ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI SLĄSKIEJ 1978
Seria: AUTOMATYKA z. 43 Nr kol. 579

Jan Szadkowski, Władysław Jakubiec, Henryk Migdacz
Politechnika Łódzka

MODELOWANIE PROCESU WYMIANY GRUP NARZĘDZI W LINIACH AUTOMATYCZNYCH OBRÓBKI SKRAWANIEM

Streszczenie. Jedną z przesłanek automatyzacji procesu wymiany narzędzi w liniach automatycznych jest przejście na wymianę grup narzędzi, w miejsce wymian indywidualnych.
Wybór strategii "harmonogramu/ wymiany grupowej powinien uwzględniać całokształt efektów techniczno-ekonomicznych oraz - w formie ograniczeń - warunki specjalne, związane np. z zastosowaniem robotów przemysłowych.
Referat zawiera informacje o metodzie optymalizacji harmonogramów wymiany grup narzędzi z uwzględnieniem wymienionych warunków.

Wymiana narzędzi w liniach automatycznych obróbki skrawaniem pozostaje stale jeszcze dziedziną procesów pomocniczych, do której automatyzacja wkracza stosunkowo powoli. Jest to spowodowane wysokimi kosztami odpowiednich urządzeń.
Jednym z ogólnych kierunków podnoszenia efektywności pracy linii jest przechodzenie na wymianę grup narzędzi w miejsce indywidualnych wymian każdego narzędzia w chwili osiągnięcia kryterium stępienia ostrza [1]. Z punktu widzenia teorii niezawodności i odnowy jest to problem przedsięwzięć zwanych cykliczną uprzedzającą wymianą elementów lub też wymianą planowo-zapobiegawczą. Zagadnieniem tym zajęli się autorzy w ramach pracy wykonanej na zlecenie Fabryki Samochodów Małolitrażowych w Bielsku-Białej. Opracowanie tego zagadnienia od strony teorii skrawania oraz efektów technicznych i ekonomicznych pracy linii automatycznych zostało przedstawione w innej publikacji [2].
W referacie autorzy chcą zwrócić uwagę na możliwość połączenia idei wymiany narzędzi grupami z automatyzacją procesu wymiany narzędzi. Wymiana grup narzędzi umożliwia stworzenie racjonalnego kompromisu pomiędzy:

- kosztami urządzeń automatycznej wymiany, których liczba może w tym przypadku ulec zmniejszeniu, przy równoczesnym wykorzystaniu automatów o uniwersalnym charakterze - typu robotów przemysłowych,
- stratami, spowodowanymi przerwami w pracy linii na dokonanie wymian narzędzi.

Ze względu na ograniczoną objętość tekstu autorzy pragną skoncentrować się na zagadnieniu wyboru optymalnych harmonogramów wymiany grup narzędzi, ze szczególnym uwzględnieniem ograniczeń nakładanych na strukturę harmonogramów przez postulat zrealizowania automatycznej wymiany. Przy uwzględnieniu takich ograniczeń, wyrażających się wyborem harmonogramów o małej liczbie tzw. faz /składników strukturalnych/ oraz stosunkowo dużej średniej liczbie grup narzędzi wymienianych w każdej fazie, zadanie jest rozwiązane metodą Monte Carlo, z uwzględnieniem polioptymalizacji.
Dla prostoty i przejrzystości rozważań wprowadza się pojęcia cyklu, modułu oraz harmonogramu wymiany grup narzędzi. Dla ustalonej liczby m grup narzędzi cykl tworzy m-ka nie powtarzających się liczb naturalnych. Dla wygody liczby te będą w dalszym ciągu traktowane jako uporządkowane w kolejności rosnącej.

Harmonogramem wymiany grup narzędzi będzie nazwana reguła przyporządkowująca każdej grupie narzędzi jej terminu wymiany.
Wprowadzając bardzo niewielkie ograniczenie wynikające z potrzeb praktyki i postulując, aby przedziały czasu τ_i, po których wymienia się poszczególne grupy narzędzi, były liczbami wymiernymi /w praktyce budując harmonogramy zawsze posługujemy się liczbami wymiernymi/, dochodzimy do zależności :

$$\tau_1 : \tau_2 : \ldots : \tau_m = \alpha_1 : \alpha_2 : \ldots : \alpha_m$$

Zgodnie z powyższym:

$$\forall i : \quad \frac{\tau_i}{\alpha_i} = \delta = \text{const}$$

Liczbę δ nazywamy modułem harmonogramu.
Z kolei definiując wielkość A jako najmniejszą wspólną wielokrotność /NWW/ liczb $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$

$$A = \text{NWW}\{\alpha_i\} \; ; \quad i = 1, 2, \ldots, m$$

można wprowadzić pojęcie okresu powtarzalności harmonogramu τ, zdefiniowanego jako : $\tau = \delta \cdot A$.
W ciągu czasu τ /jeżeli nie uwzględnia się czasów wymian narzędzi/ i-ta grupa narzędzi jest wymieniana ε_i razy :

$$\varepsilon_i = \frac{\tau}{\tau_i} = \frac{A}{\alpha_i}$$

Harmonogram /rozpatrywany w dalszym ciągu w ramach jednego okresu powtarzalności/ składa się z pewnej liczby f faz wymian.
Fazę harmonogramu można określić formalnie jako parę złożoną z :

- zbioru indeksów grup narzędzi wchodzących w jej skład /wymienianych równocześnie/,
- liczby określającej wspólny termin wymiany tych grup narzędzi, rozpatrywany w ramach jednego okresu powtarzalności harmonogramu.

Definiując $\Pi(m,n)$ jako zbiór przyporządkowań n narzędzi m grupom, zbiór dopuszczalnych harmonogramów wymiany m grup narzędzi można przedstawić jako następujący iloczyn kartezjański :

$$H(m,n,a,b) = \Pi(m,n) \times C(m,a) \times \Delta(d)$$

gdzie:

$C(m,a)$ - zbiór cykli wymiany m grup narzędzi,

$\Delta(d)$ - zbiór modułów harmonogramu.

Terminy wymian /czasy między wymianami kolejnych faz/ zależą od modułu harmonogramu.
Grupowanie n narzędzi w m grup można sobie wyobrazić jako losowanie kolejno dla każdego narzędzia numeru grupy. Grupowaniu odpowiada więc procedura losowania ze zwracaniem n spośród m, przy czym kolejność losowania jest istotna. Numerem narzędzia jest wtedy numer losowania, a odpowiadającym mu indeksem grupy wynik tego losowania.
Tak zdefiniowane pogrupowania zawierają jednak przypadki, w których narzędzia zostały rozdzielone pomiędzy liczbę grup mniejszą od m $(m-1, m-2, \ldots, 1)$.
Poniżej zostanie przedstawiona metoda heurystyczna, pozwalająca na zawężenie zbioru harmonogramów do podzbioru, w którym ze znanym prawdopodobieństwem może znajdować się rozwiązanie optymalne.
Niech $h \in H$ będzie harmonogramem optymalnym. Optymalny harmonogram składa się z określonego pogrupowania $\pi_{opt} \in \Pi$, cyklu $c_{opt} \in C$ i modułu $\delta_{opt} \in \Delta$.
Znając charakterystyki niezawodnościowe /funkcje niezawodności $P(t) = 1 - F_T(t)$ / dla każdego narzędzia, harmonogram ten można scharakteryzować wektorem $\bar{X}_{opt}$, interpretowanym jako wektor poziomów niezawodności poszczególnych narzędzi.
Terminy wymian poszczególnych narzędzi po przekształceniu przez odpowiednie funkcje niezawodności wyznaczają poziomy niezawodności $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Wektor $\bar{X}_{opt.}$ o współrzędnych $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ jest więc wektorem optymalnych poziomów niezawodności. W ten sposób dochodzimy do wniosku, że zbiór harmonogramów H może być jednoznacznie odwzorowany w zbiór wektorów X. Problem poszukiwań rozwiązań optymalnych sprowadza się do zadania określenia optymalnego wektora poziomów niezawodności.
Można teraz zdefiniowany wcześniej zbiór harmonogramów H traktować jako odwzorowanie podzbioru następującego iloczynu kartezjanskiego :

$$H \longleftrightarrow \hat{H} \subseteq X \times C \times \Delta$$

gdzie X jest zbiorem wektorów poziomów niezawodności $\bar{X}$.
Do takiego wniosku prowadzi następujące rozumowanie: wybierając pewien $c \in C$ oraz $\delta \in \Delta$, otrzymujemy swego rodzaju "pusty harmonogram", którego fazy i wchodzące w ich skład grupy nie mają jeszcze przydzielonych narzędzi. Wybierając dowolnie wektor $\bar{X}(0 < x_i < 1)$, możemy przeprowadzić przypisanie narzędzi grupom.
Procedura budowy harmonogramów dla ustalonego wektora poziomów niezawodności $\bar{X}$, cyklu c oraz modułu δ będzie się składać z dwóch etapów :

- grupowania narzędzi,
- sprawdzania, czy otrzymane pogrupowanie π wraz z cyklem i modułem δ tworzy harmonogram.

Do omówienia zasad grupowania narzędzi posłużymy się pojęciem x -procentowego okresu trwałości zdefiniowanego następująco: jeżeli T jest "czasem życia" ostrza, to zgodnie z definicją funkcji niezawodności mamy:

$$P(t^{(x)}) = P_r(T \geqslant t^{(x)}) = x$$

gdzie: $P_r(T \geqslant t^{(x)})$ oznacza prawdopodobienstwo tego, że czas życia będzie nie mniejszy od $t^{(x)}$, a x jest liczbą z przedziału $\langle 0,1 \rangle$, określającą poziom niezawodności ; wówczas oznaczając przez P^{-1} funkcję odwrotną do P, otrzymujemy formułę definiującą $t^{(x)}$:

$$t^{(x)} = P^{-1}(x)$$

przy czym w sformułowaniach werbalnych wygodnie jest wyrazić x w procentach.
Zadany wektor poziomów niezawodności $\bar{X}(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ wyznacza dla każdego narzędzia odpowiadający mu x -procentowy okres trwałości wg zależności:

$$t_i^{(x)} = P_i^{-1}(x) \; ; \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

Do i-tej grupy zalicza się każde k-te narzędzie spełniające warunek:

$$\alpha_i \cdot \delta \leqslant t_{k(i)}^{(x)} < \alpha_{i+1} \cdot \delta \qquad \text{dla } i \leqslant m-1$$

$$t_{k(i)}^{(x)} > \alpha_i \cdot \delta \qquad \text{dla } i = m$$

gdzie k(i) będzie zbiorem indeksów narzędzi i-tej grupy $(i = 1, 2, \cdots, m)$.
Otrzymane pogrupowanie π wraz z cyklem c i modułem δ jest harmonogramem, jeżeli spełnione są warunki :

- każda z m grup zawiera przynajmniej jedno narzędzie, tzn. zbiór wskaźników narzędzi i-tej grupy jest niepusty dla każdego $i = 1, 2, \cdots, n$

$$\forall i : \; k(i) \neq \emptyset$$

- wszystkie narzędzia zostały objęte procesem grupowania, tzn. zachodzi warunek :

$$\bigcup_{i=1}^{m} k(i) = \{1, 2, \cdots, n\} \wedge \forall i \neq j : \; k(i) \cap k(j) = \emptyset$$

co jest równoważne:

$$\alpha_1 \cdot \delta \leqslant \min_{k(1)} \tau_{k(1)}^{(x)} ,$$

tzn. że najmniej trwałe narzędzie zostanie przypisane do pierwszej grupy.

Przykład grupowania narzędzi oraz sprawdzania czy otrzymane pogrupowania wraz z cyklami i modułami są harmonogramami dla danych :
$m = 5$, $n = 8$, $C = \{(1:2:3:4:6), (2:3:4:6:8)\}$, $\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4\}$
przedstawia rys. 1.
Żadany wektor poziomów niezawodności $\bar{X}$ wyznacza dla każdego narzędzia x_i - procentowy okres trwałości $t_i^{(x)}$ $(i = 1,2,\ldots,8)$. Dla cyklu $(1:2:3:4:6)$ i modułu δ_4 otrzymano następujące pogrupowanie:

grupa 3 - narzędzie nr 1
grupa 4 - narzędzie nr 2
grupa 5 - pozostałe narzędzia.

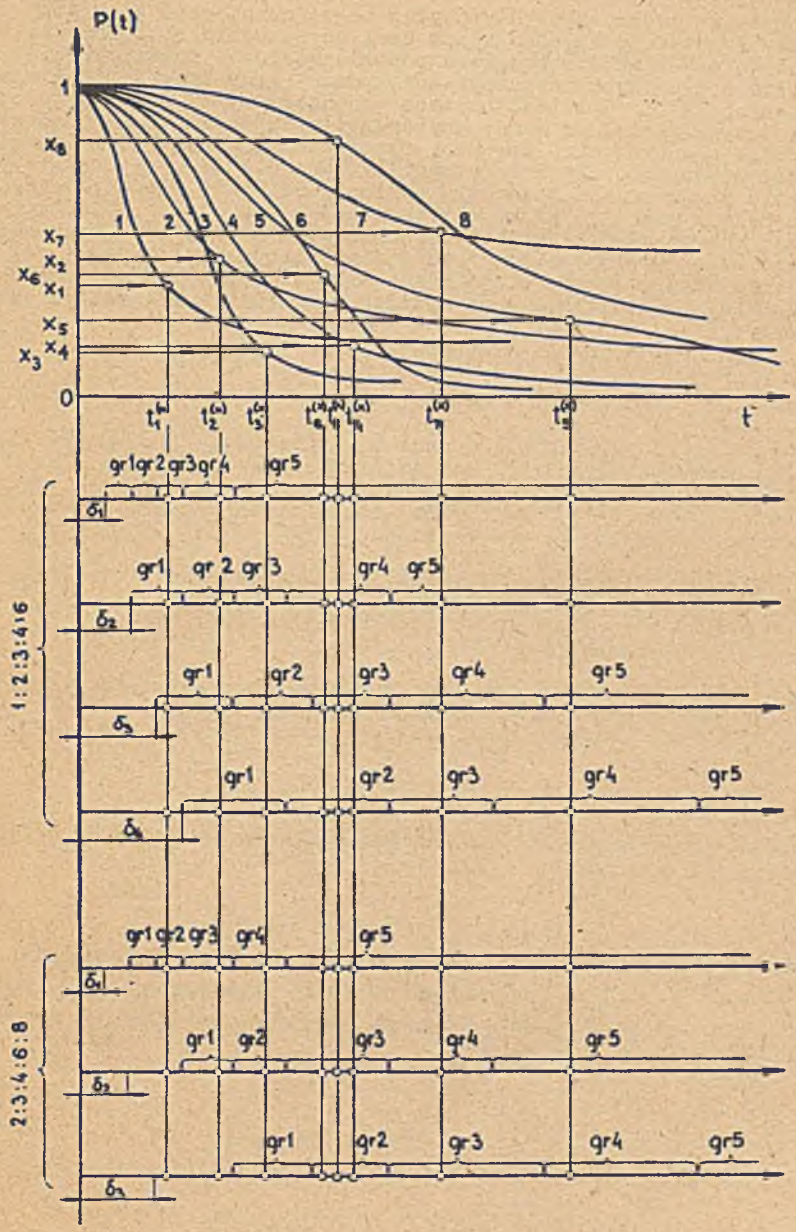
Ponieważ grupy 1 i 2 nie zawierają żadnych narzędzi, nie możemy tego przypadku uznać za harmonogram.
Dla tego samego cyklu i modułu δ_2 /podobnie dla δ_3 / otrzymano pogrupowania spełniające wcześniej omawiane warunki. Są to harmonogramy:

- h_1 : cykl $(1:2:3:4:6)$
  moduł δ_2
  gr. 1 - narzędzie nr 1
  gr.2 - narzędzie nr 2
  gr. 3 - narzędzie nr 3
  gr. 4 - narzędzia o numerach 6, 8, 4
  gr. 5 - narzędzia o numerach 7 i 5

- h_2 : cykl $(1:2:3:4:6)$
  moduł δ_3
  gr. 1 - narzędzia o numerach 1 i 2
  gr. 2 - narzędzie nr 3
  gr. 3 - narzędzia o numerach 6, 8, 4
  gr. 4 - narzędzie nr 7
  gr. 5 - narzędzie nr 5

Dla cyklu $(1:2:3:4:6)$ i modułu δ_4 nie otrzymano harmonogramu, gdyż narzędzie nr 1 nie zostało przypisane do żadnej grupy. W przypadku cyklu $(2:3:4:6:8)$ żadne pogrupowanie nie spełnia odpowiednich warunków, nie otrzymano więc harmonogramu.

Dobry, z punktu widzenia przydatności do budowy harmonogramów, cykl powinien charakteryzować się małą liczbą φ faz i dużą średnią liczbą ν grup w fazie. Mała liczba faz upraszcza program pracy robota, a w przypadku gdy sterowanie wymianą grup narzędzi nie jest zautomatyzowane, decyduje o wygodzie obsługi. Stosując harmonogramy o dużych średnich liczbach grup w fazie, można się spodziewać skrócenia łącznego czasu traconego na wymianę narzędzi, dzięki równoczesnym wymianom większych liczb narzędzi.
Wychodząc z założenia, że na oba parametry ma wpływ najmniejsza wspólna wielokrotność A liczb $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$, przeprowadzono następującą badanie. Wygenerowano przy użyciu komputera wszystkie cykle o $A \leq 100$ i wyznaczono dla każdego z nich liczbę faz i średnią liczbę grup w fazie. Liczba φ faz w jednym okresie powtarzalności harmonogramu jest nie większa od liczby A. Równość zachodzi dla przypadków cykli o $\alpha_1 = 1$. Średnia liczba grup w fazie dla ustalonego A może przyjmować szeroki wachlarz wartości. Dla małych A kresy dolne tych zakresów przyjmują wartości większe niż w przypadku większych A. Pozwala to na sformułowanie ogólnego wniosku, że cykle o małych A charakteryzują się dobrymi własnościami i te należy stosować do budowy harmonogramów wymian grup narzędzi. Traktując średnią liczbę grup w fazie ν jako ważniejszy parametr charakteryzujący cykl, sformułowano następujące zasady ograniczania zbioru C :



Rys. 1. Przykład grupowania narzędzi.

Spośród cykli o małych A / $A < A'$ / należy wybrać zbiór charakteryzujący się dużym $\vartheta(\vartheta > \vartheta')$. Wymaga sprawdzenia, czy tak określony zbiór cykli C charakteryzuje się dostateczną różnorodnością proporcji liczb $\alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_m$, a szczególnie $\alpha_1 : \alpha_m$. Jest to konieczne, by harmonogram mógł uwzględniać duże rozbieżności w proporcjach trwałości narzędzi, najbardziej i najmniej trwałych.

Na podstawie sformułowanych powyżej reguł opracowano algorytm generowania i selekcji harmonogramów oraz odpowiednie oprogramowanie, będące elementem składowym programu pozwalającego na rozwiązywanie zadań poszukiwania optymalnych harmonogramów wymiany grup narzędzi w liniach automatycznych [3] . Wyselekcjonowane harmonogramy są oceniane drogą symulacji z uwzględnieniem dwóch kryteriów: wydajności linii oraz kosztu jednostkowego produkowanych wyrobów. Oprogramowanie pozwala na uwzględnienie różnorodnych cech sposobu wymiany narzędzi oraz wykorzystanych do tego celu urządzeń. Zastosowanie polioptymalizacji zapewnia szczególnie wyczerpujący przegląd efektów technicznych i ekonomicznych, a znajomość zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto umożliwia kierownictwu przedsiębiorstwa dokonywanie wyboru strategii obsługi narzędziowej w sposób elastyczny, uwzględniający zmieniające się relacje pomiędzy optimum lokalnym - dla linii oraz optimum globalnym - dla całego przedsiębiorstwa.

LITERATURA

[1.] Szadkowski J., Jakubiec W., Migdacz H. - Struktura i optymalizacja cykli wymiany narzędzi w liniach automatycznych obróbki części samochodowych.
Krakowski Oddział PAN, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej. Kraków 1976.

[2.] Szadkowski J., Migdacz H., Jakubiec W. - Probleme der Zuverlässigkeit von automatischen Fertigungsstrassen.
22. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Hochschule. Ilmenau 1977.

[3.] Jakubiec W., Migdacz H. - Badanie efektywności cyklicznej wymiany uprzedzającej grup narzędzi w liniach automatycznych.
Praca doktorska, promotor Szadkowski J. Łódź 1978.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМЕНЫ РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Р е з ю м е

В работе даётся информация о методе оптимализации графиков замены инструментов, с точки зрения перехода от замен индывидуальных к заменам групповым, принимая во внимание технико-экономические эффекты, а также внедрение промышленных автоматов.

MODELLING THE TOOL-EXCHANGE PROCESS IN AUTOMATIC PRODUCTION LINES OF METAL-REMOVING MACHINE TOOLS

S u m m a r y

The paper presents a method for optimizing the group-exchange of tools taking into accounte a broad range of technico-economical consideration and special constraints, resulting from robot applications.