

## ASSESSMENT METHODS OF PRODUCTION PROCESSES RELIABILITY – STATE OF THE ART

## METODY OCENY NIEZAWODNOŚCIOWEJ PROCESÓW PRODUKCYJNYCH – STAN WIEDZY

Maciej Chlebus, Sylwia Werbińska-Wojciechowska

Wrocław University of Technology, Politechnika Wrocławska

**Abstract:** *In the paper, authors focus on a problem of reliable performance of production processes. Reliability analyses of production systems regard considering many different factors and requirements. As a result, the paper discusses the basic definitions from the area of production engineering and reliability theory. Based on the literature research, there is proposed a basic classification of methods for production processes reliability assessment. Later, authors focus on the development of a multidimensional approach to production process reliability assessment. The work ends up with summary and directions for further research.*

**Keywords:** *production process, reliability assessment, literature review*

**Streszczenie:** *W artykule autorzy skupili się na problemie niezawodności procesów produkcyjnych. Analizy niezawodnościowe procesów produkcyjnych wymagają uwzględnienia wielu różnych czynników oraz uwarunkowań. W związku z tym, w pracy omówiono podstawowe pojęcia z obszaru inżynierii produkcji oraz teorii niezawodności. W oparciu o badania literaturowe, zaproponowano podstawową klasyfikację metod oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych. Następnie skupiono się na przedstawieniu nowego wielowymiarowego podejścia do oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych. Pracę kończy podsumowanie oraz wskazanie dalszych kierunków prac badawczych.*

**Słowa kluczowe:** *proces produkcyjny, ocena niezawodnościowa, przegląd literatury*

## **ASSESSMENT METHODS OF PRODUCTION PROCESSES RELIABILITY – STATE OF THE ART**

### **1. Introduction**

Performing at the market manufacturing companies are characterized by currently high complexity and by having many links with the environment, of both physical and virtual type. At the same time, increasing market uncertainty, linked to, among others, changing consumer expectations and high competitiveness on a global scale cause that there are placed in front of manufacturing companies new challenges in terms of ensuring flexibility of production systems, reliability and product quality, and availability of products on the market [2, 53]. The uncertainty of the environment and the requirements for, among others, product quality, shorter product life cycles, as well as the rapid aging technology cause a growing interest in such concepts as flexibility, productivity, quality, vulnerability, resilience or reliability. This is confirmed by a number of studies available in the literature (e.g. works [15, 21, 22, 29, 38, 40, 51]). At the same time, in search of greater efficiency and productivity, production systems are subjected reengineering processes, adapting them to modern management concepts (such as e.g. Lean Management) [2, 50]. However, such highly specialized production systems are less tolerant of the appearance of errors and damages occurring both in the supply chain and in the research area of production processes. Therefore, the reliability of production processes and systems are one of the key parameters to assess their performance [9, 32].

In this article, the authors focused on presenting a basic literature review including methods for analysing and evaluating the reliability of production processes, along with an identification of research gaps in the given research area. The article is an extension of the literature review presented in [8], where the models discussed the analysis and evaluation of the reliability of production processes.

Consequently, the next Section presents an overview of literature from the analysed research area. The basic concepts of manufacturing engineering and reliability theory are discussed. Based on literature research, the basic classification of methods of reliability analysis of production processes is proposed. Then, the authors focus on introducing a new multidimensional approach to the reliability assessment of manufacturing processes. The work ends with a summary and an indication of directions for further research.

### **2. Production process reliability assessment – literature review**

The first step is to introduce the basic concepts related to the production, the production system and manufacturing process.

The concept of production is understood as *a set of coordinated work processes in which the conscious and deliberate human activity defined as a work transforms raw materials into products (goods, services), employing means of labour and human resources* [44, 54]. Manufacturing process takes place in the production system.

The system will be defined as *a related set of elements acting together to achieve the defined goal* [44]. Therefore, the production system is *deliberately designed and structured arrangement of material, energy and information, operated by man and used to manufacture certain products (goods and services) in order to meet the diverse needs of consumers* [44, 54]. In the light of this definition, the production system can be treated as a set of workstations on which there is performed the transformation of the input material into finished goods for sale (Figure 1) [17, 44]. At the same time, the transformation of materials requires the provision of adequate resources, including [44]:

- technical means of production - halls, buildings, machinery and equipment, tools, instruments, means of transport, IT equipment, etc.,
- work items - materials purchased from the outside and intended for use in the production system,
- factors of energy - electricity, fuel, energy and other heat necessary for the operation of the production system,
- staff,
- information - essential in the process of production management,
- financial resources.

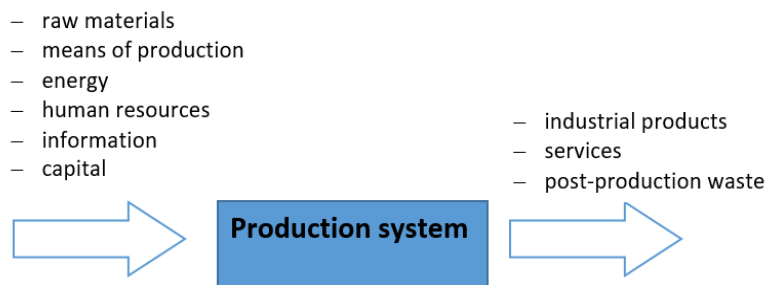


Fig. 1. A generalized model of a production system [54]

The essence of production systems is the implementation of production processes. In accordance with PN-EN ISO 9000: 2006 [47], the process is defined as *a set of interrelated or mutually interacting actions that transform inputs into outputs*. Nowosielski in his work [43] has developed this definition by describing the process as *an ordered set of actions, rules of conduct and recommendations, whose application in practice transforms input states into initial states in order to achieve measurable results of significant value for the customer*. In turn, Piatkowski in his work [45] assumed that the process is *a directed chain of events that are successive in time and form stages, phases, stages of development or transformations leading to a certain final stage*. According to the definition adopted in the work [44], the process is *a sequence of successive actions that make up "uninterrupted movement"*. Thus, referring to the definitions given above, the production process can be defined as *an ordered sequence of actions (operations, tasks) resulting in the customer receiving the required products* [44].

In turn, according to Niziński and Zurek, the production process *encompasses all the interrelated activities of people and means of work resulting in finished products (products, products)* [41]. According to Dwiliński [14], the production process is *the processing of materials into products using energy, information, qualified human resources and financial resources, as well as distribution, sales and delivery to customers of products and after-sales service*. Another definition is presented in [34], where the production process is *the totality of events and measures taken intentionally to make that the subject their effects achieves the desired changes that occur gradually*.

At the same time, taking into account the level of complexity of systems structures and production processes in real companies, high demands on efficiency and stability of performed processes, time pressure, or variability of production technologies, the reliability analyses of production processes and systems with the estimation of the impact of errors and failures on the performance of the whole organization gain in importance [23, 37].

A proper definition of reliability of production processes requires the presentation of the basics of reliability engineering theory. The term dependability of an object has been defined in PN-93 / N-50191 [46] which describes it *as a set of properties that describe the availability of an object and being affected by reliability, maintainability and supportability*. Other dependability characteristics of the object are defined in Table 1.

*Table 1 Definition of the main dependability characteristics according to PN-93/N-50191 standard [46]*

<b>Term</b>	<b>Definition</b>
Availability	Ability of an object to remain in condition for fulfilling the required function under given conditions, at a given moment or in a given period of time, assuming that there are provided the required external resources.
<b>Reliability</b>	<b>Property of an object to maintain the ability to perform present function at a certain time and under certain conditions.</b>
Maintainability	Ability of an object to maintain or restore under certain conditions of operation to a condition in which it may fulfil the required functions provided that the operation is carried out under prescribed conditions in accordance with established procedures and means.
Supportability	Ability of the organization to provide support connected with necessary maintenance means providing according to a given maintenance policy requirements.

One of the first works, in which the authors focused on analysing and evaluating the reliability of production processes and systems is [6]. Authors in their work defined the reliability of a production system as a probability that *the order of manufacturing components will be fully realized within a certain time interval*.

Another definition was proposed by the authors [23], defining the reliability of a production process as *the ability of equipment and personnel to perform operational tasks without failure interruption*. On the other hand, in [31], the authors defined the reliability of production process in the context of the probability of consumer demand and the performance level of a production system. The authors of [52] propose a very general definition, taking reliability of system/process as *the likelihood of events that prejudice the achievement of results*. At the same time, in case of a manufacturing system, reliability is usually treated as a performance indicator that provides information of overall system capability (see e.g. [32, 33]), productivity or quality (see e.g. [9, 15]), as a measure of production time (see e.g. [76]), or as the effect of ensuring high quality of the product and the reliability of system components (see e.g. [7]).

The complexity and multifaceted nature of production systems performance made that there can be found a lot of work covering issues of reliability engineering in the recent literature. Assessment problems in this field have gained much interest since 1960s [11]. A summary of literature in the examined research area can be found, for example, in [49], where the author focused on the issues of assessing the reliability of the production systems, or in the works [27, 28, 55], where the literature on the use of RAM analysis methods (*Reliability, Availability, Maintainability*) in the area of production systems performance is investigated. Surveys among international managers of manufacturing companies in the area of evaluation which reliability analysis methods are applied in their organizations were presented, among others, in [18]. Moreover, a number of studies may be found in the literature covering the risk analysis of production processes/systems performance based on the use of basic reliability analysis methods (e.g. [4, 25, 52]), or diagnostics and forecasting for maintenance of production systems and processes (e.g. work [57]). Issues of the risks associated with human factors analysis (*Human Factor Reliability analysis*) are summarized, among others, in [1, 5, 58].

Thus, based on the known literature, various approaches have been developed in order to assess and optimize the production processes performance. According to [10, 11], the main reliability assessment methods that also may be use for production processes analysis performance mostly include:

- Failure Mode and Effect Analysis (FMEA),
- Fault Tree Analysis (FTA),
- Network Reduction method,
- Decomposition method,
- Common Cause Failure Analysis method.

The authors of [56] emphasized that the analysis of the reliability and availability of production systems can be carried out using structural analysis (*logic structure analysis*), which include such methods as event tree, Petri networks or graphs Reliability, and traditional probabilistic models, which included e.g. Markov or Poisson models.

In turn, the authors of the paper [52], distinguished two main groups of methodologies for analysis of reliability of production systems/processes: analytical methods (including the Markov chain method, contingency enumeration method, and minimal path method), and the simulation methods (the Monte Carlo method). In addition, the authors [8] identified five major groups of reliability models of production processes and systems, highlighting among others, indicator assessment models, maintenance models of production machines, and models based on the use of quality engineering.

Based on PN-EN 60300-3-1: 2005 [48], methods of reliability analysis can be divided into two main groups - basic methods (mainly used for reliability analysis) and so-called general engineering methods to support reliability analysis. At the same time, the second division allows classifying methods as part of qualitative and quantitative analysis and assessment. Treating standard guidelines adopted as a basis for further research work, the authors propose a classification of reliability analysis methods, according to the diagram shown in Figure 2.

An interesting approach to the reliability analysis of production processes were presented by the authors in [23, 24, 26]. In these works, the authors focused on the problem of the production system and process reliability by presenting an approach based on the use of FMEA analysis and based on the DOE-NE-STD-1004-92 standard for the classification of risk sources. On the other hand, examples of the use of the FTA analysis in the area of systems and processes performance were presented, among others, in [35, 39].

In the paper [12] the authors presented a method for estimating the reliability of a sintering system based on the Integrated Factors Method use. The solution was based on results of fault tree analysis (FTA), Preliminary Hazard Analysis (PHA), or FMECA analysis. Use of Bayesian approach in the field of analysis of the reliability of the manufacturing process is shown by the author of the work [30]. Another approach is presented in [36], where the authors focus on the use of Weibull analysis in the area of the reliability analysis of production processes, referring to the basic definition of process reliability in accordance with PN-93/N-50191 standard [46].

The use of supporting methods in the area of reliability analysis of production systems/processes can be found, among others, in [3, 20], where the authors base on the use of statistical process control methods.

Based on the literature studies (also presented in [8]) there can be stated that most of the studies considered systems/processes reliability is a one-dimensional, focusing e.g. on the problem of unreliability of machines and equipment. However, the problem of reliability of production systems/processes requires taking into account a number of additional conditions for the execution of production tasks. Therefore, in the next section the authors proposed a new multi-dimensional approach to the definition of reliability of the production process.

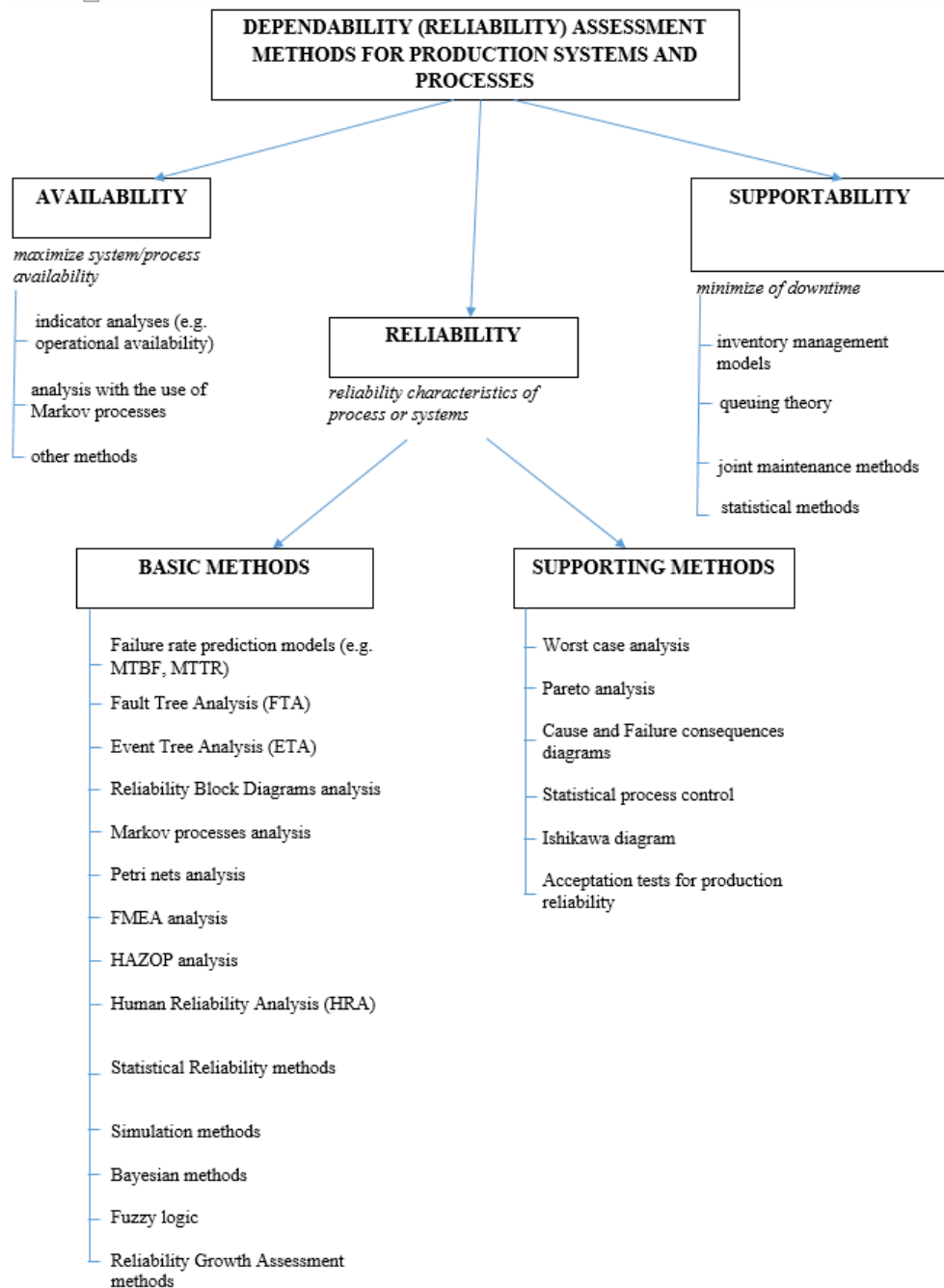


Fig. 2. The main classification of production systems/processes' dependability (and reliability) assessment methods

In addition, based on the literature review, it is possible to conclude that the currently available methods of reliability analysis are primarily focused on identifying potential hazards in the implementation of production processes, thus indicating the potential for their improvement. There are currently no solutions that would offer a comprehensive approach to the reliability assessment of the production process, taking into account clearly defined evaluation criteria and defined measures/means of assessing this reliability characteristic. Therefore, according to the authors of the article, it is advisable to develop a new methodology for assessing the reliability of the production process, taking into account the multidimensional approach along with the definition of the concept of failure of the production process, and defined criteria and methods for reliability assessment.

### **3. Production process reliability definition**

In the area of production systems performance, the main goal of the processes is to use all the resources needed to produce the final product from the supplied raw materials [16, 19]. This allows to propose basic definitions from the area of production system/process reliability.

With regard to the assumptions of the standard 46], the dependability of the manufacturing process can be defined as *a combination of properties that describe the process of availability to implement the manufacturing tasks and to affect its reliability, maintainability, and serviceability*. At the same time, the availability of the production process will determine its *ability to remain in a state of being able to carry out the production plan under the given conditions at a given moment or time, assuming that all necessary external resources (e.g. raw materials, human labour, production infrastructure) are delivered*.

In this context, based on many years of experience in the field of production systems performance of one of the co-authors of the article, the production process reliability may be defined as *an ability of a production system to completely fulfil the production plan of fully valuable final products in a specified period of time under stated conditions* [8]. The given process conditions regard to the five main areas [8]:

- machines and equipment performance and their failures occurrence possibility (connected with a number of uncertain factors, such as e.g. an uncertain degree of machine deterioration, inherent uncertainty in material and equipment quality, unavailability of operators, inadequate equipment usage) – that includes e.g. failure intensity calculations, maintenance tasks optimization,
- maintenance and logistic support infrastructure performance and their failures occurrence possibility – that takes into account e.g. the reliability of suppliers/retailers or logistic processes reliability,
- information flows and information reliability,
- possibility of the occurrence of unwanted random hazards/threats (internal and external type),
- processes of decisions making by policy makers and human factor reliability.



In this context, the failure of the production process *will determine the occurrence of a loss of process capability to fulfil the required functions (producing fully valuable products according to the production plan)*. An example of the reliability analysis of the production process, based on the multi-dimensional approach, is presented in [42], where the authors analysed the seven-state Markov model.

At the same time, the initial concept of the methodology for assessing the reliability of the manufacturing process is presented in Figure 3.

The developed concept of the reliability assessment methodology of the production process is based on the assumptions of the EN 60300-3-1 standard, primarily in the scope of identifying the performed processes and predefining the requirements of the process reliability. Correctly defined production process includes the identification and analysis of production tasks taking into account all specified operating conditions. On the other hand, the definition of reliability requirements makes it possible to define the criteria for the assessment. Requirements should relate to the specified five core operational areas.

The next step is to analyze the reliability, which identifies four basic phases:

- pre-assessment phase - allowing identification and classification of hazards in the process and related operational areas (basic and supporting infrastructure, information flow, etc.),
- data collection phase - operational data collection and expert research are planned at this stage,
- data analysis phase - includes a process reliability analysis in five core operational areas using selected core methods,
- the aggregation phase of the results obtained, allowing for the proper execution of the next stage - the reliability assessment of the production process.

The key step of the methodology to be developed will be the stage of assessing the level of the operational process reliability. On the basis of literature research (among others in the field of practical used reliability analyses, quantitative and qualitative analyses using, for example, key evaluation indicators), authors will develop a new measure of the level of process reliability that will take into account the performance results in the five defined area of operation and will be consistent with the proposed definition of reliability of the production process.

The evaluation process will answer the question posed whether initial requirements have been met. If not, there is a need to implement methods to improve the processes (e.g. reengineering processes). If the answer to this question is positive, one can go through the steps to implement recommendations that end the reliability evaluation process (if they are defined). Completion of this step completes the procedure for assessment of the reliability of the manufacturing process.

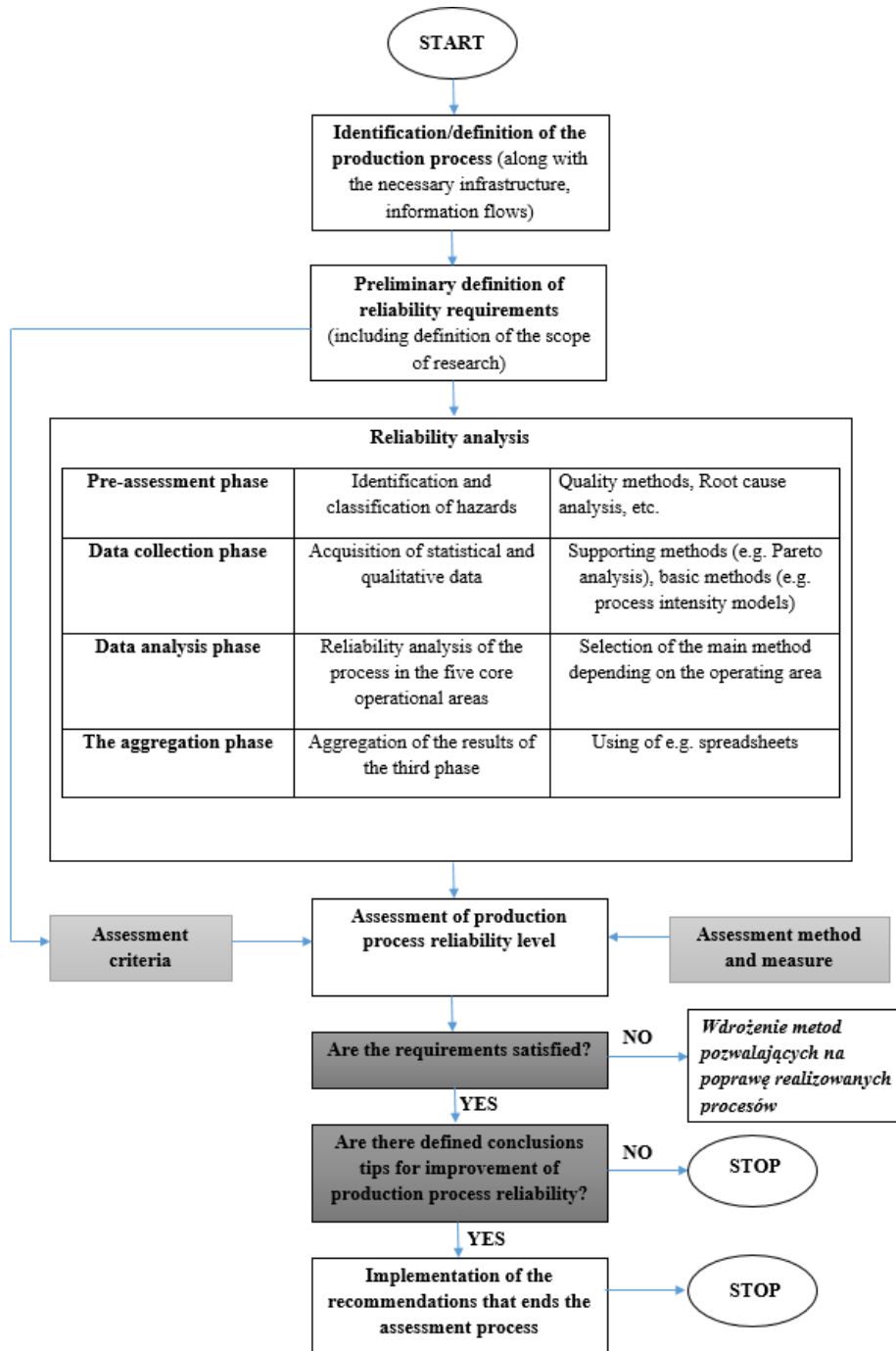


Fig. 3. The initial concept of production process reliability assessment methodology

#### 4. Summary

The authors focused on the presentation of the basic literature review covering the methods for assessing the reliability of production processes along with an indication of gaps in this research area. This allowed the authors to develop a new multidimensional approach to the reliability assessment of production processes.

Fully operational reliability analysis should take into account the assessment of all five areas of production systems performance. However, based on available literature, manufacturing companies are usually focused on the implementation of quality engineering (e.g. [15]) or a mixed approach - quality engineering and reliability (e.g. [51]) in order to improve their operational efficiency and productivity. Therefore, all the benefits associated with the implementation of multi-dimensional approach are omitted, which may be related, for example to:

- lack of awareness of the management staff regarding the benefits of a comprehensive approach in the area of assessing the reliability of systems/processes,
- lack of data necessary to implement a multidimensional reliability assessment of production systems/processes,
- lack of guidelines for the process of evaluating the reliability of production processes/systems depending on the random operational conditions.

Therefore, further research of the authors will be directed, among others, to carry out studies of real production systems performance that allowing for identification of errors occurred in the performed processes and giving the ability to implement the proposed approach.

#### 5. References

- [1] Aalipour M., Ayele Y.Z., Barabadi A.: Human reliability assessment (HRA) in maintenance of production process: a case study, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 7, Issue 2, 2016, 229-238.
- [2] Absjornslett B.E.: Assess the vulnerability of your production system, *Production Planning and Control*, vol. 10, no. 3, 1999, 219-229.
- [3] Adela-Eliza D., Simona D.: Products reliability assessment using Monte Carlo simulation, *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*, vol. 5, issue 5, 2011, 658-665.
- [4] Behun M., Kleinova J., Kamaryt T.: Risk assessment of non-repetitive production process, *Procedia Engineering*, vol. 69, 2014, 1281-1285.
- [5] Bell J., Holroyd J.: Review of human reliability assessment methods, RR679 Research Report, Health and Safety Executive, 2009.
- [6] Chakraborty S., Ankiah B.: Assessment of manufacturing system reliability: a case study, *Journal of Operational Research Society*, Vol. 40, No. 1, 1989, 55-63.

- [7] Chen Y., Jin J.: Quality-reliability chain modeling for system-reliability analysis of complex manufacturing process, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 54, no. 3, 2005, 475-488.
- [8] Chlebus M., Werbińska-Wojciechowska S.: Issues on production process reliability assessment – review. Artykuł przyjęty do druku w czasopiśmie *Research in Logistics and Production*.
- [9] Dai W., Maropoulos P.G., Zhao Y.: Reliability modelling and verification of manufacturing processes based on process knowledge management, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 28, No. 1, 2015, 98-111.
- [10] Dhillon B.S.: *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*, CRC Press, United States of America, 2006.
- [11] Dhillon B.S.: *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*, CRC Press, United States of America, 2005.
- [12] Di Bona G., Silvestri A., Forcina A., Petrillo A.: Reliability target assessment based on Integrated Factors Method (IFM): a real case study of a sintering plant, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 16, 2016, 1038-1051.
- [13] DOE-NE-STD-1004-92 – Root Cause Analysis Guidance Document, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., 1992.
- [14] Dwiliński L.: *Zarządzanie produkcją*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.
- [15] Elsayed E.A.: Perspectives and challenges for research in quality and reliability engineering, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 9, 2000, 1953-1976.
- [16] Fertsch M., Grzybowska K., Stachowiak A.: Models of manufacturing systems – classification framework. *Research in Logistics and Production*, 1(1), 2011, 45-51.
- [17] Głowacka-Fertsch D., Fertsch M.: *Zarządzanie produkcją*, Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań, 2004.
- [18] Haase F.V., Woll R.: Assessment of reliability implementation in manufacturing enterprises, *Management and Production Engineering Review*, vol. 7, no. 2, 2016, 12-20.
- [19] Hamrol A.: *Strategie i praktyki sprawnego działania*, PWN, Warszawa, 2015.
- [20] Heinrich M., Jasica G.: Assessing production process reliability using statistical methods, *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance*, vol. 3(155), 2008, 19-31.
- [21] Inman R.R., Blumenfeld D.E., Huang N., Li J., Li J.: Survey of recent advances on the interface between production system design and quality, *IIE Transactions*, Vol. 45, 2013, 557-574.
- [22] Jain A., Jain P.K., Chan F.T.S., Singh S.: A review on manufacturing flexibility, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 19, 2013, 5946-5970.

- [23] Karaulova T., Kostina M., Sahno J.: Framework of Reliability estimation for manufacturing processes, *Mechanika*, vol. 18, no. 6, 2012, 713-720.
- [24] Karaulova T., Kostina M., Shevtschenko E.: Reliability assessment of manufacturing processes, *International Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 3, No. 3, 2012, 143-151.
- [25] Khalaj M., Makui A., Tavakkoli-Moghaddam R.: Quantitative and qualitative method in risk-based Reliability assessing under epistemic uncertainty, *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 23, no. 2, 2012, 84-96.
- [26] Kostina M., Karaulova T., Sahno J., Maleki M.: Reliability estimation for manufacturing processes, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 51, issue 1, 2012, 7-13.
- [27] Kumar N., Tewari P. Sachdeva A.: Reliability assessment tools for multi-component complex systems: an overview, *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, vol. 4, Issue 01, 2015, 132-141.
- [28] Kumar P., Kumar R., Dahmani P., Narula D.: RAM analysis of some process industries: a critical literature review, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 3, no. 3, 2014, 171-179.
- [29] Li J., Meerkobv S.M., Zhang L.: Production systems engineering: main results and recommendations for management, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, Nos. 23-24, pp. 7209-7234.
- [30] Lin G.H.: Process reliability assessment with a Bayesian approach, *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, vol. 25, 2005, 392-395.
- [31] Lin Y-K., Chang P-Ch.: Reliability assessment for a stochastic manufacturing system with reworking actions, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 36, No. 3, 2013, 382-390.
- [32] Lin Y-K., Chang P-Ch.: System reliability of a manufacturing network with reworking action and different failure rates, *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 23, 2012, 6930-6944.
- [33] Lin Y-K., Chang P-Ch.: Reliability of a production system with intersectional lines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, Issue: 9, 2013, 1382-1392.
- [34] Liwowski B., Kozłowski R.: *Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją*, Oficyna a Wolters Kluwer business, Warszawa, 2011.
- [35] Liu Y., Liu Z.: An integration method for reliability analyses and product configuration, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, 2010, 831-841.
- [36] Ma J., He Y., Wu Ch.: Research on reliability estimation for mechanical manufacturing process based on Weibull analysis technology, 2012 *Prognostics & System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing)*.
- [37] Moinzadeh K., Aggarwal P.: Analysis of a Production/Inventory system subject to random disruptions, *Management Science*, Vol. 43, No. 11, 1997, 1577-1588.

- [38] Mondal S.C., Ray P.K., Maiti J.: Modelling robustness for manufacturing process: a critical review, *International Journal of Production Research*, Vol. 52, No. 2, 2014, 521-538.
- [39] Moss T.R., Andrews J.D.: Reliability assessment of mechanical systems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 210, no. 3, 205-216.
- [40] Muthiah K.M.N., Huang S.H.: A review of literature on manufacturing systems productivity measurement and improvement, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 1., No. 4., 2006, 461-484.
- [41] Niziński S., Żurek J.: *Logistyka ogólna*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2011.
- [42] Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S., Chlebus M.: Production process reliability modelling based on the Markov process implementation. *Proc. of Carpathian Logistics Congress CLC 2016, 28<sup>th</sup>-30<sup>th</sup>*, November, 2016, Zakopane, Poland.
- [43] Nowosielski S.: Zarządzanie procesami, dostępne na: [procesy.ue.wroc.pl/uploads/pliki/procesy/wyklady/ZPRnowosielskiWYKLAD.pdf](http://procesy.ue.wroc.pl/uploads/pliki/procesy/wyklady/ZPRnowosielskiWYKLAD.pdf) (dostęp: 15.11.2016r.).
- [44] Pająk E.: *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, PWE, Warszawa, 2006.
- [45] Piątkowski T.: *Analiza i modelowanie procesu sortowania strumienia małogabarytowych ładunków jednostkowych*, Rozprawa nr 139, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2010.
- [46] PN- 93/N-50191: 1993: *Słownik terminologiczny elektryki – Niezawodność, jakość obsługi*, PKN, Warszawa, 1993.
- [47] PN-EN ISO 9000:2006: *Systemy zarządzania jakością – podstawy i terminologia*, PKN, Warszawa, 2006.
- [48] PN-EN 60300-3-1:2005: *Zarządzanie niezawodnością – Część 3-1: Przewodnik zastosowań – Techniki analizy niezawodności – Przewodnik metodologiczny*, PKN, Warszawa, 2005.
- [49] Regatteri A.: *Reliability evaluation of manufacturing systems: methods and applications*, W: Aziz F.A. (Ed.), *InTech*, 2012, DOI: 10.5772/35653. Dostęp: <http://www.intechopen.com/books/manufacturing-system/reliability-evaluation-of-manufacturing-systems-methods-and-applications>
- [50] Saurin T.A., Rooke J., Koskela L.: A complex systems theory perspective of lean production, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 19, 2013, 5824-5838.
- [51] Savage G.J., Carr S.M.: Interrelating Quality and Reliability in Engineering Systems, *Quality Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2001, 137-152.
- [52] Sousa S., Nunes E., Lopes I.: Measuring and managing operational risk in industrial processes, *FME Transactions*, vol. 43, 2015, 295-302.

- [53] Szarmes P.: A review of current challenges in production planning, *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 8, No. 1, 2015, 88-95.
- [54] Szatkowski K. (red.): *Nowoczesne zarządzanie produkcją: ujęcie procesowe*, PWN, Warszawa, 2014.
- [55] Tsarouhas P.: Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: a review, *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 47, 2012, 2243-2251.
- [56] Viveros P., Zio E., Kristjanpoller F., Arata A. : Integrated system reliability and productive capacity analysis of a production line. A case study for Chilean mining process, *Proc. IMechE Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 226, 2011, 305-317.
- [57] Vogl G.W., Weiss B.A., Helu M.: A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016, 1-17, DOI: 10.1007/s10845-016-1228-8.
- [58] Watson I.A.: Review of human factors in reliability and risk assessment, *I Chem E Symposium*, April 1985, EFCE Publication Series no. 42, 323-351.



**MSc., Eng. Maciej Chlebus**, Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Maintenance and Operation of Logistic, Transportation and Hydraulic Systems; PhD student at Wrocław University of Technology with many years of industry experience in the areas of logistics, production and production planning; Current interests are related to the reliability of production processes as well as to the issues of vulnerability assessment of supply chains (Share 50%).



**Ph.D., Eng. Sylwia Werbińska-Wojciechowska**, Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Maintenance and Operation of Logistic, Transportation and Hydraulic Systems; PhD Dissertation investigated the modelling issues of logistics systems that support technical systems maintenance and operation processes; current interests are related to the issues of technical systems maintenance modelling with the use of time-delay concept, modelling and performance measurement of transport systems operation, supply chains resilience and vulnerability problems (Share 50%).

## **METODY OCENY NIEZAWODNOŚCIOWEJ PROCESÓW PRODUKCYJNYCH – STAN WIEDZY**

### **1. Wstęp**

Funkcjonujące na rynku przedsiębiorstwa produkcyjne cechują się obecnie wysoką złożonością oraz wieloma powiązaniem z otoczeniem, zarówno o charakterze fizycznym jak i wirtualnym. Jednocześnie, wzrastająca niepewność rynku, związana m.in. ze zmiennymi oczekiwaniami konsumentów czy wysoką konkurencyjnością w skali globalnej powodują, iż stawiane są przed przedsiębiorstwami produkcyjnymi nowe wyzwania w zakresie zapewnienia elastyczności systemów wytwarzania, niezawodności i jakości oferowanych produktów, czy dostępności produktów na rynku [2, 53]. Niepewność otoczenia oraz wymagania w zakresie m.in. jakości produktu, krótszych cykli życia produktów, czy szybkiego starzenia się technologii, powodują że wzrasta zainteresowanie takimi koncepcjami jak elastyczność, produktywność, jakość, podatność i odporność na zagrożenia, czy niezawodność. Potwierdza to szereg opracowań dostępnych w literaturze (np. prace [15, 21, 22, 29, 38, 40, 51]). Jednocześnie, w poszukiwaniu lepszej efektywności i wydajności, systemy produkcyjne są poddawane procesom reengineeringu, dostosowując je do nowoczesnych koncepcji zarządzania (takich jak np. Lean Management) [2, 50]. Jednakże tak wysoce wyspecjalizowane systemy produkcyjne cechują się mniejszą tolerancją na pojawiające się błędy i uszkodzenia, występujące zarówno w łańcuchu dostaw jak i w obszarze realizowanych procesów produkcyjnych. W związku z tym, niezawodność procesów i systemów produkcyjnych jest jednym z kluczowych parametrów oceny ich funkcjonowania [9, 32].

W artykule autorzy skupili się na przedstawieniu podstawowego przeglądu literatury obejmującej metody analizy i oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych wraz ze wskazaniem luk badawczych w danym obszarze. Artykuł jest rozwinięciem przeglądu literatury przedstawionego w pracy [8], gdzie omówiono modele analizy i oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych. W związku z tym, w kolejnym punkcie przedstawiono przegląd literatury z badanego obszaru. Omówiono podstawowe pojęcia z obszaru inżynierii produkcji oraz teorii niezawodności. W oparciu o badania literaturowe, zaproponowano podstawową klasyfikację metod analizy niezawodnościowej procesów produkcyjnych. Następnie skupiono się na przedstawieniu nowego wielowymiarowego podejścia do oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych. Pracę kończy podsumowanie oraz wskazanie kierunków dalszych prac badawczych.



## 2. Analiza niezawodnościowa procesu produkcyjnego – przegląd literatury

W pierwszym kroku należy przedstawić podstawowe pojęcia związane z produkcją, systemem produkcyjnym oraz procesem produkcyjnym.

Przez pojęcie produkcji rozumie się *zespół skoordynowanych procesów pracy, w których świadoma i celowa działalność ludzka, czyli praca przekształca przedmioty pracy w produkty (wyroby, usługi), używając do tego środków pracy oraz zasobów ludzkich* [44, 54]. Realizacja produkcji odbywa się w systemie produkcji.

Systemem nazwiemy *powiązany ze sobą zbiór elementów działających wspólnie dla osiągnięcia założonego celu* [44]. Zatem, system produkcyjny stanowi *celowo zaprojektowany i zorganizowany układ materiałowy, energetyczny i informacyjny, eksploatowany przez człowieka oraz służący wytwarzaniu określonych produktów (wytrobów, usług), w celu zaspokajania różnorodnych potrzeb konsumentów* [44, 54]. W świetle tej definicji system produkcyjny można traktować jako zbiór stanowisk roboczych, na których następuje transformacja (przekształcenie) strumienia materiałów wejściowych w gotowe produkty przeznaczone do sprzedaży (rys. 1) [17, 44]. Jednocześnie, transformacja materiałów wymaga dostarczenia odpowiednich zasobów, obejmujących [44]:

- techniczne środki produkcji – hale, budynki, maszyny i urządzenia, narzędzia, przyrządy, środki transportu, sprzęt IT, itp.;
- przedmioty pracy – materiały nabywane z zewnątrz i przeznaczone do wykorzystania w systemie produkcyjnym;
- czynniki energetyczne – energia elektryczna, paliwa, nośniki energii cieplnej i inne niezbędne do funkcjonowania systemu produkcyjnego;
- kadre;
- informacje – niezbędne w procesie zarządzania produkcją;
- środki finansowe.



Rys. 1. Uogólniony model systemu produkcyjnego [54]

Istotą systemów produkcyjnych jest realizacja procesów produkcyjnych.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 9000:2006 [47] proces jest określany *jako zbiór działań wzajemnie powiązanych lub wzajemnie oddziałujących, które przekształcają wejścia w wyjścia*.

Nowosielski w swojej pracy [43] rozwinął tę definicję, określając proces jako *uporządkowany zbiór działań, zasad postępowania i zaleceń, których stosowanie w praktyce przekształca stany wejściowe w stany wyjściowe w celu osiągnięcia mierzalnego rezultatu stanowiącego istotną wartość z punktu widzenia klienta.*

Z kolei Piątkowski w swojej pracy [45] przyjął, że proces jest *ukierunkowanym łańcuchem (ciągami) zdarzeń następujących po sobie w czasie i stanowiących stadia, fazy, etapy rozwoju lub przeobrażeń prowadzących do pewnego stadium końcowego.* Zgodnie z definicją przyjętą w pracy [44], proces jest *ciągami następujących po sobie działań, które składają się na „nieprzerwalny ruch”.* Zatem, odnosząc się do przedstawionych powyżej definicji, proces produkcji może być określany jako *uporządkowany ciąg działań (operacji, zadań), w wyniku którego klient otrzymuje wymagane produkty* [44].

Natomiast według Nizińskiego i Żurka proces produkcji *obejmuje całokształt wzajemnie ze sobą powiązanych działań ludzi i środków pracy, którego wynikiem są gotowe produkty (wyroby, wytwory)* [41]. Według Dwilińskiego [14], proces produkcji jest to *przetwarzanie wchodzących do systemu produkcyjnego materiałów w wyroby przy wykorzystaniu energii, informacji, kwalifikowanej pracy ludzkiej i środków finansowych, a także dystrybucja, sprzedaż i dostarczanie klientom wyrobów oraz opieka serwisowa nad wyrobami po ich sprzedaży.*

Inna definicja przedstawiona została w pracy [34], gdzie proces produkcyjny to *całokształt zjawisk i celowo podejmowanych działań, które sprawiają, że w przedmiocie pracy poddanym ich oddziaływaniu stopniowo zachodzą pożądane zmiany.*

Jednocześnie, uwzględniając poziom złożoności struktur systemów i procesów produkcyjnych funkcjonujących w rzeczywistych firmach, wysokie wymagania odnośnie efektywności i stabilności realizowanych procesów, presję czasu, czy zmienność technologii produkcji, zagadnienia analizy i oceny niezawodnościowej procesów i systemów produkcyjnych wraz z badaniem wpływu pojawiających się błędów i uszkodzeń na funkcjonowanie całej organizacji zyskują na znaczeniu [23, 37].

Właściwa definicja niezawodności procesów produkcyjnych wymaga przedstawienia podstaw z zakresu inżynierii niezawodności. Termin niezawodność obiektu został zdefiniowany w normie PN-93/N-50191 [46], gdzie określono go jako *zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi,* i jest używana tylko do ogólnego nieliczbowego zapisu. Pozostałe charakterystyki niezawodnościowe obiektu zdefiniowano w tabeli 1.

Tabela 1 Definicja podstawowych charakterystyk niezawodnościowych zgodnie z normą PN-93/N-50191 [46]

Pojęcie	Definicja
Gotowość	Zdolność obiektu do utrzymywania się w stanie umożliwiającym wypełnianie wymaganych funkcji w danych warunkach, w danej chwili lub w danym przedziale czasu, przy założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne.
Nieuszkodzalność	<b>Zdolność obiektu do wypełnienia wymaganych funkcji w danych warunkach w danym przedziale czasu.</b>
Obsługiwalność	Zdolność obiektu do utrzymywania lub odtwarzania w danych warunkach eksploatacji stanu, w którym może on wypełniać wymagane funkcje przy założeniu, że obsługa jest przeprowadzana w ustalonych warunkach z zachowaniem ustalonych procedur i środków.
Zapewnienie środków obsługi	Zdolność organizacji zajmującej się obsługą do zapewnienia w danych warunkach, na żądanie, środków potrzebnych do obsługi obiektu przy danej polityce obsługi.

Jedną z pierwszych prac, w której autorzy skupili się na analizie i ocenie niezawodnościowej procesów i systemów produkcyjnych jest [6]. Autorzy w swojej pracy zdefiniowali nieuszkodzalność systemu produkcyjnego jako *prawdopodobieństwo, że kolejność wytwarzania komponentów zostanie w pełni zrealizowana w określonym przedziale czasu*. Inną definicję zaproponowali autorzy pracy [23], określając nieuszkodzalność procesu produkcyjnego jako *zdolność wyposażenia oraz personelu do realizacji zadań operacyjnych nie przerwanej uszkodzeniem*. Z kolei w pracy [31], autorzy zdefiniowali nieuszkodzalność procesu produkcyjnego w kontekście prawdopodobieństwa realizacji popytu konsumentów oraz poziomu funkcjonowania systemu produkcyjnego. Autorzy pracy [52] proponują bardzo ogólną definicję, przyjmując nieuszkodzalność systemu/procesu produkcyjnego, jako *prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia, które przeszkodzi w osiągnięciu wyników*. Jednocześnie, w przypadku analizy systemów produkcyjnych, nieuszkodzalność bardzo często jest traktowana jako tzw. wskaźnik wydajności zapewniający informacje o zdolności operacyjnej systemu (np. prace [32, 33]), wskaźnik produktywności lub jakości (np. prace [9, 15]), miara oceny czasu produkcji (np. praca [6]), czy efekt zapewnienia wysokiej jakości produktu oraz nieuszkodzalności elementów systemu (np. [7]).

Zróżnicowanie w kwestii podejścia do definicji niezawodności i nieuszkodzalności procesów/systemów produkcyjnych oraz złożoność i różnorodny charakter wydajności systemów produkcyjnych sprawiają, że można znaleźć wiele prac obejmujących zagadnienia inżynierii niezawodności w najnowszej literaturze. Problemy analizy i oceny w tym zakresie są przedmiotem zainteresowania badaczy już od lat 1960 [11].

Podsumowanie literatury w badanym obszarze można znaleźć między innymi w pracy [49], gdzie autor skupił się na zagadnieniu oceny nieuszkodzalności systemów produkcyjnych, czy w pracach [27, 28, 55], gdzie skupiono się na przeglądzie literatury z obszaru zastosowania metod analizy RAM (*Reliability, Availability, Maintainability*) w obszarze funkcjonowania systemów produkcyjnych. Badania ankietowe wśród managerów międzynarodowych przedsiębiorstw produkcyjnych w zakresie oceny, które metody analizy niezawodnościowej są stosowane w danych organizacjach, zostały przedstawione m.in. w pracy [18]. Ponadto, w literaturze można także znaleźć szereg opracowań obejmujących analizę ryzyka funkcjonowania procesów/systemów produkcyjnych w oparciu o zastosowanie podstawowych metod analizy niezawodnościowej (np. prace [4, 25, 52]), czy zagadnienia diagnostyki i prognozowania w zakresie utrzymania systemów i procesów produkcyjnych (np. praca [57]). Zagadnienia analizy zagrożeń związanych z czynnikiem ludzkim (*Human Factor Reliability analysis*) zostały podsumowane m.in. w pracach [1, 5, 58].

Jednocześnie, bazując na światowej literaturze, można zdefiniować różne podejścia opracowane w celu przeprowadzenia oceny i optymalizacji wydajności procesów produkcyjnych. Według autora prac [10, 11], główne metody analizy niezawodności, które również mogą być użyte do analizy wydajności procesów produkcyjnych obejmują:

- analizę FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*),
- analizę Drzewa Błędów (FTA, *Fault Tree Analysis*),
- metodę Redukcji Sieci (*Network Reduction method*),
- metodę dekompozycji,
- metodę Analizy Wspólnej Przyczyny Uszkodzeń (*Common Cause Failure Analysis*).

Autorzy pracy [56] podkreślili, że analizy niezawodnościowe i badania gotowości systemów produkcyjnych mogą być przeprowadzane z wykorzystaniem analiz strukturalnych (*logic structure analysis*), które obejmują takie metody jak drzewa zdarzeń, sieci Petri'ego, czy grafy nieuszkodzalności, oraz tradycyjnych modeli probabilistycznych, gdzie uwzględnili np. modele Markowa czy modele Poissona.

Z kolei autorzy pracy [52] wyróżnili dwie główne grupy metod analizy nieuszkodzalności systemów/procesów produkcyjnych: metody analityczne (obejmujące metodę łańcuchów Markowa, metodę wyznaczania możliwych zdarzeń (*contingency enumeration method*), oraz metodę minimalnej ścieżki zdadności) oraz metody symulacyjne (metoda Monte Carlo). Ponadto, autorzy pracy [8] wyróżnili pięć głównych grup modeli niezawodnościowych procesów i systemów produkcyjnych, wyróżniając m.in. modele oceny wskaźnikowej, modele utrzymania maszyn produkcyjnych w stanie zdadności zadaniowej, oraz modele bazujące na wykorzystaniu inżynierii jakości.

W oparciu o normę PN-EN 60300-3-1:2005 [48], metody analizy niezawodności można podzielić na dwie główne grupy – metody podstawowe (służące głównie do analizy niezawodnościowej), oraz tzw. ogólne metody inżynierskie, wspomagające analizę niezawodności.

Jednocześnie, drugi podział pozwala klasyfikować metody w ramach analizy i oceny jakościowej oraz ilościowej. Traktując wytyczne normy jako podstawę w przyjętych dalszych pracach badawczych, autorzy proponują klasyfikację metod analizy niezawodnościowej, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2.

Interesujące podejście do analizy niezawodnościowej procesów produkcyjnych zostało przedstawione przez autorów w pracach [23, 24, 26]. W pracach tych autorzy skupili się na zagadnieniu nieuszkodzalności procesu i systemu produkcyjnego, przedstawiając podejście oparte o wykorzystanie analizy FMEA oraz opierające się na standardzie DOE-NE-STD-1004-92<sup>1</sup> w zakresie klasyfikacji źródeł ryzyka. Z kolei przykłady wykorzystania analizy FTA w obszarze funkcjonowania systemów i procesów produkcyjnych zostały przedstawione m.in. w pracach [35, 39]. W pracy [12] autorzy przedstawili metodę szacowania nieuszkodzalności systemu spiekania opierającą się na metodzie zintegrowanych czynników (*Integrated Factors Method*). W rozwiązaniu bazowano na wynikach analiz drzewa uszkodzeń (FTA), Wstępnej Analizy Zagrożeń (*Preliminary Hazard Analysis*, PHA), czy analizy FMECA. Wykorzystanie podejścia Bayesowskiego

w obszarze analizy niezawodnościowej procesu produkcyjnego zostało przedstawione przez autora pracy [30]. Inne podejście jest przedstawione w pracy [36], gdzie autorzy skupili się na wykorzystaniu analizy Weibulla w obszarze analizy niezawodnościowej procesów produkcyjnych, odnosząc się do podstawowej definicji nieuszkodzalności procesu, zgodnej z normą PN-93/N-50191 [46].

Wykorzystanie metod wspierających w obszarze analizy niezawodnościowej systemów/procesów produkcyjnych można znaleźć m.in. w pracach [3, 20], gdzie autorzy bazowali na wykorzystaniu metody statystycznej kontroli procesu.

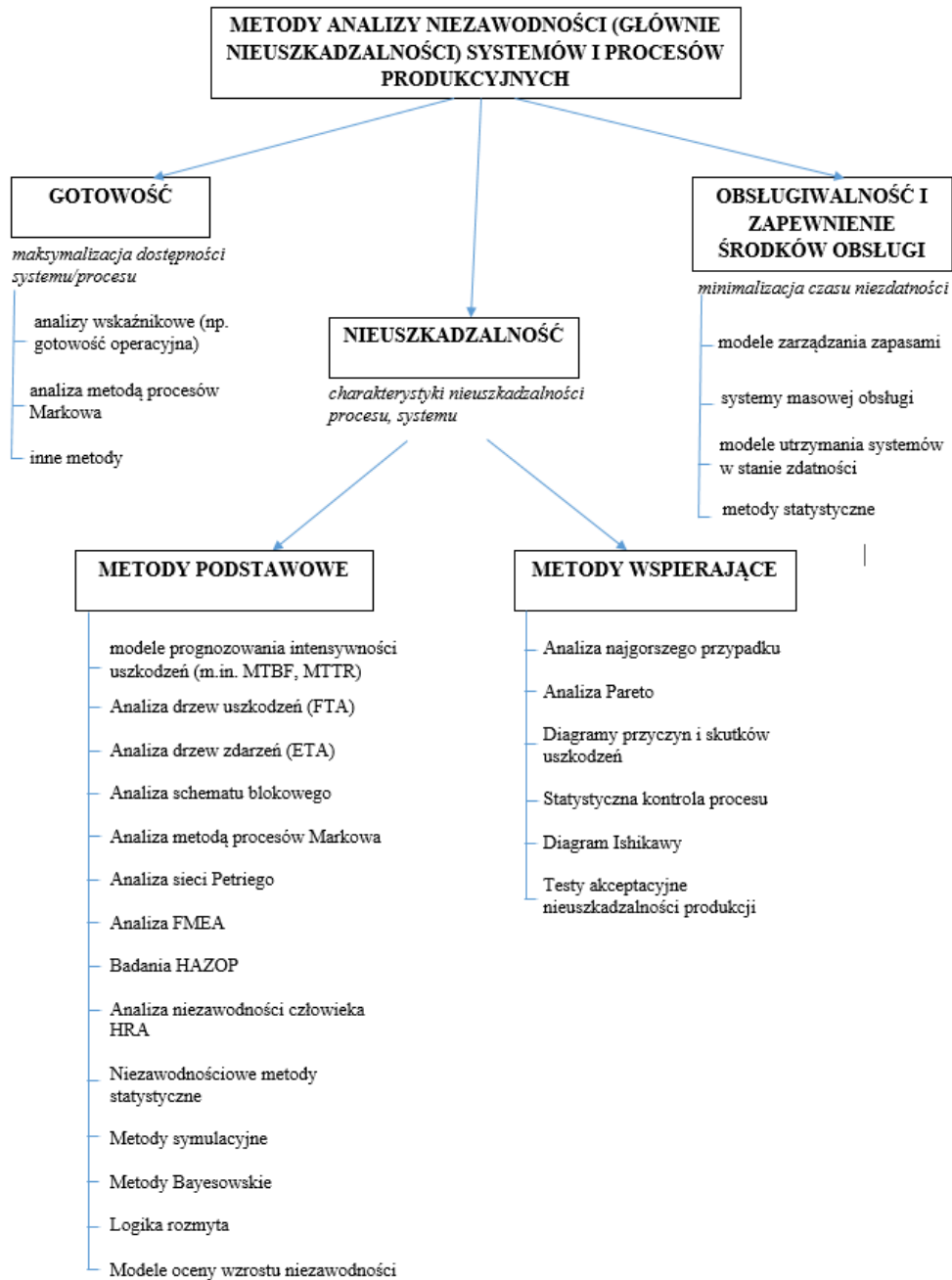
W oparciu o przeprowadzone badania literaturowe (przedstawione także w pracy [8]) można stwierdzić, że większość opracowań traktuje nieuszkodzalność systemów/procesów produkcyjnych w sposób jednowymiarowy, skupiając się np. na problemie zawodności maszyn i urządzeń. Jednakże, problem niezawodności (w tym nieuszkodzalności) systemów/procesów produkcyjnych wymaga uwzględnienia szeregu dodatkowych uwarunkowań realizacji zadań produkcyjnych. Dlatego też, w kolejnym punkcie autorzy zaproponowali nowe wielowymiarowe podejście do definicji nieuszkodzalności procesu produkcyjnego.

Ponadto, bazując na dokonanym przeglądzie literatury, można stwierdzić, iż obecnie dostępne metody analizy niezawodnościowej w głównej mierze skupiają się na identyfikacji potencjalnych zagrożeń występujących podczas realizacji procesów produkcyjnych, pozwalając na wskazanie możliwości usprawnienia ich funkcjonowania. Brakuje obecnie rozwiązań, które oferowałyby podejście kompleksowe w zakresie oceny niezawodnościowej procesu produkcji, uwzględniając w swym zakresie jasno określone kryteria oceny oraz zdefiniowane miary/sposoby oceny tej charakterystyki niezawodnościowej.

Dlatego też, zdaniem autorów artykułu wskazane jest opracowanie nowej metodyki oceny nieuszkodzalności procesu produkcyjnego, uwzględniającej wielowymiarowe podejście wraz z definicją pojęcia uszkodzenia procesu produkcyjnego, zdefiniowane kryteria oceny nieuszkodzalności oraz określone sposoby/miary oceny tej charakterystyki niezawodnościowej.

---

<sup>1</sup> Przewodnik w zakresie zastosowania metody przyczyn źródłowych (*Root cause analysis guidance document*), określający siedem podstawowych grup przyczyn zagrożeń [13]



Rys. 2. Podstawowa klasyfikacja metod analizy niezawodności (w tym niezuszkodzalności) systemów/procesów produkcyjnych

### 3. Definicja nieuszkodzalności procesu produkcyjnego

W obszarze funkcjonowania systemów produkcyjnych, głównym celem realizowanych procesów jest wykorzystanie wszystkich zasobów niezbędnych do wyprodukowania wyrobu końcowego z dostarczonych surowców [16, 19]. Pozwala to na zaproponowanie podstawowych definicji z obszaru niezawodności systemu/procesu produkcyjnego.

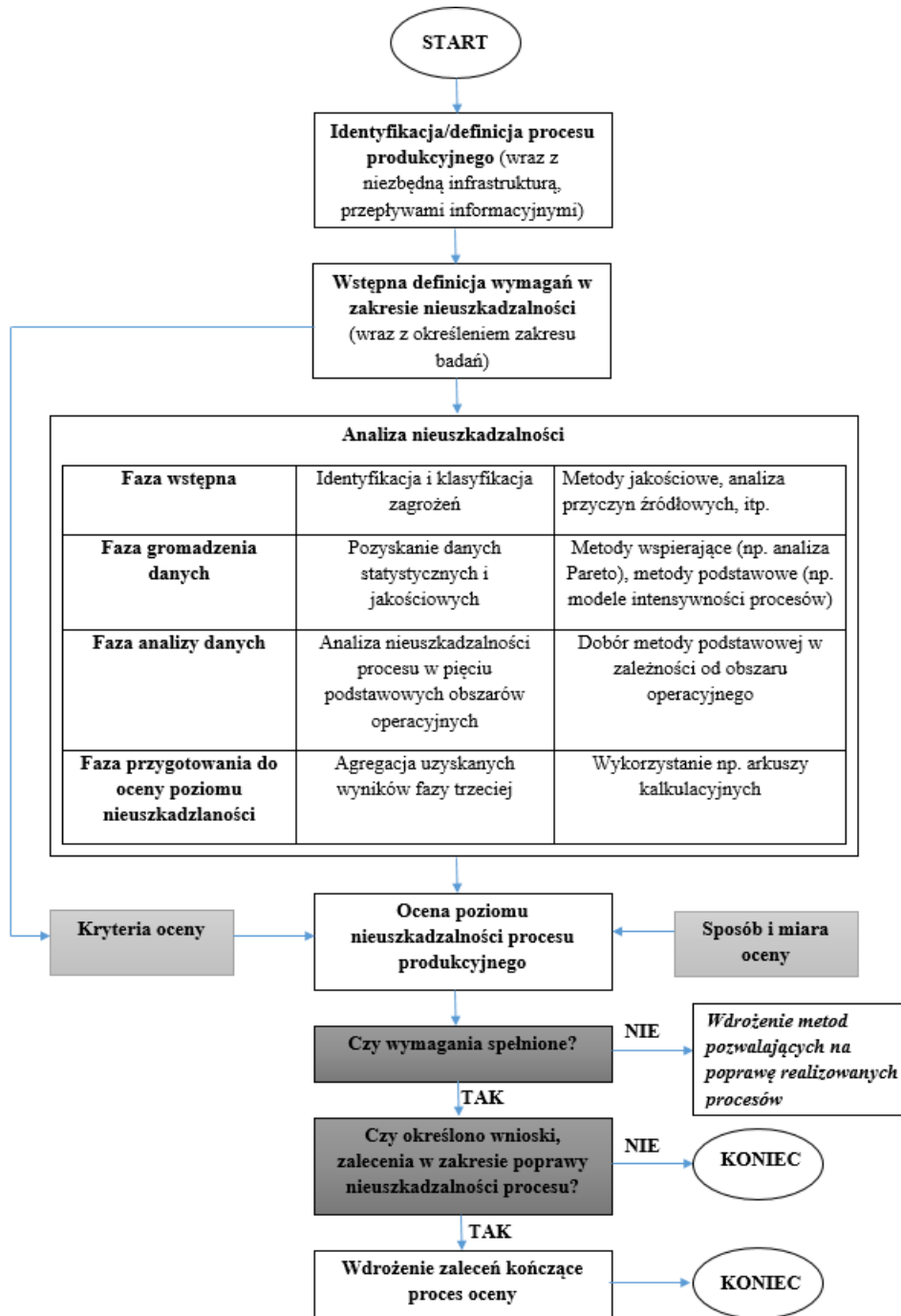
W odniesieniu do założeń normy [46], niezawodność procesu produkcyjnego może być zdefiniowana, jako *zespół właściwości, które opisują gotowość procesu do realizacji zadań produkcyjnych oraz wpływające na nią nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi*. Jednocześnie, gotowością procesu produkcyjnego nazwiemy jego *zdolność do utrzymywania się w stanie umożliwiającym realizację planu produkcyjnego w danych warunkach, w danej chwili lub w danym przedziale czasu, zakładając, że wszelkie niezbędne środki zewnętrzne (np. surowce, praca ludzka, infrastruktura produkcyjna) zostaną dostarczone*.

W tym kontekście, bazując na wieloletnim doświadczeniu z obszaru funkcjonowania systemów produkcyjnych jednego ze współautorów artykułu, można zaproponować wielowymiarową definicję nieuszkodzalności procesu produkcyjnego, jako *zdolność systemu produkcyjnego do pełnego wykonania planu produkcyjnego poprzez wyprodukowanie w pełni wartościowych wyrobów gotowych w określonym przedziale czasu i w określonych warunkach operacyjnych* [8]. Wyróżnione uwarunkowania operacyjne obejmują pięć podstawowych obszarów [8]:

- poprawność funkcjonowania maszyn i urządzeń produkcyjnych;
- poprawność funkcjonowania infrastruktury utrzymania i wsparcia logistycznego (uwzględniająca m.in. niezawodność realizowanych procesów logistycznych oraz niezawodność dostawców);
- przepływy informacyjne i ich poprawna realizacja,
- możliwość pojawienia się zewnętrznych i wewnętrznych zagrożeń,
- procesy podejmowania decyzji oraz czynnik ludzki.

W tym kontekście, uszkodzeniem procesu produkcyjnego będziemy określać *zdarzenie, w którym nastąpi utrata zdolności procesu do wypełnienia wymaganych funkcji (wytworzenia w pełni wartościowych produktów zgodnie z planem produkcji)*. Przykład analizy niezawodnościowej procesu produkcyjnego, bazującej na przedstawionym wielowymiarowym podejściu do oceny, został przedstawiony w pracy [42], gdzie autorzy przeprowadzili analizę siedmiostanowego modelu Markowa. Jednocześnie, wstępna koncepcja metodyki oceny niezawodnościowej procesu produkcyjnego została przedstawiona na rysunku 3.

Opracowana koncepcja metodyki oceny niezawodnościowej procesu produkcyjnego bazuje założeniach normy PN-EN 60300-3-1 przede wszystkim w zakresie przeprowadzenia identyfikacji realizowanych procesów oraz wstępnego zdefiniowania wymagań w zakresie nieuszkodzalności procesu. Poprawnie zdefiniowany proces produkcyjny obejmuje identyfikację i badania realizacji zadań produkcyjnych z uwzględnieniem wszystkich wyszczególnionych uwarunkowań operacyjnych. Natomiast definicja wymagań w zakresie nieuszkodzalności pozwala na określenie kryteriów przeprowadzanej oceny. Wymagania powinny odnosić się od określonych pięciu podstawowych obszarów operacyjnych.



Rys. 3. Wstępna koncepcja metodyki oceny niezawodnościowej procesu produkcyjnego



Następnym etapem jest przeprowadzenie analizy niezawodnościowej, gdzie wyróżniono cztery podstawowe fazy:

- fazę wstępną oceny – pozwalającą na przeprowadzenie identyfikacji i klasyfikacji zagrożeń występujących w procesie oraz związanych z funkcjonowaniem obszarów operacyjnych (infrastruktura podstawowa i wspierająca, przepływ informacji, itp.);
- fazę gromadzenia danych – na tym etapie przewidywane jest gromadzenie danych eksploatacyjnych oraz badania eksperckie;
- fazę analizy danych – obejmuje analizę niezawodnościową procesu w pięciu podstawowych obszarach operacyjnych z wykorzystaniem wybranych metod podstawowych;
- fazę agregacji uzyskanych wyników, pozwalającą na poprawne przeprowadzenie kolejnego etapu – oceny niezawodnościowej procesu produkcyjnego.

Kluczowym etapem opracowywanej metodyki będzie faza oceny poziomu nieuszkodzalności procesu operacyjnego. W oparciu o badania literaturowe (m.in. w zakresie wykorzystywanych w praktyce analiz niezawodnościowych, przeprowadzanych analiz ilościowych i jakościowych z wykorzystaniem np. kluczowych wskaźników oceny) autorzy opracują nową miarę oceny poziomu nieuszkodzalności procesu, która będzie brała pod uwagę wyniki badań w zakresie funkcjonowania pięciu zdefiniowanych obszarów operacyjnych oraz będzie spójna z proponowaną definicją nieuszkodzalności procesu produkcyjnego.

Przeprowadzona ocena procesu pozwoli odpowiedzieć na pytanie, czy postawione wstępne wymagania zostały spełnione. Jeśli nie, należy wdrożyć metody pozwalające na poprawę realizowanych procesów (np. reengineering procesów). Jeśli odpowiedź na pytanie jest pozytywna, można przejść do etapu wdrożenia zaleceń kończących proces oceny niezawodnościowej (jeśli takie zostały zdefiniowane). Zakończenie tego etapu kończy procedurę oceny niezawodnościowej procesu produkcyjnego.

#### **4. Podsumowanie**

W artykule autorzy skupili się na przedstawieniu podstawowego przeglądu literatury obejmującej metody oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych wraz ze wskazaniem luk badawczych w danym obszarze. Pozwoliło to na opracowanie nowego wielowymiarowego podejścia do oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych.

W pełni realizowana analiza niezawodnościowa powinna uwzględniać ocenę wszystkich pięciu obszarów funkcjonowania systemów produkcyjnych. Jednakże, bazując na dostępnej literaturze, przedsiębiorstwa produkcyjne zwykle skupione są na wdrożeniu inżynierii jakości (np. [15]) lub podejścia mieszanego – inżynierii jakości i niezawodności (np. [51]) w celu poprawy ich efektywności funkcjonowania i produktywności.

W związku z tym, wszelkie korzyści związane z wdrożeniem podejścia wielowymiarowego są pomijane, co może być związane np. z:

- brakiem świadomości kadry zarządzającej odnośnie zalet podejścia kompleksowego w obszarze oceny niezawodności systemów/procesów produkcyjnych,
- brakiem danych niezbędnych do wdrożenia wielowymiarowej oceny niezawodnościowej systemów/procesów produkcyjnych,
- brakiem wytycznych odnośnie realizacji procesu oceny niezawodnościowej procesów/systemów produkcyjnych w zależności od zmiennych uwarunkowań operacyjnych.

Dlatego też, dalsze prace badawcze autorów będą ukierunkowane m.in. na przeprowadzenie badań rzeczywistych systemów produkcyjnych, pozwalających na identyfikację błędów realizowanych procesów oraz możliwości implementacji proponowanego podejścia.

## **5. Literatura**

- [1] Aalipour M., Ayele Y.Z., Barabadi A.: Human reliability assessment (HRA) in maintenance of production process: a case study, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 7, Issue 2, 2016, 229-238.
- [2] Absjornsllett B.E.: Assess the vulnerability of your production system, *Production Planning and Control*, vol. 10, no. 3, 1999, 219-229.
- [3] Adela-Eliza D., Simona D.: Products reliability assessment using Monte Carlo simulation, *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*, vol. 5, issue 5, 2011, 658-665.
- [4] Behun M., Kleinova J., Kamaryt T.: Risk assessment of non-repetitive production process, *Procedia Engineering*, vol. 69, 2014, 1281-1285.
- [5] Bell J., Holroyd J.: Review of human reliability assessment methods, RR679 Research Report, Health and Safety Executive, 2009.
- [6] Chakraborty S., Ankiar B.: Assessment of manufacturing system reliability: a case study, *Journal of Operational Research Society*, Vol. 40, No. 1, 1989, 55-63.
- [7] Chen Y., Jin J.: Quality-reliability chain modeling for system-reliability analysis of complex manufacturing process, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 54, no. 3, 2005, 475-488.
- [8] Chlebus M., Werbińska-Wojciechowska S.: Issues on production process reliability assessment – review. Artykuł przyjęty do druku w czasopiśmie *Research in Logistics and Production*.
- [9] Dai W., Maropoulos P.G., Zhao Y.: Reliability modelling and verification of manufacturing processes based on process knowledge management, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 28, No. 1, 2015, 98-111.

- [10] Dhillon B.S.: *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*, CRC Press, United States of America, 2006.
- [11] Dhillon B.S.: *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*, CRC Press, United States of America, 2005.
- [12] Di Bona G., Silvestri A., Forcina A., Petrillo A.: Reliability target assessment based on Integrated Factors Method (IFM): a real case study of a sintering plant, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 16, 2016, 1038-1051.
- [13] DOE-NE-STD-1004-92 – Root Cause Analysis Guidance Document, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., 1992.
- [14] Dwiliński L.: *Zarządzanie produkcją*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.
- [15] Elsayed E.A.: Perspectives and challenges for research in quality and reliability engineering, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 9, 2000, 1953-1976.
- [16] Fertsch M., Grzybowska K., Stachowiak A.: Models of manufacturing systems – classification framework. *Research in Logistics and Production*, 1(1), 2011, 45-51.
- [17] Głowacka-Fertsch D., Fertsch M.: *Zarządzanie produkcją*, Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań, 2004.
- [18] Haase F.V., Woll R.: Assessment of reliability implementation in manufacturing enterprises, *Management and Production Engineering Review*, vol. 7, no. 2, 2016, 12-20.
- [19] Hamrol A.: *Strategie i praktyki sprawnego działania*, PWN, Warszawa, 2015.
- [20] Heinrich M., Jasica G.: Assessing production process reliability using statistical methods, *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance*, vol. 3(155), 2008, 19-31.
- [21] Inman R.R., Blumenfeld D.E., Huang N., Li J., Li J.: Survey of recent advances on the interface between production system design and quality, *IIE Transactions*, Vol. 45, 2013, 557-574.
- [22] Jain A., Jain P.K., Chan F.T.S., Singh S.: A review on manufacturing flexibility, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 19, 2013, 5946-5970.
- [23] Karaulova T., Kostina M., Sahnó J.: Framework of Reliability estimation for manufacturing processes, *Mechanika*, vol. 18, no. 6, 2012, 713-720.
- [24] Karaulova T., Kostina M., Shevtschenko E.: Reliability assessment of manufacturing processes, *International Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 3, No. 3, 2012, 143-151.
- [25] Khalaj M., Makui A., Tavakkoli-Moghaddam R.: Quantitative and qualitative method in risk-based Reliability assessing under epistemic uncertainty, *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 23, no. 2, 2012, 84-96.

- [26] Kostina M., Karaulova T., Sahnó J., Maleki M.: Reliability estimation for manufacturing processes, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 51, issue 1, 2012, 7-13.
- [27] Kumar N., Tewari P. Sachdeva A.: Reliability assessment tools for multi-component complex systems: an overview, *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, vol. 4, Issue 01, 2015, 132-141.
- [28] Kumar P., Kumar R., Dahmani P., Narula D.: RAM analysis of some process industries: a critical literature review, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 3, no. 3, 2014, 171-179.
- [29] Li J., Meerkobv S.M., Zhang L.: Production systems engineering: main results and recommendations for management, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, Nos. 23-24, pp. 7209-7234.
- [30] Lin G.H.: Process reliability assessment with a Bayesian approach, *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, vol. 25, 2005, 392-395.
- [31] Lin Y-K., Chang P-Ch.: Reliability assessment for a stochastic manufacturing system with reworking actions, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 36, No. 3, 2013, 382-390.
- [32] Lin Y-K., Chang P-Ch.: System reliability of a manufacturing network with reworking action and different failure rates, *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 23, 2012, 6930-6944.
- [33] Lin Y-K., Chang P-Ch.: Reliability of a production system with intersectional lines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, Issue: 9, 2013, 1382-1392.
- [34] Liwowski B., Kozłowski R.: *Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją*, Oficyna a Wolters Kluwer business, Warszawa, 2011.
- [35] Liu Y., Liu Z.: An integration method for reliability analyses and product configuration, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, 2010, 831-841.
- [36] Ma J., He Y., Wu Ch.: Research on reliability estimation for mechanical manufacturing process based on Weibull analysis technology, 2012 *Prognostics & System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing)*.
- [37] Moinzadeh K., Aggarwal P.: Analysis of a Production/Inventory system subject to random disruptions, *Management Science*, Vol. 43, No. 11, 1997, 1577-1588.
- [38] Mondal S.C., Ray P.K., Maiti J.: Modelling robustness for manufacturing process: a critical review, *International Journal of Production Research*, Vol. 52, No. 2, 2014, 521-538.
- [39] Moss T.R., Andrews J.D.: Reliability assessment of mechanical systems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 210, no. 3, 205-216.

- [40] Muthiah K.M.N., Huang S.H.: A review of literature on manufacturing systems productivity measurement and improvement, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 1., No. 4., 2006, 461-484.
- [41] Niziński S., Żurek J.: *Logistyka ogólna*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2011.
- [42] Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S., Chlebus M.: Production process reliability modelling based on the Markov process implementation. *Proc. of Carpathian Logistics Congress CLC 2016*, 28<sup>th</sup>-30<sup>th</sup>, November, 2016, Zakopane, Poland.
- [43] Nowosielski S.: Zarządzanie procesami, dostępne na: [procesy.ue.wroc.pl/uploads/pliki/procesy/wyklady/ZPRnowosielskiWYKLA D.pdf](http://procesy.ue.wroc.pl/uploads/pliki/procesy/wyklady/ZPRnowosielskiWYKLA D.pdf) (dostęp: 15.11.2016r.).
- [44] Pająk E.: *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, PWE, Warszawa, 2006.
- [45] Piątkowski T.: *Analiza i modelowanie procesu sortowania strumienia małogabarytowych ładunków jednostkowych*, Rozprawa nr 139, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2010.
- [46] PN- 93/N-50191: 1993: *Słownik terminologiczny elektryki – Niezawodność, jakość obsługi*, PKN, Warszawa, 1993.
- [47] PN-EN ISO 9000:2006: *Systemy zarządzania jakością – podstawy i terminologia*, PKN, Warszawa, 2006.
- [48] PN-EN 60300-3-1:2005: *Zarządzanie niezawodnością – Część 3-1: Przewodnik zastosowań – Techniki analizy niezawodności – Przewodnik metodologiczny*, PKN, Warszawa, 2005.
- [49] Regatteri A.: *Reliability evaluation of manufacturing systems: methods and applications*, W: Aziz F.A. (Ed.), *InTech*, 2012, DOI: 10.5772/35653. Dostęp: <http://www.intechopen.com/books/manufacturing-system/reliability-evaluation-of-manufacturing-systems-methods-and-applications>
- [50] Saurin T.A., Rooke J., Koskela L.: A complex systems theory perspective of lean production, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 19, 2013, 5824-5838.
- [51] Savage G.J., Carr S.M.: Interrelating Quality and Reliability in Engineering Systems, *Quality Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2001, 137-152.
- [52] Sousa S., Nunes E., Lopes I.: Measuring and managing operational risk in industrial processes, *FME Transactions*, vol. 43, 2015, 295-302.
- [53] Szarmes P.: A review of current challenges in production planning, *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 8, No. 1, 2015, 88-95.
- [54] Szatkowski K. (red.): *Nowoczesne zarządzanie produkcją: ujęcie procesowe*, PWN, Warszawa, 2014.
- [55] Tsarouhas P.: Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: a review, *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 47, 2012, 2243-2251.

- [56] Viveros P., Zio E., Kristjanpoller F., Arata A. : Integrated system reliability and productive capacity analysis of a production line. A case study for Chilean mining process, Proc. IMechE Part O: Journal of Risk and Reliability, vol. 226, 2011, 305-317.
- [57] Vogl G.W., Weiss B.A., Helu M.: A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing, Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 1-17, DOI: 10.1007/s10845-016-1228-8.
- [58] Watson I.A.: Review of human factors in reliability and risk assessment, I Chem E Symposium, April 1985, EFCE Publication Series no. 42, 323-351.



**mgr inż. Maciej Chlebus**, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych; doktorant Politechniki Wroclawskiej z wieloletnim doświadczeniem w przemyśle w obszarach logistyki, produkcji oraz planowania produkcji; obecne zainteresowania związane są z zagadnieniami niezawodności procesów produkcyjnych, jak również problemów oceny odporności na zagrożenia łańcuchów dostaw (Udział 50%).



**dr inż. Sylwia Werbińska-Wojciechowska**, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych; Rozprawa doktorska obejmowała problematykę modelowania wsparcia logistycznego procesów eksploatacji systemów technicznych; obecnie zainteresowania związane są z zagadnieniami modelowania strategii utrzymania systemów technicznych z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych, modelowania i oceny funkcjonowania systemów transportowych oraz problemów oceny odporności na zagrożenia łańcuchów dostaw (Udział 50%).