

Maciej SZKODA, Grzegorz KACZOR, Magdalena SATORA  
*Cracow University of Technology (Politechnika Krakowska)*

## THE PROBLEM OF RELIABILITY ALLOCATION IN THE SUBASSEMBLIES OF RAIL VEHICLES

### Problem alokacji niezawodności na przykładzie podzespołów pojazdów szynowych

**Abstract:** *The following paper concerns an application of reliability allocation as a method for achieving the desired level of reliability for a selected subassembly of a type 6Dg diesel locomotive. On the basis of real operational data for the investigated vehicle, a decision model was developed to solve the allocation problem. It was demonstrated that the locomotive's reliability may be improved by replacing the individual components in the braking and pneumatic system with components of higher reliability or by using additional equivalent parallel components in the reliability-wise configuration.*

**Keywords:** rail vehicles, reliability allocation, decision model

**Streszczenie:** *Tematem artykułu jest zastosowanie alokacji niezawodności jako metody umożliwiającej osiągnięcie wymaganego poziomu niezawodności wybranego podzespołu pojazdu szynowego. Na podstawie rzeczywistych danych eksploatacyjnych zgromadzonych dla lokomotywy spalinowej typu 6Dg opracowano model decyzyjny do rozwiązania zagadnienia alokacji. Wykazano, że zwiększenie niezawodności układu hamulcowego i pneumatycznego może nastąpić poprzez zastąpienie poszczególnych elementów o wyższej niezawodności lub poprzez zastosowanie dodatkowych elementów rezerwowych w strukturze tego układu.*

**Słowa kluczowe:** pojazdy szynowe, alokacja niezawodności, model decyzyjny

## **1. Introduction**

A major aspect of rail vehicles' lifecycle is to ensure a high level of reliability of their subassemblies and elements. This issue occurs not only at the stage of design – so-called reliability synthesis – but also during their operation where reference is made to the reliability analysis. In both cases, we deal with a decision model in which the knowledge of the vehicle's reliability structure is of paramount importance. Furthermore, identification of the cause for unavailability and taking account of its influence on the correct functioning of the vehicle requires the knowledge of the distribution of the probability of occurrence of the unavailability of the vehicle's particular subassemblies and elements. These are only some of the input data required for the analysis. There are also certain technical and/or economic limitations to improving reliability. The basic factor which is the easiest to use to express these limitations are the costs or the degree of difficulty encountered in reaching the required reliability level.

## **2. Reliability allocation**

The foundations of machine reliability modelling have been addressed many times in writings on the subject – both in classical and in currently noteworthy papers. There are two essential approaches to the issue of improving the reliability of technical systems. One is reliability allocation, and the other is redundancy allocation. Both approaches have been addressed in the writings many times [2, 8, 18].

In the case of reliability allocation, the reliability structure remains unchanged. The strategy is about enhancing the reliability of particular system elements usually through replacing them with other elements. On the other hand, this involves the need to make applicable financial outlays. Reliability allocation applies in particular to systems where no alternative solutions can be proposed, e.g. redundancy allocation. Redundancy allocation consists of providing selected system elements with structural excessiveness in the form of introducing additional reserve elements with a comparable or a higher reliability level. Concerning subassemblies of rail vehicles such an approach may be burdensome and in some cases, even technically impossible to apply [2].

Resolution of the issue of reliability or redundancy allocation requires the knowledge of models of the probability distribution for rail vehicle assemblies and subassemblies. Writings on the subject conclude that more than 95% of the cases of unavailability of machine elements relate to the following distributions [10]:

- a) Normal distribution,
- b) Log-normal distribution,
- c) Uniform distribution,
- d) Exponential distribution,
- e) Weibull distribution,
- f) Gumbel distribution.

The other required item of information is the degree of difficulty /costliness of improving the reliability of such subassemblies/elements and the expression of the relation between reliability and the difficulty/costliness. One of the models frequently cited in writings is the cost function [6]:

$$c_i(R_i; f_i, R_{i,min}, R_{i,max}) = e^{\left[ (1-f_i) \frac{R_i - R_{i,min}}{R_{i,max} - R_i} \right]} \quad (1)$$

where:  $c_i(R_i)$  = unit cost of improving the reliability of element  $i$ ,

$R_i$  = target value of the reliability function of element  $i$ ,

$f_i$  = difficulty/costliness of improving the reliability of element  $i$ ,

$R_{i,min}$  = current value of the reliability function of element  $i$ ,

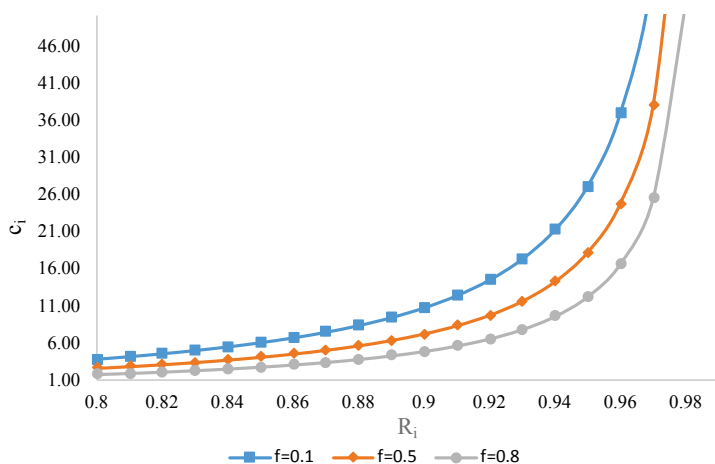
$R_{i,max}$  = maximum achievable value of the reliability function of element  $i$ ,

In the writings on the reliability of means of transport, authors very often address the issue of the relation between reliability and the economic effects expressed in the costs of operation [3, 9, 11, 12, 16]. This problem has been discussed in many publications over several dozens of years. For instance, in the paper of 1968 [5], the relation of the costs of the system operation in the function of its reliability was defined taking into account the push factors. It was concluded that the combination of the reliability and economic efficiency of technical systems offers huge economic advantages and should be widely applied. In paper [13], the authors confirmed a considerable influence of reliability characteristics on the economics of vehicle operation, in particular, the costs involved in its maintenance and use. According to the authors, the cost characteristics in the reliability function, offer the possibility of optimum planning of material resources, vehicle maintenances and repairs. Paper [17] considers several examples of formulating the measures of system efficiency taking into account its reliability.

Examples pertain to renewable and non-renewable objects. Definitions of efficiency measures use economic ratios such as the average income from the object's operation, the costs involved in failures and the reliability ratios such as probability density function of the time to failure, mean time to failure, mean repair time. Paper [1] addresses the issue of minimisation of the costs of the object's

operation depending on the specific reliability level. The author refers to the relation defined in the reliability manual [7] with the application of the renewal function  $H(t)$  and the expected renewal costs until the time  $t$ . Publication [15] presents a possibility of application of the cost analysis to quantitative and qualitative verification of the strategy of maintenance of means of transport. Using the failure intensity function, the authors define an equation for the unit cost of technical maintenance. Paper [3] presents considerations of an assessment of the efficiency of the operation of machinery with particular emphasis on the relation between the maintenance costs, unscheduled stoppages and the total costs. Paper [13], on the other hand, describes the process of designing reliability, availability and maintainability of technical objects taking into consideration the LCC cost criterion.

Examples of the relation between the cost function  $c_i$  and the reliability function of element  $R_i$  for selected values of the ratio  $f$  are presented in fig. 1. It follows from the characteristics obtained that the smaller the values of the ratio  $f$  are (within the range of 0 to 1), the faster the cost function  $c_i$  of improving reliability aims at infinity. Hence, wishing to obtain the required value of the probability of correct operation of a particular element, lower financial outlays will be incurred if the ratio  $f$  is higher in practice. In practice, the value of  $f$  may be hard to determine and should be based on expert knowledge and the experience to date in the operation of subassemblies and elements of rail vehicles [6].



**Fig. 1.** The relation between the cost function  $c_i$  and the value of the reliability function of element  $R_i$  for various values of the coefficient  $f$  [6]

### 3. Reliability allocation in the braking and pneumatic system of a 6Dg diesel locomotive

Based on an assessment of the technical availability of the 6Dg locomotive, done in paper [14] it was demonstrated that during the period between maintenances at the maintenance level P2 (done every 1000 hours of operation), there is a clear drop in the reliability of the locomotive under examination. One of the possibilities of improving the vehicle's reliability is to allocate the reliability of selected subassemblies and their elements. Presented below is a computational example for the braking and pneumatic system with the use of the specialist *Reliability Allocation* module available in the Reliasoft BlockSim software package.

#### 3.1. Decision model for reliability allocation of the braking and pneumatic system

The aim of the issue of allocation of reliability in the case of the analysed locomotive braking and pneumatic system is to propose changes to the reliability structure  $t$  or changes relating directly to a modification of the selected elements which will result in attaining the required reliability level within the assumed period of operation, with the lowest possible financial outlays. The mathematical notation of such aim is as follows [4, 6]:

$$\min. C = \sum_{i=1}^n c_i(R_i) \quad (2)$$

where  $C$  means the cost of making changes to the breaking and pneumatic system of a 6Dg locomotive.

The values of  $R_i$  for the particular elements of the braking and pneumatic system were estimated on the basis of the Times to Failure (TTF), generated on the basis of actual operating data as presented in paper [14]. Based on the operating data that were gathered, the reliability models of the times to failure of the analysed elements were developed. The analysis applied a two-parameters Weibull distribution for which the probability density function of the time to failure is expressed in the formula:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} - \left[ \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

where:  $\beta$  = shape parameter,  $\eta$  = scale parameter,  $\gamma$  = location parameter.

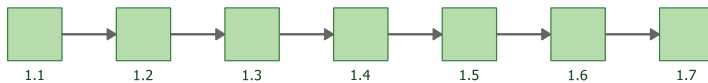
The values of Weibull distribution parameters and the Mean Time to Failure (MTTR) of the braking and pneumatic elements of a 6Dg locomotive are presented in table 1.

**Table 1**

**Parameters of Weibull distribution and MTTR of elements of the braking and pneumatic system of a 6Dg diesel locomotive  $f$  [14]**

No.	Element	Weibull distribution parameters		MTTR [h]
		$\beta$	$\eta$ [h]	
1.1	Main and auxiliary compressor	1.1252	9607.990	12.0
1.2	Engine driving the main or auxiliary compressor	1.2142	41034.100	8.0
1.3	Pneumatic valves	1.7262	6010.360	4.0
1.4	Pneumatic cables	0.7204	186192.000	3.0
1.5	Actuator in the brake system	1.0096	22993.400	3.5
1.6	Other elements in the pneumatic circuit	1,0221	115243,000	6,0
1.7	Brake mechanical elements	1,7743	5867,300	2,5

The reliability structure of the selected locomotive braking and pneumatic system is presented in fig. 2.



**Fig. 2.** Structure of reliability of the braking and pneumatic system of a 6Dg locomotive

With the serial reliability structure, the determination of the  $R(t)$  function of the analysed system may be based on the following formula [10]:

$$R_s = \prod_{i=1}^7 R_i(t) \tag{4}$$

Based on the data presented in Table 1 and relation 3, the current value of the reliability function of the system  $R_s = 0.84$  was estimated for the operation time  $t = 1000$  hours. The selected value of the random variable results from the maintenance scheduled at that time at the P2 level of a 6Dg locomotive and the drop in the technical availability between maintenances which was the subject of paper [14].

The aim of the allocation analysis is to reach the target reliability function of the system in time  $t = 1000$  h at the level of  $R_s = 0.95$ .

In order to be able to resolve the task, set in this way, it was assumed that the maximum value of the probability of correct operation that may be attained for the elements considered is 0.999. Accordingly, the desirable value  $R_i$  for these elements should be within the range:

$$R_{i,min} \leq R_i \leq 0,999 \tag{5}$$

Since it was necessary to determine the value of the index  $f_i$  (formula 1) for the braking and pneumatic system elements, a concept based on the SV (severity) ration was used, proposed in the Reliasoft BlockSim software. The values of  $f_i$  were estimated using the following formula [6]:

$$f = 1 - \left(\frac{SV}{10}\right) \tag{6}$$

The data for the reliability allocation analysis were gathered and presented in table 2.

**Table 2**

**Data for reliability allocation of a rail vehicle’s braking and pneumatic system**

No.	Element	$R_{i,min}$ ( $t=1000$ h)	$R_{max}(t)$	$f_i$
1.1	Main and auxiliary compressor	0.999	0.999	0.1
1.2	Engine driving the main or auxiliary compressor	0.956	0.999	0.33
1.3	Pneumatic valves	0.977	0.999	0.67
1.4	Pneumatic cables	0.989	0.999	0.75
1.5	Actuator in the brake system	0.959	0.999	0.71
1.6	Other elements in the pneumatic circuit	0.992	0.999	0.50
1.7	Brake mechanical elements	0.958	0.999	0.79

### 3.2. Selected results of reliability allocation in the Reliasoft BlockSim software package

With the use of the *Reliability Allocation* tool in the Reliasoft BlockSim package, the issue of reliability allocation was resolved. An edition window screen shot with the results is presented in fig. 3.

Block Name	Reliability Importance	Current Reliability	Maximum Achievable Reliability	Feasibility	Target Reliability	Equivalent Parallel Units
1.1	0.841380	0.998900	0.999	Hard (9.9)	0.998900	1.000000
1.2	0.849748	0.989062	0.999	Easy (2.5)	0.995870	1.215664
1.3	0.879344	0.955774	0.999	Moderate (6.7)	0.983896	1.323950
1.4	0.860145	0.977107	0.999	Easy (3.3)	0.992821	1.307037
1.5	0.876681	0.958677	0.999	Easy (2.9)	0.990275	1.454043
1.6	0.847046	0.992217	0.999	Moderate (5)	0.995485	1.112117
1.7	0.877651	0.957617	0.999	Easy (2.1)	0.991720	1.516558

Fig. 3. Reliability Allocation tool in the Reliasoft BlockSim software package

The data from table 1 were fed into the Reliasoft BlockSim software environment and, based on the in-built *Reliability Allocation* tool, calculations were done using the decision model expressed in equation 2. The target was the value of the reliability function of the system  $R_s = 0.95$  for the time  $t = 1000$  h. The calculation results are presented in table 3.

Table 3

Results of the reliability allocation analysis

Element identification	$R_{i,min}(t=1000\text{ h})$	$R_i(t=1000\text{ h})$	Change [%]	Recommended number of reserve elements
1.1	0.999	0.999	0	1.000
1.2	0.956	0.988	3.35	1.422
1.3	0.977	0.993	1.64	1.321
1.4	0.989	0.993	0.40	1.106
1.5	0.959	0.989	3.13	1.428
1.6	0.992	0.995	0.30	1.095
1.7	0.958	0.991	3.44	1.489

It is to be concluded on the basis of the results obtained and presented in table 2 that the task of allocating the reliability of the braking and pneumatic system can be resolved through enhancing the reliability of the particular elements or through the application of additional reserve elements within the structure (N.E.P.U –



number of equivalent parallel units). In the case of the 6Dg locomotive, the application of additional reserve elements in the braking and pneumatic system structure is practically impossible from the technical point of view. In turn, the values of the reliability function to be ensured for the particular elements to attain the target reliability of the system within the pre-set time should be approached theoretically. These should be the starting point for the concept of modification of the braking and pneumatic system through the application of elements which are more costly but whose reliability is higher.

## **4. Conclusions**

The paper presents an example of the application of the reliability method allocation to rail vehicles. The *Reliability Allocation* model available in the Reliasoft BlockSim software package was used for this purpose. The analysis was performed using the example of the braking and pneumatic system of a 6Dg locomotive based on actual operation data and a selected cost function. The application of reliability allocation involves financial outlays regardless of the choice of the method type. It is worth noting, however, that the reliability allocation costs are infrequently incurred and owing to that, we ensure an improvement of rail vehicle reliability indices in between of the maintenances, thus reducing the costs of drops in their technical availability.

## **5. References**

1. Bucior J.: Podstawy teorii i inżynierii niezawodności. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
2. Coit D.W., Zio E.: The evolution of system reliability optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, In Press, Corrected Proof (available online 8 September 2018).
3. Drożyner P., Mikołajczak P.: Assessment of the effectiveness of machine and device operation. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, No. 3(35), 2007.
4. Feliks J., Majewska K.: Wykorzystanie funkcji kosztów Mettasa do alokacji nieuszkodzalności w systemach logistycznych. *Instytut Logistyki i Magazynowania*, Nr 2/2012.
5. Gniedenko B.W., Bielajew J.K., Sołowiew A.D.: *Metody matematyczne w teorii niezawodności*. WNT, Warszawa 1968.

6. Mettas A.: Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems. Annual Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles 2000.
7. Migdalski J.: Poradnik niezawodności: Podstawy matematyczne. Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego WEMA, 1982.
8. Mohammadi M., Mortazavi S.M., Karbasian M.: Developing a Method for Reliability Allocation of Series-Parallel Systems by Considering Common Cause Failure. International Journal of Industrial Engineering & Production Research. Vol. 29, No. 2.
9. O'Connor P.: Practical Reliability Engineering, 4th Edition. John Wiley & Sons, 2010.
10. Oprzędkiewicz J.: Niezawodność maszyn, Skrypty Uczelniane Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1981.
11. Oprzędkiewicz J., Młynarski S., Jabłoński J.: Wpływy niezawodności na zmianę kosztów eksploatacji pojazdów samochodowych. Problemy eksploatacji, nr 1, 2002.
12. Pamuła W.: Niezawodność i bezpieczeństwo. Wybór zagadnień. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
13. Szkoda M.: Kształtowanie potencjału przewozowego przedsiębiorstw transportu kolejowego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2017.
14. Szkoda M., Kaczor G.: Reliability and availability assessment of diesel locomotive using fault tree analysis. Archives of Transport, Vol. 40, Iss. 4, 2016.
15. Szpytko J., Salamonowicz T., Żurek J.: Prognozowanie niezawodności w eksploatacji środków transportu bliskiego. Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności, 2003.
16. Wolde ten M., Ghabbar A.A.: Optimizing inspection intervals - Reliability and availability in terms of a cost model: A case study on railway carriers. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 114, 2013.
17. Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J.: Niezawodność systemów technicznych. PWN, Warszawa 1990.
18. Yalaoui A., Chu C., Châtelet E.: Reliability allocation problem in a series-parallel system. Reliability Engineering & System Safety, 90(2005).

# **PROBLEM ALOKACJI NIEZAWODNOŚCI NA PRZYKŁADZIE PODZESPOŁÓW POJAZDÓW SZYNOWYCH**

## **1. Wprowadzenie**

Ważnym aspektem w cyklu istnienia kolejowych środków transportu jest zapewnienie wysokiego poziomu niezawodności ich podzespołom i elementom. Zagadnienie to pojawia się nie tylko na etapie projektowania, tzw. synteza niezawodności, ale także na etapie eksploatacji, na którym mowa jest o analizie niezawodności. W obu przypadkach mamy do czynienia z modelem decyzyjnym, w którym przede wszystkim niezbędna jest znajomość struktury niezawodnościowej analizowanego pojazdu. Ponadto aby móc zlokalizować przyczynę niezdatności i uwzględnić jej wpływ na poprawne funkcjonowanie pojazdu, konieczna jest znajomość rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia niezdatności poszczególnych podzespołów i elementów pojazdu. To tylko niektóre z wymaganych danych wejściowych do przeprowadzenia analizy. Istnieją także pewne ograniczenia techniczne i/lub ekonomiczne zwiększania niezawodności. Podstawowym czynnikiem, za pomocą którego najłatwiej wyrazić te ograniczenia, są koszty lub stopień trudności osiągnięcia wymaganego poziomu niezawodności.

## **2. Zagadnienie alokacji niezawodności**

Podstawy modelowania niezawodności maszyn na etapie projektowania były wielokrotnie poruszane w literaturze – zarówno klasycznej, jak i aktualnej. Istnieją dwa zasadnicze podejścia do zagadnienia zwiększania niezawodności systemów technicznych. Pierwszym z nich jest alokacja niezawodności, drugim natomiast – alokacja redundancji. Oba podejścia były wielokrotnie poruszane w literaturze [2, 8, 18].

W przypadku alokacji niezawodności, struktura niezawodności pozostaje niezmienną. Strategia ta polega na zwiększeniu niezawodności poszczególnych elementów systemu zwykle przez zastąpienie ich innymi elementami. Z drugiej

strony wiąże się to z koniecznością poniesienia odpowiednich nakładów finansowych. Alokacja niezawodności ma zastosowanie szczególnie w przypadku systemów, dla których nie jest możliwe zaproponowanie alternatywnych rozwiązań, np. alokacji redundancji. Alokacja redundancji polega na zapewnieniu wybranym elementom systemu nadmiarowości strukturalnej w postaci wprowadzenia dodatkowych elementów rezerwowych o porównywalnym lub wyższym poziomie niezawodności. W odniesieniu do podzespołów pojazdów szynowych takie podejście może być kłopotliwe do zastosowania, w niektórych przypadkach wręcz technicznie niemożliwe [2].

Rozwiązanie zagadnienia alokacji niezawodności bądź alokacji redundancji wymaga znajomości modeli rozkładów prawdopodobieństwa zespołów i podzespołów pojazdu szynowego. W literaturze stwierdzono, że ponad 95% przeanalizowanych przypadków niezdatności elementów maszyn sprowadza się do następujących rozkładów [10]:

- a) rozkład normalny,
- b) rozkład log-normalny,
- c) rozkład równomierny,
- d) rozkład wykładniczy,
- e) rozkład Weibulla,
- f) rozkład Gumbella.

Drugą wymaganą informacją jest stopień trudności/kosztowności zwiększenia poziomu niezawodności tych podzespołów/elementów i wyrażenie zależności między niezawodnością a trudnością/kosztownością. Jednym z często przytaczanych w literaturze modeli jest funkcja kosztów [6]:

$$c_i(R_i; f_i, R_{i,min}, R_{i,max}) = e^{\left[ (1-f_i) \frac{R_i - R_{i,min}}{R_{i,max} - R_i} \right]} \quad (1)$$

gdzie:

$c_i(R_i)$  = jednostkowy koszt zwiększenia niezawodności elementu  $i$ ,

$R_i$  = docelowa wartość funkcji niezawodności elementu  $i$ ,

$f_i$  = trudność/kosztowność zwiększenia niezawodności elementu  $i$ ,

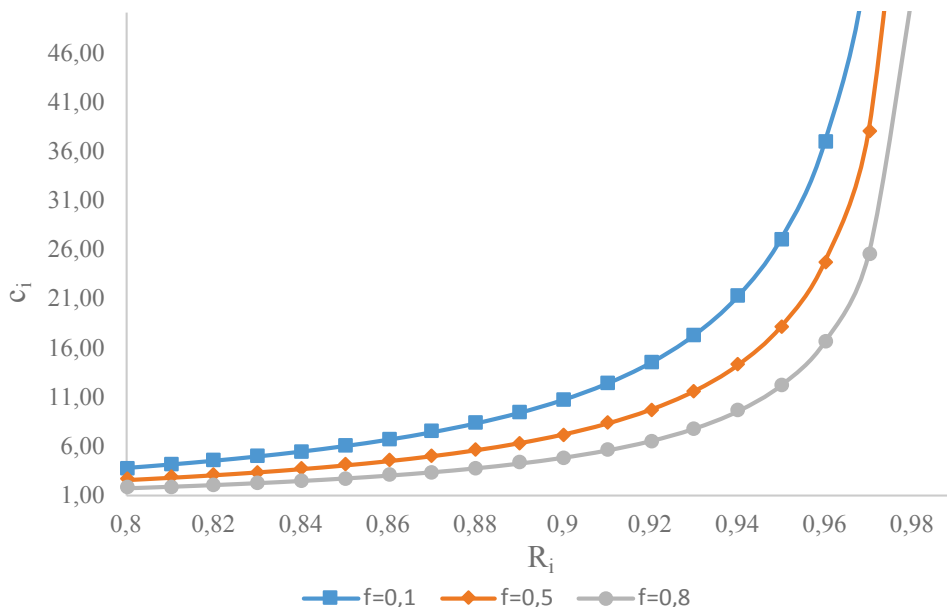
$R_{i,min}$  = aktualna wartość funkcji niezawodności elementu  $i$ ,

$R_{i,max}$  = maksymalnie osiągalna wartość funkcji niezawodności elementu  $i$ .

W literaturze dotyczącej niezawodności środków transportu od kilkudziesięciu lat autorzy poruszają kwestię zależności pomiędzy niezawodnością a efektami ekonomicznymi wyrażonymi w kosztach eksploatacji [3, 9, 11, 12, 16]. Przykładowo w pracy z 1968 r. [5] zdefiniowano zależność na koszty eksploatacji systemu

w funkcji jego niezawodności z uwzględnieniem czynników wymuszających. Stwierdzono, że łączenie niezawodności i efektywności ekonomicznej systemów technicznych daje wysokie korzyści gospodarcze i powinno być wszechstronnie stosowane. W pracy [13] autorzy potwierdzili znaczący wpływ charakterystyk niezawodnościowych na ekonomikę eksploatacji pojazdu, w szczególności na koszty związane z utrzymaniem i użytkowaniem. Charakterystyki kosztów w funkcji niezawodności według autorów dają możliwość optymalnego planowania zasobów materialnych, przeglądów i napraw pojazdu. W pracy [17] rozważanych jest kilka przykładów formułowania miar efektywności systemu z uwzględnieniem jego niezawodności. Przykłady dotyczą obiektów nieodnawialnych oraz odnawialnych. Do definicji miar efektywności wykorzystywane są wskaźniki ekonomiczne, np.: średni dochód z pracy obiektu, koszty związane z uszkodzeniami, oraz wskaźniki niezawodnościowe, np.: funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia, średni czas między uszkodzeniami, średni czas naprawy. W opracowaniu [1] poruszono kwestię minimalizacji kosztów eksploatacji obiektu w zależności od określonego poziomu niezawodności. Autor przywołuje zależność zdefiniowaną w poradniku niezawodności [7] z zastosowaniem funkcji odnowy  $H(t)$  na oczekiwane koszty odnowy do chwili  $t$ . W publikacji [15] przedstawiono możliwość zastosowania analizy kosztowej do ilościowej i jakościowej weryfikacji strategii utrzymania środków transportu. Wykorzystując funkcję intensywności uszkodzeń, autorzy definiują równanie na jednostkowy koszt obsługi technicznych. W artykule [3] przedstawiono rozważania dotyczące oceny efektywności eksploatacji maszyn ze szczególnym uwzględnieniem zależności pomiędzy kosztami utrzymania, nieplanowych przestojów a kosztami całkowitymi. Natomiast w pracy [13] opisano proces projektowania niezawodności, gotowości i podatności na utrzymanie obiektów technicznych z uwzględnieniem kryterium kosztu LCC.

Przykładowe zależności funkcji kosztów  $c_i$  od funkcji niezawodności elementu  $R_i$  dla wybranych wartości współczynnika  $f$  przedstawiono na rys. 1. Z wykreślonych charakterystyk wynika, że im mniejsze wartości przyjmuje współczynnik  $f$  (w zakresie od 0 do 1), tym szybciej funkcja kosztów  $c_i$  zwiększania niezawodności dąży do nieskończoności. Zatem chcąc uzyskać pożądaną wartość prawdopodobieństwa poprawnej pracy danego elementu, poniesie się mniejsze nakłady finansowe, jeśli współczynnik  $f$  będzie przyjmował większe wartości. W praktyce, wartość  $f$  może być trudna do wyznaczenia i powinna się opierać na podstawie wiedzy eksperckiej oraz dotychczasowego doświadczenia w eksploatacji podzespołów i elementów pojazdów szynowych [6].



Rys. 1. Zależność funkcji kosztów  $c_i$  od wartości funkcji niezawodności element  $R_i$  dla różnych wartości współczynnika  $f$  [6]

### 3. Alokacja niezawodności w układzie pneumatycznym i hamulcowym lokomotywy spalinowej 6Dg

Na podstawie oceny gotowości technicznej lokomotywy 6Dg, przedstawionej w pracy [14], wykazano, że w okresie pomiędzy przeglądami na poziomie utrzymania P2 (wykonywanym co 1000 godz. czasu pracy) następuje zdecydowany spadek niezawodności badanej lokomotywy. Jedną z możliwości poprawy niezawodności pojazdu jest alokacja niezawodności wybranych podzespołów i ich elementów. Poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy dla układu pneumatycznego i hamulcowego z wykorzystaniem specjalistycznego modułu *Reliability Allocation*, dostępnego w pakiecie oprogramowania Reliasoft BlockSim.

### 3.1. Model decyzyjny alokacji niezawodności układu pneumatycznego i hamulcowego

Celem analizy alokacji niezawodności w przypadku analizowanego układu pneumatycznego i hamulcowego lokomotywy jest zaproponowanie zmian w strukturze niezawodności  $t$  bądź zmian odnoszących się bezpośrednio do modyfikacji wybranych elementów, których wynikiem będzie osiągnięcie pożądanego poziomu niezawodności układu w założonym okresie eksploatacji, przy możliwie najmniejszych nakładach finansowych. Matematyczny zapis tak postawionego celu jest następujący [4, 6]:

$$\min. C = \sum_{i=1}^n c_i(R_i) \quad (2)$$

gdzie  $C$  oznacza koszt wprowadzenia zmian dla układu pneumatycznego i hamulcowego lokomotywy spalinowej typu 6Dg.

Wartości  $R_i$  poszczególnych elementów układu pneumatycznego i hamulcowego zostały oszacowane na podstawie rozkładów czasu poprawnej pracy (ang. Time to Failure – TTF), otrzymanych na podstawie rzeczywistych danych eksploatacyjnych, jak przedstawiono w pracy [14]. W oparciu o zgromadzone dane eksploatacyjne określono modele niezawodnościowe czasów poprawnej pracy analizowanych elementów. W analizie zastosowano dwuparametrowy rozkład Weibulla, dla którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy wyraża się wzorem:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} - \left[ \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

gdzie:  $\beta$  = parameter kształtu,  $\eta$  = parameter skali,  $\gamma$  = parameter położenia.

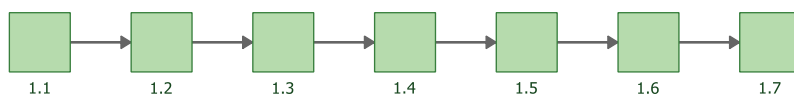
Wartości parametrów rozkładu Weibulla i średni czas trwania naprawy MTTR elementów układu pneumatycznego i hamulcowego lokomotywy spalinowej typu 6Dg zestawiono w tab. 1.

Tabela 1

**Parametry rozkładu Weibulla i MTTR elementów układu pneumatycznego i hamulcowego lokomotywy spalinowej typu 6Dg [14]**

Ozn.	Element	Parametry rozkładu Weibulla		MTTR [h]
		$\beta$	$\eta$ [h]	
1.1	Sprężarka główna i pomocnicza	1,1252	9607,990	12,0
1.2	Silnik napędzający sprężarkę główną lub pomocniczą	1,2142	41034,100	8,0
1.3	Zawory pneumatyczne	1,7262	6010,360	4,0
1.4	Przewody pneumatyczne	0,7204	186192,000	3,0
1.5	Siłownik w układzie hamulcowym	1,0096	22993,400	3,5
1.6	Pozostałe elementy w obwodzie pneumatycznym	1,0221	115243,000	6,0
1.7	Elementy mechaniczne hamulca	1,7743	5867,300	2,5

Strukturę niezawodności wybranego układu pneumatycznego i hamulcowego lokomotywy przedstawiono na rys. 2.



**Rys. 2.** Struktura niezawodności układu pneumatycznego i hamulcowego lokomotywy 6Dg

Uwzględniając szeregową strukturę niezawodności, funkcja  $R(t)$  analizowanego układu może być wyznaczona w oparciu następującą formułę [10]:

$$R_s = \prod_{i=1}^7 R_i(t) \quad (4)$$

Na podstawie danych, przedstawionych w tab. 1 oraz zależności 3 oszacowano aktualną wartość funkcji niezawodności systemu  $R_s = 0,84$  dla czasu pracy  $t = 1000$  godzin. Wybrana wartość zmiennej losowej wynika z wypadającego w tym czasie przeglądu na poziomie P2 lokomotywy 6Dg oraz ze spadku gotowości technicznej między przeglądami, co było tematem pracy [14]. Celem prowadzonej analizy alokacji jest osiągnięcie docelowej wartości funkcji niezawodności układu w czasie  $t = 1000$  h na poziomie  $R_s = 0,95$ .



Aby móc rozwiązać tak postawione zadanie, założono, że maksymalna wartość prawdopodobieństwa poprawnej pracy, jaka może zostać osiągnięta dla rozpatrywanych elementów wynosi 0,999. W związku z tym pożądana wartość  $R_i$  dla tych elementów powinna mieścić się w przedziale:

$$R_{i,min} \leq R_i \leq 0,999 \quad (5)$$

W związku z koniecznością wyznaczenia wartości współczynnika  $f_i$  (1) dla elementów układu hamulcowego i pneumatycznego zastosowano koncepcję opartą na współczynniku SV (severity), proponowaną w oprogramowaniu Reliasoft BlockSim. Wartości  $f_i$  oszacowano według następującej formuły [6]:

$$f = 1 - \left(\frac{SV}{10}\right) \quad (6)$$

Dane do analizy alokacji niezawodności zostały zebrane i przedstawione w tab. 2.

**Tabela 2**

**Dane do analizy alokacji niezawodności układu pneumatycznego i hamulcowego pojazdu szynowego**

Oznaczenie	Element	$R_{i,min}$ ( $t=1000$ h)	$R_{max}(t)$	$f_i$
1.1	Sprężarka główna i pomocnicza	0,999	0,999	0,1
1.2	Silnik napędzający sprężarkę główną lub pomocniczą	0,956	0,999	0,33
1.3	Zawory pneumatyczne	0,977	0,999	0,67
1.4	Przewody pneumatyczne	0,989	0,999	0,75
1.5	Siłownik w układzie hamulcowym	0,959	0,999	0,71
1.6	Pozostałe elementy w obwodzie pneumatycznym	0,992	0,999	0,50
1.7	Elementy mechaniczne hamulca	0,958	0,999	0,79

### 3.2. Wybrane wyniki alokacji niezawodności w pakiecie oprogramowania Reliasoft BlockSim

Wykorzystując narzędzie *Reliability Allocation* w pakiecie Reliasoft BlockSim, rozwiązano zagadnienie alokacji niezawodności. Zrzut ekranu okna edycyjnego z uzyskanymi wynikami przedstawiono na rys. 3.

Block Name	Reliability Importance	Current Reliability	Maximum Achievable Reliability	Feasibility	Target Reliability	Equivalent Parallel Units
1.1	0.841380	0.998900	0.999	Hard (9.9)	0.998900	1.000000
1.2	0.849748	0.989062	0.999	Easy (2.5)	0.995870	1.215664
1.3	0.879344	0.955774	0.999	Moderate (6.7)	0.983896	1.323950
1.4	0.860145	0.977107	0.999	Easy (3.3)	0.992821	1.307037
1.5	0.876681	0.958677	0.999	Easy (2.9)	0.990275	1.454043
1.6	0.847046	0.992217	0.999	Moderate (5)	0.995485	1.112117
1.7	0.877651	0.957617	0.999	Easy (2.1)	0.991720	1.516558

**Calculations**

**ALLOCATION ANALYSIS**

**Allocation Type**  
Cost Optimized

Refresh

**Inputs**

Target Reliability: 0.95  
 Time: 1000  
 Units: Hour (hr)  
 Iterations: 50

**Outputs**

Current Reliability: 0.840454  
 System Reliability: 0.950000

**Color Limits**  
 0.0% - 100.0%; Range

RBD1

Rys. 3. Narzędzie Reliability Allocation w pakiecie oprogramowania Reliasoft BlockSim

Dane z tab. 1 wprowadzono do środowiska programowego Reliasoft BlockSim oraz w oparciu o wbudowane narzędzie *Reliability Allocation* zrealizowano obliczenia, wykorzystując model decyzyjny wyrażony równaniem (2). Jako cel przyjęto wartość funkcji niezawodności systemu  $R_s = 0,95$  dla czasu  $t=1000$  h. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3

**Wyniki analizy alokacji niezawodności**

Oznaczenie elementu	$R_{i,min}(t=1000\text{ h})$	$R_i(t=1000\text{ h})$	Zmiana [%]	Zalecana liczba elementów rezerwowych
1.1	0,999	0,999	0	1,000
1.2	0,956	0,988	3,35	1,422
1.3	0,977	0,993	1,64	1,321
1.4	0,989	0,993	0,40	1,106
1.5	0,959	0,989	3,13	1,428
1.6	0,992	0,995	0,30	1,095
1.7	0,958	0,991	3,44	1,489

Na podstawie uzyskanych wyników, przedstawionych w tab. 2 należy stwierdzić, że zadanie alokacji niezawodności układu pneumatycznego i hamulcowego można rozwiązać poprzez zwiększenie niezawodności poszczególnych

elementów lub przez zastosowanie dodatkowych elementów rezerwowych w strukturze (N.E.P.U – number of equivalent parallel units). W przypadku przedmiotowej lokomotywy 6Dg zastosowanie dodatkowych elementów rezerwowych w strukturze układu pneumatycznego i hamulcowego z technicznego punktu widzenia jest praktycznie niemożliwe. Z kolei wartości funkcji niezawodności, jakie należy zapewnić poszczególnym elementom, aby osiągnąć docelową niezawodność układu w założonym czasie, należy traktować w ujęciu teoretycznym. Powinny one stanowić punkt odniesienia dla projektu modyfikacji układu pneumatycznego i hamulcowego poprzez zastosowanie elementów droższych, ale o wyższej niezawodności.

#### **4. Podsumowanie**

Przedstawiona praca zawiera przykład zastosowania metody alokacji niezawodności w odniesieniu do pojazdów szynowych. Wykorzystano do tego celu moduł *Reliability Allocation* dostępny w pakiecie oprogramowania Reliasoft BlockSim. Analiza została wykonana na przykładzie układu pneumatycznego i hamulcowego lokomotywy 6Dg w oparciu o rzeczywiste dane eksploatacyjne oraz z wykorzystaniem wybranej funkcji kosztów. Zastosowanie alokacji niezawodności wiąże się z poniesieniem nakładów finansowych, niezależnie od wyboru rodzaju metody. Warto jednak mieć na uwadze, że koszty alokacji niezawodności ponoszone są jednokrotnie, a dzięki temu zapewniamy poprawę wskaźników niezawodności pojazdu szynowego w okresach międzyprzebiegów, przez co każdorazowo obniżamy koszty spadku gotowości technicznej.

#### **5. Literatura**

1. Bucior J.: Podstawy teorii i inżynierii niezawodności. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
2. Coit D.W., Zio E.: The evolution of system reliability optimization. Reliability Engineering & System Safety, In Press, Corrected Proof (available online 8 September 2018).
3. Drożyner P., Mikołajczak P.: Assessment of the effectiveness of machine and device operation. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, No. 3(35), 2007.
4. Feliks J., Majewska K.: Wykorzystanie funkcji kosztów Mettasa do alokacji nieuszkodzalności w systemach logistycznych. Instytut Logistyki i Magazynowania, Nr 2/2012.

5. Gniedenko B.W., Bielajew J.K., Sołowiew A.D.: Metody matematyczne w teorii niezawodności. WNT, Warszawa 1968.
6. Mettas A.: Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems. Annual Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles 2000.
7. Migdalski J.: Poradnik niezawodności: Podstawy matematyczne. Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego WEMA, 1982.
8. Mohammadi M., Mortazavi S.M., Karbasian M.: Developing a Method for Reliability Allocation of Series-Parallel Systems by Considering Common Cause Failure. International Journal of Industrial Engineering & Production Research. Vol. 29, No. 2.
9. O'Connor P.: Practical Reliability Engineering, 4th Edition. John Wiley & Sons, 2010.
10. Oprędkiewicz J.: Niezawodność maszyn. Skrypty Uczelniane Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1981.
11. Oprędkiewicz J., Młynarski S., Jabłoński J.: Wpływy niezawodności na zmianę kosztów eksploatacji pojazdów samochodowych, Problemy eksploatacji, nr 1, 2002.
12. Pamuła W.: Niezawodność i bezpieczeństwo. Wybór zagadnień. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
13. Szkoda M.: Kształtowanie potencjału przewozowego przedsiębiorstw transportu kolejowego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2017.
14. Szkoda M., Kaczor G.: Reliability and availability assessment of diesel locomotive using fault tree analysis. Archives of Transport, Vol. 40, Iss. 4, 2016.
15. Szpytko J., Salamonowicz T., Żurek J.: Prognozowanie niezawodności w eksploatacji środków transportu bliskiego. Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności, 2003.
16. Wolde ten M., Ghobbar A.A.: Optimizing inspection intervals - Reliability and availability in terms of a cost model: A case study on railway carriers. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 114, 2013.
17. Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J.: Niezawodność systemów technicznych. PWN, Warszawa 1990.
18. Yalaoui A., Chu C., Châtelet E.: Reliability allocation problem in a series-parallel system. Reliability Engineering & System Safety, 90(2005).