

Arkadiusz GOLA

RELIABILITY ANALYSIS OF RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEM STRUCTURES USING COMPUTER SIMULATION METHODS

ANALIZA NIEZAWODNOŚCIOWA STRUKTUR REKONFIGUROWALNEGO SYSTEMU PRODUKCYJNEGO Z WYKORZYSTANIEM METOD SYMULACJI KOMPUTEROWEJ*

Choosing the right production structure (configuration) is one of the most important steps in the process of designing a reconfigurable manufacturing system (RMS). Whether or not a production process to be executed is capable of achieving the assumed performance parameters depends, among others, on the reliability of the machines and technological devices that make up the system under design. Because the individual components of a manufacturing system have different levels of reliability, the reliability of the system as a whole depends to a large extent on the way in which they are configured. This article discusses the process of selecting the structure of a manufacturing system with changing machine reliability, which allows to accommodate these changes to maintain the stability of the production process. The focus of the study was a manufacturing system under design dedicated to the machining of body parts. The experiments were carried out using analytical methods and computer simulation methods. Simulations were performed using Enterprise Dynamics software.

Keywords: reconfigurable manufacturing system, RMS, configuration, production structure, reliability, simulations, Enterprise Dynamics.

Wybór odpowiedniej struktury produkcyjnej (konfiguracji) stanowi jeden z ważniejszych kroków w procesie projektowania rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego (RMS). Możliwość osiągnięcia zakładanych parametrów wydajnościowych planowanego do realizacji procesu produkcyjnego jest uzależniona m.in. od stopnia niezawodności maszyn i urządzeń technologicznych wchodzących w skład projektowanego systemu. Zróżnicowany poziom niezawodności poszczególnych elementów systemu produkcyjnego powoduje, iż niezawodność systemu jako całości w dużej mierze zależy od sposobu ich konfiguracji. W niniejszym artykule przedstawiono proces wyboru struktury systemu produkcyjnego pod kątem możliwości zachowania stabilności procesu produkcyjnego wraz ze zmianą stopnia niezawodności maszyn technologicznych wchodzących w skład systemu. Jako obiekt badań przyjęto projektowany system produkcyjny dedykowany do obróbki części klasy korpus. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metod analitycznych oraz metod symulacji komputerowej. Jako narzędzie symulacji wykorzystany został system Enterprise Dynamics.

Słowa kluczowe: rekonfigurowalny system produkcyjny, RMS, konfiguracja, struktura produkcyjna, niezawodność, symulacje, Enterprise Dynamics.

1. Introduction

Current efforts in the design and installation of manufacturing systems are concentrated on increasing their efficiency, flexibility, and convertibility [2]. This is a result of the growing individualization of customer needs, pressure from global competition, and unprecedented technical and technological progress [14]. The need to meet the growing market demands imposes the necessity of not only developing new methods and techniques of organizing and managing production, but also searching for new forms of organizing manufacturing systems that would allow to achieve these goals [16].

In the light of the prospects for the development of industry in line with Industry 4.0 paradigms, one of the measures that can ensure success for manufacturing companies is the implementation of the concept of reconfigurable manufacturing systems (RMS), which combine the advantages of traditional manufacturing lines and flexible manufacturing systems, thus facing the demands placed on modern manufacturing systems [25, 46]. The idea of a RMS was born in the mid-1990s as a response to the challenges posed by progressing globalization [26]. From that moment on, many scientific, research and industrial centers have been developing methods of designing

manufacturing systems with a dynamic production structure adaptable to current market needs [40].

A key issue in designing RMS is the selection of an appropriate production structure that enables the manufacture of products with an assumed efficiency, while allowing to maintain the principles of the reconfigurable manufacturing system [31,33]. This problem has been the subject of numerous studies for over a dozen years now. General assumptions regarding the optimal selection of an RMS configuration are presented in [34, 41, 44]. Methods for the selection of machines for RMS have been proposed by Bensmailne, Dahane and Beouncef [5] and Haddou Benderbal, Dahane and Benyoucef [20]. Reza Abdi developed a model based on the Analytical Hierarchical Process (AHP) method, which allows to structure criteria for selection of layout configuration in RMS [39]. Li, Mitrouchev, Wang, Brissand, and Lu proposed a Petri-net-based method of optimal selection of RMS configuration [30]. Similarly, Petri nets combined with the Lagrange optimization theory were used in the approach proposed by Hsieh [21]. The problem of optimal selection of RMS configuration has also been investigated by Goyal, Jain and Jain, who used NSGA II and TOPSIS multi-criteria optimization methods [19]. The process of selecting the production structure of an RMS viewed from the perspective of maximizing the productivity of the system under design

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

was discussed in paper [17]. The problem of optimization of flow-line configuration of selected RMS was also investigated by Dou, Dai and Meng [11, 12] as well as Delorme, Malyutin and Dolgoui [10]. Apart from research on RMS, interesting insights can also be found in studies in the area of analysis and selection of configurations for reconfigurable assembly systems [4, 7].

More and more authors also become interested in the problems of reconfiguration of existing RMS structures, a tendency that reflects the requirement of dynamic change in the production capacity of such systems [18]. An overview of the literature along with a proposal of a general framework for reconfiguration based on the assessment of system life cycle and multiple production levels has been presented in paper [35]. Evaluation criteria and the process of evaluation of reconfiguration of existing systems have been discussed by Wang, Huang, Yan and Du [42] and by Puik, Telgen, Van Moergestel and Ceglarek [37]. An interesting decision-making method for reconfiguration of RMS production structure using the Gale-Shapley model was presented by Renna [38]. Yamana proposed a similar approach based on particle swarm optimization (PSO) [45].

Unfortunately, all the solutions presented in the publications mentioned above assume that the individual machines and technological devices which make up a system under design are characterized by 100% reliability. This fact limits their practical application in industrial settings because in real life, the individual components are never 100% reliable; this means the system as a whole also has a lower than nominal reliability, which directly affects its productivity, efficiency, and production costs [29]. Although in their work [8], Dahane and Benyoucef did draw attention to the issue of reliability in the process of designing RMS, they concentrated solely on the problem of selecting machines for the system under design. Thus, there are no research results showing how a change in the level of reliability of machines affects the level of reliability and expected productivity of an RMS.

This paper focuses on how the production structure of an RMS system being designed affects the level of its reliability and productivity, depending on the level of reliability of the machines that form part of this system. In particular, the article proposes a method for prototyping RMS production structures which uses analytical estimation of system structure reliability and computer simulation. The essence of the proposed approach is to enable the selection of an RMS structure that will correspond to the expected characteristics determining the reliability and productivity of the system under design. The following evaluation criteria for prototyping were adopted: reliability of the system as a whole, system productivity, and utilization rates of the machines and devices making up the manufacturing subsystem of the RMS under design.

2. Reconfigurable manufacturing systems – definition and design assumptions

A *reconfigurable manufacturing system (RMS)* is one designed to quickly adjust its functionality and production capacity to changing market demand, by changing the structure of the system both with regard to its hardware and software components [23,26]. The concept of RMS was created in the Engineering Research Centre at the University of Michigan College of Engineering (USA) and was implemented in 1999 as a response to new market challenges manifested, among others, by [6]:

- the need to reduce the time of launching a new product in the market,
- customer demand for increasing assortment diversity,
- smaller and variable production volumes, and
- the need to reduce the prices of manufactured goods.

The basic features of RMS include [32]:

- *Modularity* – all the main components of a system (both hardware and software) have a modular structure. Modularity makes it possible to easily change the structure of a system or device in order to adjust it in the best possible way to the current production requirements.
- *Integrability* – the ability to quickly and precisely integrate modules by a set of mechanical, informational and control interfaces that enable their integration and communication.
- *Customization* – system flexibility is designed around the current production needs.
- *Convertibility* – the ability to quickly change the functionality of the existing system, machines and controls to suit new production tasks.
- *Scalability* – the ability to easily change the production capacity of an RMS by changing its structure or the production capacity of its specific components.
- *Diagnosability* – the ability to automatically read the current state of the system and to detect and diagnose the causes of output product defects and take corrective action immediately.

Thanks to customization, the functionality and production capacity of RMS are strictly adjusted to current production tasks. As a consequence, these systems have a minimum required level of flexibility, which limits the investment costs. Owing to their modularity, integrity, scalability and convertibility, however, they can be quickly redesigned to achieve a new, desirable level of functionality and production capacity suited to new market requirements (Figure 1).

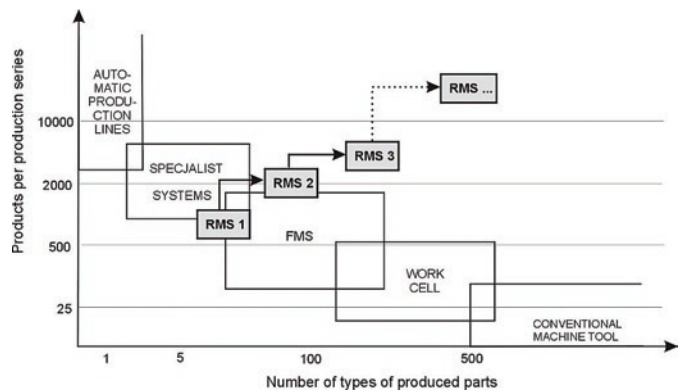


Fig. 1. RMS functionality compared to other manufacturing systems

The basic feature of RMS is their reconfigurable structure, which enables quick rearrangement of hardware and software to obtain a certain level of functionality and production capacity adjusted to current production tasks.

An RMS is composed of workstations which are reconfigurable machine tools, a control system consisting of reconfigurable controllers for the control of the reconfigurable machine tools, and a reconfigurable material transport and handling subsystem, controlled by the control system, for automated transport of materials and workpieces within the RMS. Both reconfigurable process machines and controllers have a modular design that enables fast and reliable integration when a need to change the structure of the system arises.

An example of a reconfigurable manufacturing system is shown in Figure 2.

The system (10) consists of workstations (12) with reconfigurable machine tools (14). The system also contains a control system with the operator's station (16) and reconfigurable controllers (18) which communicate with each other, as shown by the dashed lines. In addition, the system incorporates a handling system consisting of a gantry robot (20), at least one wireless AGV trolley (22), and a system of transmitters and aerial receivers (23) communicating with the AGV

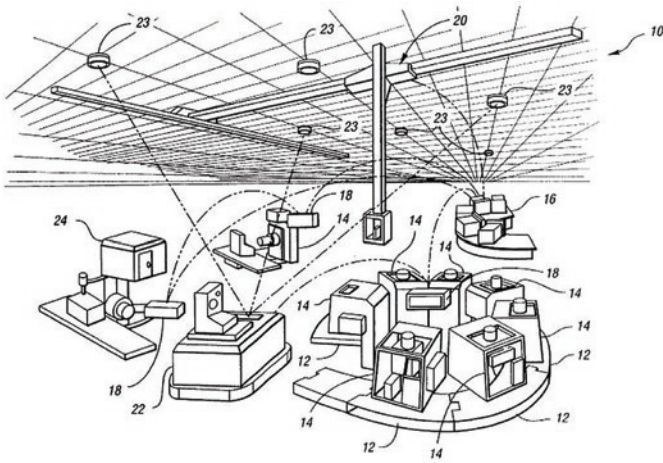


Fig. 2. Reconfigurable manufacturing system [24]

(22). The AGV trolley also communicates with at least one reconfigurable controller (18).

Reconfigurable manufacturing systems enable integration with other modern production devices such as laser processing devices (24) which have their own reconfigurable controllers that communicate with the operator's station (16) and the remaining controllers in the system [24].

3. Problems of designing RMS production structures

Manufacturing systems can be designed in many configurations: serial, parallel or hybrid. The different configurations have a considerable impact not only on the possibility of adapting production to market needs, but also on the reliability, productivity, product quality, and costs of production [27]. For that reason, the right production structure has to be chosen already at the design stage, because the type of structure used cannot be changed during the system's lifetime [25].

According to the definition, a reconfigurable production system is designed for rapid adjustment of its functionality and production capacity to tasks arising from the changing market demand, by changing the structure of the system, both with regard to production hardware and software (see Section 2). In order to make dynamic change of production capacity possible, the structure of the system must be designed so as to enable quick change of the functionality of the existing system in order to adjust it to new production tasks. System structure must therefore be modular, and thus enable easy addition or removal of a process machine without the need to overhaul the production structure and change the functioning of the system [1].

By definition, the structure of RMS is a structure that enables multi-stage machining of workpieces, and simultaneously provides the possibility of replacing machines at the individual stages of the production process [13]. An example of such a structure, utilized by a US powertrain manufacturer, is shown in Figure 3.

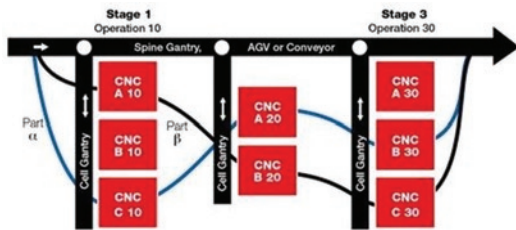


Fig. 3. Functional structure of a reconfigurable manufacturing system [1]

It is a system in which the production process is executed in three stages and enables simultaneous processing of two different parts (a,

b). A roller conveyor serves all machines in a particular production stage – it delivers blanks to each machine tool, picks the machined parts and delivers them to an input/output buffer (marked with white dots in Figure 3). The buffer can be a roller conveyor or several AGVs. The machine tools in each stage of the process are always identical [13].

In the present study, we analyzed the process of selecting structures for the reconfigurable manufacturing system discussed in article [28]. The RMS designed in that article was dedicated to the machining of body parts (Fig. 4). The technological process encompassed five technological operations performed on two faces of a part, each face requiring separate fixturing (Fig. 4 b). The design assumed that the system should be capable of producing 500 parts a day. The working time per day for the manufacturing system (F_j) was 60,000 seconds.

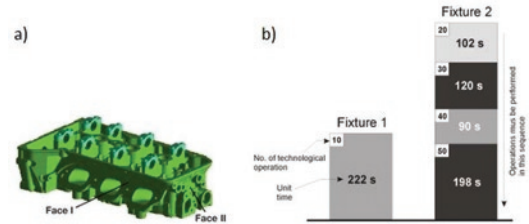


Fig. 4. Engine part : a) general schematic view of the product, b) structure of the technological process [28].

The maximum allowable cycle time for producing 500 parts in 60,000 seconds was $\tau_{max} = 120$ s/part. In designing a system like that, the designer must first establish the minimum number of machines (M) needed to achieve the given production volume. This can be done using formula (1) [28]:

$$M = \frac{Q * t}{F_j * R} * 100\% = \frac{500 \text{ szt.} * 732 \text{ s / szt.}}{60000 \text{ s} * 100\%} * 100\% = 6,1 \quad (1)$$

where: Q – daily demand [parts/day], t – machining time [s/part], F_j – working time per day [s], R – machine reliability [%].

In the analyzed case, in which the machines were assumed to have 100% reliability, the minimum number of machines needed was 7, which corresponded to 64 possible system configurations (calculated using formula (2)):

$$K = \sum_{m=1}^M \binom{M-1}{m-1} = 2^{M-1} = 2^{7-1} = 64 \quad (2)$$

where: K – number of possible system configurations, M – number of machines in the manufacturing system, m – number of processing stages

This number can be reduced to 15 configurations by dividing the system into two subsystems (associated with the need to change the way the part is fixed in the workstation) and by taking into account the number of operations that can be performed in each of the stages (Figure 5).

For systems that produce parts in two stages, only one configuration (marked with the symbol A in Fig. 6) is possible. In this configuration, each part is produced at a cycle time of 111 s/part in the first stage and 102 s/part in the second stage. The first stage is a bottleneck and determines the work cycle for the entire system at $t_{max} = 111$ s/part. The expected productivity of a system with a structure like this is 540 parts.

Theoretically, in the case of systems in which products are manufactured in three stages, four configurations are possible. However,

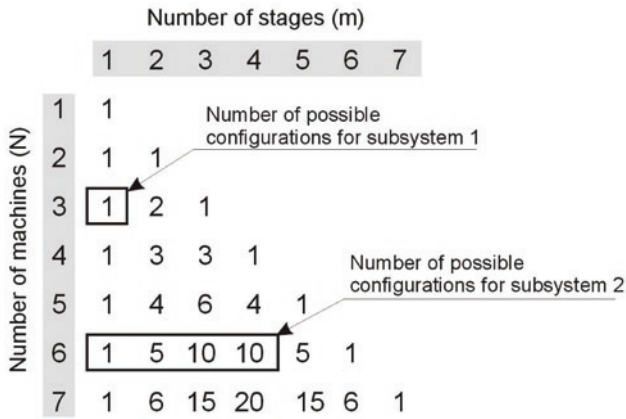


Fig. 5. Pascal's triangle was used to determine the number of system configurations in each production stage

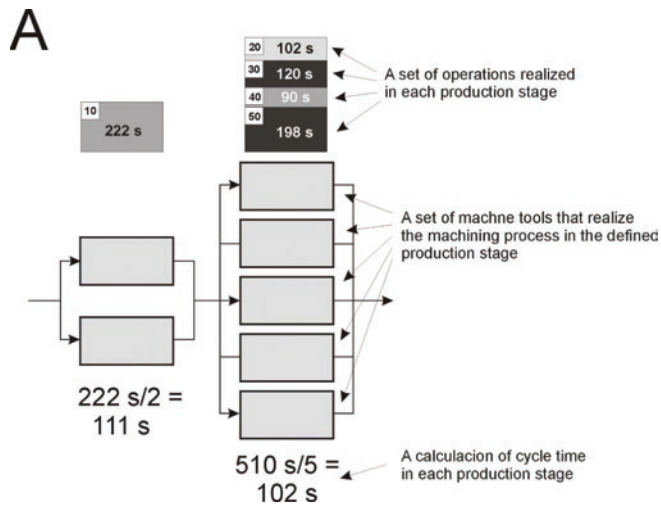


Fig. 6. The production structure of a system in which parts are produced in two stages

only three of them (marked with symbols B, C and D) allow to machine parts at a cycle time lower than or equal to 120 s/part. (Fig. 7). The fourth configuration (marked with the symbol E) has only one machine in the third stage, which is a bottleneck that works at a cycle time of 198 s/part, generating a productivity that is too low to meet the demand.

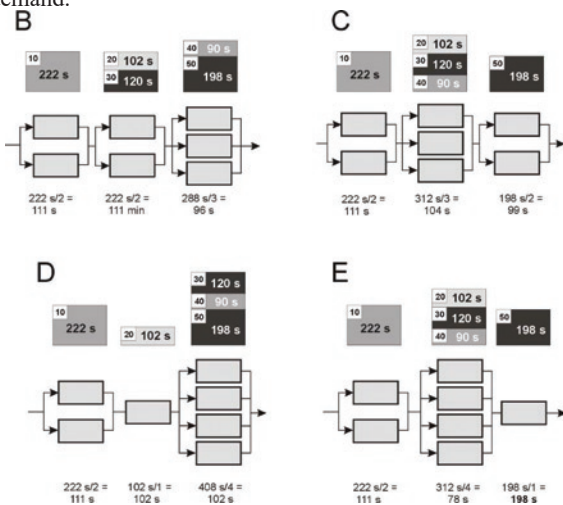


Fig. 7. Production structures of a system in which parts are produced in three stages

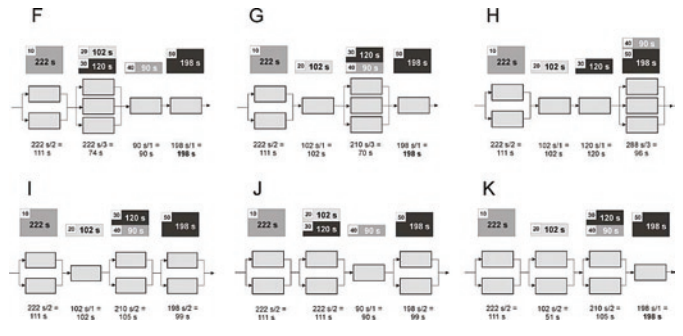


Fig. 8. Production structures of a four-stage-production system

A four-stage-production system may have one of the production structures shown in Fig. 8. However, only three of them meet the requirement that parts be produced at a cycle time lower than 120 s/part, and only these structures will be subjected to further analysis. All the acceptable configurations (marked with the symbols H, I, and J) can operate at a cycle time of 111 s/part. The remaining ones have only one machine in the last stage, which is a limiting link that enables production at a cycle time of 198 s/parts.

Five-stage systems can be configured in four different ways as shown in Fig. 9. Unfortunately, only one of these arrangements (marked with the symbol O) meets the requirements regarding the maximum production cycle time: its cycle time is exactly 120 s/part. In the other three structures, the fifth stage is a bottleneck. Its cycle time of 198 s is insufficient from the point of view of the efficiency requirements of the system under design.

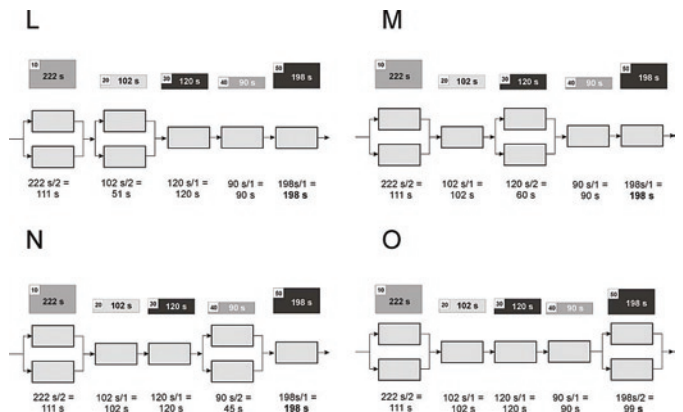


Fig. 9. Production structures of a five-stage-manufacturing system

A detailed analysis of the configurations of a RMS in terms of whether their nominal efficiency complies with the design requirements allows one to substantially reduce the number of feasible arrangements, but not to identify the best design. In designing a system like this, it is necessary to take into account additional criteria that enable one to select a structure that on the one hand will guarantee the fulfilment of the limiting conditions defined in the pre-design phase, and on the other, will take into account factors related to the current operation of the system. As part of the present study, we assessed the reliability and expected productivity of the manufacturing system, taking into account the production structures selected based on the requirement of minimum efficiency. In particular, we evaluated the relationship between changes in the level of reliability of the manufacturing system (R_s) and changes in the level of reliability of its component machines and devices (R) and the expected level of productivity of the system, assuming that the machines that are part of the RMS have different levels of reliability.

4. Analysis of reliability and productivity of RMS system structures

4.1. Evaluation of the reliability of the reconfigurable manufacturing system under design

In general, system reliability (R_s) is understood as the probability that the system will operate continuously throughout its useful life [9]. The total reliability of a system depends on both the reliability of all its components and the way they are arranged [3]. Serial arrangement (Fig. 10 a) reduces the reliability of a system. This is because a system built of elements positioned in a row operates only when all the individual machines are in working order. If the reliability of each machine is R , and the number of machines is n , then the reliability of the system is R^n .

Parallel arrangement of two identical elements increases the overall reliability of a system. More components added in parallel (Figure 10 b) increase the reliability of the system, because the system will stop functioning only when all system components have failed. In this case, the probability that n identical machines arranged in parallel will fail is $(1-R)^n$, and the reliability of the system is $1-(1-R)^n$ [43].

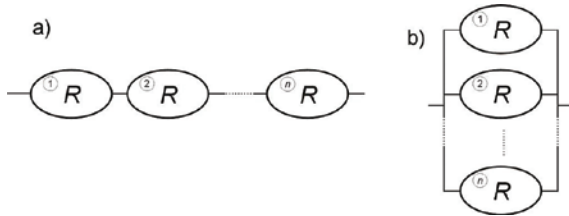


Fig. 10. Basic configurations of manufacturing systems: a) serial (linear) structure, b) parallel structure

All of the structures of the RMS being designed are hybrids that combine the characteristics of both parallel and serial structures. System reliability (R_s) is then a derivative of both the number of production stages as well as the number of machines in each stage, and its value for each configuration can be calculated using the formulas given in Table 1.

Table 1. Manufacturing system reliability formulas for selected structures

Configuration	Formula
A	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2]$
B	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2]$
C	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2]$
D	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * [1 - (1 - R)^2]$
H	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * R * [1 - (1 - R)^2]$
I	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2]$
J	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2] * R * [1 - (1 - R)^2]$
O	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * R * R * [1 - (1 - R)^2]$

Reliability levels of the RMS under design for each of the selected structures, at different levels of reliability of the component machines, are shown in Table 2.

As the results show, changes in RMS reliability for each of the structures are disproportionate (Fig. 11). In the case of configura-

tion A, despite the decrease in the reliability level of the individual machines, the reliability of the system as a whole remains relatively stable up to a certain point, after which it sharply drops. A completely different situation takes place in the case of configuration O, where a reduction in machine reliability is accompanied by an immediate,

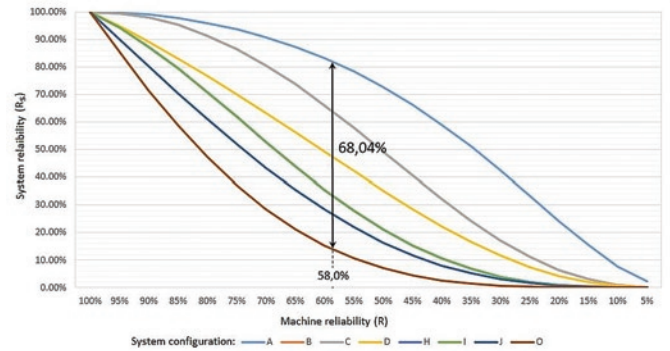


Fig. 11. Relationships between machine reliability (R) and manufacturing system reliability (R_s)

substantial decrease in system reliability.

Considering the fact that the reliabilities of machines and manufacturing devices decrease with operation time, the type of configuration used is crucial for maintaining the assumed production capacity within the system's planned life cycle. For example, assuming that the machines operate at a reliability rate of 75%, the reliability of a two-stage system is 93.66%, while a five-stage system (configuration O) has a reliability of 37.08%. Selection of the system's structure already at the design stage can therefore be of key importance for the system's productivity and efficiency in subsequent operational periods. The largest difference (68.04%) in system reliabilities was found when machines operated at 58% reliability: system reliability for configuration A was 81.28% and for configuration O 13.24%

A lower level of machine reliability translates directly into a lower production capacity. Consequently, to reach a specific production volume at a lower level of machine reliability, the manufacturer needs to increase the number of machine tools in the system. To determine the minimum number of machines needed (both for the entire system as well as the subsystems of the RMS being designed), one can use the formula (1) given in Section 3. Assuming that the minimum daily demand is $Q = 500$ parts/day, working time per day is $F_j = 60,000$ s, and projected machine reliability is $R = 75\%$, the number of machines in each of the subsystems of the RMS which manufactures the product shown in Figure 4 in five stages is:

• Stage I:

$$M_I = \frac{Q * t}{F_j * R} * 100\% = \frac{500 \text{ pc} * 222 \text{ s / pc}}{60000 \text{ s} * 75\%} * 100\% = 2.47 \Rightarrow 3 \quad (3)$$

• Stage II:

$$M_{II} = \frac{Q * t}{F_j * R} * 100\% = \frac{500 \text{ pc} * 102 \text{ s / pc}}{60000 \text{ s} * 75\%} * 100\% = 1.13 \Rightarrow 2 \quad (4)$$

• Stage III

$$M_{III} = \frac{Q * t}{F_j * R} * 100\% = \frac{500 \text{ pc} * 120 \text{ s / pc}}{60000 \text{ s} * 75\%} * 100\% = 1.33 \Rightarrow 2 \quad (5)$$

• Stage IV

$$M_{IV} = \frac{Q * t}{F_j * R} * 100\% = \frac{500 \text{ pc} * 90 \text{ s / pc}}{60000 \text{ s} * 75\%} * 100\% = 1.00 \Rightarrow 1 \quad (6)$$

Table 2. Reliability of the system under design (R_s) for various configurations as a function of machine reliability (R)

R	Configuration							
	A	B	C	D	H	I	J	O
100 %	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%
95 %	99.7500%	99.4882%	99.4882%	94.7619%	94.2893%	94.2893%	90.0131%	85.3093%
90 %	98.9990%	97.9120%	97.9120%	89.0911%	87.3269%	87.3269%	80.1098%	71.4493%
85 %	97.7426%	95.2281%	95.2281%	83.0454%	79.3906%	79.3906%	70.3860%	58.6800%
80 %	95.9693%	91.4227%	91.4227%	76.6771%	70.7789%	70.7789%	60.9485%	47.1859%
75 %	93.6584%	86.5173%	86.5173%	70.0378%	61.7981%	61.7981%	51.9104%	37.0789%
70 %	90.7789%	80.5741%	80.5741%	63.1840%	52.7500%	52.7500%	43.3861%	28.4038%
65 %	87.2891%	73.6992%	73.6992%	56.1816%	43.9192%	43.9192%	35.4848%	21.1463%
60 %	83.1398%	66.0442%	66.0442%	49.1098%	35.5622%	35.5622%	28.3046%	15.2410%
55 %	78.2784%	57.8050%	57.8050%	42.0639%	27.8968%	27.8968%	21.9260%	10.5816%
50 %	72.6563%	49.2188%	49.2188%	35.1563%	21.0938%	21.0938%	16.4063%	7.0313%
45 %	66.2396%	40.5564%	40.5564%	28.5153%	15.2702%	15.2702%	11.7744%	4.4333%
40 %	59.0234%	32.1126%	32.1126%	22.2822%	10.4858%	10.4858%	8.0282%	2.6214%
35 %	51.0493%	24.1917%	24.1917%	16.6044%	6.7410%	6.7410%	5.1316%	1.4299%
30 %	42.4284%	17.0886%	17.0886%	11.6265%	3.9795%	3.9795%	3.0156%	0.7023%
25 %	33.3679%	11.0657%	11.0657%	7.4768%	2.0935%	2.0935%	1.5808%	0.2991%
20 %	24.2035%	6.3245%	6.3245%	4.2509%	0.9331%	0.9331%	0.7027%	0.1037%
15 %	15.4372%	2.9715%	2.9715%	1.9896%	0.3205%	0.3205%	0.2409%	0.0260%
10 %	7.7807%	0.9783%	0.9783%	0.6534%	0.0686%	0.0686%	0.0515%	0.0036%
5 %	2.2056 %	0.1356%	0.1356%	0.0904%	0.0046%	0.0046%	0.0035%	0.0001%

• Stage V

$$M_V = \frac{Q * t}{F_j * R} * 100\% = \frac{500 \text{ pc} * 198 \text{ s} / \text{pc}}{60000 \text{ s} * 75\%} * 100\% = 2.20 \Rightarrow 3 \quad (7)$$

Table 3 shows, for each structure, how many machines (including division into subsystems) are needed to produce 500 parts per day, assuming that the machines differ in reliability. As the results show, a decline in machine reliability makes it necessary to expand the machine park (increase the number of machine tools at each stage of the system). Although the structure of the RMS does allow one to add new machine tools to the system, such a procedure generates extra costs related to the purchase of machines, adjusting the transport subsystem, and finding additional space.

As can be seen from Fig. 12, the increase in the number of necessary machine tools is relatively independent of the type of production structure. However, it has (for each configuration) the nature of an exponential function. While in the case of 85% machine reliability, the number of necessary machine tools is 8–9, when reliability drops to 50%, the minimum number of machine tools increases to 16–18.

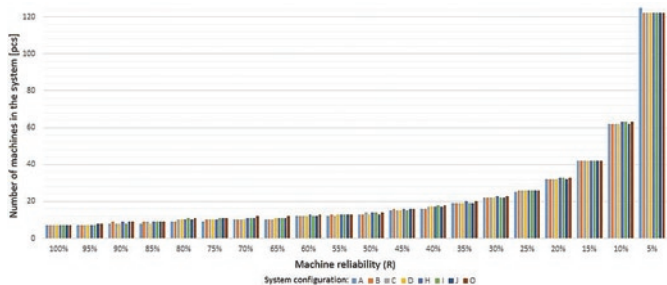


Fig. 12. Relationship between machine reliability (R) and the minimum number of machines in the system (M) required to execute the production plan

This means that there is a certain critical moment at which further expansion of the system becomes uneconomical.

An important issue, from the point of view of system operation in the planned life cycle, is also the reliability of the system which is being expanded as machine reliability declines. System reliabilities for the particular structures are shown in Fig. 13; they were calculated assuming that the system must be expanded to adjust its production capacity to demand (in the analyzed case, 500 parts/day).

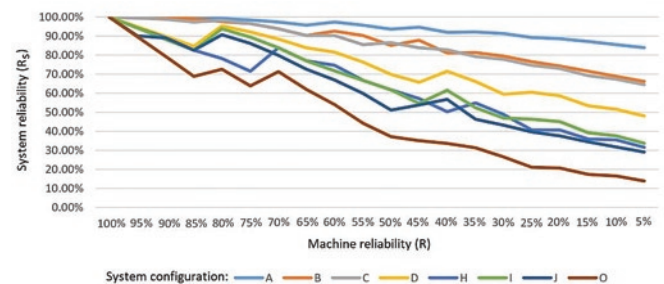


Fig. 13. Relationships between machine reliability (R) and reliability of the manufacturing system to which new machine tools are being added (R_s)

As can be seen from the graph above, despite the fact that new machine tools are being added as machine reliability decreases, the reliability of the system as a whole declines. While in the case of a two-stage system (configuration A), it only decreases to 83.92% (with machine reliability of 5%), in the case of a five-stage system (configuration O), system reliability drops to a dramatic 13.9%. This means that the type of production structure used directly determines the reliability of the reconfigurable manufacturing system being designed. Multi-stage systems are much more susceptible to decreases in reliability.

Table 3. Number of machine tools required for the implementation of the planned production program: (a) at individual stages of production, (b) in the entire manufacturing system

R	Configuration								
		A	B	C	D	H	I	J	O
100%	a)	2+5	2+2+3	2+3+2	2+1+4	2+2+1+2	2+1+2+2	2+1+1+3	2+1+1+1+2
	b)	7	7	7	7	7	7	7	7
95%	a)	2+5	2+2+3	2+3+2	2+1+4	2+2+1+2	2+1+2+2	2+1+2+3	2+1+2+1+2
	b)	7	7	7	7	7	7	8	8
90%	a)	3+5	3+3+3	3+3+2	3+1+4	3+3+1+2	3+1+2+2	3+1+2+3	3+1+2+1+2
	b)	8	9	8	8	9	8	9	9
85%	a)	3+5	3+3+3	3+4+2	3+1+4	3+3+1+2	3+1+3+2	3+1+2+3	3+1+2+1+2
	b)	8	9	9	8	9	9	9	9
80%	a)	3+6	3+3+3	3+4+3	3+2+5	3+3+1+3	3+2+3+3	3+2+2+3	3+2+2+1+3
	b)	9	9	10	10	10	11	10	11
75%	a)	3+6	3+3+4	3+4+3	3+2+5	3+3+1+3	3+2+3+3	3+2+2+4	3+2+2+1+3
	b)	9	10	10	10	10	11	11	11
70%	a)	3+7	3+3+4	3+4+3	3+2+5	3+3+2+3	3+2+3+3	3+2+2+4	3+2+2+2+3
	b)	10	10	10	10	11	11	11	12
65%	a)	3+7	3+3+4	3+4+3	3+2+6	3+3+2+3	3+2+3+3	3+2+2+4	3+2+2+2+3
	b)	10	10	10	11	11	11	11	12
60%	a)	4+8	4+4+4	4+5+3	4+2+6	4+4+2+3	4+2+3+3	4+2+2+4	4+2+2+2+3
	b)	12	12	12	12	13	12	12	13
55%	a)	4+8	4+4+5	4+5+3	4+2+7	4+4+2+3	4+2+4+3	4+2+2+5	4+2+2+2+3
	b)	12	13	12	13	13	13	13	13
50%	a)	4+9	4+4+5	4+6+4	4+2+7	4+4+2+4	4+2+4+4	4+2+2+5	4+2+2+2+4
	b)	13	13	14	13	14	14	13	14
45%	a)	5+10	5+5+6	5+6+4	5+2+8	5+5+2+4	5+2+4+4	5+2+3+6	5+2+3+2+4
	b)	15	16	15	15	16	15	16	16
40%	a)	5+11	5+5+6	5+7+5	5+3+9	5+5+2+5	5+3+5+5	5+3+3+6	5+3+3+2+5
	b)	16	16	17	17	17	18	17	18
35%	a)	6+13	6+6+7	6+8+5	6+3+10	6+6+3+5	6+3+5+5	6+3+3+7	6+3+3+3+5
	b)	19	19	19	19	20	19	19	20
30%	a)	7+15	7+7+8	7+9+6	7+3+12	7+7+3+6	7+3+6+6	7+3+4+8	7+3+4+3+6
	b)	22	22	22	22	23	22	22	23
25%	a)	8+17	8+8+10	8+11+7	8+4+14	8+8+3+7	8+4+7+7	8+4+4+10	8+4+4+3+7
	b)	25	26	26	26	26	26	26	26
20%	a)	10+22	10+10+12	10+13+9	10+5+17	10+10+4+9	10+5+9+9	10+5+5+12	10+5+5+4+9
	b)	32	32	32	32	33	33	32	33
15%	a)	13+29	13+13+16	13+18+11	13+6+23	13+13+5+11	13+6+12+11	13+6+7+16	13+6+7+5+11
	b)	42	42	42	42	42	42	42	42
10%	a)	19+43	19+19+24	19+26+17	19+9+34	19+19+8+17	19+9+18+17	19+9+10+24	19+9+10+8+17
	b)	62	62	62	62	63	63	62	63
5%	a)	37+85	37+37+48	37+52+33	37+17+68	37+37+15+33	37+17+35+33	37+17+20+48	37+17+20+15+33
	b)	125	122	122	122	122	122	122	122

4.2. Evaluation of expected productivity of the RMS under design

An important issue in designing a manufacturing system, apart from assessing its reliability, is to plan its production capacity, so that it can generate a specified volume of products. Considering the fact

that the level of machine reliability decreases over the entire period of operation, both system productivity and the number and utilization rate of machine tools making up the system will also change. These factors may also determine the selection of the production structure of a RMS.

Table 4. Results of simulation experiments for a two-stage manufacturing system

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Configuration A												
	2+5											
P	500	500	482	455	428	400	372	346	319	293	266	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.02%	82.38%	77.80%	73.08%	68.38%	63.96%	59.42%	54.86%	50.30%	45.70%	40.90%
	2+5	2+5	3+5	3+5	3+6	3+6	3+7	3+7	4+8	4+8	4+9	5+10
P	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.02%	85.00%	85.00%	70.87%	70.87%	60.73%	60.73%	53.15%	53.15%	47.24%	42.50%

R – machine reliability, P – number of manufactured products, M-I – mean workload of machine tools in the first production stage, M-II – mean workload of machine tools in the second production stage,

Table 5. Results of simulation experiments for a three-stage manufacturing system

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Configuration B												
	2+2+3											
P	500	500	479	450	422	388	357	331	310	273	264	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	92.50%	92.50%	89.60%	84.60%	79.60%	74.60%	69.60%	64.60%	59.60%	54.60%	49.60%	44.60%
M-III	80.03%	80.00%	76.83%	72.13%	67.77%	62.27%	57.43%	53.27%	50.03%	44.20%	42.50%	38.20%
	2+2+3	2+2+3	3+3+3	3+3+3	3+3+3	3+3+4	3+3+4	3+3+4	4+4+4	4+4+5	4+4+5	5+5+6
P	500	500	500	500	498	500	500	500	500	500	485	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-III	80.03%	80.00%	80.03%	80.03%	80.03%	60.00%	60.00%	60.00%	60.00%	47.98%	46.94%	39.97%
Configuration C												
	2+3+2											
P	500	500	481	454	430	400	373	346	319	292	265	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	86.63%	86.67%	84.03%	79.30%	74.90%	69.97%	65.27%	60.50%	55.87%	51.13%	46.47%	41.80%
M-III	82.50%	82.50%	79.60%	75.15%	71.15%	66.25%	61.70%	57.25%	52.75%	48.25%	43.85%	39.35%
	2+3+2	2+3+2	3+3+2	3+4+2	3+4+3	3+4+3	3+4+3	3+4+3	4+5+3	4+5+3	4+6+4	5+6+4
P	500	500	500	500	500	500	500	489	500	496	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	86.63%	86.67%	86.63%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	64.97%	52.00%	52.00%	42.77%	43.37%
M-III	82.50%	82.50%	82.50%	82.50%	55.00%	55.00%	55.00%	53.87%	55.00%	54.80%	41.25%	41.25%
Configuration D												
	2+1+4											
P	500	500	481	452	427	396	372	345	318	288	263	237
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	85.00%	85.00%	82.05%	77.35%	72.87%	68.00%	63.65%	59.05%	54.47%	49.60%	45.22%	40.65%
	2+1+4	2+1+4	3+1+4	3+1+4	3+2+5	3+2+5	3+2+5	3+2+6	4+2+6	4+2+7	4+2+7	5+2+8
P	500	500	500	495	500	500	500	500	500	500	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	52.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	85.00%	85.00%	85.00%	84.70%	68.00%	68.00%	68.02%	56.67%	56.65%	48.59%	48.59%	42.50%

R – machine reliability, P – number of manufactured products, M-I-M-III – mean workloads of machine tools in production stages I to III,

Table 6. Results of simulation experiments for a four-stage manufacturing system

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Configuration H												
	2+2+1+2											
P	500	500	480	451	421	390	360	329	297	267	242	218
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	92.50%	92.50%	89.60%	84.60%	79.60%	74.60%	69.60%	64.60%	59.60%	54.60%	49.60%	44.60%
M-III	75.00%	75.00%	72.20%	68.10%	64.10%	60.20%	56.10%	52.10%	48.10%	44.00%	40.00%	35.90%
M-IV	82.50%	82.50%	79.20%	74.00%	69.65%	64.55%	59.50%	54.55%	49.25%	44.25%	40.30%	36.30%
	2+2+1+2	2+2+1+2	3+3+1+2	3+3+1+2	3+3+1+3	3+3+1+3	3+3+2+3	3+3+2+3	4+4+2+3	4+4+2+3	4+4+2+4	5+5+2+4
P	500	500	500	500	500	490	500	500	500	461	484	488
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%
M-II	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%
M-III	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	37.50%	37.55%	37.50%	37.50%	37.50%	37.50%
M-IV	82.50%	82.50%	82.50%	82.50%	55.00%	54.13%	55.00%	55.00%	55.00%	50.83%	40.30%	40.60%
Configuration I												
	2+1+2+2											
P	500	500	481	454	427	400	372	345	318	291	262	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	87.50%	87.55%	84.60%	79.90%	75.20%	70.40%	65.65%	60.95%	56.20%	51.50%	46.55%	42.00%
M-IV	82.50%	82.55%	79.45%	75.00%	70.55%	66.10%	61.60%	57.15%	52.70%	48.20%	43.50%	39.35%
	2+1+2+2	2+1+2+2	3+1+2+2	3+1+3+2	3+2+3+3	3+2+3+3	3+2+3+3	3+2+3+3	4+2+3+3	4+2+4+3	4+2+4+4	5+2+4+4
P	500	500	500	494	500	500	500	500	489	498	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	42.00%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	87.50%	87.55%	87.50%	58.37%	58.37%	58.37%	58.37%	58.37%	58.37%	43.80%	43.80%	43.80%
M-IV	82.50%	82.55%	82.50%	81.75%	55.00%	55.03%	55.00%	55.00%	54.10%	55.00%	41.27%	41.30%
Configuration J												
	2+1+1+3											
P	494	472	447	421	396	371	343	307	279	270	245	205
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	99.50%	95.00%	90.20%	85.20%	80.20%	75.10%	70.10%	65.00%	60.00%	54.90%	49.90%	44.90%
M-IV	79.33%	75.70%	71.90%	67.83%	63.67%	59.57%	55.10%	49.43%	45.03%	43.57%	39.57%	33.30%
	2+1+1+3	2+1+2+3	3+1+2+3	3+1+2+3	3+2+2+3	3+2+2+4	3+2+2+4	3+2+2+4	4+2+2+4	4+2+2+5	4+2+2+5	5+2+3+6
P	494	500	500	495	498	500	500	498	493	500	465	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	42.50%	42.50%	42.55%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	99.50%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	49.90%	50.00%	49.90%	33.30%
M-IV	79.33%	80.00%	80.03%	79.36%	80.03%	60.00%	60.00%	59.95%	59.45%	47.98%	45.10%	39.98%

R – machine reliability, P – number of manufactured products, M-I–M-IV – mean workloads of machine tools in production stages I to IV

Table 7. Results of simulation experiments for a five-stage manufacturing system

R	Configuration O											
	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
P	494	472	442	413	386	361	334	305	280	256	226	200
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	99.50%	95.00%	90.20%	85.20%	80.20%	75.10%	70.10%	65.00%	60.00%	54.90%	49.90%	44.90%
M-IV	74.50%	71.10%	67.50%	63.70%	59.30%	54.90%	50.60%	46.20%	42.20%	38.60%	35.10%	31.70%
M-V	81.70%	77.95%	73.10%	68.40%	64.00%	59.90%	55.30%	50.00%	46.20%	42.25%	37.45%	33.10%
P	494	500	500	485	500	496	500	500	500	459	452	488
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	99.50%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	49.90%	33.30%
M-IV	74.50%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	37.55%	37.55%	37.50%	37.50%	35.10%	37.50%
M-V	81.70%	82.00%	82.50%	80.30%	55.00%	54.70%	55.03%	55.00%	55.00%	50.77%	37.50%	40.60%

R – machine reliability, P – number of manufactured products, M-I-M-V – mean workloads of machine tools in production stages I to V

To assess how the decrease in machine reliability affects the expected productivity of the RMS under design, computer simulation analyses were conducted, which are one of the basic tools used in this type of problems [15,36]. Simulations were performed using Enterprise Dynamics 7.0 software from Incontrol Simulation Solutions. A model of the system was developed for each of the production structures (Figure 14), and simulation of production was performed for a period corresponding to the working time per day (60,000 seconds), in which the reliability of machine tools was reduced in 5% increments. Aspects related to the operation of the transport and storage subsystems were ignored.

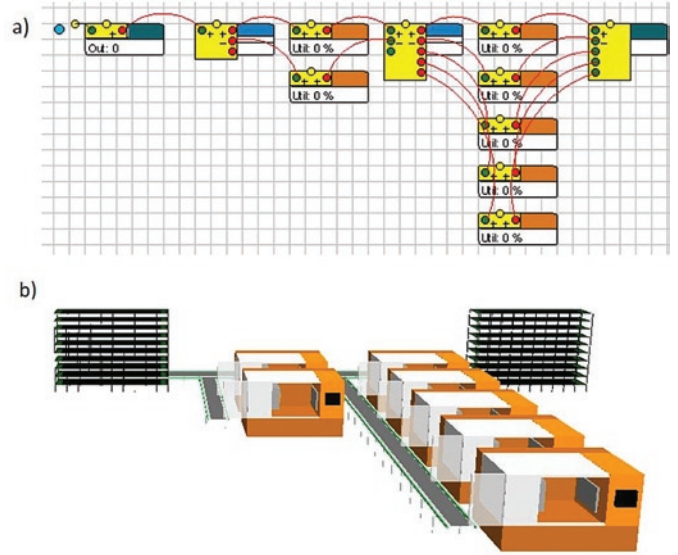


Fig. 14. Example of a simulation model for configuration A developed using Enterprise Dynamics software: a) a 2D model of the machine tool sub-system, b) 3D visualization of the system

Productivity analyses were carried out for:

- systems with a baseline structure in which all machines and devices were characterized by 100% reliability (see Section 3).
- expanded systems to which new machine tools were added as the reliability of the machines and devices already in use decreased (see Table 3).

In the case of the “expanded” systems, simulation experiments were carried out for structures containing a maximum of 16 machine tools with reliabilities of not less than 45%. To assess the reproducibility of the obtained results, the simulation experiments were carried out in five replicates for each system. Mean results are shown in Tables 4–7.

As the results show, the expected system productivity decreases with the declining reliability of the machines in the machine tool sub-system (Fig. 15). Nevertheless, in contrast to system reliability, the decrease in expected productivity is similar for each of the analyzed structures and is almost proportional (see Fig. 10). This means that

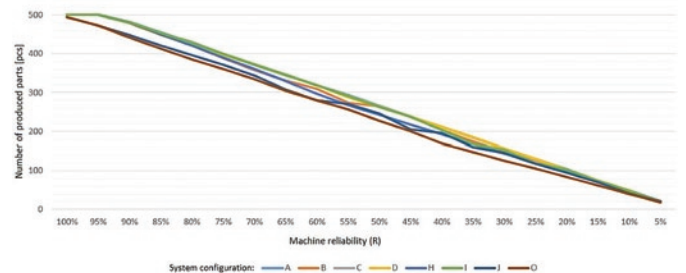


Fig. 15. Relationship between the number of manufactured products (P) and the reliability of the machines in the machine tool subsystem (R)

in designing an RMS, it is not enough to analyze system reliability alone, because such an analysis does not provide a full picture of attainable productivity, which is a fundamental issue from the point of view of system operation.

The key problem is the fact that expansion does not always allow the system to generate a specified volume of products. It is possible then that despite methodological correctness of the design, the system will not have enough production capacity to meet the current demand. This means that the analytical methods used at the stage of system design are insufficient, and the results obtained with their use must be verified using simulation methods.

In the case under analysis, the only configuration that ensures a required production capacity is configuration A. Taking into account the results of the reliability analyses (Section 4.1) – this structure is the preferred one as it guarantees stable production over the entire lifetime of the system.

5. Conclusions and further research

Selection of the right production structure is the key element in the process of designing any manufacturing system as what structure is used has long-term implications for the efficiency, productivity and operating costs of the system being designed. This also applies to reconfigurable manufacturing systems, which are currently one of the main focuses of research in the area of designing modern production systems.

In the present study, an attempt was made to assess the structures of a designed RMS system from the point of view of changes in the reliability of its component machines. As the analyses show, the type of system configuration has a direct impact on the reliability of the

system as a whole. System reliability changes in a disproportionate way along with changing reliability of the machines and production equipment which make up the system. Importantly, as demonstrated by the simulation experiment, changes in system reliability are not reflected in the system's expected productivity, which (although it does decline with decreasing machine reliability) is relatively independent of the type of production structure. Importantly, a system which theoretically can reach the required level of efficiency may not be able to attain the assumed production volume. To verify the productivity of the designed system and eliminate errors which cannot be identified using analytical methods, one needs to perform simulation tests.

The present results also show that RMS structures with fewer production stages are the preferred type of structure because they ensure process stability. Unfortunately, these structures are based on multi-task machine tools, which automatically makes them more expensive. Therefore, the process of selecting production structures should be accompanied by multicriteria analyses, which make it possible to minimize the costs of constructing and operating the system, while taking into account the required performance characteristics as well as operational, technical and organizational limitations.

As part of further research, we plan to carry out performance analyses taking into account the varied reliability of machines and devices (especially in the process of expanding an RMS) and the impact of the reliability of means of internal transport on the productivity of a designed reconfigurable manufacturing system.

References

- Andersen A-L, Larsen J K, Brunoe T D, Nielsen K, Ketelsen C. Critical enablers of changeable and reconfigurable manufacturing and their industrial implementation. *Journal of Manufacturing Technology Management* 2018; 29(6): 983-1002, <http://dx.doi.org/10.1108/JMTM-04-2017-0073>.
- Antosz K. Maintenance – identification and analysis of the competency gap. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (3): 484–494, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.3.19>.
- Anzanello M J, De Oliveira Lemos F. Reliability Evaluation and Component Allocation in Series and Parallel Systems Consisting of Non-Identical Three-State Component. XIV International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. The integration of productive chain with an approach to sustainable manufacturing. Rio de Janeiro, Brazil, 13 to 16 October 2008.
- Battini D, Faccio M, Ferrari E, Persona A, Sgarbossa F. Design configuration for a mixed model assembly system in case of low product demand. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007; 34(1-2): 188-200, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0576-5>.
- Bensmaine A, Dahane M, Benyoucef L. A non-dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment. *Computers and Industrial Engineering* 2013; 66(3): 519-524, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2012.09.008>.
- Bi Z, Lang S, Shen W. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. *International Journal of Production Research* 2008; 46(4): 967-992, <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600905646>.
- Cohen Y, Faccio M, Galizia F G, Mora C, Pilati F. Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms. *IFAC PapersOnLine* 2017; 50(1): 14958-14963, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2550>.
- Dahane M, Menyoucef L. An adapted NSGA-II algorithm for a Reconfigurable manufacturing system (RMS) design under machines reliability constraints. *Metaheuristics for Production Systems*; 60: 109-130, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23350-5_5.
- Daniewski K, Kosicka E, Mazurkiewicz D. Analysis of the Correctness of Determination of the Effectiveness of Maintenance Service Actions. *Management and Production Engineering Review* 2018; 9 (2): 20-25, <http://dx.doi.org/10.24425/119522>.
- Delorme X, Malyutin S, Dolgui A. A multi-objective approach for design of reconfigurable transfer lines. *IFAC-PapersOnLine* 2016, 49(12): 509-514, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.675>.
- Dou J, Dai X, Meng Z. A GA-based approach for optimizing single-part flow-line configurations of RMS, *Journal of Intelligent Manufacturing* 2011; 22(2): 301-317, <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-009-0305-7>.
- Dou J, Dai X, Meng Z. Optimisation of multi-part flow-line configuration of reconfigurable manufacturing system using GA. *International Journal of Production Research* 2010; 48(14): 4071-4100, <http://dx.doi.org/10.1080/00207540903036305>.
- ElMaraghy H A. Flexible and Reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Manufacturing Systems* 2005; 17(4): 261-276, <http://dx.doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>.
- Esmailian B, Behdad S, Wang B. The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems* 2016; 39,

- 79-100, <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>.
15. Gola A, Wiechetek L. Modelling and simulation of production flow in job-shop production system with Enterprise Dynamics software. *Applied Computer Science* 2017; 13(4): 87-97, <http://dx.doi.org/10.23743/acs-2017-32>.
 16. Gola A. Economic Aspects of Manufacturing Systems Design. *Actual Problems of Economics* 2014; 156 (6): 205-212.
 17. Gola A, Świć A. Economic analysis of manufacturing systems configuration in the context of their productivity. *Actual Problems of Economics* 2014; 162(12): 385:394.
 18. Gola A, Świć A. Reconfigurable manufacturing systems as a way of long-term economic capacity management. *Actual Problems of Economics* 2015; 166(4): 15-22.
 19. Goyal K K, Jain P K, Jain M. Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing systems using NSGA II and TOPSIS. *International Journal of Production Research* 2012; 50(15): 4175-4191.
 20. Haddou Benderbal H, Dahane M, Benyoucef L. Flexibility-based multi-objective approach for machines selection in reconfigurable manufacturing system (RMS) design under unavailability constraints. *International Journal of Production Research* 2017; 55(20): 6033-6051: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2017.1321802>.
 21. Hsieh F-S. Design of scalable agent-based Reconfigurable manufacturing systems with Petri nets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 2018; 31(8): 748-759; <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2018.1429665>.
 22. Jasiulewicz-Kaczmarek M. Practical aspects of the application of RCM to select optimal maintenance policy of the production line. In: Nowakowski, T; Mlynczak, M; Jodejko-Pietruczuk, A; et al. *Safety and Reliability: Methodology and Applications - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference 2015*: 1187-1195, <http://dx.doi.org/10.1201/b17399-165>.
 23. Koren Y. The Rapid Responsiveness of RMS. *International Journal of Production Research*; 51(23-24): 6817-6827, <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.856528>.
 24. Koren Y, Arbor A, Kota S. United States Patent, no. US 6 349 237, 2000.
 25. Koren Y, Gu X, Guo W. Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering* 2018; 13(2): 121-136, <http://dx.doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>.
 26. Koren Y, Heisel U, Jovane F, Morivaki T, Pritschow G, Ulsoy G, Van Brussel H. *Reconfigurable Manufacturing Systems*. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 1999; 48(2): 527-540.
 27. Koren Y, Hu S J, Weber T W. Impact on manufacturing system configuration on performance. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 1998; 47(1): 369-370.
 28. Koren Y, Shpitalni M. Design of Reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 2010; 29(4): 130-141, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.01.001>.
 29. Kosicka E, Kozłowski E, Mazurkiewicz D. Intelligent systems of forecasting the failure of machinery park and supporting fulfilment of orders of spare parts. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 2018; 637: 54-63, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-64465-3_6.
 30. Li G Q, Mitrouchev P, Wang Y, Brissaud D, Lu L. Evaluation of the logic model of the reconfigurable manufacturing system based on generalised stochastic Petri nets. *International Journal of Production Research* 2012; 50(22): 6249-6258, <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.6162235>.
 31. Maganha I, Silva C, Ferreira L M D F. Understanding reconfigurability of manufacturing systems: An empirical analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 2018; 48: 120-130, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.07.004>.
 32. Mehrabi M, Ulsoy G, Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2000; 11(4): 403-419, <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008930403506>.
 33. Mittal K K, Jain P K. An Overview of Performance Measures in Reconfigurable Manufacturing System. *Procedia Engineering* 2014; 69: 1125-1129, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.100>.
 34. Moghaddam S K, Houshmand M, Fatahi Valilai O. Configuration design in scalable reconfigurable manufacturing systems (RMS); a case of single-product flow line (SPFL). *International Journal of Production Research* 2018; 56(11): 3932-3954, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9243-7>.
 35. Napoleone A, Pozetti A, Macchi M. A framework to manage reconfigurability in manufacturing, *International Journal of Production Research* 2018; 56(11): 3815-3837, <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2018.1437286>.
 36. Negahban A, Smith S J. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 2014; 33(2): 241-261, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>.
 37. Puik E, Telgen D, Van Moergestel L, Ceglarek D. Assessment of reconfiguration schemes for Reconfigurable Manufacturing Systems based on resources and lead time. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2017; 43: 30-38, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.011>.
 38. Renna P. Decision-making method of reconfigurable manufacturing systems' reconfiguration by a Gale-Shapley model. *Journal of Manufacturing Systems* 2017; 45: 149-158, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.09.005>.
 39. Reza Abdi M. Layout configuration selection for Reconfigurable manufacturing systems using the fuzzy AHP. *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 2009; 17(1-2): 149-165.
 40. Singh A, Gupta S, Asjad M, Gupta P. Reconfigurable manufacturing systems: journey and the road ahead. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 2017; 8(2): 1849-1857, <http://dx.doi.org/10.1007/s13198-017-0610-z>.
 41. Spicer P, Koren Y, Shpitalni M, Yip-Hoi D. Design principles for machining system configurations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2002; 51(1): 275-280, [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61516-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61516-9).
 42. Wang G X, Huang S H, Yan Y, Du J J. Reconfiguration schemes evaluation based on preference ranking of key characteristics of reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017; 89 (5-8): 2231-2249, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9243-7>.
 43. Waters D. *Operations Management: Producing Goods and Services*, Pearson Education 2002.
 44. Xiaobo Z, Wang J, Luo Z. A stochastic model of a Reconfigurable manufacturing system, Part 2: Optimal configurations. *International Journal of Production Research* 2000; 38(12): 2829-2842, <https://dx.doi.org/10.1080/002075400411501>.
 45. Yamada Y. Dynamic reconfiguration of reconfigurable manufacturing systems using particle swarm optimization. *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2006: 1444-1449, <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1641912>.

46. Zheng P, Wang H, Sang Z, Zhong R Y, Liu Y, Liu C, Mubarak K, Yu S, Xu X. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering* 2018; 13(2): 137-150, <http://dx.doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>.

Arkadiusz GOLA

Faculty of Mechanical Engineering

Lublin University of Technology

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland

e-mail: a.gola@pollub.pl

Dr inż. Arkadiusz Gola

Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
Ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland
e-mail: a.gola@pollub.pl

Analiza niezawodnościowa struktur rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego z wykorzystaniem metod symulacji komputerowej

Słowa kluczowe: *rekonfigurowalny system produkcyjny, RMS, konfiguracja, struktura produkcyjna, niezawodność, symulacje, Enterprise Dynamics*

Streszczenie: Wybór odpowiedniej struktury produkcyjnej (konfiguracji) stanowi jeden z ważniejszych kroków w procesie projektowania rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego (RMS). Możliwość osiągnięcia zakładanych parametrów wydajnościowych planowanego do realizacji procesu produkcyjnego jest uzależniona m.in. od stopnia niezawodności maszyn i urządzeń technologicznych wchodzących w skład projektowanego systemu. Zróżnicowany poziom niezawodności poszczególnych elementów systemu produkcyjnego powoduje, iż niezawodność systemu jako całości w dużej mierze zależy od sposobu ich konfiguracji. W niniejszym artykule przedstawiono proces wyboru struktury systemu produkcyjnego pod kątem możliwości zachowania stabilności procesu produkcyjnego wraz ze zmianą stopnia niezawodności maszyn technologicznych wchodzących w skład systemu. Jako obiekt badań przyjęto projektowany system produkcyjny dedykowany do obróbki części klasy korpus. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metod analitycznych oraz metod symulacji komputerowej. Jako narzędzie symulacji wykorzystany został system Enterprise Dynamics.

1. Wprowadzenie

Obecne działania w zakresie projektowania i instalowania systemów produkcyjnych ukierunkowane są na wzrost ich efektywności, elastyczności i zamienności [2]. Jest to efektem postępującej indywidualizacji potrzeb klientów, presji konkurencyjnej o zasięgu globalnym oraz niespotykanym w ostatnich dekadach postępowaniem technicznym i technologicznym [14]. Konieczność sprostaną rosnącym wymaganiom rynku nakłada konieczność nie tylko opracowywania nowych metod i technik organizacji i zarządzania produkcją, ale także poszukiwania nowych form organizacji systemów produkcyjnych, umożliwiających osiągnięcie tych celów [16].

W świetle perspektyw rozwoju przemysłu zgodnego z paradygmatami Przemysłu 4.0, jednym z działań mogących zapewnić sukces przedsiębiorstwom produkcyjnym jest implementacja koncepcji rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych (RMS), które łączą w sobie korzyści charakterystyczne dla klasycznych linii produkcyjnych, jak też elastycznych systemów produkcyjnych – a tym samym stawiają czoła wymaganiom stawianym współczesnym systemom wytwórczym [25,46]. Idea rekonfigurowalnych systemów

produkcyjnych powstała w połowie lat 90-tych XX wieku jako odpowiedź na wyzwania niesione przez postępującą globalizację [26]. Od tego momentu w wielu ośrodkach naukowych, badawczych i przemysłowych trwają nieustanne prace nad opracowaniem metod projektowania systemów wytwórczych o dynamicznej strukturze produkcyjnej – umożliwiającej jej dostosowanie do bieżących potrzeb rynkowych [40].

W procesie projektowania RMS zagadnieniem o kluczowym znaczeniu pozostaje wybór odpowiedniej struktury produkcyjnej, która umożliwi produkcję wyrobów z zakładaną wydajnością, przy jednoczesnym zachowaniu pryncypiów rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego [31,33]. Dlatego też problematyka ta jest od kilkunastu lat przedmiotem wielu prac badawczych. Ogólne założenia dotyczące problematyki optymalnego wyboru konfiguracji RMS zostały przedstawione w pracach [34,41,44]. Metody doboru maszyn technologicznych dla rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych zaproponowali A. Bensmailne, M. Dahane, L. Beouncef [5] oraz H. Haddou Benderbal, M. Dahane i L. Benyoucef [20]. M. Reza Abdi opracował model oparty na metodzie AHP (*Analytical Hierarchical Process*), umożliwiający strukturalizowanie kryteriów dla potrzeb rozmieszczenia maszyn w strukturze RMS [39]. G.Q. Li, P. Mitrouchev, Y. Wang, D. Brissand oraz L. Lu zaproponowali metodę optymalnego wyboru konfiguracji RMS opartą o sieci Petriego [30]. Podobnie sieci Pietriego połączone z teorią optymalizacji Lagrange'a zostały wykorzystane w podejściu zaproponowanym przez F.-S. Hsieh'a [21]. Problematyką optymalnego wyboru konfiguracji RMS zajmowali się również K.K. Goyal, P.K. oraz M. Jain, którzy do tego celu wykorzystali metody optymalizacji wielokryterialnej NSGA II oraz TOPSIS [19]. Proces wyboru struktury produkcyjnej rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego pod kątem maksymalizacji produktywności projektowanego systemu został przedstawiony w pracy [17]. Istota optymalizacji przepływu w wyselekcjonowanych konfiguracjach RMS była również przedmiotem badań prowadzonych przez J. Dou, X. Dai oraz Z. Meng'a [11,12], a także X. Delorme, S. Malyutin'a oraz A. Dolgoui [10]. Ponadto, w literaturze znaleźć można rezultaty prac w zakresie analizy i wyboru konfiguracji dla rekonfigurowalnych systemów montażowych [4,7].

Obok problematyki wyboru optymalnej struktury produkcyjnej, wśród dostępnych publikacji zaczynają się także pojawiać opracowania dotyczące problematyki rekonfiguracji istniejącej struktury RMS – co jest odzwierciedleniem wymogu dynamicznej zmiany zdolności produkcyjnych takiego systemu [18]. Przegląd literatury wraz z propozycją ogólnych założeń w zakresie rekonfiguracji opartej o ocenę cyklu życia i wielu poziomów w procesie projektowania systemu został przedstawiony w pracy [35]. Kryteria i proces oceny rekonfiguracji istniejących systemów zaprezentowali G.X. Wang, S.H. Huang, Y. Yan i J.J. Du [42] a także E. Puik, D. Telgen, L. Van Moergestel i D. Ceglarek [37]. Interesującą metodę podejmowania decyzji w zakresie rekonfiguracji struktury produkcyjnej RMS z wykorzystaniem modelu Gale-Shapley'a przedstawił P. Renna [38], podczas gdy Y. Yamana do tego celu zaś wykorzystał metodę roju cząstek (PSO) [45].

Niestety w przypadku wszystkich z powyżej wymienionych publikacji, zaprezentowane w nich rozwiązania uwzględniają założenie 100% niezawodności poszczególnych maszyn i urządzeń technologicznych wchodzących w skład projektowanego systemu. Fakt ten nakłada ograniczenia w zakresie ich praktycznej implementacji w warunkach przemysłowych – w rzeczywistości bowiem niezawodność poszczególnych elementów nigdy nie osiąga wartości 100 %, a tym samym system jako całość również posiada niezawodność niższą od nominalnej, co w bezpośredni sposób wpływa na produktywność, wydajność i koszt realizowanej produkcji [29]. Co prawda M. Dahane i L. Benyoucef w swojej pracy [8] zwrócili uwagę na kwestię niezawodności w procesie projektowania rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych – niemniej jednak skupili się wyłącznie na problematyce doboru maszyn do projektowanego systemu. Tym samym brak jest wyników badań pokazujących w jaki sposób zmiana poziomu

niezawodności maszyn technologicznych wpływa na poziom niezawodności i stopień oczekiwanej produktywności rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego.

W niniejszej pracy skupiono się na problematyce wpływu struktury produkcyjnej projektowanego systemu na poziom niezawodności i produktywności systemu klasy RMS w zależności od poziomu niezawodności maszyn technologicznych wchodzących w skład projektowanej struktury. W szczególności w artykule zaproponowano metodę wariantowania struktur produkcyjnych rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego wykorzystującą metodę analitycznego szacowania niezawodności struktur systemów oraz metodę symulacji komputerowej. Istotą zaproponowanego podejścia jest umożliwienie wyboru struktury RMS odpowiadającej oczekiwany charakterystykom determinującym niezawodność i produktywność projektowanego systemu. Jako kryteria oceny w procesie wariantowania przyjęto poziom niezawodności systemu jako całości, poziom produktywności systemu oraz stopień wykorzystania maszyn i urządzeń wchodzących w skład podsystemu wytwarzania projektowanego RMS.

2. Istota i założenia projektowe rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych

Pod pojęciem *rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego (RMS)* rozumie się system produkcyjny zaprojektowany pod kątem możliwości szybkiego dostosowania funkcjonalności i posiadanych zdolności produkcyjnych do zadań wynikających ze zmiennego zapotrzebowania rynku poprzez zmianę struktury systemu zarówno w sferze urządzeń produkcyjnych, jak i oprogramowania [26]. Koncepcja RMS powstała w Centrum Badań Inżynierskich w Uniwersytecie Michigan (Stany Zjednoczone Ameryki Północnej) i została wprowadzona w życie w 1999 r. jako odpowiedź na nowe wyzwania rynku przejawiające się m.in. w [6]:

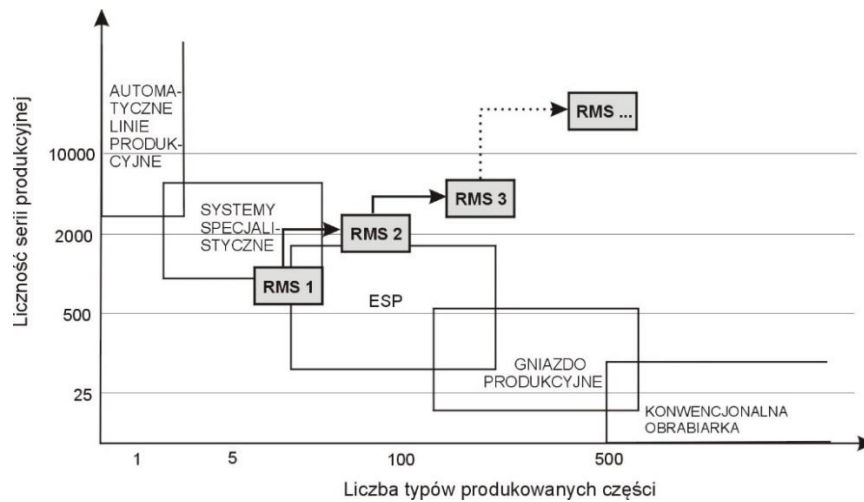
- konieczności skracania czasu wprowadzenia nowego produktu na rynek,
- większym zróżnicowaniu asortymentowym wyrobów wymaganych przez klientów,
- mniejszych i zmiennych wolumenach produkcji,
- konieczności obniżania cen produkowanych wyrobów.

Do podstawowych cech rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego zalicza się [32]:

- *Modułowość* – oznaczająca, że wszystkie główne składniki systemu (zarówno sprzęt, jak i oprogramowanie) mają budowę modułową. Modułowość umożliwia, w przypadku zaistnienia takiej potrzeby, łatwą zmianę struktury systemu lub urządzenia w celu możliwie najlepszego dopasowania do aktualnych wymagań produkcyjnych.
- *Integralność* – zdolność do szybkiej i precyzyjnej integracji modułów poprzez zbiór mechanicznych, informatycznych i kontrolnych połączeń umożliwiających ich integrację i komunikację.
- *Racjonalność* – rozumianą poprzez projektowanie systemu ze ścisłym ukierunkowaniem na zapewnienie elastyczności rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego na poziomie ściśle dostosowanym do aktualnych potrzeb produkcyjnych.
- *Zmienność* – zdolność do szybkiej zmiany funkcjonalności istniejącego systemu, maszyn i sterowników w celu dostosowania się do nowych zadań produkcyjnych.
- *Skalowalność* – zdolność do łatwej zmiany poziomu zdolności produkcyjnych RMS poprzez zmianę struktury rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego lub zmianę zdolności produkcyjnych określonych elementów wchodzących w skład RMS.
- *Diagnozowalność* – zdolność do automatycznego odczytu aktualnego stanu systemu oraz możliwość wykrywania i diagnozowania przyczyn powstawania braków produkcyjnych oraz natychmiastowego podjęcia działań korygujących.

Dzięki racjonalności rekonfigurowalne systemy produkcyjne posiadają funkcjonalność i zdolność produkcyjną ściśle dostosowaną do aktualnych zadań produkcyjnych. Posiadają tym samym minimalny wymagany poziom elastyczności ograniczając koszty inwestycyjne. Dzięki

budowie modułowej, integralności, skalowalności i zmienności mogą być jednak szybko przeprojektowywane uzyskując nowy, pożądany poziom funkcjonalności i zdolności produkcyjnych dostosowany do nowych wymagań rynku (rys. 1).

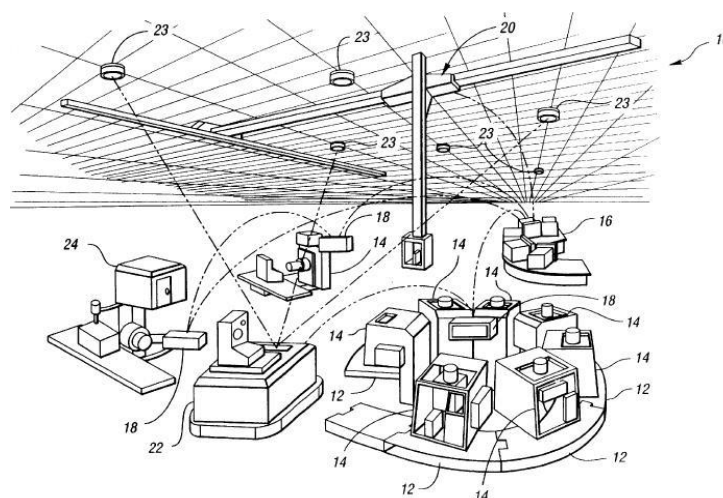


Rys. 1. Funkcjonalność RMS na tle innych systemów produkcyjnych

Podstawową cechą rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych jest ich struktura umożliwiająca szybką zmianę konfiguracji sprzętu i oprogramowania w celu uzyskania określonego poziomu funkcjonalności i zdolności produkcyjnych dostosowanych do aktualnych zadań produkcyjnych.

W skład rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego wchodzi stanowiska robocze w postaci rekonfigurowalnych obrabiarek, systemu sterowania zawierającego rekonfigurowalne sterowniki sterujące rekonfigurowalnymi obrabiarkami oraz rekonfigurowalny podsystem transportu i manipulacji nadzorowany przez system sterowania, umożliwiający zautomatyzowany transport materiałów i części obrabianych w obszarze RMS. Zarówno rekonfigurowalne maszyny technologiczne, jak i sterowniki mają budowę modułową umożliwiającą szybką i niezawodną integrację w celu zmiany struktury systemu.

Przykład rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Rekonfigurowalny system produkcyjny [24]

W skład systemu (10) wchodzi stanowiska robocze (12) zawierające rekonfigurowalne maszyny obróbkowe (14). System zawiera również w swojej strukturze system sterowania wraz

ze stanowiskiem operatora (16) i rekonfigurowalnymi sterownikami (18), które komunikują się ze sobą, co zostało zobrazowane za pomocą przerywanych linii. Ponadto w strukturze systemu znajduje się system manipulacji, w skład którego wchodzi robot bramowy (20), co najmniej jeden wózek bezprzewodowy AGV (22) oraz układ nadajników i odbiorników antenowych (23) komunikujących się z wózkiem AGV (22). Wózek AGV posiada również łączność z przynajmniej jednym rekonfigurowalnym sterownikiem (18).

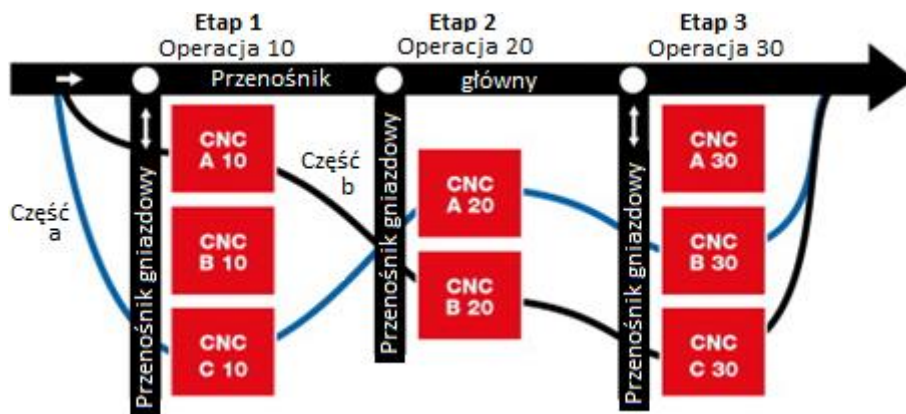
Rekonfigurowalne systemy produkcyjne umożliwiają integrację z innymi nowoczesnymi urządzeniami produkcyjnymi takimi jak urządzenia obróbki laserowej (24) posiadające własne rekonfigurowalne sterowniki pozostające w łączności ze stanowiskiem operatora (16) oraz pozostałymi sterownikami w systemie [24].

3. Problematyka projektowania struktur produkcyjnych RMS

Systemy produkcyjne mogą być projektowane w wielu układach (konfiguracjach), tj. szeregowych, równoległych lub hybrydowych. Różne konfiguracje mają znaczący wpływ nie tylko na możliwość dostosowania produkcji do potrzeb rynku, ale także na niezawodność, produktywność, jakość oraz koszty produkcji [27]. Dlatego też istotnym pozostaje wybór odpowiedniej struktury produkcyjnej już na etapie projektowania systemu – rodzaj struktury nie może być bowiem przedmiotem zmiany w trakcie okresu eksploatacji systemu [25].

Zgodnie z definicją, rekonfigurowalny system produkcyjny jest projektowany pod kątem możliwości szybkiego dostosowywania funkcjonalności i zdolności produkcyjnych do zadań wynikających ze zmiennego zapotrzebowania rynku przez zmianę struktury systemu zarówno w sferze urządzeń produkcyjnych, jak i oprogramowania (zob. pkt. 2). Aby możliwa była dynamiczna zmiana zdolności produkcyjnej, struktura projektowanego systemu musi spełniać warunki możliwości szybkiej zmiany funkcjonalności istniejącego systemu w celu dostosowania się do nowych zadań produkcyjnych. Struktura ta musi więc charakteryzować się modułowością, a tym samym umożliwiać łatwe dodanie lub usunięcie maszyny technologicznej bez konieczności ingerencji w całościową zmianę struktury produkcyjnej i funkcjonowania systemu [1].

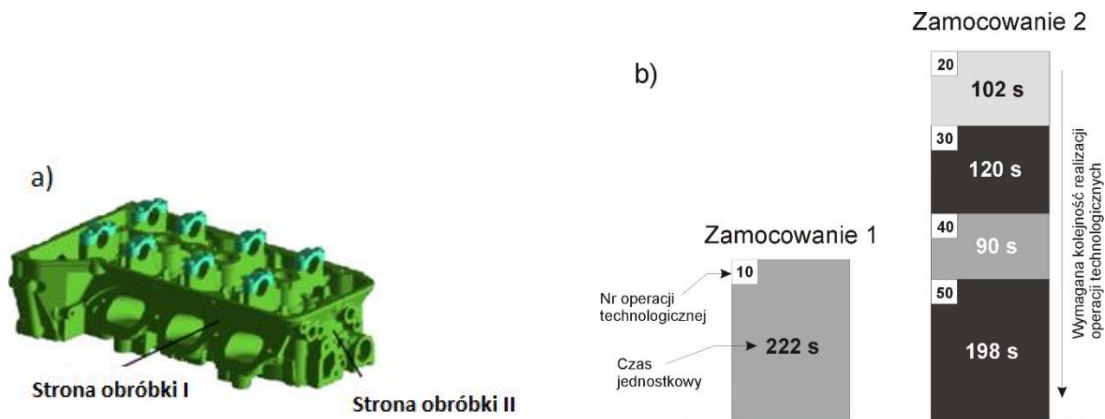
Zgodnie z istotą i założeniami rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych struktura RMS jest strukturą umożliwiającą wieloetapową obróbkę części z jednoczesną zamiennością maszyn technologicznych na poszczególnych etapach realizacji procesu produkcyjnego [13]. Przykład takiej struktury zaczerpnięty z konkretnego przedsiębiorstwa ze Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej, zajmującego się produkcją zespołów napędowych został pokazany na rys. 3.



Rys. 3. Struktura funkcjonalna rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego [1]

Jest to system, w którym proces produkcyjny realizowany jest w trzech etapach i umożliwia jednoczesną obróbkę dwóch różnych części (a, b). Przenośnik rolkowy obsługuje wszystkie obrabiarki znajdujące się w jednym z etapów procesu – dostarcza półfabrykaty na poszczególne obrabiarki, odbiera wyroby po obróbce oraz dostarcza do buforów międzyoperacyjnych (oznaczonych na rysunku 3 białymi kropkami). Funkcje bufora pełnić może przenośnik rolkowy lub kilka lub kilkanaście wózków AGV. Obrabiarki w każdym z etapów procesu są zawsze identyczne [13].

W ramach niniejszego opracowania analizie poddano proces selekcji struktur rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego przedstawionego w pozycji [23]. Zaprezentowany przykład dotyczył procesu projektowania systemu klasy RMS dedykowanego do obróbki części klasy korpus (rys. 4), którego proces technologiczny obejmował pięć operacji technologicznych wykonywanych w minimum dwóch zamocowaniach (rys 4 b). Zgodnie ze zdefiniowanymi założeniami projektowany system powinien być zdolny do produkcji 500 szt. części dziennie. Efektywny fundusz czasu pracy projektowanego systemu produkcyjnego (F_j) wynosił 60 000 sekund/dzień.



Rys. 4. Informacje o przedmiocie będącym przedmiotem obróbki: a) ogólny schemat wyrobu, b) struktura procesu technologicznego [23]

Produkcja 500 części w czasie 60 000 sek. oznacza, iż dopuszczalny maksymalny takt produkcji nie może przekraczać $\tau_{\max} = 120 \text{ s/szt.}$ W pierwszym kroku należy więc ustalić minimalną niezbędną liczbę maszyn (M), która umożliwi zrealizowanie produkcji na zakładanym poziomie. Do tego celu można wykorzystać formułę (1) [28]:

$$M = \frac{Q * t}{F_j * R} \cdot 100\% = \frac{500 \text{ szt.} * 732 \text{ s / szt.}}{60000 \text{ s} \cdot 100\%} * 100\% = 6,1 \quad (1)$$

gdzie: Q – wymagana dzienna produkcja [szt.], t – czas obróbki [s/szt.], F_j – dzienny efektywny fundusz czasu pracy [s], R – niezawodność maszyny [%].

W analizowanym przypadku, przy założonej 100% niezawodności maszyn wchodzących w skład systemu niezbędna minimalna liczba maszyn wynosi 7, co oznacza możliwą liczbę konfiguracji systemu (obliczoną z wykorzystaniem formuły (2)) wynoszącą 64.

$$K = \sum_{m=1}^M \binom{M-1}{m-1} = 2^{M-1} = 2^{7-1} = 64 \quad (2)$$

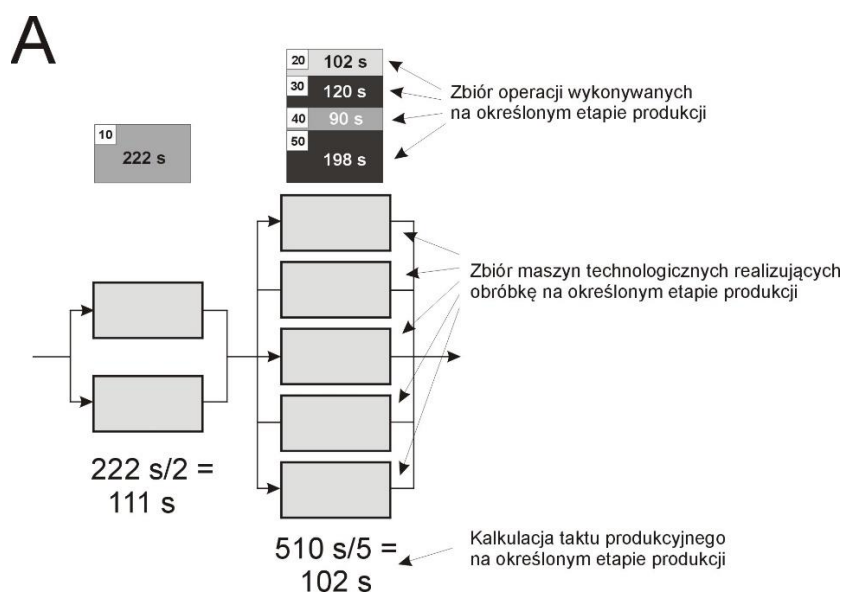
gdzie: K – liczba możliwych konfiguracji systemu, M – liczba maszyn technologicznych w systemie produkcyjnym, m – liczba etapów obróbki w systemie

Podział systemu na dwa podsystemy (związane z koniecznością zmiany zamocowania przedmiotu obrabianego) i uwzględnienie liczby operacji możliwych do realizacji w każdym z etapów umożliwia redukcję liczby możliwych konfiguracji systemu do 15 (rys. 5).

		Liczba etapów (m)						
		1	2	3	4	5	6	7
Liczba maszyn (N)	1	1						
	2	1	1					
	3	1	2	1				
	4	1	3	3	1			
	5	1	4	6	4	1		
	6	1	5	10	10	5	1	
	7	1	6	15	20	15	6	1

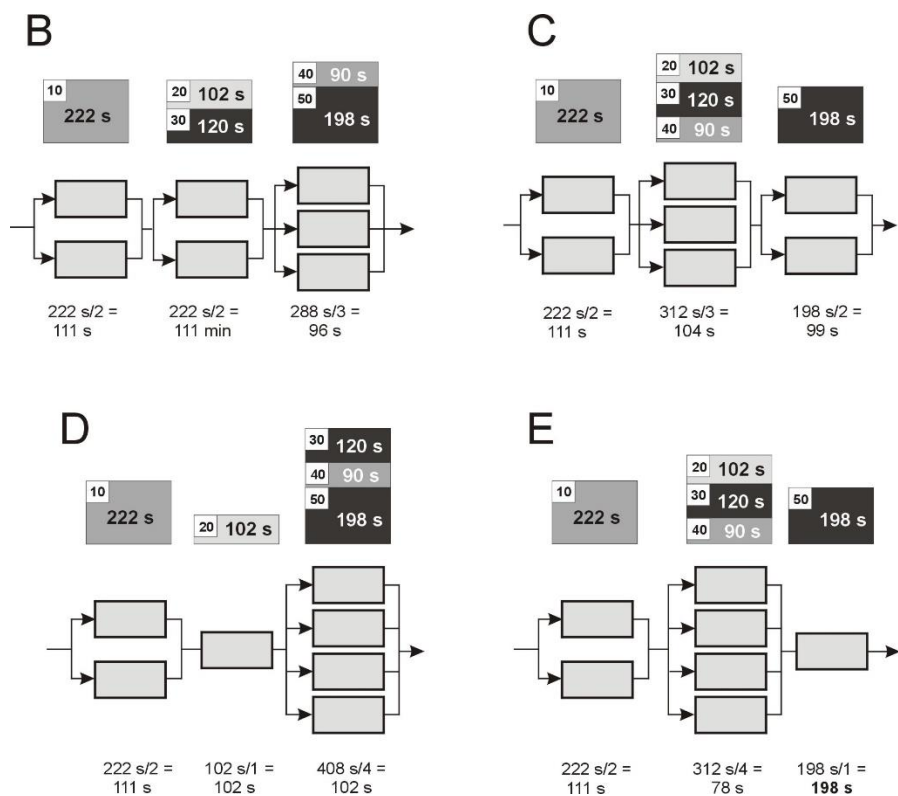
Rys. 5. Wykorzystanie trójkąta Pascala dla potrzeb ustalenia liczby konfiguracji systemu w każdym z etapów

Dla systemów realizujących produkcję w dwóch etapach możliwa jest tylko jedna konfiguracja – oznaczona symbolem A (rys. 6). W konfiguracji tej, w pierwszym etapie każda z części produkowana jest w takcie 111 s/szt., w drugim zaś w takcie 102 s/szt. Pierwszy z etapów jest więc wąskim gardłem i określa takt pracy dla całego systemu na poziomie $t_{\max} = 111$ s/szt. Oczekiwana produktywność systemu o takiej strukturze wynosi: 540 szt.



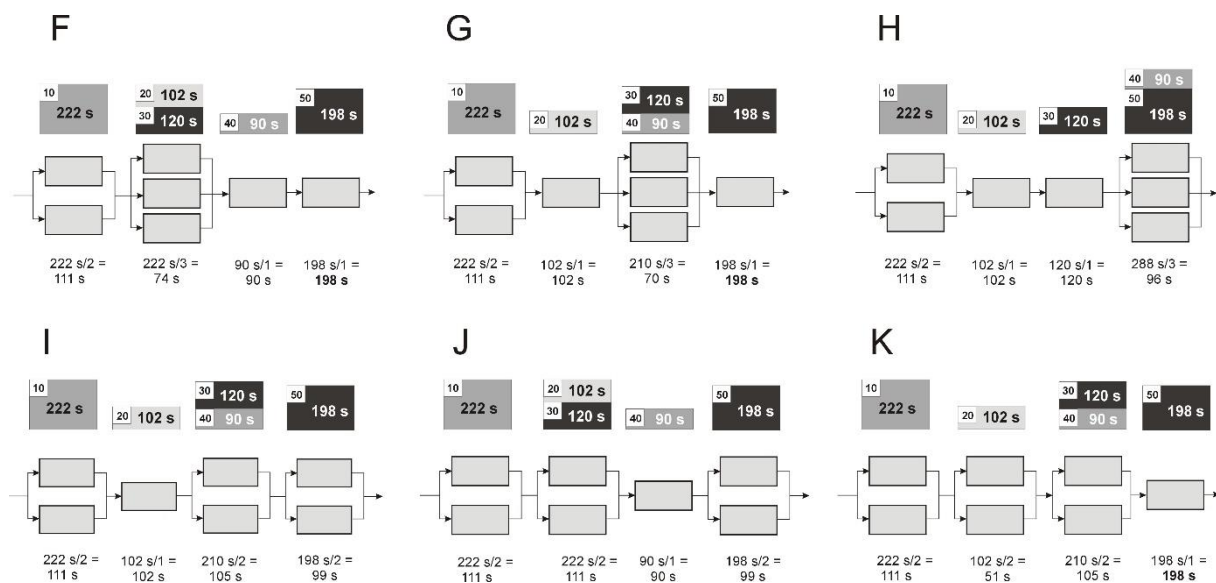
Rys. 6. Struktura produkcyjna systemu realizującego produkcję w dwóch etapach

W przypadku systemów, w których produkcja realizowana jest w trzech etapach teoretycznie możliwe są cztery konfiguracje. Jednakże tylko trzy z nich (oznaczone na rys. symbolami B, C i D) umożliwiają obróbkę części w takcie mniejszym lub równym 120 s/szt. (rys. 7). Czwarta z konfiguracji (oznaczona symbolem E) posiada tylko jedną maszynę w trzecim etapie, która stanowi wąskie gardło pracujące w takcie 198 s/szt. i określa produktywność systemu uniemożliwiającą zaspokojenie popytu na wymaganym poziomie.



Rys. 7. Struktury produkcyjne systemu realizującego produkcję w trzech etapach

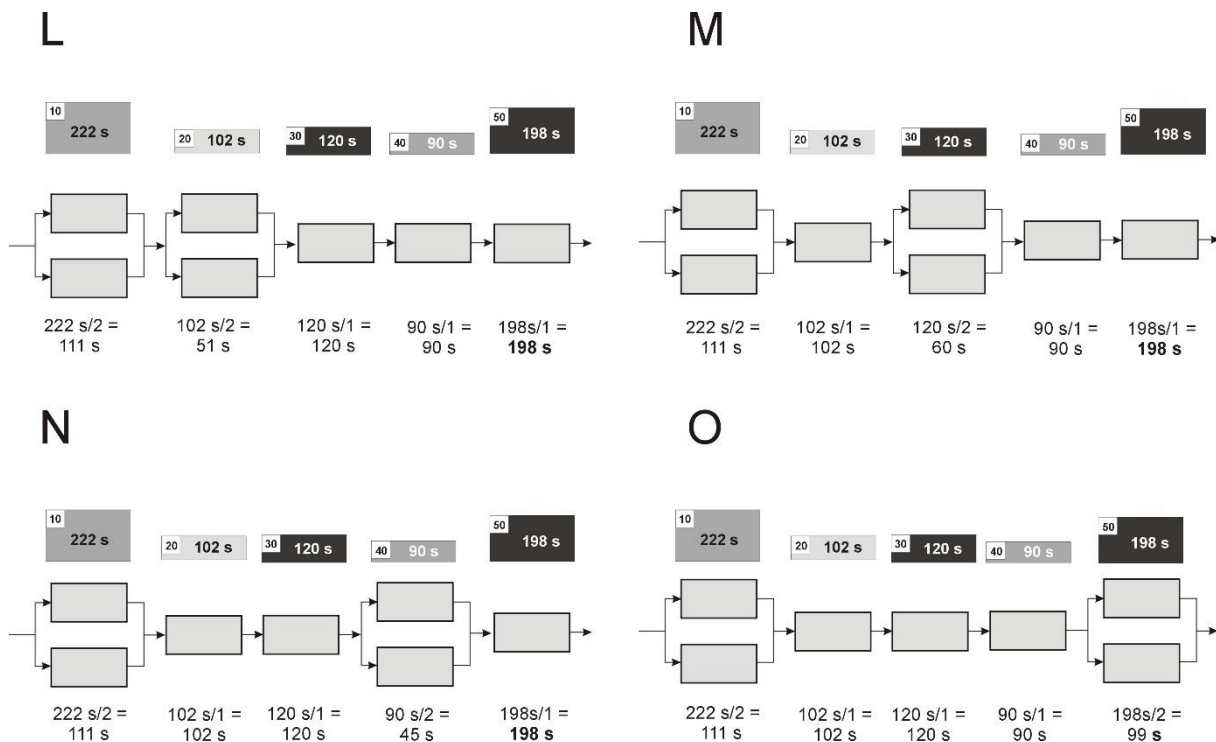
System realizujący produkcję w czterech etapach może posiadać jedną ze struktur produkcyjnych przedstawionych na rys. 8. Jednakże tylko trzy z nich spełniają wymóg produkcji z taktem niższym niż 120 s/szt. i tylko te będą poddane dalszej analizie. Wszystkie akceptowalne konfiguracje (oznaczone symbolami H,I,J) mogą pracować w takcie 111 s/szt. Pozostałe z nich posiadają na ostatnim etapie tylko jedną maszynę, która stanowi ogniwo limitujące umożliwiające produkcję w takcie 198 s/szt.



Rys. 8. Struktury produkcyjne systemu realizującego produkcję w czterech etapach

W przypadku układów pięcioetapowych możliwe są cztery konfiguracje przedstawione na rys. 9. Niestety tylko jedna z nich (oznaczona symbolem O) spełnia wymagania

maksymalnego taktu produkcji. W jej przypadku takt produkcji wynosi dokładnie 120 s/szt. W pozostałych trzech strukturach wąskie gardło stanowi piąty etap, którego takt produkcji wynosi 198 s – co jest niewystarczające z punktu widzenia wymagań wydajnościowych projektowanego systemu.



Rys. 9. Struktury produkcyjne systemu realizującego produkcję w pięciu etapach

Szczegółowa analiza konfiguracji RMS pod kątem zgodności stopnia wydajności nominalnej z wymaganiami projektowymi umożliwi znaczną redukcję ich liczby – niemniej jednak nie daje możliwości wyłonienia najlepszego rozwiązania. W procesie projektowania systemu niezbędne jest tym samym uwzględnienie dodatkowych kryteriów umożliwiających wybór struktury, która z jednej strony będzie gwarantem spełnienia warunków ograniczających zdefiniowanych w fazie przedprojektowej, z drugiej zaś będzie uwzględniać czynniki związane z bieżącą eksploatacją systemu. W ramach zrealizowanych badań przeprowadzono analizy w zakresie oceny stopnia niezawodności i oczekiwanej produktywności systemu produkcyjnego z uwzględnieniem struktur produkcyjnych wyłonionych w procesie selekcji opartej o wymóg minimalnej wydajności. W szczególności ocenie poddano zależność pomiędzy zmianą stopnia niezawodności systemu produkcyjnego (R_s) a zmianą stopnia niezawodności maszyn i urządzeń wchodzących w jego skład (R) oraz oczekiwanym poziomem produktywności systemu przy założeniu różnych poziomów niezawodności maszyn – elementów projektowanego rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego.

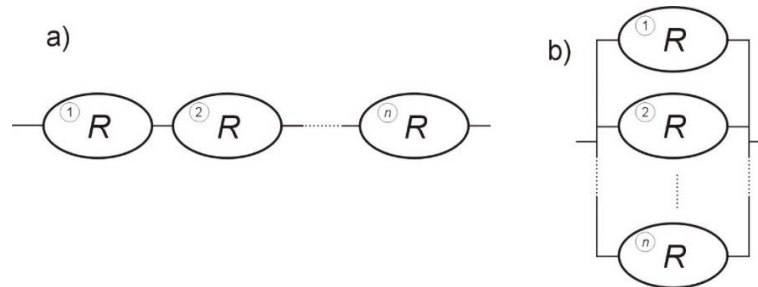
4. Analiza niezawodności i produktywności struktur systemu klasy RMS

4.1. Ocena niezawodności rekonfigurowalnego projektowanego systemu produkcyjnego

W ogólnym ujęciu pod pojęciem niezawodności systemu (R_s) rozumie się prawdopodobieństwo jego ciągłej pracy przez cały okres [9]. Całkowita niezawodność systemu zależy tak od niezawodności wszystkich jego elementów, jak i sposobu ich ułożenia [3]. Jeżeli

elementy dodawane są liniowo (szeregowo) (rys. 10 a) niezawodność systemu ulega redukcji. Dzieje się tak, ponieważ system zbudowany w elementach liniowych funkcjonuje tylko wtedy, gdy wszystkie pojedyncze maszyny działają. Jeżeli niezawodność każdej z maszyn wynosi R a liczba maszyn wynosi n to niezawodność systemu wynosi R^n .

Równoległe ułożenie dwóch jednakowych elementów powoduje wzrost całkowitej niezawodności układu. Dodawanie równoległe większej liczby elementów (rys. 10 b) powoduje wzrost niezawodności systemu ponieważ system przestanie funkcjonować wyłącznie wtedy kiedy wszystkie elementy systemu zawiodą. W takim przypadku prawdopodobieństwo, że n takich samych maszyn połączonych równoległe dozna awarii wynosi $(1-R)^n$, a niezawodność systemu jest równa $1-(1-R)^n$ [43].



Rys. 10. Struktury podstawowe konfiguracji systemów produkcyjnych: a) struktura szeregową (liniową), b) struktura równoległa

Wszystkie ze struktur projektowanego rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego stanowią rozwiązania hybrydowe, łączące w sobie charakterystyki zarówno struktur równoległych, jak też szeregowych. Niezawodność systemu (R_s) jest więc pochodną zarówno liczby etapów produkcji, jak również liczby maszyn w każdym z etapów a jej wartość dla każdej konfiguracji można obliczyć wykorzystując formuły przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Formuły do obliczenia stopnia niezawodności systemu produkcyjnego dla wyselekcjonowanych struktur

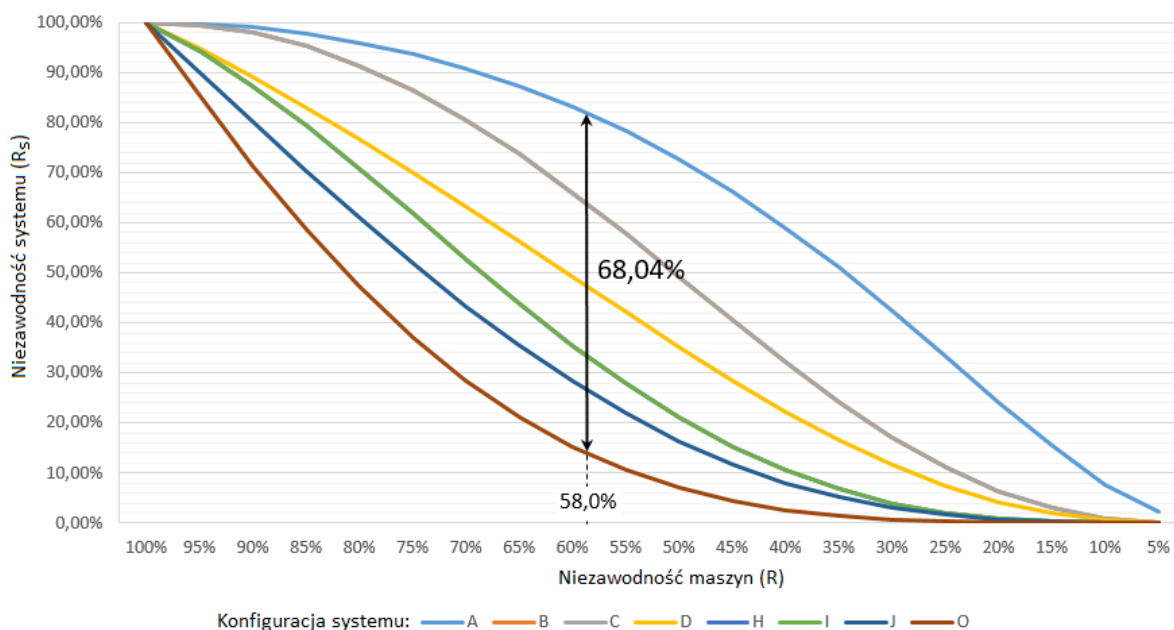
Konfiguracja	Formuła
A	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^5]$
B	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^3]$
C	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^3] * [1 - (1 - R)^2]$
D	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * [1 - (1 - R)^4]$
H	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * R * [1 - (1 - R)^3]$
I	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2]$
J	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * [1 - (1 - R)^2] * R * [1 - (1 - R)^2]$
O	$R_s = [1 - (1 - R)^2] * R * R * R * [1 - (1 - R)^2]$

Obliczone wyniki stopnia niezawodności projektowanego RMS dla każdej z wyselekcjonowanych struktur, przy różnym poziomie niezawodności maszyn technologicznych wchodzących w skład systemu, zostały przedstawione w tabeli 2.

Jak pokazują uzyskane rezultaty zmiana poziomu niezawodności RMS dla każdej ze struktur ma charakter nieproporcjonalny (rys. 11). W przypadku konfiguracji A – mimo spadku stopnia niezawodności poszczególnych urządzeń – niezawodność systemu do pewnego momentu pozostaje względnie stała, po czym następuje gwałtowny jej spadek. Skrajnie odmienna sytuacja ma miejsce w przypadku konfiguracji O, gdzie wraz z obniżaniem poziomu niezawodności maszyn następuje natychmiastowy, znaczny spadek niezawodności systemu.

Tab. 2. Niezawodność projektowanego systemu (R_s) dla różnych konfiguracji w zależności od poziomu niezawodności maszyn technologicznych (R)

R	Konfiguracja							
	A	B	C	D	H	I	J	O
100 %	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%
95 %	99.7500%	99.4882%	99.4882%	94.7619%	94.2893%	94.2893%	90.0131%	85.3093%
90 %	98.9990%	97.9120%	97.9120%	89.0911%	87.3269%	87.3269%	80.1098%	71.4493%
85 %	97.7426%	95.2281%	95.2281%	83.0454%	79.3906%	79.3906%	70.3860%	58.6800%
80 %	95.9693%	91.4227%	91.4227%	76.6771%	70.7789%	70.7789%	60.9485%	47.1859%
75 %	93.6584%	86.5173%	86.5173%	70.0378%	61.7981%	61.7981%	51.9104%	37.0789%
70 %	90.7789%	80.5741%	80.5741%	63.1840%	52.7500%	52.7500%	43.3861%	28.4038%
65 %	87.2891%	73.6992%	73.6992%	56.1816%	43.9192%	43.9192%	35.4848%	21.1463%
60 %	83.1398%	66.0442%	66.0442%	49.1098%	35.5622%	35.5622%	28.3046%	15.2410%
55 %	78.2784%	57.8050%	57.8050%	42.0639%	27.8968%	27.8968%	21.9260%	10.5816%
50 %	72.6563%	49.2188%	49.2188%	35.1563%	21.0938%	21.0938%	16.4063%	7.0313%
45 %	66.2396%	40.5564%	40.5564%	28.5153%	15.2702%	15.2702%	11.7744%	4.4333%
40 %	59.0234%	32.1126%	32.1126%	22.2822%	10.4858%	10.4858%	8.0282%	2.6214%
35 %	51.0493%	24.1917%	24.1917%	16.6044%	6.7410%	6.7410%	5.1316%	1.4299%
30 %	42.4284%	17.0886%	17.0886%	11.6265%	3.9795%	3.9795%	3.0156%	0.7023%
25 %	33.3679%	11.0657%	11.0657%	7.4768%	2.0935%	2.0935%	1.5808%	0.2991%
20 %	24.2035%	6.3245%	6.3245%	4.2509%	0.9331%	0.9331%	0.7027%	0.1037%
15 %	15.4372%	2.9715%	2.9715%	1.9896%	0.3205%	0.3205%	0.2409%	0.0260%
10 %	7.7807%	0.9783%	0.9783%	0.6534%	0.0686%	0.0686%	0.0515%	0.0036%
5 %	2.2056 %	0.1356%	0.1356%	0.0904%	0.0046%	0.0046%	0.0035%	0.0001%



Rys. 11. Zależności pomiędzy stopniem niezawodności maszyn technologicznych (R) a stopniem niezawodności systemu produkcyjnego (R_s)

Biorąc pod uwagę fakt, iż stopień niezawodności maszyn i urządzeń produkcyjnych w czasie eksploatacji ulega zmniejszeniu, rodzaj konfiguracji ma kluczowe z punktu widzenia możliwości produkcji na zakładanym poziomie, w planowanym cyklu życia systemu. Dla przykładu – przy założeniu 75% stopnia niezawodności maszyn technologicznych – niezawodność systemu w układzie dwuetapowym (konfiguracja A) wynosi 93,66%, podczas gdy układ pięcioetapowy (konfiguracja O) oznacza niezawodność systemu na poziomie 37,08%. Wybór struktury na etapie projektowym może więc mieć tym samym kluczowe

znaczenie dla produktywności i wydajności systemu w kolejnych okresach eksploatacji. Największa różnica stopnia niezawodności systemu występuje przy niezawodności maszyn na poziomie 58% i wynosi ona 68,04 % (poziom niezawodności systemu dla konfiguracji A: 81,28%; poziom niezawodności dla konfiguracji O: 13,24%).

Niższy poziom niezawodności maszyn w sposób bezpośredni przekłada się na niższe możliwości produkcyjne systemu. W konsekwencji, aby zrealizować produkcję o określonym wolumenie przy niższym poziomie niezawodności parku maszynowego, istnieje konieczność zwiększenia liczby obrabiarek w systemie. Do określenia minimalnej liczby niezbędnych maszyn (zarówno dla całego systemu, jak też podsystemów projektowanego RMS), można wykorzystać formułę (1) zaprezentowaną w rozdziale 3. I tak, przy założeniu minimalnej wymaganej liczby wyprodukowanych wyrobów na poziomie $Q = 500$ szt./dziennie, dziennym efektywnym funduszu czasu pracy systemu równym $F_j = 60000$ s. i zakładanej niezawodności maszyn technologicznych na poziomie $R = 75\%$ liczba obrabiarek w każdym z podsystemów RMS realizującego produkcję wyrobu przedstawionego na rys. 4 w pięciu etapach będzie wynosić:

- Etap I:

$$M_I = \frac{Q * t}{F_j * R} \cdot 100\% = \frac{500 \text{ szt.} * 222 \text{ s/szt.}}{60000 \text{ s} \cdot 75\%} * 100\% = 2,47 \Rightarrow 3 \quad (3)$$

- Etap II:

$$M_{II} = \frac{Q * t}{F_j * R} \cdot 100\% = \frac{500 \text{ szt.} * 102 \text{ s/szt.}}{60000 \text{ s} \cdot 75\%} * 100\% = 1,13 \Rightarrow 2 \quad (4)$$

- Etap III

$$M_{III} = \frac{Q * t}{F_j * R} \cdot 100\% = \frac{500 \text{ szt.} * 120 \text{ s/szt.}}{60000 \text{ s} \cdot 75\%} * 100\% = 1,33 \Rightarrow 2 \quad (5)$$

- Etap IV

$$M_{IV} = \frac{Q * t}{F_j * R} \cdot 100\% = \frac{500 \text{ szt.} * 90 \text{ s/szt.}}{60000 \text{ s} \cdot 75\%} * 100\% = 1,00 \Rightarrow 1 \quad (6)$$

- Etap V

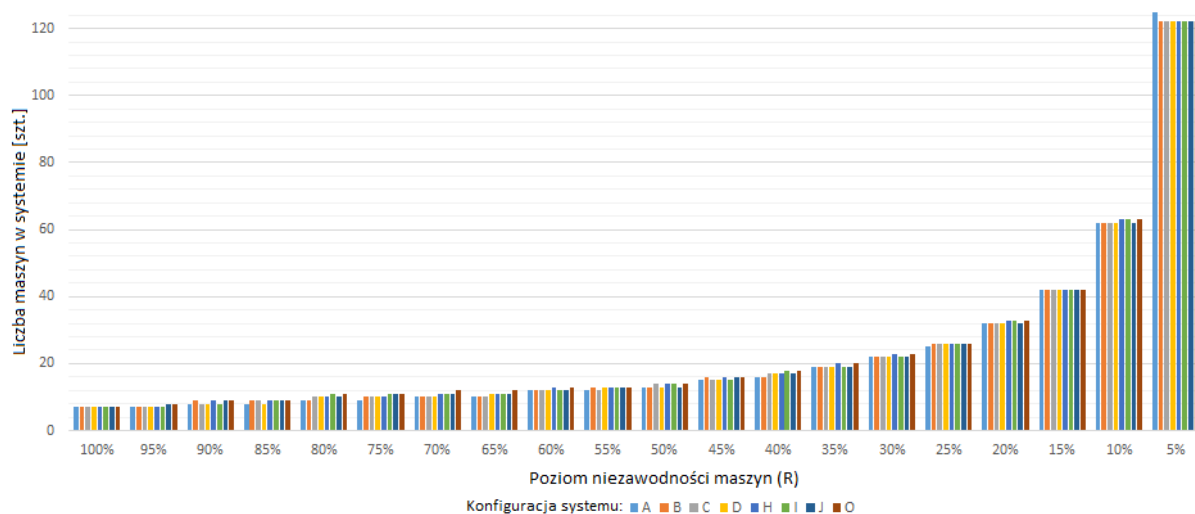
$$M_V = \frac{Q * t}{F_j * R} \cdot 100\% = \frac{500 \text{ szt.} * 198 \text{ s/szt.}}{60000 \text{ s} \cdot 75\%} * 100\% = 2,20 \Rightarrow 3 \quad (7)$$

W tabeli 3, dla każdej ze struktur, przedstawiono pełne zestawienie liczby niezbędnych maszyn (wraz z podziałem na podsystemy) umożliwiających produkcję na poziomie 500 szt./dzień przy założeniu zróżnicowanego poziomu niezawodności maszyn technologicznych. Jak pokazują wyniki spadek niezawodności maszyn technologicznych pociąga za sobą konieczność rozbudowy parku maszynowego (zwiększania liczby obrabiarek na każdym z etapów systemu). Mimo, iż struktura RMS umożliwia „dołączanie” kolejnych obrabiarek – oznacza to dodatkowe koszty związane z samym zakupem maszyn, jak również dostosowaniem podsystemu transportowego oraz wygospodarowaniem dodatkowej powierzchni.

Jak wynika z rys. 12 wzrost liczby niezbędnych obrabiarek jest względnie niezależny od rodzaju struktury produkcyjnej. Ma on jednakże (dla każdej z konfiguracji) charakter funkcji wykładniczej. O ile w przypadku niezawodności maszyn na poziomie 85%, liczba niezbędnych obrabiarek wynosi 8-9, przy poziomie niezawodności 50% wzrasta do 16-18. Oznacza to tym samym, iż istnieje pewien krytyczny moment, w którym rozbudowa systemu staje się nieekonomiczna.

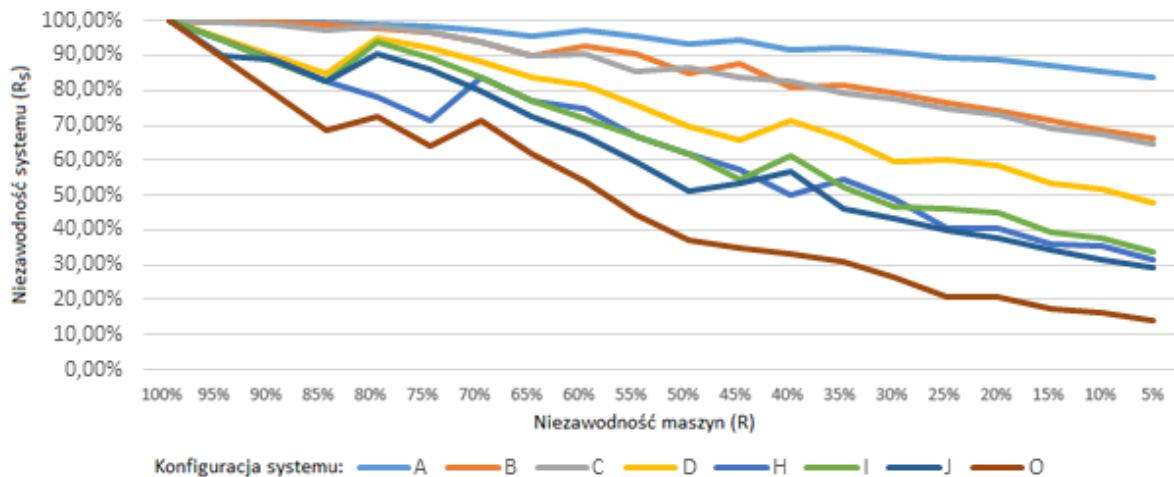
Tab. 3. Liczba obrabiarek niezbędnych do realizacji zakładanego programu produkcji: (a) na poszczególnych etapach produkcji, (b) w całym systemie produkcyjnym

R	Konfiguracja								
		A	B	C	D	H	I	J	O
100%	(a)	2+5	2+2+3	2+3+2	2+1+4	2+2+1+2	2+1+2+2	2+1+1+3	2+1+1+1+2
	(b)	7	7	7	7	7	7	7	7
95%	(a)	2+5	2+2+3	2+3+2	2+1+4	2+2+1+2	2+1+2+2	2+1+2+3	2+1+2+1+2
	(b)	7	7	7	7	7	7	8	8
90%	(a)	3+5	3+3+3	3+3+2	3+1+4	3+3+1+2	3+1+2+2	3+1+2+3	3+1+2+1+2
	(b)	8	9	8	8	9	8	9	9
85%	(a)	3+5	3+3+3	3+4+2	3+1+4	3+3+1+2	3+1+3+2	3+1+2+3	3+1+2+1+2
	(b)	8	9	9	8	9	9	9	9
80%	(a)	3+6	3+3+3	3+4+3	3+2+5	3+3+1+3	3+2+3+3	3+2+2+3	3+2+2+1+3
	(b)	9	9	10	10	10	11	10	11
75%	(a)	3+6	3+3+4	3+4+3	3+2+5	3+3+1+3	3+2+3+3	3+2+2+4	3+2+2+1+3
	(b)	9	10	10	10	10	11	11	11
70%	(a)	3+7	3+3+4	3+4+3	3+2+5	3+3+2+3	3+2+3+3	3+2+2+4	3+2+2+2+3
	(b)	10	10	10	10	11	11	11	12
65%	(a)	3+7	3+3+4	3+4+3	3+2+6	3+3+2+3	3+2+3+3	3+2+2+4	3+2+2+2+3
	(b)	10	10	10	11	11	11	11	12
60%	(a)	4+8	4+4+4	4+5+3	4+2+6	4+4+2+3	4+2+3+3	4+2+2+4	4+2+2+2+3
	(b)	12	12	12	12	13	12	12	13
55%	(a)	4+8	4+4+5	4+5+3	4+2+7	4+4+2+3	4+2+4+3	4+2+2+5	4+2+2+2+3
	(b)	12	13	12	13	13	13	13	13
50%	(a)	4+9	4+4+5	4+6+4	4+2+7	4+4+2+4	4+2+4+4	4+2+2+5	4+2+2+2+4
	(b)	13	13	14	13	14	14	13	14
45%	(a)	5+10	5+5+6	5+6+4	5+2+8	5+5+2+4	5+2+4+4	5+2+3+6	5+2+3+2+4
	(b)	15	16	15	15	16	15	16	16
40%	(a)	5+11	5+5+6	5+7+5	5+3+9	5+5+2+5	5+3+5+5	5+3+3+6	5+3+3+2+5
	(b)	16	16	17	17	17	18	17	18
35%	(a)	6+13	6+6+7	6+8+5	6+3+10	6+6+3+5	6+3+5+5	6+3+3+7	6+3+3+3+5
	(b)	19	19	19	19	20	19	19	20
30%	(a)	7+15	7+7+8	7+9+6	7+3+12	7+7+3+6	7+3+6+6	7+3+4+8	7+3+4+3+6
	(b)	22	22	22	22	23	22	22	23
25%	(a)	8+17	8+8+10	8+11+7	8+4+14	8+8+3+7	8+4+7+7	8+4+4+10	8+4+4+3+7
	(b)	25	26	26	26	26	26	26	26
20%	(a)	10+22	10+10+12	10+13+9	10+5+17	10+10+4+9	10+5+9+9	10+5+5+12	10+5+5+4+9
	(b)	32	32	32	32	33	33	32	33
15%	(a)	13+29	13+13+16	13+18+11	13+6+23	13+13+5+11	13+6+12+11	13+6+7+16	13+6+7+5+11
	(b)	42	42	42	42	42	42	42	42
10%	(a)	19+43	19+19+24	19+26+17	19+9+34	19+19+8+17	19+9+18+17	19+9+10+24	19+9+10+8+17
	(b)	62	62	62	62	63	63	62	63
5%	(a)	37+85	37+37+48	37+52+33	37+17+68	37+37+15+33	37+17+35+33	37+17+20+48	37+17+20+15+33
	(b)	125	122	122	122	122	122	122	122



Rys. 12. Zależność pomiędzy stopniem niezawodności maszyn (R) a minimalną liczbą maszyn w systemie (M) niezbędną do wykonania zakładanego planu produkcji

Z punktu widzenia eksploatacji systemu w planowanym cyklu życia, istotnym zagadnieniem pozostaje również kwestia niezawodności systemu, który jest rozbudowywany wraz ze spadkiem poziomu niezawodności maszyn. Kształtowanie się stopnia niezawodności systemu dla poszczególnych struktur, z założeniem jego rozbudowy w celu dostosowania zdolności produkcyjnych do niezbędnego poziomu (w analizowanym przypadku 500 szt./dzień) został pokazany na rys. 13.



Rys. 13. Zależność pomiędzy poziomem niezawodności maszyn technologicznych (R) a poziomem niezawodności rozbudowywanego systemu produkcyjnego (R_s)

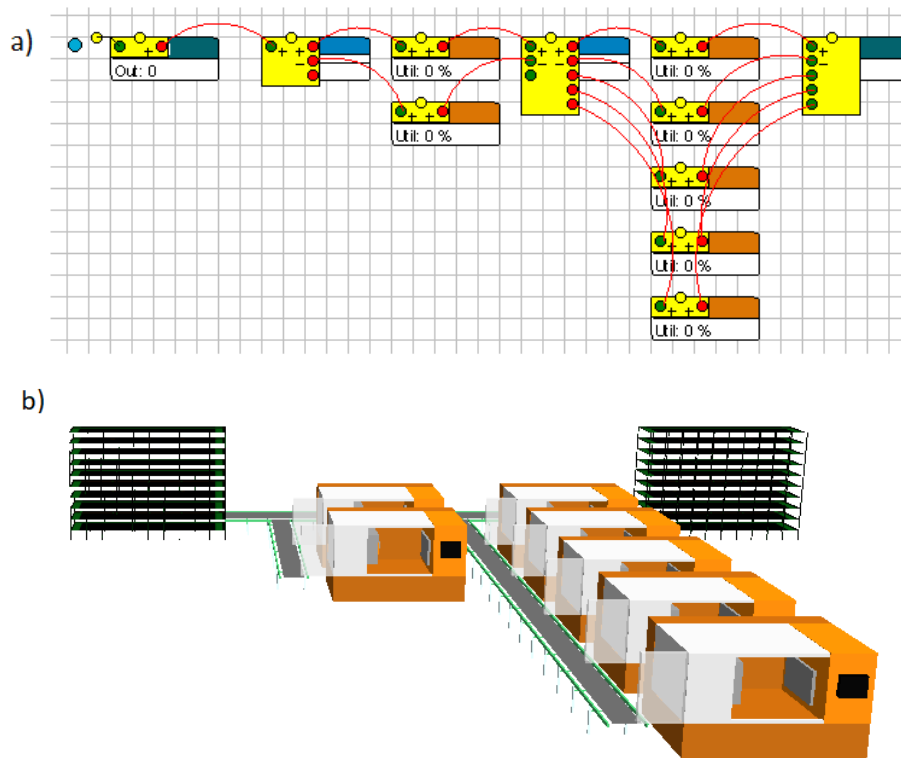
Jak wynika z powyższego wykresu, mimo „systematycznego” zwiększania liczby obrabiarek wraz ze spadkiem poziomu niezawodności maszyn – niezawodność całego systemu ulega redukcji. O ile w przypadku systemu pięcioetapowego (konfiguracja A) – spada ona do poziomu 83,92% (przy poziomie niezawodności maszyn równym 5%), o tyle w przypadku systemu pięcioetapowego (konfiguracja O) – niezawodność systemu spada aż do poziomu 13,9%. Oznacza to, iż rodzaj struktury produkcyjnej, w sposób bezpośredni będzie determinował niezawodność projektowanego rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego. Systemy wieloetapowe – charakteryzują się tu zdecydowanie większą podatnością na spadek poziomu niezawodności.

4.2. Ocena stopnia oczekiwanej produktywności projektowanego RMS

Obok oceny stopnia niezawodności, podstawową kwestią w procesie projektowania systemu wytwórczego pozostaje zaplanowanie stopnia jego zdolności produkcyjnej umożliwiającej produkcję wyrobów na zakładanym poziomie. Biorąc pod uwagę fakt, iż w całym okresie eksploatacji następuje spadek poziomu niezawodności maszyn – zmianie ulegać będzie zarówno stopień produktywności systemu, jak też liczba i stopień wykorzystania obrabiarek wchodzących w skład systemu. Czynniki te mogą więc również stanowić determinanty wyboru struktury produkcyjnej RMS.

Aby dokonać oceny, w jaki sposób spadek niezawodności maszyn wpływa na poziom oczekiwanej produktywności projektowanego RMS wykonano analizy z wykorzystaniem metod symulacji komputerowej, które są jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanych w tego typu problemach [15,36]. Jako narzędzie badawcze wykorzystano system Enterprise Dynamics 7.0 firmy Incontrol Simulation Solutions. Dla każdej ze struktur produkcyjnych opracowano model systemu (rys. 14) oraz przeprowadzono symulację produkcji dla założonego okresu odpowiadającego efektywnemu czasowi pracy systemu (60 000 sekund) redukując kolejno niezawodność maszyn technologicznych o kolejne 5%. W ramach zrealizowanych

badan pominięto aspekty związane funkcjonowaniem podsystemów transportu i magazynowania.



Rys. 14. Przykład modelu symulacyjnego dla konfiguracji A opracowanego w programie Enterprise Dynamics: a) model podsystemu obrabiarek w układzie 2D, b) wizualizacja systemu w układzie 3D

- Analizy w zakresie produktywności zrealizowano dla systemów:
- o strukturze pierwotniej – określonej dla niezawodności maszyn i urządzeń na poziomie 100% (zob. pkt. 3),
 - rozbudowywanych wraz ze spadkiem niezawodności maszyn i urządzeń (zob. tab. 3).

W przypadku systemów „rozbudowywanych” eksperymenty symulacyjne przeprowadzono dla struktur zawierających maksymalnie 16 maszyn technologicznych o poziomie niezawodności nie mniejszej niż 45%. Aby ocenić powtarzalność uzyskanych wyników, dla każdego z układów eksperyment symulacyjny został przeprowadzony pięciokrotnie a uzyskane średnie wyniki zamieszczono w tabelach 4-7.

Tab. 4. Wyniki eksperymentów symulacyjnych dla systemu realizującego produkcję w dwóch etapach

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Konfiguracja A												
	2+5											
P	500	500	482	455	428	400	372	346	319	293	266	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.02%	82.38%	77.80%	73.08%	68.38%	63.96%	59.42%	54.86%	50.30%	45.70%	40.90%
	2+5	2+5	3+5	3+5	3+6	3+6	3+7	3+7	4+8	4+8	4+9	5+10
P	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.02%	85.00%	85.00%	70.87%	70.87%	60.73%	60.73%	53.15%	53.15%	47.24%	42.50%

R – poziom niezawodności maszyn technologicznych, P – liczba wytworzonych produktów, M-I – średnie obciążenie obrabiarek w pierwszym etapie produkcji, M-II – średnie obciążenie obrabiarek w drugim etapie produkcji,

Tab. 5. Wyniki eksperymentów symulacyjnych dla systemu realizującego produkcję w trzech etapach

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Konfiguracja B												
2+2+3												
P	500	500	479	450	422	388	357	331	310	273	264	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	92.50%	92.50%	89.60%	84.60%	79.60%	74.60%	69.60%	64.60%	59.60%	54.60%	49.60%	44.60%
M-III	80.03%	80.00%	76.83%	72.13%	67.77%	62.27%	57.43%	53.27%	50.03%	44.20%	42.50%	38.20%
	2+2+3	2+2+3	3+3+3	3+3+3	3+3+3	3+3+4	3+3+4	3+3+4	4+4+4	4+4+5	4+4+5	5+5+6
P	500	500	500	500	498	500	500	500	500	500	485	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	37.00%
M-III	80.03%	80.00%	80.03%	80.03%	80.03%	60.00%	60.00%	60.00%	60.00%	47.98%	46.94%	39.97%
Konfiguracja C												
2+3+2												
P	500	500	481	454	430	400	373	346	319	292	265	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	86.63%	86.67%	84.03%	79.30%	74.90%	69.97%	65.27%	60.50%	55.87%	51.13%	46.47%	41.80%
M-III	82.50%	82.50%	79.60%	75.15%	71.15%	66.25%	61.70%	57.25%	52.75%	48.25%	43.85%	39.35%
	2+3+2	2+3+2	3+3+2	3+4+2	3+4+3	3+4+3	3+4+3	3+4+3	4+5+3	4+5+3	4+6+4	5+6+4
P	500	500	500	500	500	500	500	489	500	496	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	86.63%	86.67%	86.63%	65.00%	65.00%	65.00%	65.00%	64.97%	52.00%	52.00%	42.77%	43.37%
M-III	82.50%	82.50%	82.50%	82.50%	55.00%	55.00%	55.00%	53.87%	55.00%	54.80%	41.25%	41.25%
Konfiguracja D												
2+1+4												
P	500	500	481	452	427	396	372	345	318	288	263	237
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	85.00%	85.00%	82.05%	77.35%	72.87%	68.00%	63.65%	59.05%	54.47%	49.60%	45.22%	40.65%
	2+1+4	2+1+4	3+1+4	3+1+4	3+2+5	3+2+5	3+2+5	3+2+6	4+2+6	4+2+7	4+2+7	5+2+8
P	500	500	500	495	500	500	500	500	500	500	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	52.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	85.00%	85.00%	85.00%	84.70%	68.00%	68.00%	68.02%	56.67%	56.65%	48.59%	48.59%	42.50%

R – poziom niezawodności maszyn technologicznych, P – liczba wytworzonych produktów, M-I – M-III – średnie obciążenie obrabiarek w kolejnych etapach produkcji

Tab. 6. Wyniki eksperymentów symulacyjnych dla systemu realizującego produkcję w czterech etapach

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Konfiguracja H												
2+2+1+2												
P	500	500	480	451	421	390	360	329	297	267	242	218
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	92.50%	92.50%	89.60%	84.60%	79.60%	74.60%	69.60%	64.60%	59.60%	54.60%	49.60%	44.60%
M-III	75.00%	75.00%	72.20%	68.10%	64.10%	60.20%	56.10%	52.10%	48.10%	44.00%	40.00%	35.90%
M-IV	82.50%	82.50%	79.20%	74.00%	69.65%	64.55%	59.50%	54.55%	49.25%	44.25%	40.30%	36.30%
	2+2+1+2	2+2+1+2	3+3+1+2	3+3+1+2	3+3+1+3	3+3+1+3	3+3+2+3	3+3+2+3	4+4+2+3	4+4+2+3	4+4+2+4	5+5+2+4
P	500	500	500	500	500	490	500	500	500	461	484	488
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	37.00%
M-III	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	37.50%	37.55%	37.50%	37.50%	37.50%	37.50%
M-IV	82.50%	82.50%	82.50%	82.50%	55.00%	54.13%	55.00%	55.00%	55.00%	50.83%	40.30%	40.60%
Konfiguracja I												
2+1+2+2												
P	500	500	481	454	427	400	372	345	318	291	262	238
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	87.50%	87.55%	84.60%	79.90%	75.20%	70.40%	65.65%	60.95%	56.20%	51.50%	46.55%	42.00%
M-IV	82.50%	82.55%	79.45%	75.00%	70.55%	66.10%	61.60%	57.15%	52.70%	48.20%	43.50%	39.35%
	2+1+2+2	2+1+2+2	3+1+2+2	3+1+3+2	3+2+3+3	3+2+3+3	3+2+3+3	3+2+3+3	4+2+3+3	4+2+4+3	4+2+4+4	5+2+4+4
P	500	500	500	494	500	500	500	500	489	498	500	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	42.00%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	87.50%	87.55%	87.50%	58.37%	58.37%	58.37%	58.37%	58.37%	58.37%	43.80%	43.80%	43.80%
M-IV	82.50%	82.55%	82.50%	81.75%	55.00%	55.03%	55.00%	55.00%	54.10%	55.00%	41.27%	41.30%

R – poziom niezawodności maszyn technologicznych, P – liczba wytworzonych produktów, M-I - M-VI – średnie obciążenie obrabiarek w kolejnych etapach produkcji

Tab. 6. Wyniki eksperymentów symulacyjnych... - c.d.

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Konfiguracja J												
	2+1+1+3											
P	494	472	447	421	396	371	343	307	279	270	245	205
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	99.50%	95.00%	90.20%	85.20%	80.20%	75.10%	70.10%	65.00%	60.00%	54.90%	49.90%	44.90%
M-IV	79.33%	75.70%	71.90%	67.83%	63.67%	59.57%	55.10%	49.43%	45.03%	43.57%	39.57%	33.30%
	2+1+1+3	2+1+2+3	3+1+2+3	3+1+2+3	3+2+2+3	3+2+2+4	3+2+2+4	3+2+2+4	4+2+2+4	4+2+2+5	4+2+2+5	5+2+3+6
P	494	500	500	495	498	500	500	498	493	500	465	500
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	42.50%	42.50%	42.55%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	99.50%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	49.90%	50.00%	49.90%	33.30%
M-IV	79.33%	80.00%	80.03%	79.36%	80.03%	60.00%	60.00%	59.95%	59.45%	47.98%	45.10%	39.98%

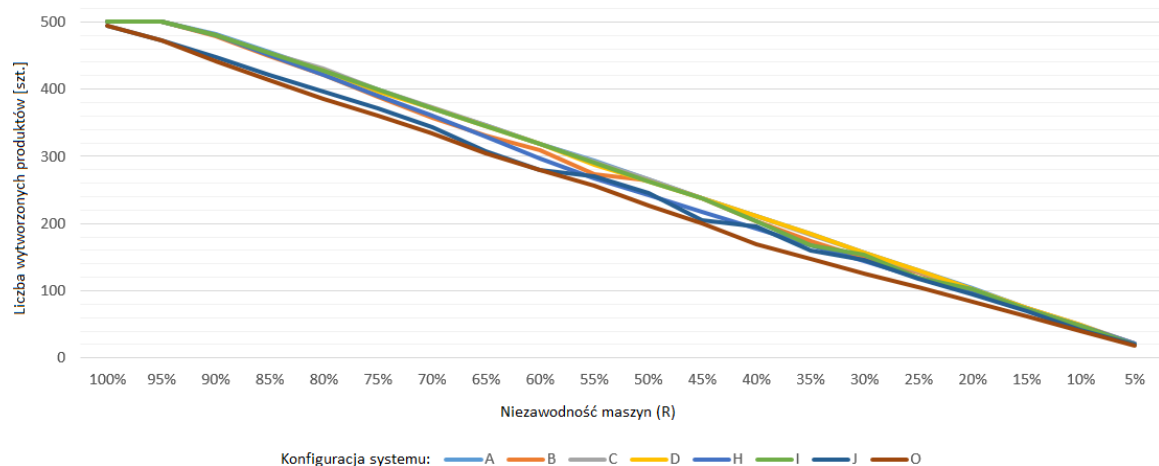
R – poziom niezawodności maszyn technologicznych, P – liczba wytworzonych produktów, M-I-M-VI – średnie obciążenie obrabiarek w kolejnych etapach produkcji

Tab. 7. Wyniki eksperymentów symulacyjnych dla systemu realizującego produkcję w pięciu etapach

R	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Konfiguracja O												
	2+1+1+1+2											
P	494	472	442	413	386	361	334	305	280	256	226	200
M-I	92.50%	92.50%	90.30%	85.10%	80.30%	75.10%	70.30%	65.10%	60.30%	55.10%	50.30%	45.10%
M-II	85.00%	85.00%	82.50%	77.90%	73.30%	68.70%	64.10%	59.50%	54.90%	50.30%	45.70%	41.10%
M-III	99.50%	95.00%	90.20%	85.20%	80.20%	75.10%	70.10%	65.00%	60.00%	54.90%	49.90%	44.90%
M-IV	74.50%	71.10%	67.50%	63.70%	59.30%	54.90%	50.60%	46.20%	42.20%	38.60%	35.10%	31.70%
M-V	81.70%	77.95%	73.10%	68.40%	64.00%	59.90%	55.30%	50.00%	46.20%	42.25%	37.45%	33.10%
	2+1+1+1+2	2+1+2+1+2	3+1+2+1+2	3+1+2+1+2	3+2+2+1+3	3+2+2+1+3	3+2+2+2+3	3+2+2+2+3	4+2+2+2+3	4+2+2+2+3	4+2+2+2+4	5+2+3+2+4
P	494	500	500	485	500	496	500	500	500	459	452	488
M-I	92.50%	92.50%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	61.67%	46.30%	46.30%	46.30%	37.00%
M-II	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%	42.50%
M-III	99.50%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	49.90%	33.30%
M-IV	74.50%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	37.55%	37.55%	37.50%	37.50%	35.10%	37.50%
M-V	81.70%	82.00%	82.50%	80.30%	55.00%	54.70%	55.03%	55.00%	55.00%	50.77%	37.50%	40.60%

R – poziom niezawodności maszyn technologicznych, P – liczba wytworzonych produktów, M-I - M-V – średnie obciążenie obrabiarek w kolejnych etapach produkcji

Jak pokazują uzyskane wyniki oczekiwana produktywność systemu spada wraz ze spadkiem poziomu niezawodności maszyn technologicznych tworzących podsystem obrabiarek (rys. 15). Niemniej jednak, w odróżnieniu od stopnia niezawodności systemu, spadek oczekiwanej produktywności jest zbliżony dla każdej z analizowanych struktur i ma charakter niemalże proporcjonalny (por. rys. 10). Oznacza to tym samym, iż w procesie projektowania RMS sama analiza niezawodności systemu jest niewystarczająca – nie daje bowiem pełnego obrazu dotyczącego możliwej do uzyskania produktywności – co z punktu widzenia eksploatacji systemu jest zagadnieniem podstawowym.



Rys. 15. Zależność pomiędzy liczbą wytworzonych produktów (P) a stopniem niezawodności maszyn technologicznych tworzących podsystem obrabiarek (R)

Kluczową kwestią pozostaje fakt, iż mimo rozbudowy systemu nie we wszystkich przypadkach system umożliwi produkcję na zakładanym poziomie. W konsekwencji istnieje więc możliwość, iż mimo poprawności metodologicznej na etapie projektowania systemu – w trakcie jego eksploatacji może pojawić się sytuacja, iż system nie będzie w stanie zrealizować produkcji zgodnie z bieżącym zapotrzebowaniem. Oznacza to tym samym, iż metody analityczne wykorzystywane na etapie projektowania systemu są niewystarczające, a otrzymane za ich pomocą wyniki wymagają weryfikacji z wykorzystaniem metod symulacyjnych.

W analizowanym przypadku jedyną konfiguracją, która zapewnia produkcję na wymaganym poziomie w analizowanym przypadku pozostaje konfiguracja A. Biorąc pod uwagę wyniki analiz niezawodnościowych (pkt 4.1) – struktura ta jest strukturą preferowaną, gwarantującą stabilną produkcję w trakcie całego okresu eksploatacji systemu.

5. Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań

Wybór odpowiedniej struktury produkcyjnej stanowi kluczowy element w procesie projektowania każdego systemu produkcyjnego – pociąga on bowiem za sobą długoterminowe skutki w zakresie wydajności, produktywności i kosztów eksploatacji projektowanego systemu. Problem ten występuje również w przypadku rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych, które obecnie stanowią jeden z podstawowych kierunków badawczych w obszarze projektowania nowoczesnych systemów wytwórczych.

W ramach zrealizowanych badań podjęto próbę oceny struktur projektowanego systemu klasy RMS z punktu widzenia zmian stopnia niezawodności maszyn wchodzących w skład projektowanego systemu. Jak wynika z przeprowadzonych, analiz rodzaj konfiguracji systemu ma bezpośredni wpływ na poziom niezawodności systemu jako całości. Zmiana poziomu niezawodności systemu zmienia się w sposób nieproporcjonalny wraz ze zmianą stopnia niezawodności maszyn i urządzeń produkcyjnych wchodzących w jego skład. Niemniej jednak – jak pokazały przeprowadzone badania symulacyjne - nie znajduje to odzwierciedlenia w oczekiwanej produktywności systemu, która choć ulega redukcji wraz ze zmniejszeniem poziomu niezawodności maszyn – jest względnie niezależna od rodzaju struktury produkcyjnej. Co istotne, mimo teoretycznej wydajności systemu na wymaganym poziomie – istnieją przypadki, w których system nie jest w stanie zrealizować zakładanego wolumenu produkcji. Uzasadnia to więc konieczność prowadzenia badań symulacyjnych na etapie projektowym, które umożliwiają rzeczywistą weryfikację produktywności projektowanego systemu oraz eliminację błędów, których identyfikacja nie jest możliwa z wykorzystaniem metod analitycznych.

Biorąc pod uwagę uzyskane rezultaty należy stwierdzić, iż z punktu widzenia stabilności procesu preferowanymi pozostają struktury RMS o mniejszej liczbie etapów produkcyjnych. Niemniej jednak struktury te opierają się na obrabiarkach wielozadaniowych, które w automatyczny sposób przekładają się na wyższe koszty inwestycyjne projektowanego systemu. Dlatego też, w procesie wyboru struktur produkcyjnych niezbędne jest prowadzenie badań z wykorzystaniem metod analizy wielokryterialnej, umożliwiającej minimalizację kosztów inwestycji i eksploatacji projektowego systemu z uwzględnieniem wymaganych założeń wydajnościowych oraz ograniczeń eksploatacyjnych i techniczno-organizacyjnych.

W ramach dalszych badań planowane jest przeprowadzenie analiz wydajnościowych z uwzględnieniem zróżnicowanej niezawodności maszyn i urządzeń technologicznych (zwłaszcza w procesie rozbudowy systemu) oraz wpływu stopnia niezawodności urządzeń transportu wewnętrznego na produktywność projektowanego rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego.

Literatura

1. Andersen A.-L., Larsen J.K., Brunoe T.D., Nielsen K., Ketelsen C. Critical enablers of changeable and reconfigurable manufacturing and their industrial implementation. *Journal of Manufacturing Technology Management* 2018; 29(6): 983-1002, 10.1108/JMTM-04-2017-0073.
2. Antosz K. Maintenance – identification and analysis of the competency gap. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (3): 484–494, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.3.19>.
3. Anzanello M.J., De Oliveira Lemos F. Reliability Evaluation and Component Allocation in Series and Parallel Systems Consisting of Non-Identical Three-State Component. XIV International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. The integration of productive chain with an approach to sustainable manufacturing. Rio de Janeiro, Brazil, 13 to 16 October 2008.
4. Battini D., Faccio M., Ferrari E., Persona A., Sgarbossa F. Design configuration for a mixed model assembly system in case of low product demand. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007; 34(1-2): 188-200, <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0576-5>.
5. Bensmaine A., Dahane M., Benyoucef L. A non-dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment. *Computers and Industrial Engineering* 2013; 66(3): 519-524, 10.1016/j.cie.2012.09.008.
6. Bi Z., Lang S., Shen W. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. *International Journal of Production Research* 2008; 46(4): 967-992, <https://doi.org/10.1080/00207540600905646>.
7. Cohen Y., Faccio M., Galizia F.G., Mora C., Pilati F. Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms. *IFAC PapersOnLine* 2017; 50(1): 14958-14963, 10.1016/j.ifacol.2017.08.2550.
8. Dahane M., Menyoucef L. An adapted NSGA-II algorithm for a Reconfigurable manufacturing system (RMS) design under machines reliability constraints. *Metaheuristics for Production Systems*; 60: 109-130, https://doi.org/10.1007/978-3-319-23350-5_5.
9. Daniewski K., Kosicka E., Mazurkiewicz D. Analysis of the Correctness of Determination of the Effectiveness of Maintenance Service Actions. *Management and Production Engineering Review* 2018; 9 (2): 20-25, 10.24425/119522.
10. Delorme X., Malyutin S., Dolgui A. A multi-objective approach for design of reconfigurable transfer lines. *IFAC-PapersOnLine* 2016, 49(12): 509-514, 10.1016/j.ifacol.2016.07.675.
11. Dou J., Dai X., Meng Z., A GA-based approach for optimizing single-part flow-line configurations of RMS, *Journal of Intelligent Manufacturing* 2011; 22(2): 301-317, 10.1007/s10845-009-0305-7.
12. Dou J., Dai X., Meng Z., Optimisation of multi-part flow-line configuration of reconfigurable manufacturing system using GA. *International Journal of Production Research* 2010; 48(14): 4071-4100, 10.1080/00207540903036305.
13. ElMaraghy H.A. Flexible and Reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Manufacturing Systems* 2005; 17(4): 261-276, 10.1007/s10696-006-9028-7.
14. Esmailian B., Behdad S., Wang B. The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems* 2016; 39, 79-100, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>.

15. Gola A, Wiechetek Ł. Modelling and simulation of production flow in job-shop production system with Enterprise Dynamics software. *Applied Computer Science* 2017; 13(4): 87-97, 10.23743/acs-2017-32.
16. Gola A. Economic Aspects of Manufacturing Systems Design, *Actual Problems of Economics* 2014; 156 (6): 205-212.
17. Gola A., Świć A. Economic analysis of manufacturing systems configuration in the context of their productivity. *Actual Problems of Economics* 2014; 162(12): 385:394.
18. Gola A., Świć A. Reconfigurable manufacturing systems as a way of long-term economic capacity management. *Actual Problems of Economics* 2015; 166(4): 15-22.
19. Goyal K.K., Jain P.K., Jain M. Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing systems using NSGA II and TOPSIS. *International Journal of Production Research* 2012; 50(15): 4175-4191.
20. Haddou Benderbal H., Dahane M., Benyoucef L. Flexibility-based multi-objective approach for machines selection in reconfigurable manufacturing system (RMS) design under unavailability constraints. *International Journal of Production Research* 2017; 55(20): 6033-6051: 10.1080/00207543.2017.1321802.
21. Hsieh F.-S., Design of scalable agent-based Reconfigurable manufacturing systems with Petri nets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 2018; 31(8): 748-759; 10.1080/0951192X.2018.1429665.
22. Jasiulewicz-Kaczmarek M. Practical aspects of the application of RCM to select optimal maintenance policy of the production line. In: Nowakowski, T; Mlynczak, M; Jodejko-Pietruczuk, A; et al. *Safety and Reliability: Methodology and Applications - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference 2015*: 1187-1195, 10.1201/b17399-165.
23. Koren Y. The Rapid Responsiveness of RMS. *International Journal of Production Research*; 51(23-24): 6817-6827, <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.856528>.
24. Koren Y., Arbor A., Kota S. *United States Patent, no. US 6 349 237*, 2000.
25. Koren Y., Gu X., Guo W. Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering* 2018; 13(2): 121-136, <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>.
26. Koren Y., Heisel U., Jovane F., Morivaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Van Brussel H. *Reconfigurable Manufacturing Systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology* 1999; 48(2): 527-540.
27. Koren Y., Hu S.J., Weber T.W. Impact on manufacturing system configuration on performance. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 1998; 47(1): 369-370.
28. Koren Y., Shpitalni M. Design of Reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 2010; 29(4): 130-141, 10.1016/j.jmsy.2011.01.001.
29. Kosicka E., Kozłowski E., Mazurkiewicz D. Intelligent systems of forecasting the failure of machinery park and supporting fulfilment of orders of spare parts. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 2018; 637: 54-63, 10.1007/978-3-319-64465-3_6.
30. Li G.Q., Mitrouchev P., Wang Y., Brissaud D., Lu L. Evaluation of the logic model of the reconfigurable manufacturing system based on generalised stochastic Petri nets. *International Journal of Production Research* 2012; 50(22): 6249-6258, 10.1080/00207543.2011.6162235.
31. Maganha I., Silva C., Ferreira L.M.D.F. Understanding reconfigurability of manufacturing systems: An empirical analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 2018; 48: 120-130: 10.1016/j.jmsy.2018.07.004.
32. Mehrabi M., Ulsoy G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2000; 11(4): 403-419: <https://doi.org/10.1023/A:1008930403506>.

33. Mittal K.K., Jain P.K. An Overview of Performance Measures in Reconfigurable Manufacturing System. *Procedia Engineering* 2014; 69: 1125-1129, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.100>.
34. Moghaddam S.K., Houshmand M., Fatahi Valilai O. Configuration design in scalable reconfigurable manufacturing systems (RMS); a case of single-product flow line (SPFL). *International Journal of Production Research* 2018; 56(11): 3932-3954, 10.1007/s00170-016-9243-7.
35. Napoleone A., Pozetti A., Macchi M. A framework to manage reconfigurability in manufacturing, *International Journal of Production Research* 2018; 56(11): 3815-3837, 10.1080/00207543.2018.1437286.
36. Negahban A., Smith S.J., Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 2014; 33(2): 241-261: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>.
37. Puik E., Telgen D., Van Moergestel L., Ceglarek D. Assessment of reconfiguration schemes for Reconfigurable Manufacturing Systems based on resources and lead time. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2017; 43: 30-38, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.011>.
38. Renna P. Decision-making method of reconfigurable manufacturing systems' reconfiguration by a Gale-Shapley model. *Journal of Manufacturing Systems* 2017; 45: 149-158, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.09.005>.
39. Reza Abdi M. Layout configuration selection for Reconfigurable manufacturing systems using the fuzzy AHP. *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 2009; 17(1-2): 149-165.
40. Singh A., Gupta S., Asjad M., Gupta P. Reconfigurable manufacturing systems: journey and the road ahead. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 2017; 8(2): 1849-1857, <https://doi.org/10.1007/s13198-017-0610-z>.
41. Spicer P., Koren Y., Shpitalni M., Yip-Hoi D. Design principles for machining system configurations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2002; 51(1): 275-280: 10.1016/S0007-8506(07)61516-9.
42. Wang G.X., Huang S.H., Yan Y., Du J.J. Reconfiguration schemes evaluation based on preference ranking of key characteristics of reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017; 89 (5-8): 2231-2249, 10.1007/s00170-016-9243-7.
43. Waters D., *Operations Management: Producing Goods and Services*, Pearson Education 2002.
44. Xiaobo Z., Wang J., Luo Z. A stochastic model of a Reconfigurable manufacturing system, Part 2: Optimal configurations. *International Journal of Production Research* 2000; 38(12): 2829-2842, <https://doi.org/10.1080/002075400411501>.
45. Yamada Y., Dynamic reconfiguration of reconfigurable manufacturing systems using particle swarm optimization. *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2006: 1444-1449, 10.1109/ROBOT.2006.1641912.
46. Zheng P., Wang H., Sang Z., Zhong R.Y., Liu Y., Liu C., Mubarak K., Yu S., Xu X. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering* 2018; 13(2): 137-150: 10.1007/s11465-018-0499-5.