



Prognozowanie niezawodności złożonych obiektów technicznych

DARIUSZ LASKOWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Złożone obiekty techniczne zawierają wiele elementów cechujących się wysokim poziomem zaawansowania technicznego, gwarantujących utrzymanie zadeklarowanego poziomu niezawodności. W zdecydowanej większości przypadków badania zasadniczych cech obiektów ukierunkowane są na określenie zdatności funkcjonalnej w oderwaniu od badań operatorów. Jest to znaczne uproszczenie i wyidealizowanie warunków, ponieważ z winy tzw. czynnika ludzkiego może pochodzić ponad 50% niezdatności (uszkodzeń, awarii, defektów). Dlatego też należy podkreślić wagę wpływu człowieka na poprawność realizacji funkcji zdefiniowanych w założeniach technicznych w aspekcie niezawodności.

Słowa kluczowe: niezawodność, system antropotechniczny, potencjalność, efektywność, narażenia
Symbole UKD: 62.004-192

Wstęp

Cechą charakterystyczną postępu jest zintensyfikowanie toku życia wokół różnego rodzaju mediów transmisyjnych, zapewniających przepływ informacji pomiędzy ludźmi. Postęp ten wprowadza społeczeństwo w uzależnienie od rozległych i wysoce rozproszonych systemów, które funkcjonują w nieograniczonym środowisku sieciowym. Wraz z rozwojem technologii rośnie liczba usług oferowanych przez złożone obiekty techniczne (*ZOT*), zwiększają się wymagania związane z oferowaniem zbioru usług przy zdefiniowanym i gwarantowanym poziomie jakości usług. W wielu dziedzinach gospodarki organizacje i instytucje wykorzystują *ZOT* (np. systemy sieciowe — sieci telekomunikacyjne, sieci teleinformatyczne) jako podstawowe narzędzie służące do obiegu informacji.

1. Złożony obiekt techniczny

Istotnymi cechami charakteryzującymi współcześnie konstruowane złożone obiekty techniczne o charakterze systemowym są między innymi [6]:

- złożoność struktury, duża liczba i różnorodność elementów, skomplikowany algorytm funkcjonowania, wszechstronność oddziaływania z otoczeniem,
- wzrost roli i znaczenia rozpatrywanego obiektu w rzeczywistości, dla której jest on tworzony i z którą powinien współistnieć oraz współdziałać,
- ludzie jako istotni uczestnicy procesu eksploatacji takiego obiektu,
- różnorodność i złożoność funkcji przy zdefiniowanym współdziałaniu z otoczeniem,
- stosunkowo duże nakłady (finansowe, czasu, zespoły specjalistów, materiały itp.) pochłaniane na etapie projektu.

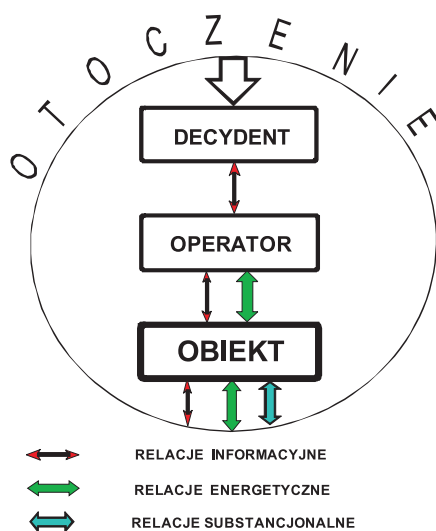
Cechy te wymuszają przyjęcie szczególnych uwarunkowań w procesie badań systemowych, gdy powszechnym narzędziem projektantów, zespołów produkcyjnych i eksploatorów stały się stacje robocze o dużych mocach obliczeniowych z wieloaspektowym oprogramowaniem symulacyjnym [1]. U podstaw systemowych metod badań znajdują się dwa pojęcia:

- *system* — rozumiany najczęściej jako zbiór elementów wzajemnie ze sobą powiązanych, stanowiących określoną całość i realizujących określone funkcje,
- idea systemowości — zakłada badanie obiektu jako całości z uwzględnieniem sprzężeń wewnętrznych (między komponentami systemu) oraz zewnętrznych (relacji między systemem a otoczeniem).

Podział systemu na części składowe (elementy/komponenty — *E/KS*) stanowi jeden z początkowych etapów opracowania formalnego opisu systemu, jest on uzależniony od celu badań i niejednoznaczny oraz hierarchiczny i wielopoziomowy. Element systemu traktowany jest jako względnie niepodzielny w ramach analizowania wybranego problemu, przy wykorzystaniu określonego modelu systemu. Istotną cechą systemu jako całości jest to, że jego właściwości nie są prostą sumą właściwości jego elementów, lecz określone są przez właściwości elementów oraz sprzężenia między elementami w trakcie realizacji algorytmu funkcjonowania, z uwzględnieniem uwarunkowań zewnętrznych (oddziaływania otoczenia). Istnienie sprzężeń oraz oddziaływań determinuje całościowe właściwości systemu zapewniające poprawność funkcjonalną.

W zdecydowanej większości przypadków prowadzone badania naukowe nie uwzględniają *czynnika ludzkiego*. Jest to znaczne uproszczenie i wyidealizowanie warunków otoczenia systemu, a wyniki badań dowodzą, że ponad 50% uszkodzeń i awarii prowadzących do niezdatności pochodzi z winy czynnika ludzkiego [7]. Odpowiedzialność człowieka (występującego w roli operatora) za poprawne funkcjonowanie zautomatyzowanych systemów technicznych, a w szczególności militarnych,

mimo wsparcia nowoczesnymi technologiami informatycznymi, nie zmniejszyła się. Jeśli uwzględnimy złożoność zjawisk zachodzących w procesie użytkowania i obsługi, w definiowaniu pojęcia *system* konieczne jest odniesienie zarówno do technicznych komponentów systemu, jak i do ludzi. W zależności od liczności tych zbiorów *system* przyjęto nazywać socjotechnicznym (komponentami systemu są dwa podzbiory: obiektów technicznych i ludzi) lub antropotechnicznym (komponenty systemu to decydent systemu oraz para antropotechniczna operator-obiekt techniczny (rys. 1.1) [3].



Rys. 1.1. Model systemu antropotechnicznego w ujęciu relacyjnym

Istotą systemu antropotechnicznego (SAT) są jego właściwości określone przez właściwości elementów oraz wzajemne relacje między nimi w trakcie realizacji algorytmu funkcjonowania, z uwzględnieniem uwarunkowań zewnętrznych (np. oddziaływania otoczenia). Te sprzężenia oraz oddziaływania rzutują na całościowe właściwości systemu, determinując jego stan eksploatacyjny, uzależniony od procesu użytkowania¹ i procesu obsługi². Użytkownicy SAT oceniają jego stan zdolności w kontekście:

- integralności i gotowości elementów strukturalnych systemu do zrealizowania zadania,
- niezawodności³ i odporności na błędy urządzeń i oprogramowania,

¹ W procesie użytkowania realizowane jest zadanie, do wykonania którego obiekt został wytworzony.

² W procesie obsługi odtwarzany jest potencjał eksploatacyjny i przywracana jest zdolność funkcjonalna.

³ Pojęcie „niezawodność” (ang. *reliability*) interpretowane w ujęciu PN-93/N[9].

- bezpieczeństwa jako rezultat celowego (destruktor, przeciwnik) i/lub niezawinionego negatywnego oddziaływania czynnika ludzkiego,
- wpływu naturalnych zdarzeń losowych, np. interferencji fal radiowych, wiatru, wyładowań atmosferycznych, awarii zasilania itp.

2. Efektywność złożonego obiektu technicznego

We współczesnych wysoce zdecentralizowanych i o dużej skali złożoności SAT zamierzoną efektywność funkcjonowania organizacji/przedsiębiorstwa osiąga się przez integrację w jednolitą całość wszystkich poziomów organizacyjnych. Wadą tego typu postępowania jest możliwość wzrostu prawdopodobieństwa dostępu do zasobów informacyjnych osób nieuprawnionych. Poziom tego typu ryzyka zmniejsza się przez wdrażanie kompleksowych i wzajemnie uzupełniających się mechanizmów zapewniających optymalne wykorzystanie potencjału systemu w celu uzyskania efektywnej pracy.

Badanie zasadniczych cech systemów (tj. potencjalność, efektywność) identyfikujących zdolność funkcjonalną obejmuje wieloaspektowy zbiór eksperymentalny i użyteczny zagadnień analizy i oceny systemów, stanowiących merytoryczny element całościowy badań społeczno-ekonomicznych i technicznych w następujących dziedzinach:

- analizie systemowej, gdzie modele ocenowe stanowią podstawę budowy modeli decyzyjnych, ocena stanu rzeczy jest podstawą podejmowania decyzji,
- inżynierii systemów, gdzie ocena wariantów rozwiązań jest podstawą wyboru rozwiązania najkorzystniejszego.

Potrzeby ze strony użytkownika zasobów sieciowych można przedstawić w postaci strumienia zapotrzebowań na usługi (np. usługi teleinformatyczne/telekomunikacyjne), realizowane przez wydzielone zasoby systemowe. Ze względu na uwarunkowania wewnętrzne i zewnętrzne systemu, strumień zapotrzebowań obsługiwanych jest kształtowany przez szereg zdarzeń, działań i procesów powodujących znaczne jego odkształcenie w stosunku do strumienia zapotrzebowań zgłoszonych. Rozpoczęcie realizacji usługi nie zawsze jest równoznaczne z jej zrealizowaniem, a obsługa zapotrzebowania może zostać przerwana w trakcie realizacji lub może nie zostać zrealizowana ze względu na stan zdolności relacji sieciowych.

Uwzględniając powyższe rozważania, można przyjąć następujące znaczenia pojęć:

Efektywność SAT to uogólniona i wielokryterialna charakterystyka określająca skuteczność realizacji zadań funkcjonalnych przez zasoby systemu w zdefiniowanych warunkach eksploatacyjnych i w danym przedziale czasu.

Pojęcie „efektywności” jest identyfikowane w niejednoznaczny sposób, jedni [Gubin, Matlin] traktują ją jako miarę jakości, inni [Konieczny] jako miarę

użyteczności, jeszcze inni [Drużynin, Kontorow] jako rezultat działania systemu. Dlatego też w dalszej części przyjęto, zgodnie z teorią Koniecznego oraz w oparciu o prace L. Będkowskiego i T. Dąbrowskiego, że miarami chwilowej (punktowej) użyteczności systemu są: potencjalność i efektywność [3]. Te miary systemowe są funkcjonalami⁴ określonymi na zbiorach: właściwości wewnętrznych systemu $\{W_w\}$, oddziaływań sterowalnych $\{S\}$ (np. pobudzeń sterujących) oraz oddziaływań niesterowalnych $\{Z\}$ (np. zakłóceń), w określonej chwili (lub dla określonej wartości innej zmiennej niezależnej systemu):

$$E_p(t) = f_p [\{W_w(t)\}, \{S(t)\}, \{Z(t)\}] \quad (2.1)$$

$$E_e(t) = f_e [\{W_w(t)\}, \{S(t)\}, \{Z(t)\}]. \quad (2.2)$$

Właściwości W_w to wartości wielkości wewnętrznych opisujących jego strukturę (konstrukcyjną i funkcjonalną). Właściwości te nazywane są często wielkościami stanu lub zmiennymi stanu, gdyż przy określonych wartościach wielkości wejściowych determinują one wartości wielkości wyjściowych.

W tym kontekście system antropotechniczny można postrzegać jako w pełni lub tylko częściowo zdolny do wykonania podstawowych funkcji. Zgodnie z powyższym proponuję przyjąć, że niezawodność oznacza „zespół właściwości” o mierzalnym charakterze⁵, a wskaźnikami, na podstawie których można wypowiedzieć się o niezawodności — odpowiednio interpretowane — są następujące wielkości [3]:

- 1) Potencjalność wymagana ($E_{p-wym}(t)$) SAT jest określona liczbą usług, których rozpoczęcia i/lub kontynuacji realizacji żądają użytkownicy — w określonej chwili lub w określonej elementarnej jednostce czasu.
- 2) Potencjał wymagany ($F_{p-wym}(\Delta T)$) SAT jest wielkością charakteryzującą oczekiwania użytkowników odnośnie liczby oraz rodzaju wymaganych i zrealizowanych usług w określonym przedziale czasu. W interpretacji matematycznej potencjał wymagany jest całką z potencjalności wymaganej w przedziale czasu ΔT użytkowania sieci:

$$F_{p-wym}(\Delta T) = f_p(E_{p-wym}(t); t \in \Delta T) \cong \int_{\Delta T} E_{p-wym}(t) dt. \quad (2.3)$$

- 3) Potencjalność dysponowana ($E_{p-dys}(t)$) SAT jest określona liczbą możliwych do rozpoczęcia i/lub kontynuacji realizacji usług zamawianych przez użytkowników — w określonej chwili lub w określonej elementarnej jednostce

⁴ Funkcjonał — funkcja, której argumentami są funkcje, a wartościami liczby rzeczywiste lub zespolone [3].

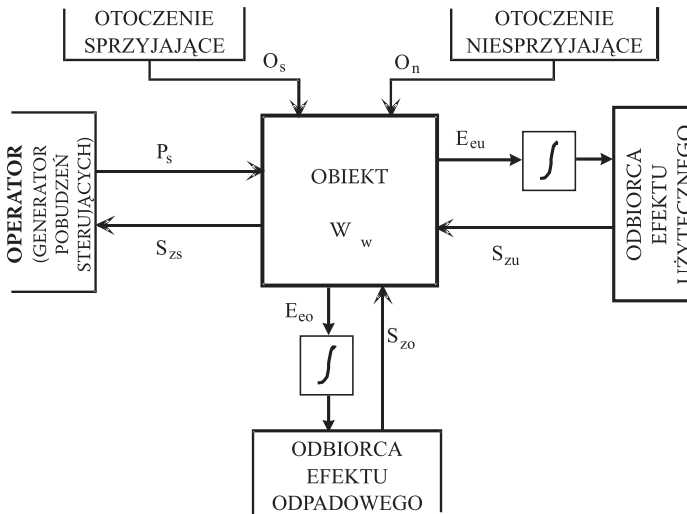
⁵ Zgodnie z normą PN-93/N.

czasu. W ogólnym ujęciu potencjalność dysponowana jest funkcjonalem następujących argumentów:

$$E_{p-dys}(t) = f_p(W_w(t), P_s(t), O_s(t), O_n(t), S_{zs}(t)), \quad (2.4)$$

gdzie: W_w — właściwości wewnętrzne systemu/obiektu,
 P_s — pobudzenia sterujące,
 O_s — sprzyjające oddziaływanie otoczenia,
 O_n — niesprzyjające oddziaływanie otoczenia,
 S_{zs} — zwrotne oddziaływanie obiektu na generator pobudeń sterujących.

Wzajemne korelacje pomiędzy SAT a otoczeniem zostały przedstawione na poniżej przedstawionym rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Model obiektu i jego związków z otoczeniem (gdzie: E_{eu} — efektywność użyteczna (użytkowa lub obsługowa), E_{eo} — efektywność odpadowa (użytkowa lub obsługowa); S_{zu} — zwrotne oddziaływanie na obiekt odbiorcy efektu użytecznego; S_{zo} — zwrotne oddziaływanie na obiekt odbiorcy efektu odpadowego)

W konsekwencji przyjętych znaczeń potencjalności i efektywności można przyjąć, że miarami przedziałowej (zadaniowej) użyteczności systemu SAT są: *potencjał* i *efekt* rozumiane jako funkcjonały określone odpowiednio na: funkcjach potencjalności i efektywności w określonym przedziale czasu T funkcjonowania systemu⁶, czyli:

⁶ Lub przedziału wartości innej zmiennej niezależnej systemu.

— potencjał: $F_p(\Delta T) = f_p(E_p(t); t^* \Delta T)$ (2.5)

— efekt: $F_e(\Delta T) = f_e(E_e(t); t^* \Delta T)$. (2.6)

Zauważmy zatem, że:

- miarami dysponowanymi i apriorycznymi możliwości systemu (obiektu) są:
 - potencjalność jako wielkość charakteryzująca zdolność systemu (obiektu) do realizacji określonego zadania użytkowego lub obsługowego;
 - potencjał jako wielkość charakteryzująca zdolność systemu (obiektu) do zrealizowania określonego zadania użytkowego lub obsługowego;
- miarami interiorycznymi i aposteriorycznymi⁷ możliwości systemu (obiektu) są:
 - efektywność jako wielkość charakteryzująca intensywność realizacji przez system (obiekt) określonego zadania użytkowego lub obsługowego, czyli jest to realizująca się potencjalność;
 - efekt jako wielkość charakteryzująca skutek zrealizowania przez system (obiekt) określonego zadania użytkowego lub obsługowego, czyli jest to zrealizowany potencjał.

Mając na uwadze potencjał i potencjalność lub efekt i efektywność, można mówić o zbiorze wskaźników opisujących ilościowo niezawodnościowe możliwości podczas eksploatacji (a szczególnie możliwości użytkowe) systemu antropotechnicznego.

3. Model matematyczny systemu antropotechnicznego

Jednym z powszechnie eksploatowanych systemów antropotechnicznych są sieci telekomunikacyjne, dlatego też do dalszej analizy przyjęto tego rodzaju SAT. W celu unifikacji nomenklatury przedstawię podstawowe problemy i pojęcia związane z modelem matematycznym sieci telekomunikacyjnych (SAT_{ST}), szerzej opisane w publikacjach [2, 4, 5].

Do opisu matematycznego sytuacji wykorzystano pojęcie i własności grafu, podzielono obiekty na fizyczne elementy oraz na różnego rodzaju oddziaływania pomiędzy elementami w ramach danej zdatności funkcjonalnej. Postać modelu matematycznego SAT_{ST} oparto na trójce uporządkowanej:

$$S = \langle G, \{F_z\}, \{f_k\} \rangle \tag{3.1}$$

gdzie: $\{F_z; z = \overline{1, Z}\}$, zbiór funkcji $F_z: T \rightarrow R^+$;
 $\{f_k; k = \overline{1, K}\}$, zbiór funkcji $f_k: W \rightarrow R^+$;
 G to skończony graf⁸ obrazujący topologię sieci i określony przez:

⁷ Czyli wykorzystanych i wykorzystywanych.

⁸ Dla grafu skończonego suma liczby węzłów i zasobów $|W| + |T| < \infty$ jest wielkością skończoną.

$$G = \langle W, T, \mathbf{Z} \rangle, \quad (3.2)$$

gdzie: — $W = \{w_l; l = \overline{1, L}\}$, przeliczalny zbiór wierzchołków grafu (węzłów systemu),
 $L = |W|$ — liczba wierzchołków grafu (moc zbioru wierzchołków);
 — $T = \{t_m; m = \overline{1, M}\}$, przeliczalny zbiór gałęzi grafu (zasobów transportowych),
 $M = |T|$ — liczba gałęzi grafu (moc zbioru gałęzi), M — licznosc zbioru linii teletransmisyjnych;
 — $E = \{e_i; i = \overline{1, I}\}$, przeliczalny zbiór elementów grafu (systemu), zawierający zbiór wierzchołków i gałęzi o licznosci:

$$|E| = |W| + |T| = L + M, \quad E = \{e_i; i = \overline{1, L + M}\} \quad (3.3)$$

— $\mathbf{Z} \subset W \otimes T \otimes W^9$, trójzłonowa relacja przyległości (incydencji).

Stan eksploatacyjny każdego elementu e_i SAT_{ST} oznaczono przez x_i oraz przyjęto:

$$x(e_i) = x_i = \begin{cases} 1 & \text{gdy element } e_i \text{ jest zdalny} \\ 0 & \text{gdy element } e_i \text{ jest niezdalny.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Procesy uszkodzeń i napraw e_i są wzajemnie niezależne a rozkłady czasu poprawnej pracy o parametrze λ_i (intensywność uszkodzeń) i czasu naprawy o parametrze μ_i (intensywność napraw) są wykładnicze. Analogicznie przyjęto, że zbiór stanów eksploatacyjnych SAT_{ST} jest dwuelementowy z następującymi kryteriami na stan zdalności:

— kryterium zdalności strukturalnej (oparte na pojęciu struktury):

$$\Phi(STI) = \begin{cases} 1 & \text{gdy sieć } SAT_{ST} \text{ jest zdalna} \\ 0 & \text{gdy sieć } SAT_{ST} \text{ jest niezdalna.} \end{cases} \quad (3.5)$$

SAT_{ST} jest w stanie zdalności wtedy i tylko wtedy, gdy w dowolnej chwili czasu t wszystkie jego elementy są w stanie zdalności.

— kryterium zdalności użytkowej [3]¹⁰ wykorzystujące miary potencjałowo-potencjalnościowe:

⁹ Symbol \otimes oznacza iloczyn kartezyjański.

¹⁰ Kryterium to odnosi się do systemu, w którym w czasie realizacji zadania mogą pojawiać się chwilowe niezdalności.

$$\bigvee_{t \in \Delta T_{zad}} \left[\bigvee_{\substack{E_{p-dys}(t) \in \Delta E_{p-d}(t) \\ E_{p-wym}(t) \in \Delta E_{p-d}(t)}}} \left[\left[E_{p-dys}(t) \geq E_{p-wym}(t) \right] \Rightarrow \left[E(t) \equiv E^Z(t) \right] \right] \right] \quad (3.6)$$

lub

$$\bigwedge_{t \in \Delta T_{zad}} \left[\bigvee_{\substack{E_{p-dys}(t) \in \Delta E_{p-d}(t) \\ E_{p-wym}(t) \in \Delta E_{p-d}(t)}}} \left[\left[E_{p-dys}(t) \geq E_{p-wym}(t) \right] \Rightarrow \left[E(t) \equiv E^Z(t) \right] \right] \right] \quad (3.7)$$

Jeśli istnieje choćby jedna taka chwila t w przedziale czasu realizacji zadania, w której potencjalność dysponowana, należąca do przedziału potencjalności dopuszczalnych, jest nie mniejsza od potencjalności wymaganej, również należącej do przedziału potencjalności dopuszczalnych, to stan SAT_{ST} w tej chwili t jest stanem zdatności,

gdzie:

- t — czas, chwila bieżąca,
- T_{zad} — przedział czasu realizacji zadania od chwili przyjętej za rozpoczęcie realizacji zadania t_0 do chwili zrealizowania zadania t_z , $T_{zad} = [t_0, t_z]$,
- $E_{p-dys}(t)$ — potencjalność dysponowana w chwili t , o relacji¹¹:

$$E_{p-dys}(t) \geq E_{p-wym}(t) \quad (3.8)$$

- $E_{p-wym}(t)$ — potencjalność wymagana w chwili t ,
- E_{p-d} — dopuszczalna wartość potencjalności w chwili t ,
- $\Delta E_{p-d}(t)$ — przedział dopuszczalnych wartości potencjalności¹²,

¹¹ Jeśli w chwili t potencjalność dysponowana jest nie mniejsza od potencjalności wymaganej, to system jest zdatny.

¹² Przedział dopuszczalnych wartości potencjalności jest determinowany m. in. właściwościami obiektu, rodzajem realizowanego zadania, warunkami realizacji zadania, wymaganiami technicznymi, bezpieczeństwaowymi, ekonomicznymi, administracyjnymi. Jest to zatem przedział o relatywnej szerokości.

zdolność do pracy, bezpieczeństwem pracy, zdolnością do bezbłędnej pracy. Stosunkowo nowym podejściem jest utożsamianie stanu zdatności człowieka ze sprawnością funkcjonowania zawodowego, wyrażoną kryteriami stanu zdrowia. Uwzględniając przedstawione powyżej uwarunkowania, można zapisać zależność na potencjalność dysponowaną SAT_{ST} :

$$E_{p-\phi_{ys}}(t) = P\{X(k_i)=1\} = f(P_{ZO}(t), P_{ZK}(t, k_i), P_{ZN}(t, n, \pi, k_i)), \quad (4.1)$$

gdzie:

- $P\{X(k_i)\}$ — prawdopodobieństwo stanu funkcjonalnej zdatności SAT_{ST} ,
- $P_{ZO}(t)$ — prawdopodobieństwo stanu funkcjonalnej zdatności operatora w chwili t , do oszacowania wartości tego prawdopodobieństwa można wykorzystać prawdopodobieństwo generowania przez operatora błędnych pobudzeń sterujących:

$$P_{ZO}(t) = 1 - P_{NO}(t). \quad (4.2)$$

$P_{NO}(t)$ można wyznaczyć w symulatorach lub rzeczywistych warunkach pracy, prowadząc obserwację sposobu działania i zachowanie operatora na wymuszenia w postaci zadań do realizacji przy oddziaływaniu audiowizualnym. Na podstawie uzyskanego zbioru danych ocenia się średni czas pracy między kolejnymi błędami, ogólną liczbę błędów przypadającą na określoną liczbę zadań do realizacji w danym czasie, liczbę zadań wykonanych bezbłędnie. Wiarygodne badania niezawodności człowieka należy prowadzić w warunkach symulacyjnych z odzwierciedleniem jak największej liczby czynników rzeczywistych. Ograniczeniami w badaniach są: złożoność warunków pola walki i badanych obiektów oraz brak uznanych zasad realizacji podobnych eksperymentów z ograniczoną możliwością stosowania metod eksperckich. Jeżeli do oceny stanu zdatności operatora przyjmimy liczbę zadań do wykonania (L_Z) i liczbę zadań kończących się błędem (L_{BZ}), to:

$$P_{NO}(t) = \frac{L_{BZ}}{L_Z} \quad (4.3)$$

więc

$$P_{ZO}(t) = 1 - \frac{L_{BZ}}{L_Z} \quad (4.4)$$

- $P_{ZK}(t, k_i)$ — prawdopodobieństwo stanu zdatności e_i przy występującym w chwili t zapotrzebowaniu na zrealizowanie zadania:

$$P_{ZK}(t, e_i) \cong K_{gi} (1 - P_{bl}) \quad (4.5)$$

lub

$$P_{ZK}(t, e_i) \cong 1 - Q_{gi} (1 - P_{bl}), \quad (4.6)$$

gdzie:

- P_{bl} — prawdopodobieństwo blokady elementu e_i systemu, wynikające z wykonywania innego zadania w chwili t ,
- K_{gi} — współczynnik gotowości elementu e_i systemu [6, 8]¹³:
 - niestacjonarny $K_{gi}(t, e_i)$ jest równy prawdopodobieństwu, że w chwili t element e_i będzie znajdował się w stanie zdatności i będzie gotowy do poprawnego funkcjonowania:

$$K_{gi}(t, e_i) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}, \quad (4.7)$$

gdzie:

λ_i — intensywność uszkodzeń i -tego elementu SAT_{ST} ¹⁴ to funkcja gęstości prawdopodobieństwa uszkodzenia urządzenia (lub oprogramowania) naprawialnego w chwili t ,

μ_i — intensywność napraw i -tego elementu SAT_{ST} ¹⁵;

- stacjonarny $K_{gi}(e_i)$ jest równy prawdopodobieństwu tego, że element systemu (system) jest w stanie zdatności w warunkach stacjonarnych (dla $t \rightarrow \infty$), przy założeniu, że zostały dostarczone środki zewnętrzne:

$$K_{gi}(e_i) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (4.8)$$

- Q_{gi} — współczynnik niegotowości elementu e_i SAT_{ST} [6]:
 - niestacjonarny:

$$Q_{gi}(t, e_i) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \left[1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)t} \right] \quad (4.9)$$

- stacjonarny:

$$Q_{gi}(e_i) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (4.10)$$

¹³ Wskaźnik współczynnika gotowości jest wyrażany bezwymiarowo lub w procentach.

¹⁴ Wartość intensywności uszkodzeń wyznaczana jest na podstawie własności charakterystycznych dla badanych technicznych obiektów i obliczana jako złożona wartość wynikowa w FIT-ach [1 FIT = 1,0 E-09 lub 10⁻⁹] lub w h⁻¹.

¹⁵ Intensywność napraw jest wyrażana w h⁻¹.

- $P_{ZN}(t, n, \pi, e_i)$ — prawdopodobieństwo stanu zdatności elementu e_i SAT_{ST} przy występującym w chwili t oddziaływaniu n -tego czynnika inicjującego proces uszkodzeniowy¹⁶ z π -tego zbioru typów narażeń. Przyjęto, że każde oddziaływanie czynnika narażenia U_n charakteryzuje się:
- prawdopodobieństwem destrukcji elementu e_i SAT_{ST} (P_{di}) w wyniku oddziaływania czynnika U_k pochodzącego od n -tego narażenia z π -tego zbioru narażeń. Obszar rażenia dla U_k zawiera zbiór punktów środka strefy oddziaływania poszczególnych czynników narażenia lub algorytmu ich wyznaczania o promieniu $r > 0$ oraz centrum rażenia $o_k(x, y)$;
 - kołem rażenia — przez podzielenie na m stref rażenia o zmiennej skuteczności zależnej od wartości promienia oddziaływania narażenia w strefie ($r_1 \leq r_2 \leq \dots r_m$);
 - rozkładem matematycznym oddziaływania n -tego narażenia z π -tego zbioru narażeń.

W rozważanym modelu destrukcja w wyniku różnych narażeń jest niezależna, a zatem prawdopodobieństwo stanu zdatności elementu e_i SAT_{ST} uwzględniające oddziaływanie narażeń określone jest wzorem:

$$P_{ZN}(n, \pi, k_i) = \prod_{i=1}^n \prod_{i=1}^{\pi} (1 - P_{di}). \quad (4.11)$$

Jeżeli e_i SAT_{ST} znajdzie się jednocześnie w kilku strefach rażenia, to prawdopodobieństwo jego zniszczenia znacznie się zwiększa i wyznacza się z zależności:

$$P_{di} = \max_{p_r^{(i)}(k_i)} [p_1(k_i), p_2(k_i), p_3(k_i), \dots, p_r(k_i)]. \quad (4.12)$$

Przy uszkodzeniu e_i zagregowanego w SAT_{ST} (będącego ogniwem w łańcuchu zadaniowym/funkcjonalnym) wystąpi niezdatność funkcjonalna dla realizacji wymaganego zadania. Stąd dla elementów $\{e(e_{i-1}, e_i)\}$ otrzymujemy:

$$P_{d\{e(e_{i-1}, e_i)\}}(n, \pi, e_i) = \prod_{e(e_{i-1}, e_m) \in \{e(e_{i-1}, e_m)\}} P_{d\{e(e_{i-1}, e_m)\}}(n, \pi, e_i), \quad (4.13)$$

$$P_{ZN\{e(e_{i-1}, e_m)\}}(n, \pi, e_i) = 1 - P_{d\{e(e_{i-1}, e_m)\}}(n, \pi, e_i). \quad (4.14)$$

¹⁶ Narażenie jest spowodowane czynnikami zewnętrznymi o charakterze katastroficznym, oddziaływanymi destrukcyjnie na k_i , do których zaliczamy żywiołowe (jako następstwo procesów zachodzących w przyrodzie) i wytworzone przez człowieka (destrukcyjne funkcjonowanie innych systemów).

Wartość prawdopodobieństwa P_{ZN} proponuję przyjąć jako funkcję (w wielu przypadkach — iloczyn) prawdopodobieństw stanu zdatności e_i (np. P_{zln} dla urządzeń o liczbie L i P_{zmn} dla oprogramowania o liczbie M) należących do SAT_{ST} :

$$\begin{aligned} P_{ZN}(n, \pi, e_i) &= f(P_{zln}(n, \pi, e_{li}), P_{zmn}(n, \pi, e_m)) \cong \\ &\cong \prod_l \prod_m P_{zln}(n, \pi, e_l) P_{zmn}(n, \pi, e_m). \end{aligned} \quad (4.15)$$

W celu wyznaczenia szczegółowych zależności matematycznych określających wartość prawdopodobieństwa stanu zdatności $e_i SAT_{ST}$, proponuje się przyjąć trzy założenia:

- wprowadzić kryterium w postaci wartości współczynnika (w_p), określającego stosunek wymiarów zewnętrznych e_i do wielkości obszaru destrukcji będącej wynikiem oddziaływania narażenia, podziału elementów e_i na zbiory obiektów punktowych ($w_p \ll 1$), liniowych ($w_p \leq 1$) i powierzchniowych ($w_p \geq 1$)¹⁷;
- zastosować rozkład wykładniczy przy wyznaczaniu wartości prawdopodobieństw destrukcji i zdatności e_i ¹⁸, jest to uzasadnione dla urządzeń funkcjonujących w trudnych warunkach eksploatacji, w których uszkodzalność obiektu kształtują głównie uszkodzenia nagłe. Dla nielicznych e_i o wysokiej klasie jakości wykonania, funkcjonujących w warunkach środowiskowych zbliżonych do laboratoryjnych, główną rolę odgrywają uszkodzenia stopniowe wskutek starzenia i zużycia (można zastosować rozkłady: gamma, normalny, Weibulla i inne w zależności wpływu na odporność przebiegu zmian starzenia i zużycia);
- wartości prawdopodobieństwa destrukcji punktowego $e_i SAT_{ST}$ określono jako:
 - warunkowe prawdopodobieństwo destrukcji P_{dw} :

$$P_{dw}(n, \pi, e_i) = 1 - \exp \left[-\delta \left(\frac{r_{n\pi}}{P_{uk}} \right)^2 \right], \quad (4.16)$$

gdzie:

- δ — parametr rozkładu normalnego,
- $r_{n\pi}$ — promień oddziaływania n -tego narażenia z π -tego zbioru typów narażeń na $e_i SAT_{ST}$,

¹⁷ Po uwzględnieniu licznosci i waznosci zbioru $e_i SAT_{ST}$, do dalszych rozważań zostały wybrane tylko elementy punktowe. Dla pozostałych typów komponentów przedstawione rozwiązanie nie posiada wysokiego stopnia wiarygodności. Należy zastosować modyfikację zdefiniowanych zależności matematycznych.

¹⁸ W teorii niezawodności przyjmuje się, że odporność $e_i SAT_{ST}$ jest stała i nie zależy od czasu w całym przedziale $(0, t)$.

- P_{uk} — prawdopodobieństwo uszkodzenia e_i SAT_{ST} n -tym narażeniem z π -tego zbioru typów narażeń,
- bezwarunkowe prawdopodobieństwo destrukcji P_{db} :

$$P_{db}(n, \pi, e_i) = P_{wn} P_{dk_i} \left\{ 1 - \exp \left[-\delta \left(\frac{r_{n\pi}}{P_{uk}} \right)^2 \right] \right\}, \quad (4.17)$$

gdzie:

- P_{wn} — prawdopodobieństwo wystąpienia czynnika destrukcyjnego U_k powodującego powstanie n -tego narażenia z π -tego zbioru typów narażeń,
- P_{dk_i} — prawdopodobieństwo destrukcji n -tym narażeniem z π -tego zbioru typów narażeń e_i SAT_{ST} .

Na podstawie przyjętych powyżej założeń proponuje się, podstawiając (4.16) lub (4.17) do zależności (4.14), zdefiniować dwa wzory na wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa stanu zdatności P_{in} elementu punktowego SAT_{ST} o następującej postaci:

- warunkowe:

$$P_{ZNw}(n, \pi, k_i) = \exp \left[-\delta \left(\frac{r_{n\pi}}{P_{uk}} \right)^2 \right], \quad (4.18)$$

- bezwarunkowe:

$$P_{ZNb}(n, \pi, k_i) = 1 - P_{wn} P_{dk_i} \left\{ 1 - \exp \left[-\delta \left(\frac{r_{n\pi}}{P_{uk}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (4.19)$$

Potencjał dysponowany $F_{p-dys}(\Delta T)$ SAT_{ST} jest miarą możliwości użytkowych, czyli jest wielkością charakteryzującą zdolność systemu do zrealizowania określonej liczby i rodzaju zadań w określonym przedziale czasu. W interpretacji matematycznej jest to całka z potencjalności dysponowanej w przedziale czasu ΔT użytkowania systemu:

$$F_{p-dys}(\Delta T) = f_p(E_{p-dys}(t); t \in \Delta T) \cong \int_{\Delta T} E_{p-dys}(t) dt. \quad (4.20)$$

Uogólniony wskaźnik zachowania stanu zdadności SAT_{ST} (4.1), zawierający funkcjonalną zdadność operatora (4.4), niestacjonarność (4.7) i bezwarunkowość narażeń (4.19), przyjmuje postać:

$$E_{p-dys}(t) = \left(1 - \frac{L_{BZ}}{L_Z}\right) \cdot \left\{ \left(\frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)t} \right) (1 - P_{bl}) \right\} \cdot \left\{ 1 - P_{wn} P_{dk} \left[1 - \exp \left[-\delta \left(\frac{r_{n\pi}}{P_{uk}} \right)^2 \right] \right] \right\}. \quad (4.21)$$

5. Wnioski

W zależności od zmiennych kryteriów i uwarunkowań otoczenia systemu antropotechnicznego można wyznaczyć kilka zasadniczych zależności matematycznych, możliwych do wykorzystania w procesie identyfikacji stanu zdadności systemu antropotechnicznego przez oszacowanie wartości potencjalności dysponowanej. Oszacowanie to umożliwia przeprowadzenie procesu prognozowania niezawodności, ukierunkowanego na zapewnienie i utrzymanie wymaganego poziomu zdadności funkcjonalnej systemu SAT_{ST} .

Różnorodność sposobów podejścia do definiowania kryteriów analizy niezawodności funkcjonowania SAT wskazuje, że w zakresie metod jej oceny występuje wiele niejednorodnych poglądów. Istnieje również potrzeba ujednoliconej i metodycznej oceny czynnika ludzkiego w roli operatora, ponieważ stał się on zasadniczym i zawodnym komponentem systemów antropotechnicznych. Jest to uwarunkowane tym, że współczesne SAT posiadają wysoce zaawansowane technologicznie urządzenia, często zawierające układy diagnostyki i eliminowania stanów własnej niezdadności.

Pomimo konieczności uwzględnienia oddziaływania wielu czynników, w SAT można zaproponować policzalne wskaźniki charakteryzujące stan zdadności systemu, na podstawie których można wypowiedzieć się w zakresie realizowalności zadań lub funkcji. Rozkład zmian w czasie wartości potencjalności umożliwia wykreślenie trajektorii potencjalnościowych, ułatwiających podejmowanie właściwych decyzji o eksploatacyjnym stanie systemu. Uwzględniając specyfikę obszaru badań, zaprezentowano przykładowe miary, na podstawie których można wypowiedzieć się o właściwościach złożonych obiektów technicznych.

Przedstawione zagadnienie posiada wieloaspektowość i wskazuje na konieczność wykonywania szczegółowej analizy możliwości realizacji właściwości zdefiniowanych w założeniach technicznych ZOT . Z punktu widzenia niezawodności obiektów systemowych, za celowe uważa się, aby proces ten był wykonany zarówno na etapie projektowania, jak i modernizacji złożonych obiektów technicznych posiadających cechy obiektów antropotechnicznych.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 8.09.2006 r.

LITERATURA

- [1] M. AMANOWICZ, *Modelowanie profesjonalnych systemów radiokomunikacji ruchomej lądowej*, WAT wewn. 1878/89, Warszawa, 1989.
- [2] T. BATYCKI, A. KASPRZAK, *Wybrane algorytmy optymalizacji przepływów w sieciach teleinformatycznych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1983.
- [3] T. M. DĄBROWSKI, *Diagnozowanie systemów antropotechnicznych w ujęciu potencjałowo-efektywnym*, rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa, 2001.
- [4] L. R. FORD, D. R. FULKERSON, *Przepływy w sieciach*, PWN, Warszawa, 1969.
- [5] A. KASPRZAK, *Algorytmy równoczesnej optymalizacji przepływów, przepustowości kanałów i struktur topologicznych sieci teleinformatycznych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1989.
- [6] D. LASKOWSKI, *Synteza wskaźników przeżywalności sieci teleinformatycznych*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2004.
- [7] J. MIGDAŁSKI [red.], *Inżynieria niezawodności. Poradnik*, ATR, Bydgoszcz, 1992.
- [8] Military handbook 217 f/472: *Reliability prediction of electronic equipment and maintainability prediction*, DOD, Washington, DC 20301, 1991.
- [9] Polska Norma PN-72/E01050 z późniejszymi poprawkami w PN-93/N-50191.
- [10] M. TODA, *Logic of Systems: General Systems*, 1956.

D. LASKOWSKI

Forecast of reliability of complex technical objects

Abstract. Complex technical objects contain many components, characterised by high advanced technical level, that guarantee maintenance of the declared reliability level. In majority of cases, investigations of essential features of the objects are aimed at determination of their functional ability and are carried out separately from operators' investigations. It is considerable simplification and idealisation of conditions because the faults of "human factor" faults can cause over 50% damages, defects, or failures. Thus, influence of people activity on proper operation of complex objects should be taken into consideration in technical guidelines, in reliability aspect.

Keywords: reliability, anthrop technical system, potentiality, efficiency, hazards

Universal Decimal Classification: 62.004-192

