

Jerzy SZWABOWSKI

Politechnika Szczecińska

DOBÓR CZASU JEDNOSTKOWEGO OPERACJI OBRÓBKII SKRAWANIEM PRZY ZACHOWANIU OPTYMALNEJ WARTOŚCI JEJ CENY LUB KOSZTU

Streszczenie: Referat przedstawia metodę umożliwiającą zmianę czasu jednostkowego wielozabiegowej operacji obróbki skrawaniem przy zachowaniu tej samej, optymalnej wartości ceny lub kosztu operacji. W metodzie wykorzystuje się odpowiedni podział nadatku operacyjnego na zabiegi. Metodę można stosować do wyrównywania czasów wykonania operacji przy równoważeniu linii lub gniazd produkcyjnych podczas opracowywania harmonogramów produkcji.

SELECTION OF UNIT TIME OF MACHINING OPERATION PRESERVING OPTIMUM PRICE OR COST

Summary: This paper presents a method that allows to change a unit time for a multi-cut machining operation preserving the same optimum operation price or cost. In this method an appropriate division of an operation allowance for cuts is used. The method may be applied to equalize the operation times in proces of balancing of production lines or cells during task scheduling.

AUSWAHL DER STÜCKZEIT VON OPERATIONEN DER SPANNENDEN BEARBEITUNG BEI AUFBEWAHREN OPTIMALEN WERT DER PREIS ODER KOST

Zusammenfassung: Dieser Beitrag stellt eine Methodik zur wechseln der Stückzeit von mehrstufigen Operationen der spannenden Bearbeitung bei aufbewahren den gleichen, optimalen Wert der Preis oder Operationakost vor. In diese Methode wird erforderliche Verteilung der Materialzugabe auf einzelne Arbeitsstufen verwendet. Diese Methode kann man zur Ausgleichen von Bearbeitungszeiten einer Operation beim Ausgleichen der Fertigungsstrassen oder Fertigungszellen während Vorbereitung des Fertigungharmonogramms verwendet.

1. Wprowadzenie

Wzrost efektywności produkcji może występować jedynie w dobrze zorganizowanych systemach produkcyjnych. O stopniu doskonałości struktury organizacyjnej systemu produkcyjnego świadczy m.in. liczba i długość przerw w pracy ludzi i maszyn, długość cyklu produkcyjnego oraz liczba i wartość prac w toku. Minimalizacja tych wielkości w procesach planowania i harmonogramowania produkcji umożliwia bieżącą optymalizację procesu produkcyjnego.

Niezależne projektowanie technologii i organizacji produkcji powoduje często, iż stawianie im różnych celów (a tym samym i kryteriów optymalizacji) prowadzi do konieczności dokonywania w technologii korekt wynikających z narzucenia technologowi warunków organizacji systemu produkcyjnego. Korekty takie są najczęściej odstępstwem od kryteriów optymalizacji stosowanych przez technologa podczas projektowania operacji. Im większa liczba takich korekt, tym jakość opracowania technologiczno - organizacyjnego bywa niższa. Dlatego możliwość wyrównywania czasów jednostkowych operacji (bez zmiany ceny lub kosztu operacji) dla linii i gniazd produkcyjnych, podczas opracowywania harmonogramów dla kompleksów operacji lub w trakcie sterowania operatywnego, jest jednym z istotnych czynników, pozwalających wpływać na organizację produkcji i stopień wykorzystania stanowisk produkcyjnych.

Organizacja, wydajność i koszty poszczególnych operacji decydują o tych samych wskaźnikach dla procesu technologicznego i o efektach pracy całego systemu. Dotychczas przyjmowano na ogół, iż koszt każdej operacji zależy m.in. od czasu jej wykonania. Było to wynikiem tradycyjnych sposobów projektowania operacji wielozabiegowych i wyznaczania optymalnych wartości parametrów skrawania (najczęściej zakładano określone głębokości skrawania w zabiegach - wynikające z przyjętego arbitralnie przez technologa podziału naddatku operacyjnego na zabiegi - następnie przy danej głębokości wyznaczano posuw z warunków ograniczających i dopiero wówczas obliczano optymalną wartość prędkości skrawania). Taki sposób postępowania powodował, iż wyniki były co najwyżej zbliżone do optymalnych, a technolog dokonywał oceny uzyskanych rezultatów modyfikując odpowiednio (w razie potrzeby) rodzaj lub liczbę maszyn uczestniczących w procesie technologicznym oraz poszczególne operacje.

Celem referatu jest przedstawienie metody umożliwiającej dobór lub zmiany wartości czasu jednostkowego operacji wielozabiegowej podczas wyznaczania optymalnych wartości parametrów skrawania (prędkości skrawania v , posuwu f i głębokości skrawania a - jako zmiennych decyzyjnych), przy zachowaniu nie zmienionej, optymalnej wartości ceny lub kosztu jednostkowego operacji i uwzględnieniu ograniczeń obszaru rozwiązań dopuszczalnych.

2. Teoretyczna analiza zagadnienia

Stosowanie jednego kryterium optymalizacji do projektowania operacji lub procesu okazuje się na ogół niewystarczające. Dlatego proponowana metoda zostanie przedstawiona dla bardziej ogólnego przypadku - zastosowania polioptymalizacji parametrycznej do operacji wielozadaniowej. Przyjmując podejście polioptymalizacyjne [1, 3, 5] do wyznaczenia optymalnych wartości parametrów skrawania, wprowadza się pomocniczą funkcję w (1) opartą na wzajemnie przeciwstawnych, klasycznych kryteriach minimalnego czasu t_j i kosztu K_j :

$$w = \alpha t_j + \beta K_j \rightarrow \min \quad (1)$$

gdzie: α, β - współczynniki wagowe, przy czym $\beta = (1 - \alpha)$, natomiast $0 \leq \alpha \leq 1$.

Postać funkcji (1) pozwala sprowadzić formalnie (na zasadzie kompromisu liniowego) model polioptymalizacji do optymalizacji jednokryterialnej i umożliwia wykorzystanie jej do wyznaczenia zbioru rozwiązań tworzących optimum w sensie Pareto w pierwszym etapie rozwiązywania problemu. Wówczas wartości składników równania (1) mają jedynie sens liczbowy (są wielkościami bezwymiarowymi). Jedno rozwiązanie problemu można uzyskać w drugim etapie, podejmując decyzję (na podstawie dodatkowych kryteriów różnego typu) o wielkości kompromisu między kryteriami t_j i K_j lub przyjmując określoną wartość dla α .

Funkcja celu dla czasu jednostkowego operacji ma ogólną postać [1, 3, 5]:

$$t_j = t_s + t_g + t_g t_{zn} T^{-1} \quad (2)$$

gdzie: t_s - część stała czasu jednostkowego t_j , niezależna od parametrów skrawania [min/szt]; t_g - czas główny, przyjęty jako równy czasowi skrawania [min]; t_{zn} - czas zamiany narzędzia [min]; T - okres trwałości ostrza [min].

Dla kosztu jednostkowego operacji funkcję celu przedstawia się [1, 3, 5] w postaci:

$$K_j = K_s + k_o t_j + k_n t_g T^{-1} \quad (3)$$

gdzie: k_o - koszt pracy obrabiarki [zł/min]; k_n - koszt narzędzia przypadający na jeden okres trwałości ostrza T [zł/ostrze]; K_s - koszty stałe, niezależne od parametrów skrawania [zł/szt].

Dla przypadków, gdy produkcja wyrobów ma być rentowna (czyli cena sprzedaży musi być wyższa od kosztów produkcji o wartość zysku), należy jako kryterium optymalizacji przyjmować minimalną cenę jednostkową operacji c_j o następującej funkcji celu [5]:

$$c_j = z t_j + K_j \rightarrow \min \quad (4)$$

gdzie: z - wartość wymaganego zysku, odniesiona do jednostki czasu t_j [zł/min].

Analizując na przykładzie operacji tokarskiej strukturę i przebieg czynności w operacji wielozabiegowej z jednym narzędziem pracującym w każdym z zabiegów, można przyjąć dla takiego przypadku [5], iż czas i koszt jednostkowy operacji wielozabiegowej są wielkościami addytywnymi względem czasów i kosztów zabiegów składowych, czyli:

$$t_j^n = \sum_{i=1}^n t_{j,i} \quad \text{oraz} \quad K_j^n = \sum_{i=1}^n K_{j,i} \quad (5)$$

gdzie: i - numer zabiegu ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); n - liczba zabiegów w operacji ($n = I, II, III, \dots$).

Podstawiając dla wielozabiegowej operacji toczenia powierzchni walcowej:

$$t_{g_i} = \frac{L_i}{N_i f_i} = \frac{\pi d_i L_i}{1000} v_i^{-1} f_i^{-1} \quad (6)$$

$$T = \frac{C_{T_i}}{v_i^{s_i} f_i^{\mu_{T_i}} a_i^{e_{T_i}}} \quad (7)$$

oraz przyjmując podział naddatku operacyjnego a_o (odniesionego do promienia przedmiotu) na wartości a_1, a_2, \dots, a_n dla kolejnych zabiegów, przy warunku

$$a_o = \sum_{i=1}^n a_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

można określić średnicę obrabianą d_i w i -tym zabiegu:

$$d_i = d_o + 2 \left(a_o - \sum_{j=0}^{i-1} a_j \right) \quad (\text{dla } i = 1, a_{j=0} = 0) \quad (9)$$

gdzie: $j = (i - 1)$; d_o - średnica przedmiotu, zadana do wykonania w rozpatrywanej operacji.

Podstawiając do wzorów (1) i (4) zależności (2) i (3) oraz (5 + 9) otrzymuje się po dokonaniu przekształceń następujące postacie funkcji pomocniczej w oraz ceny jednostkowej c_j dla ogólnego przypadku wielozabiegowej operacji toczenia powierzchni walcowej [5]:

$$w^n = \sum_{i=1}^n (\beta t_{S_i} + \alpha K_{S_i}) + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\pi L_i}{1000} \left[d_o + 2 \left(a_o - \sum_{j=0}^{i-1} a_j \right) \right] v_i^{-1} f_i^{-1} \times \right. \\ \left. \times \left[\beta + \alpha k_o + (\beta t_{z_{n_i}} + \alpha k_o t_{z_{n_i}} + \alpha k_{n_i}) C_{T_i} v_i^{s_i} f_i^{\mu_{T_i}} a_i^{e_{T_i}} \right] \right\} \quad (10)$$

$$c_j^n = \sum_{i=1}^n (z t_{S_i} + K_{S_i}) + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\pi L_i}{1000} \left[d_o + 2 \left(a_o - \sum_{j=0}^{i-1} a_j \right) \right] v_i^{-1} f_i^{-1} \times \right. \\ \left. \times \left[z + k_o + (z t_{z_{n_i}} + k_o t_{z_{n_i}} + k_{n_i}) C_{T_i} v_i^{s_i} f_i^{\mu_{T_i}} a_i^{e_{T_i}} \right] \right\} \quad (11)$$

Zależności (10) i (11) uwzględniają obróbkę w każdym zabiegu:

- innym, jednym narzędziem (C_n, s, u_n, e_n, k_n);
- z innym okresem trwałości ostrza T_i (α_i, β_i, z_i);
- z innymi parametrami skrawania v_i, f_i, a_i ;
- na innej średnicy d_i oraz długości toczenia L_i ;
- z innym czasem zamiany ostrza t_{zn_i} ;
- z innymi wartościami kosztów K_{zn} i czasów t_{zn} stałych.

Planując obróbkę we wszystkich zabiegach jednym, tym samym narzędziem, przyjmuje się w całej operacji:

$$s_i = s, \quad u_{T_i} = u_T, \quad e_{T_i} = e_T, \quad C_{T_i} = C_T, \quad t_{zn_i} = t_{zn}, \quad k_{n_i} = k_n \quad (12)$$

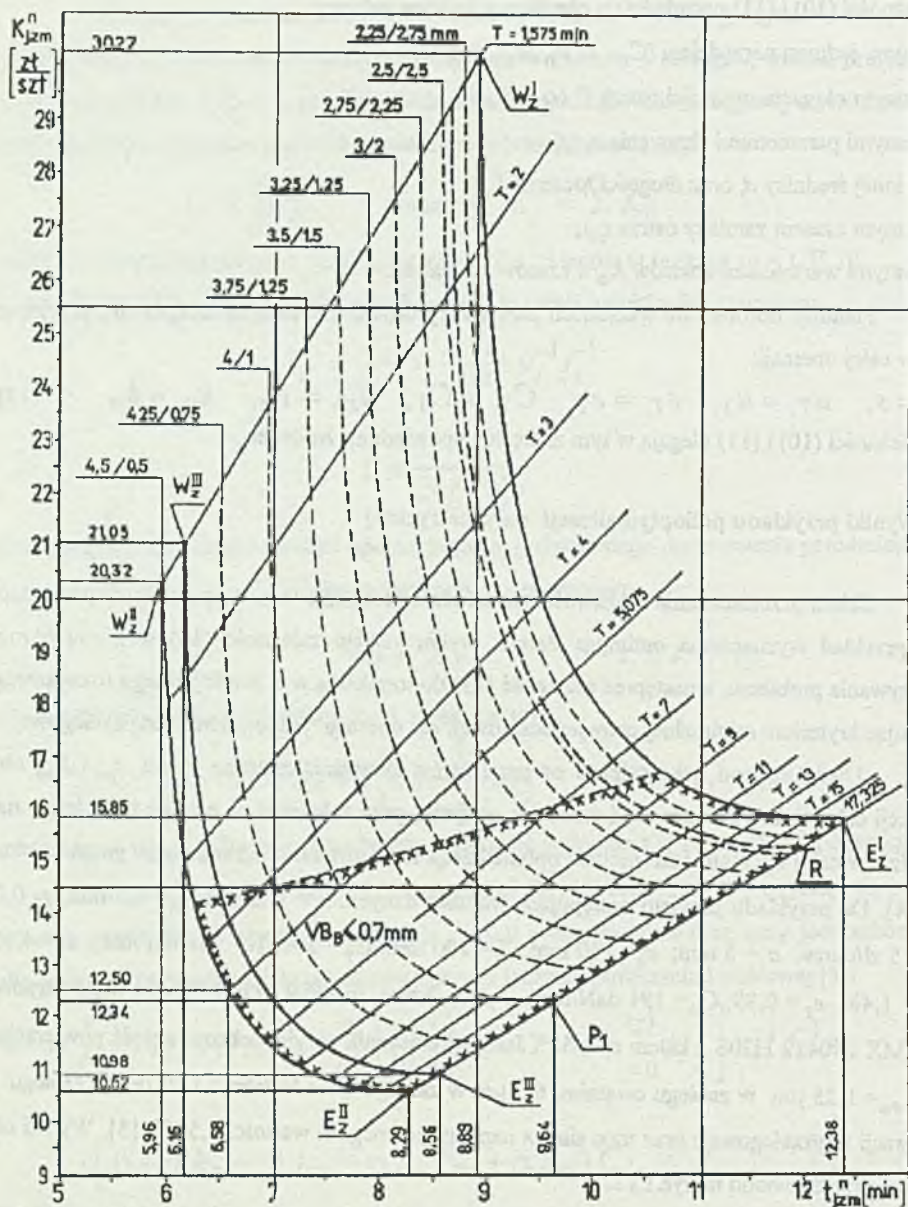
a zależności (10) i (11) ulegają w tym zakresie odpowiednim zmianom.

3. Wyniki przykładu polioptymalizacji parametrycznej

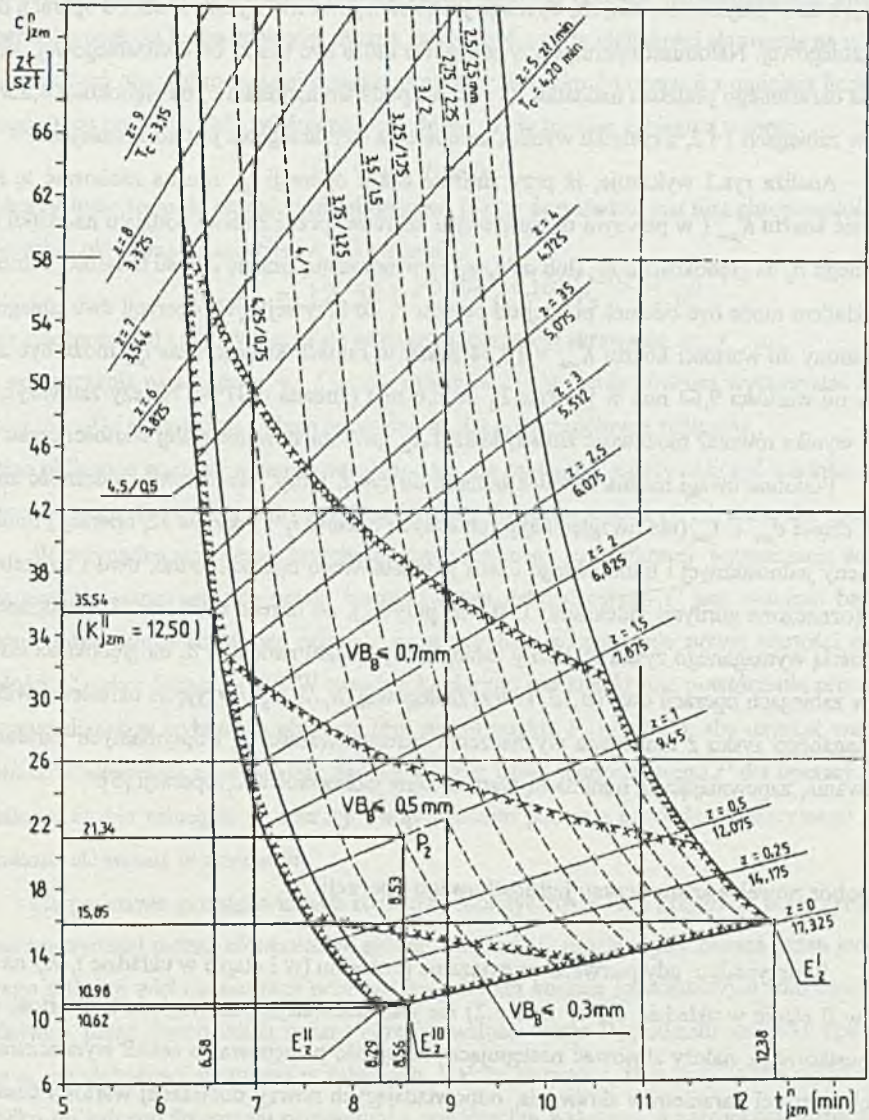
Celem przedstawienia możliwości zmian czasu jednostkowego t_j operacji przeprowadzono przykład wyznaczenia optimum Pareto, wykorzystując zależność (10) w I etapie rozwiązywania problemu, a następnie zależność (11) do uzyskania w II etapie jednego rozwiązania, stosując kryterium minimalnej ceny jednostkowej, dla operacji jedno-, dwu- i trzyzabiegowej.

Uwzględniono tylko zależne od parametrów skrawania zmienne części t_{zsm} i K_{zsm} obu funkcji celu (tj. bez kosztów K_s i czasów t_s stałych), przy założeniu, iż pracuje tylko jedno narzędzie w całej operacji. Jako metodę optymalizacji zastosowano programowanie geometryczne [2, 4]. Do przykładu przyjęto następujące wartości danych: $k_o = 1$ zł/min; $t_{zn} = 0,5$ min; $\eta = 0,8$; $k_n = 5$ zł/okres; $a_o = 5$ mm; $d_o = 140$ mm; $L = 100$ mm; $C_T = 106 \times 10^6$ m \times mm²/obr; $s = 4,15$; $u_T = 1,48$; $e_T = 0,89$; $C_{zn} = 191$ daN/mm; $r_s = 1,2$ mm; materiał ZI300; płytka wieloostrowa TNMX 240412 H20S z kątem $\epsilon_p = 55^\circ$. Jako ograniczenia przyjęto chropowatość powierzchni ($R_{a_{dop}} = 1,25$ μ m w zabiegu ostatnim, 6,3 μ m w zabiegu przedostatnim i 10 μ m w zabiegu 1. operacji trzyzabiegowej) oraz moc silnika napędu głównego o wartości 7,5 kW [5]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys.1 i 2.

Na rys.1 odcinek krzywej między punktami E_z i W_z stanowi dla każdej operacji optimum w sensie Pareto, co umożliwia analizę kompromisów (zależnych od współczynników wagowych α i β) między kryteriami czasu t_{zsm} i K_{zsm} . Utworzone optima Pareto można wykorzystać do określenia obszaru doboru polioptymalnego okresu trwałości ostrza T_p i podziału naddatku a_o na głębokości skrawania w zabiegach operacji wielozabiegowych. Z rys.1 wynika, że dla



Rys.1. Zależność czasu t_{zm}^n i kosztu K_{zm}^n dla obszaru doboru polioptymalnego okresu trwałości ostrza T_p i podziału nadadtku a_0 na głębokości skrawania w zabiegach. Obszar doboru określają optima Pareto dla każdej z trzech operacji (oznaczonych indeksami I, II i III przy literach E_z i W_z) wyznaczone dla głębokości skrawania $a_n=0,5$ mm w ostatnich zabiegach
 Fig.1. Variation of time t_{zm}^n and cost K_{zm}^n in the region of polyoptimum selection of tool life T_p and the division of the operation allowance a_0 for two- and three-cut operations



Rys.2. Zależność czasu t_{zm}^n i ceny c_{zm}^n dla obszaru doboru optymalnego okresu trwałości T_c i podziału nadadtku a_o na głębokości skrawania w zabiegach. Obszar doboru określają: prosta odpowiadająca okresowi trwałości $T_c = 17,325$ min, linie dopuszczalnego zużycia VB_B oraz linie minimalnych cen (biegnące od punktów E_z w górę) dla trzech operacji, wyznaczone dla głębokości skrawania $a_t = 0,5$ mm w ostatnich zabiegach operacji dwu- i trzyzabiegowej

Fig.2. Variation of time t_{zm}^n and price c_{zm}^n in the region of polyoptimum selection of tool life T_c and the division of the operation allowance a_o for two- and three-cut operations

przyjętych w przykładzie danych, operacja jednozabiegowa ma wyższy koszt od operacji dwu i trzyzabiegowej. Natomiast operacja trzyzabiegowa może być tańsza od dwuzabiegowej, ale tylko dla określonego podziału naddatku a_0 . Np. dla podziału naddatku a_0 na głębokości 4,25/0,75 mm w zabiegach 1 i 2, z rysunku wynika, że operacja trzyzabiegowa jest korzystniejsza.

Analiza rys.1 wykazuje, iż przy zmianie czasu operacji t_{zm} można zachować tę samą wartość kosztu K_{zm} (w pewnym ograniczonym zakresie) przez zmianę podziału naddatku operacyjnego a_0 na głębokości a_1/a_2 (lub $a_1/a_2/a_3$) i równoczesną zmianę okresu trwałości ostrza T_c . Przykładem może być odcinek prostej od punktu P_1 do krzywej E_2W_2 operacji dwuzabiegowej, odniesiony do wartości kosztu $K_{zm} = 12,34$ zł/szt, w ramach którego czas t_{zm} może być zmieniany od wartości 9,64 min w punkcie P_1 do 6,6 min (zmiana o 31%). Należy zauważyć, iż z rys.1 wynika również możliwość zmiany kosztu K_{zm} przy zachowaniu stałej wartości czasu t_{zm} .

Podobne uwagi można również odnieść do rys.2, który przedstawia zależność zmienianych części c_{zm} i t_{zm} (nie uwzględniających stałych czasów t_s i kosztów K_s operacji) minimalnej ceny jednostkowej i minimalnego czasu jednostkowego operacji jedno, dwu i trzyzabiegowej (oznaczone górnymi indeksami I, II i III przy E_2), od okresu trwałości T_c (związanego z wartością wymaganego zysku z), liczby zabiegów i podziału naddatku a_0 na głębokości skrawania w zabiegach operacji dwu (a_1/a_2) i trzyzabiegowej ($a_1/a_2/a_3$). Przyjęcie określonej wartości wymaganego zysku z umożliwi wyznaczenie okresu trwałości T_c i optymalnych parametrów skrawania, zapewniających minimalną wartość ceny jednostkowej c_j operacji [5].

4. Dobór nowej wartości czasu jednostkowego operacji

W przypadku gdy pierwsze rozwiązanie problemu (w I etapie w układzie t_j-K_j , na rys.1 lub w II etapie w układzie t_j-c_j , na rys.2) nie jest zadowalające ze względu na wartość czasu jednostkowego, należy stosować następującą kolejność postępowania celem wyznaczenia nowych wartości parametrów skrawania, odpowiadających nowej, dobieranej wartości czasu t_j' , przy zachowaniu optymalnej wartości kosztu, wyznaczonej w pierwszym rozwiązaniu:

- przyjąć nową wartość czasu jednostkowego t_j' ;
- wykorzystując zależności (2) i (3) obliczyć nową wartość okresu trwałości T' z formuły:

$$T' = \frac{k_n (t_j' - t_s)}{(K_j - k_o t_j' - K_s)} - t_{zm} \quad (13)$$

- w celu wyznaczenia nowych wartości parametrów skrawania v, f, a założyć najmniejszą głą-

bokość skrawania a_n w ostatnim zabiegu (korzystniej dla operacji trzyczabiegowej, gdyż w operacji z większą liczbą zabiegów można zmniejszyć wpływ głębokości skrawania na wartości ograniczeń obszaru rozwiązań dopuszczalnych w stosunku do operacji z mniejszą liczbą zabiegów), co pozwala obliczyć średnicę obrabianą d_3 w trzecim zabiegu z wzoru:

$$d_3 = d_o + 2a_n \quad (14)$$

- wykorzystując formułę ograniczenia aktywnego [5] (w przykładzie jest nim chropowatość powierzchni określona parametrem R_a) w postaci:

$$R_{a \text{ dop}} = 12,534 f^{0,768} a^{0,160} r_e^{-0,601} v^0 \quad (15)$$

oraz zależności (6) i (7) wyznacza się wartości parametrów skrawania v, f, a, j ;

- do wyznaczenia parametrów v, f, a dla zabiegów 1 i 2 należy również wykorzystać zależności (6), (7) i (15), stosując dane odpowiednie dla poszczególnych zabiegów,

- mając obliczone wartości parametrów skrawania dla zabiegów, należy obliczyć wartości czasu jednostkowego dla poszczególnych zabiegów oraz, do porównania z t_j' , ich sumę dla operacji.

W przypadku stosowania kryterium minimalnej ceny jednostkowej wyznaczenie wartości parametrów skrawania dla nowej wartości czasu jednostkowego t_j' jest znacznie bardziej złożone, gdyż zależność (4) nie pozwala na tak szybkie wyznaczenie nowej wartości okresu trwałości T_j' , jak z formuły (13). W zasadzie konieczne jest kilkakrotne powtórzenie procedury polioptymalizacji w wybranym obszarze (np. wokół punktu P_2 na rys.2), aby uzyskać wartości parametrów skrawania zapewniające żadaną wartość czasu jednostkowego t_j' dla operacji, przy określonej liczbie zabiegów w operacji i odpowiednim podziale nadaddatu operacyjnego a_o na głębokości skrawania w zabiegach.

Na podstawie przedstawionych rozważań teoretycznych oraz przykładu polioptymalizacji parametrycznej można sformułować główny wniosek, iż możliwa jest zmiana czasu jednostkowego operacji wielozabiegowej przy nie zmienionym koszcie jednostkowym (lub cenie jednostkowej), przez równoczesną zmianę okresu trwałości ostrza T i podziału nadaddatu operacyjnego a_o na głębokości skrawania w zabiegach. Należy zauważyć, iż w przykładzie ograniczono się tylko do jednego fragmentu przedmiotu - powierzchni walcowej, a największa liczba zabiegów w operacji wynosiła tylko trzy. Można wykazać [5], że im większa liczba i długość obrabianych fragmentów zarysu, tym większy jest zakres możliwych zmian czasu t_j . W takim przypadku konieczna jest analiza różnych wariantów operacji z uwagi na: liczbę zabiegów na poszczególnych fragmentach zarysu oraz podział nadaddatów a_o na poszczególnych fragmentach, przy określonej liczbie zabiegów dla poszczególnych fragmentów obrabianych w operacji.

Przedstawiona metoda może być przydatna przy sporządzaniu harmonogramów dla

kompleksów operacji oraz w sterowaniu operatywnym, zwłaszcza w przypadkach awarii określonych urządzeń technologicznych i konieczności zmian w marszrucie technologicznej.

LITERATURA.

- [1] Agapiou J. S.: The optimization of machining operations based on a combined criterion, Part 1: The use of combined objectives in single-pass operations. Part 2: Multipass operations. Tran. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, vol.114, 1992, pp. 500-513.
- [2] Beightler C. S., Phillips D.T.: Applied Geometric Programming. Wiley, New York 1976.
- [3] Szadkowski J.: Polioptymalizacja w projektowaniu operacji obróbki skrawaniem. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1980, nr 3-4, pp. 59-69.
- [4] Szwabowski J.: Programowanie geometryczno - liniowe w projektowaniu dwuzabiegowej operacji tokarskiej. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1991, nr 1, pp. 31-47.
- [5] Szwabowski J.: Polioptymalizacja parametryczna wielozabiegowych operacji toczenia zarysów złożonych. Monografia. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 504, seria Prace Instytutu Technologii Mechanicznej nr 12, Politechnika Szczecińska, Szczecin, 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż Tadeusz Sawik

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1994 r.

Abstract

This paper presents a method that allows to change a unit time for a multicut machining operation preserving the same optimum operation price or cost. For multicut turning operations, a theoretical analysis and effects of numerical experiments with a multiple objective function based on two individual objective functions (unit cost and unit time) in terms of restrictions resulting from surface finish and horse power, is presented. A set of compromising solutions in Pareto sense for single-, two-, and three- cuts operations and a region of a polyoptimum selection of tool life, number of cuts and division of the operation allowance is calculated. For the optimization a geometric programming is applied.

In this method an appropriate division of the operation allowance for cuts is used. The influence of both the value and the way of the division of the operation allowance on the change of three costs, time and price of the multicut operation is determined.

The method may be applied to equalize the operation times in proces of balancing of production lines or cells during task scheduling.