

Dr hab. inż. Andrzej JARDZIOCH,
 dr inż. Agnieszka TERELAK- TYMCZYNA,
 dr inż. Piotr PAWLUKOWICZ
 (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie):

BALANSOWANIE LINII PRODUKCYJNEJ Z WYKORZYSTANIEM WSKAŹNIKÓW TECHNICZNO-EKONOMICZNYCH

Streszczenie

Wskaźniki techniczno-ekonomiczne są kluczowymi elementami opisującymi prowadzoną działalność produkcyjną. Ich podstawowym zastosowaniem jest wspomaganie procesu planowania oraz ocena wyników produkcji. Artykuł przedstawia wpływ modyfikacji zawartych w normatywach parametrów obróbki skrawaniem na wzrost efektywności balansowania linii produkcyjnej. Modyfikacja parametrów zalecanych w normatywach pociąga za sobą zmianę okresu trwałości ostrza i tym samym bilansu ekonomicznego zlecenia produkcyjnego. W pracy zaproponowano wykorzystanie wskaźników techniczno-ekonomicznych do oceny granicy opłacalności tych modyfikacji.

Słowa kluczowe: obróbka skrawaniem, wskaźniki ekonomiczno- techniczne, balansowanie linii produkcyjnej, normatywy parametrów obróbki skrawaniem

BALANCING THE PRODUCTION LINE WITH THE USE OF TECHNICAL-ECONOMIC INDICATORS

Abstract

Technical-economic indicators are the key elements that describe carried out a productive activity. Their main use is to support the process of planning and evaluation of the production results. The article presents the effect of the modifications contained in the standards of machining parameters to increase efficiency of the production line balancing. Modification of the parameters recommended in standards entails changing the shelf edge, and thus the economic balance of the production order. The paper proposes use of technical-economic indicators in order to evaluate the cost-effectiveness of these modifications.

Keywords: machining, economic and technical indicators, balancing the production line, standards of machining parameters.

BALANSOWANIE LINII PRODUKCYJNEJ Z WYKORZYSTANIEM WSKAŹNIKÓW TECHNICZNO-EKONOMICZNYCH

Andrzej JARDZIOCH¹, Piotr PAWLUKOWICZ¹,
Agnieszka TERELAK-TYMCZYNA¹

1. WSTĘP

Zagadnienia balansowania linii produkcyjnych są znane od początku ich istnienia, a więc od 1913 roku, kiedy to w zakładach T. Forda w Highland Park powstała linia montażowa z ustalonym cyklem produkcyjnym. Zadaniem balansowania linii produkcyjnych jest możliwie jak najbardziej równomierne rozłożenie zadań wynikających z realizacji procesu technologicznego między stacje robocze, tak aby czasy przestojów poszczególnych stanowisk były jak najmniejsze [1,4,5].

Podstawowymi parametrami pozwalającymi określić poziom zbalansowania linii produkcyjnej są:

- współczynnik gładkości linii (Smoothness Index),
- współczynnik efektywności linii (Line Efficiency),
- czas linii (Time) [1].

W celu przeprowadzenia balansowania linii produkcyjnej stosuje się cztery główne metody:

- przenoszenie operacji między stanowiskami roboczymi, dzięki czemu na jednym stanowisku następuje skrócenie czasu pracy o czas trwania przesuwanej operacji, natomiast na drugim jego wydłużenie.
- zmianę ilości stanowisk roboczych, wprowadzając równoległy przebieg procesu produkcyjnego,

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Technologii Mechanicznej, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin.

- zmianę technologii wykonywania wyrobu pozwalającą na zmianę czasu trwania operacji np. zastąpienie procesu wiercenia przeciąganiem bądź strugania frezowaniem,
- zmianę parametrów technologicznych, która teoretycznie pozwala na bardzo płynną regulację czasu pracy stanowiska, jednakże w praktyce jest ograniczona zasadami doboru parametrów skrawania.

Dobór parametrów skrawania należy przeprowadzać w sposób, który przy zachowaniu określonej w dokumentacji technologicznej dokładności wymiarowo-kształtowej, stanu powierzchni obrabianej oraz terminu realizacji zlecenia będzie się charakteryzował możliwie najmniejszymi kosztami wytwarzania. Bardzo ważnym czynnikiem związanym z doбором parametrów skrawania jest trwałość ostrza.

Rozpatrując trzy główne parametry skrawania (prędkość, posuw oraz głębokość) największy wpływ na trwałość ostrza skrawającego ma prędkość skrawania a najmniejszy głębokość, dlatego przy stałej wartości przekroju warstwy skrawanej większą trwałość ostrza uzyskuje się skrawając przy większym stosunku głębokości skrawania do posuwu [4].

Dla najprostszego przypadku: obróbki jednym narzędziem (operacja jednozabiegowa) zostały opracowane zależności pozwalające określić trwałość narzędzia (krawędzi skrawającej) największej wydajności T_w (1) i minimalnych kosztów (trwałości ekonomicznej) T_e (2) [7]:

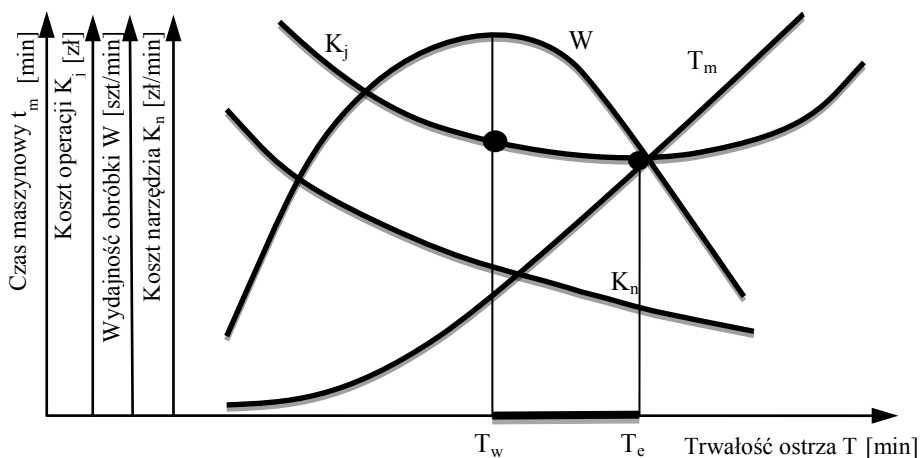
$$T_w = \tau(s - 1)t_z \quad (1)$$

$$T_e = \tau(s - 1)\left(t_z + \frac{K_n}{K_o}\right) \quad (2)$$

gdzie:

- τ – współczynnik określający stosunek czasu skrawania do czasu maszynowego
 $\tau = \frac{t_{skr}}{t_m}, 0 < \tau \leq 1$
- s – współczynnik określający zależność między prędkością skrawania a okresem trwałości ostrza (wyznaczony doświadczalnie),
- t_z – czas wymiany ostrza/narzędzia,
- K_n – koszty narzędzia, przypadające na okres trwałości ostrza (koszty materiału i wykonania narzędzia, koszty ostrzenia),
- K_o – koszty obrabiarki przypadające na pojedynczy okres trwałości ostrza, obsługa, koszty administracyjne i inne koszty ogólnozakładowe.

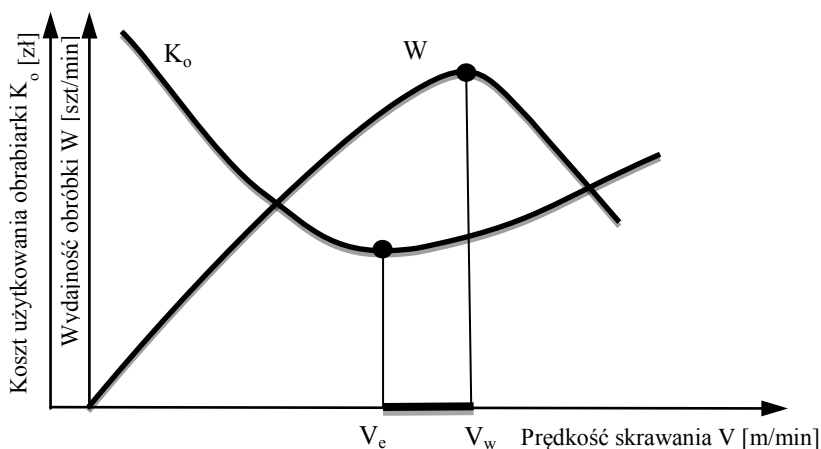
Na rys.1 pokazano graficzną interpretację przebiegu funkcji trwałości ostrza z zaznaczonymi punktami najwyższej wydajności oraz trwałości ekonomicznej.



Rys. 1. Przebieg funkcji trwałości ostrza [7]

W praktyce zaleca się aby okresy trwałości ostrzy mieściły się w przedziale, którego granice odpowiadają najmniejszym kosztom oraz największej wydajności. Wykroczenie poza te granice zawsze łączy się ze wzrostem kosztów i jednoczesnym spadkiem wydajności obróbki [4]. Jednakże ze względu na znaczenie bilansu ekonomicznego w przedsiębiorstwach najczęściej dobiera się parametry obróbki odpowiadające trwałości ekonomicznej ostrza.

Głębokość skrawania oraz posuw bardzo często są ograniczone dopuszczalnymi parametrami pracy narzędzia, wielkością naddatku bądź wymaganą chropowatością powierzchni, w związku z tym na okres trwałości ostrza oraz wydajność obróbki wpływa się głównie przez zmianę prędkości skrawania. Pokazano to na rys.2, przy czym prędkości skrawania V_e odpowiada trwałość ekonomiczna ostrza a V_w trwałość ostrza przy największej wydajności obróbki.

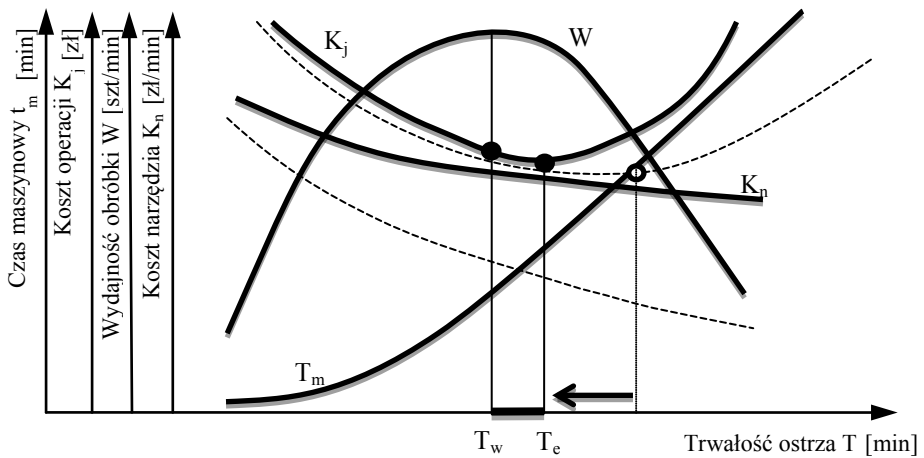


Rys. 2. Zależność wydajności i kosztów operacji od prędkości skrawania [4]

2. METODYKA

Zależności parametrów skrawania i trwałości ekonomicznej ostrza są słuszne pod warunkiem, że rozpatrujemy każdą operację indywidualnie. Natomiast gdy analizowana operacja odbywa się na jednej z maszyn znajdujących się w linii produkcyjnej o przepływie ciągłym należy uwzględnić zjawisko wąskiego gardła [2], które w danym ciągu technologicznym ma najmniejszą zdolność produkcyjną i limituje wielkość produkcji, jaką może wytwarzać cały łańcuch powiązanych ze sobą stanowisk [3].

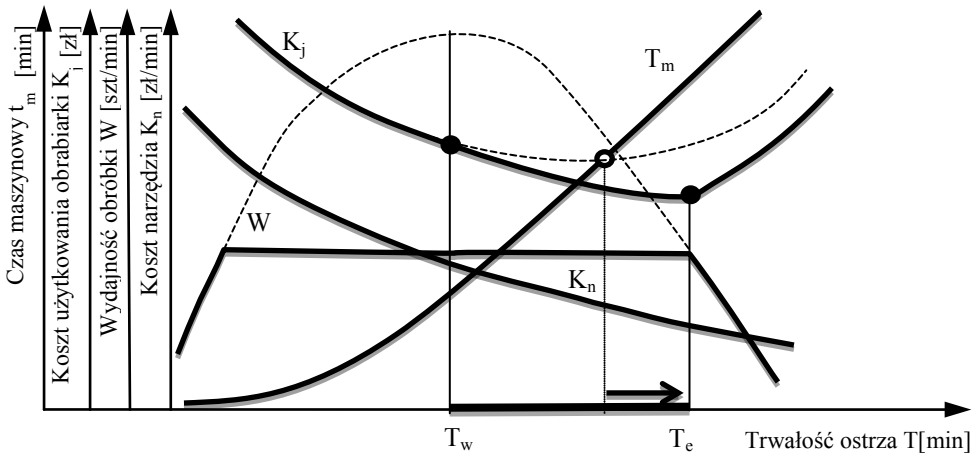
Dla obrabiarki będącej wąskim gardłem linii produkcyjnej zmiana czasu maszynowego zazwyczaj skutkuje zmianą wydajności całego systemu (nie tylko analizowanej obrabiarki). Ponieważ zmiana parametrów obróbki pojedynczych narzędzi wykorzystywanych w operacjach realizowanych na tej obrabiarence wpływa na wydajność całej linii produkcyjnej, to okres ekonomicznej trwałości ostrza dla takiej operacji należy rozpatrywać w odniesieniu do wydajności całej linii produkcyjnej oraz sumarycznych kosztów narzędzi wykorzystywanych w czasie obróbki całego wyrobu na wszystkich obrabiarkach linii produkcyjnej a nie tylko dla pojedynczej operacji wykonywanej na analizowanej obrabiarence. Na rys. 3 pokazano jak zmieni się wykres trwałości ostrza dla maszyny będącej wąskim gardłem w systemie produkcyjnym. Linie przerywane widoczne na rys. 3 przedstawiają zmiany kosztów dla produkcji jednostanowiskowej, natomiast ciągłe dla linii produkcyjnej.



Rys. 3. Przebieg funkcji trwałości ostrza dla obrabiarki będącej wąskim gardłem

Zwiększanie prędkości na obrabiarce będącej wąskim gardłem powoduje skrócenia czasu trwania operacji, zwiększając tym samym wydajność całego systemu produkcyjnego, lecz jednocześnie wiąże się to ze wzrostem kosztu narzędzia i zmniejszeniem trwałości ekonomicznej ostrza. W takim przypadku okres trwałości ekonomicznej ostrza przesuną się w kierunku okresu trwałości ostrza przy maksymalnej wydajności obróbki. Przesunięcie to jest proporcjonalne do wielkości linii produkcyjnej i związanych z tym kosztów użytkowania wszystkich obrabiarek. Gdy trwałość ekonomiczna ostrza dla wszystkich operacji osiągnie wartość równą trwałości przy maksymalnej wydajności i dalsze zwiększanie prędkości skrawania zaczyna wpływać na zmniejszenie wydajności można rozpatrywać wykorzystanie narzędzi o wydłużonej trwałości ostrza (np. z ceramiki azotkowej). W takim przypadku wyższa cena narzędzia może zostać w takim przypadku zrekompensowana zwiększoną wydajnością systemu.

Natomiast w przypadku obrabiarki nie będącej wąskim gardłem zmniejszanie prędkości skrawania a tym samym wydłużanie czasu maszynowego skutkuje zmniejszeniem kosztu narzędzia jednocześnie nie zmienia się koszt utrzymania obrabiarki, gdyż pracuje ona w czasie, w którym pierwotnie oczekiwała na kolejny przedmiot przeznaczony do obróbki. Ewentualnego zwiększania prędkości skrawania (skrócenia czasu maszynowego) nie należy rozpatrywać, ponieważ nie wpłynie on na zmianę wydajności systemu, gdyż jest ona zdeterminowana długością cyklu pracy systemu czyli czasem pracy obrabiarki będącej wąskim gardłem. Na rys. 4 pokazano jak zmieni się wykres trwałości ostrza rozpatrywany dla maszyny nie będącej wąskim gardłem w systemie produkcyjnym.



Rys. 4. Przebieg funkcji trwałości ostrza dla obrabiarki nie będącej wąskim gardłem

Mimo wydłużania okresu trwałości ekonomicznej ostrza spowodowanej obniżeniem parametrów obróbki (głównie prędkości skrawania) nie zmienia się wydajność systemu natomiast obniżają się koszty narzędzi, do momentu gdy czas maszynowy analizowanej obrabiarki zrówna się z długością cyklu linii produkcyjnej.

3. WSKAŹNIKI DLA PROCESU OBRÓBKII SKRAWANIEM

Przystępując do balansowania linii produkcyjnej należy w pierwszej kolejności wyszukać obrabiarkę będącą wąskim gardłem i dla niej przeprowadzić ponowne obliczenia trwałości ekonomicznych ostrza dla wszystkich operacji wg zależności wynikającej z przeprowadzonej wyżej analizy, a w następnej kolejności dla pozostałych obrabiarek. Trwałość ekonomiczna ostrza dla obrabiarki będącej wąskim gardłem T_{ewg} uwzględnia koszty użytkowania wszystkich obrabiarek w systemie produkcyjnym oraz inne koszty ogólnozakładowe przypadające na pojedynczy okres trwałości ostrza i została opisana zależnością (3).

$$T_{ewg} = \tau(s - 1) \left(t_z + \frac{K_n}{\sum_{i=1}^k K_{oi}} \right) \quad (3)$$

gdzie:

k – liczba obrabiarek w systemie produkcyjnym

Jeżeli na obrabiarce będącej wąskim gardłem realizowanych jest kilka operacji w pierwszej kolejności należy skracać czas trwania operacji realizowanych przez naj-

droższe narzędzia w stosunku do ich trwałości. W przypadku pozostałych obrabiarek, należy wydłużyć czas trwania operacji wykorzystujących najtańsze narzędzia w stosunku do ich trwałości.

Uwzględniając powyższe rozważania można wyznaczyć następujące wskaźniki balansowania linii produkcyjnej dla procesu obróbki skrawaniem:

1. Wskaźnik jednostkowy potencjału zmiany parametrów technologicznych obróbki skrawaniem wyrażony w [s.]. (4)

$$W_{jpt} = \frac{T_e \cdot T_e}{T_w} \text{ [s.]} \quad (4)$$

2. Wskaźnik jednostkowy wielkości wpływu kosztów narzędzia na czas trwania operacji wyrażony w [zł/s.]. (5)

$$W_{jkn} = \frac{K_n}{T_m} \text{ [zł/s]} \quad (5)$$

3. Wskaźnik cząstkowego wykorzystania możliwości balansowania linii produkcyjnej dla obrabiarki będącej wąskim gardłem. (6)

$$W_{co} = \frac{\sum_{i=1}^k T_{ewg_i} + \sum_{i=k+1}^l T_{ei}}{\sum_{i=1}^l T_{wi}} \quad (6)$$

gdzie:

- l - liczba operacji realizowanych na obrabiarce będącej wąskim gardłem,
- k - liczba analizowanych operacji.

Wykorzystując zaproponowane wskaźniki opracowano algorytm balansowania linii produkcyjnej przedstawiony na rys. 5. W algorytmie tym zastosowano pojęcie „ekonomiczne wąskie gardło”, które oznacza stanowisko na którym wyczerpano możliwość obniżania kosztów wytwarzania powiązanych z skracaniem czasu maszynowego. Dalsze skracanie czasów trwania operacji zwiększy co prawda wydajność pracy systemu, jednak spowoduje wzrost jednostkowych kosztów wyrobu.

Osiągnięcie przez wskaźnik granicznego wykorzystania możliwości balansowania linii produkcyjnej dla obrabiarki będącej wąskim gardłem wartości $W_{jkn} = 1$ oznacza, że dla narzędzi wykorzystywanych do obróbki na analizowanej obrabiarce nie ma możliwości dalszego skracania czasu maszynowego, gdyż będzie się to wiązało ze wzrostem kosztów oraz spadkiem wydajności systemu.

W przypadku, gdy $W_{jkn} < 1$, obrabiarka mimo skrócenia czasu maszynowego (na skutek uzyskania trwałości ostrza równej T_{ewg}) nadal pozostaje wąskim gardłem i dalsze jego skrócenie, co prawda wpływa na zwiększenie wydajności systemu jednakże, jest związane ze wzrostem kosztów. W takim wypadku obrabiarka staje się „ekonomicznym wąskim gardłem”.

Wskaźnik jednostkowy potencjału zmiany parametrów technologicznych obróbki skrawaniem W_{jpt} pozwala uporządkować operacje w zależności od wrażliwości na możliwość zmiany czasu maszynowego operacji przez modyfikację parametrów obróbki.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono analizę możliwości balansowania linii produkcyjnych poprzez modyfikację technologicznych parametrów skrawania. Zwrócono uwagę na wpływ wąskiego gardła na wartości ekonomicznej trwałości ostrza. Zaproponowano wzór pozwalający na obliczenie trwałości ekonomicznej ostrza realizującego obróbkę na obrabiarce będącej wąskim gardłem. Opracowano wskaźniki ułatwiające balansowanie linii produkcyjnej oraz algorytm balansowania linii produkcyjnej, który je wykorzystuje.

Sformułowano pojęcie „ekonomiczne wąskie gardło” definiujące próg opłacalności ekonomicznej skracania czasu maszynowego obrabiarki będącej wąskim gardłem linii produkcyjnej.

LITERATURA

- [1] BECKER C, SCHOLL A, *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*, European Journal of Operational Research 168(3): 694-715, 2006.
- [2] JARDZIOCH A., JASKOWSKI J., *Wykrywanie i usuwanie wąskich gardel za pomocą modelowania i badań symulacyjnych*, Materiały konferencyjne „Automatyzacja Procesów Dyskretnych, Teoria i zastosowania”, Tom 1., Gliwice 2010
- [3] LIWOWSKI B, KOZŁOWSKI R, *Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją*, Oficyna Ekonomiczna, Kraków 2006.
- [4] OLSZAK W., *Obróbka skrawaniem*, WNT, Warszawa 2008.
- [5] ÖZTÜRK C., S TUNALI S., HNICI B., ÖRNEK A., *Balancing and scheduling of flexible mixed model assembly lines with parallel stations*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 667, Issue 2, pp 2577-2591, 2012.
- [6] SCHOLL A., *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, Physica-Verlag, Heidelberg, 1999
- [7] STORCH B.: *Podstawy obróbki skrawaniem*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.