

## MODEL OF DESIGNATING THE CRITICAL DAMAGES Part 1: Description and analysis of the production system

## MODEL WYZNACZANIA USZKODZEŃ KRYTYCZNYCH Część 1: Opis i analiza systemu produkcyjnego

Bożena Zwolińska<sup>1)</sup>, Łukasz Kubica<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> AGH University of Science and Technology

<sup>1)</sup> AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

<sup>2)</sup> Jagiellonian University in Kraków

<sup>2)</sup> Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Wydział Matematyki i Informatyki

**Abstract:** *Managing company in the lean way presumes no breakdowns nor reserves in the whole delivery chain. However, achieving such low indicators is impossible. That is why in some production plants it is extremely important to focus on preventive actions which can limit damages. This article depicts the method of designating the critical damages in accordance with lean maintenance method. The article consists of two parts which make for an integral body. Part one depicts the characteristic of a realistic object, it also contains productions capabilities analysis of certain areas within the production structure. Part two depicts the probabilistic model of shaping maximal time loss basing on emptying and filling interoperational buffers.*

**Keywords:** *critical damages, production system*

**Streszczenie:** *Szczupłe zarządzanie przedsiębiorstwem zakłada zero awarii urządzeń i zero zapasów w całym łańcuchu dostaw. Osiągnięcie zerowych wskaźników jest niemożliwe, dlatego w zakładach produkcyjnych duża uwaga skupiona jest na prewencyjnych działaniach ograniczających wystąpienie uszkodzeń. W artykule przedstawiona została metoda wyznaczania uszkodzeń krytycznych, zgodnie z metodyką lean maintenance. Rozważaniom został poddany przykładowy (rzeczywisty) układ produkcyjny, w którym w chwili  $\Delta t$  wystąpiło uszkodzenia na kilku różnych obiektach. Artykuł składa się z dwóch integralnych części. W pierwszej części została przedstawiona charakterystyka obiektu rzeczywistego oraz zawarte są analizy zdolności produkcyjnych poszczególnych obszarów struktury wytwórczej. Druga część przedstawia probabilistyczny model kształtowania maksymalnych strat czasu bazujących na opróżnianiu i wypełnianiu buforów międzyoperacyjnych*

**Słowa kluczowe:** *uszkodzenia krytyczne, system produkcyjny*

## **MODEL OF DESIGNATING THE CRITICAL DAMAGES**

### **Part 1: Description and analysis of the production system**

#### **1. Introduction**

Lean Manufacturing regards to minimizing the 3M losses („muri”, „mura” and „muda”) and maximizing effectiveness of tasks and processes, which add the so-called VAT – Value Added Time [1, 2]. Lean Maintenance encompasses the issues regarding maintaining movement. This includes: minimizing waiting time due to malfunctioning machines being inactive. Waiting time is notoriously being wasted each . It is always noticeable, be it an operator waiting for the machine to complete its process or processing the information and waiting for it to be received. Oftentimes a company does not specify whether the term „short stoppage” means 2 or 3 minutes. Often regular stoppages are accepted by operators as a norm, while they may cost the company thousands if not dozens of thousands of zloty depending on the product being manufactured, the level of its completion or the production takt time relative to the customer’s takt time.

To identify the essence and degree of losses caused by lack of time for the purposes of this article, a goal was set to establish a model of determining the MPN – Machine Priority Number [3] for a given production system.

The subject of this research was a realistic productions facility, specializing in manufacturing refrigerating devices designed to store blood preparations, plasma and cryoprecipitate. Such devices are subject to extremely strict quality requirements, in accordance to ISO 13485 (Quality Assurance Systems for Medical Equipment) and badge CE0434 (for devices in compliance with 39/42/EEC directive).

Due to a high EPEX (Every Product Every Interval)rate and customization options, manufacturing refrigerating devices is characterized by dynamically changing system properties. By applying the established model assuming the dependencies of changing variables we are able to determine the maximum wasted time for a particular machine without impacting the entire productions system. The discussed model assumes scenarios assuming the production capabilities of singular machines and in groups, performing the same tasks, the positioning of a machine in the flow stream as well as the completion of production being influenced by the CEF (Customer Efect Factor) indicator. A major attribute of the model is that it accommodates for the dependencies of random variables in the structure of executing consecutive processes realizing singular tasks in the so-called singular production.

The article consists of two parts which make for an integral body. Part one depicts the characteristic of a realistic object, it also contains productions capabilities analysis of certain areas within the production structure. Analysis of bottleneck positions within the discussed value stream may also be found here.

Part two depicts the probabilistic model of shaping maximal time loss basing on emptying and filling interoperational buffers. Part two contains stream continuity analysis in relation to the CEF (Customer Effect Factor) indicator.

## 2. Characteristics of the analyzed production system

The subject of analysis is a convergent production system, i.e. one which creates a final product as a result of processing  $n$  initial elements. Furthermore, the analyzed model is comprised of several hierarchical [4, 5], constituent sub processes. Figure 1 depicts the outline of the analyzed system in the process perspective.

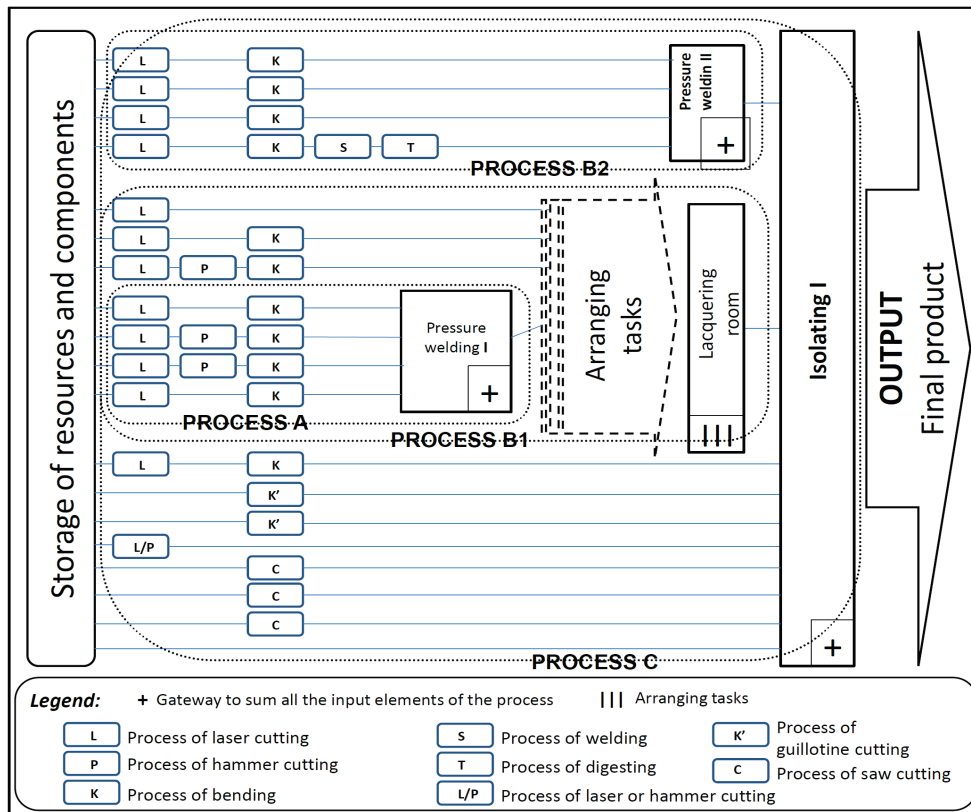


Fig. 1 The outline of the analyzed system in the process perspective

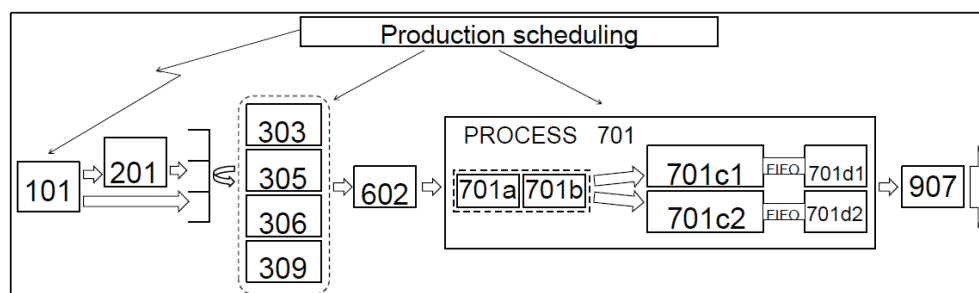
In the discussed example the final product is a main body, in further stages components are being mounted in a sequential-to-parallel system. Solely the sequential-to-parallel production system has been taken into account which takes place before assembly and regards mainly to the elements composing the main body of the refrigerating devices.

Observation and analysis of the realistic facility have proven that the key stoppages for the entire production line are generated to the „Isolation I” process. Figure 1 presenting the production system in the process perspective suggests that „PROCESS B1” and „PROCESS B2” must be performed in order to complete „PROCESS C”. Both „PROCESS B1” and „PROCESS B2” may be processed simultaneously – assuming sufficient resources are available: both machinery and staff. Further adding to the complexity of the system is the fact that „PROCESS A” is an element of „PROCESS B1”, therefore in order to complete „PROCESS B1”, „PROCESS A” must first be finished.

Optimizing the depicted system in the operational area includes:

- minimizing wasted material in the cutting phase i.e.: laser and hammer cutting – the reason why the cutting process takes place simultaneously for every element is that all half-products are cut from a single sheet;
- minimizing the time required for refitting in the coating stage – it is necessary for the product to match the customer’s colour requirements, which is why during organizing and scheduling the production the tasks are grouped by colour;
- maximizing the efficiency during the final assembly stage.

The process execution time in a mixed structure has a direct impact on the efficiency of the entire production line. In order to maximize efficiency in the available time it is necessary to make changes counteracting stoppages caused by malfunctions and errors the production stream displaying the longest execution time. By applying the critical path method (CPM) [6], a deterministic path displaying the longest execution times for each subsequent task has been established. Figure 2 shows a production line executing productions tasks for the assigned path. A Machine Priority Number has been introduced for the discussed production line, which shapes the critical damage indicator, which may occur with a certain degree of probability within  $\Delta t$  time.



*Fig. 2 Value stream flow schematic.*

Figure 2 shows the value stream flow schematic in accordance to the VSM (*Value Stream Mapping*) method. „Push” flows are dominant in the discussed stream. The Supermarket placed after the cutting stage (laser and hammer) is not „guided” by Kanban cards – only serving as a mid-operational buffer.

Scheduling tasks to edging processes is based on the gaffer's intuitive decisions [7]. The main criteria deciding the order of performed tasks are the machine's attributes and the preferences of operators manning said machine. The lack of a systematic and hierarchical task execution structure in the cutting and edging process increases disorder and „muri” and „muda” losses [8]. Furthermore the high number of various half-products which technologically need to undergo the edging process, and a relatively long time required to prepare a task for execution may cause the machinery to be overloaded („muri” losses). Heat-pressing takes place once edging is complete, this process requires delivery of all necessary components within  $\tau_z$  time – which marks the initiation of the heat-pressing stage. Heat-pressing is followed by a technologically forced stream as per the FIFO – First In First Out queue, based on Flow Production.

### 3. Establishing production capabilities

Production capability is defined as the maximum number of products which may be produced within a given time. In the example production capability is determined in relation to the nominal takt time ( $C/T_{nom}$ ) established separately for each process. The nominal value of the takt time has been introduced due to a large variety of the produced assortment. The Global EPEX index for all half-products made within the facility equals 1,78 articles per year with an average production of around 45 devices. Figure 3 shows the level of utilizing production capability in relation to the current demand – red line.

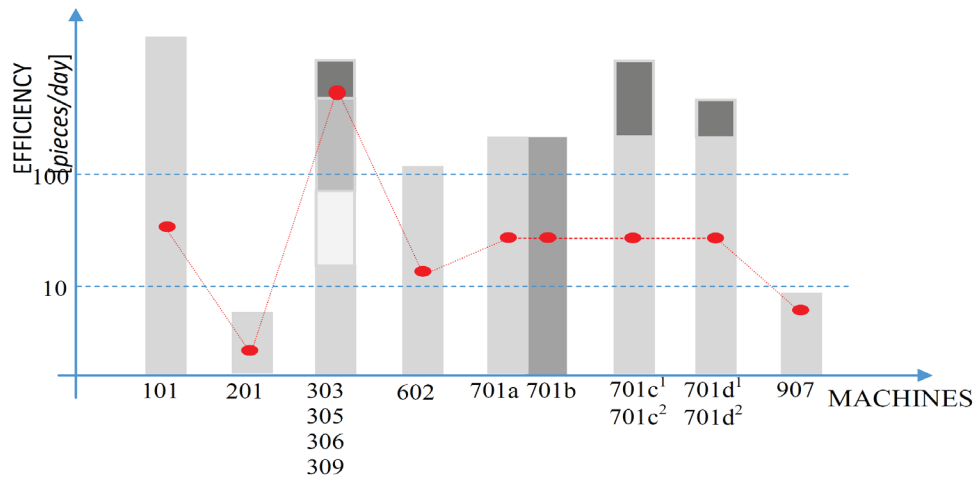


Fig. 3 The level of utilizing production capability and order level.

The picture shows only information concerning specified machines, only the ones taking part in manufacturing the strategic final product. For the purposes of this article the analyzed stream was one generating the highest annual income. Machines 602 and group 701 belong to the group of the so-called shared devices, being used in other (not examined here) final products.

Table 1. Utilizing manufacturing capability

Lp.	Process of laser cutting	Process of hammer cutting	Process of bending	Process of welding	Washing and drying	Process of lacquer powder and spray	Sintering Drying	Isolating	
	101	201	303, 305, 306, 309	602	701 a 701 b	701 c <sup>1</sup> 701 c <sup>2</sup>	701 d <sup>1</sup> 701 d <sup>2</sup>	907	
1	43%	35%	303	87%	28%	62%	52%	52%	91%
2	–	–	305	96%	–	–	39%	57%	–
3	–	–	306	79%	–	–	–	–	–
4	–	–	309	86%	–	–	–	–	–
5	43%	35%	$\bar{\Sigma}$	87%	28%	62%	max 52%	min 52%	91%

A crucial part in assessing the influence on the production system is the level of reserves, these comprise of [9]:

- efficiency reserves,
- machine stock reserves,
- human resources.

The examined example only takes into account the machine park reserves. Table 2 shows alternative machines which may be used in case of a malfunction. E.g.: For product „Korpus 450” machines 305 and 309 are reserves for 301, 306 and 307. Similar for product „Korpus 750”. Machines 602, 701 and 907 have no such reserves, but do possess efficiency reserves – picture 2 and table 1.

Table 2. Disposing replacement machines.

Product	Process of laser cutting Process of hammer cutting		Process of bending						Process of welding	Process of lacquer	Isolating
	101	201	301	303	305	306	307	309			
Korpus 450	X		X		(X <sup>301</sup> )	X	X	(X <sup>306</sup> ) (X <sup>307</sup> )	X	X	X
Korpus 550	X	X		X	X	X		X	X	X	X
Korpus 750	X				X		X	(X <sup>307</sup> )	X	X	X

Basing on the gathered data and the performed analysis, a level of importance has been assigned to machines in terms of their influence on the production system. Table 3 contains the evaluation of importance for devices utilized in production stream for device „Korpus 550”.

Table 3. The influence of a machine`s malfunction on the production system indicator

Lp.	101	201	303	305	306	309	602	701 a	701 b	701 c <sup>1</sup>	701 c <sup>2</sup>	701 d <sup>1</sup>	701 d <sup>2</sup>	907
Reserve	T	N	N	N	N	N	T	N	T	T	T	T	T	N
Efficiency [%]	43	35	87	96	79	86	28	62	52	39	52	57	91	
Importance	0,1	0,5	0,6	1	0,6	0,6	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9

Importance 0,1 is assigned to the devices which compensate their stoppages in operation with efficiency reserves. Importance 0,5 and 0,6 is assigned to machines of which stoppages have a relatively scant impact on interference in the production system. Importance 0,9 and 1 are assigned to critical machines, even short stoppages in their work can greatly influence the stable work of the production stream.

#### 4. Shaping the position within the value stream

The positioning of a machine within the value stream determines the maximum time of fixing a malfunction on the particular machine. The importance of the machine`s malfunction value in relation to the value stream is influenced by the level of work in progress (WIP), the supply levels in interoperation buffers and the dependencies of relations with the choke point. The priority of a machine is established bearing in mind the dependencies between the final recipient and the choke point.

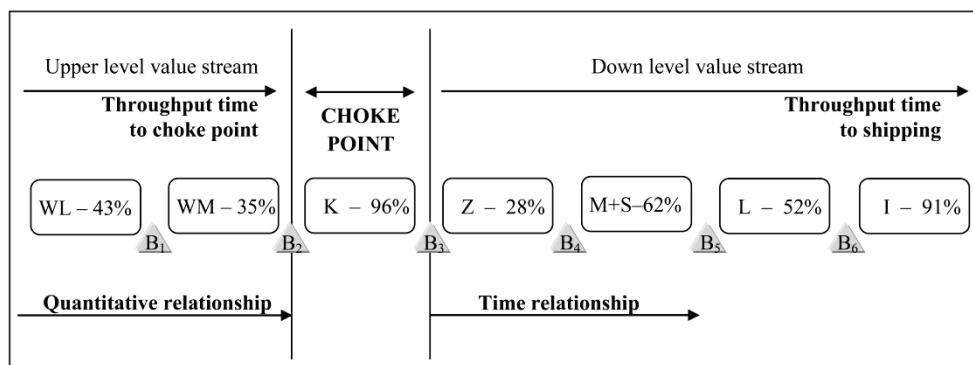


Fig. 4 The position of machines within the value stream.

This is why machines „closer” to the recipient and the ones being the choke point are granted higher priority. Figure 4 shows the position of the „choke point” and the remaining machines within the analyzed value stream. Each interference in the work time of a machine utilizing its full potential has a negative impact on the entire manufacturing system’s effectiveness. In the examined value stream over 90% of utilization takes place during the edging and isolating stages. However, only the machine group – bending brakes no. 303,305, 306 and 309 have been considered to be the choke point. This stems from the fact that during the isolating process the workstation is being refitted to suit the frame type – 450, 550, 750 and others, and utilizing the production capabilities is determined by the time adding value through blocking time. The blocking time B/T is influenced by takt time of the isolating process – C/T and seasoning time of the product, interpreted as the time necessary to achieve the required parameters. Analysis of the isolation process as a rather separate system have proven that each 1,5 hours gives us an isolated frame, which is however only ready for further processing after at least 11 hours of seasoning. The blocking time is a minimum of 12,5 hours with a takt time of 1,5 on average. This is why according to the time criteria the production process utilization for isolation equals 91% while from the volume criteria standpoint this value would slightly exceed twenty percent. Simultaneously increasing the productivity within the isolation process it would be necessary to increase storage space between isolation and the pain shop sufficiently enough to allow seasoning of the frames. In the current example this requirement does not exist, therefore the utilization level of 91% is sufficient.

In the examined example the production sample has a tolerance of several items – around 5-7. Analyses of production schedules within the period of 12 months have shown that the largest batch produced for certain final products equaled 17 items. A wide range of variants for final products extremely limited production series result in a dynamically changing structure of the manufacturing process. In such a constantly changing environment it is crucial to conduct detailed analysis of the flow of singular machines (processes) in relation to neighboring (machines and/or processes) [10] and analysis of the flow analysis through the entire system taking into account dependencies between the end of the manufacturing process and the choke point. Models 1-4 depict a general function of density probability of stream flow in relation to the choke point and the end of the manufacturing process.

Determination  $f_{101}^E(t)$  function of passage time density into the choke point from machine 101 as per formula (1):



$$f_{101}^E(t) = a_{101}^E \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + b_{B_1}^E \cdot \left( \lambda_{B_1}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_1}^{T/T} \cdot t} \right) + \quad (1)$$

$$+ a_{201}^{1E} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) + b_{B_2}^{1E} \cdot \left( \lambda_{B_2}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_2}^{T/T} \cdot t} \right)$$

where:  $a_{101}^E, a_{201}^{1E}$  - the importance of density of cycle time probability  $C/T^{WL}$  and  $C/T^{WM}$  respectively for machines 101 and 201;  $b_{B_1}^E, b_{B_2}^E$  - density importance of time function probability ensures uninterrupted production, established from the number of half products placed accordingly in buffers  $B_1$  and  $B_2$  relative to the client's takt time ( $T/T$ ). Furthermore:  $a_{101}^E + a_{201}^{1E} + b_{B_1}^E + b_{B_2}^{1E} = 1$  - therefore  $f_{101}^E(t)$  is a mixed density of the stream passing from 101 to the choke point.

Determination  $f_{101}^S(t)$  - time density function of production relative to the choke point for machine 101 as per formula:

$$f_{101}^S(t) = a_{101}^S \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + a_{201}^{1S} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) \quad (2)$$

$a_{101}^S, a_{201}^{1S}$  - importance of time probability density cycle respectively for machines 101 and 201. Furthermore:  $a_{101}^S + a_{201}^{1S} = 1$ ; therefore  $f_{101}^S(t)$  is a mixed density.

Determination  $f_{101}^{EK}(t)$  - density function of passage time to sending from 101:

$$f_{101}^{EK}(t) = a_{101}^{1EK} \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + b_{B_1}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_1}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_1}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{201}^{1EK} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) +$$

$$+ b_{B_2}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_2}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_2}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{305}^{1EK} \cdot \left( \lambda^K \cdot e^{-\lambda^K \cdot t} \right) + b_{B_3}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_3}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_3}^{T/T} \cdot t} \right) +$$

$$+ a_{602}^{1EK} \cdot \left( \lambda^Z \cdot e^{-\lambda^Z \cdot t} \right) + b_{B_4}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_4}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_4}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{701a,b}^{1EK} \cdot \left( \lambda^{M+S} \cdot e^{-\lambda^{M+S} \cdot t} \right) + \quad (3)$$

$$+ b_{B_5}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_5}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_5}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{701c,d}^{1EK} \cdot \left( \lambda^L \cdot e^{-\lambda^L \cdot t} \right) + b_{B_6}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_6}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_6}^{T/T} \cdot t} \right) +$$

$$+ a_{907}^{1EK} \cdot \left( \lambda^I \cdot e^{-\lambda^I \cdot t} \right)$$

where:  $a_i^{1EK}$  - density importance of cycle time probability for each machine in the examined passage stream from the first manufacturing process to the isolating process;  $b_{B_j}^{1EK}$  - density importance of time function probability ensuring uninterrupted production, estimated from the number of half products placed in subsequent buffers (for the entire flow stream being examined) relative to the client's takt time. Furthermore the sum of importance  $a_i^{1EK}$  and  $b_{B_j}^{1EK}$  is equal to one.

Determination  $f_{101}^{ES}(t)$  – production density time function to sending for machine 101 as per formula:

$$f_{101}^{SK}(t) = a_{101}^{1SK} \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + a_{201}^{1SK} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) + a_{305}^{1SK} \cdot \left( \lambda^K \cdot e^{-\lambda^K \cdot t} \right) + a_{602}^{1SK} \cdot \left( \lambda^Z \cdot e^{-\lambda^Z \cdot t} \right) + a_{701}^{1SK} \cdot \left( \lambda^L \cdot e^{-\lambda^L \cdot t} \right) + a_{907}^{1SK} \cdot \left( \lambda^I \cdot e^{-\lambda^I \cdot t} \right) \quad (4)$$

where:  $a_i^{1SK}$  - importance of probability density for cycle times for each machine within the passage stream from the first manufacturing process to the isolating

process. Furthermore:  $\sum_{i=1}^6 a_i^{1SK} = 1$

*Table 4. Time functions of the analyzed production system*

Lp.	Machines	Throughput time to choke point	Production time to choke point	Throughput time to shipping	Production time to shipping	Maximum time between processes
1	101	$f_{101}^E(t)$	$f_{101}^S(t)$	$f_{101}^{EK}(t)$	$f_{101}^{SK}(t)$	$t_{\max}^{WL}$
2	201	$f_{201}^E(t)$	$f_{201}^S(t)$	$f_{201}^{EK}(t)$	$f_{201}^{SK}(t)$	$t_{\max}^{WM}$
3	305	0	0	$f_{305}^{EK}(t)$	$f_{305}^{SK}(t)$	$t_{\max}^{K305}$
4	602	0	0	$f_{602}^{EK}(t)$	$f_{602}^{SK}(t)$	$t_{\max}^Z$
5	701	0	0	$f_{701}^{EK}(t)$	$f_{701}^{SK}(t)$	$t_{\max}^L$
6	907	0	0	$f_{907}^{EK}(t)$	$f_{907}^{SK}(t)$	$t_{\max}^I$

Adequately for the remaining machines passage times and production times have been established in relation to the choke point and in relation to the shipment to client. Table 4 shows probability density functions of random variables for passage times accounting for the dependency of positioning the machine to the recipient and the choke point. Due to the fact that machine 305 is the choke point, passage time density functions do not exist for machines being the choke point and any other after it, i.e.: 602, 701 and 907.

Detailed model analysis of possible time waste relative to the neighboring machines (processes) have been included in the next part of this article.

## 5. Summary

This article examines a convergent production system, which as a result of several processing stages of  $n$  entry elements creates one final product. Analyzing the discussed production system is a difficult and time consuming task. The following decide on the complexity level:

- short production series; usually 2-3 items of one product – occasionally 5-7 items.,
- product customization; allowing the customer a large freedom in choosing individual parameters of the final product,
- lack of repeatability due to a large EPEX indicator; in the discussed example this was EPEX-1,78/year with an average efficiency of circa 45 cooling devices,
- information flow not being synchronized with the production schedule, which often resulted in task changes in the production hub.

The first part of the article depicts the characteristics of the discussed realistic model. Levels of production capabilities have been assigned to certain areas in addition to identifying the position of the „bottleneck” within the value stream. Analysis of the discussed objects and the parameters which define them are based mainly on random variables. The analyzed examples consider exponential process execution times. Therefore each process time (takt time –  $C/T$ ) is a random variable with an exponential distribution  $C/T_{ij} \sim Exp(\lambda_j)$ . Lead Time ( $L/T$ ) is a random variable describing the accumulated task execution time for the utilized technology. It is a sum of independent random variables with exponential distributions.

Part two depicts the probabilistic model of shaping maximal time loss basing on emptying and filling interoperational buffers. Part two contains stream continuity analysis in relation to the CEF (Customer Effect Factor) indicator.

## **6. References**

- [1] Nyhuis P., Windhal H.P., Fundamentals of Production Logistics. Theory, Tools and Applications. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
- [2] Zwolińska B.: Use of the method VSM to the identify muda, Research in Logistics & Production, Vol. 6, No. 6, pp.513-522.
- [3] Wiegand B. Langmaack R. Baumgarten T.: Lean Maintenance System Zero Maintenance Time – Full Added Value Workbook, Lean Institute, Portsmouth U.S.A., 2005.
- [4] Gniedenko B.W. Kowalenko I.N.: Wstęp do teorii obsługi masowej, PWN, Warszawa, 1966.
- [5] Kostrzewski M.: Logistics facilities designing method-a study of a procedure for logistics facilities designing and its software implementation, Archives of Transport, Vol. 24, Iss. 3, pp. 321-340, Warszawa, 2012.
- [6] Zwolińska B. Werbińska M.: Wykorzystanie metody CPM do wyznaczania czasu rozpoczęcia produkcji urządzeń chłodniczych, Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji pod red. R. Knosali, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2017.
- [7] Zwolińska B. Michłowicz E. Kubica Ł.: The mathematical model describing the influence of chosen parameters on the quality of final products manufactured from type 1.4307 steel, METAL 2016, 25<sup>th</sup> Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Brno 2016.
- [8] Palmer D. R.,: Maintenance Planning and Scheduling Handbook, Mc Graw–Hill Education, New York, 2012.
- [9] Grzybowska K. Gajdzik B.: Optymisation of equipment setup processes in enterprises, Journal Metalurgija, 51 (4), pp. 563–566, Croatian, 2012.
- [10] Lenart B. Grzybowska K. Cimer M.: Adaptive Inventory Control in Production Systems, Hybrid Artificial Intelligent Systems, Precedings. Part II, Emilio Corchado [et al.] 222–228 Springer, Berlin, 2012.

## MODEL WYZNACZANIA USZKODZEŃ KRYTYCZNYCH Część 1: Opis i analiza systemu produkcyjnego

### 1. Wstęp

Lean Manufacturing obejmuje zagadnienia minimalizacji start *3M* („*muri*”, „*mura*” oraz „*muda*”) a maksymalizacji efektywności zadań i procesów, które dodają wartość tzw. VAT – Value Added Time [1, 2]. Lean Maintenance obejmuje zagadnienia w obszarze utrzymania ruchu. Dotyczy: minimalizacji czasu oczekiwania wynikającego z występujących przestoju maszyn w wyniku występujących usterek bądź awarii. Czas oczekiwania jest jednym z permanentnie traconych każdego dnia. Zawsze jest on widoczny, czy to w przypadku oczekiwania przez operatora na maszynę, aż ta skończy swój proces, czy to w przypadku oczekiwania na przetworzenie informacji oraz dostarczenie jej do adresata. Często w firmach nie istnieje zdefiniowane pojęcie „drobny przestój” czy jest to maksymalnie 2 a może 3 minuty. Często cykliczne przestoje praktykowane przez operatorów jako norma, kosztują firmę kilka a może nawet kilkadziesiąt tysięcy złotych w zależności od wartości produkowanego asortymentu, jego stopnia przetworzenia czy czasu taktu produkcyjnego względem taktu klienta.

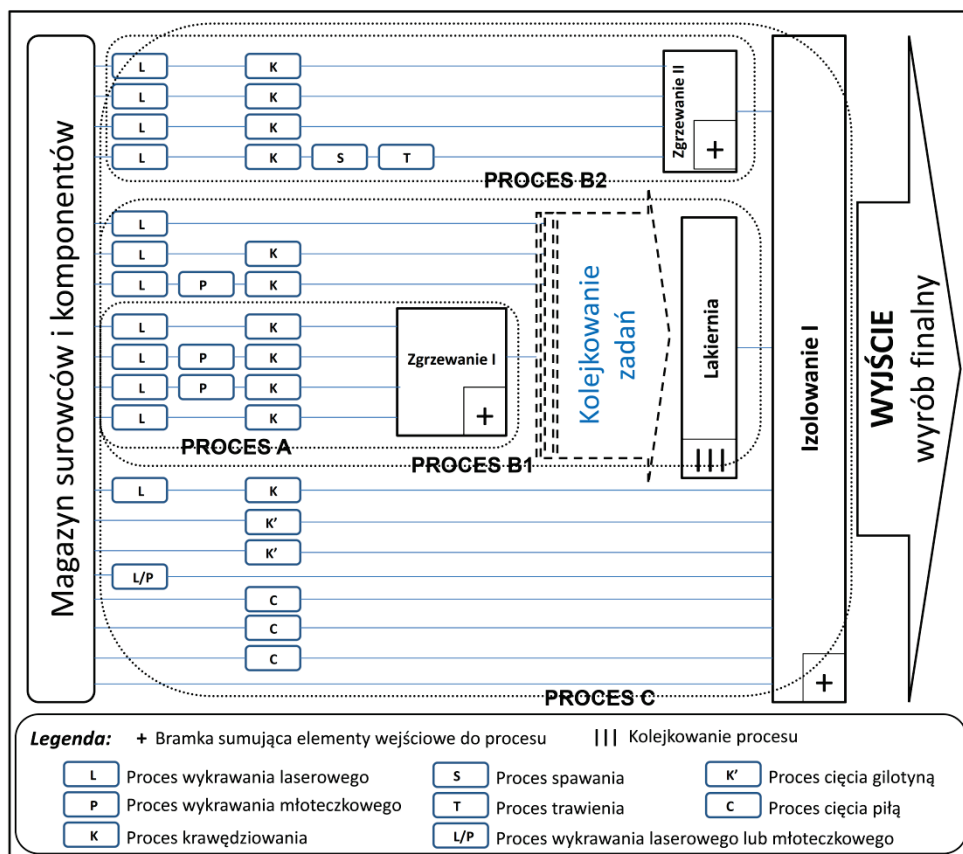
Chcąc dostrzec istotę i rangę strat wynikających z braku czasu, w ramach artykułu, celem było opracowanie modelu wyznaczania LPU – Liczby Priorytetowej Urządzenia [3] dla konwergentnego systemu produkcyjnego. Rozważaniom został poddany rzeczywisty obiekt wytwórczy, specjalizujący się w produkcji urządzeń chłodniczych przeznaczonych do przechowywania preparatów krwiopochodnych oraz osocza i krioprecypitatu. Urządzenia te posiadają bardzo restrykcyjne wymogi jakościowe, zgodne z ISO 13485 (Systemy Zarządzania Jakością dla Wyrobów Medycznych) oraz znakiem CE0434 (dla urządzeń spełniających warunki Dyrektywy 93/42/EEC). Produkcja urządzeń chłodniczych ze względu na customizację oraz duży wskaźnik EPEX (ang. Every Product Every Interval) charakteryzuje się bardzo dużą dynamiką zmian stanów systemu. Na podstawie opracowanego modelu uwzględniającego zależności zmiennych losowych, jesteśmy w stanie określić maksymalną stratę czasu na poszczególnym urządzeniu bez wpływu na system produkcyjny. Model uwzględnia rozważania w kategoriach wykorzystania zdolności produkcyjnych pojedynczych urządzeń oraz ich grup realizujących te same zadania, pozycji urządzenia w strumieniu przepływu, jak również wpływu na realizację zamówień klienta w oparciu o wskaźnik CEF (ang. Customer Effect Factor). Ważnym atrybutem modelu jest fakt, iż uwzględnia on zależności występujących zmiennych losowych w strukturze wykonywania następujących po sobie poszczególnych procesów, realizujących jedynie zlecenia w tzw.: produkcji jednostkowej.

Artykuł składa się z dwóch części stanowiących jedną integralną całość.

W pierwszej części została przedstawiona charakterystyka obiektu rzeczywistego oraz zawarte są analizy zdolności produkcyjnych poszczególnych obszarów struktury wytwórczej. W pierwszej części artykułu zawarte są również analizy pozycji wąskiego gardła w rozpatrywanym strumieniu wartości. Druga część przedstawia probabilistyczny model kształtowania maksymalnych strat czasu bazujących na opróżnianiu i wypełnianiu buforów międzyoperacyjnych. W części drugiej artykułu zawarte są analizy ciągłości przepływu względem wskaźnika CEF – Customer Effect Factor.

## 2. Charakterystyka analizowanego systemu produkcyjnego

Analizie został poddany konwergentny system wytwórczy, tj. taki, w którym w wyniku kilku stopni przetwarzania  $n$  elementów wejściowych, powstaje jeden wyrób finalny. Analizowany model jest ponadto układem złożonym z kilku hierarchicznych podprocesów składowych [4, 5]. Rysunek 1 przedstawia schemat analizowanego układu w ujęciu procesowym.



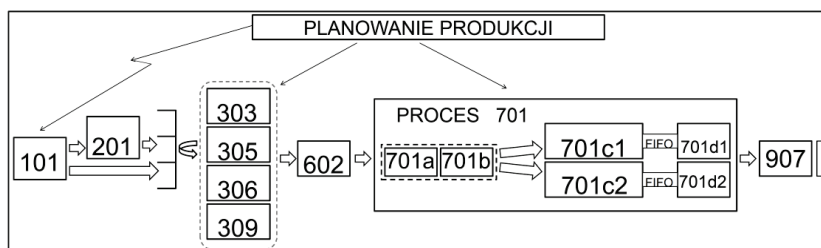
Rys. 1 Schemat analizowanego układu wytwórczego ujęciu procesowym

W rozważanym przypadku wyrobem finalnym jest korpus, do którego w kolejnych etapach następuje montaż podzespołów w układzie szeregowym. Rozważaniom została poddana jedynie struktura wytwórcza szeregowo – równoległa, która występuje przed etapem montażu i dotyczy głównie elementów składowych korpusów urządzeń chłodniczych. Obserwacje i analizy obiektu rzeczywistego wykazały, że kluczowe przestoje dla całej linii generowane są do procesu „Izolowania I”. Z rysunku 1 prezentującego układ wytwórczy w ujęciu procesowym wynika, że aby wykonać „PROCES C” muszą być zakończone: „PROCES B1” oraz „PROCES B2”. Zarówno „PROCES B1” i „PROCES B2” mogą być realizowane w tym samym czasie – przy spełnionym warunku wystarczających zasobów: maszynowych i ludzkich. Ponadto na złożoność układu wpływ ma fakt, że „PROCES A” jest składowym dla „PROCESU B1”. Tak więc aby wykonać „PROCES B1”, musi być zakończony „PROCES A”.

Optymalizacja przedstawionego układu w obszarze zadań operacyjnych obejmuje:

- minimalizację odpadu powstałego na etapie rozkroju tj.: wykrawania laserowego oraz młoteczkowego – dlatego proces wykrawania rozpoczyna się w tym samym czasie dla każdego z elementów, ponieważ z jednego arkusza wejściowego wykrawane są wszystkie potrzebne półwyroby;
- minimalizacji czasu koniecznego na przebrojenie w procesie lakierowania – kryterium klasyfikacyjnym jest kolor zgodny z zamówieniem klienta, dlatego w obszarze zarządzania i harmonogramowania produkcją następuje grupowanie zleceń według koloru;
- maksymalizacji wydajności etapu montażu końcowego.

Czas realizacji procesów w strukturze mieszanej ma bezpośredni wpływ na wydajność całej linii produkcyjnej. W celu uzyskania maksymalnej wydajności w dostępnym czasie, jednym z zadań jakie należy podjąć to działania w kierunku minimalizacji przestojów wynikających z występujących usterek i awarii w strumieniu wytwórczym o najdłuższym czasie realizacji. Korzystając z metody ścieżki krytycznej (CPM – Critical Path Method) [6] wyznaczono deterministyczną ścieżkę o najdłuższym czasie realizacji wszystkich składowych zadań. Na rysunku 2 została przedstawiona linia produkcyjna, w której realizowane są procesy wytwórcze dla wyznaczonej ścieżki. Dla przedstawionej linii produkcyjnej opracowany został model kształtowania Liczby Priorytetowej Urządzenia (LPU), który kształtuje wskaźnik uszkodzeń krytycznych jakie z pewnym prawdopodobieństwem mogą wystąpić w czasie  $\Delta t$ .



Rys. 2 Schemat przepływu strumienia wartości

Na rysunku 2 przedstawiony jest schemat przepływu strumienia wartości wykonany zgodnie z metodą VSM (ang. *Value Stream Mapping*). W rozpatrywanym strumieniu występują głównie przepływy typu „push”. Supermarket znajdujący się po procesie wykrawania (laserowego i młoteczkowego) nie jest „sterowany” kartami Kanban – pełni on jedynie funkcję bufora między operacyjnego. Harmonogramowanie zadań na procesy krawędziowania odbywa na podstawie intuicyjnych decyzji brygadzysty zmiany [7]. Głównym kryterium decyzyjnym o kolejności wykonywanych zadań są atrybuty maszyn oraz indywidualne preferencje operatorów obsługujących dane urządzenie. Brak usystematyzowanej i hierarchicznej struktury wykonywania zadań w procesie krawędziowania wpływa na dezorganizację i zwiększone występowanie strat typu „muri” i „muda” [8]. Ponadto ze względu na dużą liczbę zróżnicowanych półproduktów, które technologicznie muszą zostać poddane procesowi krawędziowania oraz względnie duży czas przygotowania do wykonania zadań, wpływa na występujące przeciążenia maszyn (czyli straty typu „muri”). Po procesie krawędziowania następuje proces zgrzewania, w którym konieczne jest dostarczenie wszystkich niezbędnych półproduktów w czasie  $\tau_z$  – który jest chwilą rozpoczęcia procesu zgrzewania. Następnie po procesie zgrzewania występuje wymuszony technologicznie przepływ według kolejki FIFO – First In First Out czyli w oparciu o produkcję potokową (ang. *Flow Production*).

### **3. Wyznaczenie zdolności produkcyjnej**

Zdolność produkcyjna definiowana jest jako maksymalna liczba produktów, jaka może zostać wytworzona w określonym czasie. W analizowanym przypadku zdolność produkcyjna określona jest względem nominalnego czasu taktu ( $C/T_{nom}$ ) wyznaczonego dla każdego procesu osobno. Nominalna wartość czasu taktu została wprowadzona ze względu na bardzo duże zróżnicowanie asortymentu produkcji. Globalny wskaźnik EPEX dla wszystkich wytwarzanych wewnątrz przedsiębiorstwa półproduktów wynosi 1,78 szt./rok przy średniej dziennej produkcji około 45 urządzeń. Rysunek 3 przedstawia poziom wykorzystania zdolności produkcyjnej względem istniejącego zapotrzebowania – czerwona linia. Na rysunku zawarte są jedynie informacje dotyczące wydzielonych urządzeń, tylko tych które biorą udział w produkcji strategicznego wyrobu finalnego. W ramach artykułu rozważaniom został poddany strumień produkcji generujący największe obroty w skali roku. Urządzenia 602 oraz grupa urządzeń 701 należy do tzw. grupy urządzeń procesów współdzielonych, które uczestniczą w produkcji innych (nie rozpatrywanych) wyrobów finalnych.





Rys. 3 Poziom wykorzystania zdolności produkcyjnej i poziom zamówień

Tabela 1. Wykorzystanie zdolności produkcyjnych

Lp.	Wykrawanie laserowe	Wykrawanie młoteczkowe	Krawędziowanie	Zgrzewanie	Mycie i suszenie	Lakierowanie proszkowe Lakierowanie natryskowe	Spiekanie Suszenie	Izolowanie	
	101	201	303, 305, 306, 309	602	701 a 701 b	701 c <sup>1</sup> 701 c <sup>2</sup>	701 d <sup>1</sup> 701 d <sup>2</sup>	907	
1	43%	35%	303	87%	28%	62%	52%	52%	91%
2	–	–	305	96%	–	–	39%	57%	–
3	–	–	306	79%	–	–	–	–	–
4	–	–	309	86%	–	–	–	–	–
5	43%	35%	∑	87%	28%	62%	max 52%	min 52%	91%

W ocenie wpływu na system produkcyjny ważne znaczenie ma również występowanie rezerw, do których zalicza się [9]:

- rezerwy wydajności,
- rezerwy zasobów maszynowych,
- rezerwy zasobów ludzkich.

W rozpatrywanym przypadku uwzględniane są jedynie rezerwy parku maszynowego. Tabela 2 przedstawia alternatywne urządzenia możliwe do wykorzystania w przypadku wystąpienia usterki. Np.: dla produktu „Korpus 450” urządzenia 305 oraz 309 stanowią rezerwy dla 301, 306 i 307.

Podobnie dla produktu „Korpus 750”. Urządzenia 602, 701 oraz 907 nie posiadają rezerw wyposażenia ale posiadają rezerwy wydajności – rysunek 2 i tabela 1.

*Tabela 2. Dysponowanie urządzeniami zastępczymi.*

Produkt	Wykrwanie laserowe	Wykrwanie młoteczkowe	Krawędziowanie						Zgrzewanie	Lakierowanie	Izolowanie
			101	201	301	303	305	306			
<b>Korpus 450</b>	X		X		(X <sup>301</sup> )	X	X	(X <sup>306</sup> ) (X <sup>307</sup> )	X	X	X
<b>Korpus 550</b>	X	X		X	X	X		X	X	X	X
<b>Korpus 750</b>	X				X		X	(X <sup>307</sup> )	X	X	X

Na podstawie zebranych danych oraz przeprowadzonych analiz zostały nadane odpowiednie wagi urządzeniom w kategorii wpływu na system produkcyjny. W tabeli 3 zawarte są wagi oceny wpływu urządzeń biorących udział w strumieniu wytwórczym dla produktu „Korpus 550”.

*Tabela 3. Wskaźnik wpływu usterki urządzenia na system produkcyjny.*

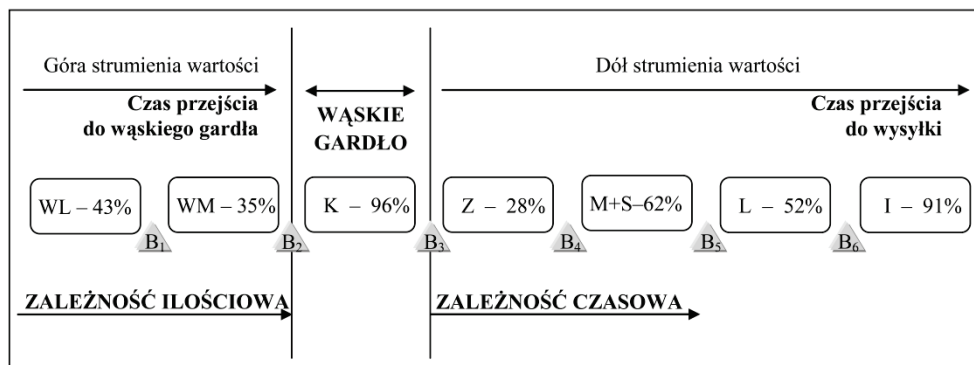
Lp.	101	201	303	305	306	309	602	701 a	701 b	701 c <sup>1</sup>	701 c <sup>2</sup>	701 d <sup>1</sup>	701 d <sup>2</sup>	907
<b>Rezerwy</b>	T	N	N	N	N	N	T	N	N	T	T	T	T	N
<b>Wykorzystanie [%]</b>	43	35	87	96	79	86	28	62	52	39	52	57	91	
<b>Waga</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>

Waga 0,1 przypisana jest urządzeniom, dla których przerwy w działaniu minimalizowane są własnymi rezerwami w wydajności. Wagę 0,5 i 0,6 przypisuje się urządzeniom, których przerwy w działaniu mają względnie średni wpływ na zakłócenia w systemie produkcyjnym. Wagę 0,9 i 1 otrzymują urządzenia krytyczne, których nawet krótkie przerwy w działaniu mają znaczny wpływ na duże zakłócenia stabilnej pracy w strumieniu wytwórczym.

#### **4. Kształtowanie pozycji w strumieniu wartości**

Pozycja urządzenia w strumieniu wartości determinuje maksymalny dopuszczalny czas usuwania występującej usterki na danym urządzeniu. Na wagę wskaźnika oceny wpływu usterki urządzenia, względem pozycji w strumieniu wartości, mają wpływ poziomy produkcji w toku (tzw. *WIP* – ang. Work – in – Process), poziomy zapasów w buforach międzyoperacyjnych oraz zależności w relacjach względem wąskiego gardła.

Kształtowanie priorytetu urządzenia odbywa się głównie z uwzględnieniem zależności względem klienta końcowego oraz wąskiego gardła. Dlatego też wyższe priorytety nadawane są urządzeniom „bliżej” odbiorcy oraz tym urządzeniom, które stanowią tzw. „wąskie gardło”. Rysunek 4 przedstawia pozycję „wąskiego gardła” oraz pozostałych urządzeń w analizowanym strumieniu wartości.



Rys. 4 Pozycja urządzeń w strumieniu wartości.

Każda przerwa pracy urządzenia wykorzystującego pełne swoje możliwości, ma negatywny wpływ na efektywność systemu wytwórczego. W analizowanym strumieniu wartości, ponad 90% wykorzystania występuje w procesie krawędziowania i izolowania. Jednak tylko grupa urządzeń – pras krawędziowych nr 303, 305, 306 i 309, została uznana za „wąskie gardło”. Wynika to z faktu, iż w procesie izolowania następuje dostosowanie stanowiska od rodzaju korpusu – 450, 550, 750 oraz innych, a wykorzystanie zdolności produkcyjnych determinowane jest nie poprzez czas dodający wartość (tzw. VAT – Value Added Time) ale poprzez czas blokowania. Na czas blokowania B/T wpływ ma czas taktu procesu izolowania – C/T oraz czas sezonowania produktu, rozumiany jako konieczny czas do uzyskania wymaganych właściwości materiału. Analizy procesu izolowania jako systemu względnie odosobnionego wykazały, że średnio co 1,5 godziny można otrzymać zaizolowany korpus, jednak jest on możliwy do dalszego wykorzystania dopiero po co najmniej 11 godzinach sezonowania. Czas blokowania to minimum 12,5 h przy czasie taktu równym średnio 1,5 h. Dlatego w kryterium czasowym wykorzystanie zdolności produkcyjnych procesu izolowania wynosi 91% natomiast w przypadku oceny według kryterium ilościowego zdolność produkcyjna procesu wahałaby się w granicach dwudziestu kilku procent. Wraz ze zwiększeniem wydajności w procesie izolowania konieczne byłoby zwiększenie przestrzeni magazynowej pomiędzy izolowaniem a malarnią, tak aby umożliwić proces sezonowania korpusów. W przypadku istniejącego zapotrzebowanie nie jest to konieczne, dlatego poziom wykorzystania równy 91% jest wystarczający.

W rozważanym przypadku partia produkcyjna waha się w granicach kilku sztuk – około 5 – 7 szt. Analizy harmonogramów produkcyjnych za okres 12 miesięcy wykazały, że największa partia jaka wystąpiła dla tych samych wyrobów finalnych równa była 17 sztuk. Szeroki wachlarz możliwych wariantów produktów końcowych oraz bardzo krótkie serie produkcyjne wpływają na dużą dynamikę zmian struktury przepływu w procesie wytwórczym. W tak zmiennych warunkach ważne jest przeprowadzenie szczegółowych analiz przepływów dla pojedynczych urządzeń (procesów) względem sąsiadujących (urządzeń i/lub procesów) [10] oraz analiz przepływu przez cały układ wytwórczy z uwzględnieniem zależności względem końca procesu wytwarzania i wąskiego gardła. Wzory: 1–4 przedstawiają ogólną postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa przepływu strumienia materiału względem „wąskiego gardła” i końca procesu wytwórczego.

Wyznaczenie  $f_{101}^E(t)$  funkcja gęstości czasu przejścia do „wąskiego gardła” od urządzenia 101 według wzoru (1):

$$f_{101}^E(t) = a_{101}^E \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + b_{B_1}^E \cdot \left( \lambda_{B_1}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_1}^{T/T} \cdot t} \right) + \\ + a_{201}^{1E} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) + b_{B_2}^{1E} \cdot \left( \lambda_{B_2}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_2}^{T/T} \cdot t} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $a_{101}^E$ ,  $a_{201}^{1E}$  - wagi gęstości prawdopodobieństwa czasów cyklu  $C/T^{WL}$  oraz  $C/T^{WM}$  odpowiednio dla urządzeń 101 i 201;  $b_{B_1}^E$ ,  $b_{B_2}^E$  - wagi gęstości prawdopodobieństwa funkcji czasu zapewnienia ciągłości produkcji, wyznaczone na podstawie liczby sztuk półproduktów znajdujących się odpowiednio w buforach  $B_1$  i  $B_2$  względem czasu taktu klienta ( $T/T$ ). Ponadto:  $a_{101}^E + a_{201}^{1E} + b_{B_1}^E + b_{B_2}^E = 1$  - więc  $f_{101}^E(t)$  jest gęstością mieszaną przejścia strumienia od 101 do „wąskiego gardła”.

Wyznaczenie  $f_{101}^S(t)$  - funkcji gęstości czasu produkcji względem „wąskiego gardła” dla urządzenia 101 według wzoru:

$$f_{101}^S(t) = a_{101}^S \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + a_{201}^{1S} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) \quad (2)$$

$a_{101}^S$ ,  $a_{201}^{1S}$  - wagi gęstości prawdopodobieństwa czasów cyklu odpowiednio dla urządzeń 101 i 201. Ponadto:  $a_{101}^S + a_{201}^{1S} = 1$  ; zatem  $f_{101}^S(t)$  jest gęstością mieszaną.

Wyznaczenie  $f_{101}^{EK}(t)$  - funkcji gęstości czasu przejścia do wysyłki od 101:

$$\begin{aligned}
 f_{101}^{EK}(t) = & a_{101}^{1EK} \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + b_{B_1}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_1}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_1}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{201}^{1EK} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) + \\
 & + b_{B_2}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_2}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_2}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{305}^{1EK} \cdot \left( \lambda^K \cdot e^{-\lambda^K \cdot t} \right) + b_{B_3}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_3}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_3}^{T/T} \cdot t} \right) + \\
 & + a_{602}^{1EK} \cdot \left( \lambda^Z \cdot e^{-\lambda^Z \cdot t} \right) + b_{B_4}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_4}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_4}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{701a,b}^{1EK} \cdot \left( \lambda^{M+S} \cdot e^{-\lambda^{M+S} \cdot t} \right) + \quad (3) \\
 & + b_{B_5}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_5}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_5}^{T/T} \cdot t} \right) + a_{701c,d}^{1EK} \cdot \left( \lambda^L \cdot e^{-\lambda^L \cdot t} \right) + b_{B_6}^{1EK} \cdot \left( \lambda_{B_6}^{T/T} \cdot e^{-\lambda_{B_6}^{T/T} \cdot t} \right) + \\
 & + a_{907}^{1EK} \cdot \left( \lambda^I \cdot e^{-\lambda^I \cdot t} \right)
 \end{aligned}$$

gdzie:  $a_i^{1EK}$  - wagi gęstości prawdopodobieństwa czasów cyklu dla każdego urządzenia w rozpatrywanym strumieniu przejścia od pierwszego procesu wytwarzania do procesu izolowania włącznie;  $b_{B_j}^{1EK}$  - wagi gęstości prawdopodobieństwa funkcji czasu zapewnienia ciągłości produkcji, wyznaczone na podstawie liczby sztuk półproduktów znajdujących się w kolejnych buforach (dla całego rozpatrywanego strumienia przepływu) względem czasu taktu klienta. Ponadto, suma wag  $a_i^{1EK}$  oraz wag  $b_{B_j}^{1EK}$  jest równa jeden.

Wyznaczenie  $f_{101}^{ES}(t)$  - funkcji gęstości czasu produkcji do wysyłki dla urządzenia 101 według wzoru:

$$\begin{aligned}
 f_{101}^{SK}(t) = & a_{101}^{1SK} \cdot \left( \lambda^{WL} \cdot e^{-\lambda^{WL} \cdot t} \right) + a_{201}^{1SK} \cdot \left( \lambda^{WM} \cdot e^{-\lambda^{WM} \cdot t} \right) + a_{305}^{1SK} \cdot \left( \lambda^K \cdot e^{-\lambda^K \cdot t} \right) + \\
 & + a_{602}^{1SK} \cdot \left( \lambda^Z \cdot e^{-\lambda^Z \cdot t} \right) + a_{701}^{1SK} \cdot \left( \lambda^L \cdot e^{-\lambda^L \cdot t} \right) + a_{907}^{1SK} \cdot \left( \lambda^I \cdot e^{-\lambda^I \cdot t} \right) \quad (4)
 \end{aligned}$$

gdzie:  $a_i^{1SK}$  - wagi gęstości prawdopodobieństwa czasów cyklu dla każdego urządzenia w strumieniu przejścia od pierwszego procesu wytwarzania do procesu

izolowania włącznie. Ponadto:  $\sum_{i=1}^6 a_i^{1SK} = 1$

Adekwatnie dla pozostałych urządzeń zostały wyznaczone czasy przejścia i czasy produkcji względem „wąskiego gardła” oraz względem wysyłki do klienta.

W tabeli 4 zostały przedstawione funkcje gęstości prawdopodobieństwa zmiennych losowych dla czasów przejścia uwzględniające zależność pozycji urządzenia względem odbiorcy oraz „wąskiego gardła”. Ze względu na fakt, iż urządzenie 305 stanowi tzw. „wąskie gardło” to odpowiednio nie występują funkcje gęstości czasów przejść dla urządzeń będących „wąskim gardłem” oraz dla urządzeń za nim się znajdujących tj.: 602, 701 oraz 907.

*Tabela 4. Funkcje czasów analizowanego systemu produkcyjnego*

Lp.	Urządzenie	Czas przejścia do wąskiego gardła	Czas produkcji do wąskiego gardła	Czas przejścia do wysylki	Czas produkcji do wysylki	Maksymalny czas względem sąsiednich procesów
1	101	$f_{101}^E(t)$	$f_{101}^S(t)$	$f_{101}^{EK}(t)$	$f_{101}^{SK}(t)$	$t_{\max}^{WL}$
2	201	$f_{201}^E(t)$	$f_{201}^S(t)$	$f_{201}^{EK}(t)$	$f_{201}^{SK}(t)$	$t_{\max}^{WM}$
3	305	0	0	$f_{305}^{EK}(t)$	$f_{305}^{SK}(t)$	$t_{\max}^{K305}$
4	602	0	0	$f_{602}^{EK}(t)$	$f_{602}^{SK}(t)$	$t_{\max}^Z$
5	701	0	0	$f_{701}^{EK}(t)$	$f_{701}^{SK}(t)$	$t_{\max}^L$
6	907	0	0	$f_{907}^{EK}(t)$	$f_{907}^{SK}(t)$	$t_{\max}^J$

Szczegółowe modelowe analizy możliwej utraty czasu względem sąsiednich urządzeń (procesów) zostały zawarte w kolejnej części artykułu.

## 5. Podsumowanie

W artykule rozważaniom został poddany konwergentny system wytwórczy, w którym w złożonym układzie w wyniku kilku stopni przetwarzania  $n$  elementów wejściowych powstaje jeden wyrób finalny. Analizy rozpatrywanego systemu wytwórczego są zadaniem trudnym i czasochłonnym. Na stopień skomplikowania wpływ mają: – krótkie serie produkcyjne; najczęściej po 2 – 3 szt. tego samego wyrobu – sporadycznie 5 – 7 szt., – customizacja produktów; czyli umożliwienie klientowi dużej swobody w indywidualizacji parametrów wyroby finalnego, – brak powtarzalności ze względu na występowanie dużego wskaźnika EPEX; w rozpatrywanym przypadku wskaźnik ten wynosił EPEX=1,78/rok przy średniej dziennej wydajności równej ok. 45 urządzeń chłodniczych, – brak

zsynchronizowanego z harmonogramem produkcji przepływu informacji, co często wpływ miało na bieżące zmiany zadań w gniazdach wytwórczych.

Pierwsza część artykułu zawiera charakterystykę rozpatrywanego obiektu rzeczywistego. Dla poszczególnych działów zostały określone poziomy wykorzystania zdolności produkcyjnych oraz umiejscowienie tzw. „wąskiego gardła” w strumieniu wartości. Analizy rozpatrywanych obiektów i parametrów ich określających oparte są w głównej mierze o zmienne losowe. Rozpatrywane przypadki uwzględniają wykładniczość czasów realizacji poszczególnych procesów, tak więc każdy czas procesu (czas taktu –  $C/T$ ) jest zmienną losową o rozkładzie wykładniczym  $C/T_{ij} \sim Exp(\lambda_{ij})$ . Lead Time ( $L/T$ ) jest zmienną losową określającą skumulowany czas realizacji zadań dla zastosowanej technologii i jest to suma niezależnych zmiennych losowych o rozkładach wykładniczych.

Druga część artykułu przedstawia probabilistyczny model kształtowania maksymalnych strat czasu bazujących na opróżnianiu i wypełnianiu buforów międzyoperacyjnych. W części drugiej artykułu zawarte są również analizy ciągłości przepływu względem wskaźnika CEF – Customer Effect Factor.

## 6. Literatura

- [1] Nyhuis P., Windhal H.P., Fundamentals of Production Logistics. Theory, Tools and Applications. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
- [2] Zwolińska B.: Use of the method VSM to the identify muda, Research in Logistics & Production, Vol. 6, No. 6, pp.513-522.
- [3] Wiegand B. Langmaack R. Baumgarten T.: Lean Maintenance System Zero Maintenance Time – Full Added Value Workbook, Lean Institute, Portsmouth U.S.A., 2005.
- [4] Gniedenko B.W. Kowalenko I.N.: Wstęp do teorii obsługi masowej, PWN, Warszawa, 1966.
- [5] Kostrzewski M.: Logistics facilities designing method-a study of a procedure for logistics facilities designing and its software implementation, Archives of Transport, Vol. 24, Iss. 3, pp. 321-340, Warszawa, 2012.
- [6] Zwolińska B. Werbińska M.: Wykorzystanie metody CPM do wyznaczania czasu rozpoczęcia produkcji urządzeń chłodniczych, Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji pod red. R. Knosali, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2017.
- [7] Zwolińska B. Michłowicz E. Kubica Ł.: The mathematical model describing the influence of chosen parameters on the quality of final products manufactured from type 1.4307 steel, METAL 2016, 25<sup>th</sup> Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Brno 2016.

- [8] Palmer D. R.,: Maintenance Planning and Scheduling Handbook, Mc Graw–Hill Education, New York, 2012.
- [9] Grzybowska K. Gajdzik B.: Optymisation of equipment setup processes in enterprises, Journal Metalurgija, 51 (4), pp. 563–566, Croatian, 2012.
- [10] Lenart B. Grzybowska K. Cimer M.: Adaptive Inventory Control in Production Systems, Hybrid Artificial Intelligent Systems, Precedings. Part II, Emilio Corchado [et al.] 222–228 Springer, Berlin, 2012.



**Dr inż. Bożena Zwolińska** w roku 2005 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo – Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Stopień doktora uzyskała w tej samej jednostce w 2009 roku. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Systemów Wytwarzania w AGH w Krakowie. Specjalność – logistyka przemysłowa (Udział 50%).



**Mgr Łukasz Kubica** w roku 2015 ukończył studia na Wydziale Matematyki i Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego uzyskując tytuł magistra. Obecnie jest studentem studiów doktoranckich na Wydziale Matematyki i Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Zajmuje się zastosowaniami rachunku prawdopodobieństwa i statystyki w praktyce oraz układami dynamicznymi (Udział 50%).