

Jolanta KRYPEK¹, Mirosław ZABOROWSKI²¹ POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI, ZAKŁAD INŻYNIERII SYSTEMÓW² INSTYTUT INFORMATYKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ PAN**Nadążne sterowanie produkcją jako metoda harmonogramowania produkcji powtarzalnej****Dr inż. Jolanta KRYPEK**

Adiunkt w Zakładzie Inżynierii Systemów Instytutu Automatyki Politechniki Śląskiej. Jej zainteresowania naukowe dotyczą zagadnień związanych z zintegrowanymi systemami informatycznymi oraz systemami sterowania produkcją. Jest autorką lub współautorką ponad 20 publikacji.



e-mail: jolanta.krypek@polsl.pl

Dr hab. inż. Mirosław ZABOROWSKI

Pracuje w Instytucie Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN w Gliwicach oraz w Wyższej Szkole Biznesu w Dąbrowie Górniczej. Jego specjalnością są informatyczne systemy zarządzania oraz systemy sterowania produkcją. Od kilku lat rozwija „model informacyjno-decyzyjny systemów zarządzania”, będący uniwersalnym modelem referencyjnym tych systemów. Autor lub współautor ponad 100 publikacji.



e-mail: mzaborowski@iitis.gliwice.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę nadążnego sterowania produkcją, którą można wykorzystać do harmonogramowania procesów produkcji powtarzalnej. Omówiono krótko algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji, który jest przeznaczony do bieżącej generacji planów wykonawczych danej komórki systemu produkcyjnego, w taki sposób, by nadały one za operacyjnymi planami produkcji pochodzącymi z jednostki koordynacyjnej systemu. Celem badań było sprawdzenie wpływu reguł priorytetu, stosowanych do wyboru wariantów produkcyjnych, na czas trwania stanów nieustalonych i na właściwości cyklogramów produkcji rytmicznej generowanych przez algorytm w stanach ustalonych.

Słowa kluczowe: sterowanie produkcją, harmonogramowanie, produkcja powtarzalna

The Follow-up Production Control as a Method of Repetitive Production Control**Abstract**

In the paper the follow-up production control is presented as a method of repetitive production scheduling. 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. The simulation research goal was to verify if dispatch rules, that are applied to production variants selection, influence on duration of transient state and on features of cyclic schedules generated by the algorithm in steady-state.

Keywords: production control, scheduling, repetitive production

1. Wprowadzenie

Każdy system zarządzania jest systemem sterowania, w którym informacje o zarządzanej jednostce organizacyjnej są przetwarzane na dotyczące jej decyzje.

Opracowana metoda nadążnego sterowania produkcją [18] a w szczególności optymalizacja decyzji w ramach tej metody, wymaga takiego modelu systemów zarządzania, który z jednej strony obejmowałby zarządzanie procesami organizacyjnymi i ich interakcję z procesami produkcyjnymi [20], a z drugiej odzwierciedlałby te sposoby obliczania kosztów i innych ekonomicznych kryteriów oceny decyzji, które są praktycznie stosowane w zintegrowanych systemach zarządzania.

Konkurencja pomiędzy wytwórcami zmusza ich do stałego podnoszenia jakości i skracania czasu reakcji na zamówienia klientów przy jednoczesnym obniżaniu cen. Postulaty te pozornie są ze sobą w sprzeczności, jednak w praktyce okazuje się, że możliwe jest ich spełnienie. Rozwiązaniem jest usprawnianie technologii oraz właściwa organizacja produkcji. Zakłady produkcyjne dążą do zmniejszania kosztów wytwarzania i magazynowania

przez pełniejsze wykorzystanie zdolności produkcyjnych, skracanie cykli produkcyjnych i spadek zapasów oraz do dostosowania zmian asortymentu i tempa produkcji do wpływających na bieżąco zamówień. Jednym z trudniejszych problemów zarządzania jest koordynacja zmian organizacyjnych przez plany produkcyjne, zmieniające się pod wpływem bieżących zamówień klientów. Zapotrzebowanie na produkowane wyroby składane jest przez klienta jako indywidualne zlecenie. Aby osiągnąć odpowiedni poziom elastyczności i skrócić cykle produkcji niezbędne jest efektywne sterowanie produkcją. Nadążne sterowanie produkcją może być jednym ze sposobów osiągnięcia tych celów w przypadku produkcji powtarzalnej.

Autorzy przyjmują, że produkcja powtarzalna (ang. *repetitive production*) w systemie produkcji na magazyn jest to produkcja w komórce produkcyjnej systemu, w której co pewien okres czasu powtarzane są asortymenty wytwarzanych produktów oraz uzbrojenie maszyn i ich przydział do operacji. 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 [9]. Ponieważ przezbieranie maszyn, wiążące się ze zmianą asortymentu produkcji, jest drogim i czasochłonnym procesem, dąży się do wydłużania okresów czasu między przebrojeniami, czyli do zwiększania wielkości partii produkowanych wyrobów. Z drugiej strony, jak wiadomo, wzrost wielkości partii skutkuje wzrostem poziomu zapasów, a to prowadzi do zwiększenia kosztów magazynowania. Znane są wzory na tzw. optymalną wielkość partii, która minimalizuje sumę kosztów przebrożeń i magazynowania [11], lecz w praktyce bieżące sterowanie przebrojeniami daje wielkości partii znacznie różniące się od optymalnych. Celem tego sterowania jest przede wszystkim dostosowanie obciążenia każdej z maszyn lub linii produkcyjnych systemu do zmieniającego się zapotrzebowania na jej produkty.

Produkcja powtarzalna charakteryzuje się skończoną liczbą wariantów uzbrojenia maszyn w komórkach produkcyjnych i odpowiadającego im asortymentu produktów, powtarzających się w na ogół nieregularnych odstępach czasu. Warianty uzbrojenia dalej będą nazywane wariantami produkcyjnymi, a w [18] nazywa się je wariantami gotowości jednostek organizacyjnych. W czasie pracy w danym wariantcie produkcyjnym komórka produkcyjna wytwarza określoną partię produktu lub współbieżnie produkuje partie produktów z określonej grupy.

Do harmonogramowania procesów produkcji powtarzalnej można wykorzystać metodę nadążnego sterowania produkcją (NSP), w tym algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji (NHP) [15,19]. Inną metodą jest szeroko znana metoda Kanban [2, 10, 11], będąca częścią operacyjną rozwiniętej w Japonii metody

organizacji produkcji, znanej pod nazwą Just in Time (dokładnie na czas). Zaletą metody Kanban, jak również metody NSP, jest możliwość utrzymywania stosunkowo małych zapasów produkcji w toku. Spotykane czasem opinie, iż metoda Kanban pozwala na całkowite wyeliminowanie zapasów, są błędne, co jest oczywiste, jeśli się pamięta, że produkcja powtarzalna jest produkcją na magazyn.

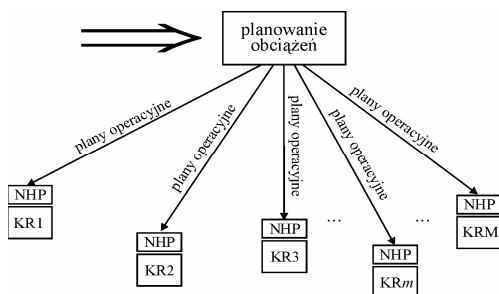
2. Nadążne sterowanie produkcją (NSP)

Nadążne sterowanie produkcją różni się znacznie od szeregowania zadań, które jest klasyczną metodą harmonogramowania produkcji [1, 3, 4, 12, 13].

Po pierwsze, nadążne sterowanie produkcją jest przeznaczone do bieżącego podejmowania decyzji o zadaniach przydzielanych do komórek produkcyjnych w chwilach zakończenia przez nie zadań wykonywanych poprzednio [15], a nie do opracowywania harmonogramów dotyczących przyszłości. Drobną modyfikacją algorytmu NHP umożliwia generację harmonogramów dla dowolnie długiego horyzontu planowania i tylko ta odmiana metody NSP może być dalej porównywana z szeregowaniem zadań. Jej wadą, podobnie jak każdego algorytmu szeregowania zadań, jest oparcie decyzji na niepewnych prognozach przyszłych zleceń i zdolności produkcyjnych.

Po drugie, metoda NSP dotyczy systemów produkcyjnych składających się z komórek podlegających całościowym przebrojeniom.

Po trzecie, inaczej są zdefiniowane zlecenia dla systemu produkcyjnego. W przypadku klasycznego szeregowania zadań niepodzielnych zlecenie jest uporządkowanym zbiorem zadań o danych czasach wykonania. Czasy wykonania 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, to znaczy liczba sztuk produktu do wykonania, lecz wielkość ta nie ma znaczenia dla sposobu rozwiązania problemu. 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 wykluczenia przydziału danej maszyny do różnych zadań (rys. 1).



Rys. 1. Dekompozycja zadań harmonogramowania w systemie nadążnego sterowania produkcją. Źródło[14]

Fig. 1. Decomposition of scheduling tasks in a follow-up controlsystem

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

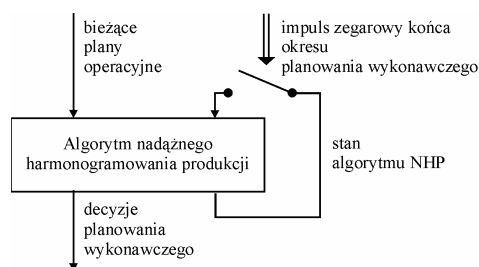
zlecenia, wraz z prognozami chwil przybycia do systemu i pożądanymi terminami zakończenia. Dla każdego okresu planowania operacyjnego najpierw rozwiązywany jest problem przydziału obciążeń do poszczególnych maszyn (komórek systemu), który może być sformułowany jako zagadnienie programowania liniowego [12]. Postawienie tego problemu 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 wykonań 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 wykluczenia 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 jedyną, co pozostaje do zrobienia, to zdecydowanie – dla każdej maszyny oddzielnie – o kolejności wykonania zadań. Do tego służy algorytm NHP. Mówiąc ściślej, algorytm NHP działa w chwili zakończenia okresu pracy lub postoju danej maszyny (komórki systemu) i podejmuje bieżącą decyzję o pracy lub postoju. W przypadku pracy jest to decyzja o wariacie produkcyjnym, co określa zestaw produktów wytwarzanych na maszynie (w komórce systemu), i o wielkościach partii tych produktów. Ponadto w obu przypadkach 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. Uzasadnieniem nazwy algorytmu NHP jest fakt, że w każdej chwili jego przeszłe decyzje mają strukturę harmonogramu.

Ze względu na główny cel bieżącego sterowania komórką produkcyjną może się wydawać, że decyzję o pracy należy podejmować zawsze, gdy istnieją jakiegokolwiek zaległości w realizacji planów operacyjnych, a wielkości partii powinny być jak największe. Jednocześnie dla zagwarantowania ograniczenia zaległości od dołu, wielkości partii dla wybranego wariantu produkcyjnego nie powinny być większe od wartości zaległości w chwilach podejmowania decyzji. Wynika z tego wniosek, że powinny być im równe. Stąd małym wartościom zaległości odpowiadają małe wartości partii produkcyjnych. Jednak 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. Z drugiej strony wiadomo, że dużym wielkościom partii odpowiadają duże wahania zapasów produkcji w toku, co wiąże się z kosztami magazynowania. Dlatego w chwili podejmowania decyzji należy porównywać zaległości dla poszczególnych wariantów z odpowiednio dobranymi wartościami progowymi.

Algorytm NHP jest algorytmem lokalnym w hierarchicznym systemie sterowania produkcją. Obliczanie planów obciążenia maszyn (KR1...KRm...KRM - komórki systemu na rys. 1) to planowanie operacyjne, a nadążne harmonogramowanie produkcji – planowanie wykonawcze. Decyzje algorytmu NHP podejmowane są na podstawie stanu algorytmu (rys.2), na który składają się ostatnio podjęte decyzje i stan zaległości w realizacji planów

operacyjnych przez plany wykonawcze. Zaległości są skumulowanymi różnicami między tymi planami w kolejnych okresach planowania wykonawczego. Zatem można je uważać za miarę jakości nadążania planów wykonawczych za operacyjnymi. Plany operacyjne są wprowadzane ze stałym okresem będącym wielokrotnością okresu planowania wykonawczego. Algorytm NHP pracuje w układzie ze sprzężeniem zwrotnym, analogicznym do układu regulacji nadążnej, przy czym plany operacyjne pełnią rolę wielkości wiodących, wykonawcze – nadążających, a zaległości są całkami z błędów regulacji, rozumianych jako różnice między wielkościami tych planów.



Rys. 2. Zastosowanie nadążnego harmonogramowania produkcji do generacji bieżących decyzji planowania wykonawczego. Źródło [14]

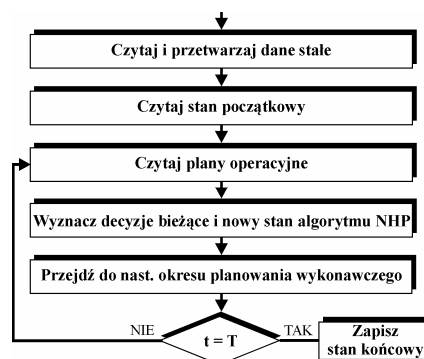
Fig. 2. Application of the follow-up scheduling algorithm to generating current executive plans

Czas trwania obliczeń za pomocą algorytmu NHP (planowanie wykonawcze) zależy liniowo zarówno od liczby maszyn w systemie, jak i od długości horyzontu harmonogramowania. Czas trwania obliczeń planowania obciążeń (planowanie operacyjne) również zależy liniowo od długości horyzontu harmonogramowania, ponieważ tak zależy od niego liczba uruchomień odpowiedniego algorytmu programowania liniowego. Szybciej niż liniowo rośnie tylko czas obliczeń programowania liniowego w funkcji liczby maszyn i liczby zadań. Metodę NSP można więc prezentować jako wyjątkowo skuteczną metodę dekompozycji problemów harmonogramowania, których szczególnymi przypadkami są problemy szeregowania zadań. Jednak, choć wielu badaczy wciąż poszukuje algorytmów szeregowania zadań o małej złożoności obliczeniowej, nie to jest jej główną zaletą. Istotną jest możliwość wykorzystania metody NSP do bieżącego podejmowania decyzji, a nie do układania harmonogramów, które w praktyce stają się nieaktualne prawie natychmiast po ich obliczeniu.

3. Algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji (NHP)

Algorytm NHP jest przeznaczony do bieżącej generacji planów wykonawczych danej komórki systemu produkcyjnego w taki sposób, by plany te nadążały za planami operacyjnymi komórki, pochodzącymi z jednostki koordynacyjnej systemu. Planami operacyjnymi w rzeczywistym systemie produkcyjnym są zlecenia produkcyjne.

Procedura *Czytaj i przetwarzaj dane stałe* odczytuje z bazy danych dane stałe algorytmu NHP (liczby wariantów i produktów, okres powtarzalności, długość okresu planowania operacyjnego, współczynnik wykorzystania zasobów odnawialnych, liczbę okresów planowania wykonawczego objętych horyzontem harmonogramowania, zbiory produktów wytwarzanych w poszczególnych wariantach produkcyjnych, długości okresów przygotowawczych, takty produkcji, wielkości partii produktów w warunkach idealnej produkcji rytmicznej). Na podstawie odczytanych danych stałych wyliczane są wartości progowe miar czasowych zaległości w realizacji planów operacyjnych.



Rys. 3. Procedury algorytmu nadążnego harmonogramowania produkcji
Fig. 3. Procedures of the follow-up scheduling algorithm

Procedura *Czytaj stan początkowy* odczytuje stan początkowy algorytmu NHP (numer chwili początkowej, będącej numerem pewnego okresu planowania wykonawczego i jego chwili końcowej, numery okresu planowania operacyjnego i okresu NHP do których należy chwila początkowa, chwile końcowe bieżących okresów planowania operacyjnego i okresu NHP oraz numery wariantu produkcyjnego w chwili początkowej. Ponadto dla poszczególnych wariantów produkcyjnych: początkowe wartości wskaźników priorytetu i miar czasowych zaległości w nadążaniu planów wykonawczych za planami operacyjnymi, a dla każdego produktu w każdym wariantcie także wartości tych zaległości).

Procedura *Czytaj plany operacyjne*: plany operacyjne spełniają w algorytmie rolę wielkości wiodących i są wprowadzane ze stałym okresem będącym wielokrotnością okresu planowania wykonawczego. Procedura jest wykonywana tylko wtedy, gdy bieżący okres planowania wykonawczego jest ostatnim z należących do bieżącego okresu planowania operacyjnego.

W procedurze *Wyznacz decyzje bieżące i nowy stan NHP* odbywa się:

- wyznaczanie wstępnych wartości nowego stanu algorytmu NHP,
- korekta stanu pochodzącej od nowych planów operacyjnych oraz
- wyznaczanie decyzji bieżących (o pracy lub postoiu danej komórki produkcyjnej i o chwili podjęcia następnej decyzji) oraz korekta stanu pochodzącej od tych decyzji.

Szczegóły działania procedury *Wyznacz decyzje bieżące i nowy stan NHP* w zależności od zastosowanej reguły priorytetu opisane były w pracach [5, 6]

Następnie wykonywana jest procedura aktualizacji wszystkich współrzędnych stanu przed przejściem do następnego okresu planowania wykonawczego. Ponadto w przypadku generacji harmonogramu dla wielu okresów planistycznych sprawdzany jest warunek zakończenia obliczeń.

4. Rola reguł priorytetu w algorytmie NHP

W literaturze znanych jest wiele reguł priorytetu, które w klasycznie sformułowanych problemach szeregowania zadań są wykorzystywane do ustalania kolejności zadań oczekujących na wykonanie w komórkach systemu produkcyjnego. Istotną kwestią jest wybór odpowiedniej reguły priorytetu, która w danych warunkach zapewniłaby najlepsze wartości przyjętego kryterium oceny harmonogramów. Należy wyraźnie zaznaczyć, że w przypadku algorytmu NHP reguły priorytetu są stosowane do wyboru wariantu produkcyjnego, czyli grupy produktów [5], a nie do

wyboru pojedynczego zadania, jak w przypadku szeregowania zadań.

Dla algorytmu NHP istnieje dowód, że jeśli plany operacyjne nie przekraczają zdolności produkcyjnych danej komórki, to algorytm gwarantuje nadążanie planów wykonawczych za operacyjnymi, czyli ograniczoność zaległości w nieskończonym horyzoncie obserwacji [16]. Dzieje się tak dzięki odpowiednio dobranym wartościom progowym zaległości, poniżej których algorytm podejmuje decyzję o postoju. Ponadto udowodniono, że jeśli plany operacyjne począwszy od pewnej chwili są stałe, to algorytm zapewnia, po skończonej liczbie kroków, zbieżność planów wykonawczych do idealnych harmonogramów cyklicznych [17]. Przy tym w każdym okresie powtarzalności poszczególne warianty produkcyjne występują dokładnie jeden raz. Obie wymienione wyżej 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.

Powstaje więc pytanie, czy dobór reguł priorytetu ma wpływ na jakość działania algorytmu NHP, skoro jego podstawowe właściwości nie zależą od niego, a z drugiej strony praktyka klasycznego szeregowania zadań każe spodziewać się takiego wpływu. W algorytmie NHP zaproponowano wykorzystanie następujących reguł wyboru wariantu produkcyjnego [5]:

- LPT – (ang. *longest processing time*), najdłuższy czas wykonania,
- SPT – (ang. *shortest processing time*), najkrótszy czas wykonania,
- FIFO – (ang. *first in – first out*), PPPO – (pierwszy przybył – pierwszy obsłużony),
- LIFO – (ang. *last in – first out*) – ostatni przybył – pierwszy obsłużony,
- ZKWP – z zadaną kolejnością wariantów produkcyjnych (minimalizująca koszty przebrojeń),
- LPT bwp – z regułą LPT bez wartości progowych.

Reguła LPT wybiera wariant produkcyjny o najdłuższym czasie potrzebnym do likwidacji zaległości. 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. Heurystyczny algorytm NHP-ZKWP o zadanej kolejności wariantów produkcyjnych został skonstruowany tak, żeby w stanie ustalonym osiągać kolejność wariantów zgodną z ich numeracją [6]. 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. Jednak produkcja realizowana w małych partiach jest niekorzystna, gdyż prowadzi do dużej częstotliwości przebrojeń, co zwiększa koszty, a zmniejsza udział czasu pracy w łącznym czasie produkcji i przebrojeń. Algorytm ten warto stosować tylko w przypadku popytu znacznie mniejszego od zdolności produkcyjnych.

5. Badania symulacyjne jakości działania algorytmu NHP

Decyzje algorytmu NHP mogą być przedstawione w postaci tzw. powtarzalnych zleceń wykonawczych, które nadążają za zleceniami produkcyjnymi [15]. Każda z nich dotyczy okresu

czasu między kolejnymi przebrojeniami danej komórki produkcyjnej i wskazuje grupę produktów do wykonania w danym wariantcie produkcyjnym. Wskazuje 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 zwiększają się liczba przebrojeń i długość okresu powtarzalności, a w konsekwencji także koszty magazynowania. Należy dołożyć wszelkich starań, aby działanie algorytmu nadającego 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 żądanego terminu ich zakończenia [8].

Skuteczność algorytmu NHP należało zbadać przy różnych regułach w znacznie różniących się sytuacjach [5]:

- 1) plany operacyjne zmieniają się przypadkowo, a komórka produkcyjna nigdy nie pracuje rytmicznie,
- 2) plany operacyjne są przedziałami stałe, lecz zmieniają się na tyle często, że komórka produkcyjna rzadko kiedy pracuje rytmicznie, a przez większość czasu pozostaje w stanie nieustalonym,
- 3) plany operacyjne są przedziałami stałe, a zmieniają się tak rzadko, że w komórce prawie zawsze mamy do czynienia z produkcją rytmiczną.

Odpowiednie do tych sytuacji przedziały czasowe:

- 1) przedział generowania nieregularnych, zmieniających się losowo planów operacyjnych, – oceniany przez średnie wartości miar czasowych zaległości
- 2) przedział trwania stanu nieustalonego, przy stałych planach operacyjnych do chwili pojawienia się idealnych harmonogramów rytmicznych (cyklogramów), – oceniany przez czas trwania stanu nieustalonego,
- 3) przedział trwania stanu ustalonego, przy stałych planach operacyjnych i idealnie rytmicznych planach wykonawczych – oceniany kolejnością wariantów w cyklogramie stanu ustalonego.

Algorytm NHP został zaimplementowany i zrealizowany w technologii internetowej. Aplikacja „Algorytm Nadążnego Harmonogramowania Produkcji” jest dostępna pod adresem URL: <http://nhp.fl1.com.pl>. Są w niej dostępne wszystkie wersje algorytmu NHP związane z zastosowaniem odpowiedniej reguły priorytetu [7].

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych nie stwierdzono wpływu wyboru reguł priorytetu na wartości średnie miar czasowych zaległości w przedziale losowo zmiennych planów operacyjnych. Czasy trwania stanów nieustalonych przy regule LPT były średnio krótsze niż przy stosowaniu innych reguł. Algorytm NHP-ZKWP za każdym razem doprowadzał do zadanej kolejności wariantów produkcyjnych w cyklogramie stanu ustalonego, podczas gdy dla innych odmian algorytmu NHP kolejność ta była przypadkowa. Niestety, skuteczność algorytmu

NHP-ZKWP w stanach ustalonych okupiona jest jego zdecydowanie najgorszymi wynikami dla losowo zmiennych planów operacyjnych i dla stanów nieustalonych przy stałych planach operacyjnych.

Przebiegi planów wykonawczych generowane przez algorytm NHP badano również w następujących przedziałach czasowych:

- 1) w czasie generowania nieregularnych zmieniających się losowo planów operacyjnych,
- 2) w czasie trwania stanu nieustalonego przy cyklicznie zmiennych planach operacyjnych, do chwili pojawienia się idealnych harmonogramów cyklicznych,
- 3) w czasie trwania stanu ustalonego przy cyklicznie zmiennych planach operacyjnych i idealnie rytmicznych planach wykonawczych.

Porównano wpływ reguł LPT i ZKPW na jakość działania algorytmu w sytuacji, gdy początkowo plany operacyjne są stałe, a harmonogramy są cykliczne, po czym plany operacyjne w jednej chwili zmieniają się na cykliczne z okresem równym okresowi powtarzalności harmonogramów w przedziale początkowym [8]. Począwszy od tej chwili, harmonogram generowany przez algorytm przez pewien okres czasu pozostaje w stanie nieustalonym, by po skończonej liczbie kroków stać się ponownie cyklogramem produkcji rytmicznej. Przeanalizowano działanie algorytmu, zwracając szczególnie uwagę na czas trwania stanów nieustalonych i na właściwości cyklogramów produkcji rytmicznej generowanych przez algorytm w stanie ustalonym, dla cyklicznie zmiennych planów operacyjnych. Badania potwierdziły ograniczoną zaległość w nadążaniu planów wykonawczych za operacyjnymi, czyli stabilną pracę algorytmu NHP, także w sytuacji przejścia od stałych zleceń produkcyjnych do zleceń pojawiających się cyklicznie.

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 postoiu 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 postoiu komórki produkcyjnej. Harmonogram produkcji (plany wykonawcze) generowany przez algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji może być zastosowany do planowania produkcji powtarzalnej. 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. 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), 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. Może to być kolejność minimalizująca koszty przebrojeń, znaleziona na przykład za pomocą algorytmu komiwojażera. Heurystyczny algorytm NHP-ZKWP o zadanej kolejności wariantów produkcyjnych został właśnie tak skonstruowany.

Praca częściowo finansowana w ramach projektu badawczego KBN 3T11A02229.

7. Literatura

- [1] Banaszak Z., Jampolski L.: Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych, WNT, Warszawa 1991.
- [2] Browne J., Harhen J., Shivnan J.: Production Management System An Integrated Perspective, Addison Wesley, 1996.
- [3] Coffman E.G.Jr (red), Teoria szeregowania zadań, Warszawa, WNT 1980.
- [4] Janiak A., Wybrane problemy i algorytmy szeregowania zadań i rozdziału zasobów, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza, PLJ 1999.
- [5] Krystek J., Zaborowski M.: Badania symulacyjne algorytmu nadążnego harmonogramowania produkcji. IX Szkoła Komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji Jurata 2005, WNT Warszawa 2005.
- [6] Krystek J., Zaborowski M.: Harmonogramowanie nadążne zadaną kolejnością wariantów produkcyjnych. W: Zaborowski M. (red) „Automatyzacja procesów dyskretnych. Sterowanie procesami dyskretnymi. Zarządzanie i inżynieria produkcji”, WNT 2004.
- [7] Krystek J., Zaborowski M.: Algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji i jego implementacja internetowa. Zastosowania informatyki w nauce, technice i zarządzaniu, IBS PAN seria BADANIA SYSTEMOWE, Warszawa 2005, tom 41.
- [8] Krystek J., Zaborowski M.: Kosztowe i czasowe kryteria optymalności algorytmu nadążnego harmonogramowania produkcji. ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 144, Gliwice 2006.
- [9] Lis S.: Podstawy projektowania systemu rytmicznej produkcji, PWN, Warszawa 1978.
- [10] Monden Y.: Toyota Production Systems: Practical Approach to Production Management, Industrial Engineering and Management Press, Atlanta, GA, 1983.
- [11] Ptak C.: ERP Tools, Techniques and Applications for Integrating the Supply Chain, CRC Press LLC, Boca Raton FA, 2004.
- [12] Sawik T.: Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych, WNT, Warszawa 1992.
- [13] Wróblewski K.J.: Podstawy sterowania przepływem produkcji. WNT, Warszawa 1993.
- [14] Zaborowski M.: Harmonogramowanie nadążne jako metoda dekompozycji złożonych zadań harmonogramowania produkcji, ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 109, Gliwice 1992.
- [15] Zaborowski M.: Nadążne harmonogramowanie produkcji, ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 129, Gliwice 2000.
- [16] Zaborowski M.: Stabilność procesu nadążnego harmonogramowania produkcji, ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 129, Gliwice 2000.
- [17] Zaborowski M.: Zbieżność procesu nadążnego harmonogramowania produkcji, ZN. Pol. Śl., s. Automatyka, z. 129, Gliwice 2000.
- [18] Zaborowski M.: Nadążne sterowanie produkcją, Wyd. WAEI Politechniki Śląskiej, ISBN 83-904743-2-8, Gliwice 2003.
- [19] Zaborowski M., Krystek J.: Algorytm nadążnego harmonogramowania produkcji. III K.K. „Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie”, Zakopane 2000.
- [20] Zaborowski M.: Model informacyjno-decyzyjny zarządzania zasobami. Rozdział 5 w M. Gruz, M. Lisiński (red.), P. Markiewicz, H. Walica, M. Zaborowski „Zarządzanie zasobami w przedsiębiorstwie”. Wyd. WSB, Dąbrowa Górnicza 2006, str. 139-204.