

# SYMULACJA PRZEBIEGU PROCESÓW PRODUKCYJNYCH W SYSTEMACH PRZEPLYWOWYCH W OPARCIU O OPROGRAMOWANIE TECNOMATIX PLANT SIMULATION

Sławomir KŁOS, Justyna PATALAS-MALISZEWSKA

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono koncepcję badań efektywności przepływu produkcji w systemach przepływowych w oparciu o metodę symulacji komputerowej z wykorzystaniem oprogramowania Tecnomatix Plant Simulation. Model symulacyjny systemu produkcyjnego został opracowany w oparciu o przykład rzeczywistego wydziału produkcyjnego, przedsiębiorstwa wytwarzającego podzespoły dla branży motoryzacyjnej. Przeprowadzone eksperymenty obejmowały badania wpływu zmiany wielkości buforów międzyoperacyjnych na wydajność systemu produkcyjnego oraz poziom zapasów produkcji w toku. Badania przeprowadzono dla dwóch różnych topologii systemu produkcyjnego. Przeprowadzono analizę porównawczą wydajności obu systemów z wykorzystaniem oprogramowania Tecnomatix Plant Simulation.

**Słowa kluczowe:** Symulacja komputerowa, produkcyjny system przepływowy, bufory międzyoperacyjne, wydajność systemu, zapasy produkcji w toku.

## 1. Wstęp

Symulacja komputerowa jest metodą badawczą często stosowaną dla potrzeb analizy przebiegu procesów produkcyjnych w celu poprawy ich wydajności. Metoda symulacji jest doskonałym narzędziem do wizualizacji i analizy przebiegu procesów produkcyjnych, jak również do wspomagania decyzji związanych z rozwojem lub modernizacją systemów produkcyjnych [2]. Dzięki symulacji komputerowej możliwa jest znaczna redukcja czasu wprowadzania nowych wyrobów do produkcji oraz szybkie uzyskanie pełnej zdolności produkcyjnej systemu [4], [6]. W oparciu o techniki symulacji komputerowej można również analizować wpływ różnych wariantów rozstawienia maszyn, kolejności wykonywania operacji, wielkości buforów trzystanowiskowych, długości dróg transportowych, itd. na wydajność systemu produkcyjnego [11], [13]. 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. Budowa modeli symulacyjnych i eksperymentalne badanie przebiegu procesów produkcyjnych przy użyciu symulacji komputerowej ma istotne znaczenie w przypadku projektowania nowych lub modernizacji istniejących systemów wytwórczych oraz przy wdrażaniu do produkcji nowych wyrobów. Na podstawie stworzonych alternatywnych modeli przebiegu procesów, można podejmować decyzje dotyczące powierzchni, liczby pracowników czy też inwestycji potrzebnych do uruchomienia nowej produkcji. Budowa modeli symulacyjnych ma swoje ograniczenia związane z pracochłonnością, a co za tym idzie kosztownością modelowania systemów produkcyjnych. Odwzorowanie systemów produkcyjnych w postaci dynamicznego modelu wymaga określenia wartości czasów operacji technologicznych, uwzględnienia awaryjności zasobów produkcyjnych i logistycznych oraz

zaprojektowania przebiegu procesu produkcji (realizacja planu produkcyjnego) [12], [15]. Aby tworzony model jak najlepiej odwzorowywał rzeczywiste zachowanie systemu produkcyjnego, należy również określić parametry dotyczące pracowników, środków transportu, planu realizacji zleceń produkcyjnych, itd. Budowa modelu symulacyjnego wymaga dużego doświadczenia i znajomości modelowanych systemów wytwórczych oraz biegłości w posługiwaniu się narzędziami do komputerowej symulacji procesów [9].

Detale dla branży motoryzacyjnej są wytwarzane najczęściej na liniach produkcyjnych lub w systemach przepływowych, w których poszczególne stanowiska produkcyjne zostały oddzielone magazynami (buforami) międzyoperacyjnymi. Zależność pomiędzy wielkością buforów międzyoperacyjnych, a wydajnością systemu produkcyjnego jest przedmiotem wielu opracowań badawczych, jako tzw. problem alokacji buforów BAP (ang. buffer allocation problem) [1], [3], [5], [8], [10]. Ponadto na wydajność systemu produkcyjnego mają wpływ czasy przebrojeń oraz czasy jednostkowe, liczba i umiejętności pracowników, wielkość partii produkcyjnych, niezawodność maszyn i urządzeń, efektywność systemu transportowego, itp. Dla potrzeb prowadzonych badań przyjęto następujące założenia dotyczące systemu produkcyjnego, które uwzględniono podczas tworzenia modelu symulacyjnego [6], [7]:

- czasy przebrojeń zostały określone dla zmiany poszczególnych partii produkcyjnych w macierzy przebrojeń,
- czasy operacji są stałe i zostały przyporządkowane do poszczególnych wyrobów,
- proces wytwórczy obejmuje trzy operacje technologiczne, realizowane na trzech identycznych maszynach każda,
- pomiędzy poszczególnymi maszynami zostały alokowane bufory międzyoperacyjne,
- system wytwarza 4 rodzaje wyrobów, cyklicznie w określonych stałą wielkością partii produkcyjnych,
- poziom dostępności maszyn przyjęto jako 95%.

Dla określonych powyżej założeń dotyczących modelu systemu produkcyjnego można postawić następujące hipotezy badawcze:

*Dany jest przepływowy system produkcyjny spełniający określone założenia dotyczące struktury i parametrów funkcjonowania.*

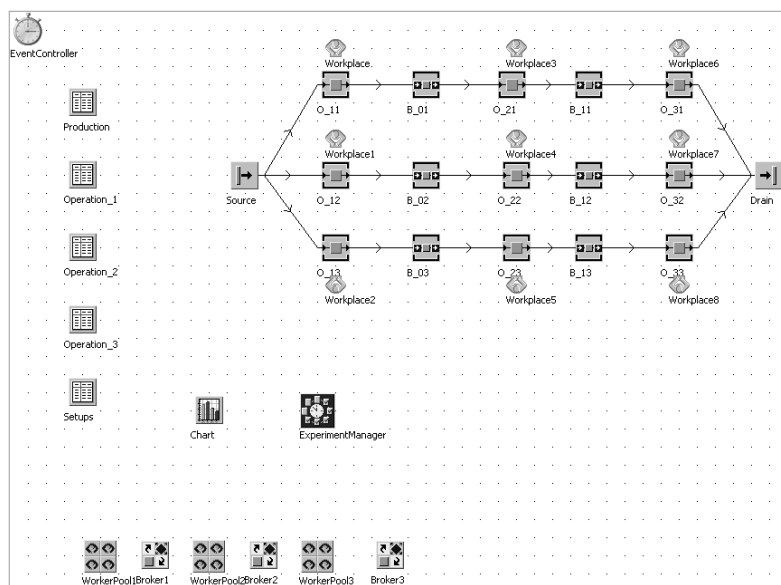
*H1. Zmiana alokacji pojemności buforów międzystanowiskowych wpływa na zmianę wydajności systemu oraz poziomu zapasów produkcji w toku.*

*H2. Zmiana struktury przepływu produkcji pomiędzy poszczególnymi stanowiskami i buforami międzyoperacyjnymi wpływa na zmianę wydajności systemu i poziomu produkcji w toku.*

W kolejnym rozdziale przedstawiono opis modelu systemu produkcyjnego.

## **2. Model symulacyjny systemu produkcyjnego**

Model systemu produkcyjnego S1 został opracowany przy użyciu oprogramowania Tecnomatix Plant Simulation v. 11 (rys. 1). System obejmuje trzy identyczne linie produkcyjne zasilane materiałami z jednego magazynu, obrabione detale również trafiają do wspólnego magazynu wyrobów.



Rys. 1. Model symulacyjny systemu produkcyjnego S1

Wielkość partii produkcyjnych została określona w tabeli Production dla czterech wyrobów odpowiednio A - 20 szt., B - 25 szt., C - 15 szt., D - 10 szt. W tabelach Operation\_1, Operation\_2 i Operation\_3 określono czasy jednostkowe wykonywania operacji odpowiednio na grupach identycznych maszyn: Operation\_1 - O\_11, O\_12, O\_13; Operation\_2 - O\_21, O\_22, O\_23; i Operation\_3 - O\_31, O\_32, O\_33 (tab. 1).

Tab. 1 Czasy jednostkowe dla poszczególnych produktów.

Produkt	Operation_1	Operation_2	Operation_3
A	5:00	8:00	9:00
B	1:00	3:00	5:00
C	3:00	5:00	7:00
D	2:00	4:00	8:00

Czasy przebrożeń zostały określone w tzw. macierzy czasów przebrożeń (tab.2). Dane przedstawione w tabeli oznaczają, że na przykład przebrożenie maszyny z produkcji wyrobu A na B wymaga 10 minut czasu przygotowawczo-zakończeniowego.

Tab. 2 Macierz czasów przebrożeń (Setups).

Produkt	A	B	C	D
-	30:00	20:00	10:00	30:00
A	30:00	10:00	30:00	15:00
B	30:00	30:00	20:00	30:00
C	40:00	40:00	30:00	20:00
D	20:00	30:00	30:00	30:00

Przy każdej maszynie zdefiniowano operatora (brak operacji automatycznych), przy czym liczba operatorów odpowiada liczbie maszyn. Zgodnie z wcześniejszymi założeniami poziom dostępności maszyn przyjęto jako 95%.

Jako dane wejściowe dla potrzeb prowadzonych eksperymentów przyjęto wielkości buforów międzystanowiskowych (tab. 3). Wielkości buforów zmieniają się od 1 do 10 detali tworząc różne warianty alokacji. Sumaryczną pojemność buforów międzystanowiskowych przedstawiono w ostatniej kolumnie. Jako dane wyjściowe wynikające z przeprowadzenia poszczególnych eksperymentów na modelu symulacyjnym, rejestrowane są średnia przepustowość systemu na godzinę (ang. Throughput per hour) i średni czas przebywania (życia) detalu w systemie (Average Product Lifespan), którego wartość odzwierciedla wielkość zapasów produkcji w toku. Przepustowość systemu oraz poziom zapasu produkcji w toku w systemach przepływowych wykazują relację. Zwiększanie pojemności buforów (poziomu zapasów produkcji w toku) prowadzi często do zwiększenia wydajności całego systemu. W celu powiązania obu wskaźników, zdefiniowano wskaźnik przepływu  $\theta$ :

$$\theta = \frac{T}{\Lambda} \quad (1)$$

gdzie: T - wydajność systemu,  $\Lambda$  - średni czas przebywania detalu w systemie

Im większa wartości wskaźnika przepływu dla poszczególnych eksperymentów, tym lepsza relacja pomiędzy wydajnością i poziomem zapasów produkcji w toku.

Tab. 3 Wejściowe dane eksperymentalne

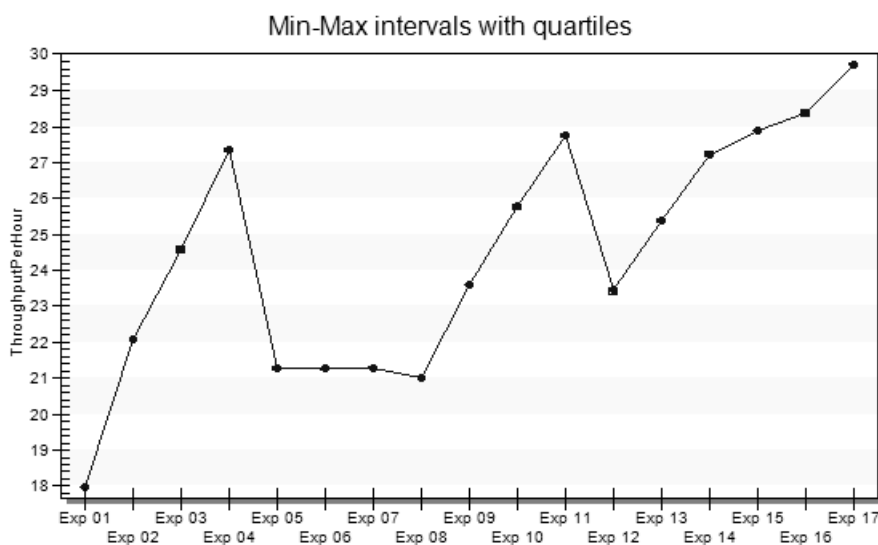
	<b>B_01</b>	<b>B_02</b>	<b>B_03</b>	<b>B_11</b>	<b>B_12</b>	<b>B_13</b>	<b>Razem</b>
<b>Exp_01</b>	1	1	1	1	1	1	6
<b>Exp_02</b>	2	2	2	2	2	2	12
<b>Exp_03</b>	3	3	3	3	3	3	18
<b>Exp_04</b>	4	4	4	4	4	4	24
<b>Exp_05</b>	1	2	3	3	2	1	12
<b>Exp_06</b>	3	2	1	1	2	3	12
<b>Exp_07</b>	1	3	2	2	1	3	12
<b>Exp_08</b>	1	1	1	5	5	5	18
<b>Exp_09</b>	2	2	2	5	5	5	21
<b>Exp_10</b>	3	3	3	5	5	5	24
<b>Exp_11</b>	4	4	4	5	5	5	27
<b>Exp_12</b>	5	5	5	1	1	1	18
<b>Exp_13</b>	5	5	5	2	2	2	21
<b>Exp_14</b>	5	5	5	3	3	3	24
<b>Exp_15</b>	5	5	5	4	4	4	27
<b>Exp_16</b>	5	5	5	5	5	5	30
<b>Exp_17</b>	10	10	10	10	10	10	60

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań modelu symulacyjnego systemu oraz analizę porównawczą przy zmienionej strukturze przepływu produkcji.

### 3. Wyniki symulacji komputerowej

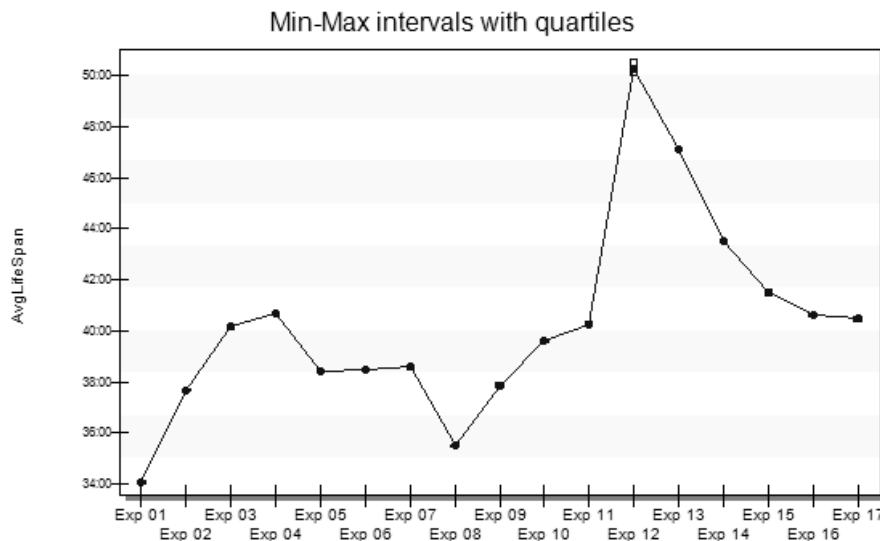
Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 3 przeprowadzono 17 eksperymentów symulacyjnych. Każdy eksperyment został przeprowadzony dla 10 zmian roboczych (przyjęto 8 godzin na zmianę).

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunkach 3 i 4, które przedstawiają odpowiednio przepustowość oraz czasy przebywania detalu w systemie. Jak wynika z wykresu przedstawionego na rysunku 2, wydajność systemu rośnie wraz ze wzrostem pojemności buforów, przy czym zwiększanie pojemności buforów międzyoperacyjnych powyżej 10 jednostek nie przynosi dalszego efektu zwiększania wydajności, która pozostaje na poziomie 29,7 detali na godzinę. Stosunkowo niską wydajność mają systemy, dla których określono jednostkowe pojemności buforów międzystanowiskowych (Exp\_01, Exp\_05, Exp\_06, Exp\_07, Exp\_08, Exp\_12). Natomiast stosunkowo wysoką wydajnością charakteryzują się systemy o zrównoważonych wielkościach buforów równych lub większych niż 4 jednostki (Exp\_04, Exp\_11, Exp\_14, Exp\_15, Exp\_16, Exp\_17).



Rys. 2 Wyniki badań symulacyjnych – wydajność systemu S1

Na rysunku 3 przedstawiono wykres obrazujący średni czas przebywania detalu w systemie w zależności od pojemności buforów międzystanowiskowych.

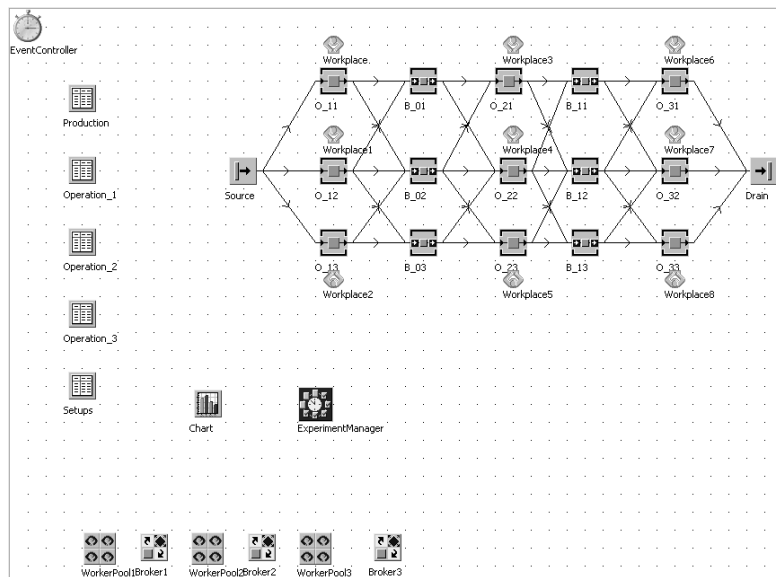


Rys. 3 Wyniki badań symulacyjnych – średni czas przebywania detalu w systemie S1

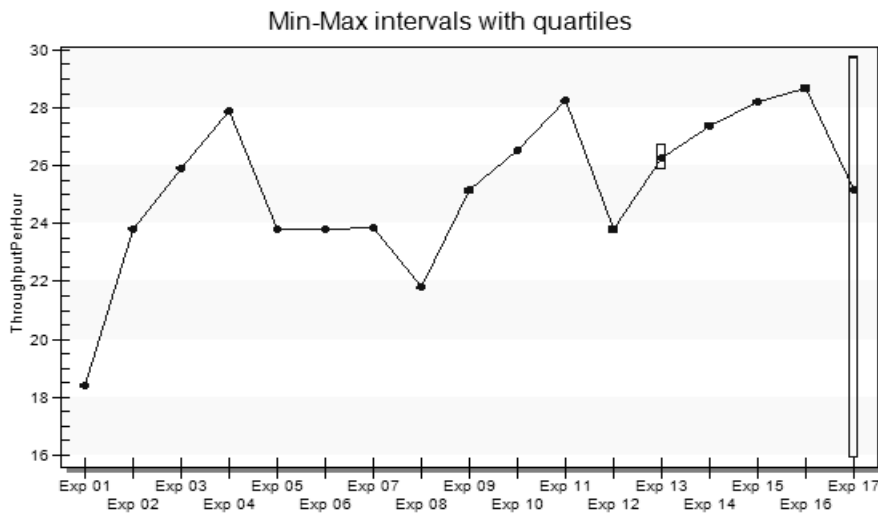
Jak wynika z wykresu, najmniejszy poziom zapasów produkcji w toku uzyskano dla eksperymentów Exp\_01 i Exp\_08 (dla jednostkowych pojemności buforów B\_01, B\_02 i B\_03). Maksymalny zapas produkcji w toku uzyskano dla alokacji pojemności buforów w eksperymencie Exp\_12 (50:16 – średni czas przebywania detalu w systemie). Jak wynika z przebiegu wykresu zwiększanie pojemności buforów międzystanowiskowych (Exp\_13 ... Exp\_16, Exp\_17) prowadzi do zmniejszenia czasu przebywania detali w systemie.

W celu zbadania wpływu zmiany struktury przepływu produkcji wprowadzono dodatkowe powiązania pomiędzy poszczególnymi obiektami systemu. W praktyce oznacza to, że detal po obróbce na maszynie O\_11 może być przekazany do bufora B\_01 lub B\_02. Zastosowano regułę priorytetu typu *round robin*, która wymusza cykliczne dostarczanie detali do wszystkich wyjść danego obiektu po kolei. Na rysunku 4 przedstawiono model systemu produkcyjnego S2 po zmianie struktury przepływu.

Dla modelu przedstawionego na rysunku 4 przeprowadzono badania symulacyjne w oparciu o dane przedstawione w tabeli 3. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Jak wynika z wartości przedstawionych na wykresie największą wydajność systemu (28,7 detali na godzinę) uzyskano dla eksperymentu Exp\_16, przy czym jest ona mniejsza niż najwyższa wydajność uzyskana w oparciu o poprzedni model o niezmienionej strukturze przepływu. Analogicznie jak w przypadku pierwszego modelu, bardzo dobrą wydajność systemu uzyskano dla alokacji pojemności buforów międzystanowiskowych określonych w eksperymentach Exp\_4 i Exp 11. W przeciwieństwie do poprzedniego modelu zwiększenie pojemności wszystkich buforów do 10 detali (Exp\_17) prowadzi do zmniejszenia wydajności całego systemu. Dla eksperymentu Exp\_8 wydajność systemu jest również bardzo niska tak jak w przypadku wcześniejszej konfiguracji systemu. Generalnie można zauważyć, że wykresy wydajności systemów są do siebie zbliżone, przy czym w przypadku systemu S2 zmienność wartości wydajności jest mniejsza.

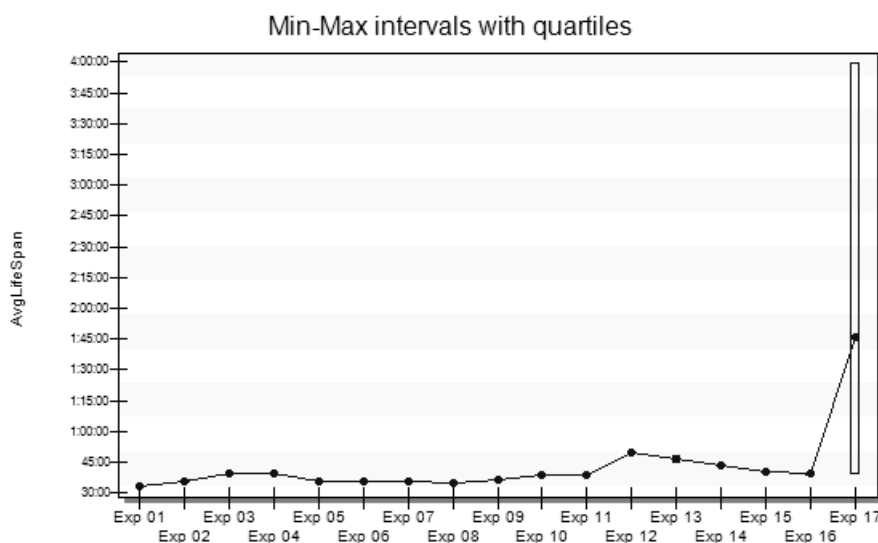


Rys. 4. Model symulacyjny systemu produkcyjnego S2 po zmianie struktury przepływu produkcji



Rys. 5 Wyniki badań symulacyjnych po zmianie struktury przepływu produkcji – wydajność systemu S2

Na rysunku 6 przedstawiono czasy przebywania detali w systemie po zmianie struktury przepływu produkcji. Czasy przebywania detali w systemie po zmianie struktury przepływu produkcji są w przypadku kilku eksperymentów nieznacznie krótsze. Znacznie wydłużył się czas przebywania detali w systemie w ostatnim eksperymencie ( z 40 min do 1 h 46 min).



Rys. 6 Wyniki badań symulacyjnych po zmianie struktury przepływu produkcji – średni czas przebywania detalu w systemie S2

Podobnie jak w przypadku poprzedniego modelu, zwiększanie pojemności buforów skutkuje skracaniem czasu przebywania detali w systemie (Exp\_12 – Exp\_16). Dla Exp\_12 czas przebywania detalu w systemie po zmianie struktury przepływu jest zbliżony do czasu przed zmianą. W tabeli 4 i na rysunku 7 przedstawiono wyniki eksperymentów symulacyjnych dla systemu przed zmianą struktury (S1) i po zmianie struktury oraz wyznaczono wartości indeksu przepływu dla poszczególnych eksperymentów.

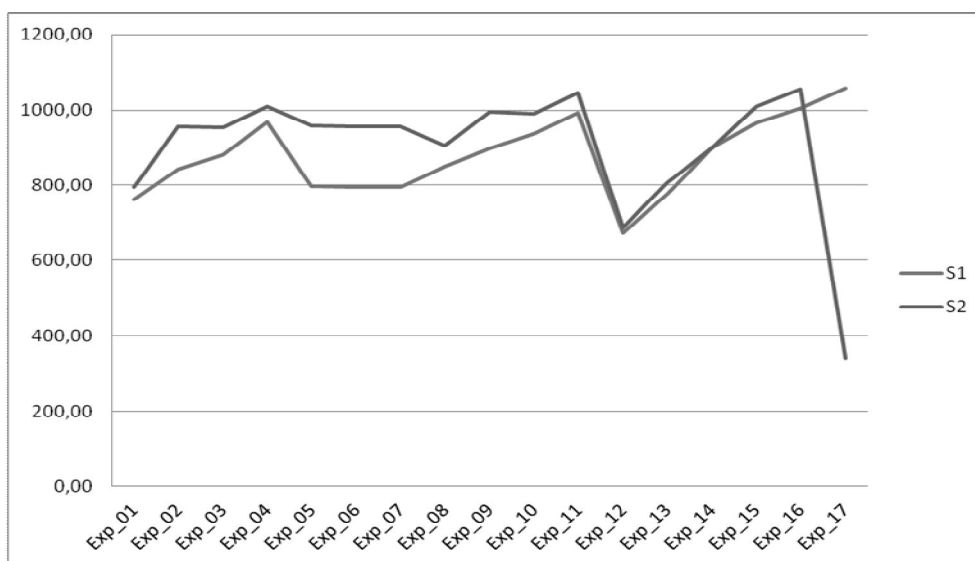
Tab. 4 Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych

	Wydajność S1	Czas przebywania detali S2	Wskaźnik przepływu S1	Wydajność S2	Czas przebywania detali S2	Wskaźnik przepływu S2
Exp_01	17,98	00:34:03	760,35	18,43	00:33:25	794,26
Exp_02	22,06	00:37:41	843,09	23,83	00:35:53	956,29
Exp_03	24,59	00:40:10	881,49	25,93	00:39:09	953,85
Exp_04	27,37	00:40:43	967,85	27,88	00:39:44	1010,20
Exp_05	21,28	00:38:26	797,36	23,81	00:35:47	958,08
Exp_06	21,26	00:38:29	795,68	23,81	00:35:49	957,26
Exp_07	21,30	00:38:35	794,90	23,88	00:35:55	957,14
Exp_08	21,00	00:35:31	851,60	21,79	00:34:36	907,04
Exp_09	23,61	00:37:53	897,51	25,16	00:36:24	995,34
Exp_10	25,78	00:39:38	936,73	26,54	00:38:33	991,50
Exp_11	27,74	00:40:16	992,23	28,26	00:38:54	1045,82
Exp_12	23,46	00:50:16	671,99	23,81	00:49:59	685,99



Exp_13	25,37	00:47:06	775,69	26,28	00:46:55	806,40
Exp_14	27,23	00:43:32	900,64	27,40	00:43:49	900,40
Exp_15	27,89	00:41:32	967,04	28,21	00:40:16	1008,58
Exp_16	28,37	00:40:37	1005,53	28,70	00:39:09	1055,47
Exp_17	29,74	00:40:29	1057,95	25,16	01:46:02	341,69

Największą wartość wskaźnik przepływu uzyskał dla systemu S1 Exp\_17 i S2 Exp\_16 (odpowiednio wartości wskaźnika przepływu 1057,95 i 1055,47), przy czym należy wziąć pod uwagę, że w systemie S1 Exp\_16 alokowano o połowę mniejsze pojemności buforów międzyoperacyjnych. Wykres przedstawiony na rysunku 7 pokazuje, że wartość wskaźnika przepływu w zakresie alokacji pojemności buforów Exp\_1 - Exp11 jest większa dla systemu po zmianie struktury przepływu materiałów (S2). Z punktu widzenia efektywności wykorzystania powierzchni produkcyjnej, system S2 spełnia lepiej to zadanie ponieważ zwiększanie pojemności buforów wymaga dodatkowej powierzchni, a w tym przypadku można uzyskać zbliżoną wydajność systemu przy znacznie mniejszych wymaganiach na pojemność buforów międzystanowiskowych.



Rys. 7 Wartości wskaźnika przepływu dla poszczególnych eksperymentów przed S1 i po zmianie struktury systemu S2.

#### 4. Wnioski i kierunki dalszych badań

Nowoczesne przedsiębiorstwa produkcyjne muszą umieć szybko dostosować się do zmiennych wymagań klientów: wprowadzać zmiany konstrukcyjne i technologiczne oraz realizować projekty produkcyjne związane z wytwarzaniem nowych wyrobów. Dlatego bardzo ważna jest umiejętność posługiwania się technikami i narzędziami umożliwiającymi modelowanie i symulację przepływu produkcji. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych modelu przepływowego systemu produkcyjnego. Model został opracowany

na podstawie rzeczywistego systemu produkcyjnego, wytwarzającego detale dla branży samochodowej. Opracowany model symulacyjny obejmuje programy produkcji wyrobów, wielkości partii produkcyjnych, czasy jednostkowe i przygotowawczo zakończyeniowe, dostępność zasobów produkcyjnych oraz pracowników. Badania zostały przeprowadzone przy użyciu oprogramowania Tecnomatix Plant Simulation v. 11. Zdefiniowano cztery produkty wytwarzane w systemie, przy czym czasy jednostkowe dla poszczególnych operacji technologicznych zostały określone narastająco (tab. 1).

Zaplanowano 17 eksperymentów dla różnej alokacji pojemności buforów międzyoperacyjnych. Zdefiniowano dwie hipotezy badawcze, które po przeprowadzeniu badań i analizie wyników można zweryfikować pozytywnie. Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 2, 3, 5 i 6 pokazała, że zmiana alokacji pojemności buforów przedzastanowiskowych wpływa na zmianę wydajności systemu oraz poziom zapasu produkcji w toku. Nie można jednoznacznie stwierdzić, że wzrost pojemności buforów wpływa na zwiększenie zapasu produkcji w toku, ponieważ dla części eksperymentów zwiększanie alokowanej pojemności buforów, skutkowało skróceniem czasu przebywania detali w systemie produkcyjnym (eksperymenty Exp\_12 – Exp\_16). Najniższa wydajność systemu była uzyskiwana przy jednostkowych pojemnościach buforów międzystanowiskowych. Okazuje się, że właściwa alokacja pojemności buforów międzystanowiskowych może prowadzić do poprawy wydajności systemu o blisko 40%.

W celu udowodnienia drugiej hipotezy (H2) zmieniono strukturę przepływu produkcji w systemie w taki sposób, że detale mogą być przekazywane do wszystkich sąsiadujących stanowisk produkcyjnych według cyklicznej reguły *round robin*. W wyniku zmiany struktury przepływu, dla większości eksperymentów uzyskano krótsze czasy przebywania detali w systemie. W celu powiązania wydajności i średniego czasu przebywania detalu w systemie zdefiniowano wskaźnik przepływu produkcji. W oparciu o przeprowadzone badania można było dokonać analizy porównawczej systemu S1 z systemem S2 (przed i po zmianie struktury przepływu produkcji). Generalnie zmiana struktury przepływu produkcji pozwoliła na uzyskanie poprawy wartości wskaźnika przepływu produkcji dla większości eksperymentów. Wskaźnik przepływu produkcji uzyskał zarówno największą jak i najmniejszą wartość dla eksperymentu Exp\_17. Ponieważ w eksperymentach Exp\_11 i Exp\_16 alokowana pojemność buforów międzystanowiskowych jest o 50% mniejsza niż w przypadku Exp\_17, a wartość wskaźnika przepływu tylko nieznacznie mniejsza, dla potrzeb wyboru najlepszej alokacji buforów, spośród badanych wariantów, należałoby przyjąć strukturę systemu S2 i alokacje pojemności buforów określone w Exp\_11 lub Exp\_16.

W ramach dalszych badań, analizowany będzie wpływ zmiany liczby pracowników w ramach wykonywania poszczególnych operacji (praca wielostanowiskowa) lub zmiana wydajności pracowników. Ponadto badany będzie wpływ kolejności wykonywania operacji według czasów jednostkowych (narastająco lub malejąco) oraz właściwe określenie czasów przygotowawczo zakończyeniowych. Istotnym aspektem dla analizy efektywności przepływu produkcji jest przeprowadzenie badań dla systemów o bardziej złożonych strukturach (np. *job shop*) [13].

## 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. Dallery, Y., Gershwin, S.B., 1992. Manufacturing flow line systems: are view of models and analytical results. *Queueing Systems: Theory and Applications* 12, pp. 3–94.
3. 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.
4. 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.
5. Gurkan G., Simulation optimization of buffer allocations in production lines with unreliable machines. *Annals of Operations Research* 2000, 93, pp. 177–216.
6. Klos S., Trebuna P., Using computer simulation method to improve throughput of production systems by buffers and workers allocation, *Management and Production Engineering Review*, 2015, Vol. 6, no. 4, pp. 60-69.
7. Klos S., Patalas-Maliszewska J., Throughput analysis of automatic production lines based on simulation methods, *Intelligent data engineering and automated learning - IDEAL 2015 Springer International Publishing Switzerland*, 2015 pp. 181-190.
8. Matta A., Simulation optimization with mathematical programming representation of discrete event systems. In: *Proceedings of the 2008 winter simulation conference*, 2008, pp. 1393–400.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Yamashita H., Altiok T., Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines. *IIE Transactions* 1998, 30, pp. 883–891.
15. Wei K. C., Tsao Q. Q., Otto N. C., Determining buffer size requirements using stochastic approximation methods, *Technical Report SR-89-73*, 1989, Ford Motor Company.

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