

MODELOWANIE ZALEŻNOŚCI CZASOWYCH W SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Streszczenie

W artykule skupiono się na omówieniu podstawowych zależności czasowych w obszarze funkcjonowania systemu produkcyjnego. Zdefiniowano relacje powstające pomiędzy efektywną, ciągłą realizacją zadania eksploatacji a logistyką. Omówiono podstawowe opóźnienia czasowe oraz na wybranym przykładzie systemu produkcyjnego pokazano możliwości oceny wybranych parametrów czasowych.

Słowa kluczowe: koncepcja opóźnień czasowych, system logistyczny, polityka obsługiwaniana

1. WPROWADZENIE

Problem opóźnień czasowych charakteryzuje wiele fizycznych czy technicznych systemów i poruszany jest m.in. w biologii, mechanice czy ekonomii [18]. Jednocześnie, na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat można zaobserwować wyraźny wzrost zainteresowania zagadnieniami zarządzania czasem czy analizy relacji czasowych występujących w systemach/obiektach technicznych.

Dowolny system produkcyjny cechuje (rys. 1):

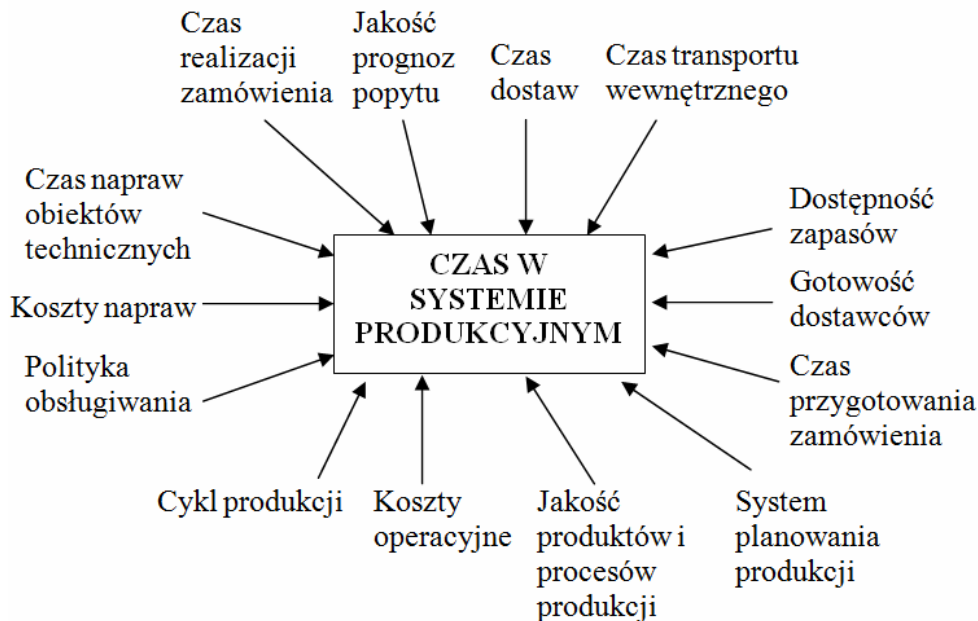
- stochastyczny popyt,
- określony poziom zapasów zgodny z wybraną polityką uzupełniania zapasów,
- ograniczone zdolności produkcyjne,
- ograniczone zdolności transportowe,
- losowy czas dostawy,
- wymagany poziom obsługi klienta,
- wielkość przepływów materiałowych i informacyjnych;
- określona struktura kosztów operacyjnych.

W związku z tym czas w systemach produkcyjnych tradycyjnie postrzegany jest w odniesieniu do [3]:

- czasu realizacji zamówienia klienta (wewnętrznego oraz zewnętrznego) – określającego czas od chwili złożenia zamówienia przez klienta, do chwili jego pełnej realizacji. W tym przypadku koncepcja czasu jest odniesiona do poziomu funkcjonowania przedsiębiorstwa produkcyjnego postrzeganego przez klienta;
- efektywności wykorzystania zasobów w procesach podstawowych przedsiębiorstwa produkcyjnego. W tym przypadku koncepcja czasu jest bezpośrednio powiązana z minimalizacją czasów przestoju oraz optymalizacją wykorzystania mocy produkcyjnych;
- czasu trwania poszczególnych procesów podstawowych, obejmującego okres od chwili, kiedy wszystkie zasoby niezbędne do realizacji procesu są gotowe do wykorzystania, do

* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

chwili uzyskania efektu przeprowadzonego procesu. Koncepcja czasu bezpośrednio uzależniona jest od dokładności przeprowadzonej identyfikacji struktury procesu.



Rys. 1. Czas w systemie produkcyjnym

Czas stał się podstawowym elementem budowania przewagi konkurencyjnej na rynku, co spowodowało rozwój m.in.:

- nowoczesnych koncepcji zarządzania logistycznego, jak Quick Response, Just in Time, czy Lean Management;
- strategii Time-Based Competition;
- zasad reengineeringu, czy
- nowoczesnych technologii komunikacji.

Jednocześnie, podstawowe zmienne decyzyjne, które należy analizować w procesie zarządzania systemami produkcji to:

- Kiedy produkować?
- Jak dużo produkować?
- Ile i gdzie inwestować aby efektywnie skrócić cykl realizacji zamówienia?

Celem większości opracowanych modeli w tym obszarze jest przewidzenie, jakie są konsekwencje podejmowanych decyzji w badanym systemie [8].

Zainteresowanie problemem modelowania relacji czasowych szczególnie wzrosło na przestrzeni ostatnich 30 lat. Związane jest to z jednej strony ze wzrostem świadomości kadry zarządzającej odnośnie konieczności kontroli kosztów eksploatacji systemów produkcji wraz ze wzrostem stopnia automatyzacji procesów produkcyjnych, w celu poprawy jakości produktu oraz efektywności ich funkcjonowania. Z drugiej strony, większa dostępność metod i narzędzi wspierających procesy modelowania zapewnia możliwość badania i rozwiązywania nowych problemów z analizowanego obszaru naukowego.

2. MODELE RELACJI CZASOWYCH W SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Przegląd podstawowych problemów badawczych związanych z modelowaniem relacji czasowych systemów produkcyjnych przedstawiono na rysunku 2.

Wpływ strategii obsługi urządzeń produkcyjnych na jakość produktu czy poziom obsługi klienta był wielokrotnie omawiany w literaturze (np. [8]). Obecnie w eksploatacji systemów technicznych można zdefiniować trzy podstawowe strategie obsługi obiektów technicznych, również wykorzystywane w obszarze funkcjonowania systemów produkcyjnych [16, 20]:

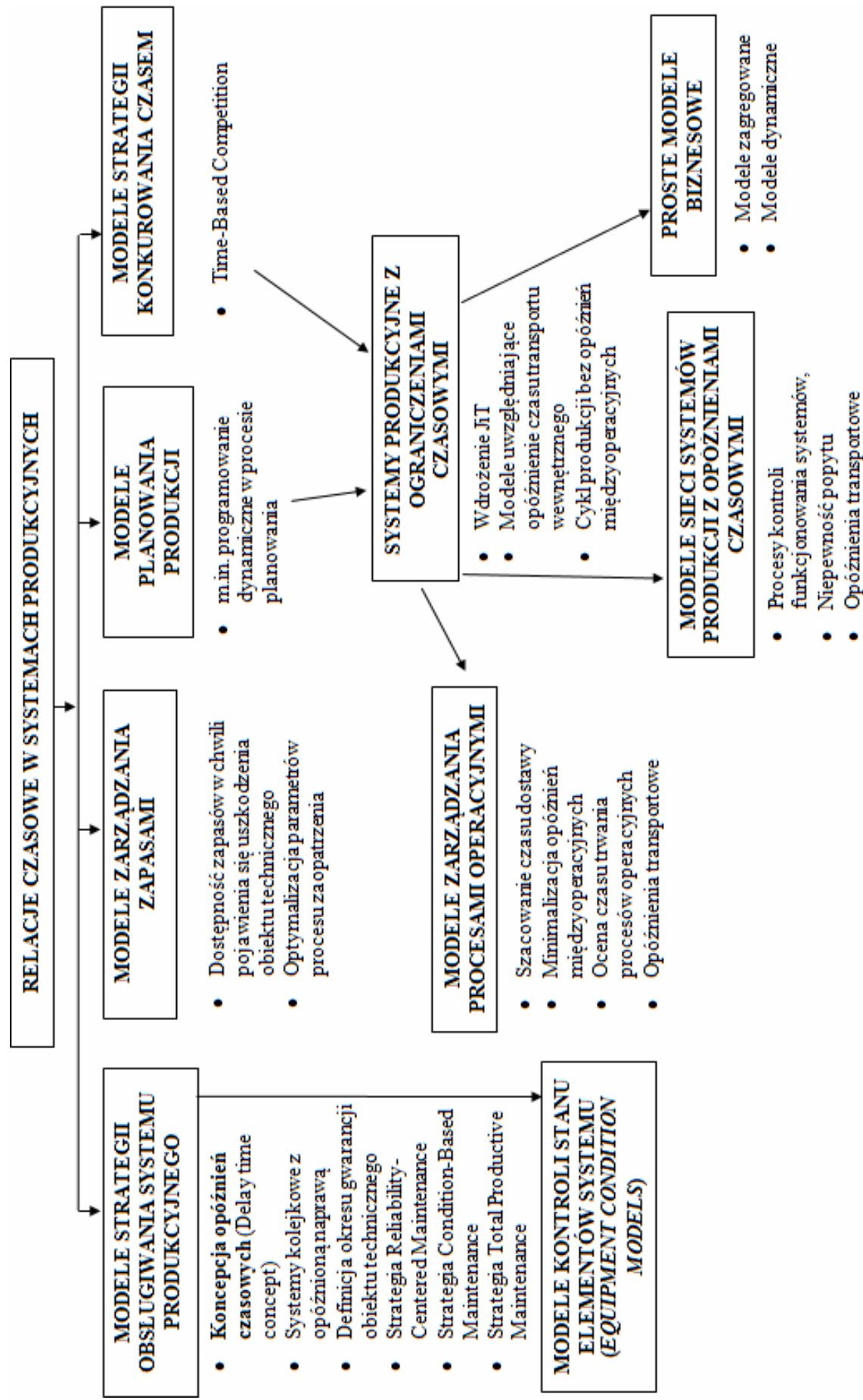
- obsługiwane korekcyjne *CM* (ang. *Corrective Maintenance*),
- obsługiwane profilaktyczne *PM* (ang. *Preventive Maintenance*),
- obsługiwane według stanu *CBM* (ang. *Condition-Based Maintenance*).

Strategia obsługi korekcyjnej jest najprostszą strategią remontową, polegającą na realizacji zadań nieplanowanych, wykonywanych w celu przywrócenia zdolności systemowi po jego uszkodzeniu poprzez przeprowadzenie operacji naprawy lub wymiany elementów niezdatnych. Wykorzystując tego typu politykę obsługi obiektu nie można mówić o jakiegokolwiek optymalizacji jej parametrów (np. [17]).

W przypadku, gdy straty związane z wystąpieniem uszkodzenia obiektu są wielokrotnie wyższe niż wartość obiektu uszkodzonego, przeprowadzanie wymian tylko po zaistnieniu awarii jest przeważnie nieracjonalne. W tego typu sytuacjach wykorzystuje się strategie: wymian profilaktycznych lub obsługiwane według stanu, w celu zmniejszenia częstości awarii obiektów, a tym samym zmniejszenia kosztów ich eksploatacji. Obsługiwane profilaktyczne obejmuje planowe i okresowe naprawy/wymiany urządzeń [4]. Natomiast obsługa według stanu bieżącego polega na przewidywaniu i wczesnym zapobieganiu awariom poprzez wykorzystanie działań diagnostycznych, polegających na obserwacji parametrów definiujących stan techniczny obiektu [4, 16].

Czwartą strategią obsługi wykorzystywaną również w obszarze funkcjonowania systemów produkcyjnych jest koncepcja *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), która wykorzystuje narzędzia (np. FMECA) w celu określenia zależności pomiędzy elementami a poziomem funkcjonowania systemu technicznego i następnie określenia efektywnej strategii zarządzania obsługą (RCM Task Selection) [8].

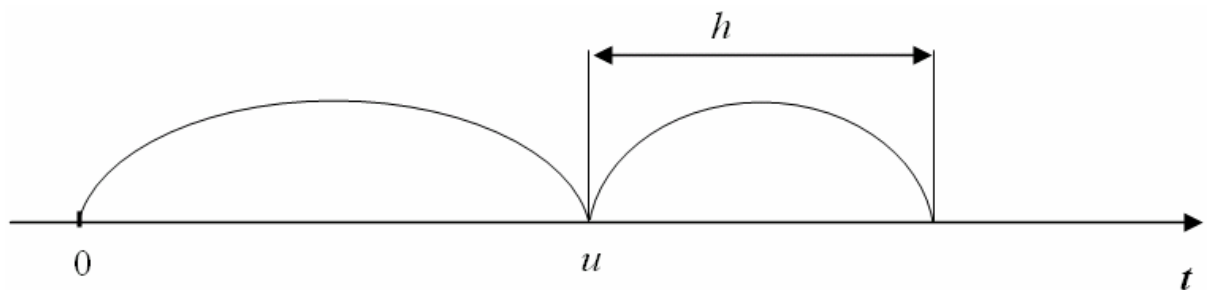
Jednakże strategie te nie pozwalają na pełne uwzględnienie zależności czasowych występujących pomiędzy elementami systemu i ich wpływu na podstawowe charakterystyki niezawodnościowe całego systemu.



Rys. 2. Modele zależności czasowych w systemach produkcyjnych
Opracowanie własne na podstawie [3, 6, 8, 21, 22, 24]

W latach 70. XX w. koncepcja opóźnień czasowych *Delay Operator* była wykorzystywana w analizach czasowych w procesie modelowania czy prognozowania [5]. W kolejnych latach pojawiały się prace poświęcone zagadnieniu zależności czasowych w innych obszarach badawczych, m.in. w modelowaniu: procesów logistycznych, procesów obsługi obiektów technicznych, czy procesów funkcjonowania systemów produkcyjnych z ograniczeniami czasowymi.

W latach 80. XX w. autorzy Christer i Waller [13] zaproponowali koncepcję opóźnień czasowych *Delay-time Concept* (DTC), wykorzystywaną do dnia dzisiejszego w teorii procesów odnowy, w celu optymalizacji czasu niezdatności systemu technicznego spowodowanego nie wykrytym w porę jego uszkodzeniem (optymalizacja okresu pomiędzy kolejnymi przeglądami). W koncepcji tej okres czasu od chwili u , w której pojawiają się pierwsze wykrywalne w trakcie przeglądu okresowego sygnały o pojawiającym się uszkodzeniu, do chwili uszkodzenia się systemu nazywany jest opóźnieniem czasowym i oznaczany przez h (rys. 3).



Rys. 3. Koncepcja relacji czasowych [13]

Do chwili obecnej opublikowano szereg artykułów zajmujących się wdrażaniem koncepcji DT w obszarze funkcjonowania systemów rzeczywistych, m.in. do rozwiązywania problemów obsługi maszyn produkcyjnych (np. [1, 10]). Znane literaturze modele bazują na klasycznych strategiach obsługi profilaktycznej (np. [9, 23]) oraz strategii ciągłej kontroli stanu systemu (*condition-based maintenance*) (np. [11, 26]). Inne zastosowania dotyczą m.in. obszaru budownictwa (np. [14]), czy analizy systemów transportowych (np. [15, 19]).

Podstawowe pytania, na które szukano odpowiedzi dotyczyły [8]:

- Jak często pojazdy powinny być naprawiane, przeglądane okresowo?
- Czy struktura systemu technicznego jest bezpieczna?
- Jak często dokonywać przeglądów okresowych urządzeń linii produkcyjnej?
- Jaka jest korzyść z realizacji procesów obsługi w odniesieniu do czasu niezdatności systemu oraz kosztów operacyjnych?

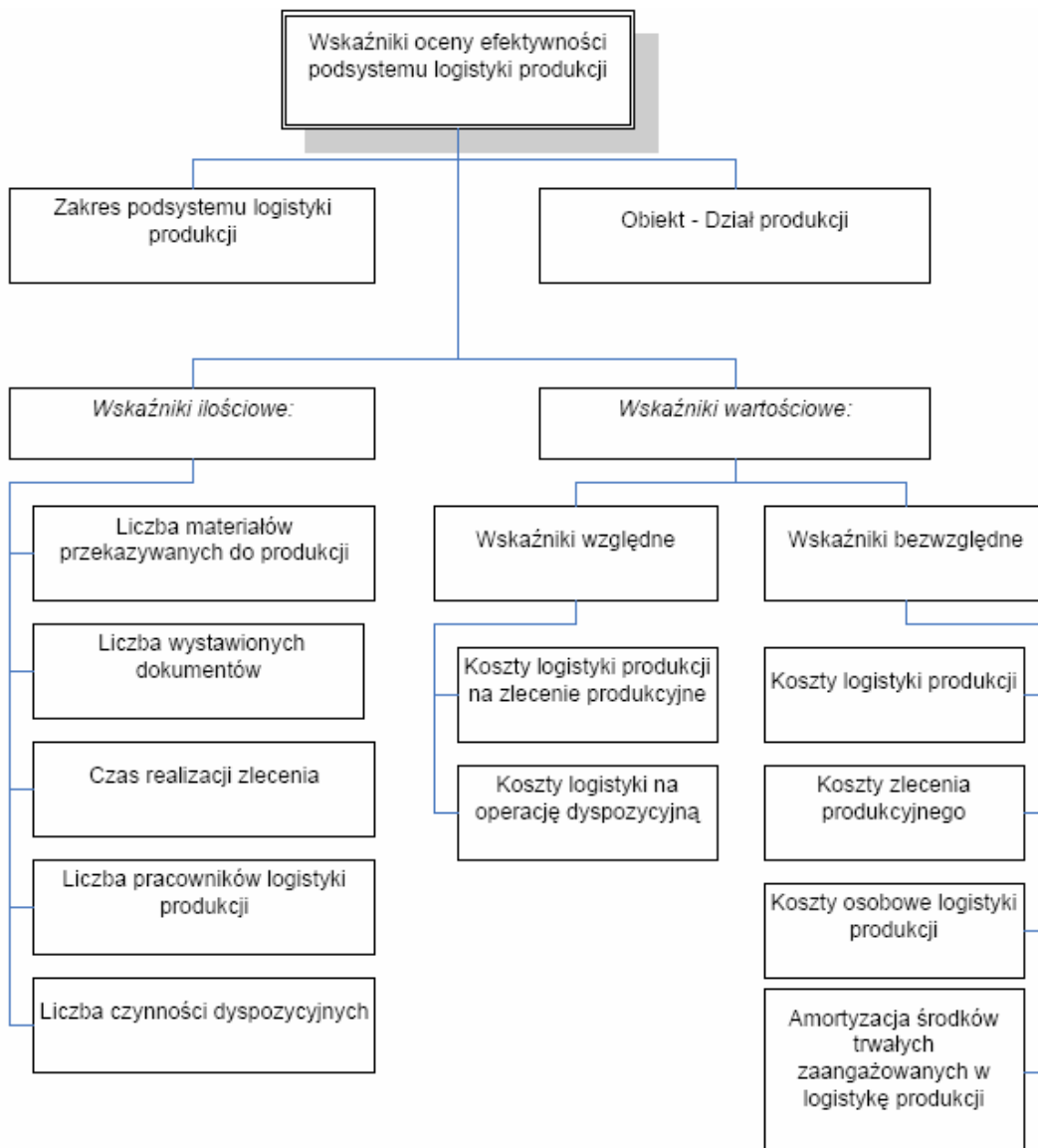
Przegląd istniejących modeli DT można znaleźć m.in. w [2, 8, 12, 22].

Jednocześnie, można zaobserwować wyraźną niechęć przedsiębiorstw do stosowania modeli opracowanych w literaturze w obszarze funkcjonowania systemów produkcyjnych z zależnościami czasowymi. Związane jest to m.in. z koniecznością pozyskiwania wielu informacji, które do tej pory nie były gromadzone w systemach, a które są niezbędne do przeprowadzenia odpowiednich procesów optymalizacji funkcjonowania systemu operacyjnego. W rezultacie, w rzeczywistych systemach produkcyjnych zwykle ocena czasowa realizowanych procesów podstawowych i logistycznych polega na analizie [8, 22]:

- niezawodności dostaw w odniesieniu do terminowości realizacji zamówień klienta,

- jakości dostaw w odniesieniu do kompletności czy elastyczności dostaw,
- efektywności procesów produkcyjnych, czy
- jakości produktów finalnych.

Wskaźniki oceny logistyki produkcji, na podstawie których dokonuje się analiz procesów sterowania produkcją zostały podzielone na ilościowe i wartościowe (co przedstawia rysunek 4). Do ilościowych wskaźników oceny należą m.in. czas realizacji zlecenia czy liczba materiałów przekazywanych do produkcji. Wskaźniki wartościowe zostały podzielone na względne i bezwzględne. Pośród wskaźników względnych rozróżniamy koszty logistyki produkcji na zlecenie produkcyjne i na operację dyspozycyjną. Druga grupa wskaźników skupia się na kosztach logistyki produkcji, zlecenia produkcyjnego, a także na kosztach osobowych oraz amortyzacji środków trwałych.



Rys. 4. Wskaźniki oceny efektywności podsystemu logistyki produkcji [25]

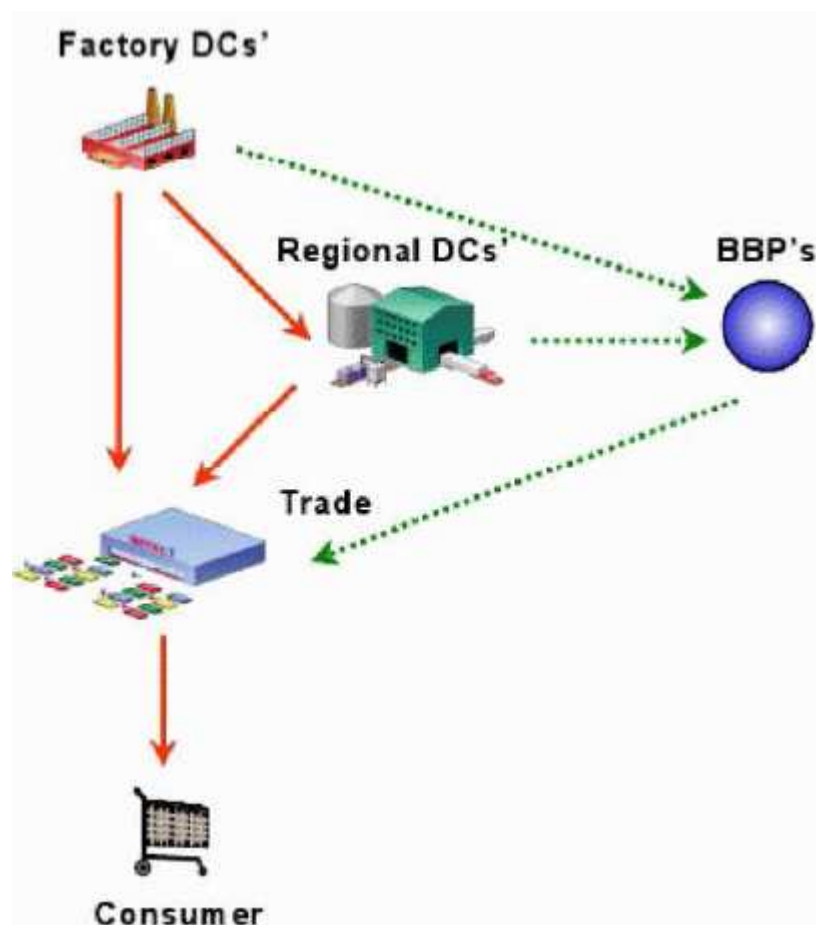
3. PRZYKŁAD OCENY FUNKCJONOWANIA SYSTEMU PRODUKCYJNEGO

Analizowane przedsiębiorstwo produkcyjne jest uczestnikiem międzynarodowego łańcucha logistycznego, którego celem jest zaopatrzenie rynku w sprzęt AGD [7].

Dystrybucja wewnątrz firmy odbywa się w ten sposób, że wyroby, które opuszczają linię produkcyjną, są przekazywane na linię montażu końcowego i do magazynu wyrobów gotowych. W drodze do magazynu poddawane są kontroli jakości na stacji kontroli statystycznej oraz pakowane. Dystrybucja wyrobów gotowych, które opuszczają fabrykę odbywa się w trzech kierunkach (rys. 5):

- regionalne centra dystrybucji,
- partnerzy biznesowi,
- centra handlowe.

Ostateczni klienci nabywają towar przede wszystkim w centrach handlowych.



Rys. 5. Kierunki dystrybucji produktów analizowanego przedsiębiorstwa [7]

Jednymi z przykładowych miar oceniających poziom funkcjonowania systemu produkcji badanej firmy są:

- wskaźnik udziału wadliwej produkcji, który w omawianej firmie oblicza się w następujący sposób:

$$U_{wp} = \frac{\text{wartość wyrobów wadliwych}}{\text{łączna wartość wyrobów}} \times 100\% \quad (1)$$

Na wartość wyrobów wadliwych składa się ilość wyprodukowanych braków oraz produktów, które posiadają dające się zlikwidować lub poprawić wady. Braki to takie wyroby, które przeznaczają się do analizy, badań lub utylizacji.

- skuteczność, którą oblicza się w firmie następująco:

$$S = \frac{\text{efekty osiągnięte}}{\text{efekty planowane}} \times 100\% \quad (2)$$

Wymienione miary są obliczane na podstawie danych gromadzonych z linii produkcyjnej. Po każdej zmianie lider ma obowiązek wpisać je na specjalne formularze. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki dla procesu produkcji wybranego modelu produktu badanego przedsiębiorstwa, uzyskane na początku 2009 roku.

Tabela 1. Miary logistyczne procesu produkcji analizowanego przedsiębiorstwa [7]

Cannon III						wskaźnik udziału wadliwej produkcji [%]	miernik oceny działalności produkcji - skuteczność [%]
data	plan	ilość sztuk	obsada	naprawa	braki		
Pierwszy tydzień							
09.02							
I	570	570	12	5	1	1,05	100,00
II		560	12	20	0	3,57	98,25
10.02							
I	570	545	12	4	1	0,92	95,61
II		557	12	32	0	5,75	97,72
11.02							
I	570	570	12	2	2	0,70	100,00
II		570	12	32	0	5,61	100,00
12.02							
I	570	560	12	2	0	0,36	98,25
II		532	12	24	0	4,51	93,33
13.02							
I	570	570	12	2	1	0,53	100,00
II		467	12	25	0	5,35	81,93
Drugi tydzień							
23.02							
I	570	530	12	4	0	0,75	92,98
II		566	12	48	2	8,83	99,30
24.02							
I	570	410	12	2	0	0,49	71,93
II		527	12	46	0	8,73	92,46
25.02							
I	570	550	12	3	1	0,73	96,49
II		565	12	25	0	4,42	99,12
26.02							
I	570	410	12	3	1	0,98	71,93
II		546	12	33	2	6,41	95,79
27.02							
I	570	510	12	6	1	1,37	89,47
II		562	12	17	4	3,74	98,60

Analiza przedstawionych danych powinna skłaniać do wniosku, iż proces produkcyjny jest realizowany w sposób sprawny z zachowaniem wysokiej jakości produktów. Jednakże, gdy

weźmie się pod uwagę nie tylko suche liczby, ale także pozna się cały proces, można zauważyć ogromną ilość zapasów w toku. Po rozmowie z pracownikami wiadomo także, że dany produkt, którego dotyczy powyższa analiza jest produkowany w fabryce już od dłuższego czasu i każdy pracownik jest wyszkolony w zakresie wykonywania swoich obowiązków. W sytuacji, gdy zaczyna się produkcja nowego modelu lub gdy na jakiegokolwiek stanowisko przychodzi nowy pracownik, poziom wadliwej produkcji gwałtownie wzrasta, natomiast poziom skuteczności maleje.

4. PODSUMOWANIE

Obecnie obserwuje się wzrost świadomości kadry zarządzającej w obszarze konieczności efektywnego zarządzania czasem w systemach produkcyjnych. Problemem jednak jest brak właściwego zidentyfikowania podstawowych zależności czasowych występujących w takich systemach oraz brak możliwości i niekiedy chęci wykorzystania modeli opracowanych w literaturze z obszaru optymalizacji procesów operacyjnych. Relacje czasowe w systemach produkcyjnych są najczęściej rozpatrywane w kontekście analizy możliwości pojawiania się np. uszkodzenia czy opóźnienia dostawy, opóźnienia realizacji harmonogramu produkcji, czy pojawienia się wyrobu wadliwego, gdyż ich wpływ na poziom realizacji zamówienia klienta jest niezaprzeczalny i znany.

LITERATURA

- [1] Akbarov A., Christer A. H., Wang W.: Problem identification in maintenance modelling: a case study, *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 4, 1031-1046, 2008.
- [2] Baker R. D., Christer A. H., Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance, *European Journal of Operational Research*, 73, 1994.
- [3] Bartezzaghi E., Spina G., Verganti R., Lead-time models of business processes, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 14, No. 5, 1994.
- [4] Blischke W. R., Prabhakar Murthy D. N., *Reliability: Modelling, Prediction and Optimization*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
- [5] Box G. E. P., Jenkins G. M., *Time Series Analysis Forecasting and Control*, Holden-Day, California, 1976.
- [6] Chan F. T. S., Wang Z., Zhang J., A two-level hedging point policy for controlling a manufacturing system with time-delay, demand uncertainty and extra capacity, *European Journal of Operational Research*, 176, 2007.
- [7] Chodzyńska P., *Analiza funkcjonowania systemu produkcji wybranego przedsiębiorstwa*, Praca dyplomowa PWr. (niepublikowana), Wrocław 2009.
- [8] Christer A. H., Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance, *Journal of the Operational Research Society*, 50, 1120-1137, 1999.
- [9] Christer A. H., Wang W., Choi K., The delay-time modelling of preventive maintenance of plant given limited PM data and selective repair at PM, *IMA Journal of Mathematics Applied in Medicine and Biology*, 15, 1998.
- [10] Christer A. H., Wang W., Baker R. D., Modelling maintenance practice of production plant using the delay-time concept, *IMA Journal of Mathematics applied in Business and Industry*, 6, 67-83, 1995.
- [11] Christer A. H., Wang W., A model of condition monitoring of a production plant, *International Journal of Prod. Res.*, Vol. 30, No. 9, 2199-2211, 1992.

- [12] Christer A. H., Redmond D. F., A recent mathematical development in maintenance theory, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*, 2, 1990.
- [13] Christer A. H., Waller W. M., Delay-time models of industrial inspection maintenance problems, *Journal of the Operational Research Society*, 33, 401-406, 1984.
- [14] Christer A. H., Modelling inspection policies for building maintenance, *Journal of the Operational Research Society*, 33, 723-732, 1982.
- [15] Desa M. I., Christer A. H., Modelling in the absence of data: a case study of fleet maintenance in a developing country, *Journal of the Operational Research Society*, 52, 247-260, 2001.
- [16] Feliks J., Majewska K., Wspomaganie logistyki eksploatacji przez obsługiwane aktywne, *Materiały Konferencji Total Logistics Management TLM'06*, Zakopane, 2006
- [17] Goel G. D., Murari K., Two-unit cold-standby redundant system subject to random checking, corrective maintenance and system replacement with repairable and non-repairable types of failures, *Microelectronic Reliability*, Vol. 30, No. 4, 1990
- [18] Hennes J-C., Tarbouriech S., Stability conditions of constrained delay systems via positive invariance, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 8, 265-278, 1998.
- [19] Mabini M. C., Christer A. H., Controlling multi-indenture repairable inventories of multiple aircraft parts, *Journal of the Operational Research Society*, 53, 1297-1307, 2002.
- [20] Michelsen F., A., Predictive maintenance control, *Materiały Konferencji ESREL 2007*, Stavanger, 2007.
- [21] Mourani I., Hennequin S., Xie X., Simulation-based optimization of a single-stage failure-prone manufacturing system with transportation delay, *International Journal of Production Economics*, 112, 2008.
- [22] Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S., *Maintenance processes modelling*. (w przygotowaniu).
- [23] Pillay A., Wang J., Wall A. D., A maintenance study of fishing vessel equipment using delay-time analysis, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 7, No. 2, 118-127, 2001.
- [24] Sloan T., Simultaneous determination of production and maintenance schedules using in-line equipment condition and yield information, *Naval Research Logistics*, Vol. 55, 2008.
- [25] Twaróg J., *Mierniki i wskaźniki logistyczne*, Biblioteka Logistyka, Poznań 2003.
- [26] Wang W., Christer A. H., Towards a general condition based maintenance model for a stochastic dynamic system, *Journal of the Operational Research Society*, 51, 145-155, 2000.

TIME RELATIONS IN PRODUCTION SYSTEMS PERFORMANCE MODELLING

Abstract

In the paper, there are discussed main time relations which may occur during production systems performance. Moreover, main interdependencies between continuous and effective operational process performance and logistic support are defined. As a result, the main time delays performance are described. Later, the example of chosen supply chain is shown providing the possibilities of time relations assessment in the area of logistic support.

Keywords: delay time concept, logistic system, maintenance policy