

Łukasz Hadaś
Wyższa Szkoła Logistyki,
Politechnika Poznańska¹



Piotr Cyplik
Wyższa Szkoła Logistyki,
Instytut Logistyki i Magazynowania



Analiza porównawcza logik przepływu „push”, „pull”, „pull/push” w produkcji – wyniki badań²

W logistyce od wielu lat toczy się spór o wyższość poszczególnych logik przepływu. Dotyczy to zarówno obszaru zaopatrzenia, produkcji, jak i dystrybucji. W każdym z tych obszarów znajdują zastosowanie koncepcje „pull” oraz „push”. Praktyczne realizacje tych koncepcji przyjmują różną postać, począwszy od miejsca lokalizacji harmonogramów dla strumieni materiałowych, miejsc koncentracji zapasów czy wreszcie sposobu inicjowania i kontroli wielkości przepływu. W obszarze produkcji jest to również kwestia kluczowa, mająca wpływ na charakterystykę przepływu strumieni produkcyjnych. Trafny wybór koncepcji oraz stworzenie realizujących je w praktyce rozwiązań szczegółowych wymaga pełnego zrozumienia ich zalet i ograniczeń.

„Push” vs. „pull” – symulacje przepływu

Jedną z dróg pełniejszego zrozumienia natury koncepcji „pull” i „push” oraz wychwycenia praktycznych różnic między nimi, jest przeprowadzenie symulacji przepływu. Przeprowadzone symulacje dotyczyły trzech wariantów sterowania przepływem strumienia produkcji, a mianowicie koncepcji „push”, „pull” oraz hybrydowej „pull/push”. Zarówno technologia wykonania (sekwencja operacji), rozmieszczenie stanowisk oraz ich potencjał (wydajność jednostkowa) była taka sama dla wszystkich przeprowadzonych symulacji. We wszystkich symulacjach realizowany był ten sam program produkcji, obejmujący trzy różne asortymenty. W poszczególnych symula-

cjach kluczową różnicą był przyjęty sposób (miejsce) harmonogramowania strumienia produkcji. Jego realizacja była zgodna z symulowanymi koncepcjami zarządzania (rysunek 1). Dla systemu według koncepcji MRP (logika „push”) był to harmonogram produkcji ulokowany na początku procesu produkcyjnego, w miejscu wydawania materiału na stanowiska. Następnie materiał był „przepychany” przez kolejne stanowiska aż do wyrobu finalnego, według priorytetu FIFO. Dla symulacji odwzorowującej koncepcję JIT (logika „pull”) harmonogram produkcji znajdował się na końcu procesu produkcyjnego, w miejscu odbioru jakościowego wyrobów gotowych. W górę strumienia produkcji zapotrzebowanie było przekazywane według sygnału karty Kanban, aż do miejsca wydań materiałowych.

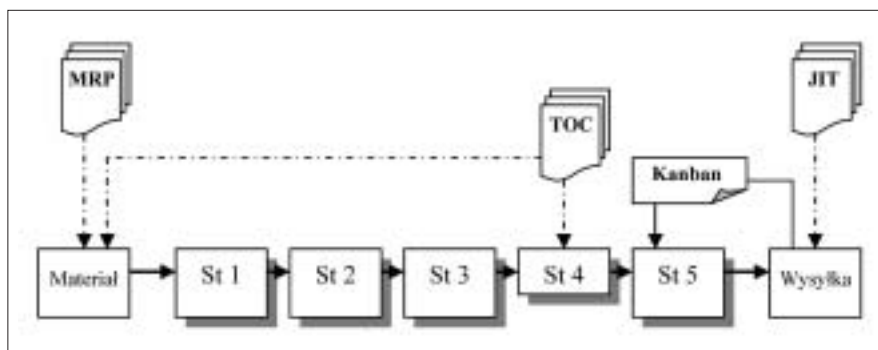
Dla systemu według koncepcji TOC (logika hybrydowa „pull/push”) harmonogram miał dwa miejsca lokalizacji: pierwsze dotyczyło ograniczenia potencjału („wąskiego gardła”), a drugie – miejsca wydawania materiału na pro-

dukcję. Harmonogram pracy ograniczenia był optymalizowany pod kątem minimalizacji strat czasu przebrożeń tego zasobu. Wydawanie materiału do produkcji (realizacja drugiego harmonogramu) było zsynchronizowane ze wpływem wyrobów z operacji na zasobie krytycznym. Poprzez pozostałe stanowiska realizowany był przepływ „push” według priorytetu FIFO.

Analiza porównawcza „push” vs. „pull” – uzyskane wyniki

Pierwszymi analizowanymi wynikami jest ilość wyprodukowanych wyrobów w rozbiću na poszczególne minuty symulacji (rysunek 2).

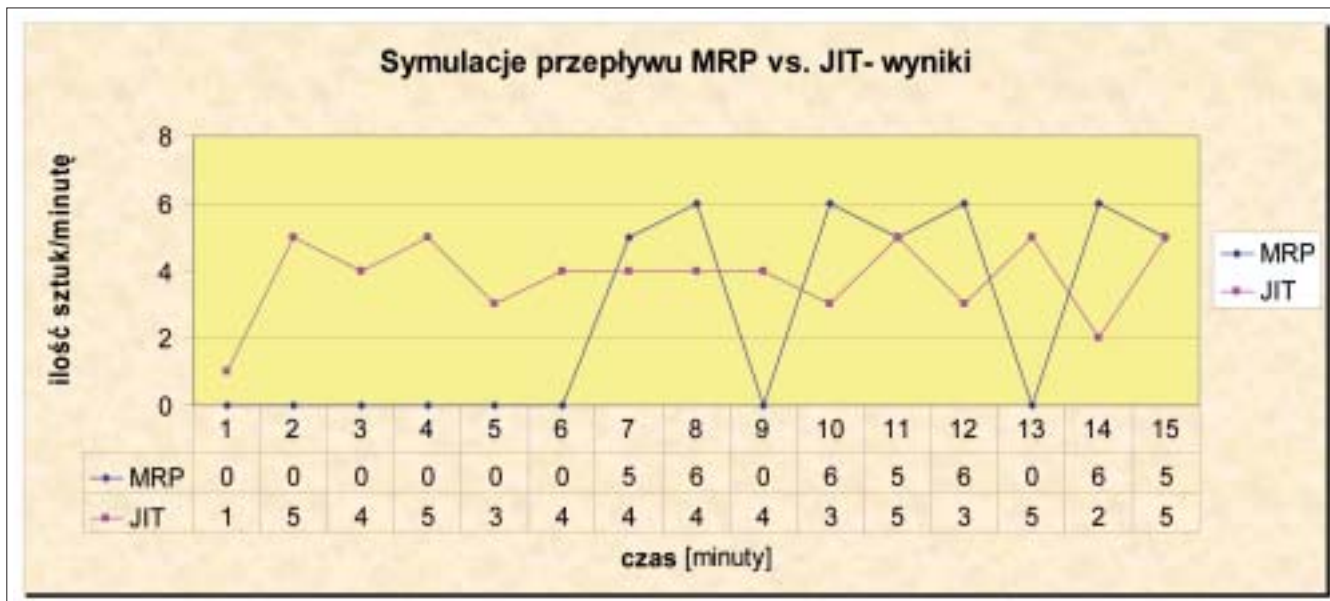
W przypadku symulacji „MRP” uwagę zwraca „napełnienie” systemu produkcyjnego robotami w toku dopiero po 6 minucie symulacji. Pierwszy „spływ” wyrobów nastąpił w 7 minucie symulacji. W następnych minutach następował spływ wyrobów na poziomie 5 lub 6 sztuk, osiągając w ten sposób stabilną wartość. Ponieważ spływ następował



Rys.1. Miejsce lokalizacji harmonogramów dla MRP, JIT, TOC w przeprowadzonej symulacji przepływu. Źródło: opracowanie własne.

¹ Dr inż. Ł.Hadaś – Wyższa Szkoła Logistyki, Instytut Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Dr inż. P.Cyplik – Wyższa Szkoła Logistyki, Instytut Logistyki i Magazynowania – Centrum Wiedzy Logistycznej (przyp. red.).

² Artykuł recenzowany (przyp. red.).



Rys. 2. Symulacje przepływu MRP vs. JIT – ilość produkowanych sztuk na minutę. Źródło: opracowanie własne.

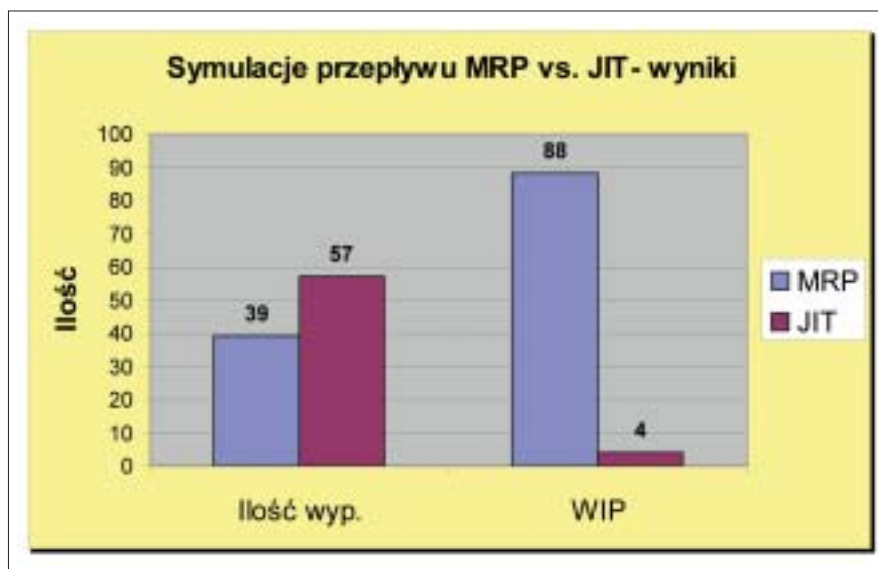
„falami” równymi lub zbliżonymi do wielkości partii, w pewnych jednostkach czasu wynosił on zero. Takie wahania wynikają z natury przepływu według partii produkcyjnej oraz przyjętej jednostki pomiaru czasu równej jednej minucie. W jednostce, w której spływ wynosił zero, osiągnięty wynik często był efektem „ustalonego” taktu produkcji. Spływ detali następował bowiem często zaraz na początku kolejnego okresu czasu. Zastosowanie mniejszej jednostki czasu dla pomiaru spływu detali oczywiście bardziej uwidoczniłoby to zjawisko. Należy jednak stwierdzić, że charakterystyczna (i w związku z tym spodziewana przez obserwatorów) cecha przepływu „push” w partiach produkcyjnych została potwierdzona.

W przypadku symulacji „JIT” odnotowane wyniki spływu detali są zgoła odmiennie. Napełnienie jednostki produkcyjnej było zdecydowanie szybsze i nastąpiło już w pierwszej minucie symulacji. Również w pierwszej minucie symulacji nastąpił spływ pierwszej sztuki wyrobu. W kolejnych minutach, po napełnieniu systemu robotami w toku, nastąpił względnie stabilny wpływ wyrobów na poziomie 4 lub 5 sztuk. Lekkie zawanie wydajności (minuta 14-sta) było spowodowane zmęczeniem operatorów, którzy zgłaszali ten fakt. W rzeczywistych warunkach produkcyjnych świadczyłoby to o zbyt wysokim tempie produkcji. Zgodnie z filozofią systemów JIT, dobór tempa produkcji byłby wypadkową między możliwością utrzymania

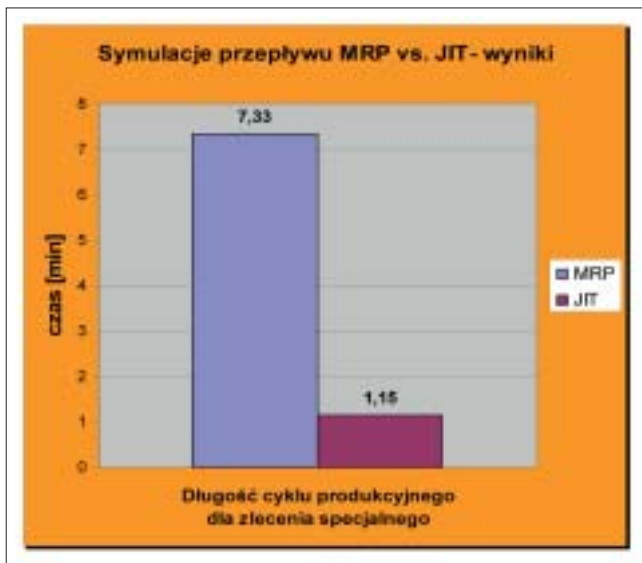
tempa nie powodującego nadmiernego znużenia operatorów oraz powstawania błędów w jakości, a zjawiskiem „mudy”. W tym przypadku tempo powinno być zapewne nieznacznie mniejsze, ale jego konkretne ustalenie oraz budowa ciągłego przepływu w zrównoważonym systemie wykracza poza cel tej symulacji i związku z tym nie jest omawiana.

Porównanie całkowitej ilości wyprodukowanych wyrobów (rysunek 3) wskazuje na dużą przewagę symulowanej koncepcji „JIT” nad „MRP”. W przypadku pierwszej symulacji wyprodukowano 39 sztuk, a w drugiej symulacji 57 sztuk, co stanowi wynik lepszy aż o 46%. Uzyskany wynik jest jednak lep-

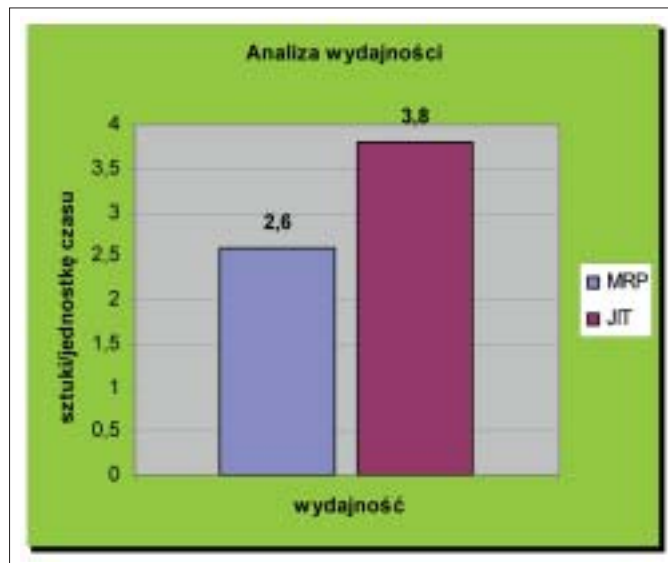
szy dla symulacji „1B”, głównie dzięki szybszemu napełnieniu jednostki produkcyjnej – a co za tym idzie – szybszemu spływowi wyrobów gotowych. Szczególną uwagę powinien zwrócić fakt, że po 6-tej minucie symulacji, gdy również system według symulacji „MRP” zaczął generować produkcję zakończoną, całkowita liczba wyprodukowanych detali była wyższa niż w przypadku symulacji „JIT”. Ponieważ jednak najistotniejsze są wyniki całkowitej zrealizowanej produkcji w czasie symulacji, przewaga systemu odwzorowanego w symulacji „JIT” jest bardzo znacząca. Można tu oczywiście założyć, że dłuższy czas realizacji obu symulacji zniwelowałby te różnice, a nawet pozwolił



Rys. 3. Całkowita ilość wyprodukowana oraz poziom robót w toku (WIP) po zakończeniu symulacji. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Długość cyklu produkcyjnego dla zlecenia specjalnego.
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Wydajność w sztukach na jednostkę czasu.
Źródło: opracowanie własne.

osiągnąć przewagę dla symulacji „MRP”. Rzecz jednak „nie leży” tylko w wyniku osiąganym w względnie długim okresie czasu. W warunkach rynkowych istotniejsze jest bowiem funkcjonowanie systemu w krótszych okresach planistycznych, które bardziej przystają do istniejącej zmienności zapotrzebowania rynkowego.

Równie znaczące informacje przynoszą wyniki (rysunek 3) zanotowanej wielkości robót w toku (WIP – *Work-in-Process*). W symulacji „MRP” wielkość robót w toku wyniosła aż 88 sztuk, wobec 4 sztuk w symulacji „JIT”. W takiej sytuacji należy spodziewać się, że wysoki poziom robót w toku generowałby nadmierne i nieuzasadnione koszty zamrożenia kapitału. Analiza sytuacji po zakończeniu symulacji pozwoliła stwierdzić, że duża część nadmiernego zapasu robót w toku była zgromadzona w początkowej fazie procesu produkcyjnego. Zjawisko to dowodzi faktu, że skuteczniejsza kontrola wydań materiałowych (uruchamianych zleceń) pozwoliłaby ograniczyć poziom robót w toku. Jest to charakterystyczne dla systemu „push”, gdzie produkcja jest „przepychana” przez stanowiska w dół strumienia wartości. Wielkość samego zjawiska jest jednak zależna od umiejętnej realizacji procesu planowania produkcji (a głównie wymaganych wyprzedzeń produkcyjnych).

Wyśmienity wynik, osiągnięty w symulacji „JIT”, jest z kolei efektem

funkcjonowania „systemu” kanban, który skutecznie przeciwdziałał nadmiernemu narastaniu robót w toku oraz przyjętej wielkości partii równej jednej sztuce.

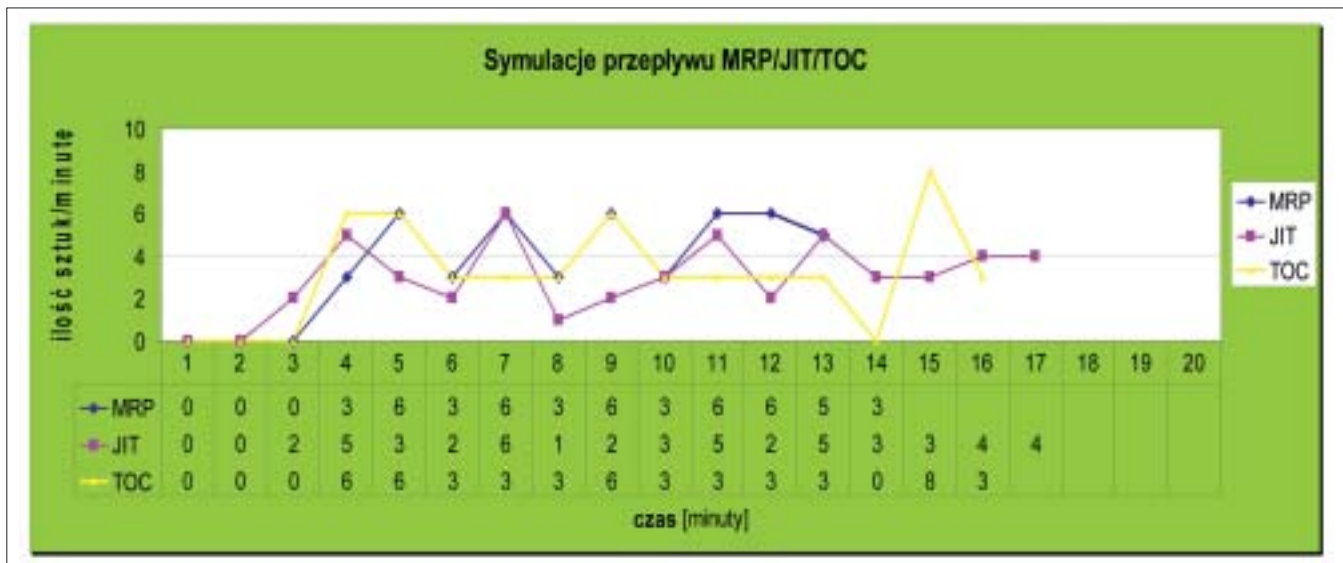
Kolejny analizowany parametr dotyczył długości cyklu produkcyjnego dla zlecenia specjalnego (rysunek 4). W przypadku symulacji „MRP” był to czas równy 7,33 minuty, a w przypadku symulacji „JIT” – zaledwie 1,15 minuty. Pomiar dokonany przy pomocy zlecenia specjalnego, wprowadzonego do poszczególnych systemów podczas ich „pełnej” pracy, dostarcza informacje na temat rzeczywistej sprawności systemów w zakresie realizacji pilnych zleceń produkcyjnych. Symulowana sytuacja odpowiada dużej zmienności asortymentowej oraz zmienności harmonogramu produkcji. Brak stabilności harmonogramu w efekcie występowania zakłóceń na przykład w obszarze zaopatrzenia materiałowego lub/i zmian priorytetów poszczególnych zamówień jest zjawiskiem powszechnie występującym w warunkach rynkowych. Ponad sześciokrotnie krótszy cykl produkcyjny dla zlecenia specjalnego w symulacji „JIT” jest efektem sposobu organizacji przepływu detali (logistyki produkcji) w poszczególnych symulacjach. Czynnikiem decydującym jest tu przyjęta wielkość partii produkcyjnej oraz będący efektem tego poziom robót w toku. Należy spodziewać się, że zmniejszenie wielkości partii produkcyjnej

w symulacji „MRP” na przykład z 6 sztuk do 3 zmniejszyłoby również proporcjonalnie cykl produkcyjny dla zlecenia specjalnego.

Ostatnim porównywanym parametrem była wydajność, liczona jako liczba sztuk na jednostkę czasu (w tym przypadku minutę). Wynik dla symulacji „JIT” był o około 45% lepszy. Biorąc pod uwagę również koszty zamrożenia kapitału, przewaga dla symulacji „JIT” jest jeszcze większa.

Analiza porównawcza „push” vs. „pull” vs. „pull/push” – wyniki

Podobnie, jak w poprzedniej symulacji, pierwszymi analizowanymi wynikami była ilość wyprodukowanych wyrobów w rozbiu na poszczególne minuty symulacji (rysunek 6). W każdej z symulacji został zrealizowany program produkcji w zakładanej wielkości i asortymencie. W uzyskanych wynikach zwraca uwagę różnica między przepływem dla symulacji „JIT”, a pozostałymi symulacjami. Przepływ realizowany po jednej sztuce, a nie w partiach obróbczych (po 3 sztuki dla pozostałych symulacji), zaowocował szybszym napełnieniem systemu produkcyjnego robotami w toku. Również ilości sztuk wpływających w danych przedziałach czasu wykazuje mniejszy rozrzut wartości, co świadczy o bardziej równomiernym przepływie strumienia materiałowych.



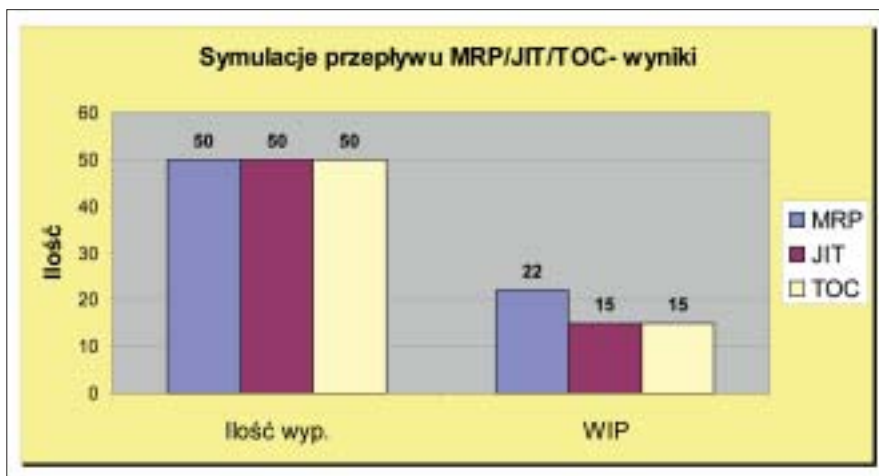
Rys. 6. Symulacje przepływu MRP/JIT/TOC – ilość produkowanych sztuk na minutę.
Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki potwierdzają wcześniej osiągnięte rezultaty dla pierwszej symulacji, której celem było właśnie rozpoznanie specyfiki przepływu „push” i „pull”. Niemniej należy zauważyć, że uzyskane wyniki mają stosunkowo duży rozrzut wartości w poszczególnych przedziałach czasu. W przypadku przepływu w partiach transportowych, wyniki osiągają wartość ilości sztuk równej zwykle jednej lub dwóm partiom obróbczym. Powodem tego jest, że czasami w przeciągu jednego przedziału czasu (1 minuty) zdążą spłynąć 2 partie obróbcze, a czasami tylko 1 partia. Kolejna partia spływa wtedy zwykle na początku kolejnego przedziału czasu. Powodem rozrzutu osiąganych wyników są również zauważone wahania wydajności. Z jednej strony jest to wpływ zjawiska „krzywej

wprawy” w wykonywaniu danych czynności, co powodowało wzrost wydajności. Z drugiej strony pojawiał się efekt monotonii i zmęczenia, który wytwarzał czasowe spadki wydajności. Oba powyższe efekty (wprawy i zmęczenia) były wyraźnie zauważalne podczas obserwacji pracy operatorów w przeciągu trwania symulacji. Nie starano się jednak „specjalnie” wyeliminować tych zjawisk ponieważ ich wpływ nie był bardzo duży. W przypadku zjawiska wprawy przeciwdziałano mu poprzez wprowadzenie rotacji na poszczególnych stanowiskach. W pewnym zakresie przeciwdziało to również zjawisku monotonii. Pewne wahania wydajności są jednak tu do zaakceptowania ze względu na to, że występują one również w rzeczywistych warunkach produkcyjnych.

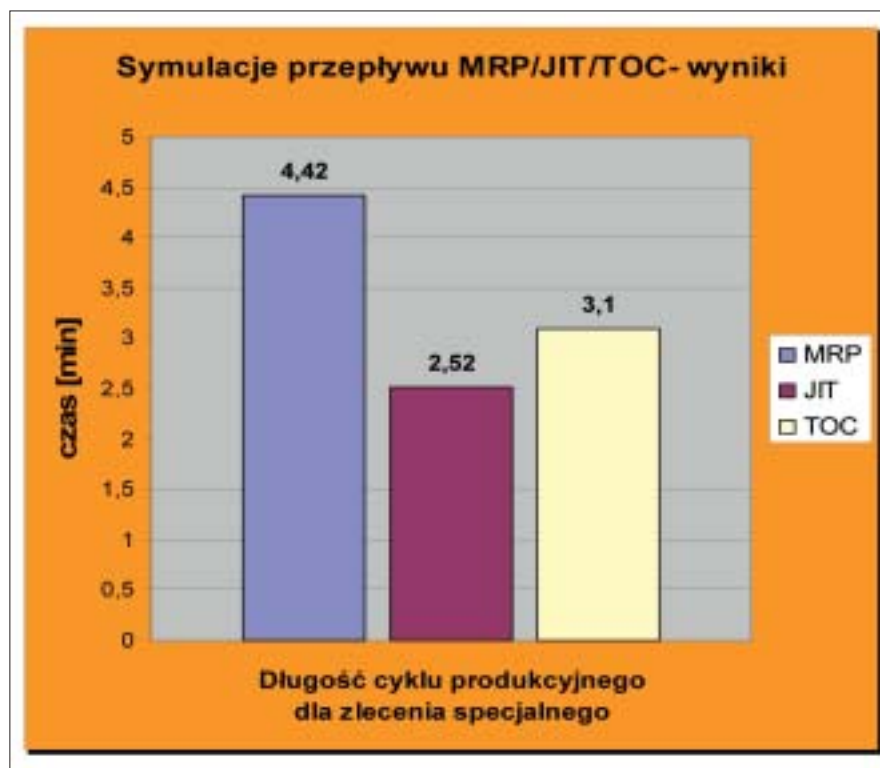
Jak już wcześniej wspomniano, we wszystkich symulacjach zrealizowano program produkcji (rysunek 7). Różnice w tej kwestii polegają na tym, że odnotowano nieznaczne rozbieżności w czasie trwania poszczególnych symulacji.

Kluczową analizowaną kwestią jest tu poziom robót w toku. Dla symulacji „MRP” były to 22 sztuki (rysunek 7). Dla symulacji koncepcji „JIT” poziom robót w toku wyniósł zaledwie 15 sztuk. Wynik taki nie jest żadnym zaskoczeniem, ponieważ system JIT był tu symulowany z użyciem sterowania przepływem przy pomocy metody kanban. Wersja zastosowanego systemu kanban była w pełni zgodna z użytym kanbanem produkcyjnym w symulacji „pierwszej”, odwojującej „JIT”. Różnica polegała na tym, że w symulacji „pierwszej” przez system produkcyjny przepływał jeden rodzaj wyrobu, a w symulacji „drugiej” były to trzy różne wyroby (ABC). W związku z tym system kanban musiał ulec modyfikacji. Zamiast jednego sygnału do produkcji, użyte zostały 3 sygnały (karty kanban) na każdym ze stanowisk. Ponieważ stanowisk produkcyjnych było 5, a produkowanych typów wyrobów 3, to minimalny poziom robót w toku wyniósł tu właśnie dokładnie 15 sztuk. Jest to rezultat utrzymania zapasu przystanowiskowego w wielkości jednej sztuki, każdego wyrobu na każdym z etapów produkcji. Jednocześnie należy zauważyć, że system kanban w postaci wolnych miejsc odkładczych nie jest tu w pełni jednoznaczny. Zda-



Rys. 7. Całkowita ilość wyprodukowana oraz poziom robót w toku (WIP) po zakończeniu symulacji. Źródło: opracowanie własne.

rzało się bowiem, że jeden z operatorów podejmował realizację zlecenia według sygnału kanban, po czym drugi operator – wcześniej zajęty poprzednim zleceniem – podejmował realizację tego samego zlecenia widząc „pusty” kanban. Oczywiście gdyby operator 2 sprawdził, że bieżące zamówienie jest już w toku realizacji, nie popełniałby takiego błędu. Nie było to jednak jego obowiązkiem, ani nie był o tym problemie poinformowany. To pokazuje, że w praktyce ta kwestia musiałaby być jednoznacznie rozwiązana. Mogłoby to być rozwiązane poprzez zastosowanie pobieranych przez operatora kart kanban lub informacji w postaci „wygaszanych” sygnałów świetlnych. Celem takiego działania jest zapewnienie, że podjęte do realizacji zlecenie jednocześnie czyni nieaktualnym sygnał kanban, a nie dopiero w momencie jego realizacji. Oczywiście sytuacja taka nie ma miejsca w przypadku pojedynczych operatorów, realizujących każdą z operacji (dla strumieniowości równej 1).



Rys. 8. Długość cyklu produkcyjnego dla zlecenia specjalnego.
Źródło: opracowanie własne.

W symulacji koncepcji „TOC” osiągnięto również wielkość robót w toku na poziomie 15 sztuk. To bardzo dobry wynik, ponieważ równy jest uzyskanemu w symulacji „JIT”. Jak wiadomo, system JIT zorientowany jest na utrzymanie niskiego poziomu robót w toku. Umiejętne sterowanie procesem wydań materiałowych pozwala uzyskać w systemie TOC równie zadowalające efekty, co w systemie JIT. Kluczowe jest tu zsynchronizowanie wydań materiałowych z rytmem pracy ograniczenia. Dalsza optymalizacja wielkości bufora czasowego pozwala na osiągnięcie jeszcze niższego poziomu zapasów. To jednak nie było celem tej symulacji. Celem było bowiem osiągnięcie poziomu robót zbliżonego do JIT przy jednoczesnym skutecznym buforowaniu zasobu krytycznego. Taką cechą ma właśnie przepływ według koncepcji TOC.

Kolejną badaną wielkością była długość cyklu produkcyjnego. Pomiar dokonany był tak, jak w przypadku symulacji „pierwszej”, na podstawie wprowadzonego do systemu zlecenia specjalnego (rysunek 8).

Dla symulacji „MRP” był to czas równy 4 minutom i 42 sekundom. Dla symulacji „JIT” długość cyklu dla zlecenia

specjalnego wyniosła 2 minuty i 52 sekundy. Różnica ta na korzyść symulacji „JIT”, tak jak we wcześniejszej symulacji, była spowodowana różnicą między przepływem w partiach a przepływem po jednej sztuce. Dla symulacji odwzorowującej koncepcję „TOC” długość cyklu wyniosła 3 minuty i 10 sekund. Osiągnięty wynik był zatem nieznacznie gorszy od symulacji „JIT”.

Wnioski

Ze względu na znaczny poziom robót w toku symulacja logiki „push” (MRP) okazała się mniej efektywna od symulacji logiki „pull” (JIT) oraz logiki hybrydy „push/pull” (TOC). Uzyskane wyniki potwierdzają, że sterowanie przepływem według koncepcji „push” wymaga większego poziomu robót w toku, a co za tym idzie, jest bardziej kapitałochłonne. Z drugiej jednak strony, w warunkach nie zrównoważonego potencjału produkcyjnego, swoje zalety ukazuje koncepcja „push”, która dzięki zgromadzeniu pewnego poziomu robót w toku pozwala na zachowanie ciągłości pracy stanowisk i w efekcie większą wydajność. Interesującą alternatywą, łączącą zalety koncepcji „pull” oraz „push”, jest zastosowanie koncepcji hybrydowej „pull/push”, pozwalającej na skuteczną

kontrolę poziomu robót w toku oraz buforowanie niezrównoważonego potencjału produkcyjnego.

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia analizę porównawczą logik przepływu „push”, „pull” oraz hybrydy „pull/push” w obszarze logistyki produkcji. Są to rozwiązania stosowane w systemach produkcyjnych wg koncepcji MRP, JIT oraz TOC. Spostrzeżenia dotyczące analizowanych logik przepływu oparte są na przeprowadzonych badaniach-symulacjach. Wyniki badań pokazują różnicę w naturze różnorodnej organizacji logistyki przepływu strumieni materiałowych, zarówno ze względu na ich efektywność całkowitą jak i optymalne warunki ich funkcjonowania.

SUMMARY

The comparative analysis logic of “push”, “pull” and “pull/push” flow in production area – research results. The article presents comparative analysis logic of “pull”, “push” and hybrid “pull/push” flow in production area. There are solutions applied in MRP, JIT and TOC conception. Observations about analyzed logics of flow are based on research-simulations. Results of research show difference of nature in varied solution of logistics flow stream of material.