ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978
Seria: Automatyka z.44 Nr kol. 580

Marek Kacprzak
Politechnika Śląska

ZAGADNIENIA UKŁADANIA I REALIZACJI HARMONOGRAMÓW PRACY CENTRUM PRODUKCYJNEGO

Streszczenie. Przedstawiono zagadnienie układania harmonogramów pracy Centrum Produkcyjnego dyskretnego procesu przemysłowego. Omówiono możliwości realizacji harmonogramów przez system komputerowej automatyzacji Centrum Produkcyjnego.

1. Wstęp

Automatyzacja procesów produkcyjnych związana jest z zagadnieniami układania harmonogramów procesów produkcyjnych oraz realizacji tych harmonogramów przez System Komputerowej Automatyzacji.

Wymienione zagadnienia należą do najważniejszych problemów, które pojawiają się przy automatyzacji procesów produkcyjnych. W pracy rozpatrujemy je na przykładzie Centrum Produkcyjnego - dyskretnego procesu przemysłowego.

Organizację procesów produkcyjnych dzieli się zazwyczaj na: planowanie okresowe i planowanie operatywne.
Planowanie okresowe ustala długofalowy (od 1 tygodnia do 1 kwartału) plan produkcji, uwzględniając różne kryteria techniczno-ekonomiczne (np. wykonanie określonego zbioru detali w ustalonym czasie przy możliwie najmniejszych nakładach) oraz określa zmianowe zadania produkcyjne.
Planowanie operatywne ustala organizację produkcji na danej zmianie (tzn. dla każdego urządzenia określa kolejność zadań i czas ich realizacji), przyjmując najczęściej jako kryterium minimalizację czasu wykonania zadań zmianowych [2].

Planowanie operatywne dla Centrum Produkcyjnego prowadzi do rozwiązywania następującego zagadnienia Johnsona (zagadnienia planowania kalendarzowego):

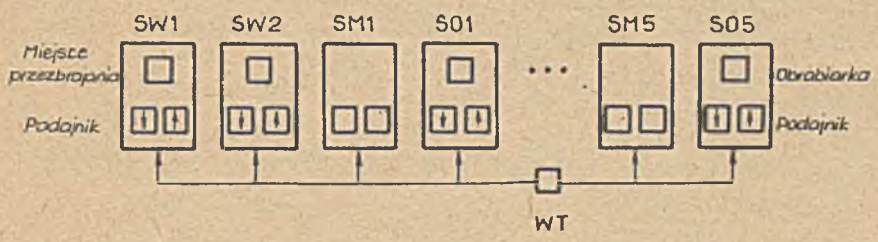
- dane jest N stacji i L detali, z których każdy jest obrabiany w określonej kolejności w pewnych stacjach,
- dane są czasy obróbki każdego detalu w każdej stacji; należy określić harmonogram, czyli ustalić kolejność przechodzenia detali przez każdą ze stacji tak, aby zminimalizować łączny czas wykonania wszystkich detali.

Mimo wielkiego praktycznego znaczenia zagadnienia Johnsona, jak dotąd, udało się je rozwiązać analitycznie jedynie dla przypadku N=2 stacji. Rozwiązanie optymalne (harmonogram optymalny) - oczywiście - zawsze istnieje, chociaż nie musi być jednoznaczne.

Brak jest jednak efektywnych algorytmów umożliwiających rozwiązanie zagadnienia Johnsona nawet tylko dla małej ilości detali, dla N>2.
Metoda bezpośredniego przeglądu /ułożenia wszystkich możliwych harmonogramów i wybrania optymalnego/ jest niewykonalna dla problemów praktycznych ze względu na olbrzymią ilość możliwych rozwiązań. W praktyce do rozwiązywania zagadnienia Johnsona stosuje się dwie grupy metod: analityczne i heurystyczne.
Metody analityczne polegają na: ułożeniu modelu matematycznego, określeniu kryterium w postaci funkcji celu, wprowadzeniu odpowiednich zmiennych decyzyjnych. W ten sposób zagadnienie Johnsona sprowadza się do programowania dyskretnego /czasem do programowania całkowitoliczbowego/, rozwiązując je jedną ze znanych metod przybliżonych [1]. Na ogół jednak w zagadnieniach praktycznych otrzymuje się w ten sposób zadania programowania dyskretnego, które ze względu na wielką wymiarowość nie dają się rozwiązać na maszynie cyfrowej.
Metody heurystyczne wykorzystują specyfikę konkretnego procesu popartą doświadczeniami osoby opracowującej harmonogram. Zadanie układania harmonogramu rozwiązuje się na maszynie cyfrowej.
Obie metody dają w wyniku rozwiązanie nieoptymalne; błędu rozwiązania nie można a priori oszacować.
W pracy przedstawiono zagadnienia układania harmonogramów i ich realizacji na przykładzie Systemu Komputerowej Automatyzacji SKSC-1 dla Centrum Produkcyjnego KOR-1.

2. Opis Centrum Produkcyjnego KOR-1

Centrum Produkcyjne KOR-1, którego budowa jest pokazana na rys. 1, składa się: z dwóch stacji wejściowo-wyjściowych SW, pięciu stacji obróbkowych SO, pięciu stacji magazynowych SM oraz z wózka transportowego WT.



Rys. 1 Struktura Centrum Produkcyjnego KOR -1

Każda stacja wejściowo-wyjściowa składa się z miejsca przezbrajania i podajnika. Każda stacja obróbkowa składa się z obrabiarki i podajnika. Obrabiarki są sterowane numerycznie; mają one wymieniany zestaw narzędzi. W CP KOR-1 stosowany jest paletowy sposób transportu detali. Detal przebywający w CP jest mocowany na stałe na palecie przy pomocy określonego typu uchwytu /przyrządu/.

Podajniki w stacjach SW i SO są magazynem dla palety wchodzącej do stacji i dla palety wychodzącej ze stacji. Łącznie w SW i SO mogą się znajdować co najwyżej trzy palety, w SM - dwie palety, na wózku transportowym - jedna paleta.
Nazwijmy urządzeniem każde z miejsc w CP, w którym może znajdować się paleta. W każdym urządzeniu może przebywać paleta z detalem zamocowanym przy pomocy uchwytu lub paleta pusta (bez detalu i bez uchwytu). Paleta z zamocowanym uchwytem może znajdować się tylko w miejscu przezbrajania. Palety pozostają w urządzeniach CP przez całą zmianę.
W CP KOR-1 obrabiane są zbiory różnych detali. Każdy detal surowy jest mocowany w miejscu przezbrajania przy pomocy określonego uchwytu na palecie. Następnie detal jest obrabiany w kolejnych, określonych dla danego detalu obrabiarkach. Detal gotowy jest zdejmowany z uchwytu w miejscu przezbrajania. W miejscach przezbrajania odbywają się również operacje mocowania uchwytu na palecie i zdejmowania uchwytu z palety.
Nie jest wymagana ciągłość obróbki detalu w kolejnych obrabiarkach.
Nie jest wymagana ciągłość pracy przez całą zmianę obrabiarki lub miejsca przezbrajania.
Palety z detalami surowymi, częściowo obrobionymi i gotowymi, mogą być przechowywane w stacjach magazynowych. Wózek transportowy umożliwia przewożenie palet między stacjami.
Znane są czasy:

transportu palet między stacjami,
wymiany palety między wózkiem a SM, podajnikiem SW i podajnikiem SO,
wymiany palety między podajnikiem SW i miejscem przezbrajania,
wymiany palety między podajnikiem SO i obrabiarką.

3. Zadanie planowania operatywnego dla CP KOR-1

W wyniku planowania okresowego dla CP KOR-1 zostaje wyznaczone na daną zmianę następujące zadanie planowania operatywnego.

a) Dany jest zbiór detali do obróbki w CP w ciągu zmiany
$$D=\{d_1,\dots,d_l,\dots,d_L\}.$$
b) Dla każdego detalu jest określony ciąg technologiczny wymaganych do wykonania operacji
$$d_l=(z_{l1},\dots,z_{lq},\dots,z_{lQ(l)}).$$
c) Dla każdej operacji z_{lq} określony jest numer n urządzenia, w którym operacja odbywa się, rodzaj r operacji i czas jej wykonania $T^r_{lqn}>0$ (z^r_{lqn}, T^r_{lqn}).
Urządzenia ponumerowane są następująco:
$n=1,2$ dla miejsc przezbrajania,
$n=3,\dots,7$ dla obrabiarek,
$n=8,\dots,32$ kolejno dla podajników SW, podajników SO, SM i WT,
(w CP KOR-1 są N=32 urządzenia).
W urządzeniach wykonywane są następujące rodzaje operacji:
w miejscu przezbrajania - mocowanie uchwytu, mocowanie detalu, zdejmowanie uchwytu, zdejmowanie detalu,

w obrabiarce - obróbka detalu,
w SM oraz podajnikach SW i SO - magazynowanie palety,
w WT - transport palety.

W danej chwili w każdym urządzeniu może być wykonywana co najwyżej jedna operacja.

d) Wykonanie operacji z_{1q} w każdej obrabiarce wymaga określonego zestawu narzędzi. Zakładamy, że wszystkie stacje SO są uzbrojone przez całą zmianę w ten sposób, że możliwe jest wykonanie wszystkich wymaganych operacji z_{1q} bez przezbrojeń zestawów narzędzi.

e) Dla każdego detalu określony jest potrzebny typ uchwytu u_s. Znana jest ilość uchwytów poszczególnych typów w ciągu zmiany.

f) Dany jest zbiór palet P_j, $j=1,\ldots,32$.

Uwzględniając wszystkie ograniczenia narzucone przez sam obiekt (opisane w rozdziale 2), stan początkowy CP (stan końcowy poprzedniej zmiany) oraz podane wyżej warunki a ÷ f należy dla każdego urządzenia CP:

A. wyznaczyć harmonogram zapewniający minimalizację całkowitego czasu wykonania zbioru detali D w ciągu zmiany,

B. podać niezbędną ilość palet J dla realizacji tego harmonogramu.

Przez harmonogram rozumiemy zbiór N list zadań zmianowych; listą zadań dla n-tego urządzenia ($n=1,\ldots,N$) nazywamy ciągi uporządkowanych czwórek

$$(z^r_{1qn}, P_j, t_p, t_k),$$

gdzie t_p i t_k oznaczają chwile początku i końca operacji z^r_{1qn} dla detalu d_l zamocowanego na palecie P_j.

Opisane zadanie jest szczególnym przypadkiem zagadnienia Johnsona.

4. System Komputerowej Automatyzacji SKSC-1 dla Centrum Produkcyjnego KOR-1

System Komputerowej Automatyzacji SKSC-1 dla CP KOR-1 zawiera:

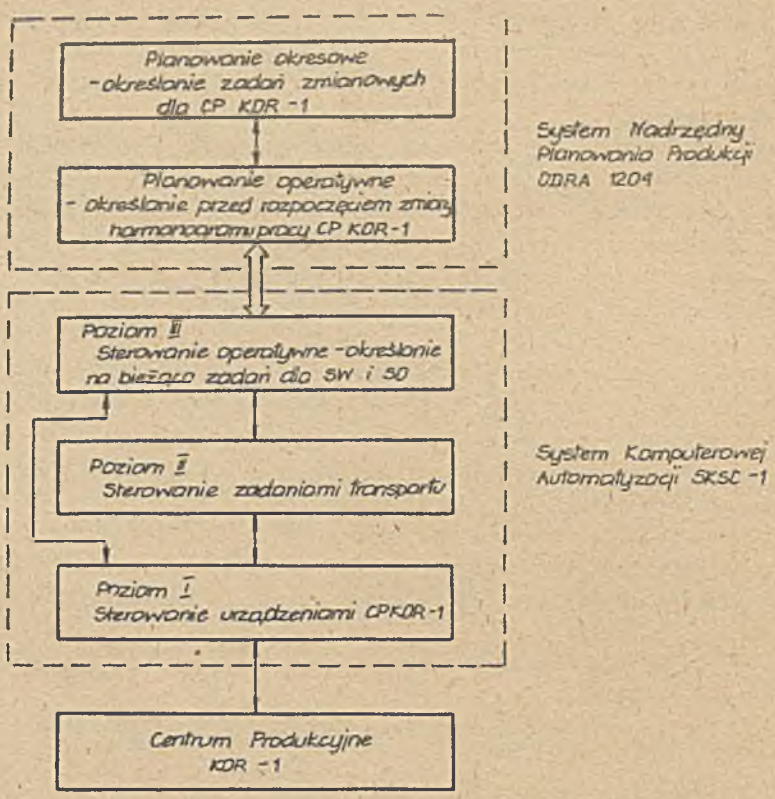
- połączone ze sobą minikomputery MERA 306 i MERA 302 z pamięcią dyskową,
- jednostki sterujące, umożliwiające przesyłanie sygnałów między obiektem i SKSC-1,
- pulpit dyspozytora, sygnalizujący stan wszystkich urządzeń CP KOR-1 i umożliwiający ręczne sterowanie tymi urządzeniami.

Ułożenie harmonogramu pracy dla CP KOR-1, czyli rozwiązanie bardzo skomplikowanego przypadku zagadnienia Johnsona, jest trudne do rozwiązania na minikomputerowym sprzęcie SKSC-1. Dlatego przyjęto, że SKSC-1 współpracuje z Systemem Nadrzędnym Planowania Produkcji (maszyną cyfrową ODRA 1204), który rozwiązuje zadania planowania okresowego i planowania operatywnego.

Rys. 2 przedstawia wielopoziomową, hierarchiczną strukturę funkcjonalną SKSC-1.

W wyniku planowania okresowego i operatywnego zostaje określony przed rozpoczęciem zmiany harmonogram pracy CP KOR-1.

Dla ułożenia tego harmonogramu stosuje się metody heurystyczne.



Rys. 2 Struktura funkcjonalna Systemu Komputerowej Automatyzacji SKSC-1 dla Centrum Produkcyjnego KOR -1

Otrzymany harmonogram nie jest optymalny, ale zapewnia średnie wykorzystanie wszystkich obrabiarek powyżej 90% czasu zmiany, co jest wynikiem zadowalającym dla celów praktycznych.

System Nadrzędny układa harmonogram dla sytuacji idealnej - dla określonych czasów wykonywania wszystkich operacji, bez uwzględnienia niemożliwych do przewidzenia zakłóceń w pracy CP KOR-1.

W praktyce, w czasie pracy CP KOR-1, mogą występować różnorodne zakłócenia procesu produkcyjnego, z których najistotniejsze są:

a) zmiana czasów wykonania operacji w obrabiarkach i miejscach przezbrajania w stosunku do założonych czasów (np. wskutek chwilowych przerw pracy obrabiarki, wymuszanych przez operatora dla wymiany zużytego narzędzia lub kontroli obrabianego detalu itp.),

b) uszkodzenie w trakcie obróbki pewnego detalu, który nie nadaje się do dalszej obróbki i powinien zostać usunięty z CP,

c) chwilowa lub trwała awaria stacji SW lub SO.

Każde opisane zakłócenie procesu produkcyjnego powoduje na ogół zaburzenie harmonogramu, tzn. wydłużenie czasu jego realizacji.

Niektóre zakłócenia mogą być kompensowane przez tzw. "bufory" w podajnikach SO i SW (dostarczanie do podajnika danej stacji kolejnego detalu jeszcze w trakcie wykonywania w tej stacji operacji na poprzednim detalu).
Uwzględnienie przy układaniu harmonogramu "buforów", zmniejszających wrażliwość harmonogramu na zakłócenia, jest dodatkowym warunkiem, bardzo trudnym, a często niemożliwym do spełnienia.
Największe zaburzenia harmonogramu powoduje - oczywiście - trwała awaria stacji SO, czyli zmiana konfiguracji CP KOR-1.
"Sztywna" realizacja przez SKSC-1 harmonogramu opracowywanego przez System Nadrzędny, tzn. inicjowanie wszystkich operacji w chwilach wynikających z harmonogramu, jest poprawna przy braku zakłóceń, ale jest nie do przyjęcia w warunkach wystąpienia zakłóceń. Opóźnienie jednej operacji (np. końca obróbki w SOi) powodowałoby zatrzymanie wszystkich innych operacji i oczekiwanie na koniec obróbki w SOi, zwiększając dodatkowo zakłócenie harmonogramu.
W związku z tym należy zapewnić specjalny sposób realizacji przez SKSC-1 harmonogramu opracowywanego przez System Nadrzędny tak, aby umożliwić pracę CP również przy wystąpieniu zakłóceń w trakcie zmiany.
SKSC-1 został podzielony funkcjonalnie na trzy poziomy sterowania, przedstawione na rysunku 2.

Poziom I zapewnia bezpośrednie sterowanie wszystkich urządzeń CP KOR-1.

Sterowanie przepływem detali w CP KOR-1 (poziom II) oparte jest o system żądań wysyłanych ze stacji SW i SO do transportu. Żądania określają stan stacji. Aktualne zadania dla stacji SW i SO ustalane są przez poziom III. Umożliwia to traktowanie wszystkich stacji jako "niezależnych", powiązanych jedynie drogą transportową. Zwiększa odporność CP na zakłócenia harmonogramu pracy, między innymi przez tworzenie "buforów" w podajnikach SW i SO.
Sterowanie przepływem detali (ruchy wózka transportowego, wykorzystanie stanowisk magazynowych) zapewnia możliwość realizacji zadań dla SW i SO.

Poziom III określa zadania dla obrabiarek i miejsc przezbrajania.
Dla obrabiarek obowiązują listy kolejności zadań wynikające z harmonogramu Systemu Nadrzędnego.
Ustalanie zadań dla miejsc przezbrajania następuje na podstawie prowadzonych przez SKSC-1 na bieżąco analiz: aktualnych list zadań dla obrabiarek, stanu CP i dostępnej ilości uchwytów.
Taki sposób sterowania miejscami przezbrajania umożliwia poprawną pracę CP KOR-1 również przy zakłóceniach, bez konieczności ingerencji dyspozytora.
Ustalane zadania dla miejsc przezbrajania zapewniają możliwość realizacji wymaganej kolejności list zadań dla obrabiarek. Dla sytuacji bez zakłóceń ustalane zadania dla miejsc przezbrajania są zgodne z zadaniami określonymi przez harmonogram Systemu Nadrzędnego.

Synchronizacja pracy miejsc przezbrajania zdarzeniami zachodzącymi w CP umożliwia opóźnienie /lub wstrzymanie/ wprowadzania do CP detali obrabianych w opóźnionych /lub uszkodzonych/ SO.
W przypadku uszkodzenia jednej SW następuje przydzielenie zadań drugiej dobrej SW

W SKSC-1 zapewniona jest współpraca dyspozytora z systemem.
SKSC-1 informuje dyspozytora o aktualnym stanie CP, realizacji harmonogramu i jego zakłóceniach. SKSC-1 umożliwia dyspozytorowi modyfikację list zadań dla obrabiarek i miejsc przezbrajania, zarówno przy normalnej realizacji harmonogramu, jak i przy wystąpieniu zakłóceń. Modyfikacja może polegać na skreśleniu zadania, ustaleniu nowego zadania lub zmianie kolejności zadań.
Dyspozytor może podjąć decyzję o automatycznym usunięciu z CP określonego uszkodzonego detalu,
W przypadku trwałej awarii SOi dyspozytor może podjąć dwie decyzje:
- automatycznie wykreślić we wszystkich listach zadań detale obrabiane w SOi oraz dalej realizować zaburzony harmonogram,
- wstrzymać realizację zaburzonego harmonogramu i zwrócić się do Systemu Nadrzędnego Planowania Produkcji o ułożenie nowego harmonogramu dla nowej konfiguracji CP i aktualnego stanu CP.

5. Wnioski

Opisany sposób realizacji przez SKSC-1 harmonogramów pracy CP KOR-1, układanych przez System Nadrzędny metodami heurystycznymi, był sprawdzany podczas eksploatacji doświadczalnej. Uzyskano dobre wyniki realizacji harmonogramów zarówno dla warunków idealnych, jak i przy występowaniu różnego rodzaju zakłóceń. System SKSC-1 jest rozbudowywany w oparciu o nowe spostrzeżenia i wnioski wynikające z eksploatacji doświadczalnej.

Realizacja przez SKSC-1 harmonogramu pracy CP KOR-1 polega na:
- nadzorowaniu harmonogramu w warunkach pracy bez zakłóceń,
- korygowaniu /automatycznie przez SKSC-1 lub z udziałem dyspozytora/ na bieżąco harmonogramu przy wystąpieniu zakłóceń.

Główną zmienną sterującą dla CP KOR-1 jest kolejność zadań dla obrabiarek i miejsc przezbrajania. Zmiana kolejności zadań, szczególnie dla obrabiarek, powoduje duże zaburzenia harmonogramu.
SKSC-1 zmienia kolejność zadań dla obrabiarek jedynie na żądanie dyspozytora. Podjęcie przez dyspozytora tylko na podstawie stanu CP właściwej decyzji o modyfikacji list zadań jest trudne. Praktycznie w chwili podejmowania decyzji dyspozytor nie wie jak wpłynie ona na dalszą realizację harmonogramu. Dlatego należy umożliwić wspomaganie pracy dyspozytora przez SKSC-1. W razie konieczności zmiany kolejności zadań, SKSC-1 powinien na podstawie analiz czasowych podać dyspozytorowi pewną ilość możliwych decyzji oraz określić ich wpływ na harmonogram.
Dla prowadzenia dokładnych analiz czasowych celowe jest opracowanie dla SKSC-1 "zegarów-budzików", umożliwiających odliczanie czasów trwania

operacji, sygnalizację przekroczenia czasów operacji, odliczanie czasów przerw w pracy stacji.

Niezależnie od wymienionych problemów prowadzone są próby układania harmonogramów na sprzęcie minikomputerowym.
Jest to zadanie bardzo trudne ze względu na złożoność zagadnienia Johnsona dla CP KOR-1 oraz ze względu na małą moc obliczeniową sprzętu minikomputerowego.
Do układania harmonogramów można wykorzystać metody poszukiwania przypadkowego z lokalną optymalizacją [1].
Opracowując algorytm układania harmonogramów należy zwrócić uwagę na specyfikę konkretnego obiektu, np. dla CP KOR-1 sprawą bardzo istotną było tworzenie "buforów" dla stacji obróbkowych i odpowiednia gospodarka uchwytami.
Opracowanie takiego algorytmu umożliwiłoby "dobudowywanie" harmonogramu na bieżąco przy występujących zakłóceniach, a nawet samodzielne układanie przez SKSC-1 harmonogramu na całą zmianę bez wykorzystywania Systemu Nadrzędnego Planowania Produkcji.

LITERATURA

[1] A.A. Korbut, J.J. Finkelsztejn : Programowanie dyskretne. PWS, 1974.
[2] A. Niederliński : Systemy cyfrowe automatyki przemysłowej. Tom 2, WNT, 1977.

DERIVATION AND REALIZATION OF PRODUCTION SCHEDULES IN A PRODUCTION CENTER

S u m m a r y

The paper presents problems connected with the determination and computer control of production schedules in a discrete industrial process.