

THE NEW APPROACH TO IDENTIFICATION OF PARAMETRIC AND MOMENTARY DAMAGES ON THE BASIS OF LINDEBERG – LEVY'S MODEL

NOWE PODEJŚCIE DO METODY IDENTYFIKACJI USZKODZEŃ PARAMETRYCZNYCH I CHWILOWYCH NA PODSTAWIE METODY LINDEBERG'A – LEVY'EGO

Paweł Lindstedt¹, Tomasz Sudakowski², Artur Kulaszka¹

¹ Air Force Institute of Technology, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

² Wodociągi Białostockie Sp. z o.o.

Abstract: The new approach for the assessment of reliability condition of the exploited system, based on the appropriate analysis of changes in the current parameters of technical condition aR_b and the regulation condition aR_c , determined from the compressed condition equation (1 and 2). While analyzing the course of momentary parameters for technical condition aR_b and the regulation condition aR_c , it was observed that the parametric and momentary damages can be identified on the basis of quantitative relations between momentary threshold value d_{pr} and corresponding momentary permissible value $d_{pr dop}$, which are calculated from equation (7, 8, 9) resulting from Lindeberg–Levy's theorem. It is assumed that the damages are prevailing, when for the moment θ_i : $d_{pr_i} > d_{pr dop_i}$. With the number of damages (damage map), reliability parameters for each moment of exploitation of technical object (before the catastrophic damages will occur) can be determined. Parametric damages (expected lifetime $E(T)$ and standard deviation of expected lifetime $\sigma_{E(T)}$) provides the reasonable information for the appropriate planning of the servicing of exploitative objects.

Keywords: parametric damages, momentary damages, technical condition parameter, regulation condition parameter, reliability characteristics

Streszczenie: Przedstawione w artykule nowe podejście do metody oceny stanu niezawodności eksploatowanego układu polega na odpowiedniej analizie zmian bieżących parametrów stanu technicznego aR_b i stanu regulacji aR_c , wyznaczonych ze sprzężonych równań stanu (1 i 2). Analizując przebiegi chwilowych wartości parametrów stanu technicznego aR_b i stanu regulacji aR_c dostrzeżono, że uszkodzenia parametryczne i chwilowe mogą być identyfikowane na podstawie ilościowych relacji między chwilową wartością progową d_{pr} a odpowiadającą jej chwilową wartością dopuszczalną $d_{pr dop}$, które oblicza się ze wzorów (7, 8, 9) wynikających z twierdzenia Lindeberg'a – Levy'ego. Zakłada się, że uszkodzenie istnieje wtedy, gdy dla chwili θ_i : $d_{pr_i} > d_{pr dop_i}$. Dysponując liczbami uszkodzeń (mapą uszkodzeń) można wyznaczyć parametry niezawodnościowe dla każdej chwili eksploatacji obiektu technicznego (przed pojawieniem się uszkodzeń katastroficznych). Parametry uszkodzeń (oczekiwany czas życia $E(T)$ i odchylenie standardowe oczekiwanego czasu życia $\sigma_{E(T)}$) są przystępną informacją do odpowiedniego planowania obsługi eksploatacyjnych obiektów.

Słowa kluczowe: uszkodzenie parametryczne, uszkodzenie chwilowe, parametr stanu technicznego, parametr stanu regulacji, charakterystyki niezawodności

THE NEW APPROACH TO IDENTIFICATION OF PARAMETRIC AND MOMENTARY DAMAGES ON THE BASIS OF LINDBERG – LEVY'S MODEL

1. Introduction

The process of utilization of complex technical object is followed by its deregulation (loss in the quality of performance), wear and increase in unreliability. Therefore, it is required that the deregulated condition, technical condition and reliability should be observed during its standard utilization and servicing. The results of these observation will make it possible to carry out synthetic (comprehensive) assessment of the object applicability, thereby, determining its ability to correctly carryout given tasks, in accordance with its intended purpose.

Continuous observation of changes in the technical condition parameters, on the basis of relation between diagnostic signals (output) and input signals (environment), gives the possibility to evaluate the condition of object deregulation. [5, 6]

Continuous observation of changes in the regulation condition parameters, on the basis of relation between utility signals associated with the wear of elements, and environment, utility and accompanying signals from the environment, gives the possibility to evaluate the technical condition of the object. [1, 6, 11]

Continuous knowledge accumulation related to the object damages that are at the border levels of deregulation and wear of object, followed by the recalculation of identified number of damages to the reliability characteristic, gives the possibility to examine the object reliability condition.

Evaluation of regulation condition, diagnostics and reliability are essential, and closely connected elements, which within the framework of cybernetic exploitation system are basis for a comprehensive evaluation of the object applicability condition. [1, 5, 6]

The method described in the article, evaluates the applicability condition for exploited object, on the basis of appropriate analysis related to the changes in the current values of the parameters of the technical condition a_{Rb} and the regulation condition a_{Rc} , determined from interactional, compressed condition equation. [2, 5, 6]

It was observed that the course value analysis of parameters of technical condition a_{Rb} and regulation condition a_{Rc} , enables the identification of damages (parametric and momentary, respectively), on the basis of quantitative relations between momentary threshold value d_{pri} (parameter a_{Rb} , a_{Rc}), and corresponding momentary permissible value $d_{pr dop i}$, which are calculated based on the Lindeberg– Levy's theorem. [8]

2. Theoretical basis for the evaluation of applicability of technical object

The essence of the method for evaluation of applicability is based on the assumption that each technical object in environment is described with the usage of two correlated condition equations: [2, 5, 6, 11]

$$\dot{D}_K = a_{R_b} D_K + b_{R_b} U, \quad (1)$$

$$\dot{U} = a_{R_c} U + b_{R_c} D_K, \quad (2)$$

where:

\dot{D}_K – complex diagnostic signal and its derivative,

\dot{U} – complex utility (operation) signal and its derivative,

a_{R_b} – technical condition parameter,

a_{R_c} – regulation (utilization) condition parameter,

b_{R_b} – parameter determining the impact of utilization quality on the technical condition,

b_{R_c} – parameter determining the impact of technical condition quality on the performance condition,

These equations are based on the evident observation, that the utility (operational) value of an object depends on its technical condition (physical wear), and technical condition from the intensity of usage and the quality of regulation, i.e. technical condition D_K is an environment for the utilization condition U and vice versa.

From the condition equation (1 and 2), technical condition parameter a_{R_b} and regulation condition a_{R_c} are calculated:

$$a_{R_b} = \frac{\Delta D_K}{\Delta \theta (D_K + \hat{a}_{R_b} U)} \quad (3)$$

$$a_{R_c} = \frac{\Delta U}{\Delta \theta (U + \hat{a}_{R_c} D_K)} \quad (4)$$

where:

$$\hat{a}_{R_b} = - \frac{\sum_{i=1}^n D_{K_i} U_i}{\sum_{i=1}^n U_i^2} \quad (5)$$

$$\hat{a}_{R_c} = - \frac{\sum_{i=1}^n D_{K_i} U_i}{\sum_{i=1}^n D_{K_i}^2} \quad (6)$$

Dependencies (3 and 4) show that at each moment $\theta_i + \Delta \theta$ ($\Delta \theta$ - sufficiently high), momentary values a_{R_b} and a_{R_c} can be calculated that are basis for the quantitative evaluation of technical condition and regulation condition. Additionally, course of sequence values $a_{R_b}(\theta)$ and $a_{R_c}(\theta)$ can be the basis for the identification of parametric and momentary damages and hence, the reliability characteristics (before the occurrence of catastrophic damage).

In order to accurately define the reliability condition, there is a need to determine the subsequent values of threshold condition parameters for the object from dependency (7), permissible value of condition parameters (8) and momentary permissible value of condition parameters a_{Rb} , a_{Rc} (9). [5, 8]

$$d_{pri}(\theta) = i \cdot x_i + a_i \cdot s_i \cdot \sqrt{i} \quad (7)$$

$$d_{dopi}(\theta) = m \cdot \bar{x}_m + a_i \cdot s_m \cdot \sqrt{m} \quad (8)$$

$$d_{pr\ dopi}(\theta) = \frac{(d_{dop} - d_{pr3})}{\theta_{max} - \theta_3} (\theta_i - \theta_3) + d_{pr3} \quad (9)$$

where:

$d_{pri}(\theta)$ – momentary threshold for parameters a_{Rb} and a_{Rc} ,

d_{dop} – permissible value of parameters a_{Rb} and a_{Rc} ,

$d_{pr\ dopi}$ – permissible value for parameters a_{Rb} and a_{Rc} for the moment of testing

θ_i , d_{pr3} – value for the third measurement,

\bar{x}_m – average,

s – standard deviation,

i – number of subsequent measurement,

coefficient $a_i = \frac{\sum x_i - i\mu_i}{\sigma_i \sqrt{i+2}}$ includes the information that the set of value of parameters, tends to have normal distribution, for which average parameter is $\mu_i = \frac{\sum x_i}{i+2}$, and standard deviation parameter is $\sigma_i = \frac{5}{4}\mu_i$, $m = \frac{\theta_{max}}{\Delta\theta_{sr}}$. [5, 9]

3. Characteristics of the threshold condition parameters of the object

For each operational duration of a technical object θ , the threshold value of diagnostic signal $d_{pr}(\theta)_i$ is determined as a function of time θ , which is the threshold characteristic (7). Threshold characteristic is used for representing the course of maximum aggregate value $d_{pr\ dopi}$ of parameters a_{Rb} and a_{Rc} as a function of operational time of technical object θ .

Permissible value d_{dop} (8) is the highest value, which a particular parameter can achieve after time θ_{max} , corresponding to its service life. d_{pr3} is the value for three measurements, for which statistical rules can be applied. Points d_{pr3} for θ_3 and d_{dop} for θ_{max} form the basis to determine the threshold characteristic, in accordance with the Lindeberg–Levy's theorem [5, 7, 8].

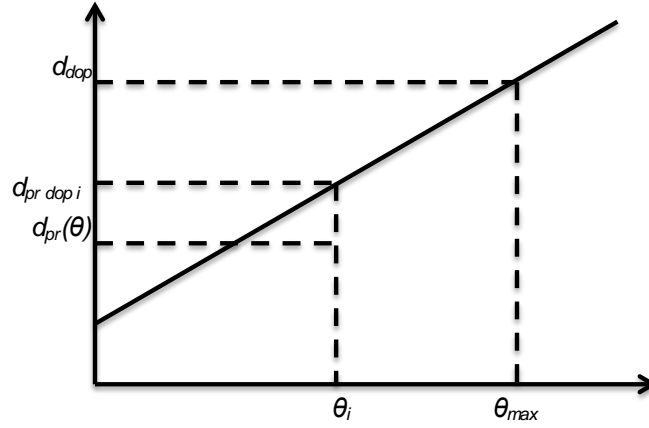


Fig. 1 Threshold characteristic and its usage for damage identification.

Figure 1 represents the momentary threshold values of diagnostic signal, permissible value and threshold permissible value of diagnostic signal. On their basis, the moment of occurrence of parametric and momentary damages was determined. Parametric damages occur when, for the course of parameter a_{Rb} , at any moment „i”, $d_{pri}(\theta) > d_{prdopi}$. Momentary damage will occur when, for the course of parameter a_{Rc} , at any moment „i”, $d_{pri}(\theta) > d_{prdopi}$. Number m_b and m_c of parametric and momentary damages are basis for determining reliability estimates $R_b^*(t)$ and $R_c^*(t)$, and subsequently, reliability characteristics, $R(t) = R(R_b^*, R_c^*)$. [5, 10]

4. Experimental research (exploitation) of two objects during two observation periods

A comprehensive research was concluded on two pumps, during two observation periods. On this basis, the parameters a_{Rb} i a_{Rc} were calculated, and presented in table 1 and 2.

Number of damages $m(t)$ and the contractual number of objects $n = \frac{\theta_{obs}}{\Delta\theta_{sr}}$ (where $\Delta\theta_{sr}$ – average time between damages), enables to calculate the estimators $R_{a_{Rb}}^*$ and $R_{a_{Rc}}^*$ and $R^*(t) = R_{a_{Rb}}^* \cdot R_{a_{Rc}}^*$. This data allows to determine $R(t)$, and then to calculate $E(T) = \int_0^\infty tR(t)dt$ and $\sigma_{E(T)}^2 = 2 \int_0^\infty tR(t)dt - E(T)^2$, i.e. base reliability parameters – $E(T)$ expected lifetime and $\sigma_{E(T)}$ – standard deviation of expected lifetime. For the tested pump no. 3, the parameters amounted to: $E(T)=281.10$, $\sigma_{E(T)}=146.02$ (for I observation period) and $E(T)=324.53$, $\sigma_{E(T)}=161.71$ (for II observation period), while for pump no.4, the parameters amounted to: $E(T)=307.20$, $\sigma_{E(T)}=190.56$ (for I observation period) and $E(T)=247.48$, $\sigma_{E(T)}=170.68$ (for II observation period).

*The new approach to identification of parametric and momentary damages...
Nowe podejście do metody identyfikacji uszkodzeń parametrycznych...*

Table 1 Values of the parameters of technical condition a_{Rb} and regulation condition a_{Rc} for pump assembly no. 3. Threshold value, and threshold permissible (formulas 7, 8, 9), and also, identified amount of parametric and momentary damages for pump assembly no. 3 [5]

θ [h]	$\theta_{obs.}$ [h]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}	d_{praRb}	$d_{prdopaRb}$	d_{praRc}	$d_{prdopaRc}$	$m(t)_{aRb}$	$m(t)_{aRc}$
8329	0	1,10	1,28								
8354	25	0,89	1,15	0,147	0,068						
8401	72	0,96	1,07	0,026	0,028	0,366	0,366	0,179	0,179	1	1
8442	113	0,74	1,08	0,041	0,001	0,371	0,475	0,174	0,224	0	0
8487	158	1,06	1,33	0,648	0,250	1,474	0,595	0,586	0,274	1	1
8531	202	1,00	1,21	0,051	0,113	1,462	0,712	0,689	0,323	1	1
8578	249	0,85	1,27	0,022	0,007	1,437	0,837	0,679	0,374	1	1
8602	273	0,86	1,23	0,005	0,014	1,405	0,901	0,679	0,401	1	1
8648	319	0,71	1,07	0,031	0,023	1,406	1,023	0,690	0,452	1	1
8675	346	0,82	1,15	0,084	0,037	1,469	1,095	0,718	0,482	1	1
8699	370	0,78	1,09	0,040	0,032	1,489	1,159	0,742	0,508	1	1
8744	415	1,33	1,11	0,027	0,001	1,498	1,279	0,736	0,558	1	1
8769	440	0,76	1,12	0,194	0,004	1,692	1,345	0,733	0,585	1	1
8819	490	0,71	1,12	0,006	0,000	1,683	1,478	0,727	0,641	1	1
8838	509	0,76	1,06	0,039	0,029	1,709	1,529	0,752	0,662	1	1
8861	532	0,59	1,11	0,029	0,006	1,728	1,590	0,753	0,687	1	1
8909	580	0,96	1,35	0,155	0,048	1,881	1,718	0,798	0,740	1	1
8937	608	0,96	1,41	0,000	0,015	1,871	1,793	0,809	0,771	1	1
8982	653	0,85	1,30	0,022	0,014	1,884	1,912	0,819	0,821	0	0
9006	677	0,68	1,12	0,050	0,035	1,927	1,976	0,851	0,847	0	1
9029	700	1,00	1,19	0,114	0,024	2,037	2,037	0,872	0,872	1	1
14880	0	0,79	1,16								
14920	40	0,99	1,21	0,064	0,014						
14960	80	0,68	1,12	0,068	0,013	0,201	0,201	0,041	0,041	1	1
15003	123	0,59	1,10	0,015	0,002	0,234	0,317	0,047	0,227	0	0
15033	153	0,68	1,08	0,075	0,005	0,314	0,398	0,051	0,255	0	0
15073	193	0,77	1,12	0,095	0,056	0,421	0,506	0,139	0,292	0	0
15100	220	0,86	1,28	0,702	0,477	1,558	0,579	0,927	0,318	1	1
15140	260	0,76	1,06	0,060	0,112	1,580	0,686	1,022	0,355	1	1
15182	302	0,99	1,28	0,051	0,038	1,600	0,800	1,040	0,395	1	1
15206	326	1,26	1,16	0,027	0,010	1,600	0,864	1,032	0,417	1	1
15312	432	1,17	1,20	0,003	0,001	1,581	1,150	1,017	0,517	1	1
15352	472	0,82	1,26	0,073	0,008	1,637	1,258	1,012	0,554	1	1
15358	478	0,92	1,10	0,174	0,312	1,805	1,274	1,361	0,560	1	1
15407	527	0,61	1,09	0,033	0,001	1,823	1,406	1,350	0,606	1	1
15431	551	1,01	1,10	0,089	0,003	1,902	1,470	1,341	0,628	1	1
15461	581	1,25	1,11	0,020	0,001	1,909	1,551	1,332	0,657	1	1
15540	660	0,69	1,27	0,027	0,005	1,925	1,764	1,328	0,731	1	1
15612	732	1,27	1,13	0,020	0,005	1,935	1,958	1,325	0,798	0	1
15685	805	0,69	1,27	0,029	0,005	1,955	2,155	1,322	0,867	0	1
15691	811	1,24	1,04	0,212	0,083	2,171	2,171	1,402	0,872	1	1

Table 2 Values of the parameters of technical condition a_{Rb} and regulation condition a_{Rc} for pump assembly no. 4. Threshold value, and threshold permissible (formulas 7, 8, 9), and also, identified amount of parametric and momentary damages for pump assembly no. 4 [5]

θ [h]	θ_{obs} [h]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$	$m(t)_{a_{Rb}}$	$m(t)_{a_{Rc}}$
8329	0	0,46	1,13								
8354	25	0,46	1,28	0,001	0,079						
8401	72	0,51	1,20	0,028	0,025	0,067	0,067	0,203	0,203	1	1
8442	113	0,76	1,24	0,031	0,003	0,102	0,174	0,193	0,211	0	0
8487	158	0,37	1,09	0,084	0,012	0,227	0,292	0,194	0,219	0	0
8531	202	0,32	1,41	0,005	0,011	0,225	0,406	0,198	0,227	0	0
8578	249	0,69	1,13	0,036	0,016	0,258	0,529	0,209	0,236	0	0
8602	273	0,34	1,05	0,173	0,012	0,495	0,592	0,217	0,240	0	0
8648	319	0,35	1,21	0,001	0,008	0,488	0,712	0,222	0,248	0	0
8675	346	0,62	1,12	0,061	0,014	0,547	0,783	0,233	0,253	0	0
8699	370	0,48	1,21	0,629	0,031	1,435	0,845	0,263	0,257	1	1
8744	415	0,64	1,14	0,022	0,006	1,439	0,963	0,267	0,266	1	1
8769	440	0,66	1,14	0,004	0,000	1,427	1,028	0,265	0,270	1	0
8819	490	0,41	1,14	0,067	0,000	1,482	1,159	0,264	0,279	1	0
8838	509	0,54	1,15	0,132	0,014	1,609	1,208	0,276	0,283	1	0
8861	532	0,33	1,14	0,062	0,001	1,661	1,268	0,275	0,287	1	0
8909	580	0,28	1,15	0,005	0,000	1,656	1,394	0,274	0,296	1	0
8937	608	0,35	1,15	0,020	0,000	1,667	1,467	0,273	0,301	1	0
8982	653	0,35	1,05	0,003	0,009	1,661	1,584	0,281	0,309	1	0
9006	677	0,31	1,41	0,007	0,022	1,660	1,647	0,303	0,313	1	0
9029	700	0,99	1,06	0,053	0,015	1,707	1,707	0,317	0,317	1	1
14880	0	1,05	1,18								
14920	40	0,29	1,14	0,051	0,001						
14960	80	0,57	1,05	0,235	0,010	0,590	0,590	0,025	0,025	1	1
15003	123	0,30	1,03	0,028	0,001	0,566	0,992	0,023	0,211	0	0
15033	153	0,30	1,35	0,000	0,013	0,536	1,272	0,039	0,216	0	0
15073	193	0,49	1,14	1,135	0,019	2,406	1,645	0,063	0,222	1	0
15100	220	0,59	1,35	0,810	0,030	3,313	1,897	0,101	0,226	1	0
15140	260	0,50	1,14	0,209	0,028	3,454	2,271	0,132	0,232	1	0
15182	302	0,77	1,14	0,025	0,001	3,421	2,663	0,131	0,239	1	0
15206	326	0,91	1,07	0,015	0,006	3,386	2,887	0,136	0,243	1	0
15312	432	1,45	1,37	0,007	0,004	3,350	3,877	0,139	0,259	0	0
15352	472	0,44	1,34	0,090	0,001	3,404	4,251	0,139	0,265	0	0
15358	478	0,65	1,06	0,451	0,526	3,858	4,307	0,915	0,266	0	1
15407	527	1,17	1,37	0,027	0,020	3,855	4,764	0,925	0,274	0	1
15431	551	0,83	1,07	0,068	0,111	3,896	4,988	1,034	0,277	0	1
15461	581	0,97	1,08	0,014	0,001	3,885	5,268	1,025	0,282	0	1
15540	660	0,99	1,23	0,001	0,013	3,864	6,006	1,031	0,294	0	1
15612	732	0,88	1,19	0,011	0,026	3,855	6,679	1,050	0,305	0	1
15685	805	0,78	1,07	0,011	0,177	3,847	7,360	1,235	0,316	0	1
15691	811	0,69	1,09	2,860	0,028	7,416	7,416	1,257	0,317	1	1

In the process of exploitation of interest $E(T)_{min} = E(T) - \sigma_{E(T)}$, they are synthesized from the parameters $E(T)$ and $\sigma_{E(T)}$. For the tested pump no. 3 for I observation period $E(T)_{min}=135.08$, for II observation period $E(T)_{min}=162.82$, for the tested pump no. 4 for I observation period $E(T)_{min}=116.4$, for II observation period $E(T)_{min}=76.80$. Here you can see that the state of the reliability pump no. 3 is better than the state of the reliability of pump no. 4. Determined parameters allows to plan servicing activity in the exploitation process.

Based on the results of the analysis, included in table 1 and 2, it can be concluded that while conducting research, parametric damages m_{Rb} , and momentary damages m_{Rc} has occurred and that only these (without catastrophic m_{Ra}) have become the basis for determining reliability parameters. [5, 7, 10]

5. Summary

The problem of determining reliability characteristics for each single object, based on the number of parametric and momentary damages (before the occurrence of catastrophic damages) is still open. Its solution largely depends on the way of identifying parametric and momentary damages, which is particularly difficult, when relatively small number of measurements are at disposition. The most common diagnostic threshold, and fact of crossing the diagnostic threshold (damage) are determined on the basis of statistical processing of received measurement. Thresholds $\mu+\sigma$, $\mu+2\sigma$, $\mu+3\sigma$ (where μ – average of measurements, σ – standard deviation) are imprecise, because, they are based only on statistics. Subsequent threshold is determined on base of Lindeberg– Levy's theorem (7 and 8) and it is much more precise, because it includes additional information such as: the beginning of object utilization is equal to approximately zero, and that for the service life θ_{max} wear is determined by direct methods and it is equal to d_{dop} . The effect of new approach is the fact that the presented method can be a good verification material for other method.

6. References

- [1] Borowczyk H., Lindstedt P., Manerowski J., Permisses for a practical computer – aided parametric method of evaluation of the technical object reliability, Journal of KONES, vol. 16 no 2, Warsaw 2009.
- [2] Cempel C., Teoria i inżynieria systemów, ITE – PIB, Radom 2006.
- [3] Grądzki R., The influence of diagnostic signal measurement period on blades technical condition imagines determined from phase shift difference, Solid State Phenomena Mechatronic Systems and Materials V 2013, vol. 199.
- [4] Grądzki R., Lindstedt P., Method of assessment of technical object amplitude in environment of exploitation and service conditions, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2015, 17 (1).
- [5] Lindstedt P., Sudakowski T., Method of prediction of reliability characteristics of a pumping station on the base of diagnostic information, Journal of KONBiN 2(5) 2008, ITWL, Warszawa 2008.

- [6] Lindstedt P., Sudakowski T., Grądzki R., Eksploatacyjna niezawodność maszyny i jej teoretyczne podstawy, Wyd. ITWL, Warszawa 2016.
- [7] Lindstedt P., Sudakowski T., Grądzki R., Prediction of estimates of technical object's reliability on the basis of damage determined from Lindeberg – Levy's claim and multiplicity of the set specified from ergodicity stream damage, Journal of KONES, vol. 20, nr 1 (2013).
- [8] Mańczak K., Metoda identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania, WNT, Warszawa 1971.
- [9] Sołodnikow W. W., Dynamika statystyczna liniowych układów sterowania automatycznego, WNT, Warszawa 1964.
- [10] Sotkow B. S., Niezawodność elementów i urządzeń automatyki, WNT, Warszawa 1973.
- [11] Sudakowski T., Permisses of operational method of calculation of reliability of machines on the base of parametric and momentary symptoms of damage, Acta Mechanica et Automatica, vol. 3 no. 4, Białystok 2009.



Professor, PhD., Eng. Paweł Lindstedt, Air Force Institute of Technology, Aircraft Engine Department (Share 33,3%).



PhD. Eng. Tomasz Sudakowski Department of Automatic Control and Robotics of Białystok University of Technology (Share 33,3%).



MSc Eng. Artur Kułaszka – Head of ITWL's (AFIT's) Laboratory for Monitoring Health of Turbomachinery (Share 33,3%).

NOWE PODEJŚCIE DO METODY IDENTYFIKACJI USZKODZEŃ PARAMETRYCZNYCH I CHWILOWYCH NA PODSTAWIE METODY LINDEBERG'A – LEVY'EGO

1. Wstęp

W procesie użytkowania złożonego obiektu technicznego następuje jego rozregulowanie (utrata jakości działania), zużywanie i zwiększenie zawodności. Dlatego wymagane jest, aby podczas jego standardowego użytkowania i obsługiwanego obserwowany był jego stan wyregulowania, stan techniczny i niezawodności. Wyniki tych obserwacji umożliwiają przeprowadzenie syntetycznej (kompleksowej) oceny zdatości obiektu, określającej jego zdolność do prawidłowej realizacji powierzonych mu zadań zgodnie z jego przeznaczeniem. Ciągła obserwacja zmian parametrów stanu technicznego na podstawie relacji między sygnałami diagnostycznymi (wyjściowymi), a sygnałami wejściowymi (otoczenia), umożliwia ocenę stanu regulacji obiektu [5, 6].

Ciągłą obserwację zmian parametrów stanu regulacji na podstawie relacji między sygnałami użytkowymi związanymi ze zużywaniem się elementów, a sygnałami otoczenia, użytkowymi i towarzyszącymi umożliwia ocenę stanu technicznego obiektu [1, 6, 11].

Ciągle gromadzenie wiedzy o uszkodzeniach obiektu, które są granicznymi poziomami rozregulowania i zużycia obiektu i następnie po przeliczeniu tak zidentyfikowanej liczby uszkodzeń na charakterystyki niezawodnościowe daje możliwość badania stanu niezawodności obiektu.

Oceny stanu regulacji, diagnostyki i niezawodności są podstawowymi, ściśle ze sobą powiązаныmi elementami, które w ramach cybernetycznego systemu eksploatacji są podstawą do kompleksowej oceny stanu zdatości obiektu [1, 5, 6]. Nowe podejście do metody opisanej w artykule oceny stanu zdatości eksploatowanego obiektu polega na odpowiedniej analizie zmian bieżących wartości parametrów stanu technicznego a_{Rb} i stanu regulacji a_{Rc} wyznaczonych z interakcyjnych, sprzężonych równań stanu [2, 5, 6].

Dostrzeżono, że analiza wartości przebiegu parametrów stanu technicznego a_{Rb} i stanu regulacji a_{Rc} umożliwia identyfikację uszkodzeń (odpowiednio parametrycznych i chwilowych) na podstawie ilościowych relacji między chwilowymi wartościami progowymi d_{pri} (parametr a_{Rb} , a_{Rc}), a dopowiadającymi im chwilowymi wartościami dopuszczalnymi $d_{pr dop i}$, które oblicza się na podstawie metody Lindeberg'a – Levy'ego [5, 8].

2. Teoretyczne podstawy oceny stanu zdadności obiektu technicznego

Istotą sposobu oceny stanu zdadności jest założenie, że każdy obiekt techniczny w otoczeniu opisuje się za pomocą dwóch skorelowanych równań stanu: [2, 5, 6, 11]

$$\dot{D}_K = a_{R_b} D_K + b_{R_b} U, \quad (1)$$

$$\dot{U} = a_{R_c} U + b_{R_c} D_K, \quad (2)$$

gdzie:

\dot{D}_K – kompleksowy sygnał diagnostyczny i jego pochodna,

\dot{U} – kompleksowy sygnał użytkowy (działania) i jego pochodna,

a_{R_b} – parametr stanu technicznego,

a_{R_c} – parametr stanu regulacji (użytkowania),

b_{R_b} – parametr oddziaływania jakości użytkowania na stan techniczny,

b_{R_c} – parametr oddziaływania jakości stanu technicznego na stan działania.

Równania te bazują na spostrzeżeniu, że wartość użytkowa (działania) obiektu zależy od stanu technicznego (zużycia fizycznego), a stan techniczny od intensywności użytkowania i jakości regulacji, tzn., że stan techniczny D_K jest otoczeniem dla stanu użytkowego U i odwrotnie.

Z równań stanu (1 i 2) oblicza się parametry stanu technicznego a_{R_b} i stanu regulacji a_{R_c} :

$$a_{R_b} = \frac{\Delta D_K}{\Delta \theta (D_K + \hat{a}_{R_b} U)} \quad (3)$$

$$a_{R_c} = \frac{\Delta U}{\Delta \theta (U + \hat{a}_{R_c} D_K)} \quad (4)$$

gdzie:

$$\hat{a}_{R_b} = - \frac{\sum_{i=1}^n D_{K_i} U_i}{\sum_{i=1}^n U_i^2} \quad (5)$$

$$\hat{a}_{R_c} = - \frac{\sum_{i=1}^n D_{K_i} U_i}{\sum_{i=1}^n D_{K_i}^2} \quad (6)$$

Z zależności (3 i 4) wynika, że w każdej chwili $\theta_i + \Delta \theta$ ($\Delta \theta$ - dostatecznie duże) można obliczyć chwilowe wartości a_{R_b} i a_{R_c} , które są podstawą do ilościowej oceny stanu technicznego i stanu regulacji. Dodatkowo przebiegi ciągów wartości $a_{R_b}(\theta)$ i $a_{R_c}(\theta)$ mogą być podstawą do identyfikacji uszkodzeń parametrycznych i chwilowych, a stąd charakterystyk niezawodnościowych (przed wystąpieniem uszkodzeń katastroficznych).

W celu dokładnego określenia stanu niezawodnościowego należy wyznaczyć kolejne wartości progowe parametrów stanu obiektu z zależności (7), wartość dopuszczalną parametrów stanu (8) oraz chwilową wartość dopuszczalną parametrów a_{Rb} , a_{Rc} (9) [8].

$$d_{pri}(\theta) = i \cdot x_i + a_i \cdot s_i \cdot \sqrt{i} \quad (7)$$

$$d_{dopi}(\theta) = m \cdot \bar{x}_m + a_i \cdot s_m \cdot \sqrt{m} \quad (8)$$

$$d_{pr dopi}(\theta) = \frac{(d_{dop} - d_{pr3})}{\theta_{max} - \theta_3} (\theta_i - \theta_3) + d_{pr3} \quad (9)$$

gdzie:

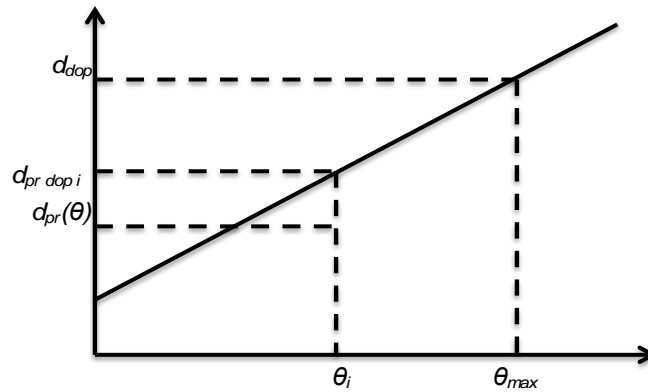
- $d_{pri}(\theta)$ – próg chwilowy dla parametrów a_{Rb} i a_{Rc} ,
- d_{dop} – wartość dopuszczalna parametrów a_{Rb} i a_{Rc} ,
- $d_{pr dopi}$ – wartość dopuszczalna parametrów a_{Rb} i a_{Rc} dla chwili badania θ_i ,
- d_{pr3} – wartość dla trzeciego pomiaru,
- \bar{x} – średnia,
- s – odchylenie standardowe,
- i – numer kolejnego pomiaru,

współczynnik $a_i = \frac{\sum x_i - i\mu_i}{\sigma_i \sqrt{i+2}}$ uwzględniający informację, że zbiór wartości parametrów dąży do rozkładu normalnego, dla którego parametr średniej $\mu_i = \frac{\sum x_i}{i+2}$, a parametr odchylenia standardowego $\sigma_i = \frac{5}{4}\mu_i$, $m_i = \frac{\theta_{max}}{\Delta\theta_{sr}}$.

3. Charakterystyka progowa parametrów stanu

Dla każdego czasu działania obiektu technicznego θ wyznacza się wartość progową sygnału diagnostycznego $d_{pr}(\theta)$, w funkcji czasu θ która jest charakterystyką progową (7). Charakterystyka progowa służy do przedstawienia przebiegu maksymalnej wartości sumarycznego $d_{pr dopi}$ parametrów a_{Rb} i a_{Rc} w funkcji czasu działania obiektu technicznego θ .

Wartością dopuszczalną d_{dop} (8) jest największa wartość, jaką dany parametr może osiągnąć po czasie θ_{max} , odpowiadającym resursowi. d_{pr3} jest wartością dla trzech pomiarów, dla których można zastosować reguły statystyki. Punkty d_{pr3} dla θ_3 i d_{dop} dla θ_{max} są podstawą do wyznaczania charakterystyki progowej wg twierdzenia Lindeberg'a – Levy'ego.



Rys. 1 Charakterystyka progowa i jej zastosowanie do identyfikacji uszkodzeń

Na rys. 1 przedstawiono chwilowe wartości progowe sygnału diagnostycznego, wartości dopuszczalne oraz progowe dopuszczalne wartości sygnału diagnostycznego. Na ich podstawie określono chwile, w których wystąpiły uszkodzenia parametryczne i chwilowe. Uszkodzenie parametryczne wystąpi wtedy, gdy dla przebiegu parametru a_{Rb} w dowolnej chwili „i”, $d_{pri}(\theta) > d_{pr dop i}$. Uszkodzenie chwilowe wystąpi wtedy, gdy dla przebiegu parametru a_{Rc} w dowolnej chwili „i”, $d_{pri}(\theta) > d_{pr dop i}$. Liczba m_b i m_c uszkodzeń parametrycznych i chwilowych są podstawą do wyznaczenia estymatorów niezawodności $R_b^*(t)$ i $R_c^*(t)$, a następnie charakterystyk niezawodności $R(t) = R(R_b^*, R_c^*)$ [5, 10].

4. Badania eksperymentalne (eksploatacyjne) dwóch obiektów w dwóch okresach obserwacji

Przeprowadzono kompleksowe badania dwóch pomp w dwóch okresach obserwacji. Na tej podstawie obliczono parametry a_{Rb} i a_{Rc} , które przedstawiono w tabeli 1 i 2.

Liczba uszkodzeń $m(t)$ i umowna liczba obiektów $n = \frac{\theta_{obs}}{\Delta\theta_{sr}}$ (gdzie $\Delta\theta_{sr}$ – średni czas między uszkodzeniami) pozwala obliczyć estymatory $R_{a_{Rb}}^*$ i $R_{a_{Rc}}^*$ oraz $R^*(t) = R_{a_{Rb}}^* \cdot R_{a_{Rc}}^*$. Dane te pozwalają wyznaczyć $R(t)$, a następnie obliczyć $E(T) = \int_0^\infty R(t)dt$ i $\sigma_{E(T)}^2 = 2 \int_0^\infty tR(t)dt - E(T)^2$ tzn. podstawowe parametry niezawodności – $E(T)$ oczekiwany czas życia i $\sigma_{E(T)}$ – odchylenie standardowe oczekiwanego czasu życia obiektu. Dla badanej pompy nr 3 okresy te wynoszą: $E(T)=281,10$, $\sigma_{E(T)}=146,02$ (dla I okresu obserwacji) i $E(T)=324,53$, $\sigma_{E(T)}=161,71$ (dla II okresu obserwacji), natomiast dla pompy nr 4 okresy te wynoszą: $E(T)=307,20$, $\sigma_{E(T)}=190,56$ (dla I okresu obserwacji) i $E(T)=247,48$, $\sigma_{E(T)}=170,68$ (dla II okresu obserwacji).

*The new approach to identification of parametric and momentary damages...
Nowe podejście do metody identyfikacji uszkodzeń parametrycznych...*

Tab. 1 Wartości parametru stanu technicznego a_{Rb} i stanu regulacji a_{Rc} dla zespołu pompowego nr 3. Wartości progowe i progowe dopuszczalne (wzory 7, 8, 9), a także zidentyfikowana liczba uszkodzeń parametrycznych i chwilowych dla zespołu pompowego nr 3 [5]

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$	$m(t)_{a_{Rb}}$	$m(t)_{a_{Rc}}$
8329	0	1,10	1,28								
8354	25	0,89	1,15	0,147	0,068						
8401	72	0,96	1,07	0,026	0,028	0,366	0,366	0,179	0,179	1	1
8442	113	0,74	1,08	0,041	0,001	0,371	0,475	0,174	0,224	0	0
8487	158	1,06	1,33	0,648	0,250	1,474	0,595	0,586	0,274	1	1
8531	202	1,00	1,21	0,051	0,113	1,462	0,712	0,689	0,323	1	1
8578	249	0,85	1,27	0,022	0,007	1,437	0,837	0,679	0,374	1	1
8602	273	0,86	1,23	0,005	0,014	1,405	0,901	0,679	0,401	1	1
8648	319	0,71	1,07	0,031	0,023	1,406	1,023	0,690	0,452	1	1
8675	346	0,82	1,15	0,084	0,037	1,469	1,095	0,718	0,482	1	1
8699	370	0,78	1,09	0,040	0,032	1,489	1,159	0,742	0,508	1	1
8744	415	1,33	1,11	0,027	0,001	1,498	1,279	0,736	0,558	1	1
8769	440	0,76	1,12	0,194	0,004	1,692	1,345	0,733	0,585	1	1
8819	490	0,71	1,12	0,006	0,000	1,683	1,478	0,727	0,641	1	1
8838	509	0,76	1,06	0,039	0,029	1,709	1,529	0,752	0,662	1	1
8861	532	0,59	1,11	0,029	0,006	1,728	1,590	0,753	0,687	1	1
8909	580	0,96	1,35	0,155	0,048	1,881	1,718	0,798	0,740	1	1
8937	608	0,96	1,41	0,000	0,015	1,871	1,793	0,809	0,771	1	1
8982	653	0,85	1,30	0,022	0,014	1,884	1,912	0,819	0,821	0	0
9006	677	0,68	1,12	0,050	0,035	1,927	1,976	0,851	0,847	0	1
9029	700	1,00	1,19	0,114	0,024	2,037	2,037	0,872	0,872	1	1
14880	0	0,79	1,16								
14920	40	0,99	1,21	0,064	0,014						
14960	80	0,68	1,12	0,068	0,013	0,201	0,201	0,041	0,041	1	1
15003	123	0,59	1,10	0,015	0,002	0,234	0,317	0,047	0,227	0	0
15033	153	0,68	1,08	0,075	0,005	0,314	0,398	0,051	0,255	0	0
15073	193	0,77	1,12	0,095	0,056	0,421	0,506	0,139	0,292	0	0
15100	220	0,86	1,28	0,702	0,477	1,558	0,579	0,927	0,318	1	1
15140	260	0,76	1,06	0,060	0,112	1,580	0,686	1,022	0,355	1	1
15182	302	0,99	1,28	0,051	0,038	1,600	0,800	1,040	0,395	1	1
15206	326	1,26	1,16	0,027	0,010	1,600	0,864	1,032	0,417	1	1
15312	432	1,17	1,20	0,003	0,001	1,581	1,150	1,017	0,517	1	1
15352	472	0,82	1,26	0,073	0,008	1,637	1,258	1,012	0,554	1	1
15358	478	0,92	1,10	0,174	0,312	1,805	1,274	1,361	0,560	1	1
15407	527	0,61	1,09	0,033	0,001	1,823	1,406	1,350	0,606	1	1
15431	551	1,01	1,10	0,089	0,003	1,902	1,470	1,341	0,628	1	1
15461	581	1,25	1,11	0,020	0,001	1,909	1,551	1,332	0,657	1	1
15540	660	0,69	1,27	0,027	0,005	1,925	1,764	1,328	0,731	1	1
15612	732	1,27	1,13	0,020	0,005	1,935	1,958	1,325	0,798	0	1
15685	805	0,69	1,27	0,029	0,005	1,955	2,155	1,322	0,867	0	1
15691	811	1,24	1,04	0,212	0,083	2,171	2,171	1,402	0,872	1	1

Tab. 2 Wartości parametru stanu technicznego a_{Rb} i stanu regulacji a_{Rc} dla zespołu pompowego nr 4. Wartości progowe i progowe dopuszczalne (wzory 7, 8, 9), a także zidentyfikowana liczba uszkodzeń parametrycznych i chwilowych dla zespołu pompowego nr 4 [5]

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}	d_{praRb}	d_{prdopa}	d_{praRc}	d_{prdopa}	$m(t)_{aR}$	$m(t)_{aR}$
8329	0	0,46	1,13								
8354	25	0,46	1,28	0,001	0,079						
8401	72	0,51	1,20	0,028	0,025	0,067	0,067	0,203	0,203	1	1
8442	113	0,76	1,24	0,031	0,003	0,102	0,174	0,193	0,211	0	0
8487	158	0,37	1,09	0,084	0,012	0,227	0,292	0,194	0,219	0	0
8531	202	0,32	1,41	0,005	0,011	0,225	0,406	0,198	0,227	0	0
8578	249	0,69	1,13	0,036	0,016	0,258	0,529	0,209	0,236	0	0
8602	273	0,34	1,05	0,173	0,012	0,495	0,592	0,217	0,240	0	0
8648	319	0,35	1,21	0,001	0,008	0,488	0,712	0,222	0,248	0	0
8675	346	0,62	1,12	0,061	0,014	0,547	0,783	0,233	0,253	0	0
8699	370	0,48	1,21	0,629	0,031	1,435	0,845	0,263	0,257	1	1
8744	415	0,64	1,14	0,022	0,006	1,439	0,963	0,267	0,266	1	1
8769	440	0,66	1,14	0,004	0,000	1,427	1,028	0,265	0,270	1	0
8819	490	0,41	1,14	0,067	0,000	1,482	1,159	0,264	0,279	1	0
8838	509	0,54	1,15	0,132	0,014	1,609	1,208	0,276	0,283	1	0
8861	532	0,33	1,14	0,062	0,001	1,661	1,268	0,275	0,287	1	0
8909	580	0,28	1,15	0,005	0,000	1,656	1,394	0,274	0,296	1	0
8937	608	0,35	1,15	0,020	0,000	1,667	1,467	0,273	0,301	1	0
8982	653	0,35	1,05	0,003	0,009	1,661	1,584	0,281	0,309	1	0
9006	677	0,31	1,41	0,007	0,022	1,660	1,647	0,303	0,313	1	0
9029	700	0,99	1,06	0,053	0,015	1,707	1,707	0,317	0,317	1	1
14880	0	1,05	1,18								
14920	40	0,29	1,14	0,051	0,001						
14960	80	0,57	1,05	0,235	0,010	0,590	0,590	0,025	0,025	1	1
15003	123	0,30	1,03	0,028	0,001	0,566	0,992	0,023	0,211	0	0
15033	153	0,30	1,35	0,000	0,013	0,536	1,272	0,039	0,216	0	0
15073	193	0,49	1,14	1,135	0,019	2,406	1,645	0,063	0,222	1	0
15100	220	0,59	1,35	0,810	0,030	3,313	1,897	0,101	0,226	1	0
15140	260	0,50	1,14	0,209	0,028	3,454	2,271	0,132	0,232	1	0
15182	302	0,77	1,14	0,025	0,001	3,421	2,663	0,131	0,239	1	0
15206	326	0,91	1,07	0,015	0,006	3,386	2,887	0,136	0,243	1	0
15312	432	1,45	1,37	0,007	0,004	3,350	3,877	0,139	0,259	0	0
15352	472	0,44	1,34	0,090	0,001	3,404	4,251	0,139	0,265	0	0
15358	478	0,65	1,06	0,451	0,526	3,858	4,307	0,915	0,266	0	1
15407	527	1,17	1,37	0,027	0,020	3,855	4,764	0,925	0,274	0	1
15431	551	0,83	1,07	0,068	0,111	3,896	4,988	1,034	0,277	0	1
15461	581	0,97	1,08	0,014	0,001	3,885	5,268	1,025	0,282	0	1
15540	660	0,99	1,23	0,001	0,013	3,864	6,006	1,031	0,294	0	1
15612	732	0,88	1,19	0,011	0,026	3,855	6,679	1,050	0,305	0	1
15685	805	0,78	1,07	0,011	0,177	3,847	7,360	1,235	0,316	0	1
15691	811	0,69	1,09	2,860	0,028	7,416	7,416	1,257	0,317	1	1

W procesie eksploatacji interesujące są wartości $E(T)_{min} = E(T) - \sigma_{E(T)}$, które syntezują parametry $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$. Dla zespołu pompowego nr 3 I okres obserwacji $E(T)_{min}=135,08$, II okres obserwacji $E(T)_{min}=162,82$, a dla zespołu pompowego nr 4 I okres obserwacji $E(T)_{min}=116,48$, II okres obserwacji $E(T)_{min}=76,80$. Tu widać, że stan niezawodnościowy zespołu pompowego nr 3 jest lepszy od stanu niezawodnościowego zespołu pompowego nr 4. Wyznaczone parametry pozwalają planować czynności obsługowe w procesie eksploatacji.

Na podstawie analizy wyników, zawartych w tabelach 1 i 2, można wywnioskować, że podczas przeprowadzonych badań, wystąpiły uszkodzenia parametryczne m_{Rb} , jak i też uszkodzenia chwilowe m_{Rc} i że tylko one (bez uszkodzeń katastroficznyc m_{Ra}) stały się podstawą do wyznaczania parametrów niezawodnościowych [5, 7, 10].

5. Podsumowanie

Problem wyznaczania charakterystyk niezawodnościowych dla każdego pojedynczego obiektu na podstawie liczby uszkodzeń parametrycznych i chwilowych (przed wystąpieniem uszkodzeń katastroficznyc) jest ciągle otwarty. Jego rozwiązanie w dużej mierze zależy od sposobu identyfikacji liczby uszkodzeń parametrycznych i chwilowych, co jest szczególnie trudne, gdy dysponuje się stosunkowo małą liczbą pomiarów. Najczęściej próg diagnostyczny i fakt przekroczenia progu diagnostycznego (uszkodzenie) wyznaczone są na podstawie statystycznej obróbki otrzymanyc pomiarów. Progi $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$, $\mu + 3\sigma$ (gdzie μ – średnia pomiarów, σ – odchylenie standardowe) są nieprecyzyjne, bo bazują tylko na statystyce. Kolejny próg wyznaczony przy pomocy twierdzenia Lidenberga – Lewy’ego (7 i 8) jest precyzyjniejszy, bo uwzględnia dodatkowe informacje takie, jak: dla początku użytkowania obiektu zużycie wynosi około zero i że dla resursu θ_{max} zużycie określone metodami bezpośrednimi wynosi d_{dop} . Efektem nowego podejścia jest fakt, że przedstawiona metoda może być dobrym materiałem weryfikacyjnym innej metody.

6. Literatura

- [1] Borowczyk H., Lindstedt P., Manerowski J., Permisses for a practical computer – aided parametric method of evaluation of the technical object reliability, Journal of KONES, vol. 16 no 2, Warsaw 2009.
- [2] Cempel C., Teoria i inżynieria systemów, ITE – PIB, Radom 2006.
- [3] Grądzki R., The influence of diagnostic signal measurement period on blades technical condition imagines determined from phase shift difference, Solid State Phenomena Mechatronic Systems and Materials V 2013, vol. 199.
- [4] Grądzki R., Lindstedt P., Method of assessment of technical object amplitude in environment of exploitation and service conditions, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2015, 17 (1).

- [5] Lindstedt P., Sudakowski T., Method of prediction of reliability characteristics of a pumping station on the base of diagnostic information, Journal of KONBiN 2(5) 2008, ITWL, Warszawa 2008.
- [6] Lindstedt P., Sudakowski T., Grądzki R., Eksploatacyjna niezawodność maszyny i jej teoretyczne podstawy, Wyd. ITWL, Warszawa 2016.
- [7] Lindstedt P., Sudakowski T., Grądzki R., Prediction of estimates of technical object's reliability on the basis of damage determined from Lindeberg – Levy's claim and multiplicity of the set specified from ergodicity stream damage, Journal of KONES, vol. 20, nr 1 (2013).
- [8] Mańczak K., Metoda identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania, WNT, Warszawa 1971.
- [9] Sołodnikow W. W., Dynamika statystyczna liniowych układów sterowania automatycznego, WNT, Warszawa 1964.
- [10] Sotskow B. S., Niezawodność elementów i urządzeń automatyki, WNT, Warszawa 1973.
- [11] Sudakowski T., Permisses of operational method of calculation of reliability of machines on the base of parametric and momentary symptoms of damage, Acta Mechanica et Automatica, vol. 3 no. 4, Białystok 2009.



***Professor, PhD., Eng. Paweł Lindstedt**, Air Force Institute of Technology, Aircraft Engine Department (Udział 33,3%).*



***PhD. Eng. Tomasz Sudakowski** Department of Automatic Control and Robotics of Białystok University of Technology (Udział 33,3%).*



***MSc Eng. Artur Kułaszka** – Head of ITWL's (AFIT's) Laboratory for Monitoring Health of Turbomachinery (Udział 33,3%).*

The new approach to identification of parametric and momentary damages...
Nowe podejście do metody identyfikacji uszkodzeń parametrycznych...
