ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: AUTOMATYKA z. 129 Nr kol. 1474

Waldemar KACZMARCZYK
Akademia Górniczo-Hutnicza

# NOWE KRYTERIUM OCENY STOPNIA WYKORZYSTANIA MASZYN DLA ZADAŃ SZEREGOWANIA PRODUKCJI

**Streszczenie.** W niniejszej pracy przedstawione jest nowe *kryterium oceny stopnia wykorzystania maszyn* dla zadań szeregowania produkcji, przede wszystkim w systemach przepływowych. Podaje ono maksymalny stopień wykorzystania maszyn na przestrzeni *wielu okresów* produkcyjnych, przy którym nie narastają *zaległości produkcyjne*. Może ono zastąpić powszechnie stosowane obecnie kryterium długości uszeregowania $C_{max}$. W pracy przedstawione są wyniki obliczeń dla obu tych kryteriów.

# A NEW MACHINE UTILIZATION CRITERION FOR PRODUCTION SCHEDULING

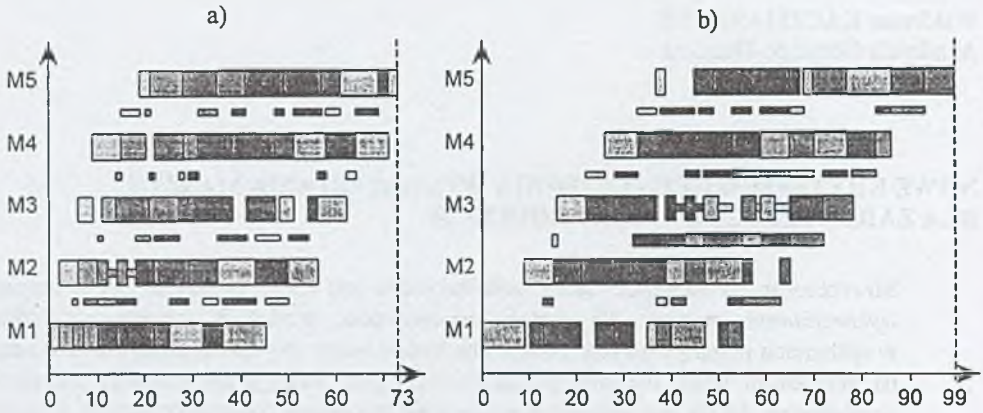
**Summary.** In this paper is presented new *machine utilization criterion* for production scheduling, mainly in flow shop systems. This criterion describes maximal machine utilization over many production periods, which do not lead to rising production delays. It might be used instead of schedule length criterion $C_{max}$. In the paper are presented results of calculations for both of these criteria's.

## 1. Wprowadzenie

Istotnym elementem wpływającym na jakość harmonogramowania produkcji w systemach przepływowych może być sposób traktowania **obciążenia wstępnego maszyn**, a więc wszystkich operacji z poprzedniego planu produkcyjnego, które nie zostały jeszcze wykonane, ale które będą wykonane zgodnie ze starym harmonogramem produkcyjnym jeszcze przed rozpoczęciem wykonywania następnego planu. Obciążenie wstępne opisać można podając dla każdej maszyny $k$ w stadium $i$ **moment gotowości** $R_{ik}$, tzn. podając, od kiedy poszczególne maszyny dostępne będą dla operacji z nowego planu.

Na rysunku 1 przedstawione są dwa rozwiązania tego samego permutacyjnego zadania przepływowego z pojedynczymi (tj. o pojemności 1) buforami pomiędzy maszynami. Na rysunku 1.a) przedstawione jest rozwiązanie uważane za „dobre", tzn. z krótkim $C_{max}$, natomiast na rysunku 1.b) rozwiązanie „złe", tzn. z długim $C_{max}$. W obu uszeregowaniach

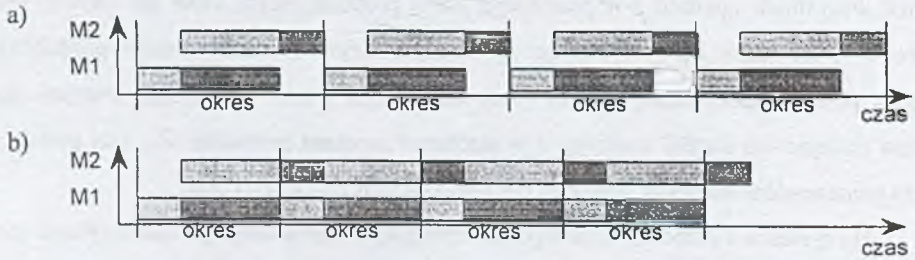
przesunięto „do przodu", tak daleko jak to było tylko możliwe, wszystkie operacje, z wyjątkiem operacji ostatniego wyrobu.




Rys.1. Dwa rozwiązania permutacyjnego zagadnienia przepływowego a) krótkie i b) długie
Fig.1. Two solutions of a permutation flow shop problem a) short and b) long

Wyraźnie widać, że długość przestojów maszyn *pomiędzy* pierwszym i ostatnim wyrobem jest mniej więcej taka sama w obu uszeregowaniach. W szczególności w dłuższym uszeregowaniu na maszynie M4 nie ma żadnych przestojów. Różnią się więc one głównie „przestojami" ostatnich maszyn na początku i pierwszych maszyn na końcu uszeregowania, tzn. przed rozpoczęciem pierwszych i po zakończeniu ostatnich operacji.

Co by się stało, gdyby te przestoje wypełnione zostały przez operacje z wcześniejszego bądź późniejszego okresu produkcyjnego, tak jak to pokazano na rysunku 2.? Na rysunku 2.b) harmonogramy „nakładają się na siebie", dzięki czemu przestoje maszyn, drugiej na początku i pierwszej na końcu każdego okresu, zostały wyeliminowane. Czy nie zmienia to naszego postrzegania zagadnienia przepływowego?




Rys.2. Wielookresowe harmonogramy produkcyjne a) bez i b) z obciążeniem wstępnym
Fig.2. Multi–period production schedules a) without and b) with initial work-in-process

W tej pracy przedstawione zostanie nowe kryterium oceny jakości rozwiązań generowanych przez algorytmy szeregowania, uwzględniające występowanie obciążenia wstępnego maszyn. Przedstawione zostaną wyniki obliczeń dla tego kryterium przy użyciu dobrze znanych algorytmów szeregowania.

## 2. Stopień wykorzystania maszyn

W wielu zakładach produkcyjnych stopień wykorzystania maszyn jest najbardziej istotnym kryterium sterowania produkcją i dlatego winien on być jednym z głównych kryteriów oceny wyników generowanych przez algorytmy harmonogramowania produkcji. W teorii szeregowania kryterium to zastępowane jest minimalizacją długości uszeregowania $C_{max}$ (Dudek [2]). Czy słusznie?

W zakładach pracujących w trybie wielozmianowym zapewne nie, gdyż kryterium $C_{max}$ ocenia jedynie pojedyncze harmonogramy (okresy produkcyjne) i nie bierze pod uwagę obciążenia wstępnego maszyn. W tym rozdziale zaproponowany zostanie odmienny sposób szacowania stopnia wykorzystania maszyn, który następnie będzie wykorzystany do oceny znaczenia obciążenia wstępnego, a tym samym użyteczności kryterium $C_{max}$.

Niech $W$ oznacza **obciążenie maszyn**. Dla zagadnienia przepływowego obciążenie maszyn $W$ można wyznaczyć jako największą sumę czasów wykonywania operacji przypadających na jedna maszynę: $W = \max_{i \in S} \sum_{j \in N} p_{ij}$, gdzie $S_i$ to zbiór maszyn (stadiów), $N$ – zbiór wyrobów, a $p_{ij}$ czasy wykonywania operacji.

Jeśli w stadiach są maszyny równoległe, to obciążenie maszyn w danym stadium wyznaczyć można jako optymalną wartość funkcji celu zagadnienia maszyn równoległych z operacjami podzielnymi, a więc $P|preem|C_{max}$ dla maszyn identycznych oraz $R|preem|C_{max}$ dla maszyn dowolnych. Obciążenie maszyn całego systemu można wtedy wyznaczyć jako największe obciążenie jednego ze stadiów.

Przy planowaniu wielkości produkcji uwzględnia się ograniczenia potencjału produkcyjnego w postaci dostępnego czasu pracy maszyn. **Maksymalną, dopuszczalną** *wartość obciążenia maszyn* $W_{max}$, to znaczy największą wartość, jaką można przyjąć w planie produkcyjnym, wyznaczyć można ze wzoru:

$$W_{max} = \eta \lambda, \tag{1}$$

gdzie $\lambda$ to **długość okresu produkcyjnego**, a $\eta$ to współczynnik z przedziału $(0,1)$.

Zastosowanie takiego współczynnika „bezpieczeństwa" $\eta$ zapewnia pewien zapas czasu. Jest to konieczne, gdyż nigdy nie jest możliwe pełne wykorzystanie zdolności

produkcyjnych (Schneeweiß [5] str. 92–94 i str. 192–193). $\eta$ opisuje więc **zakładany maksymalny** *stopień wykorzystania maszyn*.

W rzeczywistym procesie planowania produkcji wartość $\eta$ przyjmowana jest na podstawie doświadczenia i uśrednionych wyników symulacji procesu produkcyjnego. Gdyby planowanie wielkości produkcji i jej harmonogramowanie były wykonywane w tym samym momencie, to można by było obliczyć harmonogram i sprawdzić czy dany plan produkcyjny można wykonać w trakcie jednego okresu produkcyjnego, czy też nie. Ale niestety, te dwa etapy planowania nie są wykonywane równocześnie, stąd określając wielkość produkcji trzeba posługiwać się prawdopodobną wartością $\eta$. Zakładany stopień wykorzystania maszyn musi między innymi uwzględniać ryzyko wynikające z faktu, że długość harmonogramu $C_{max}$ dla danej wartości obciążenia maszyn $W$ może się wahać w dość szerokich granicach.

Przyjmując pewien plan produkcyjny zakłada się, że zostanie on wykonany w trakcie jednego okresu produkcyjnego. Wahania wartości $C_{max}$ stwarzają jednak ryzyko, że plan produkcyjny zostanie wykonany z pewnym opóźnieniem $L$, które wynika z różnicy pomiędzy $C_{max}$ a długością okresu produkcyjnego $\lambda$:

$$L = C_{max} - \lambda \,. \tag{2}$$

Chcąc zmniejszyć ryzyko takiego opóźnienia $L$ trzeba zwiększyć dysponowany zapas czasu, a więc zmniejszyć zakładany stopień wykorzystania maszyn $\eta$. I odwrotnie, aby zwiększyć stopień wykorzystania maszyn, trzeba zmniejszyć ten zapas, co niesie ze sobą zwiększone ryzyko, że harmonogram będzie dłuższy od okresu produkcyjnego.

## 3. Wyznaczanie maksymalnego, osiągalnego stopnia wykorzystania maszyn

Niech $R_{ik}(t-1)$ oznacza czas zakończenia ostatniej operacji na maszynie $k$ w stadium $i$ w okresie $t-1$, a $R^0_{ik}(t)$ obciążenie początkowe tejże maszyny w okresie $t$. W celu uproszczenia eksperymentów obliczeniowych należy przyjąć, że moment rozpoczęcia każdego nowego okresu produkcyjnego odpowiada chwili zero. Dzięki temu, na użytek eksperymentów obliczeniowych, obciążenie początkowe maszyny $k$ w stadium $i$ w okresie $t$ można wyznaczyć ze wzoru:

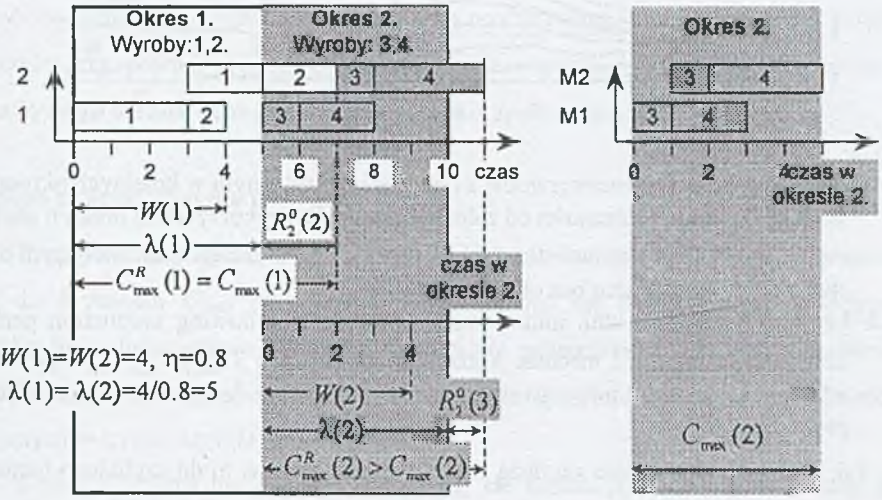
$$R^0_{ik}(t) = \max\{0, R_{ik}(t-1) - \lambda\} \,. \tag{3}$$

Proces planowania wielkości produkcji dla okresu produkcyjnego $t$ o zadanej długości $\lambda$ jest dość złożony i odtwarzanie go przy generowaniu przykładów do eksperymentów obliczeniowych byłoby zajęciem karkołomnym. Dużo łatwiej jest wygenerować losowo

kolejny plan produkcyjny w okresie $t$, a następnie dobrać długość okresu produkcyjnego dla zakładanej wartości $\eta$ zgodnie z równaniem:

$$\lambda(t) = W(t) / \eta \,. \tag{4}$$

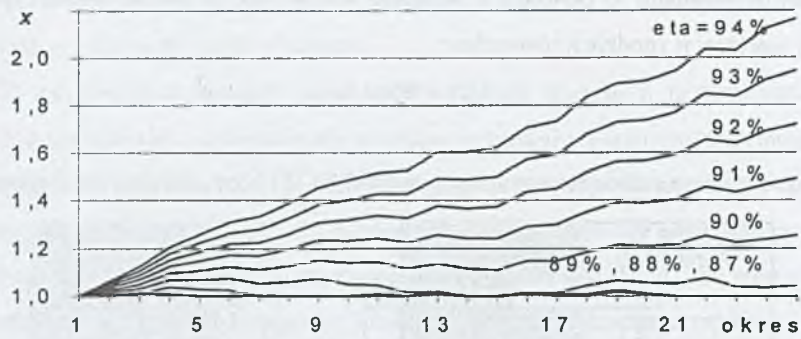
a) Szeregowanie z obciążeniem wstępnym ($\eta$=0.8) b) i bez obciążenia wstępnego




Rys.3. Wyznaczanie harmonogramów z obciążeniem wstępnym
Fig.3. Determining schedules with initial work in process

Niech $C_{max}(t)$ oznacza długość harmonogramu bez obciążenia wstępnego w okresie $t$, a $C_{max}^R(t)$ długość harmonogramu z obciążeniem wstępnym w okresie $t$. Przebieg obliczeń dla każdego nowego przykładowego zadania (tj. w okresie $t$) wygląda następująco. Najpierw należy wygenerować dane zadania, wyznaczyć obciążenie maszyn $W(t)$ oraz harmonogram, między innymi $C_{max}^R(t)$, uwzględniając przy tym obciążenia wstępne maszyn $R_{ik}^0(t)$ wyznaczone za pomocą poprzedniego zadania (tj. z okresu $t$-1). Następnie trzeba obliczyć długość okresu produkcyjnego $\lambda(t)$ (równanie (4)), a za jego pomocą wielkość obciążeń początkowych $R_{ik}^0(t+1)$ dla następnego zadania ze wzoru (równanie (3)). Na rysunku 3 przestawiony jest przykład wyznaczania harmonogramów z obciążeniem wstępnym maszyn.

Na rysunku 4 przestawione są wyniki takich obliczeń dla permutacyjnego zagadnienia przepływowego z pojedynczymi buforami, liczbą wyrobów $n$ = 20 i liczbą maszyn $m$ = 3 dla wielu różnych wartości $\eta$ za pomocą algorytmu CDS (Campbell [3]).




Rys.4. Zmiany długości harmonogramów z obciążeniem wstępnym w kolejnych okresach produkcyjnych $t$ w zależności od założonego stopnia wykorzystania maszyn **eta** (η). x = $C^R_{\max}/C_{\max}$ — stosunek długości harmonogramu z obciążeniem wstępnym do długości harmonogramu bez obciążenia wstępnego

Fig.4. Length of schedule with initial work-in-process in following production periods t according to assumed machine utilization **eta** (η). x = $C^R_{\max}/C_{\max}$ — quotient of schedule length with initial work-in-process to schedule length without initial work-in-process

Jak widać, jeśli przyjmie się dużą wartość η, to prowadzi to do szybkiego narastania zaległości produkcyjnych. Zmniejszając η zmniejsza się zarazem nachylenie krzywej. Naturalną granicą zmniejszania η jest moment, gdy krzywa będzie się niemal pokrywać z osią poziomą. I właśnie ta graniczna wartość $\eta_{max}$ jest interesującą nas maksymalną, osiągalną wartością stopnia wykorzystania maszyn.

**Maksymalny, osiągalny stopień wykorzystania maszyn $\eta_{max}$ jest to największy stosunek obciążenia maszyn $W$ do długości okresu produkcyjnego λ, przy którym nie narastają zaległości produkcyjne $R^0$.**

Niech $\overline{C}_{\max}$ oznacza średnią długość uszeregowań z obciążeniem wstępnym, tzn. $\overline{C}_{\max} = 1/t_{\max}\sum_{t=1}^{t_{\max}} C_{\max}(t)$, a $\overline{C}^R_{\max}$ średnią długość uszeregowań otrzymanych dla tych samych zadań, ale bez uwzględnienia obciążenia wstępnego, tj. $\overline{C}^R_{\max} = 1/t_{\max}\sum_{t=1}^{t_{\max}} C^R_{\max}(t)$. Aby obliczyć wartość $\eta_{max}$ trzeba znaleźć największą wartość η, przy której obciążenie wstępne „praktycznie nie wpływa" na długość harmonogramów. Zatem $\eta_{max}$ można zdefiniować jako największą wartość η, dla którego po upływie pewnej liczby okresów $t_{max}$ wartość $\overline{C}^R_{\max}$ będzie większa od $\overline{C}_{\max}$ o mniej niż ρ procent:

$$\eta_{\max} = \max\left\{ \eta \in [0,1]:\ 100 * \frac{\overline{C}^R_{\max} - \overline{C}_{\max}}{\overline{C}_{\max}} < \rho \right\}. \tag{5}$$

$\rho$ jest więc wartością dopuszczalną błędu, a $t_{max}$ to liczba okresów, podczas których algorytm poddawany jest próbie.

Założenie stopnia wykorzystania maszyn $\eta$ na poziomie $\eta_{max}$ nie oznacza, że w ogóle nie będzie żadnego obciążenia początkowego, gdyż obciążenie początkowe wynikające z wahań $C_{max}$ pozostanie. Nie będzie natomiast narastania obciążenia początkowego, które byłoby równoznaczne z przeciążeniem systemu produkcyjnego, tzn. narastaniem zaległości, i wcześniej czy później wymusiłoby zmniejszenie współczynnika $\eta$. W tym sensie $\eta_{max}$ można by więc określić jako *stabilny* stopień wykorzystania maszyn.

## 4. Ogólna charakterystyka nowego kryterium

Proponowane kryterium oceny algorytmów ma swoje wady i zalety. W przeciwieństwie do kryterium $C_{max}$ nie można go zastosować do oceny jakości pojedynczego uszeregowania, lecz jedynie do oceny sumy wielu uszeregowań i to pod warunkiem, że uwzględniane jest obciążenie wstępne. Tak więc może i powinno być stosowane w zakładach pracujących w trybie ciągłym, tj. na trzy zmiany.

Cechę tę można potraktować jako wadę, ale można ją też uznać za istotną zaletę. Wszak $\eta_{max}$ jest stałą charakteryzującą cały proces produkcyjny, który ze względu na sposób generowania planów produkcyjnych jest procesem losowym. Stosując kryterium $C_{max}$ trzeba badać nie tylko wyniki średnie, ale także maksymalne i minimalne. W przypadku $\eta_{max}$ te zmartwienia odpadają.

Wyznaczanie $\eta_{max}$ jest dość złożone, co nie tylko oznacza większy nakład obliczeń, ale i trudności przy precyzyjnym prezentowaniu wyników. Wartość $\eta_{max}$ do pewnego stopnia jest uzależniona od arbitralnie dobieranych parametrów $\rho$ oraz $t_{max}$. Kontrowersje może też dla różnych zagadnień wzbudzać sposób wyznaczania obciążenia maszyn $W$.

Nowe kryterium ma jednak również istotne zalety. Jest ono bliższe intuicyjnemu rozumieniu stopnia wykorzystania maszyn niż kryterium $C_{max}$. Tak więc, pozostając na pewnym poziomie ogólności, będzie można szybko porozumieć się z ludźmi odpowiedzialnymi za planowanie produkcji. $\eta_{max}$ uwzględnia obciążenie wstępne, które występuje we wszystkich zakładach pracujących na dwie, trzy zmiany. Stopień wykorzystania maszyn ma naturalne, nieprzekraczalne górne oszacowanie równe 1.

Kryterium maksymalnego stopnia wykorzystania maszyn $\eta_{max}$ można uzupełnić o dodatkowy parametr istotny przy projektowaniu samego procesu planowania produkcji. Chodzi o wartość opóźnienia $L$, to znaczy różnicę pomiędzy długością harmonogramu

a długością okresu produkcyjnego $C_{max}(t) - \lambda(t)$. Wielkość ta zależy pośrednio od przyjętej wartości $\eta$. Dla $\eta_{max}$ opóźnienie będzie przyjmowało największe wartości, natomiast w miarę zmniejszania $\eta$ opóźnienie będzie zbliżało się do zera.

W rzeczywistym procesie produkcyjnym opóźnienie $L$ można zmniejszyć rozpoczynając wykonywanie operacji z kolejnego okresu $t$ jeszcze podczas okresu $t-1$, od razu jak tylko zwolnią się potrzebne do tego maszyny. W ten sposób różnica $C_{max} - \lambda$ rozkłada się na dwa okresy produkcyjne $t-1$ oraz $t+1$, a rzeczywiste opóźnienie, a więc czas wykonywania operacji przeniesionych do okresu $t+1$ jest mniejsze. W ten sposób pomiar opóźnień jest istotny nie tylko przy ocenie wielkości ryzyka, że plany produkcyjne nie zostaną terminowo wykonane, ale również dla określenia wyprzedzenia, z jakim można bądź należy planować i rozpoczynać wykonywanie każdego kolejnego planu produkcyjnego.

## 5. Wyniki obliczeń

Aby ocenić czy proponowane kryterium wnosi coś nowego do oceny efektywności algorytmów przeprowadzono obliczenia dla permutacyjnego zagadnienia przepływowego z pojedynczymi buforami z liczbą maszyn $m = 5$, 10 oraz liczbą wyrobów $n = 10,20,\ldots,100$. Dla każdego zestawu parametrów $m$ i $n$ obliczono po 10 przykładów. We wszystkich przykładach zastosowano $\rho = 1$ oraz $t_{max} = 100$. Obliczenia wykonano z dokładnością do 1%.

Uwzględniono następujące algorytmy: **Lok** – prosty algorytm lokalnego przeszukiwania, stosujący wymianę pozycji dwóch wyrobów, **Los** – losowo wybrana sekwencja, **L00** – najlepsza spośród 100 losowo wybranych sekwencji, **Pal** – algorytm Palmera [4], **CDS** – algorytm CDS [1], **NEH** – algorytm NEH [3].

Wyniki dla 5 maszyn przestawione są w tablicy 1 a dla 10 maszyn w tablicy 2. Należy zwrócić uwagę na kilka szczególnie interesujących wyników. Przede wszystkim podawane w tablicy 1 wartości $\eta_{max}$ dla prostego (!) algorytmu ulepszającego oraz algorytmu **NEH** są bardzo wysokie, co mogłoby oznaczać, iż tak naprawdę stopnia wykorzystania maszyn nie można już za pomocą algorytmów szeregowania dalej poprawić! Dla 10 maszyn te wyniki są nieco gorsze, ale wynik 96% też jest zaskakująco dobry.

Tablica 1

Wartości $C_{max}$ i $\eta_{max}$ dla zagadnienia przepływowego z 5 maszynami

| | Los | | L00 | | Pal | | CDS | | NEH | | Lok |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | C | E | C | E | C | E | C | E | C | E | $\eta_{max}$ [%] |
| 10 | 15,7 | 4,6 | 3,6 | 0,6 | 5,1 | 5,0 | 3,6 | 4,4 | 0,9 | 1,3 | 94,7 |
| 20 | 15,2 | 7,3 | 6,3 | 2,9 | 6,8 | 8,2 | 4,7 | 6,9 | 1,0 | 1,0 | 97,8 |
| 30 | 14,4 | 8,2 | 7,2 | 4,4 | 9,2 | 11,1 | 6,0 | 8,5 | 0,9 | 0,6 | 98,1 |
| 40 | 14,3 | 9,0 | 7,9 | 5,4 | 11,8 | 13,0 | 7,9 | 10,3 | 0,8 | 0,7 | 98,4 |
| 50 | 14,1 | 9,6 | 8,4 | 6,0 | 13,6 | 14,4 | 9,5 | 11,5 | 0,7 | 0,5 | 98,5 |
| 60 | 13,9 | 10,2 | 8,8 | 6,8 | 15,1 | 15,2 | 10,8 | 12,5 | 0,7 | 0,7 | 98,7 |
| 70 | 13,9 | 10,7 | 9,1 | 7,2 | 16,3 | 16,0 | 11,9 | 13,5 | 0,7 | 0,8 | 98,8 |
| 80 | 13,7 | 10,6 | 9,4 | 7,6 | 17,1 | 16,4 | 12,8 | 14,3 | 0,6 | 0,8 | 98,8 |
| 90 | 13,8 | 10,7 | 9,8 | 8,0 | 17,8 | 17,0 | 13,6 | 14,7 | 0,6 | 0,8 | 98,9 |
| 100 | 13,8 | 11,0 | 9,9 | 8,1 | 18,3 | 16,9 | 14,2 | 15,0 | 0,5 | 0,7 | 98,8 |

$n$ – liczba wyrobów, **E** – różnica $\eta_{max}$ dla danego algorytmu i algorytmu **Lok**, **C** – średnia, względna różnica $C_{max}$ dla danego algorytmu i algorytmu **Lok**, tj. $\mathbf{C(alg)} = 1/t_{\max} \sum_{t=1}^{t_{\max}} \left(C_{\max}(\mathbf{alg},t)/C_{\max}(\mathbf{Lok},t) - 1\right) * 100$, gdzie $C_{max}(\mathbf{alg},t)$ to wartość zwykłego $C_{max}$ (tzn. bez uwzględniania obciążenia wstępnego) dla algorytmu **alg** w okresie $t$. Dla każdej wartości $n$ przedstawiona jest wartość średnia 10 przykładów (z $t_{max}$=100 każdy).

Wartości **C** oraz **E** podane w obu tablicach ilustrują odległość dzielącą dany algorytm od najlepszego algorytmu, jakim był algorytm lokalnego przeszukiwania **Lok**. I tak należy zwrócić uwagę, iż ta „odległość" dla algorytmu Palmera (**Pal**) jest dla obu kryteriów bardzo podobna, różnica pomiędzy nimi wynosi przeciętnie 1%. Natomiast dla rozwiązań losowych (**Los** i **L00**) jest bardzo duża — z uwagi na kryterium $\eta_{max}$ algorytmy te wypadają znacznie lepiej niż z uwagi na kryterium $C_{max}$. Może to oznaczać, że stosowanie algorytmów szeregowania ma mniejszy wpływ na stopień wykorzystania maszyn niż by to sugerowały wyniki uzyskiwane dla kryterium $C_{max}$.

Tablica 2

Wartości $C_{max}$ i $\eta_{max}$ dla zagadnienia przepływowego z 10 maszynami

| | Los | | L00 | | Pal | | CDS | | NEH | | Lok |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | C | E | C | E | C | E | C | E | C | E | $\eta_{max}$ [%] |
| 10 | 14,1 | 2,6 | 3,7 | -0,2 | 5,1 | 3,9 | 3,2 | 3,5 | 1,0 | 1,0 | 89,9 |
| 20 | 15,7 | 3,6 | 7,5 | 0,8 | 6,5 | 4,3 | 5,3 | 4,4 | 1,3 | 1,2 | 93,3 |
| 30 | 15,8 | 5,0 | 8,9 | 2,2 | 7,1 | 5,7 | 6,0 | 5,3 | 1,2 | 0,8 | 94,7 |
| 40 | 15,7 | 6,5 | 9,4 | 3,4 | 7,7 | 6,9 | 6,4 | 6,6 | 1,2 | 0,8 | 95,4 |
| 50 | 15,3 | 7,2 | 9,8 | 4,6 | 8,3 | 8,1 | 6,7 | 7,4 | 1,1 | 0,7 | 95,8 |
| 60 | 15,0 | 7,5 | 10,0 | 5,0 | 8,9 | 8,9 | 7,1 | 8,1 | 1,0 | 0,6 | 96,0 |
| 70 | 14,8 | 7,8 | 10,2 | 5,2 | 9,8 | 9,9 | 7,6 | 8,5 | 0,9 | 0,4 | 96,0 |
| 80 | 14,6 | 8,1 | 10,3 | 5,9 | 10,6 | 10,2 | 8,1 | 9,1 | 0,8 | 0,4 | 96,0 |
| 90 | 14,4 | 8,5 | 10,4 | 6,0 | 11,3 | 11,0 | 8,7 | 9,6 | 0,7 | 0,3 | 96,0 |
| 100 | 14,1 | 8,3 | 10,5 | 6,1 | 12,0 | 11,3 | 9,2 | 9,9 | 0,7 | 0,2 | 96,0 |

Ciekawie prezentuje się też zestawienie wyników najlepszego spośród 100 losowych rozwiązań (L00) z wynikami algorytmu Palmera (Pal) i algorytmu CDS (CDS). O ile z uwagi na kryterium $C_{max}$ algorytm L00 jest lepszy od dwóch pozostałych jedynie przy dużej liczbie wyrobów i małej liczbie maszyn, o tyle z uwagi na kryterium $\eta_{max}$ jest wyraźnie lepszy niezależnie od liczby wyrobów i maszyn.

Pomimo pewnej zbieżności wyników dla obu kryteriów trzeba się więc liczyć z możliwością, że będą one prowadzić w pewnych przypadkach do odmiennych wniosków o użyteczności algorytmów. Wydaje się więc, że obciążenie wstępne w istotny sposób wpływa na wyniki obliczeń, a tym samym nie powinno być ignorowane, jak to ma miejsce w kryterium $C_{max}$. Zważywszy na ten fakt oraz na istotne zalety proponowanego kryterium $\eta_{max}$ jego stosowanie wydaje się być uzasadnione tak w pracach badawczych, jak i przy wyborze metod harmonogramowania dla rzeczywistych systemów produkcyjnych.

## LITERATURA

1. Campbell H.G., Dudek R.A., Smith M.L.: A Heuristic Algorithm for the n Job, m Machine Sequencing Problem, Management Science, 16, 1970, pp. B630–B637.
2. Dudek R.A., Panwalker S.S., Smith M.L.: The lessons of flow shop scheduling research, Operations Research, 1993, pp. 7–13.
3. Nawaz M., Enscore Jr E.E., Ham I.: A heuristic algorithm for the m–machine, n–job flow shop sequencing problem, OMEGA International Journal of Management Science, 11(1), 1983, pp. 91–95.
4. Palmer D.S.: Sequencing Jobs Through a Multi–Stage Process in The Minimum Total Time – A Quick Method of Obtaining a Near Optimum, Operations Research Quart*erly*, 16, 1965, pp. 101–107.
5. Schneeweiß Ch.: Einführung in die Produktionswirtschaft, Springer–Verlag, Berlin, 1992.

Recenzent: Dr hab. inż. E.Nowicki

**Abstract**

In this paper is presented a new criterion for production scheduling algorithms. This criterion measures machine utilization in the whole production system over many production periods. In every period it takes into account initial work–in–process resulting from production delays in previous periods. In the paper has been showed why initial work–in–process is important for flow shop systems. New criterion might be used instead of well–known $C_{max}$ criterion.

The main advantage of proposed criterion is his similarity to native understanding of machine utilization. It seems also to be more appropriate than $C_{max}$ criterion for production systems working in continuous mode and it has natural upper bound equal 1. Finally this

criterion estimates the whole multi period production process and gives as result only one deterministic number so that any stochastic analysis is not necessary.

Comparison of computational results for permutation flow shop showed that new criterion leads sometimes to different conclusions about algorithms quality then $C_{max}$ criterion. Also the difference, between random and optimized solutions, seems to be smaller for new criterion than for $C_{max}$. Machine utilization estimated for simple local search heuristics is very close to the upper bound of 100%.

For that reasons proposed criterion seems to be very useful for both research and practice and can not be replaced by $C_{max}$ criterion.