Tomasz Wiśniewski[1)],
Szymon Rymaszewski[1)],
Przemysław Korytkowski[1)]

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA DYNAMICZNIE PRZYDZIELANYCH PRIORYTETÓW W POLIGRAFII

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję zarządzania procesem produkcyjnym w drukarni w oparciu o dynamiczne reguły priorytetowe. Koncepcja zakłada, że przed każdym stanowiskiem roboczym będzie podejmowana decyzja o wyborze kolejnego zadania do obsłużenia. Przedstawione w artykule badania symulacyjne pokazują jak zmienia się efektywność produkcji w zależności od przyjętej dynamicznej reguły priorytetowej.

Słowa kluczowe: priorytety dynamiczne, produkcja poligraficzna, modelowanie symulacyjne.

WSTĘP

Firmy poligraficzne ciągłe zastanawiają się jakimi metodami można usprawnić proces produkcyjny, aby podnieść rentowność oraz skrócić czas realizacji zleceń. Istnieje wiele możliwości w tym zakresie, poczynając od podejścia najbardziej kapitałochłonnego, tj. inwestycji w nowe maszyny, poprzez modernizację istniejącego parku maszynowego, kończąc na szeroko rozumianych zmianach organizacyjnych. Celem tego artykułu jest przedstawienie korzyści jakie niesie ze sobą wdrożenie do zarządzania procesem produkcyjnym dynamicznego sterowania uruchamianiem zleceń ma poszczególnych etapach produkcyjnych z wykorzystaniem metod priorytetowania.

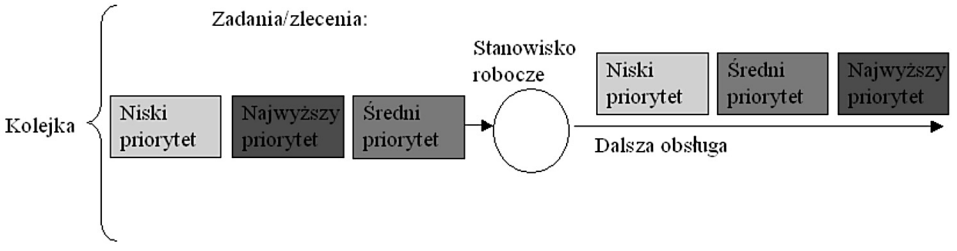
W większości drukarni zlecenia przekazywane są na produkcję wg klasycznych metod, tj. planowania kalendarzowego wprzód, czyli planuje się wykonywać operacje technologiczne tak szybko jak to jest możliwe, lub planowania kalendarzowego wstecz, czyli produkcję planuje się tak, aby zlecenia było zakończone dokładnie na uzgodniony z klientem termin. Metody te uzupełniane są czasem podziałem zleceń na pilne i normalne, gdzie zlecenia pilne mają priorytet zajęcia maszyn przed zleceniami normalnymi.

W trakcie produkcji pojawiają się nieprzewidywalne zakłócenia np. awarie maszyn, opóźnienia w dostawach materiałów, niekorzystne warunki atmosferyczne,

[1)] Katedra Inżynierii Systemów Informacyjnych, Wydział Informatyki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, e-mail: pkorytkowski@wi.zut.edu.pl

błędy oszacowania czasów wykonania zadań itp., które powodują, że planowane harmonogramy stają się niewydajne lub niemożliwe do zrealizowania. Zakłócenia produkcyjne są źródłem niepewności w harmonogramowaniu zadań. Są one kluczem do uzyskania modelu dobrze odwzorowującego rzeczywistość, w której bardzo często spotkać się można z informacją nieprecyzyjną lub niepełną. Obecność zakłóceń i niepewności w rzeczywistych systemach produkcyjnych przyczynia się do konieczności wprowadzania zmian w planowanym uszeregowaniu. Nie jest zatem możliwe szeregowanie zadań w całym systemie za pomocą z góry określonego harmonogramu. Bardziej elastycznym podejściem do szeregowania zadań, jest wykorzystanie mechanizmu priorytetu (lub szeregowania rozmytego, stochastycznego), w którym nie występuje sprecyzowane uszeregowanie kolejności wykonywanych zadań. Podczas pracy systemu zadania są wykonywane w kolejności zależnej od przypisanego im wcześniej priorytetu. Rozwiązania bazujące na wykorzystaniu mechanizmu priorytetu są bardziej elastyczne i lepiej przystosowują się do potrzeb danego przedsiębiorstwa.

Istota priorytetowania polega na tym, że jednostka o wyższym priorytecie znajdująca się w kolejce przed stanowiskiem jest obsługiwana przed jednostką o niższym priorytecie. Dzięki odpowiedniej strategii priorytetów przydzielana jest odpowiednia kolejność wykonywania zadań w kolejkach przed stanowiskami produkcyjnymi. Na rysunku 1 widać, że najwyższy priorytet wśród *n* zadań/zleceń ma zadanie 2, zatem zadanie 2 będzie obsłużone jako pierwsze.



Rys. 1. Istota priorytetowania zleceń

Metoda priorytetowania zleceń ma w rzeczywistości dwa zadania:

- podjęcie decyzji, które z oczekujących zadań powinno być obsłużone jako pierwsze,
- zarządzanie zadaniami oczekującymi na obsługę.

Zastosowanie reguł priorytetowych ma uzasadnienie w trudności wyboru zadania z kolejki oczekujących zadań przed stanowiskiem produkcyjnym. Istnieje *n!* sposobów na ustawienie *n* zadań oczekujących przed danym stanowiskiem. Czyli jeśli w kolejce znajduje się 10 zadań oczekujących na wykonanie na danym stanowisku można je wykonać na 3 628 800 sposobów.

Klasyfikacje systemów z priorytetami można przeprowadzić ze względu na sposób decyzji, która jednostka spośród czekających w kolejce wejdzie jako pierwsza:

- jeżeli decyzja w tej kwestii zależy tylko od tego, do której klasy jednostka ta należy, to takie systemy noszą nazwę systemów z priorytetem zewnętrznym (statyczne priorytety – ang. static priority). Priorytety statyczne nadawane są z góry, raz przed wejściem do systemu,
- jeżeli decyzja zależy od aktualnego stanu systemu mówi się o priorytetach wewnętrznych (priorytetach dynamicznych – ang. dynamic priority). Priorytety dynamiczne nadawane są przed każdym stanowiskiem.

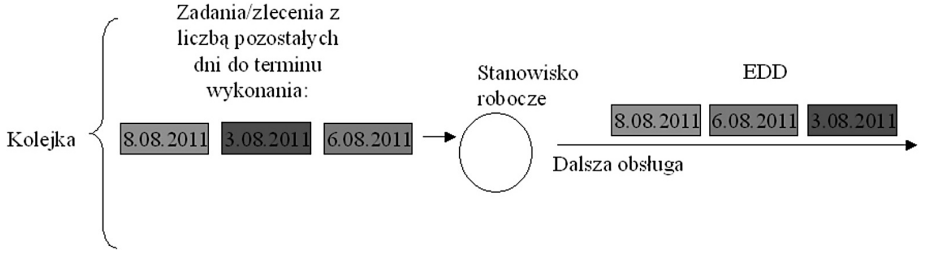
Drugie zagadnienie klasyfikujące systemy z priorytetami odnosi się do problemu co zrobić gdy do podczas obsługi jednostki z niższym priorytetem zgłosi się jednostka z wyższym priorytetem, można wówczas:

- przerwać obsługę jednostki o niższej klasie (priorytety rugujące / z wywłaszczeniem – ang. *preemptive scheduling*),
- kontynuować dalej obsługę (priorytety nierugujące / bez wywłaszczeń ang. *non-preemptive scheduling*).

DYNAMICZNE REGUŁY PRIORYTETOWE

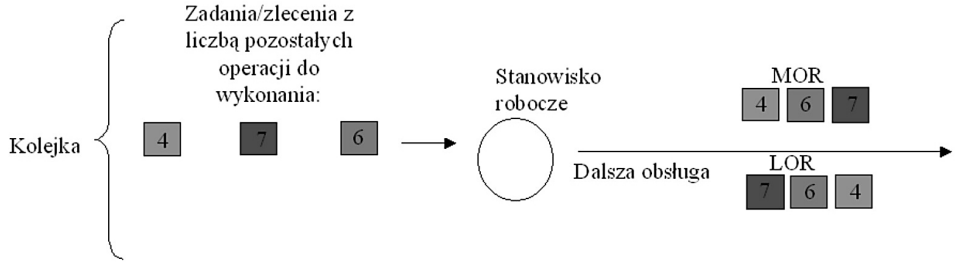
Priorytety dynamiczne są to metody pozwalające na ustalenie kolejności uruchamiana zleceń na maszynach w zależności od przyjętej polityki oraz bieżącego profilu obciążenia pracą. Najprostszą zasadą priorytetowania jest reguła FIFO, tj. zlecenia są obsługiwane w kolejności w jakiej napłynęły od klientów. Jest to reguła statyczna, to znaczy nie uwzględnia obecnej sytuacji na produkcji. Potraktowana zostanie ona jako punkt odniesienia przy badaniu efektywności dynamicznych priorytetów.

Do analizy przedstawionej w niniejszym opracowaniu zostały wybrane reguły, które można wdrożyć w firmach poligraficznych, to jest: EDD, MOR, LOR, SPT i LPT. Reguła EDD (ang. Earliest Due Date) wskazuje, że do obsłużenia na danym stanowisku roboczym jako pierwsze wybierane jest zlecenie, które ma najkrótszy pozostały czas na zakończenie zlecenia (schemat działania reguły zilustrowany na rysunku 2).



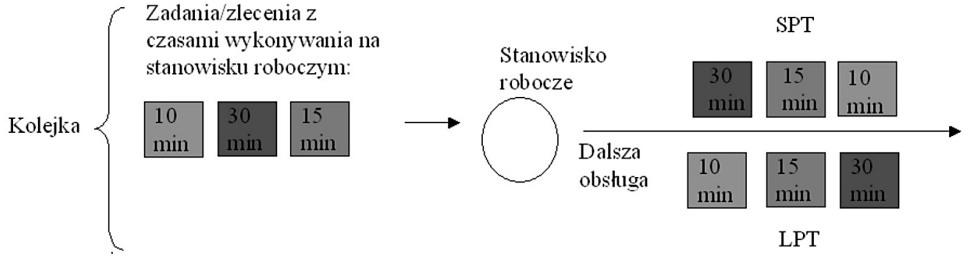
Rys. 2. Schemat obsługi reguły EDD

Reguła MOR (ang. Most Operation Remaining) preferuje zlecenia, które mają najwięcej operacji technologicznych jeszcze do wykonania (w sensie ilości stanowisk, przez które musi przejść). Reguła LOR (ang. Least Operation Remaining) jest przeciwieństwem poprzedniej reguły i preferuje zlecenia, dla których pozostało najmniej operacji technologicznych do wykonania. Zasadę działania reguł schematycznie przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat obsługi reguł MOR i LOR

Z kolei reguły SPT (ang. Shortest Processing Time) oraz LPT (ang. Longest Processing Time) biorą pod uwagę szacunkowy czas niezbędny do zakończenia zlecenia i wybierają dla SPT to z najkrótszym pozostałym czasem, a dla LPT z najdłuższym pozostałym czasem operacji technologicznych. Schemat działania reguł zobrazowano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat obsługi reguł MOR i LOR

Zarządzanie zleceniami produkcyjnymi przy pomocy reguł priorytetowych wdraża się w przedsiębiorstwie w celu: minimalizacji ilości przeterminowanych zadań, obniżenia poziomu produkcji w toku, zrównoważenia obciążenia pracą pracowników i maszyn. Z natury reguł priorytetowych wynika, że niestety nie można wyznaczyć tej jedynej, najlepszej reguły, która zapewniłaby jednoczesne osiągnięcie wszystkich wymienionych przed chwilą celów [2].

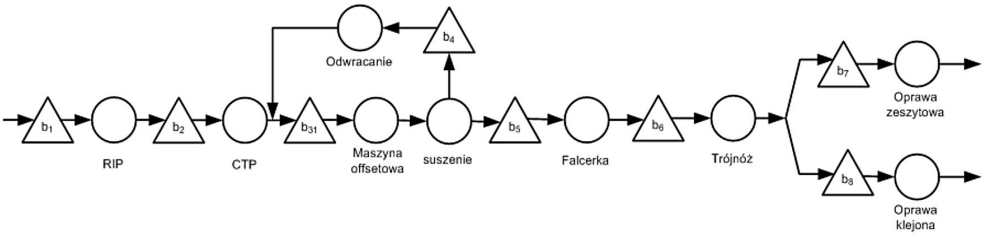
Obsługa zleceń w kolejności ich nadejścia (FIFO) jest uważana za „sprawiedliwą" gdyż cykl produkcyjny każdego zlecenia będzie na podobnym poziomie (minimalizacja wariancji cyklu produkcyjnego). Zastosowanie reguły SPT (shortest processing times) prowadzi do minimalizacji średniego czasu cyklu produkcyjnego,

czyli czasu jaki mija od rozpoczęcia procesu produkcyjnego do jego zakończenia, oraz minimalizacji średniego czasu przeterminowanych zleceń w warunkach wysokiego obłożenia pracą [5]. Jeśli rozpatrzeć wyłącznie średni czas przeterminowanych zleceń, to często lepsza może się okazać reguła EDD (earliest due date). Analizy przeprowadzone w [6] dla systemu składającego się z 8 stanowisk roboczych zorganizowanych w gniazda wskazują ponadto, że reguła FIFO nie najlepiej sprawdza się w środowisku, w którym każde zlecenie ma z góry określony termin realizacji.

Przedstawione w artykule podejście do zarządzania przepływem prac w drukarni może zostać zaimplementowane jako moduł wspierający podsystem planowania produkcji komercyjnego systemu informatycznego wspierającego zarządzanie drukarnią lub też może zostać zrealizowany jako niezależne narzędzie planistyczne.

MODEL DRUKARNI

Na potrzeby niniejszego artykułu załóżmy, że zajmiemy się analizą hipotetycznego systemu produkcyjnego w typowej drukarni offsetowej. Badaniu poddamy system składający się z 9 operacji technologicznych: RIP, CTP, maszyna offsetowa, suszenie, odwracanie, falcerka, trójnóż, oprawa zeszytowa, oprawa klejona. Zakładamy, że maszyna offsetowa jest minimum czterokolorowa bez odwracania. Przed każdą operacją technologiczną przewidziany jest bufor na zadania oczekujące na zwolnienie danej maszyny. Zadania z każdego bufora wybierane są do produkcji wg zadanej dynamicznej reguły priorytetowej. W analizowanym systemie uwzględniany jest podział zlecenia na arkusze drukarskie w przypadku prac o większej objętości oraz kompletacja przed ewentualną oprawą. Schemat ideowy analizowanego systemu produkcyjnego przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Schemat symulowanego offsetowe procesu produkcyjnego

Opisany system produkcyjny został zamodelowany w pakiecie symulacyjnym Arena firmy Rockwell Software. Arena jest środowiskiem umożliwiającym przeprowadzenie badań symulacyjnych praktycznie dowolnego systemu złożonego, w tym systemów produkcyjnych [3]. Uniwersalność tego narzędzia pozwala odwzorować procesy zachodzące w każdego typu drukarni. Wykorzystanie modelu symulacyj-

nego do analizy wpływu zastosowania priorytetów dynamicznych jest niezmiernie ważne gdyż pozwala na przeprowadzenie badań procesów produkcyjnych zachodzących w firmie bez ingerencji w rzeczywistą produkcję [4]. Oznacza, to że wszelkie analizy przeprowadza się tylko w komputerze, a wykorzystanie odpowiedniej metodyki przygotowania modelu symulacyjnego zapewnia ścisła korelację pomiędzy wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem modelu symulacyjnego a wynikami jakie można byłoby osiągnąć przeprowadzając analogiczne badania na rzeczywistym systemie produkcyjnym [1]. Raz przygotowany model symulacyjny pozwala na przeprowadzenie nawet bardzo dużej ilości analiz dla najróżniejszych konfiguracji i wariantów systemu produkcyjnego oraz profili obciążenia zleceniami itp. [7]. W modelu bardzo dokładnie odwzorowane są charakterystyki wydajnościowe wszystkich stanowisk roboczych, uwzględnione się między innymi: czasy operacji przygotowawczych i zakończeniowych, przerwy technologiczne, odpowiednio kalkulowany jest czas właściwej pracy.

BADANIA SYMULACYJNE

Czasy trwania operacji technologicznych na wszystkie stanowiskach roboczych zostały zamodelowane z uwzględnieniem ewentualnej losowości. Czasy dla poszczególnych stanowisk zostały podane w tabeli 1, dla operacji charakteryzujących się losowością podano oprócz wartości oczekiwanej również szacunkową wartość odchylenia standardowego. Pozostałe parametry modelu zostały zebrane poniżej:

1. Przeanalizowano pięć dynamicznych reguł priorytetowych (oraz regułę FIFO):

$$pr_i \in \{FIFO, EDD, LOR, MOR, SPT, LPT\}$$

2. Obciążenie sprzętu pracą zbadano na następujących poziomach:

50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%

3. Założono, że drukarnia produkuje trzy typy wyrobów:
   - ulotki,
   - broszury,
   - książki.
4. Parametry wynikowe podlegające analizie:
   - szacunkowy zysk ζ (1);
   - cykl produkcyjny – czas przetwarzania zlecenia (z podziałem na typy wyrobów);
   - ilość produkcji w toku (z podziałem na typy wyrobów);
   - długości kolejek przed stanowiskami roboczymi.
5. Parametry eksperymentów symulacyjnych:
   - czas przedbiegu wynosi 1 dzień,
   - czas pojedynczego badania wynosi 100 dni,
   - ilość identycznych i niezależnych losowo powtórzeń wynosi 5.

Tabela 1. Czasy trwania operacji technologicznych

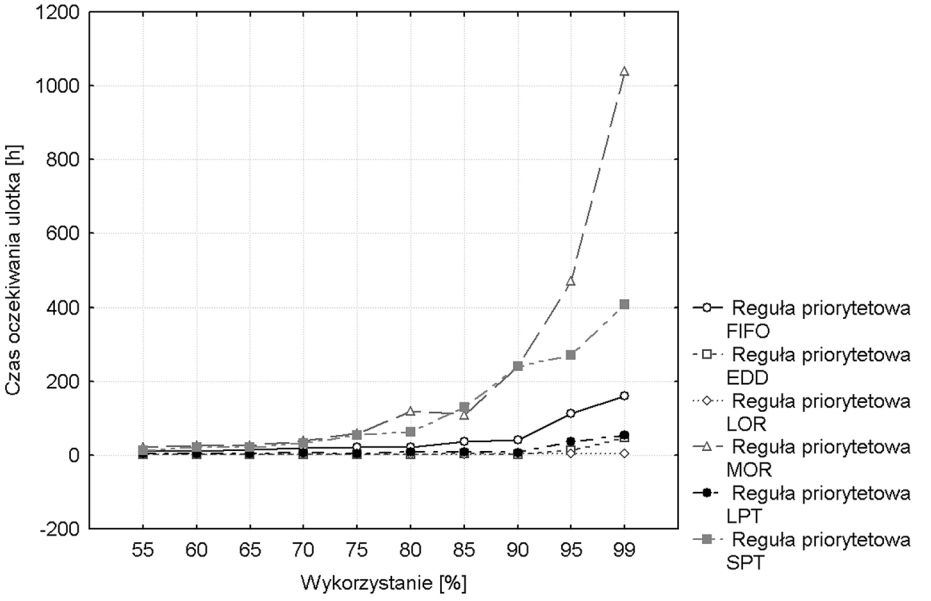
Stanowisko robocze	Wartość oczekiwana czasów przygotowawczych	Odchylenie standardowe czasów przygotowawczych	Wartość oczekiwana czasu operacji technologicznej dla 1 arkusza	Odchylenie standardowe operacji technologicznej dla 1 arkusza	Jednostka
RIP	0	0	20	0,2	min.
CTP	0	0	0,5	0	min.
Druk	40	10	0,005	0	min.
Odwracanie	15	2	0	0	min.
Schnięcie	60	15	0	0	min.
Falcowanie	15	3	0,0075	0	min.
Cięcie	20	5	0,0075	0	min.
Oprawa klejona	30	8	0,006	0	min.
Oprawa zeszytowa	30	5	0,005	0	min.

Tabela 2. Parametry zleceń

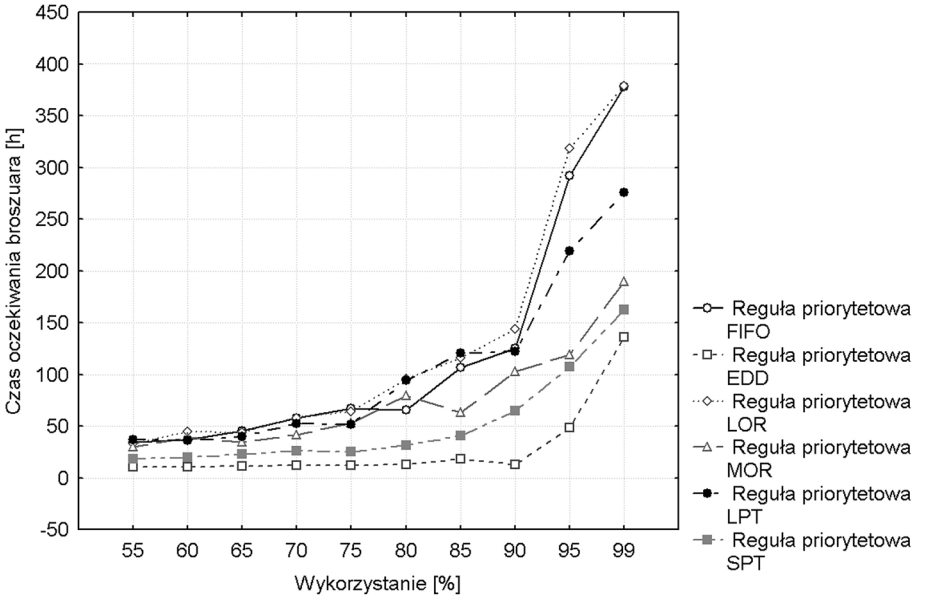
Nazwa parametru	Typ wyrobu		
	ulotka	broszura	książka
Ilość egzemplarzy	Min – 1000 Śr. – 5000 Max – 100000	Min – 100 Śr. – 1000 Max – 10000	Min – 500 Śr. – 3500 Max – 5000
Format strony	A4, A5, A6	A4, A5, A6	A4, A5, A6
Ilość stron	1 – 2	Min – 8 Śr. – 12 Max – 16	Min – 100 Sr. – 300 Max – 512
Typ oprawy	–	zeszytowa	klejona lub zeszytowa

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych zaplanowano zbiór eksperymentów, które zostały wykonane na modelu drukarni offsetowej. Eksperymentów było łącznie 420 (10·6·7 = 10 poziomów wykorzystania, 6 reguł priorytetowych oraz 7 replikacji każdego wariantu).

Na rysunkach 6 i 7 pokazano wykresy czasu oczekiwania ulotek oraz broszur względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych. Łatwo zauważyć, że dla niskich poziomów wykorzystania kiedy kolejki są niewielkie różnice pomiędzy regułami priorytetowymi nie są duże, gdyż same czasy oczekiwania są niewielkie (szczególnie dla ulotki, dla broszury zmiany można zauważyć już nawet przy niższych wartościach wykorzystania). Dla produktu klasy ulotka i wysokich wartościach wykorzystania najbardziej korzystną regułą jest LOR oraz EDD, a najmniej korzystne to reguła MOR oraz SPT. Przewaga reguły LOR jest tutaj dość oczywista gdyż przy produkcji ulotek występuje mniej stanowisk przez

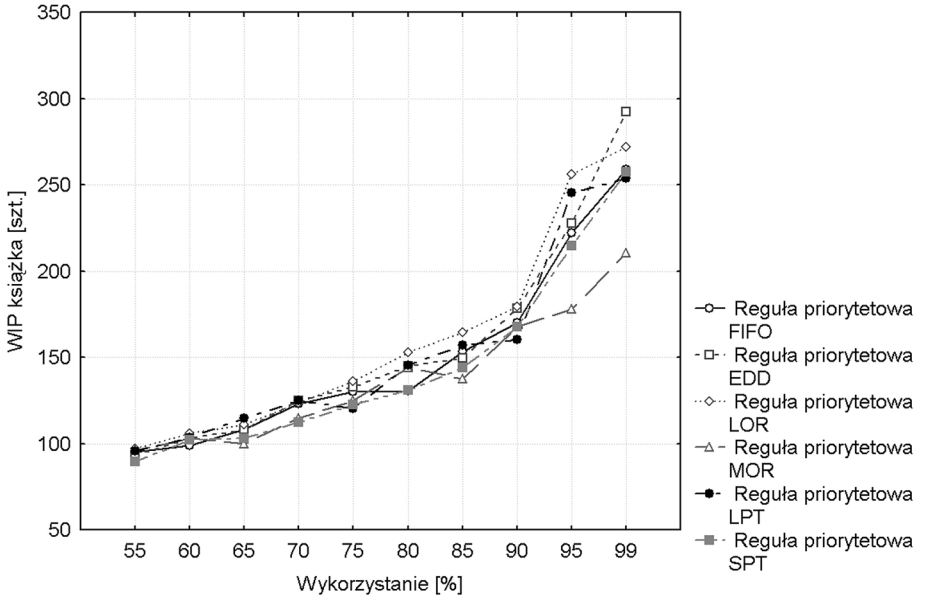


Rys. 6. Czas oczekiwania produktu klasy ulotka względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych



Rys. 7. Czas oczekiwania produktu klasy broszura względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych

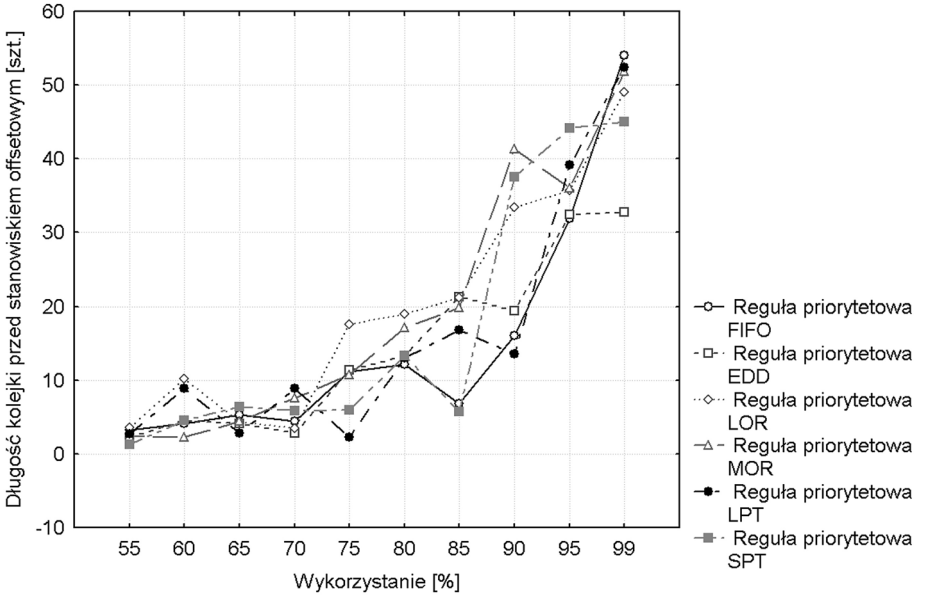
które musi ona przejść zatem na wcześniejszych etapach druku ma ona przewagę nad innymi produktami, ze względu na mniejsza liczbę pozostałych operacji do wykonania i dzięki temu jest obsługiwana jako pierwsza (w regule LOR) i szybciej przechodzi przez cały proces produkcyjny. Dla produktu klasy broszura najlepszą regułą na wszystkich poziomach wykorzystania jest EDD oraz SPT. Najgorszymi, powodującymi największe czasy oczekiwania, jest natomiast LOR i FIFO, podobnie są to najmniej korzystne reguły jeśli chodzi o czas oczekiwania książki. Najlepszymi regułami, które minimalizują czas oczekiwania na wysokich poziomach wykorzystania, dla książki są natomiast MOR oraz SPT.



Rys. 8. Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy książka względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych

Rysunek 8 pokazuje ilość produkcji w toku WIP książki (bardzo podobnie jest dla broszury) względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych. Najlepszą regułą obniżającą parametr WIP dla książek jest MOR dla broszury są to EDD oraz SPT. Najgorsze wyniki dla broszury, reguła przy której parametr WIP jest największy to LPT, dla książki natomiast to EDD oraz LOR. Dla produktu klasy broszura oraz książka wzrost wykorzystania powoduje znaczący wzrost ilości produkcji w toku, nawet dla niższych poziomów wykorzystania.

Rysunek 9 przedstawia długość kolejki przed maszyną offsetową (dla wszystkich typów produktów) względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych. Łatwo zaobserwować, iż nie ma tutaj zdecydowanie jednej reguły, która by działała dobrze (obniżała ilość zadań w kolejce) dla wszystkich poziomów



Rys. 9. Długość kolejki przed maszyną offsetową względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych

wykorzystania. Stosunkowo dobrą regułą dla większości poziomów wykorzystania jest reguła EDD.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono możliwości i efekty wdrożenia do praktyki produkcyjnej dynamicznych priorytetów do zarządzania kolejnością przetwarzania zleceń produkcyjnych. Uzyskane wyniki pokazały, że zastosowanie odpowiednio dobranych priorytetów dynamicznych pozwala na znaczące podniesienie efektywności procesu produkcyjnego, zarówno z punktu widzenia skrócenia czasu realizacji zleceń oraz zmniejszenia ilości produkcji w toku, jak i podniesienia ogólnej efektywności. Badania symulacyjne pokazują, że priorytetyzacja zleceń produkcyjnych jest szczególnie ważna przy wysokim obciążeniu parku maszynowego. Im wyższe obciążenie, tym większych pozytywnych efektów należy się spodziewać przy doborze odpowiedniej polityki priorytetowej.

Zaprezentowane podejście jest bardzo uniwersalne i z łatwością można je zastosować do analizy dowolnej firmy produkcyjnej. Symulacja stwarza możliwość na wierne odwzorowanie komputerze procesów produkcyjnych, a odpowiednio dobrane eksperymenty pozwalają na przeprowadzenie niezbędnych analiz.

Wyniki przeprowadzonych badań mogą stanowić podstawę do wytycznych dla drukarni w zakresie zarządzania zleceniami produkcyjnymi. Będą one działać tak długo, aż nie zajdą ważne zmiany w procesie produkcyjnym, które mogą dotyczyć zmiany parku maszynowego, zmiany procesów technologicznych lub zmian w zleceniach klientów, które na przykład zaburzą procentowy udział poszczególnych typów zleceń w całości produkcji.

LITERATURA

1. Banks J., Carson J., Nelson B.: Discrete-event System Simulation. Prentice Hall, New York 2001.
2. Chan F.T.S., Chan H.K., Lau H.C.W., Ip R.W.L.: Analysis of dynamic dispatching rules for a flexible manufacturing system. Journal of Materials Processing Technology 138, 2003: 325–331.
3. Kelton W.D., Sadowski R.P., Sturrock D.T.: Simulation with Arena. McGraw-Hill, Boston 2004.
4. Law A.M., Kelton W.D.: Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, Boston 2000.
5. Rajendran C., Holthaus O.: A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. European Journal of Operational Research 116, 1999: 156–170.
6. Vinod V., Sridharan R. Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system. Int. J. Production Economics 129, 2011: 127–146.
7. Scott L.R., Harmonosky C.M.: An improved simulated annealing simulation optimization method for discrete parameter stochastic systems. Computers & Operations Research 32, 2005,: 343–358.

ANALYSIS OF USAGE DYNAMIC PRIORITY RULES IN PRINTING INDUSTRY

Summary

In article was presented an approach in management of the printing production process based on dynamic priority rules. The concept assumes that before any working post a decision will be taken about the next task to handle. Presented in this paper simulation studies show how the efficiency of production depends on the adopted dynamic priority rule.

Keywords: dynamic priorities, commercial offset printing system, simulation modeling.