



Robert PILCH ORCID 0000-0003-2342-5776, pilch@agh.edu.pl – corresponding author  
Maksymilian SMOLNIK ORCID 0000-0003-0753-5190, smolnik@agh.edu.pl  
AGH University of Krakow (Akademia Górniczo-Hutnicza), Poland

## IMPACT OF THE CONSTRUCT TYPE ON THE AVAILABILITY OF THE SELECTED GROUPS OF TECHNICAL OBJECTS

### Wpływ konstrukcji na gotowość wybranych grup obiektów technicznych

**Abstract:** *The paper concerns the quantitative assessment of the availability of the groups of machines of the two different types of construct /design/ – traditional and modular, which perform the same functions and in the analyzed groups constitute koon-type reliability structures. The main aim is to determine the size of the differences in the availability and reliability of such groups of machines at different values of the characteristics regarding the failure rate and renewal of their subassemblies and modules. The solution to the problem was obtained through digital simulation, for which the model and assumptions were developed by the authors. The obtained results indicate that the groups of the machines of modular construct /design/ are characterized by better reliability and availability, which may constitute one of the guidelines in the process of making investment decisions and planning the use and maintenance of this type of machines.*

**Keywords:** availability, complex technical object, construct, design

**Streszczenie:** *Artykuł dotyczy ilościowej oceny gotowości grup maszyn o dwóch różnych typach konstrukcji: tradycyjnej i segmentowej, które pełnią te same funkcje i w analizowanych grupach tworzą struktury niezawodnościowe typu kzn. Głównym celem jest określenie, jak duże są różnice w gotowości i niezawodności takich grup maszyn przy różnych wartościach charakterystyk dotyczących awaryjności i odnowy ich podzespołów i segmentów. Rozwiązanie problemu uzyskano na drodze symulacji cyfrowej, do której model i założenia opracowali autorzy. Uzyskane wyniki wskazują, że lepszą niezawodnością oraz gotowością charakteryzują się grupy maszyn o konstrukcji segmentowej, co może stanowić jedną ze wskazówek w procesie podejmowania decyzji inwestycyjnych i planowania eksploatacji tego typu maszyn.*

**Słowa kluczowe:** gotowość, obiekty złożone, konstrukcja

Received: March 20, 2024 / Revised: March 27, 2024 / Accepted: March 27, 2024 / Published: March 29, 2024



## 1. Introduction

One of the basic factors influencing the reliability, as well as availability and durability of a technical object is its **construct** /design/ understood as the arrangement of structures and other states of the product [1]. Therefore, analyzing, assessing and forming the design features of technical means has clear practical significance in reliability engineering. This involves comparing, according to the planned use, objects of different constructs /designs/, which, however, would perform the same function in this application. This issue is addressed in the paper.

The work considers machines that perform the same operational functions, cf. [2, 3, 4], but are characterized by two types of constructs /designs/: **traditional** and **modular**. In both cases, these machines are considered in the reliability context as complex objects (i.e. consisting of distinguished smaller units, each of which is characterized by its certain reliability [5, 6]) and renewable (i.e. restored to a working condition /availability state/ after failure [7, 8, 9]). In a construction context, technical means of both types consist of smaller units (subassemblies) that perform the same functions, cf. [2].

The main structural /design/ difference concerns the structural /design/ solutions of the connections of the mentioned units (subassemblies). In the case of objects of the **modular** construct /design/, the connections of some units (modules) are designed for quick connection and disconnection (often without the use of additional tools). Objects of the **traditional** construct /design/ are understood (in this paper) as technical means performing the same functions as the considered objects of the modular construct /design/, but not designed to provide the possibility of quick and easy connection and disconnection of some of their units (subassemblies). Therefore, in the case of the objects of the traditional construct /design/, their disassembly and assembly will be particularly time-consuming, labor-intensive and requires the use of additional tools.

Objects of the modular construct /design/ are common in designing, manufacturing, use and maintenance of machines, and their examples include: rail vehicle trains with cars and engine units, some construction, agricultural machines and power tools, as well as some mechanized household appliances. At the same time, parallel to the indicated objects of the modular construct /design/, similar technical means are being built of the construct /design/ enabling the implementation of the same function, but without the possibility of easy and quick replacement of units (subassemblies) planned by their designer. Examples of machines of the modular construct /design/ (as understood in this paper) are shown in Figure 1.



**Fig. 1.** Examples of the objects of the modular structure /design/: EMA Combi / Celma power tools (left), Zelmotor household appliances (right)

**The aim of this study** is to determine and compare the reliability and availability of a selected group of objects of the modular construct /design/ with an analogous (i.e. functionally identical but structurally different) group of objects of the traditional construct /design/. It is assumed that both considered groups of the objects are characterized by reliability (redundant) structures of the koon type.

It is obvious that the availability index, cf. [6, 10, 11], of the group of the objects of the modular construct /design/ will be higher than the availability index of the corresponding group of the objects of the traditional construct /design/. This results from the assumptions regarding the group's reliability structure and the possibility of renewing failed machine subassemblies. What is particularly interesting, however, is how large the quantitative differences are for different values of the reliability indexes of the individual units (subassemblies, modules). In the case of the use and maintenance of groups of renewable objects, a particularly important practical indicator is the availability index that the group operating in a specific reliability structure will achieve [12, 13].

Two types of agricultural machines were selected for the analysis, which perform the same function, but are produced as objects of the modular and traditional constructs /designs/. As already noted, it was assumed that in both cases the groups of such objects will operate in the selected koon reliability structure. Data on the failure rate of machine subassemblies (modules) are exemplary (hypothetical) in nature, and for research reasons,

different values were adopted – which served to reflect different situations in use and maintenance systems.

The obtained results may provide guidance when choosing a more profitable (in terms of investment and operating costs) technical solution, e.g. in machine rental companies, municipal and service plants or larger horticultural farms.

## **2. Assumptions and developed computational model**

A computer simulation [14] was used to perform calculations and estimate reliability indexes of the groups of machines of the considered types. The basic assumption for the simulation model is the independence of the failures of individual subassemblies (modules) of the machines as well as the machines themselves [15]. In the simulation, the operation history is generated for each subassembly (module) of the machine individually over an assumed time horizon in accordance with the probability distributions of operating time to failure and renewal adopted for the unit.

For the machines of the modular construct /design/, it is assumed that only the failed machine module can be replaced and that the modules can be interchanged with other machines to ensure the availability of  $k$  out of  $n$  machines. In this case, the koon system of the machines is unavailable from the moment when at least  $n - k + 1$  modules of the same type (i.e. performing the same function) become unavailable, and returns to the state of availability when no more than  $n - k$  modules of each type become available at the same time.

In the case of the machines of the traditional construct /design/, a failure of any subassembly of the machine renders it unavailable, and to ensure the availability of the group of the machines ( $k$  available machines), the unavailable machine can only be replaced by another available one – it is not possible to interchange the subassemblies with other machines. In this case, the koon system of the machines is unavailable from the moment when there are at least  $n - k + 1$  of any subassemblies in separate machines unavailable, and returns to the state of availability when no more than  $n - k$  of any subassemblies are unavailable in separate machines at the same time.

Figure 2 shows a graphical example of the history of operation of a group of identical modules for the 4 out of 5 case with marked failure and renewal moments.

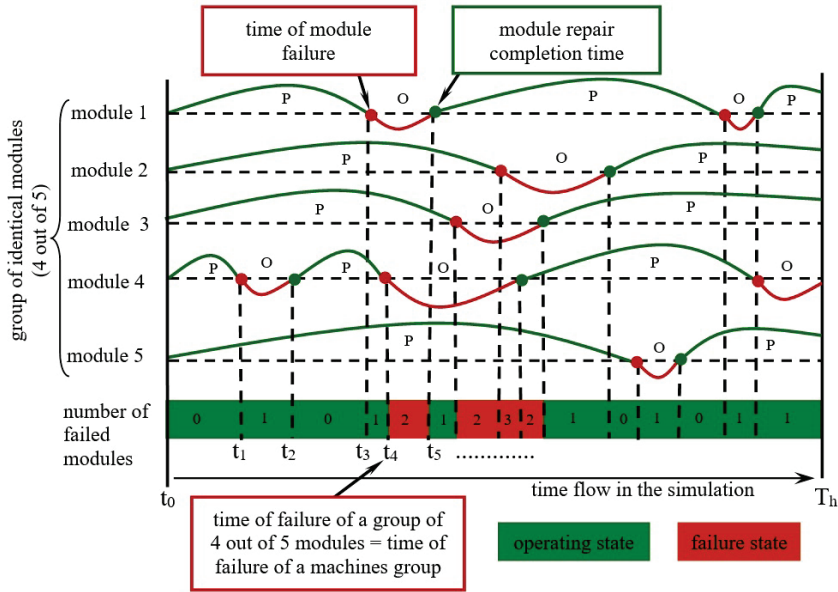


Fig. 2. Example of the history of operation of a one group of modules in the simulation for the 4 out of 5 case (P – work, O – renewal)

Figure 3 graphically presents an example of the operation history for a group of subassemblies (3 out of 3 structure) constituting a single machine of the traditional construct /design/, with the moments of failure and renewal marked.

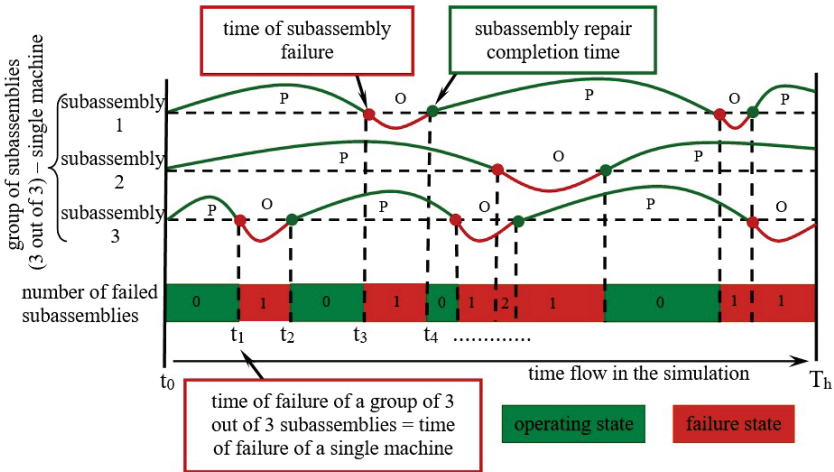


Fig. 3. Example of the history of operation of a one group of subassemblies of a 3 out of 3 structure constituting a single machine of the traditional construct /design/ (P – work, O – renewal)

The estimation of the sought reliability characteristics of the groups of machines operating in koon-type structures is based on the results of a multiple-times repeated simulation carried out for the selected group operation time horizon with an identical set of input parameters in each single simulation. If during the  $j$  simulation run a moment occurs when the given group of machines of the koon structure becomes unavailable for the first time, this time value is recorded then as  $t_{u1}(j)$  and constitutes the realization of the random variable of operating time to the first failure of the group used to determine its reliability course, according to the formula:

$$R(t) = 1 - \frac{n_{u1}(t)}{n_s} \quad (1)$$

where:

$n_{u1}(t)$  – number of  $t_{u1}$  values of operating time to first failure of the group, shorter than  $t$  recorded in all simulations

$n_s$  – number of simulation repetitions.

All times of failure of the group of the machines  $t_{ui}(j)$  and its return to the availability state  $t_{oi}(j)$  recorded in the simulation make it possible to determine the total time  $t_z(j)$  the group stays in the availability state in the given simulation run and are the values used to determine the availability index  $A(T_h)$  of the group.

$$t_z(j) = T_h - \sum_{i=1}^m (t_{oi} - t_{ui}) \quad \text{when } t_{om} \leq T_h \quad (2)$$

$$t_z(j) = T_h - (\sum_{i=1}^{m-1} (t_{oi} - t_{ui})) - (T_h - t_{um}) \quad \text{when } t_{om} > T_h \quad (3)$$

where:

$t_z(j)$  – availability time of the group of machines in  $j$  simulation

$t_{oi}$  – time of the  $i$  return to the availability state of the group of machines in  $j$  simulation

$t_{ui}$  – time of the  $i$  failure of the group of machines in  $j$  simulation

$t_{om}$  – time of the last return to the availability state of the group of machines in  $j$  simulation

$t_{um}$  – time of the last failure of the group of machines in  $j$  simulation.

$$A(T_h) = \frac{\sum_{j=1}^{n_s} t_z(j)}{T_h \cdot n_s} \quad (4)$$

where:

$A(T_h)$  – availability index of a group of machines

$T_h$  – simulation time horizon

$n_s$  – number of simulation repetitions.

The simulation was developed and implemented in the Matlab environment. The required input data for the simulation experiment are:

- koon type reliability structure
- probability distributions of the working time to failure and duration of post-failure renewal of each module for the machines of the modular construct /design/ and each subassembly for the machines of the traditional construct /design/, along with parameter values
- time horizon  $T_h$  of the group operation (use and maintenance) in the simulation.

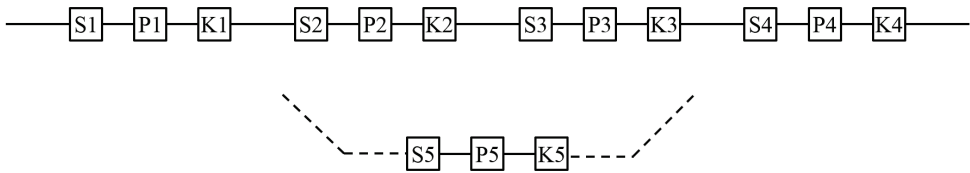
Based on the simulations performed, the following values are estimated:

- course of the reliability function  $R(t)$  of the koon group of the machines of the given type in the operating horizon assumed in the simulation
- value of the availability index  $A(T_h)$  of the koon group of the machines of the given type in the assumed operating horizon
- average number of the failures  $l_{ui}(T_h)$  of each module and, respectively, subassembly of the machines of the given type in the assumed operating horizon.

### **3. Data, calculation results and discussion**

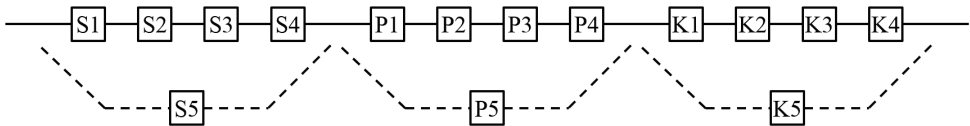
Exemplary calculations that were carried out using the developed tool concerned the study of the reliability and availability of two groups of certain agricultural machines of 4 out of 5 reliability structures. It was assumed that all machines in the first group are characterized by an identical segmented construct /design/ (each machine consists of three modules /units/: drive, transmission, working /mowing/) and all machines in the second group are characterized by an identical traditional construct /design/ (each machine can be divided into three subassemblies /units/: drive, transmission and working /mowing/). The relevant units (modules and subassemblies) of both types of the machines perform identical functions. Moreover, machines of the both types can be equipped with the same type of engines and they perform the mowing function with almost identical parameters (cutting width). Machines (of the both types) corresponding to the presented characteristics are currently available in the offer of one of the European agricultural machinery manufacturers. It should be emphasized that the machines mentioned are considered only as the examples of objects to be analyzed, and the reliability data used are hypothetical.

Figures 4 and 5 present the reliability structures of the considered groups of machines. Individually distinguished units indicate appropriate subassemblies (modules) of the machines; units marked with: the letter "S" represent the drive subassemblies (modules), the letter "P" represent the transmission subassemblies (modules), and the letter "K" represent the working /mowing/ subassemblies (modules).



**Fig. 4.** Diagram of the reliability structure of the group of machines (4 out of 5) of the traditional construct /design/

The unavailability of the analyzed group of machines of the traditional construct /design/ occurs when at least two of the five groups of subassemblies (machines) of 3 out of 3 structure each are unavailable at the same time.



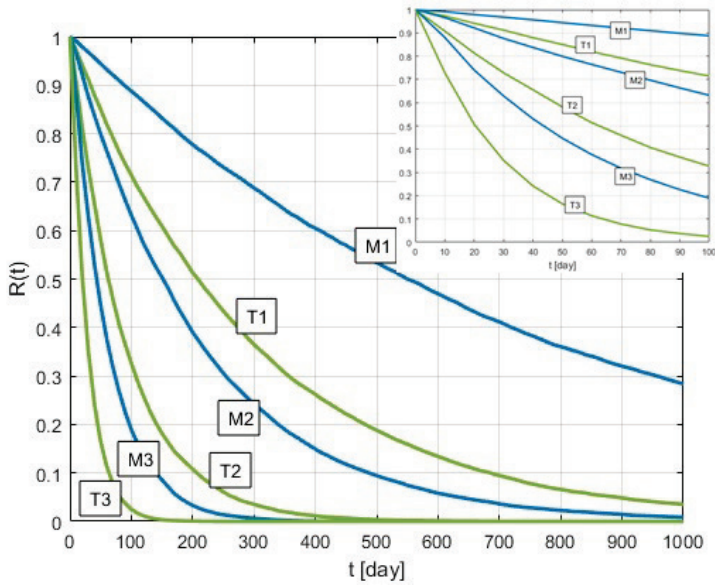
**Fig. 5.** Diagram of the reliability structure of the group of machines (4 out of 5) of the modular construct /design/

The unavailability of the analyzed group of machines of the modular construct /design/ occurs when the unavailability of any of the 3 groups of the modules of 4 out of 5 structure each occurs.

To calculate the availability and reliability indexes of the considered groups of machines, data in the form of exponential probability distributions of the operating time to failure and the duration of post-failure renewal were adopted. The distribution parameters for the individual machine modules and subassemblies were assumed as several different values: failure rate  $\lambda$  in the range of  $1/365 - 1/91$  [1/day], repair rate  $\mu$  in the range of  $1/10 - 1/3$  [1/day] – which serves to reflect various situations in the operation process. The time horizon of the calculations was assumed to be  $T_h = 2555$  [days] and the number of repetitions of each simulation experiment was  $n_s = 10000$ .

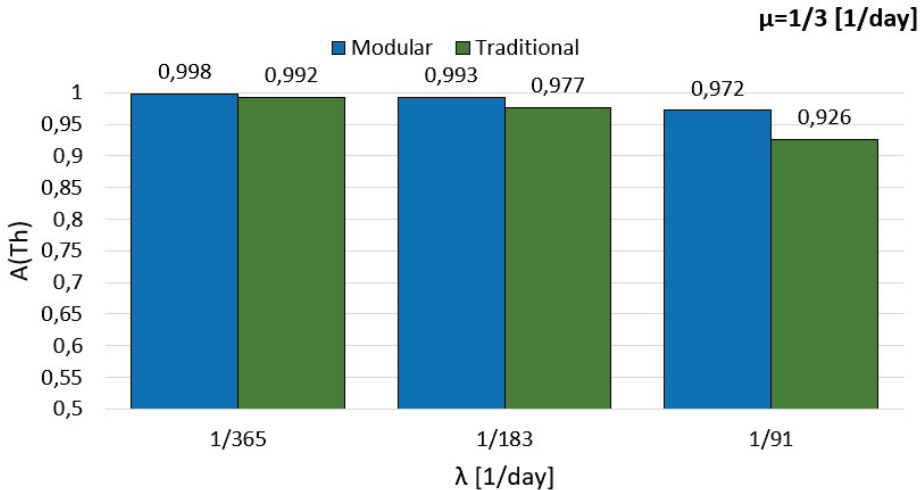
Figures 6 – 9 show the results of calculations obtained according to the developed computational model, presenting changes in the reliability of the groups of machines of 4oo5 structures and a comparison of their availability.



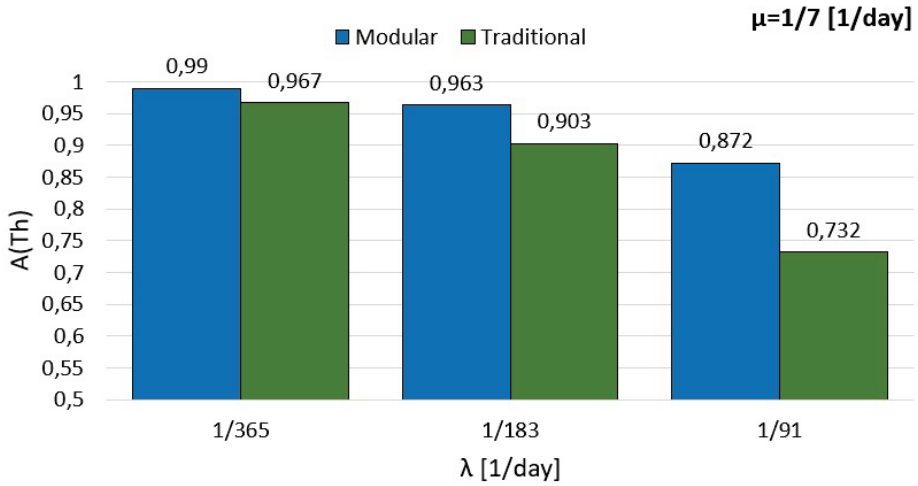


**Fig. 6.** Reliability functions of the groups of machines of 4oo5 structures for repair rate  $\mu = 1/3$  [1/day]: M1 (modular) and T1 (traditional) of  $\lambda = 1/365$  [1/day], M2 and T2 of  $\lambda = 1/183$  [1/day], M3 and T3 of  $\lambda = 1/91$  [1/day]

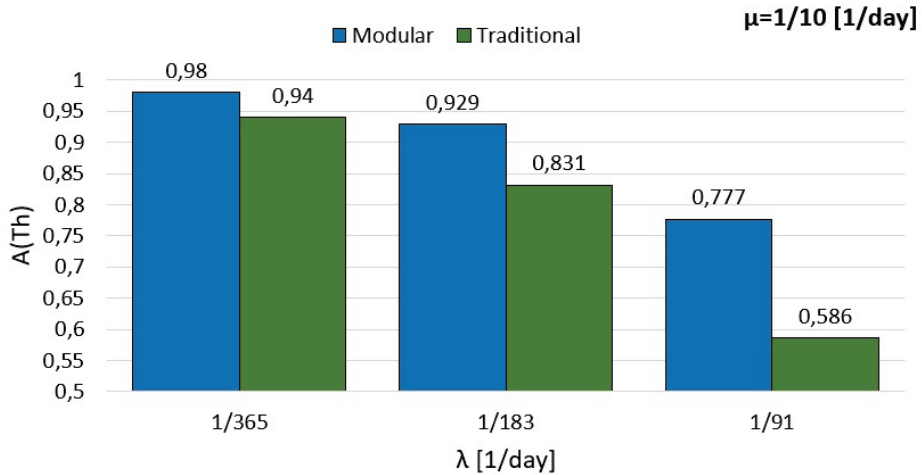
The obtained graphs show that for each set of input data, the groups of objects of the modular construct /design/ are characterized by better reliability.



**Fig. 7.** Availability indexes of the groups of machines depending on the failure rate of the modules and subassemblies at the constant repair rate



**Fig. 8.** Availability indexes of the groups of machines depending on the failure rate of the modules and subassemblies at the constant repair rate



**Fig. 9.** Availability indexes of the groups of machines depending on the failure rate of the modules and subassemblies at the constant repair rate

Based on the results obtained, it can be seen that regardless of the values of failure rate and repair rate of the modules and, respectively, subassemblies, higher availability values are obtained for the groups of machines of the modular construct /design/. Taking into account the fact that the calculations assumed the same values of the failure rate repair rate of the corresponding modules and subassemblies of the machines, these results show which

type of machine construct /design/ is better due to the availability indexes of the group of such machines, and in the comparison, the machines of the modular construct /design/ are better.

## **4. Conclusions**

The results obtained during the presented research constitute a preliminary quantitative description of the differences in reliability and availability of the selected groups of the objects of the modular construct /design/ and those of the traditional construct /design/. The values of the designated indexes enable comparison of both constructs /designs/in terms of the validity of their applications (due to the acceptable failure rate of the machines) when different situations and operational requirements are considered.

In particular, based on the values obtained, it can be concluded that:

- the groups of objects of the modular construct /design/ and the reliability structure of the koon type (when  $k < n$ ) are characterized by greater availability compared to the (functionally corresponding to them) groups of objects of the traditional construct /design/ (assuming the same reliability indexes of the modules and subassemblies),
- in the cases considered, for the assumed reliability indexes of the modules (subassemblies), the group of the 4 out of 5 objects of the modular construct /design/ is characterized by the availability indexes that are approximately 0,6% – 32,6% higher compared to the group of the objects of the traditional construct /design/.

The developed tool for simulating the operation process of technical objects of the modular construct /design/ enables the analysis of the availability of such objects, taking into account their preventive renewal (when the operating time to failure is described by distributions other than exponential). Analyzes in this area will be an element of the further research.

Another interesting issue is the economic result of the use and maintenance of the objects of the modular construct /design/ – compared to the result of the use and maintenance of the objects of the traditional construct /design/ (performing the same function as the considered modular objects). Calculations regarding this problem are possible after combining the reliability results obtained using the presented tool with the costs of servicing (post-failure renewal), losses due to failures and investment costs for objects of both types.

### ***Acknowledgement***

*The research was performed in the framework of a research program done at the AGH University of Krakow, at the Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, the contract number – subsidy 16.16.130.942.*

## 5. References

1. J. Dietrych, System i konstrukcja. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1985.
2. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.H. Grote, Engineering Design: A Systematic Approach. London: Springer-Verlag London Limited, 2007.
3. J. Boratyński, TRIZ dla ciekawych. Kielce: Urząd Marszałkowski Woj. Świętokrzyskiego, 2013.
4. K. Koltze, V. Souchkov, Systematische Innovation. TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung. Muenchen Wien: Carl Hanser Verlag, 2011.
5. J. Migdalski [ed.], Poradnik niezawodności: Podstawy matematyczne. Warszawa: Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”, 1982.
6. K.S. Trivedi, A. Bobbio, Reliability and availability engineering: Modeling, analysis, and applications. Cambridge University Press, 2017.
7. A. Birolini, Reliability Engineering. Theory and Practice. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, Milan, Paris, Singapore, Tokyo: Springer-Verlag, 1999.
8. B. Gnedenko, I. Ushakov, Probabilistic reliability engineering. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.
9. P.A. Tobias, D.C. Trinidade, Applied reliability. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
10. S. Młynarski, R. Pilch, M. Smolnik, J. Szybka, G. Wiązania, „Formation of «koon» systems reliability estimated with analytical and simulation calculation methods”, Journal of KONBiN, vol. 42, no. 1, 2017. DOI: 10.1515/jok-2017-0028.
11. J. Zhao, C. Gao, T. Tang, „A review of sustainable maintenance strategies for single component and multicomponent equipment”, Sustainability, vol. 14, no. 5, 2992, 2022. DOI: 10.3390/su14052992.
12. G. Wiązania, M. Smolnik, R. Pilch. „An estimation of koon systems availability using a simulation method”, Journal of Machine Construction and Maintenance, no. 4, 2017.
13. E. Kozłowski, A. Borucka, P. Oleszczuk, T. Jałowicz, “Evaluation of the maintenance system readiness using the semi-Markov model taking into account hidden factors”, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 25, no.4, 2023. DOI:10.17531/ein/172857.
14. J. Faulin, A. A. Juan Perez, S. S. Martorell Alsina, J. E. Ramirez-Marquez [eds.], Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems. London, New York: Springer, 2010.
15. Z. Zeng, A. Barros, D. Coit, “Dependent failure behavior modeling for risk and reliability: A systematic and critical literature review”, Reliability Engineering & System Safety, vol. 239, 109515, 2023. DOI: 10.1016/j.res.2023.109515.

# WPLYW KONSTRUKCJI NA GOTOWOŚĆ WYBRANYCH GRUP OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

## 1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych czynników wpływających na niezawodność, w tym gotowość oraz trwałość, obiektu technicznego jest jego konstrukcja rozumiana jako układ struktur i innych stanów wytworu [1]. Zatem analizowanie, ocenianie i kształtowanie cech konstrukcyjnych środków technicznych ma wyraźne znaczenie praktyczne w inżynierii niezawodności. Wiąże się z tym porównywanie, ze względu na planowane zastosowanie, obiektów o różnej konstrukcji, które jednak w tym zastosowaniu miałyby pełnić taką samą funkcję. Zagadnienia tego dotyczy niniejszy artykuł.

W pracy rozważane są maszyny pełniące takie same funkcje użytkowe, por. [2, 3, 4], jednak charakteryzujące się konstrukcjami dwóch typów: **tradycyjną** oraz **segmentową**. W obu przypadkach maszyny te traktowane są w kontekście niezawodnościowym jako obiekty złożone, tj. składające się z wyróżnionych mniejszych jednostek, z których każda charakteryzuje się pewną niezawodnością [5, 6], oraz odnawialne, tj. przywracane po uszkodzeniu do stanu zdatności [7, 8, 9]. W kontekście konstrukcyjnym środki techniczne obu typów składają się z mniejszych jednostek (podzespołów), pełniących takie same funkcje, por. [2].

Zasadnicza różnica konstrukcyjna dotyczy rozwiązań konstrukcyjnych połączeń wymienionych jednostek (podzespołów). W przypadku obiektów o konstrukcji segmentowej połączenia niektórych jednostek zaprojektowane zostały z myślą o ich szybkim łączeniu i rozłączaniu (i to często bez wykorzystania dodatkowych narzędzi). Obiekty o konstrukcji tradycyjnej rozumiane są w niniejszej pracy jako środki techniczne pełniące takie same funkcje jak rozważane obiekty o konstrukcji segmentowej, jednak niezaplanowane z uwzględnieniem możliwości szybkiego i łatwego łączenia i rozłączania ich niektórych jednostek (podzespołów). Zatem w przypadku obiektów o konstrukcji tradycyjnej ich demontaż i montaż będą szczególnie czasochłonne, pracochłonne i wymagające użycia dodatkowych narzędzi.

Obiekty o konstrukcji segmentowej występują powszechnie w budowie i eksploatacji maszyn, a jako ich przykłady można wymienić: składy pojazdów szynowych z wagonami i jednostkami napędowymi, niektóre maszyny budowlane, rolnicze czy elektronarzędzia, a także niektóre zmechanizowane urządzenia gospodarstwa domowego. Jednocześnie,

oprócz wskazanych obiektów o konstrukcji segmentowej, budowane są podobne środki techniczne o konstrukcji umożliwiającej realizację takiej samej funkcji, ale bez zaplanowanej przez ich projektanta możliwości łatwej i szybkiej wymiany jednostek (podzespołów). Przykłady maszyn o konstrukcji segmentowej, w znaczeniu przyjętym w niniejszej pracy, przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1.** Przykłady obiektów o konstrukcji segmentowej: elektronarzędzia EMA Combi / Celma (po lewej), urządzenia gospodarstwa domowego Zelmotor (po prawej)

Celem niniejszego opracowania jest określenie i porównanie niezawodności i gotowości wybranej grupy obiektów o konstrukcji segmentowej z analogiczną (tj. identyczną pod względem funkcjonalnym, ale różną pod względem konstrukcyjnym) grupą obiektów o konstrukcji tradycyjnej. Zakłada się przy tym, że obie rozpatrywane grupy obiektów charakteryzują się strukturami niezawodnościowym (nadmiarowymi) typu kzn.

Oczywiste jest, że gotowość, por. [6, 10, 11], grupy obiektów o konstrukcji segmentowej będzie większa od gotowości odpowiedniej grupy obiektów o konstrukcji tradycyjnej. Wynika to z założeń dotyczących struktury niezawodnościowej grupy oraz możliwości prowadzenia odnowy uszkodzonych podzespołów maszyn. Szczególnie interesujące jest jednak, jak duże są to różnice ilościowe dla różnych wartości wskaźników niezawodności poszczególnych jednostek (podzespołów, segmentów). W przypadku eksploatacji grup obiektów odnawialnych szczególnie istotnym praktycznie wskaźnikiem jest gotowość, jaką będzie się charakteryzowała funkcjonująca w określonej strukturze niezawodnościowej grupa [12, 13].

Do przeprowadzenia analizy wybrano maszyny rolnicze dwóch typów, które pełnią jednakową funkcję, ale produkowane są jako obiekty o konstrukcji segmentowej oraz tradycyjnej. Jak już zaznaczono, założono, że w obydwu przypadkach grupy takich obiektów będą pracowały w wybranej strukturze niezawodnościowej kzn. Dane dotyczące awaryjności podzespołów (segmentów) maszyn mają charakter przykładowy (hipotetyczny), a ze względów badawczych (poznawczych) przyjmowano ich różne wartości, co służyło odzwierciedlaniu różnych sytuacji w systemach eksploatacji.

Uzyskane wyniki mogą stanowić wskazówkę podczas dokonywania wyboru bardziej opłacalnego, ze względu na koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne, rozwiązania technicznego, np. w wypożyczalniach maszyn, zakładach komunalnych, usługowych czy większych gospodarstwach ogrodnictwa.

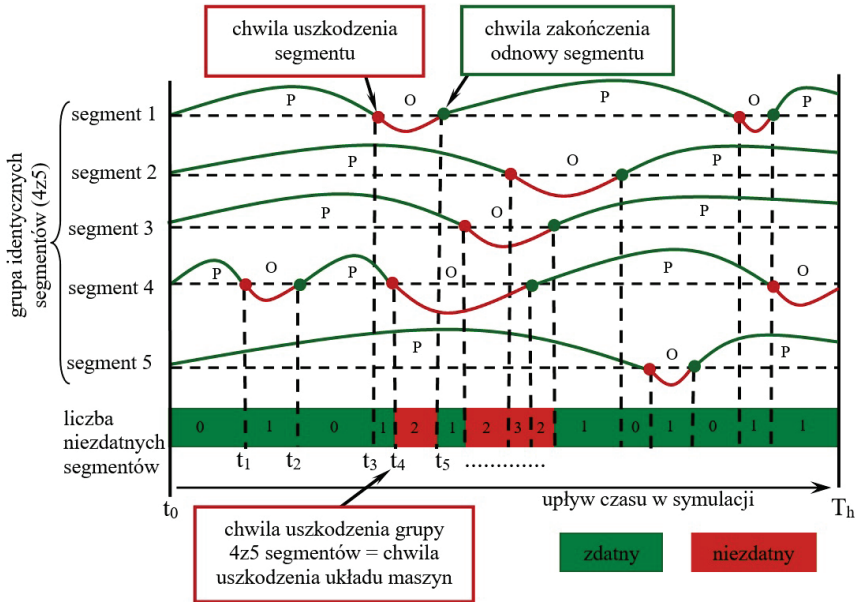
## **2. Założenia i opracowany model obliczeniowy**

Do przeprowadzenia obliczeń i szacowania wskaźników niezawodnościowych grup maszyn rozpatrywanych typów wykorzystano symulację komputerową [14]. Podstawowym założeniem do modelu symulacyjnego jest niezależność uszkodzeń poszczególnych podzespołów (segmentów) w maszynach, jak i maszyn między sobą [15]. Historia eksploatacji jest w symulacji generowana dla każdego podzespołu (segmentu) maszyny indywidualnie w założonym horyzoncie czasowym zgodnie z przyjętymi dla niego rozkładami prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia i odnowy.

Dla maszyn o konstrukcji segmentowej zakładana jest możliwość wymiany tylko uszkodzonego segmentu maszyny oraz możliwość zamiany segmentów między maszynami, aby zapewnić zdatność  $k$  spośród  $n$  maszyn. W tym przypadku układ kzn maszyn jest niezdatny od chwili, gdy niezdatnych zacznie być przynajmniej  $n - k + 1$  tego samego rodzaju (tj. pełniących tę samą funkcję) segmentów i wraca do stanu zdatności w chwili, gdy jednocześnie niezdatnych będzie nie więcej niż  $n - k$  segmentów każdego rodzaju.

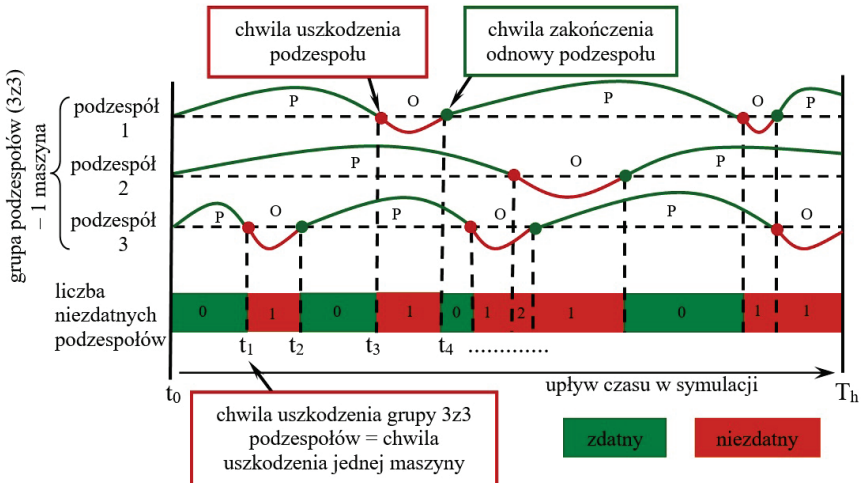
W przypadku maszyn o konstrukcji tradycyjnej uszkodzenie dowolnego podzespołu maszyny powoduje jej niezdatność i w celu zapewnienia zdatności układu ( $k$  maszyn zdatnych) może ona być zastąpiona tylko przez inną zdatną maszynę – nie ma możliwości zamiany podzespołów między maszynami. W tym przypadku układ kzn maszyn jest niezdatny od chwili, gdy w osobnych maszynach niezdatnych zacznie być przynajmniej  $n - k + 1$  dowolnych podzespołów i wraca do stanu zdatności w chwili, gdy w osobnych maszynach jednocześnie niezdatnych będzie nie więcej niż  $n - k$  dowolnych podzespołów.

Na rys. 2 w formie graficznej przedstawiono schematycznie przykładowy przebieg historii eksploatacji grupy identycznych segmentów dla przypadku 4z5 z zaznaczonymi chwilami uszkodzeń i odnow.



Rys. 2. Przykładowy przebieg historii eksploatacji jednej grupy segmentów w symulacji dla przypadku 4z5 (P – praca, O – odnowa)

Na rys. 3 przedstawiono schematycznie przykładowy przebieg historii eksploatacji dla grupy podzespołów (struktura 3z3) tworzących jedną maszynę o konstrukcji tradycyjnej z zaznaczonymi chwilami uszkodzeń i odnów.



Rys. 3. Przykładowy przebieg historii eksploatacji jednej grupy podzespołów o strukturze 3z3 tworzących jedną maszynę o konstrukcji tradycyjnej (P – praca, O – odnowa)



Oszacowanie poszukiwanych charakterystyk niezawodności grup maszyn pracujących w strukturach typu kzn odbywa się na podstawie wyników wielokrotnie powtórzonej symulacji, realizowanej dla wybranego horyzontu eksploatacji układu z identycznym zestawem parametrów wejściowych w każdej pojedynczej symulacji. Jeśli w  $j$ -tym przebiegu symulacji pojawia się chwila, kiedy dany układ maszyn o strukturze kzn po raz pierwszy staje się niezdatny, to ta wartość czasu jest rejestrowana jako  $t_{ui}(j)$  i stanowi realizację zmiennej losowej czasu pracy do pierwszego uszkodzenia układu służącą do wyznaczenia przebiegu jego niezawodności, wg zależności:

$$R(t) = 1 - \frac{n_{ui}(t)}{n_s} \quad (1)$$

gdzie:

$n_{ui}(t)$  – liczba wartości czasów pracy do pierwszego uszkodzenia układu  $t_{ui}$ , mniejszych od  $t$  zarejestrowanych we wszystkich symulacjach,

$n_s$  – liczba powtórzeń symulacji.

Wszystkie rejestrowane w symulacji czasy uszkodzenia grupy maszyn  $t_{ui}(j)$  i jej powrotu do stanu zdatności  $t_{oi}(j)$  umożliwiają wyznaczenie łącznego czasu przebywania grupy w stanie zdatności w danym przebiegu symulacji  $t_z(j)$  i są wartościami służącymi do wyznaczenia gotowości grupy  $A(T_h)$ .

$$t_z(j) = T_h - \sum_{i=1}^m (t_{oi} - t_{ui}) \quad \text{gdy } t_{om} \leq T_h \quad (2)$$

$$t_z(j) = T_h - (\sum_{i=1}^{m-1} (t_{oi} - t_{ui})) - (T_h - t_{um}) \quad \text{gdy } t_{om} > T_h \quad (3)$$

gdzie:

$t_z(j)$  – czas zdatności grupy w  $j$ -tej symulacji,

$t_{oi}$  – czas  $i$ -tego powrotu do stanu zdatności grupy maszyn w  $j$ -tej symulacji,

$t_{ui}$  – czas  $i$ -tego uszkodzenia grupy maszyn w  $j$ -tej symulacji,

$t_{om}$  – czas ostatniego powrotu do stanu zdatności grupy maszyn w  $j$ -tej symulacji,

$t_{um}$  – czas ostatniego uszkodzenia grupy maszyn w  $j$ -tej symulacji.

$$A(T_h) = \frac{\sum_{j=1}^{n_s} t_z(j)}{T_h \cdot n_s} \quad (4)$$

gdzie:

$A(T_h)$  – wskaźnik gotowości grupy maszyn,

$T_h$  – horyzont czasowy realizacji symulacji,

$n_s$  – liczba powtórzeń symulacji.

Symulację napisano i zrealizowano w środowisku Matlab. Wymaganymi danymi wejściowymi do realizacji eksperymentu symulacyjnego są:

- struktura niezawodnościowa typu kzn,
- rozkłady prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia oraz czasu trwania odnowy poawaryjnej każdego z segmentów dla maszyn o konstrukcji segmentowej i każdego podzespołu dla maszyn o konstrukcji tradycyjnej wraz z wartościami parametrów,
- horyzont czasowy  $T_h$  eksploatacji grupy w symulacji.

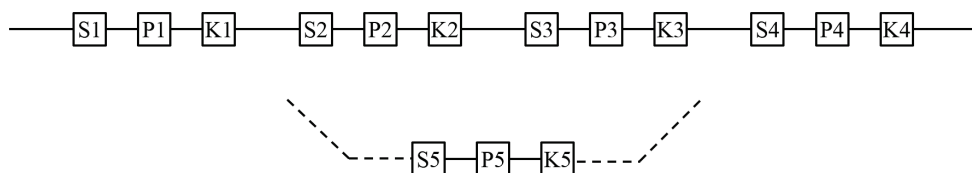
Na podstawie wykonanych symulacji oszacowane zostają następujące wielkości:

- przebieg funkcji niezawodności  $R(t)$  grupy kzn dla danego typu maszyn w przyjętym w symulacji horyzoncie eksploatacji,
- wartość wskaźnika gotowości  $A(T_h)$  grupy kzn maszyn danego typu w przyjętym horyzoncie eksploatacji,
- średnia liczba uszkodzeń  $l_{ui}(T_h)$  każdego z segmentów i odpowiednio podzespołów dla danego typu maszyn w przyjętym horyzoncie eksploatacji.

### 3. Dane, wyniki obliczeń i dyskusja

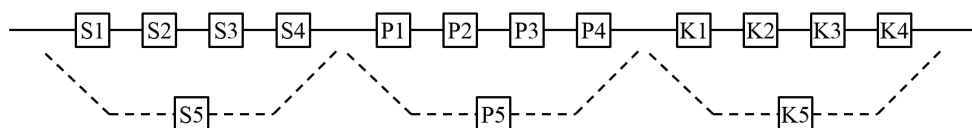
Przykładowe obliczenia, które zostały przeprowadzone za pomocą opracowanego narzędzia, dotyczyły badania niezawodności i gotowości dwóch grup pewnych maszyn rolniczych o niezawodnościowych strukturach 4z5. Przyjęto, że wszystkie maszyny w pierwszej grupie charakteryzują się identyczną konstrukcją segmentową, w każdej maszynie wyróżnia się trzy segmenty (jednostki): napędowy, przekładniowy, roboczy (koszący) oraz wszystkie maszyny w drugiej grupie charakteryzują się identyczną konstrukcją tradycyjną – w każdej maszynie można wyróżnić trzy podzespoły (jednostki): napędowy, przekładniowy i roboczy (koszący). Przy tym odpowiednie jednostki (segmenty i podzespoły) maszyn obu typów pełnią identyczne funkcje. Ponadto, maszyny obu typów wyposażone mogą być w silniki tego samego typu oraz realizują one funkcję koszenia przy niemal identycznych parametrach (szerokość koszenia). Maszyny (obu typów) odpowiadające przedstawionej charakterystyce są obecnie dostępne w ofercie jednego z europejskich producentów maszyn rolniczych. Należy podkreślić, że wspomniane maszyny przywołane zostały tylko jako przykład obiektów do analizy, a wykorzystywane dane niezawodnościowe mają charakter hipotetyczny.

Na rys. 4 i 5 przedstawiono struktury niezawodnościowe rozpatrywanych grup maszyn. Poszczególne wyróżniane jednostki wskazują odpowiednie podzespoły (segmenty) maszyn; przy tym jednostki oznaczone literą „S” reprezentują podzespoły (segmenty) napędowe, literą „P” reprezentują podzespoły (segmenty) przekładniowe, a literą „K” reprezentują podzespoły (segmenty) robocze (koszące).



Rys. 4. Schemat struktury niezawodnościowej grupy maszyn (4z5) o konstrukcji tradycyjnej

Niezdatność analizowanej grupy maszyn o konstrukcji tradycyjnej następuje w chwili, gdy występuje jednocześnie niezdatność przynajmniej dwóch z pięciu grup podzespołów (maszyn) o strukturze 3z3 każda.

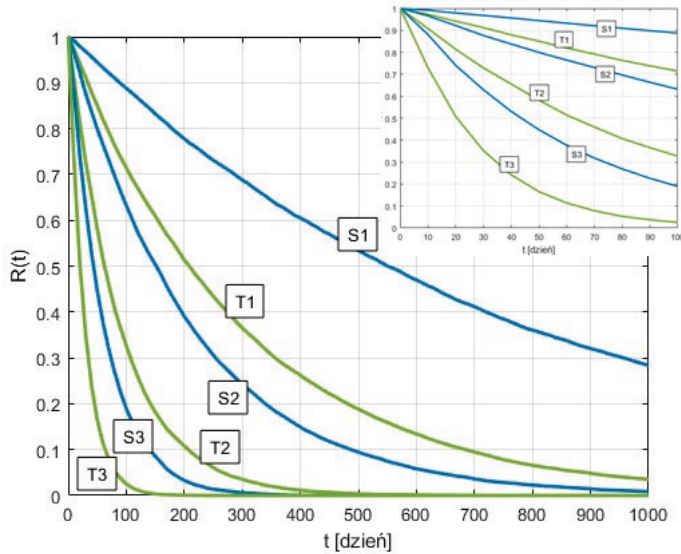


Rys. 5. Schemat struktury niezawodnościowej grupy maszyn (4z5) o konstrukcji segmentowej

Niezdatność analizowanej grupy maszyn o konstrukcji segmentowej następuje w chwili, gdy pojawi się niezdatność dowolnej z trzech grup segmentów o strukturze 4z5 każda.

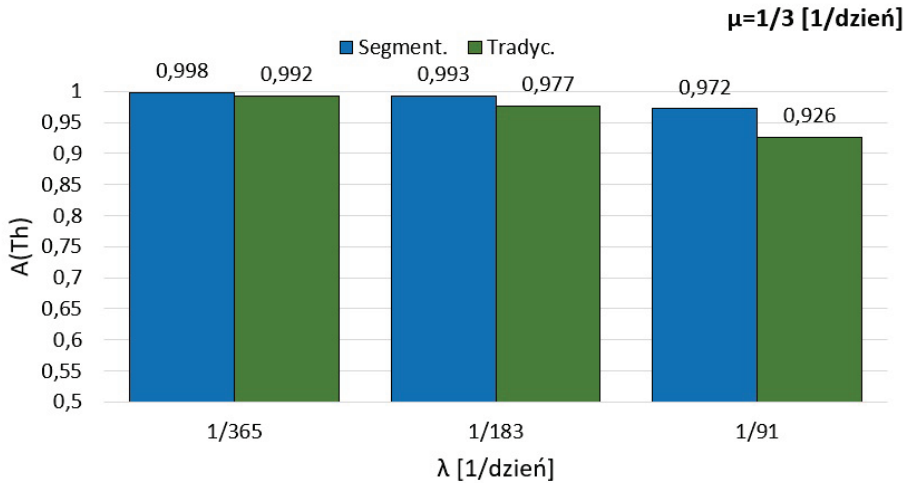
Do obliczeń gotowości i niezawodności rozpatrywanych grup maszyn przyjęto dane w postaci wykładniczych rozkładów prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia oraz czasu trwania odnowy poawaryjnej. Parametry rozkładów dla poszczególnych segmentów oraz podzespołów maszyn przyjmowano jako kilka różnych wartości: intensywność uszkodzeń  $\lambda$  z zakresu  $1/365 - 1/91$  [1/dzień], intensywność odnowy  $\mu$  z zakresu  $1/10 - 1/3$  [1/dzień] – co służy odzwierciedleniu różnych sytuacji w procesie eksploatacji. Horyzont czasowy obliczeń przyjęto  $T_h = 2555$  [dni], a liczbę powtórzeń każdego eksperymentu symulacyjnego  $n_s = 10000$ .

Na rys. 6–9 zamieszczono wyniki obliczeń uzyskanych według opracowanego modelu obliczeniowego, prezentujące zmiany przebiegu niezawodności grup maszyn w strukturach 4z5 oraz porównanie ich gotowości.

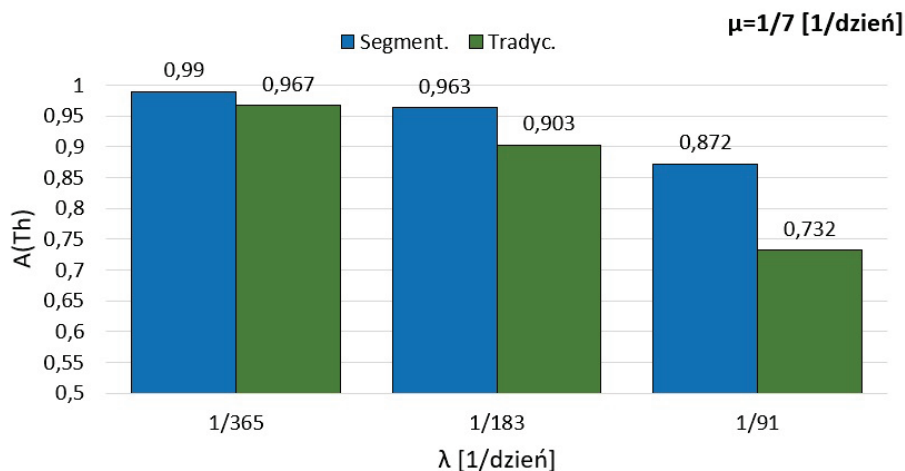


**Rys. 6.** Przebiegi zmian niezawodności grup maszyn o strukturach 4z5 dla intensywności odnowy  $\mu = 1/3$  [1/dzień]: S1 (segmentowe) i T1 (tradycyjne) z  $\lambda = 1/365$  [1/dzień], S2 i T2 z  $\lambda = 1/183$  [1/dzień], S3 i T3 z  $\lambda = 1/91$  [1/dzień]

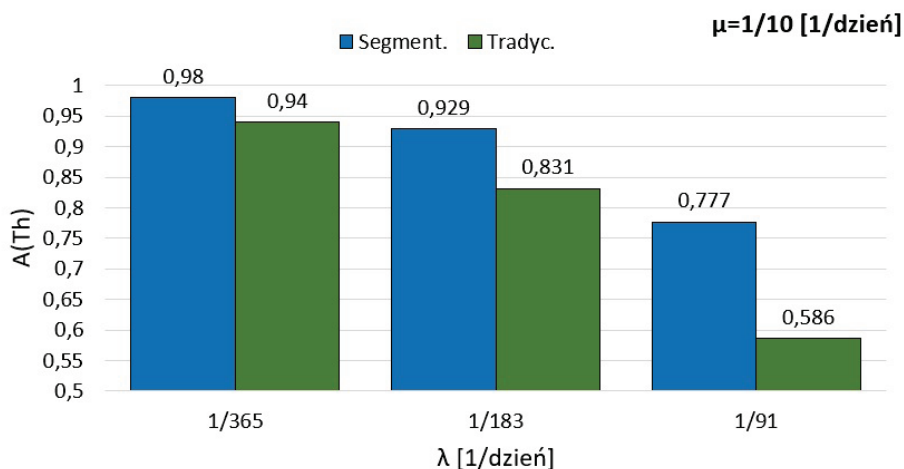
Uzyskane przebiegi wskazują, że w każdym zestawie danych wejściowych lepszą niezawodnością charakteryzują się grupy obiektów o konstrukcji segmentowej.



**Rys. 7.** Wartości gotowości grup maszyn w zależności od wartości intensywności uszkodzeń segmentów i podzespołów przy stałej intensywności odnowy



**Rys. 8.** Wartości gotowości grup maszyn w zależności od wartości intensywności uszkodzeń segmentów i podzespołów przy stałej intensywności odnowy



**Rys. 9.** Wartości gotowości grup maszyn w zależności od wartości intensywności uszkodzeń segmentów i podzespołów przy stałej intensywności odnowy

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że niezależnie od wartości intensywności uszkodzeń oraz intensywności odnowy segmentów oraz odpowiednio podzespołów większe wartości gotowości otrzymywane są dla grup maszyn o konstrukcji segmentowej. Uwzględniając fakt, że w obliczeniach przyjmowano te same wartości intensywności uszkodzeń oraz odnowy dla odpowiadających sobie w maszynach segmentów i podzespołów wyniki te uwiadcniają, który rodzaj konstrukcji maszyn jest

lepszy ze względu na gotowość grupy takich maszyn i w porównaniu takim lepsze są maszyny o konstrukcji segmentowej.

## 4. Wnioski

Uzyskane w ramach przedstawionych badań wyniki stanowią wstępny ilościowy opis różnic niezawodności i gotowości wybranych grup obiektów o konstrukcji segmentowej oraz o konstrukcji tradycyjnej. Wartości wyznaczonych wskaźników umożliwiają porównywanie obu konstrukcji pod względem zasadności ich zastosowań (ze względu na akceptowalną awaryjność maszyn), gdy rozpatruje się różne sytuacje i wymagania eksploatacyjne.

W szczególności, na podstawie uzyskanych wartości można stwierdzić, że:

- grupy obiektów o konstrukcji segmentowej i strukturze niezawodnościowej typu kzn (gdy  $k < n$ ) charakteryzują się większą gotowością w porównaniu z odpowiadającymi im funkcjonalnie grupami obiektów o konstrukcji tradycyjnej (przy przyjęciu jednakowych wskaźników niezawodności segmentów i podzespołów),
- w rozważonych przypadkach, dla założonych wskaźników niezawodności segmentów (podzespołów) grupa 4z5 obiektów o konstrukcji segmentowej charakteryzuje się gotowością większą o ok. 0,6% – 32,6% w porównaniu z grupą obiektów o konstrukcji tradycyjnej.

Opracowane narzędzie do symulacji procesu eksploatacji obiektów technicznych o konstrukcji segmentowej umożliwia analizę gotowości takich obiektów przy uwzględnieniu ich odnawiania prewencyjnego (gdy czas pracy do ich uszkodzenia opisywany jest innymi rozkładami niż wykładniczy). Analizy w tym zakresie będą elementem dalszych badań.

Interesującym zagadnieniem jest również ekonomiczny skutek eksploatacji obiektów o konstrukcji segmentowej – w porównaniu ze skutkiem eksploatacji obiektów o tradycyjnej konstrukcji (pełniących taką samą funkcję jak rozważane obiekty segmentowe). Obliczenia dotyczące tego problemu są możliwe po powiązaniu wyników niezawodnościowych, uzyskanych za pomocą przedstawionego narzędzia, z kosztami usuwania awarii, stratami z tytułu uszkodzeń oraz kosztami inwestycyjnymi dotyczącymi obiektów obu typów.

### **Finansowanie**

*Pracę wykonano w ramach badań prowadzonych w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, nr umowy – subwencja 16.16.130.942.*

## 5. Literatura

1. J. Dietrych, System i konstrukcja. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1985.
2. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.H. Grote, Engineering Design: A Systematic Approach. London: Springer-Verlag London Limited, 2007.
3. J. Boratyński, TRIZ dla ciekawych. Kielce: Urząd Marszałkowski Woj. Świętokrzyskiego, 2013.
4. K. Koltze, V. Souchkov, Systematische Innovation. TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung. Muenchen Wien: Carl Hanser Verlag, 2011.
5. J. Migdalski [red.], Poradnik niezawodności: Podstawy matematyczne. Warszawa: Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”, 1982.
6. K.S. Trivedi, A. Bobbio, Reliability and availability engineering: Modeling, analysis, and applications. Cambridge University Press, 2017.
7. A. Birolini, Reliability Engineering. Theory and Practice. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, Milan, Paris, Singapore, Tokyo: Springer-Verlag, 1999.
8. B. Gnedenko, I. Ushakov, Probabilistic reliability engineering. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.
9. P.A. Tobias, D.C. Trinidade, Applied reliability. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
10. S. Młynarski, R. Pilch, M. Smolnik, J. Szybka, G. Wiązania, „Formation of «koon» systems reliability estimated with analytical and simulation calculation methods”, Journal of KONBiN, vol. 42, no. 1, 2017. DOI: 10.1515/jok-2017-0028.
11. J. Zhao, C. Gao, T. Tang, „A review of sustainable maintenance strategies for single component and multicomponent equipment”, Sustainability, vol. 14, no. 5, 2992, 2022. DOI: 10.3390/su14052992.
12. G. Wiązania, M. Smolnik, R. Pilch. „An estimation of koon systems availability using a simulation method”, Journal of Machine Construction and Maintenance, no. 4, 2017.
13. E. Kozłowski, A. Borucka, P. Oleszczuk, T. Jałowicz, “Evaluation of the maintenance system readiness using the semi-Markov model taking into account hidden factors”, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 25, no.4, 2023. DOI:10.17531/ein/172857.
14. J. Faulin, A. A. Juan Perez, S. S. Martorell Alsina, J. E. Ramirez-Marquez [red.], Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems. London, New York: Springer, 2010.
15. Z. Zeng, A. Barros, D. Coit, “Dependent failure behavior modeling for risk and reliability: A systematic and critical literature review”, Reliability Engineering & System Safety, vol. 239, 109515, 2023. DOI: 10.1016/j.res.2023.109515.