

Jolanta KRYSTEK*

NADAŻNE STEROWANIE PROCESEM PRODUKCJI POWTARZALNEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę nadażnego sterowania produkcją, którą można wykorzystać do harmonogramowania procesów produkcji powtarzalnej. Omówiono algorytm nadażnego harmonogramowania produkcji, który jest przeznaczony do bieżącej generacji planów wykonawczych danej komórki systemu produkcyjnego, w taki sposób, by nadażały one za operacyjnymi planami produkcji pochodzącymi z jednostki koordynacyjnej systemu. Opracowywano symulacyjny modelu procesu produkcji powtarzalnej. Do symulacji wykorzystano środowisko ProModel firmy PROMODEL Corporation.

Słowa kluczowe: sterowanie produkcją, nadażne harmonogramowanie produkcji, produkcja powtarzalna, reguły priorytetu, symulacja

1. WPROWADZENIE

Celem współczesnego przedsiębiorstwa jest produkcja wysokiej jakości wyrobów w jak najkrótszym czasie przy jednoczesnej minimalizacji kosztów produkcji oraz elastycznym dostosowaniu się do zmieniających się potrzeb klientów. W takiej sytuacji mogą wystąpić problemy przy wyznaczaniu optymalnych planów produkcyjnych, opartych na prognozach popytu i zamówieniach klienta, przy czym udział prognoz i zamówień w planowaniu jest zależny od typu produkcji realizowanej w przedsiębiorstwie.

Jednym z najczęściej występujących typów produkcji jest produkcja powtarzalna (ang. *repetitive production*), czyli produkcja w komórce produkcyjnej systemu, w której (w nieregularnych odstępach czasu) powtarzane są asortymenty wytwarzanych produktów oraz uzbrojenie maszyn (wariant produkcyjny) i ich przydział do operacji. W czasie pracy w danym wariantcie produkcyjnym w komórce produkcyjnej wytwarzana jest określona partia produktu lub współbieżnie produkowane są partie produktów z określonej grupy. Jednocześnie wytwarzanych może być wiele różnych wyrobów a dla niektórych z nich niemożliwe może być wykonanie ich na dokładnie na czas – najczęściej wykonywane są one zbyt wcześnie lub zbyt późno. Ze względów ekonomicznych oba przypadki są równie niekorzystne. Szczególnym przypadkiem produkcji powtarzalnej jest produkcja rytmiczna, w której okres powtarzalności (nazywany rytmem) jest stały. W przeciwieństwie do produkcji powtarzalnej, produkcja rytmiczna występuje tylko w stanie ustalonym, gdy wyroby są wytwarzane w określonym porządku, z zachowaniem stałego okresu między kolejnymi uruchomieniami / zakończeniami serii tych samych wyrobów.

Do harmonogramowania procesów produkcji powtarzalnej można wykorzystać metodę nadażnego sterowania produkcją (NSP) [4,13], w tym algorytm nadażnego harmonogramowania produkcji (NHP) [14]. Algorytm NHP jest algorytmem lokalnym w systemie nadażnego sterowania produkcją i jest przeznaczony do bieżącej generacji planów

* Politechnika Śląska, Instytut Automatyki, Zakład Inżynierii Systemów

wykonawczych danej komórki systemu produkcyjnego w taki sposób, by plany te nadażały za operacyjnymi planami komórki, pochodzącymi z jednostki koordynacyjnej systemu. Plany operacyjne (zlecenia produkcyjne) spełniają w algorytmie rolę wielkości wiodących. Nadażanie harmonogramów (planów wykonawczych) za zmiennymi planami operacyjnymi polega na utrzymaniu w określonych granicach tych części składowych zapasów, których wahania zależą od różnic pomiędzy planami operacyjnymi i wykonawczymi. Istnieje dowód, że jeśli plany operacyjne nie przekraczają zdolności produkcyjnych danej komórki, to algorytm gwarantuje ograniczoność zaległości w nadażaniu planów wykonawczych za operacyjnymi przy nieskończonym horyzoncie obserwacji [11]. Dzieje się tak dzięki odpowiednio dobranym wartościom progowym zaległości, poniżej których algorytm podejmuje decyzję o postoiu. Ponadto udowodniono, że jeśli plany operacyjne począwszy od pewnej chwili są stałe, to algorytm zapewnia zbieżność planów wykonawczych do idealnych harmonogramów cyklicznych, po skończonej liczbie kroków tworzących przedział czasowy stanu nieustalonego [12]. Przy tym w każdym okresie powtarzalności poszczególne warianty produkcyjne, czyli warianty uzbrojenia komórki produkcyjnej, występują dokładnie jeden raz. Obie wymienione wyżej, podstawowe właściwości algorytmu NHP, nie zależą od tego, według jakich reguł priorytetu wybierany jest wariant produkcyjny dla bieżącego okresu pracy. Wystarczy, że jest to jeden z wariantów, dla których zaległości osiągnęły lub przekroczyły wartości progowe.

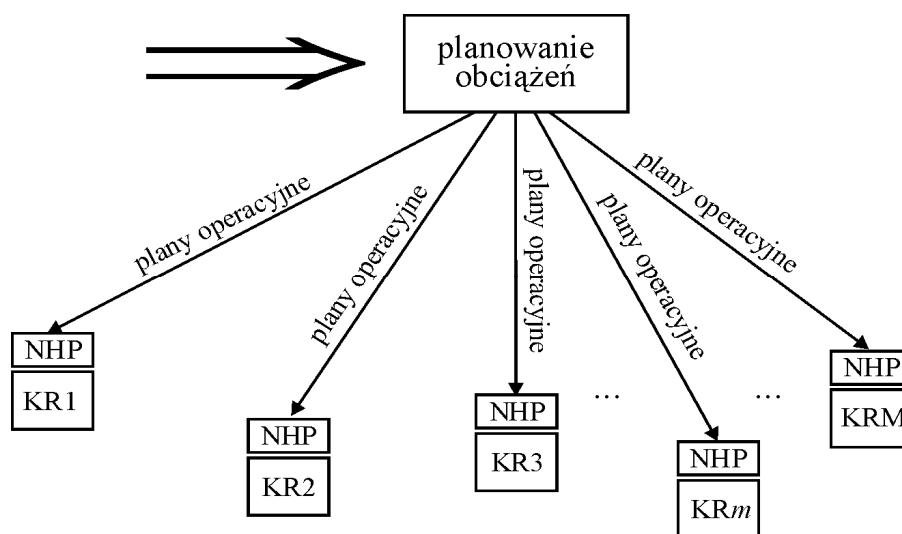
2. NADAŻNE STEROWANIE PRODUKCJĄ

Nadażne sterowanie produkcją (NSP) [13] różni się znacznie od szeregowania zadań, które jest klasyczną metodą harmonogramowania produkcji [1,2,3,8]:

1. jest przeznaczone do bieżącego podejmowania decyzji o zadaniach przydzielanych do komórek produkcyjnych w chwilach zakończenia przez nie zadań wykonywanych poprzednio, a nie do opracowywania harmonogramów dotyczących przyszłości. Drobną modyfikacją algorytmu NHP umożliwi generację harmonogramów dla dowolnie długiego horyzontu planowania i tylko ta odmiana metody NSP mogłaby być porównywana z szeregowaniem zadań,
2. dotyczy systemów produkcyjnych składających się z komórek podlegających całościowym przebrojeniom,
3. inaczej są zdefiniowane zlecenia dla systemu produkcyjnego:
 - a. w przypadku klasycznego szeregowania zadań niepodzielnych zlecenie jest uporządkowanym zbiorem zadań o danych czasach wykonania, które obejmują nie tylko czasy robocze, lecz także czasy przygotowawcze, przeznaczone na przebrojenia maszyn. W ogólniejszych modelach problemu szeregowania zadań czasy te mogą być inne dla każdej maszyny, której przydział do określonego zadania jest dopuszczalny. Ponadto dla każdego zlecenia są podane chwile ich zwolnienia do realizacji (przybycia zleceń do systemu) oraz pożądane terminy zakończenia. Może być także podana wielkość zlecenia. Przy tych danych problem szeregowania zadań polega na podaniu dla każdego zadania chwil jego rozpoczęcia i zakończenia oraz decyzji o przydziale maszyny. W każdym kroku dyskretyzacji czasu obowiązuje warunek wzajemnego wykluczania przydziału danej maszyny do różnych zadań,
 - b. w metodzie NSP każde zlecenie dla systemu produkcyjnego pojawia się na początku pewnego bieżącego okresu planowania operacyjnego i zawiera identyfikator procesu do wykonania oraz wielkość zlecenia, to znaczy liczbę sztuk produktu, które mają być wytworzone w danym procesie. Ponadto, w odmianie metody NSP porównywalnej z szeregowaniem zadań, dane są także przyszłe zlecenia, wraz z prognozami chwil

przybycia do systemu i pożądanymi terminami zakończenia. Dla każdego okresu planowania operacyjnego najpierw rozwiązywany jest problem przydziału obciążeń do poszczególnych maszyn (komórek systemu) (rys. 1), który może być sformułowany jako zagadnienie programowania liniowego [8]. Jest możliwe dzięki znajomości identyfikatorów procesów ze zleceń, które mają być współbieżnie wykonywane w systemie. Każdy proces jest uporządkowanym zbiorem operacji. Wykonanie zadania polega na jednokrotnym lub wielokrotnym wykonaniu operacji. Wielkości zadań (krotności wykonania operacji), a także czasy ich wykonania, są proporcjonalne do wielkości zlecenia. To umożliwia znalezienie takiego przydziału zadań do maszyn, przy którym najdłuższy z czasów obciążenia maszyn jest minimalny. Inaczej niż w metodzie szeregowania zadań, czasy wykonania zadań nie obejmują czasów przygotowawczych. Oczywiście, w problemie przydziału obciążeń nie obowiązuje warunek wzajemnego wykluczania przydziału maszyn do różnych zadań.

W przypadku przekroczenia zdolności produkcyjnych algorytm planowania obciążeń przenosi część zleceń na późniejsze okresy. Można to interpretować jako selekcję zleceń produkcyjnych lub ich podział na zlecenia mniejsze. W efekcie otrzymuje się decyzje o zbiorach zadań związanych z przyjętymi do realizacji zleceniami, a więc to, co w klasycznym problemie szeregowania zadań jest dane. Jednak w przypadku metody NSP tak obliczone zadania są już przydzielone do poszczególnych maszyn, a jedyne, co pozostaje do zrobienia, to zdecydowanie (dla każdej maszyny oddzielnie) o kolejności wykonania zadań. Do tego służy algorytm NHP.

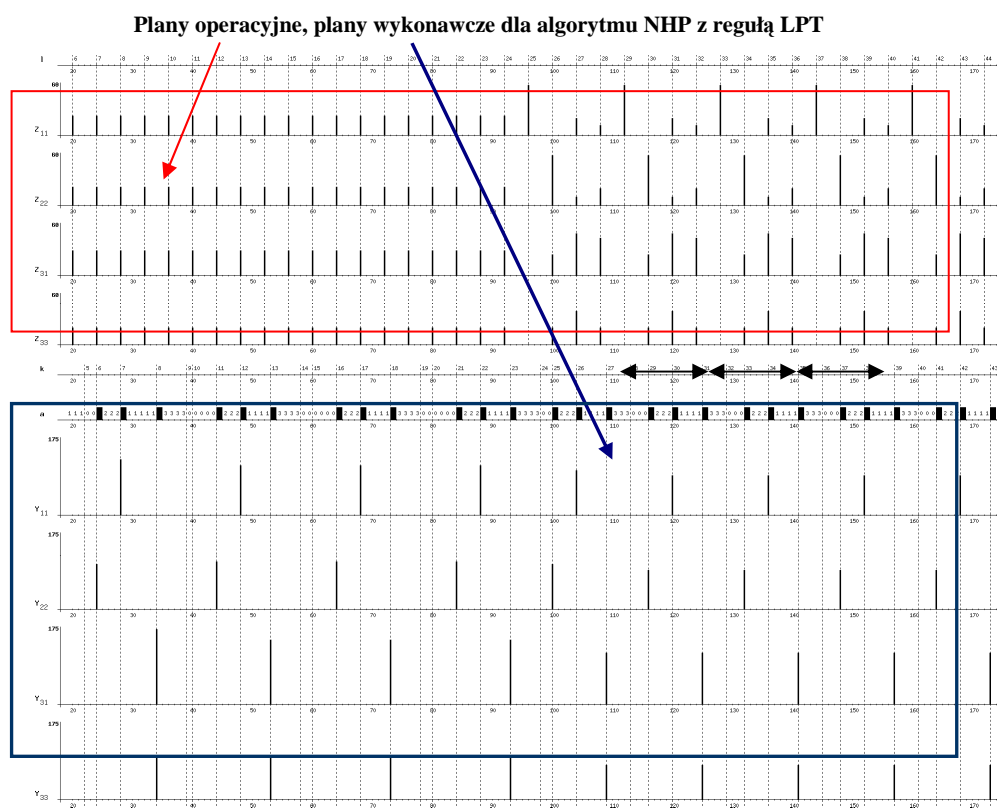


Rys. 1. Dekompozycja zadań harmonogramowania w systemie nadążnego sterowania produkcją.
Źródło[10].

3. ALGORYTM NADAŻNEGO HARMONOGRAMOWANIA PRODUKCJI

W przeciwieństwie do klasycznych metod harmonogramowania, które generują decyzje o przyszłym wykonywaniu znanych na początku zadań, algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji (NHP) działa na bieżąco w nieskończonym horyzoncie czasowym. Algorytm NHP działa w chwili zakończenia okresu pracy lub postoju danej maszyny (komórki roboczej systemu) i podejmuje bieżącą decyzję o pracy lub postoju [14]. Decyzje podejmowane są na podstawie stanu algorytmu, na który składają się poprzednio

podjęte decyzje oraz zaległości w realizacji planów operacyjnych przez plany wykonawcze. W przypadku pracy jest to decyzja o wariancie produkcyjnym, co jednoznacznie określa zestaw produktów wytwarzanych na maszynie (w komórce systemu), i o wielkościach partii wykonawczych tych produktów. Ponadto dla obu decyzji oblicza się przewidywaną chwilę zakończenia rozpoczynanego okresu pracy lub postoju. Ponieważ każdorazowo chwila ta jest prognozą chwili rozpoczęcia następnego okresu pracy lub postoju, można zasymulować wielokrotne działanie algorytmu NHP w przedziale czasu o dowolnej długości. Nie jest to więc algorytm harmonogramowania w zwykłym sensie, ale uzasadnieniem jego nazwy jest fakt, że w każdej chwili jego przeszłe decyzje mają strukturę harmonogramu. Oczywiście, jeśli tylko znane są przyszłe zadania komórki z określonego skończonego horyzontu czasowego, to możliwa jest symulacja przyszłego działania algorytmu NHP i uzyskanie w ten sposób klasycznie rozumianego harmonogramu. Jednak takie wykorzystanie algorytmu ma tę samą podstawową wadę, którą mają inne metody, czyli oparcie się na niepewnych prognozach przyszłych zadań i przyszłej dostępności zasobów.



Rys. 2. Decyzje algorytmu NHP(powtarzalne zlecenia wykonawcze) nadążające za zleceniami produkcyjnymi. [Źródło własne]

Decyzje algorytmu NHP mogą być przedstawione w postaci tzw. powtarzalnych zleceń wykonawczych, które nadążają za zleceniami produkcyjnymi (rys. 2). Każda z nich dotyczy okresu czasu między kolejnymi przebrojeniami danej komórki produkcyjnej i wskazuje grupę produktów do wykonania w danym wariancie produkcyjnym. Określa także wielkość zlecenia wykonawczego, równą zaległościom w realizacji planów operacyjnych przez plany wykonawcze.

Generowane na bieżąco powtarzalne zlecenia wykonawcze są jednoznaczne, więc nie można ich optymalizować. Można jednak wpływać na jakość działania algorytmu dobierając odpowiednio reguły priorytetu stosowane do wyboru grupy produktów, które mają być wykonane w bieżącym okresie pracy. Jeśli w poszczególnych wariantach uzbrojenia komórka

produkcyjna (maszyna) nie jest wykorzystywana lub jest obciążona tylko przez niewielką część czasu pracy, to wartości niektórych kryteriów optymalizacji są niekorzystne. Poza czasem przestoju komórki zwiększa się liczba przebrojeń i długość okresu powtarzalności, a w konsekwencji także koszty magazynowania. Należy dołożyć wszelkich starań, aby działanie algorytmu nadążnego harmonogramowania produkcją było jak najlepsze ze względu na powszechnie stosowane kryteria – koszty przebrojeń, koszty magazynowania, czas przestoju maszyn, długość cyklu produkcji, czas przepływu zleceń przez system, maksymalne opóźnienie zleceń produkcyjnych w stosunku do żadanego terminu ich zakończenia.

Ze względu na główny cel bieżącego sterowania komórką produkcyjną może się wydawać, że decyzję o pracy w danej komórce należy podejmować zawsze, gdy istnieją jakiegokolwiek zaległości w realizacji planów operacyjnych. Wiadomo jednak, że produkcja realizowana w małych partiach jest niekorzystna, gdyż prowadzi do dużej częstotliwości przełączeń pomiędzy wariantami produkcyjnymi, co pociąga za sobą duże koszty przebrojeń, jak również spadek udziału czasu pracy w procesie produkcji na rzecz czasu niezbędnego na przebrojenia. Jednocześnie dużym wielkościom partii produkcyjnych odpowiadają duże wahania zapasów produkcji w toku, co zwiększa koszty produkcji poprzez zwiększenie kosztów magazynowania. Dlatego w chwili podejmowania decyzji o pracy lub postoju

w danej komórce należy porównywać zaległości dla poszczególnych wariantów z odpowiednio dobranymi wartościami progowymi.

4. ROLA REGUŁ PRIORYTETU W ALGORYTMIE NHP

W klasycznie sformułowanych problemach szeregowania zadań reguły priorytetów są wykorzystywane do ustalenia kolejności zadań oczekujących na wykonanie w komórkach (maszynach) systemu produkcyjnego [9].

W badaniach symulacyjnych algorytmu NHP [6] zastosowano następujące reguły wyboru wariantu produkcyjnego:

- LPT – (ang. *longest processing time*), najdłuższy czas wykonania,
- SPT – (ang. *shortest processing time*), najkrótszy czas wykonania,
- FIFO – (ang. *first in – first out*), (pierwszy przybył – pierwszy obsłużony),
- LIFO – (ang. *last in – first out*) – ostatni przybył – pierwszy obsłużony.

Specyfika algorytmu NHP polega na tym, że zaimplementowane w nim reguły priorytetu stosowane są do wyboru wariantu produkcyjnego, czyli grupy produktów, które mogą być wykonane w bieżącym okresie pracy przy określonym uzbrojeniu komórki produkcyjnej [16]. Wybierany jest jeden wariant spośród wszystkich wariantów, dla których zaległości w realizacji planów operacyjnych przez plany wykonawcze osiągnęły lub przekroczyły wartości progowe zaległości.

Reguła LPT pozwala na wybór takiego wariantu produkcyjnego który wymaga najdłuższego czasu do likwidacji zaległości. Reguła LPT bwp (bez wartości progowych) w przypadku małego obciążenia maszyn skraca czas oczekiwania na wykonanie planów operacyjnych, a w przypadku normalnych obciążeń działa tak, jak z wartościami progowymi. Algorytm ten warto stosować tylko w przypadku popytu znacznie mniejszego od zdolności produkcyjnych komórki. Za pomocą reguły SPT wybierany jest wariant produkcyjny o najkrótszym czasie potrzebnym do likwidacji zaległości. Reguła FIFO wybiera wariant, który najwcześniej osiągnął wartość progową zaległości. Reguła LIFO wyznacza do realizacji ten wariant, który jako ostatni osiągnął wartość progową zaległości.

Przeprowadzono szereg badań symulacyjnych oceniających skuteczność i jakość działania algorytmu NHP [5,6,7]. Przeanalizowano działanie algorytmu, zwracając szczególną uwagę na czas trwania stanów nieustalonych i na właściwości cyklogramów produkcji rytmicznej generowanych przez algorytm w stanie ustalonym, dla stałych i cyklicznie zmiennych planów operacyjnych. Badania potwierdziły ograniczoność zaległości w nadążaniu planów wykonawczych za operacyjnymi, czyli stabilną pracę algorytmu NHP, także w sytuacji przejścia od stałych zleceń produkcyjnych do zleceń pojawiających się cyklicznie.

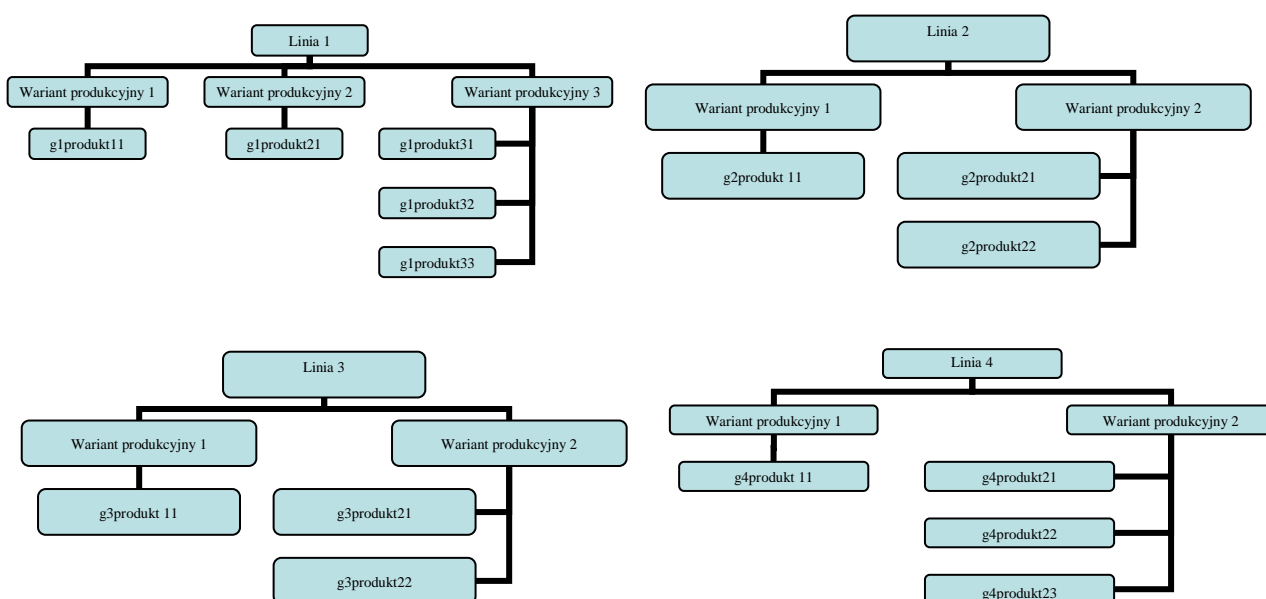
Generowane przez algorytm NHP decyzje planowania wykonawczego nadążają za operacyjnymi planami produkcji (zleceniami produkcyjnymi), a dla stałych lub cyklicznie zmiennych planów operacyjnych układają się w harmonogramy cykliczne (cyklogramy), osiągane po skończonej liczbie kroków tworzących przedział czasowy stanu nieustalonego. Jednym z dodatkowych wymagań, które można postawić algorytmowi NHP, jest to, by w każdym cyklogramie, niezależnie od stanu w chwili ustąpienia zakłóceń, kolejność wariantów produkcyjnych była zgodna z ich numeracją. Efektem analizy problemu minimalizacji kosztów przebrojeń było stworzenie unikalnej reguły priorytetu NHP-ZKWP (z zadaną kolejnością wariantów produkcyjnych) [5].

5. SYMULACJA PROCESU PRODUKCJI POWTARZALNEJ

Nadążne sterowanie produkcją a zwłaszcza algorytm NHP może mieć zastosowanie do sterowania takimi procesami produkcji powtarzalnej w których musi następować szybka reakcja na zmieniające się zamówienia klienta (zewnętrznego lub wewnętrznego).

Obiektem badań była firma cateringowa, która swoją produkcję opiera na otrzymywanych na bieżąco zamówieniach klienta. Dokonano szczegółowej analizy procesów produkcji i na tej podstawie został opracowywany symulacyjny model procesu produkcyjnego. Do modelowania i symulacji przykładowego procesu wykorzystano środowisko ProModel firmy PROMODEL Corporation [16].

W ofercie symulowanego systemu znajduje się 15 różnych pozycji wyrobów gotowych, podzielonych na cztery grupy asortymentowe (rys.3).

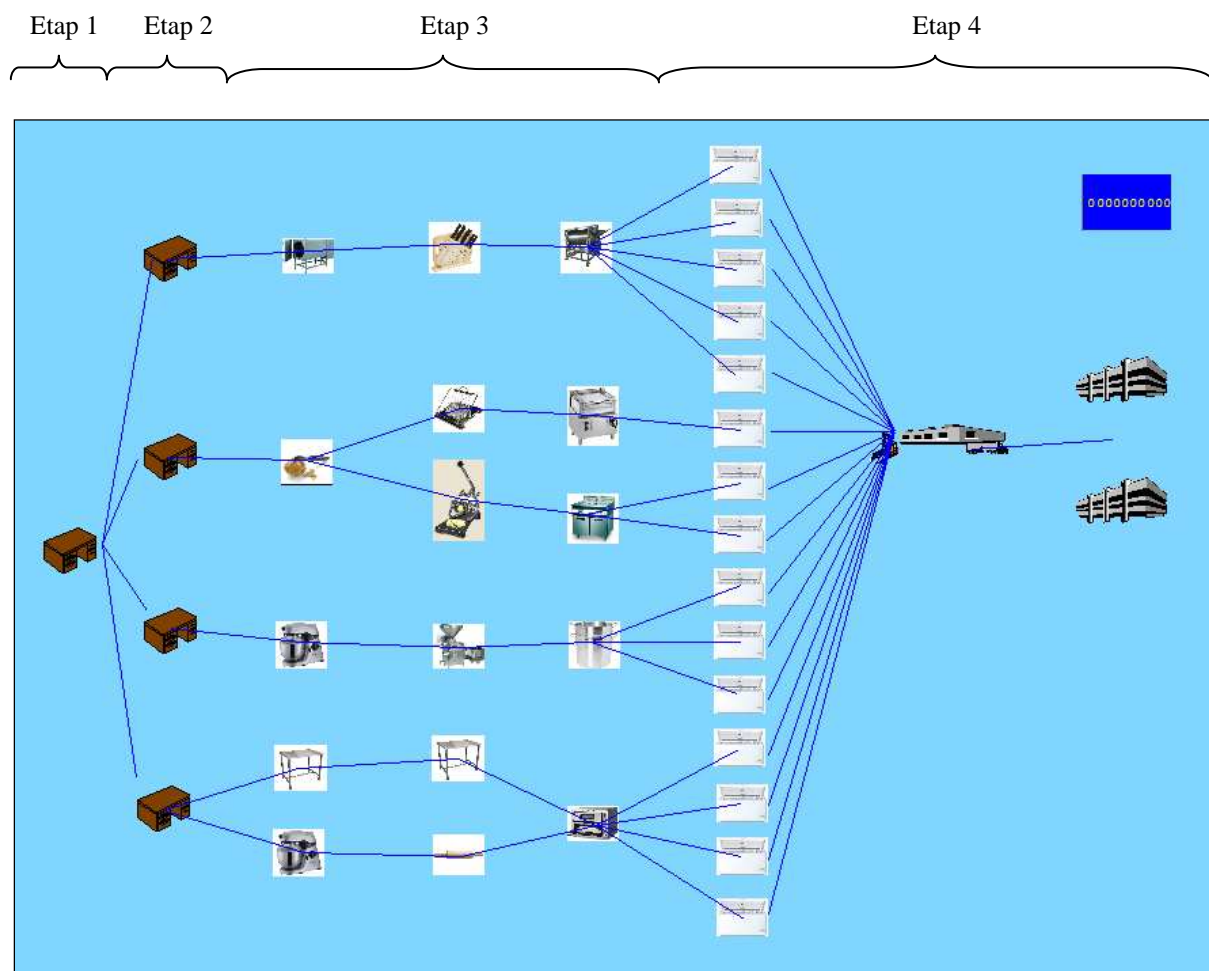


Rys. 3. Przydział produktów do wariantów i linii produkcyjnych. [Źródło własne]

W modelu zastosowano uniwersalne nazwy produktów w postaci $g_k\text{produkt}_{lm}$, ponieważ taki zapis jednocześnie przedstawia informację o numerze (m) produkowanego wyrobu, numerze linii produkcyjnej (k) oraz numerze wariantu produkcyjnego (l) w jakim jest wytwarzany dany produkt (rys. 3). Każdy unikalny klucz klm przypisany jest tylko jednemu konkretnemu produktowi.

Zaimplementowany proces produkcji składa się z czterech etapów (rys. 4):

1. przyjmowanie zamówień klientów i przydzielanie ich do realizacji na odpowiednich liniach produkcyjnych (planowanie obciążeń),
2. podjęcie decyzji o przystąpieniu do pracy i wyborze wariantu produkcyjnego lub o przestoju i chwili jego zakończenia (obszar działania algorytmu NHP)
3. realizacja planów wykonawczych czyli wytwarzanie zamówionych produktów,
4. kompletowanie zamówień, pakowanie i wysyłka do odbiorcy.



Rys. 4. Etapy symulowanego procesu produkcyjnego. [Źródło własne]

Opis działania modelu

Zamówienia od klientów napływają do systemu planowania obciążeń. Dla każdej linii produkcyjnej tworzone są plany operacyjne (etap 1).

Decyzje o pracy lub postoju każdej z linii są podejmowane niezależnie dla każdej z nich na podstawie zaległości w realizacji planów operacyjnych przez plany wykonawcze. Do wyboru wariantu produkcyjnego stosowane są różne zaimplementowane w systemie reguły

priorytetu (FIFO, LIFO, LPT, SPT). Zgodnie z numerem wybranego wariantu odpowiednie zamówienia są kierowane do realizacji w etapie 3.

W etapie 3 wytwarzane są produkty w oparciu o decyzje podjęte w etapach 1 i 2. W tym miejscu podział na cztery, niezależne linie produkcyjne jest bardzo wyraźny. Na każdej z nich wytwarzana jest inna grupa produktów. W ramach poszczególnych linii surowce i półprodukty są przemieszczane potokowo między maszynami i poddawane kolejnym operacjom. Czas ich trwania jest stały, ustalony oddzielnie dla każdego z piętnastu produktów i niezależny od typu aktualnie używanej maszyny. Pomędzy poszczególnymi maszynami (stanowiskami pracy) nie ma magazynów na zapasy produkcji w toki (WIP). Wskutek tego czas wykonywania operacji na danym produkcie określa również, jak często gotowe produkty opuszczają linię. Pojemność maszyn w tej części symulacji wynosi 1. Wprowadzenie zróżnicowanych czasów operacji dla różnych stanowisk spowodowałoby, że najdłuższy z czasów stałby się taktem produkcji dla danego wyrobu, a maszyna do której byłby przypisany – „wąskim gardłem”. Ponadto należałoby wprowadzić magazyny międzystanowiskowe lub bufory czasowe.

Każda z linii ma przynajmniej jedną maszynę wspólną dla wszystkich wariantów, więc w niektórych sytuacjach konieczne są przebrojenia. Wyróżnia się trzy takie zdarzenia:

- pierwsze uruchomienie maszyny (zależnie od wariantu),
- przejście bezpośrednio z jednego wariantu produkcyjnego na inny,
- powrót do pracy po postoju, jeśli warianty po i przed nim są różne.

Ostatnim etapem jest kompletowanie i wysyłanie gotowych zamówień do odbiorców. Wszystkie produkty opuszczające linię są grupowane zgodnie z zamówieniami, w kolejności od najstarszego do najmłodszego. Każda z takich grup otrzymuje etykietę z numerem zamówienia i jest przewożona do magazynu. W chwili, kiedy w magazynie znajdują się już wszystkie pozycje konkretnego zamówienia (opisane takimi samymi etykietami), są one wysyłane do odbiorcy.

Badania symulacyjne

Cel jaki został postawiony to sprawdzenie w jaki sposób liczba przyjmowanych na bieżąco zamówień wpływa na sterowanie systemem oraz spełnienie warunków gwarantujących stabilność i zbieżność systemu sterowania z algorytmem NHP.

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla stałych, cyklicznie zmiennych i pojawiających się losowo planów operacyjnych (zamówień klientów). Potwierdziły one, że generowane przez algorytm NHP decyzje planowania wykonawczego nadążają za operacyjnymi planami produkcji (zleceniami produkcyjnymi), a dla stałych lub cyklicznie zmiennych planów operacyjnych układają się w harmonogramy cykliczne (cyklogramy), osiągnane po skończonej liczbie kroków tworzących przedział czasowy stanu nieustalonego.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metodę nadążnego sterowania produkcją wykorzystaną do harmonogramowania produkcji powtarzalnej. Omówiono algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji, który jest algorytmem lokalnym w hierarchicznym systemie nadążnego sterowania produkcją. Algorytm NHP działa w chwili zakończenia okresu pracy lub postoju danej maszyny (komórki roboczej systemu) i na podstawie obliczanych na bieżąco zaległości w realizacji planów operacyjnych przez plany wykonawcze podejmuje bieżące decyzje o pracy lub o postoju komórki produkcyjnej. Generowane na bieżąco powtarzalne zlecenia wykonawcze są jednoznaczne, więc nie trzeba ich optymalizować. Można jednak wpływać na jakość działania algorytmu dobierając odpowiednio reguły

priorytetu stosowane do wyboru grupy produktów, które mają być wykonane w bieżącym okresie pracy. Przeprowadzone wcześniej badania symulacyjne potwierdziły, że generowane przez algorytm NHP decyzje planowania wykonawczego nadążają za operacyjnymi planami produkcji (zleceniami produkcyjnymi), a dla stałych lub cyklicznie zmiennych planów operacyjnych układają się w harmonogramy cykliczne (cyklogramy), osiągnane po skończonej liczbie kroków tworzących przedział czasowy stanu nieustalonego.

Nadażne sterowanie produkcją może być wykorzystane np. przez firmy cateringowe, zajmujące się organizacją przyjęć, uroczystości, dostarczaniem posiłków regeneracyjnych dla pracowników, zaopatrywaniem bufetów, itd. Krótkie terminy ważności surowców i produktów wymuszają bieżące realizowanie zleceń. Algorytm NHP może mieć również zastosowanie w zarządzaniu środkami transportu w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Na potrzeby tej pracy dokonano szczegółowej analizy procesów produkcji firmy cateringowej w której zastosowano nadażne sterowanie produkcją. Opracowywano symulacyjny model procesu produkcyjnego a do symulacji wykorzystano środowisko ProModel firmy PROMODEL Corporation. Stosowanie komputerowych technik modelowania i symulacji umożliwia szybkie projektowanie nowych i weryfikacji istniejących systemów produkcyjnych, pozwala wykonywać eksperymenty na wielu wariantach wirtualnego procesu produkcyjnego jednocześnie oraz śledzić skutki wprowadzonych zmian przed podjęciem ostatecznych decyzji. Takie postępowanie zmniejsza ryzyko niepowodzenia oraz umożliwia wybór najkorzystniejszego wariantu w rzeczywistych warunkach aplikacyjnych.

Praca finansowana ze środków przewidzianych na BK-221/RAu1/20010/t.5.

LITERATURA

- [1] Banaszak Z., Jampolski L.: *Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych*, WNT, Warszawa 1991.
- [2] Coffman E.G.Jr (red), *Teoria szeregowania zadań*, Warszawa, WNT 1980
- [3] Janiak A., *Wybrane problemy i algorytmy szeregowania zadań i rozdziału zasobów*, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza, PLJ 1999.
- [4] Krystek J., Zaborowski M.: *Nadażne sterowanie produkcją jako metoda harmonogramowania produkcji powtarzalnej*. *Pomiary Automatyka Kontrola* Vol 53, 8-2007, s. 33-37
- [5] Krystek J., Zaborowski M.: *Harmonogramowanie nadażne z zadaną kolejnością wariantów produkcyjnych*. [W:] Zaborowski M. (red) *Automatyzacja procesów dyskretnych. Sterowanie procesami dyskretnymi. Zarządzanie i inżynieria produkcji*, WNT 2004.
- [6] Krystek J., Zaborowski M.: *Badania symulacyjne algorytmu nadażnego harmonogramowania produkcji*. IX Szkoła Komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji Jurata 2005, WNT Warszawa 2005.
- [7] Krystek J., Zaborowski M.: *Działanie algorytmu nadażnego harmonogramowania produkcji przy cyklicznie zmiennych planach operacyjnych*. IX K.K. „Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie”, Zakopane 2006, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2006, Tom 1, str.67-78.
- [8] Sawik T.: *Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych*, WNT. Warszawa 1992.
- [9] Wróblewski K.J.: *Podstawy sterowania przepływem produkcji*. WNT, Warszawa 1993.

- [10] Zaborowski M.: *Harmonogramowanie nadążne jako metoda dekompozycji złożonych zadań harmonogramowania produkcji*, ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 109, Gliwice 1992.
- [11] Zaborowski M.: *Stabilność procesu nadążnego harmonogramowania produkcji*, ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 129, Gliwice 2000.
- [12] Zaborowski M.: *Zbieżność procesu nadążnego harmonogramowania produkcji*, ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 129, Gliwice 2000.
- [13] Zaborowski M.: *Nadążne sterowanie produkcją*, Wyd. WAEI Politechniki Śląskiej, ISBN 83-904743-2-8, Gliwice 2003.
- [14] Zaborowski M., Krystek J.: *Algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji*. III K.K. „Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie”, Zakopane 2000.
- [15] Zaborowski M., Krystek J.: *Wpływ reguł priorytetu na działanie algorytmu nadążnego sterowania produkcji*. VIII K.K. „Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie”, Zakopane 2005, WNT Warszawa 2005, str. 668-679.
- [16] <http://www.promodel.com> i ProModel version 7 User Guide.

THE FOLLOW-UP CONTROL OF REPETITIVE PRODUCTION PROCESS

Abstract

In the paper the follow-up production control as a method of repetitive production scheduling is presented. A short description of the follow-up scheduling algorithm is given. The follow-up scheduling algorithm is designed to current generation of work cell executive plans which follow operational production plans coming from coordination unit. A simulation model of the repetitive production process was developed. The simulation software ProModel of PROMODEL Corporation is used and a short description of simulation model in ProModel software is given.

Keywords: production control, follow-up scheduling, repetitive production, dispatch rules, simulation