

ANALIZA PROCESÓW ZWIĄZANYCH Z UTRZYMANIEM RUCHU LINII PRODUKCYJNEJ W OPARCIU O METODĘ SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Sławomir KŁOS, Justyna PATALAS-MALISZEWSKA

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań przebiegu procesów związanych z utrzymaniem ruchu linii produkcyjnej o różnych topologiach w oparciu o metodę symulacji komputerowej z wykorzystaniem oprogramowania Tecnomatix Plant Simulation. Przedmiotem badań była zautomatyzowana linia produkcyjna złożona z zasobów produkcyjnych i buforów międzyoperacyjnych. W modelu symulacyjnym przyjęto różną dostępność zasobów produkcyjnych, różne pojemności buforów międzyoperacyjnych oraz różną liczbę personelu utrzymania ruchu jako dane wejściowe. Na wyjściu modelu badano wydajność na godzinę oraz średni czas przebywania detalu w systemie. Badania przeprowadzono dla trzech różnych topologii linii produkcyjnej. W wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych określono wpływ liczby pracowników utrzymania ruchu, pojemności buforów oraz dostępności zasobów produkcyjnych na wydajność i poziom zapasu produkcji w toku.

Słowa kluczowe: Symulacja komputerowa, utrzymanie ruchu, bufony międzyoperacyjne, wydajność systemu, zapasy produkcji w toku.

1. Wstęp

Zastosowanie metod symulacji komputerowe dla potrzeb badania efektywności procesów i systemów produkcyjnych jest umożliwia wizualizację oraz analizę zmian ich parametrów dynamicznych. Wyniki badań symulacyjnych są wykorzystywane do wspomaganie podejmowania decyzji związanych z rozwojem lub modernizacją systemów produkcyjnych [1, 2]. Istotnym aspektem modernizacji systemów produkcyjnych jest kwestia obsługi utrzymania ruchu i dostępności maszyn. W oparciu o techniki symulacji komputerowej można analizować wpływ różnych wariantów rozstawienia maszyn, kolejności wykonywania remontów, wielkości magazynów międzyoperacyjnych, długości dróg transportowych, itd. na wydajność systemu produkcyjnego lub wielkość zapasu produkcji w toku [4, 5]. Stosowanie metod symulacji sprawdza się wówczas, gdy rozwiązanie problemu przy pomocy metod analitycznych jest zbyt złożone, a przeprowadzenie bezpośrednich eksperymentów praktycznych na modelu fizycznym jest niemożliwe lub zbyt kosztowne.

Modelowanie symulacyjne systemów produkcyjnych jest procesem pracochłonnym, który wymaga zebrania szczegółowych danych dotyczących przebiegu procesów oraz dopasowania zachowania modelowanych obiektów do określonych rozkładów statystycznych (czasy jednostkowe, wielkości magazynów międzystanowiskowych, czasy transportu detali, itd.). Aby tworzony model jak najlepiej odwzorowywał rzeczywiste zachowanie systemu produkcyjnego, należy również określić parametry dotyczące liczby pracowników, środków transportu, planu realizacji zleceń produkcyjnych, itd. Budowa

modelu symulacyjnego wymaga doświadczenia i znajomości modelowanych systemów wytórczych oraz biegłości w posługiwaniu się narzędziami do komputerowej symulacji procesów [3, 9].

Detale dla branży motoryzacyjnej są wytwarzane najczęściej na liniach produkcyjnych, w których poszczególne stanowiska produkcyjne zostały oddzielone magazynami (buforami) międzyoperacyjnymi. W artykule przedstawiono wyniki badania zautomatyzowanej linii produkcyjnych o różnych topologiach (powiązania pomiędzy poszczególnymi zasobami produkcyjnymi). Pomiedzy poszczególnymi zasobami produkcyjnymi (obrabiarkami CNC), alokowano magazyny międzyoperacyjne (bufory). Pojemności buforów BAP (ang. buffer allocation problem), dostępności zasobów produkcyjnych (ang. resources availability) oraz liczba pracowników utrzymania ruchu determinowały zmienne wejściowe eksperymentów symulacyjnych [6, 8, 10]. Na wyjściu modelu rejestrowano zmiany wydajności oraz średni czas przebywania detali w systemie (poziom zapasu produkcji w toku). Przyjęto następujące założenia dotyczące systemu produkcyjnego, które uwzględniono podczas tworzenia modelu symulacyjnego:

- system składa się z zasobów połączonych w linii produkcyjnej o różnych topologiach (trzy warianty) i obejmuje trzy operacje technologiczne wykonywane na dwóch identycznych zasobach każda,
- czasy wykonywania operacji technologicznych zostały określone rozkładem *Uniform*, a czy czasy wykonywania operacji na wszystkich zasobach zmieniały się w przedziale $\langle 1;5 \rangle$ minut,
- dostępność zasobów produkcyjnych zmieniała się od 99% do 80%,
- wielkości buforów międzyoperacyjnych dla poszczególnych eksperymentów przyjmowały cztery wartości (1,5,10,20),
- badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla jednorodnej produkcji dla której nie przewidziano przebrożeń (czasy przebrożeń równe 0).

Dla powyższych założeń przyjęto następujący problem badawczy:

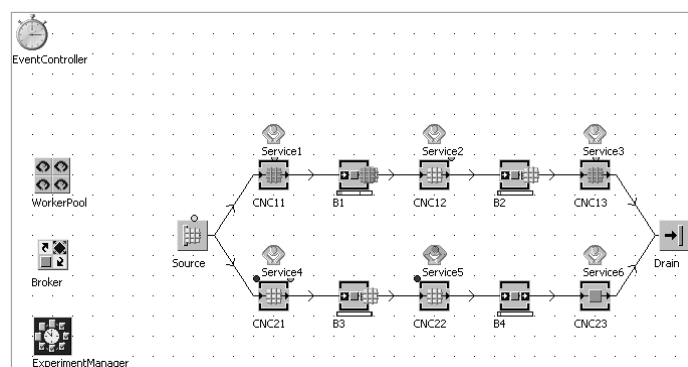
Dany jest system produkcyjny złożony z zasobów i buforów międzystanowiskowych, określonych czasach wykonywania operacji. Jaki wpływ na wydajność systemu będą miały zmiany topologii systemu (powiązania pomiędzy zasobami i buforami), alokacja buforów, dostępność zasobów oraz liczba pracowników utrzymania ruchu?

W kolejnym rozdziale przedstawiono modele systemu produkcyjnego o różnych topologiach.

2. Modele symulacyjne systemu produkcyjnego

Modele systemu produkcyjnego zostały opracowane przy użyciu oprogramowania Tecnomatix Plant Simulation v. 11. Eksperymenty symulacyjne zaprojektowano tak aby można było analizować wpływ dostępności zasobów produkcyjnych, liczby pracowników utrzymania ruchu oraz wielkości buforów międzyoperacyjnych na wydajność i poziom zapasów produkcji w toku. Badania przeprowadzono analizując trzy topologie systemów S1, S2 i S3. Na rysunku 1 przedstawiono topologię S1, która składa się z dwóch linii produkcyjnych o wspólnym wejściu i wyjściu detali. Linie są całkowicie zautomatyzowane, jednak przy każdym zasobie produkcyjnym (obrabiarki CNC) zdefiniowano stanowisko serwisowe obsługiwane przez pracownika utrzymania ruchu w czasie, gdy zasób jest niedostępny. Pomiedzy zasobami produkcyjnymi alokowano bufory B₁, B₂, B₃, B₄. Obiekt

WorkerPool determinuje liczbę pracowników utrzymania ruchu (PUR). Dla każdego modelu przeprowadzono analizy dla 1 i 6 PUR. Dane wejściowe dla eksperymentów symulacyjnych przedstawiono w tabeli 1.

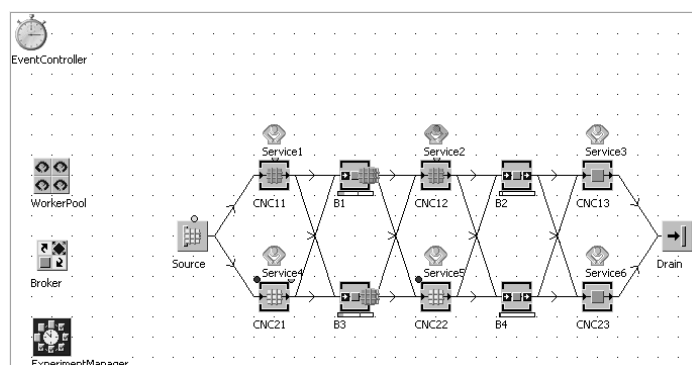


Rys. 1. Model symulacyjny systemu produkcyjnego o topologii S1

Tab. 1 Dane wejściowe dla eksperymentów symulacyjnych

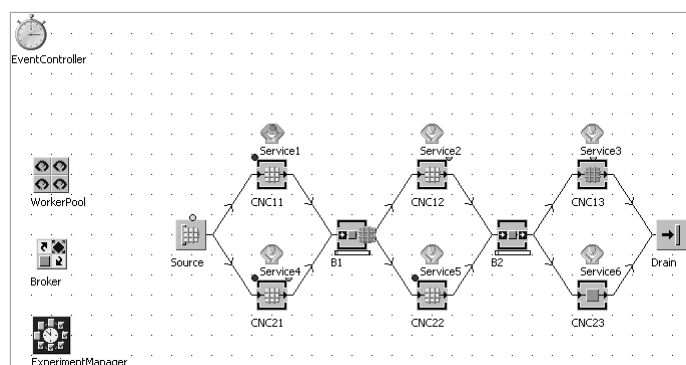
	CNC11	CNC12	CNC13	CNC21	CNC22	CNC23	średnia	B1	B2	B3	B4
Exp01	99	99	99	99	99	99	99,0	1	1	1	1
Exp02	99	99	99	99	99	99	99,0	5	5	5	5
Exp03	99	99	99	99	99	99	99,0	10	10	10	10
Exp04	99	99	99	99	99	99	99,0	20	20	20	20
Exp05	90	90	90	90	90	90	90,0	1	1	1	1
Exp06	90	90	90	90	90	90	90,0	5	5	5	5
Exp07	90	90	90	90	90	90	90,0	10	10	10	10
Exp08	90	90	90	90	90	90	90,0	20	20	20	20
Exp09	80	80	80	80	80	80	80,0	1	1	1	1
Exp10	80	80	80	80	80	80	80,0	5	5	5	5
Exp11	80	80	80	80	80	80	80,0	10	10	10	10
Exp12	80	80	80	80	80	80	80,0	20	20	20	20
Exp13	99	95	90	99	95	90	94,7	1	1	1	1
Exp14	99	95	90	99	95	90	94,7	5	5	5	5
Exp15	99	95	90	99	95	90	94,7	10	10	10	10
Exp16	99	95	90	99	95	90	94,7	20	20	20	20
Exp17	99	90	80	99	90	80	89,7	1	1	1	1
Exp18	99	90	80	99	90	80	89,7	5	5	5	5
Exp19	99	90	80	99	90	80	89,7	10	10	10	10
Exp20	99	90	80	99	90	80	89,7	20	20	20	20
Exp21	80	90	99	80	90	99	89,7	1	1	1	1
Exp22	80	90	99	80	90	99	89,7	5	5	5	5
Exp23	80	90	99	80	90	99	89,7	10	10	10	10
Exp24	80	90	99	80	90	99	89,7	20	20	20	20

Na rysunku 2 przedstawiono topologię S2 badanego systemu produkcyjnego. Model różni się od poprzedniego dodatkowymi powiazaniami pomiędzy buforami i zasobami produkcyjnymi. Dla zasobów i buforów zdefiniowano reguły dostępu *round robin*, które sprawiedliwie przesyłają detale do każdego kanału wyjściowego.



Rys. 2. Model symulacyjny systemu produkcyjnego o topologii S2

Podczas badań przeprowadzono analogiczne eksperymenty symulacyjne dla topologii systemu S2 jak w przypadku topologii S1 (dane w tabeli 1). Badania zostały przeprowadzone analogicznie jak w poprzednim przypadku dla trzech wariantów liczby personelu utrzymania ruchu (1,2 i 6 pracowników). Ostatnia badana topologia systemu produkcyjnego obejmuje sześć zasobów produkcyjnych, ale tylko dwa bufory. Zasoby zostały pogrupowane po dwa równoległe stanowiska (rysunek 3).



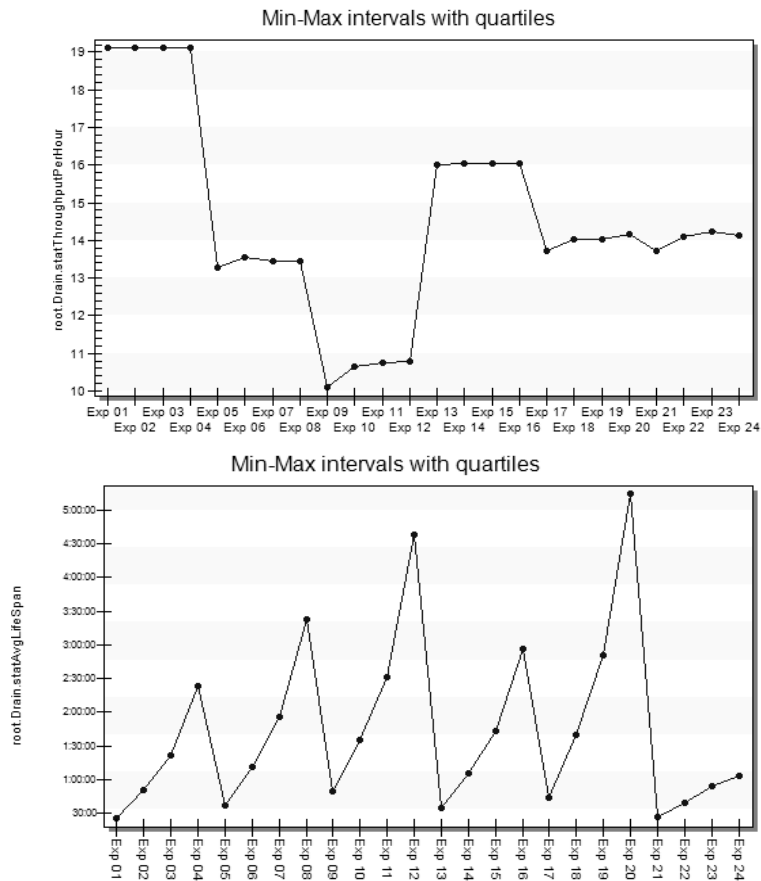
Rys. 3. Model symulacyjny systemu produkcyjnego o topologii S3

Ze względu na mniejszą liczbę buforów międzyoperacyjnych zmodyfikowano dane wejściowe dla eksperymentów symulacyjnych (pominięto pojemności buforów B₃ i B₄), pozostałe dane wejściowe dla eksperymentów symulacyjnych nie zmieniły się (tabela 1). Detale na wyjściu każdego bufora są rozdzielane do zasobów w oparciu o regułę *round robin*.

W kolejnym rozdziale przedstawiono i przeprowadzono dyskusję wyników badań symulacyjnych dla poszczególnych topologii systemu produkcyjnego.

3. Wyniki symulacji komputerowej

W oparciu o dane wejściowe przedstawione w tabeli 1 przeprowadzono 24 eksperymenty symulacyjne dla systemu produkcyjnego o topologii S1 przy trzech wariantach liczby personelu. Na rysunku 4 przedstawiono wykres obrazujący zmiany wydajności i średni czas przebywania detalu w systemie dla topologii S1 i 1 PUR.



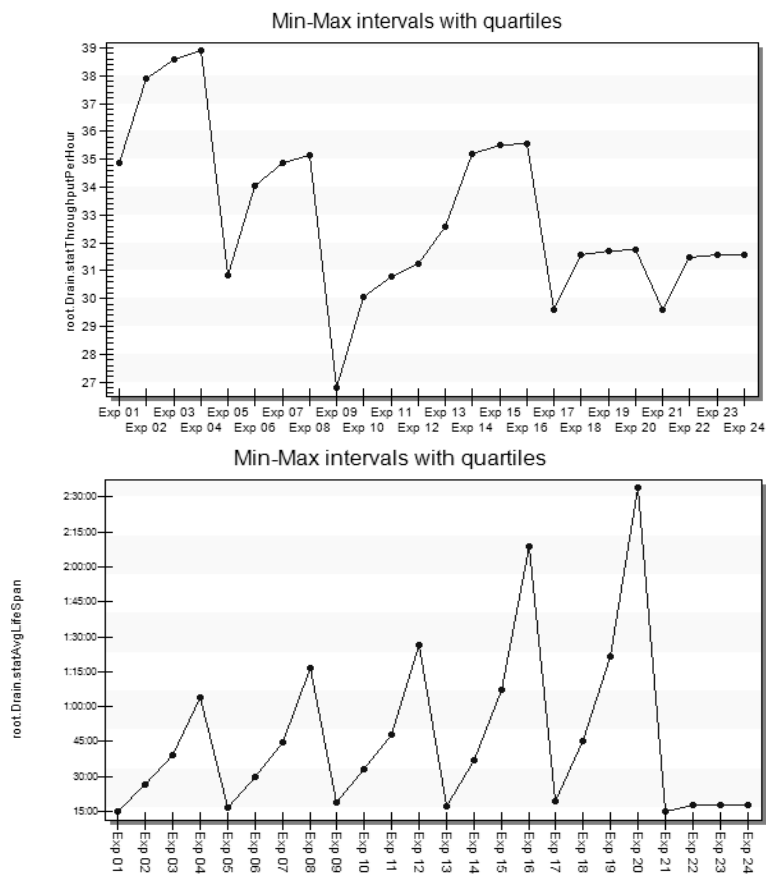
Rys. 4. Wydajność i średni czas życia detalu w systemie dla topologii S1 i 1 PUR

Jak wynika z przedstawionych wykresów największą wydajność (ok. 19 szt./h) uzyskano dla maksymalnych wartości dostępności zasobów.

Zmiana pojemności buforów praktycznie nie ma wpływu na wydajność, jednak w dużym stopniu wpływa na poziom zapasów produkcji w toku. Największy poziom zapasu produkcji w toku (czas przebywania detalu w systemie 5h) wystąpił dla eksperymentu Exp20 dla największych pojemności buforów i malejących dostępnościach zasobów w poszczególnych liniach produkcyjnych.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań systemu o topologii S1 dla 6 PUR. Wprowadzenie dodatkowych pracowników utrzymania ruchu spowodowało dalszy wzrost wydajności systemu i obniżenie zapasów produkcji w toku. Szczególnie widoczna jest poprawa wydajności dla wariantu o najniższej średniej dostępności zasobów (Exp11 i Exp12). Najniższą wydajność (poniżej 27 szt./h) osiągnięto dla najmniejszych dostępności zasobów i jednostkowych buforów (Exp09).

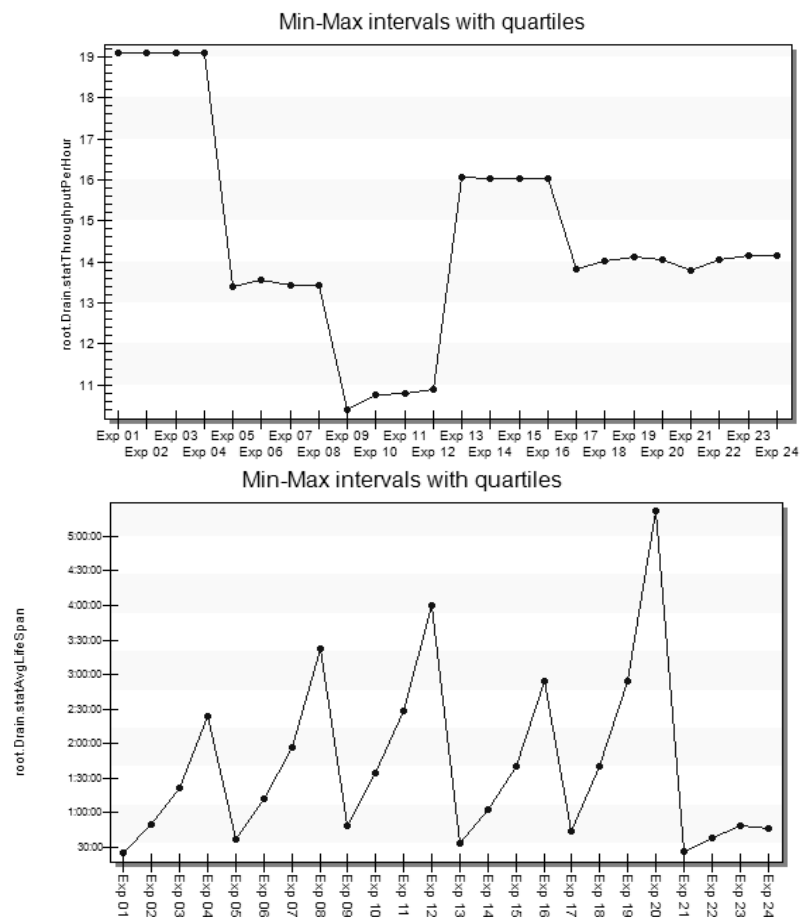
Rysunek 6 przedstawia wyniki badań systemu produkcyjnego o topologii S2 dla 1 PUR. Jak wynika z pokazanego wykresu zmiana topologii (zmiana powiązań pomiędzy zasobami i buforami) nie wpłynęła na wydajność systemu (wykres wydajności prawie identyczny z



Rys. 5. Wydajność i średni czas życia detalu w systemie dla topologii S1 i 6 PU

wykresem pokazanym na rysunku 4). Podobnie wygląda kwestia zapasów produkcji w toku, zmiana topologii tylko w niewielkim stopniu wpłynęła na zmiany średniego czasu życia detali w systemie w trakcie poszczególnych eksperymentów (nieznacznie krótsze okresy życia detali w systemie o topologii S2). Największą wartość czasu życia detalu w systemie uzyskano dla Exp20 (ponad 5h). Najmniejsze wartości uzyskano dla jednostkowych pojemności buforów międzystanowiskowych oraz dla eksperymentów Exp21-Exp24. W przypadku minimalnej liczby PUR wielkość buforów praktycznie nie ma wpływu na wydajność systemu, a wyłącznie na wielkość zapasu produkcji w toku.

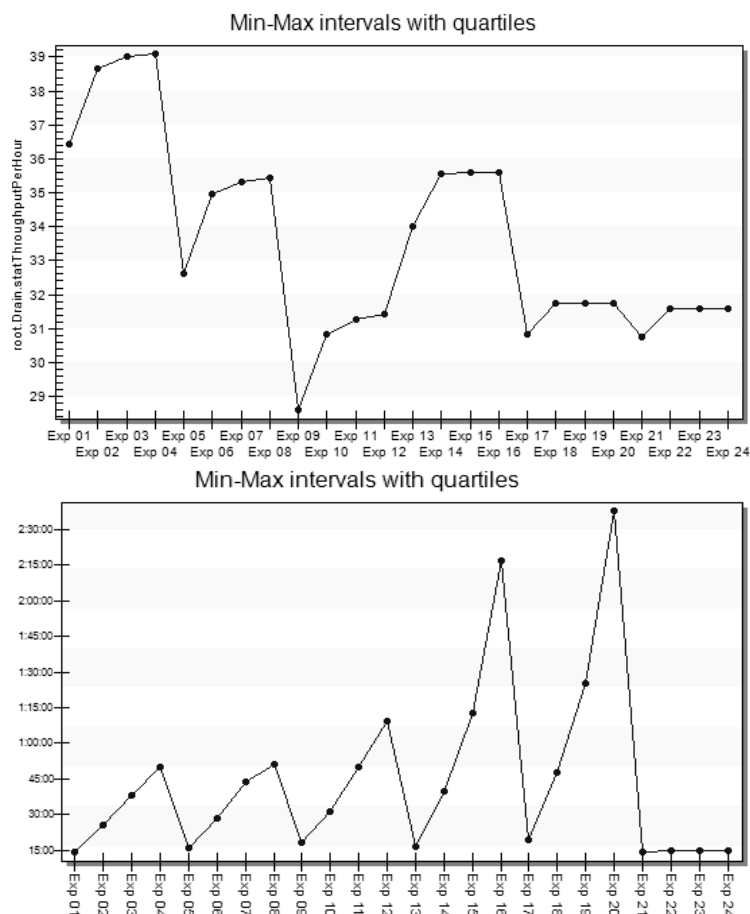
Na rysunku 7 przedstawiono wydajność i średni czas życia detali w systemie o topologii S2 dla 6 PUR. W porównaniu z wykresami przedstawionymi na rysunku 5, zwiększanie pojemności buforów powyżej 1 ma mniejszy wpływ na zwiększenie wydajności. Zmiana topologii wpływa również na zmniejszenie poziomu zapasów produkcji w toku (niższe średnie wartości czasu życia detali w systemie dla poszczególnych eksperymentów), oraz zwiększenie wydajności (praktyczne dla wszystkich eksperymentów). Maksymalna wydajność (ponad 39 szt./h) została uzyskana dla maksymalnej dostępności zasobów i największej pojemności buforów międzystanowiskowych (Exp04). Średni czas przebywania detali w systemie zmniejszył się z 18 min dla topologii S1 (eksperymenty



Rys. 6. Wydajność i średni czas życia detalu w systemie dla topologii S2 i 1 PU

Exp22, Exp23, Exp24) dla topologii S2. Przy 6 PUR wielkość buforów ma znaczący wpływ na wydajność. Dla przykładu zwiększenie pojemności buforów w Exp01 - Exp04 skutkuje wzrostem wydajności z 36 do 39 szt./h. Podobnie jak w przypadku topologii S1, wydajność systemu dla eksperymentów Exp07 i Exp08 są zbliżone do wydajności dla eksperymentów Exp14, Exp15 i Exp16 pomimo różnicy średniej dostępności zasobów. Wydajność dla eksperymentów Exp18, Exp19, Exp20, Exp22, Exp23 i Exp24 są zbliżone do wydajności Exp11 i Exp12 pomimo dużej różnicy średniej dostępności zasobów.

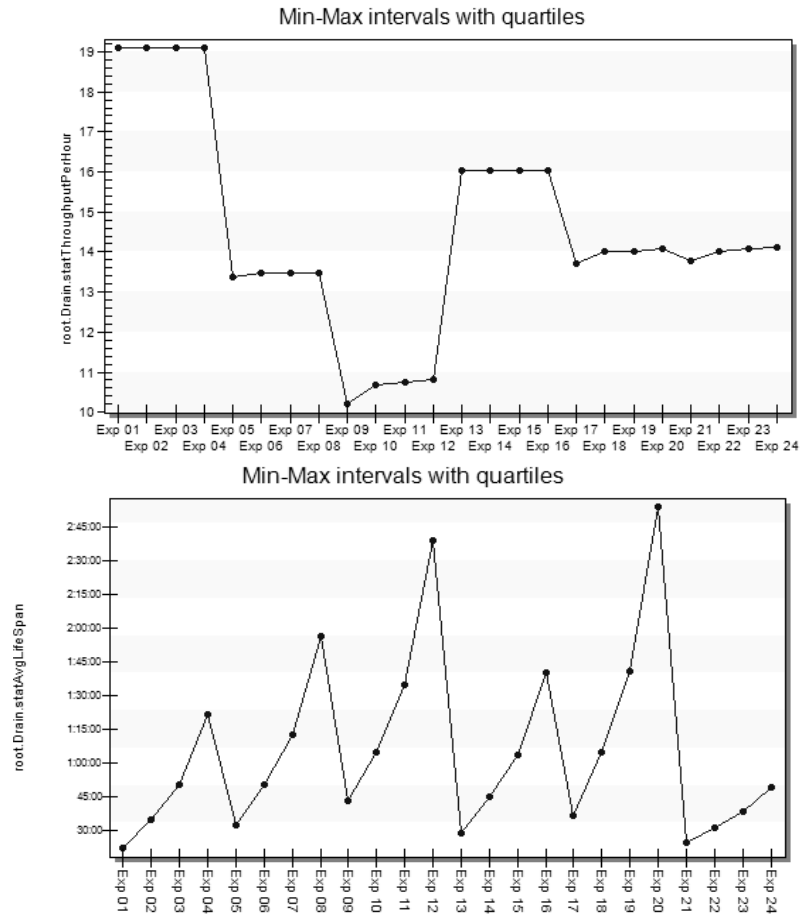
Na rysunku 8 przedstawiono wyniki eksperymentów symulacyjnych dla topologii S3 systemu produkcyjnego i 1 PUR. Wykres wydajności jest zbliżony do wykresu przedstawionego na rysunkach 6 i 4. Maksymalne wartości wydajności zostały osiągnięte dla Exp01- Exp04 bez względu na wielkość buforów i wyniosły ok. 19 szt./min. Przy 1 PUR pojemności buforów praktycznie nie mają wpływu na wydajność całego systemu. O wydajności decyduje średnia wydajność poszczególnych zasobów. Najmniejsza wydajność systemu (ok. 10 szt./min) uzyskano dla eksperymentu Exp09. Dla 1 PUR wydajności systemów produkcyjnych o topologiach S1, S2 i S3 są do siebie bardzo zbliżone. Średni



Rys. 7. Wydajność i średni czas życia detalu w systemie dla topologii S2 i 6 PUR

czas życia detalu w systemie zmienia się w znaczący sposób w zależności od pojemności buforów. Maksymalny, średni czas życia detali w systemie uzyskano dla Exp20 dla malejących dostępności zasobów produkcyjnych i maksymalnych pojemności buforów. Minimalny średni czas życia detalu uzyskano dla rosnących wartości dostępności zasobów oraz jednostkowej wartości pojemności buforów. Minimalny zapas produkcji w toku w systemie jest osiągnany dla jednostkowych wielkości buforów.

Na rysunku 9 przedstawiono wykresy wydajności i średniego czasu życia detali w systemie produkcyjnym o topologii S3 i 6 PUR dla poszczególnych eksperymentów symulacyjnych. Analiza wyników pokazuje, że największą wydajność (39 szt./h) podobnie jak w przypadku wykresów z rysunków 5 i 7 uzyskano dla eksperymentu Exp04 przy maksymalnej dostępności zasobów i maksymalnej wielkości buforów. Maksymalny średni czas życia detali w systemie uzyskano dla eksperymentu Exp20, dla malejących dostępności zasobów produkcyjnych i maksymalnej wielkości buforów. Wydajności systemu produkcyjnego o topologii S3 i 6 PUR są dla poszczególnych eksperymentów mniejsze niż odpowiadające im wydajności systemu o topologii S2 i 6 PUR. Generalnie dla topologii S3 i 6 PUR zapasy



Rys. 8. Wydajność i średni czas życia detalu w systemie dla topologii S3 i 1 PUR

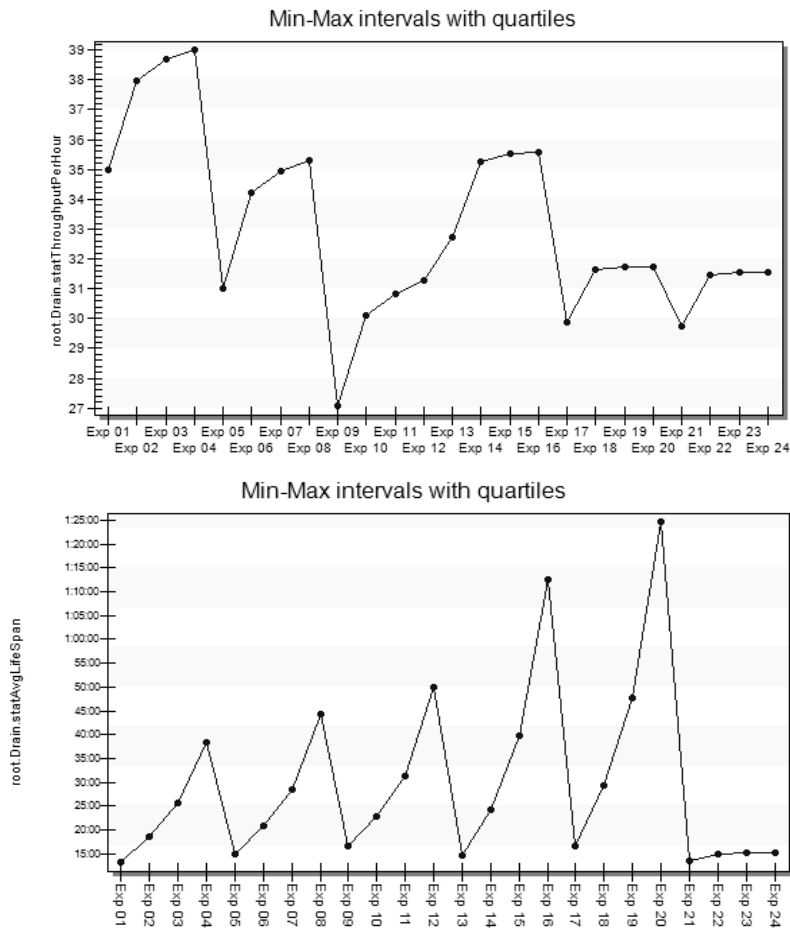
produkcji w toku są mniejsze w porównaniu z wynikami uzyskanymi podczas prowadzenia eksperymentów symulacyjnych dla topologii S1 i S3 przy analogicznej liczbie pracowników. Zatem zastosowanie topologii S3 pozwala ograniczyć średnie czasy życia detali w systemie a co za tym idzie poziom zapasów produkcji w toku.

W kolejnym rozdziale przedstawiono najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań symulacyjnych i kierunki dalszych badań.

4. Wnioski i kierunki dalszych badań

Symulacja komputerowa jest często wykorzystywana do analizy i projektowania systemów produkcyjnych. Badania symulacyjne mogą być na przykład prowadzone w celu:

- przewidywania wpływu zakłóceń na realizację procesów produkcyjnych i logistycznych i oceny efektywności procesów utrzymania ruchu,



Rys. 9. Wydajność i średni czas życia detalu w systemie dla topologii S3 i 6 PUR

- analizy efektywności procesów produkcyjnych w celu wdrożenia projektów umożliwiających usprawnienie procesów wytwarzania poprzez lepsze wykorzystanie zasobów oraz czasu,
- identyfikacji i wyeliminowania ograniczeń w eksploatacji zasobów w celu poprawy wydajności całego systemu produkcyjnego,
- oceny wydajności systemu istniejącego, bądź stworzenia nowego sprawnie działającego systemu proponowanego w różnych wariantach,
- zmniejszenia prawdopodobieństwo niezrealizowania wymagań postawionych przez konsumenta.
- planowania potrzeb materiałowych i określania optymalnej partii dostaw,
- określenia wielkości optymalnego poziomu zatrudnienia.

Wydajność systemów produkcyjnych jest jednym z kluczowych parametrów decydujących w wielu obszarach produkcji o konkurencyjności przedsiębiorstw. Z drugiej strony np. dla firm branży motoryzacyjnej kluczowa jest redukcja zapasów produkcji w toku. W przedstawionym artykule przeprowadzono badania wpływu topologii systemu

produkcyjnego, alokacji buforów, dostępności zasobów i liczby pracowników utrzymania ruchu na wydajność systemu i poziom zapasów produkcji w toku (średni czas życia detali w systemie). Badania przeprowadzono wykorzystując metodę symulacji komputerowej i oprogramowanie Tecnomatix Plant Simulation v. 11. Model został opracowany na podstawie rzeczywistego systemu produkcyjnego, wytwarzającego detale dla branży samochodowej. Badaniom poddano trzy topologie systemu produkcyjnego i dla każdej topologii badano dwa warianty liczby pracowników utrzymania ruchu (1 PUR i 6 PUR). Zaprojektowano 24 eksperymenty symulacyjne dla różnych dostępności zasobów produkcyjnych i pojemności buforów międzyoperacyjnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

- Całkowita wydajność systemu produkcyjnego jest determinowana dostępnością zasobów produkcyjnych.
- Poziom zapasu produkcji w toku jest determinowany wielkością buforów międzystanowiskowych.
- Najwyższą wydajność systemu uzyskano dla topologii S2 i 6 PUR.
- Najniższy średni czas życia detalu w systemie (najniższy poziom zapasu produkcji w toku) uzyskano dla topologii S3 i 6 PUR.
- Przy minimalnej liczbie personelu utrzymania ruchu (1 PUR) zwiększanie pojemności buforów międzyoperacyjnych nie wpływa na wydajność systemu, ale powoduje wzrost poziomu zapasu produkcji w toku.
- Najmniejszy poziom zapasów produkcji w toku uzyskano przy narastającej dostępności zasobów, zaś największy przy malejącej dostępności.

Przeprowadzone wyniki badań pokazały przydatność metody symulacji komputerowej do analizy wpływu liczby PUR na wydajność systemu i poziom zapasów produkcji w toku. W ramach dalszych badań, analizowany będzie wpływ kolejności wykonywania operacji według czasów jednostkowych (narastająco lub malejąco) oraz właściwe określenie czasów przygotowawczych i zakończeniowych. Ponadto badany będzie wpływ liczby pracowników utrzymania ruchu na wydajność przy określonych wybranych rozkładami stochastycznymi awariach maszyn. Istotnym aspektem dla analizy efektywności przepływu produkcji będzie przeprowadzenie badań dla systemów o bardziej złożonych strukturach z uwzględnieniem środków transportu (przenośniki, wózki widłowe, etc).

Literatura

1. Battini D., Persona A., Regattieri A., Buffer size design linked to reliability performance: A simulative study, *Computers & Industrial Engineering*, 56, 2009, pp. 1633–1641.
2. Demir L., Tunali S., Eliiyi D.T., The state of the art on buffer allocation problem: a comprehensive survey, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25, (2014), pp. 371–392.
3. Fernandes N. O., Carmo - Silva S., Order release in a workload controlled flow-shop with sequence-dependent set-up times, *International Journal of Production Research* 2011, 49(8), pp. 2443–54.
4. Matta A., Simulation optimization with mathematical programming representation of discrete event systems. In: *Proceedings of the 2008 winter simulation conference*, 2008, pp. 1393–400.
5. Nahas N., Ait-Kadi D., Nourelfath M., Selecting machines and buffers in unreliable series-parallel production lines. *International Journal of Production Research* 2009; Vol. 47(14), pp. 3741–74.

6. Shi C., Gershwin S.B., An efficient buffer design algorithm for production line profit maximization. *International Journal of Production Economics*, 2009, 122, pp. 725 – 40.
7. Staley D. R., Kim D. S., Experimental results for the allocation of buffers in closed serial production lines, *International Journal of Production Economics*, Vol. 137, 2012, pp. 284–291.
8. Vergara H. A., Kim D. S., A new method for the placement of buffers in serial production lines, *International Journal of Production Research*, 2009, 47, pp. 4437–4456.
9. Vidalis, M. I., Papadopoulos, C. T., Heavey, C., On the workload and ‘phase load’ allocation problems of short reliable production line with finite buffers, *Computers and Industrial Engineering*, 48, 2005, pp.825–837.
10. Yamashita H., Altiok T., Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines. *IIE Transactions* 1998, 30, pp. 883–891.

Dr hab. inż. Sławomir KŁOS, prof. UZ

Dr hab. inż. Justyna PATALAS-MALISZEWSKA, prof. UZ

Instytut Informatyki i Zarządzania Produkcją

Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski

65-516 Zielona Góra,

ul. Prof. Z. Szafrana 4

tel./fax: 048 68 328 2514

e-mail: s.klos@iizp.uz.zgora.pl

j.patalas@iizp.uz.zgora.pl