych grup technologicznie zmiennych maszyn.

Przyjmujemy, że poszczególne grupy maszyn są ponumerowane od 1 do N_{gr} , przy czym w każdej grupie maszyny są uszeregowane według ubywania priorytetów.

Wymagania odnośnie rozpatrywanego zadania można przedstawić następująco:

- zachowanie kolejności obróbki technologicznej każdej części,
- nieujemne wartości pracochłonności elementarnej operacji,

- rozpoczęcie obróbki części (zespołów) odbywa się partiami P_i , gdzie P_i – wielkość partii części i -tego asortymentu,
- istnienie wyposażenia technologicznie zamiennego,
- maszyna nie może jednocześnie wykonywać więcej niż jedną operację z i -tą częścią,
- na każdej partii d_i nie może być jednocześnie wykonywana więcej niż jedna operacja,
- rozpoczęta j -ta operacja i -tej części jest wykonywana bez przerwy t_{ij} jednostek czasu,
- ani jedna operacja nie może być rozpoczęta szybciej od zaplanowanego terminu wykonania; operacja rozpoczyna się w momencie, gdy będzie zgłoszona gotowość maszyny (po przezbajaniu) oraz przygotowana do obróbki część,
- wszystkie zamówienia są gotowe do wykonania na czas T , rozpoczęcia procesu produkcyjnego. Przy konstruowaniu harmonogramu przyjmujemy, że $T = 0$,
- następną operacja nie może być rozpoczęta przed zakończeniem poprzedzającej ją operacji, wykonywanej nad częścią danej partii.

Algorytm jest opracowany dla produkcji seryjnej i charakteryzuje się następującymi właściwościami [14]:

- proces technologiczny może być zorganizowany w sposób szeregowo-równoległy lub szeregowy,
- w procesie technologicznym występują operacje montażu, liczba rodzajów (zespołów) po montażu jest kilka razy mniejsza (na przykład dwa razy),
- brak pełnej jednokierunkowości procesów technologicznych (częściowa jednokierunkowość z dokładnością do grup maszyn),
- możliwość powrotu partii części (zespołów) na tę samą maszynę, ale przy wykonywaniu innej operacji,
- częściowa zgodność niektórych grup maszyn (część maszyn występuje w kilku grupach),
- uwzględnienie nie zakończonej produkcji (niektóre partie mogą być już częściowo obrobione),
- różna wydajność maszyn w grupie dla niektórych operacji,
- duży rozmiar zadania (kilkadziesiąt części i operacji w każdym procesie technologicznym części oraz grup maszyn),
- uwzględnienie czasów przezbajania maszyn i inne.

3. ZASTOSOWANIE TOC W PLANOWANIU I HARMONOGRAMOWANIU

Sprawne optymalizowanie planowania produkcji należy do jednego z głównych postulatów rozwoju przedsiębiorstwa. Przy jego realizacji potrzebne są, zatem efektywne procedury wspomagające procesy podejmowania decyzji.

TOC jest metodą autorstwa E.M.Goldratta pozwalającą na identyfikację i zarządzanie ograniczeniami [4-8]. Rozwijana od 1986 roku przez amerykański Instytut Avrahama Y. Goldratta stała się uznaną i szanowaną powszechnie dziedziną wiedzy o zarządzaniu i nie tylko. Wymaga ona spojrzenia na całe przedsiębiorstwo oraz całościowej jego analizy. Paradoksalnie jednak reorientacja na wyniki całego systemu (przedsiębiorstwa) wymaga skoncentrowania się na bardzo wąskich odcinkach działania, które są obszarami ograniczającymi ("wąskimi gardłami"). W każdym przedsiębiorstwie występuje pewien podstawowy punkt krytyczny lub "wąskie gardła".

TOC jest filozofią zarządzania, której celem jest nastawienie przedsiębiorstwa na zarabianie, generowanie wymiernych korzyści (pieniędzy) zarówno w chwili obecnej jak i w przyszłości.

Cel ten jest osiągalny przez: maksymalizowanie przepływu (tempo sprzedaży), minimalizowanie zapasów (np. koszt materiałów) i minimalizację kosztów operacyjnych.

Według TOC powinno się zarządzać punktem krytycznym ("wąskim gardłem") poprzez postępowanie zgodnie z następującymi krokami:

- krok 1: zidentyfikuj ograniczenie ("wąskie gardło") systemu
 - Ograniczenia fizyczne np. zdolności produkcyjne
 - Ograniczenia polityczne np. zasady, plany, procedury
- krok 2: maksymalnie wykorzystaj obecne możliwości "wąskiego gardła" np. zmaksymalizowanie czasu pracy maszyny, która jest wąskim gardłem
- krok 3: podporządkuj wszystko inne maksymalnemu wykorzystaniu (eksploatacji) "wąskiego gardła".
- krok 4: podnieś możliwości (przepustowość) "wąskiego gardła" np. zakup nowej maszyny
- krok 5: wróć do etapu 1, gdyż po znalezieniu i wyeliminowaniu jednego punktu krytycznego pojawi się następny.

Krok 1. Zidentyfikuj ograniczenie

Ograniczeniem może być wszystko to, co wpływa negatywnie na doprowadzenie organizacji, projektu do celu. W przedsiębiorstwach, organizacjach możemy wyróżnić dwa rodzaje ograniczeń: fizyczne i polityczne. O ile fizyczne ograniczenia są łatwiejsze do zaobserwowania, zlokalizowania i podjęcia działań związanych z nimi to polityczne często bywają nierozpoznane, ponieważ często trudne jest przeanalizowanie całego ciągu przyczynowo-skutkowego aż do pierwszego, który tworzy ograniczenie. Ograniczenie fizyczne dotyczą często maksymalnej mocy produkcyjnych, zarówno konkretnej maszyny, urządzenia, stanowiska pracy, a nawet czasami całych działów produkcyjnych. Zależy jest to oczywiście od: organizacji przedsiębiorstwa, metody sterowania przebiegiem procesu produkcyjnego czy od metody produkcji. Można ogólnie określić, że jeżeli jakieś ograniczenie nie jest „widoczne”, mierzalne to prawdopodobnie jest ograniczeniem politycznym. Przykładami takich politycznych ograniczeń mogą być: przyjęte procedury, zasady lub miary, które często służą do oceny sukcesu lub też porażki. Trudność związana z identyfikacją i pracami nad ograniczeniami politycznymi często jest związana z jego przebiegiem przez dużą ilość działów, komórek, wielokrotnie odpowiedzialność jest rozmyta a w takich przypadkach identyfikacja i rozpoczęcie działań jest bardzo skomplikowane a czasami wręcz niemożliwe.

Krok 2. Maksymalnie wykorzystaj obecne możliwości "wąskiego gardła"

Stwierdzenie to wg TOC oznacza maksymalne wykorzystanie możliwości „wąskiego gardła” bez jakichkolwiek inwestycji. Z przeprowadzonych analiz i badań wynika, że bardzo rzadko „wąskie gardło” wykorzystywane jest w sposób maksymalny. Powodami tego może być brak analizy „wąskich gardeł” lub błędnie określone jego miejsce. Najprostszym zabiegiem związanym z maksymalizacją wykorzystania „wąskiego gardła” jest zwiększenie czasu pracy (np. pracownika, maszyny), pamiętać jednak należy, że powinno się rozważyć również inne możliwości.

Krok 3. Wszystko inne podporządkuj maksymalnemu wykorzystaniu "wąskiego gardła".

Jeżeli zostały zrealizowane poprzednie kroki i „wąskie gardło” wykorzystywane jest w sposób maksymalny to powinno się podporządkować jemu wszystkie inne zasoby,

działania czy zabiegi. Czasami się zdarza, że na tym etapie wymagana jest decyzja związana ze zmniejszeniem przerobu w innych działach, na innych maszynach (niebędących „wąskim gardłem”). Decyzja taka jest wymagana, gdyż jej brak może doprowadzić do zwiększenia zapasów a tym samym do zmniejszenia jej „przepustowości”. W sytuacji, gdy po 3 kroku „wąskie gardło” nadal nim pozostaje to można stwierdzić, że firma osiągnęła maksymalny poziom produkcji.

Krok 4. Podnieś możliwości (przepustowość) "wąskiego gardła"

Często zdarzają się sytuacje, że aby wyeliminować „wąskie gardło” oraz zwiększyć swoją przepustowość, przedsiębiorstwo musi dokonać inwestycji np. zakup nowej maszyny. Tego typu działania wykonywane są w tym kroku wg TOC.

Krok 5. Wróć do etapu 1

Ponieważ każdy system ma jakiś czynnik ograniczający, po znalezieniu i wyeliminowaniu jednego pojawi się następny. Na tym czynniku należy znowu skoncentrować działania firmy. Praca nad poprawą efektywności działania nigdy się nie kończy. TOC jest filozofią ciągłej poprawy efektywności działania. TOC oferuje większe korzyści w porównaniu do tradycyjnego podejścia, które nie uwzględnia "wąskich gardeł" i ich wpływu na efektywność systemu, jakim jest firma [9, 11-12].

3. EKSPERYMENT KOMPUTEROWY

Eksperyment komputerowy przeprowadzono przy wykorzystaniu narzędzia o nazwie Zaawansowane Planowanie Produkcji (ZPP) [20] dostarczonego przez jednego z dostawców tego typu oprogramowania na rynku polskim, w którym wprowadzono autorskie modyfikacje i konfigurację. Dane wejściowe, które posłużyły do przeprowadzenia eksperymentów to m.in.: $i = 20$ – liczba części, $G_{ij} = 26$ – liczba grup technologicznie zamiennych maszyn, $j = 27$ – liczba maszyn, macierz operacji technologicznych, macierz pracochłonności operacji, macierz pracochłonności przebrojenia, macierz wielkości popytu. Eksperymenty przeprowadzono dla układu szeregowego i szeregowo-równoległego, a jako funkcję celu przyjęto minimalny całkowity czas wykonania pełnego zbioru zleceń (makespan).

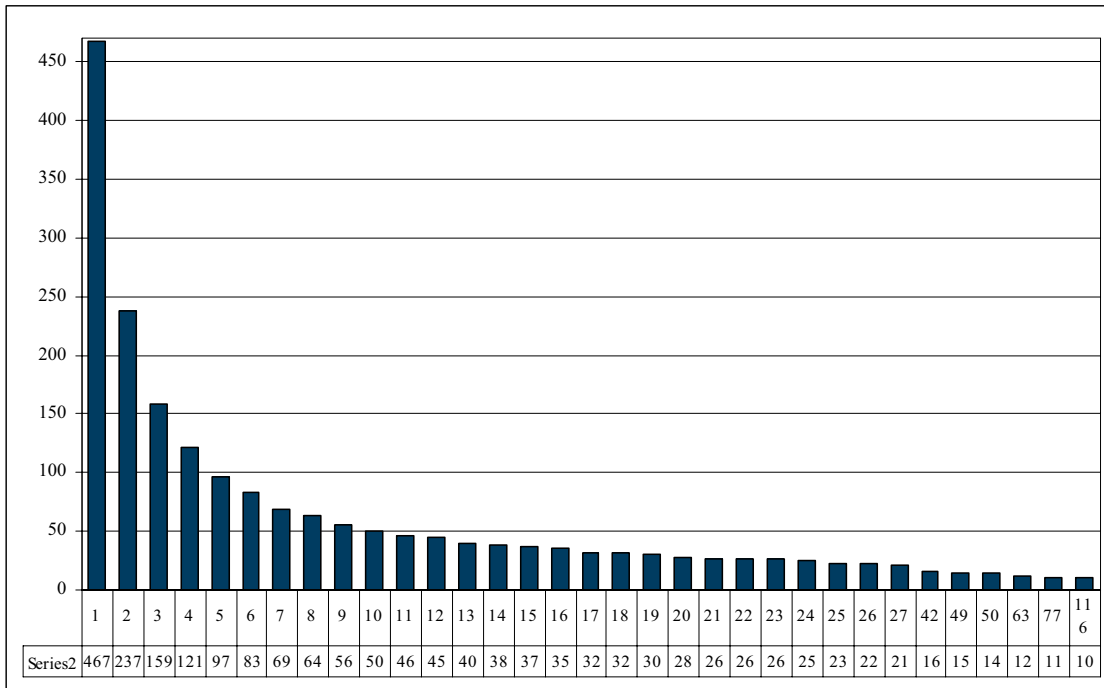
Szczegółowe zestawienie wszystkich wyżej wymienionych parametrów znajduje się w [20]. Tab. 1 zawiera wielkości popytu na kolejne dziesięć części (zespoły).

Tab. 1. Wielkości popytu na kolejne zadania dotyczące wykonania części (zespołów)

	Fizyczny numer części (zespołu) d_i									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wielkość popytu [szt.]	50	77	63	116	49	19	5	27	42	19

Celem eksperymentu było zbadanie wpływu wielkości partii produkcyjnej na sumaryczny czas wykonania pełnego zbioru zadań. Wprowadzenie parametru maksymalnej partii produkcyjnej wpływa oczywiście na liczbę zleceń produkcyjnych oraz na wzrost czasów przebrojeń. Prześledźmy dwa przypadki wpływu maksymalnej partii produkcyjnej na liczbę zleceń. Gdy zadanie o maksymalnej liczbie części jest równe jak w naszym przypadku 116 szt., wtedy liczba zleceń wynosi 10 i jest równa liczbie zadań do wykonania. Rozpatrzmy

jak wzrośnie liczba zleceń, gdy minimalną wielkość partii produkcyjnej przyjmiemy równą 1 szt., a maksymalną 4 szt. Dla pierwszego zadania, którego wielkość wynosi 50 liczba zleceń będzie równa 13 (12 zleceń po 4 szt. i 1 zlecenie na 2 szt.), dla drugiego zadania otrzymamy 20 zleceń (19 zleceń po 4 szt. i 1 zlecenie na 1 szt.) itd. Sumaryczna liczba zleceń dla przyjętych danych będzie wynosić natomiast $121 = (13+20+16+29+13+5+2+7+11+5)$. Takie podejście ze zmianą maksymalnej wielkości partii produkcyjnej ma sens tylko wtedy, gdy procesy produkcyjne wykonywane są na grupach technologicznie zamiennych maszyn. W przypadku gdyby one nie istniały, a procesy produkcyjne realizowane byłyby na pojedynczych maszynach we wszystkich przypadkach testowych otrzymane wyniki powinny być zbliżone do siebie.



Rys. 1. Zależność liczby zleceń od maksymalnej wielkości partii produkcyjnej [opracowanie własne]

Eksperyment komputerowy przeprowadzono w 33 seriach wprowadzając zmiany w jednym parametrze (parametrem zmienianym jest maksymalna wielkość partii produkcyjnej). Pozostałe parametry pozostawały niezmiennie, a mianowicie:

- wszystkie zlecenia mają ten sam priorytet,
- wszystkie maszyny mają ten sam współczynnik wykorzystania i wynosi on 100 %,
- czas przed i po zakończeniu każdej z operacji jest równy zero,
- czas transportu międzyoperacyjnego jest stały i wynosi zero,
- każda z maszyn jest w stanie pracy 24 godzinnym przez 7 dni w tygodniu, czyli zakłada się stan idealny dostępności maszyn,
- każda maszyna może być obciążona maksymalnie do 100 %,
- kolejna operacja dla zlecenia produkcyjnego rozpoczyna się po zakończeniu całej partii produkcji detali w operacji poprzedniej,
- termin dostępności wszystkich detali jest taki sam dla wszystkich wyrobów (data pokrycie popytu jest taka sama dla wszystkich detali).

Dla tak sformułowanego problemu i założeń można określić, że przy wielkości partii produkcyjnej równej 1 szt. uzyskujemy szeregowo-równoległy przepływ procesu produkcyjnego, natomiast dla pozostałych przypadków są to przepływy szeregowo.

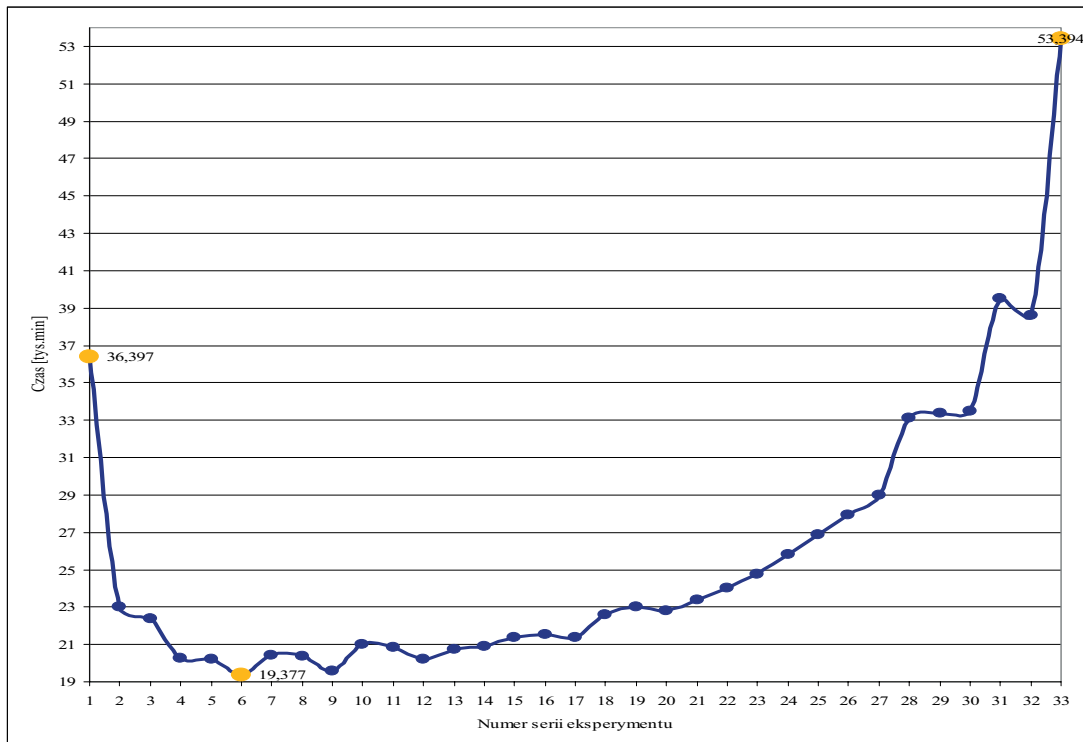
Tab. 2. Czas [min] wykonania całego zbioru zadań dla kolejnych serii eksperymentu [opracowanie własne]

	Fizyczny numer części (zespołu) d_i										Sum. czas wykonania zleceń
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
min 1 max 1	4915	7998	9695	16029	19652	15052	14979	23464	21481	4679	36397
min 1 max 2	8627	13141	12700	15731	22281	21456	20780	21802	9502	8022	23012
min 1 max 3	18334	18415	7658	15401	14000	16542	17988	8397	13118	20020	22367
min 1 max 4	5218	8139	9427	13113	17909	19067	16470	11901	15901	13667	20280
min 1 max 5	8324	15871	10527	18564	20223	8572	7369	16496	13508	8613	20223
min 1 max 6	16370	16721	19260	16567	15160	15726	9583	17773	11990	16909	19377
min 1 max 7	17787	8263	11162	15722	13281	18394	9662	12657	12157	12353	20448
min 1 max 8	19409	19365	11421	17109	16667	17335	10272	18694	17871	20227	20386
min 1 max 9	19157	15986	10381	19598	14462	15612	11798	14303	16473	19438	19598
min 1 max 10	17900	19277	15787	20649	18187	14673	12332	11523	16949	14978	21026
min 1 max 11	18989	11678	16047	16346	19543	19470	12622	20861	16977	16245	20866
min 1 max 12	18780	15461	16336	19150	13830	19828	12549	20202	19658	17704	20202
min 1 max 13	20073	13863	17705	17427	17759	20670	13216	20259	20536	19557	20753
min 1 max 14	20264	16165	17801	20576	20691	20898	14034	15299	19257	18788	20898
min 1 max 15	19921	15855	16132	20595	19803	21161	14483	16260	19327	21375	21375
min 1 max 16	20416	16208	12985	19248	11674	19669	14748	17322	19571	21256	21532
min 1 max 17	20921	17227	17174	20623	11234	20346	15146	19112	21223	21059	21404
min 1 max 18	21107	17749	19895	21390	19445	21351	15879	22590	22435	20553	22590
min 1 max 19	21021	17271	19675	19080	21245	22514	16139	22998	21670	21677	22998
min 1 max 20	21946	18387	14883	21549	22281	21198	16453	22692	21907	21677	22827
min 1 max 21	21782	18571	15471	22224	22441	23133	16846	23370	20949	21677	23370
min 1 max 22	22291	18223	19523	22759	20756	14227	17373	23694	24006	21677	24006
min 1 max 23	23595	19374	21506	21525	17263	14380	17517	24756	23667	21677	24756
min 1 max 24	23638	19622	22657	23546	14242	14534	17853	25817	23446	21677	25817
min 1 max 25	24011	19526	22711	24411	14450	12981	18733	26880	23523	21677	26880
min 1 max 26	24060	19441	22556	24273	14744	12981	19030	27942	24358	21677	27942
min 1 max 27	24510	22404	25126	25134	21650	21300	19921	29004	24576	21677	29004
min 1 max 42	25727	22523	25293	24254	23587	26853	22391	29004	33104	28835	33104
min 1 max 49	29397	27720	24002	28751	27456	30722	24531	29004	33104	30236	33404
min 1 max 50	29437	27727	24485	29088	27456	30747	24851	29004	33104	30315	33482
min 1 max 63	19891	32915	30759	32332	31367	33586	20623	29815	33104	36609	39517
min 1 max 77	21002	32740	31582	35569	33428	30459	19718	38401	33104	38613	38613
min 1 max 116	20129	33141	30759	53394	35921	35410	18010	34610	33104	37783	53394

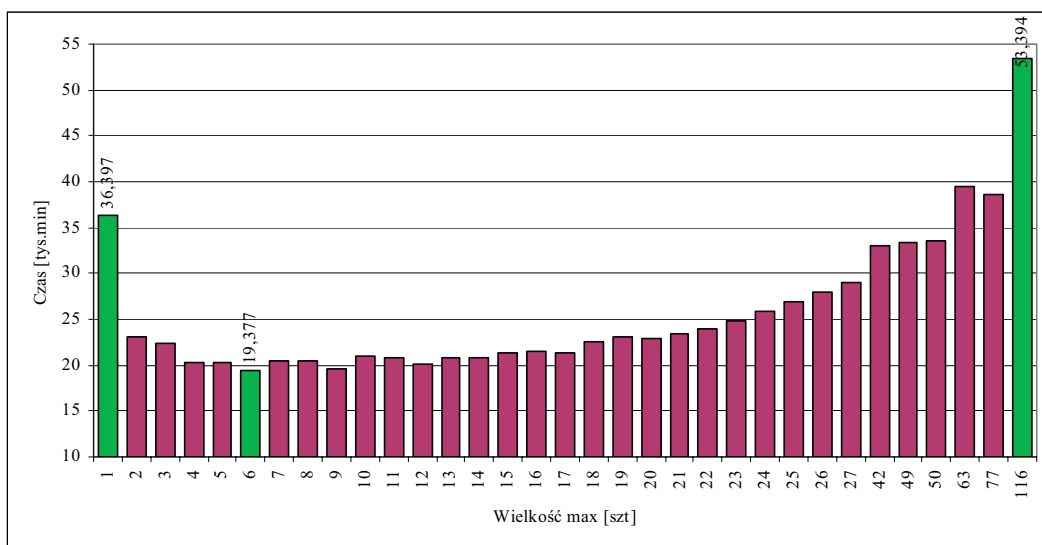
W tab. 2 przedstawiono zestawienie otrzymanych wyników dla przeprowadzonych 33 serii eksperymentu. Pierwsza kolumna zawiera informacje o minimalnej i maksymalnej wielkości partii produkcyjnej, ostatnia natomiast sumaryczny czas wykonania zbioru wszystkich zleceń (zbioru zapotrzebowania - popytu).

Jak wynika z tab. 2 dla przebiegu szeregowo-równoległego procesu produkcyjnego otrzymano wynik 36 397 min., a dla klasycznego przebiegu szeregowego to znaczy, gdy maksymalna wielkość zlecenia produkcyjnego wynosi 116 szt. osiągnięty wynik to 53 394 min. Minimalny czas wykonania całego zbioru zadań produkcyjnych otrzymano w 6 serii

eksperymentu (rys. 2), czyli przy założeniu, że maksymalna wielkość partii wynosi 6 szt. (rys. 3). Dla tej serii eksperymentu rozpatrzono 83 = (9+13+11+20+9+4+1+5+7+4) zleceń produkcyjnych (rys. 1), a otrzymany czas ich wykonania wynosi 19 377 min.



Rys. 2. Zależność czasu wykonania całego zbioru zadań dla danych serii eksperymentu [opracowanie własne]



Rys. 3. Zależność maksymalnej wielkości zlecenia produkcyjnego i czasu wykonania całego zbioru zadań [opracowanie własne]

Otrzymane wyniki zostały przeanalizowane również pod względem czasu potrzebnego do zrealizowania całości zadania dla poszczególnych części. Eksperyment pokazał, że minimalnego czasu wykonania nie uzyskano dla żadnego z zadań przy wielkości partii równej 6 szt. (przy tej wielkości partii otrzymano najmniejszy sumaryczny czas wykonania całego zbioru zleceń). Minimalne czasy wykonania dla pojedynczych zadań zostały otrzymane głównie wtedy, gdy maksymalna wielkość partii produkcyjnej mieściła się w przedziale od 1-ej do 5-ciu szt. (tab. 7). Tylko dla zadania 5-go minimalny czas został osiągnięty przy maksymalnej wielkości partii produkcyjnej równej 17 szt. Kolorem szarym w tab. 2 zostały oznaczone minimalne czasy wykonania dla pojedynczych zadań.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników można określić następujące wnioski. Czas wykonania procesu produkcyjnego dla badanego zagadnienia jest zależny od maksymalnej wielkości partii. Jest oczywiste, że wraz ze wzrostem liczby zleceń produkcyjnych wzrasta sumaryczny czas przeobrażenia maszyn, ale jak przedstawiono powyżej możliwe jest znalezienie takiego rozwiązania, które będzie kompromisem pomiędzy całkowitym czasem przebrojeń i sumarycznym czasem wykonania zbioru zleceń produkcyjnych.

Z innej strony analizując wyniki można oczekiwać, że będą one inne, gdy w eksperymencie symulacyjnym byłyby uwzględnione czasy transportu międzyoperacyjnego. Czasy te wpłynęłyby na wydłużenie sumarycznego czasu wykonania zbioru zleceń. Ten wątek eksperymentu będzie analizowany w dalszych badaniach.

LITERATURA

- [1] Adams J., Balas E., and Zawack D., The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling, *Management Science*, 34, 1998, pp. 391-401.
- [2] Balas E., Machine sequencing via disjunctive graph: An implicit enumeration algorithm, *Operations Research*, 17, 1969, pp. 149-156.
- [3] Carlier J., The one – machine sequencing problem, *European Journal of Operation Research*, 11, 1982, pp. 42-47.
- [4] Goldratt E.M., *Cel, Werbel*, Warszawa 2000
- [5] Goldratt E.M., *Łańcuch krytyczny, Werbel*, Warszawa 2000.
- [6] Goldratt E.M., *Necessary but not sufficient*, North River Press, N. Y. 2000.
- [7] Goldratt, E.M., *The Haystack Syndrome*, Croton-on-Hudson, North River Press, N.Y. 1990.
- [8] Goldratt, Eliyahu M., *The Theory of Constraints*, Croton-on-Hudson, North River Press, N.Y. 1990.
- [9] Przygodzka E., *Teoria Ograniczeń (Theory of Constraints)*, Internet.
- [10] Smutnicki Cz., *Algorytmy szeregowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
- [11] Spencer M., Cox J., *The Constraints Management Handbook*, The St. Lucie Press/Apics Series on Constraints Management, 1997.
- [12] Umbre M., Srikanth M., *Synchronous Manufacturing – Principles for World Class Excellenc*, Spectrum Publishing Company, 1995.
- [13] Witek T., Witkowski T., Antczak A., Use Theory of Constraints method to solve job-shop scheduling problem, IV International Conference on Advances in Production Engineering, Warszawa APE 2007, pp. 51-59

- [14] Witkowski T., Szeregowanie zadań i harmonogramowanie produkcji metodą optymalizacji SZEZA, OW PW, Warszawa 1998.
- [15] Witkowski T., Antczak A., Witek T., Selected contemporary algorithms of job-shop scheduling problem and the production scheduling, IIIth International Conference on Advances in Production Engineering, Warszawa APE 2004 (part I) pp.121-130
- [16] Witkowski T., Antczak A., Witek T., Selected contemporary algorithms of job-shop scheduling problem and the production scheduling, w: (red. T. Krupa, L. Gąsioriewicz) Współczesne systemy organizacji i zarządzania produkcją, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2006, s. 157-165.
- [17] Witkowski T., Antczak A., Witek T., The Application of Genetic Algorithms and An Immune Systems Approach for Job-Shop Scheduling, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Automation 2004, Warszawa PIAP 2004, s. 285-294.
- [18] Witkowski T., Witek T., Optymalizacja planowania produkcji z wykorzystaniem teorii ograniczeń, w: (red. T. Krupa, L. Gąsioriewicz) Współczesne systemy organizacji i zarządzania produkcją, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2006, s. 109-121.
- [19] Witkowski T., Witek T., Antczak. A., Zawansowane Planowanie Produkcji z wykorzystaniem Teorii Ograniczeń, Prace Naukowe - Komitet Nauk Organizacji i Zarządzania PAN, w: Przedsiębiorstwo i region w zjednoczonej Europie, Kielce 2004, s. 370-378.
- [20] Technical documentation and APP software – Lawson Software.