

# ANALIZA NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU MONTAŻOWEGO

## ASSEMBLING SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS

*W artykule przedstawiono sposób określenia niezawodności odcinka montażowego jako zbioru urządzeń o różnych rozkładach prawdopodobieństwa uszkodzeń. Dokonano analizy niezawodności pojedynczego urządzenia roboczego na przykładzie głowicy wkręcającej. Wykorzystano w tym celu metodę grafu uszkodzeń, która pozwala powiązać niezawodność urządzenia z niezawodnością odcinka montażowego*

*Słowa kluczowe: system montażowy, prawdopodobieństwo uszkodzeń, graf uszkodzeń, dekompozycja.*

*In article one introduced manner of qualification of reliability of assembly - section as of gathering of devices about different schedules of probability of damages. One executed analyses of reliability single devices working on example of cap screwing in. One used in this of aim method graphs of damages, which permits to tie reliability of device with reliability of assembly - section*

*Keywords: assembly system, probability of failure, failure graphs, decomposition.*

### 1. Wstęp

Obecnie projektowane i budowane linie montażowe są liniami asynchronicznymi, w skład których wchodzi odcinki montażowe o różnej strukturze organizacyjno-technologicznej i różnym stopniu automatyzacji. Parametry funkcjonowania określone dla każdego z odcinków i odpowiednio zestawione funkcyjnie z pozostałymi, umożliwiają ocenę jakościową i ilościową linii montażowej jako całości. Ilościowa ocena niezawodności odcinka montażowego, rozpatrywanego obecnie jako system, dokonywana jest poprzez obliczenie prawdopodobieństwa niezawodnej pracy z wykorzystaniem prawdopodobieństw uszkodzeń i napraw elementów składowych systemu [1].

W artykule przedstawiono:

- Przybliżoną metodę oceny niezawodności odcinka montażowego.
- Metodę określenia niezawodności urządzenia roboczego jako elementu decydującego o niezawodności odcinka montażowego.

### 2. Określenie ogólnych parametrów funkcjonowania systemu montażowego

Biorąc pod uwagę dane dotyczące rozkładu intensywności uszkodzeń i prawdopodobieństwa pracy bez awarii systemu montażowego w różnych przedziałach czasu eksploatacji można sformułować wnioski:

### 1. Introduction

Actual assembly line are designed and built as asynchronous lines consisting of assembling sections differing in technology - organisation structure and in automation level. Qualitative and quantitative evaluation of assembly line as a whole is possible on grounds of functional parameters determined for all individual sections and functionally combined together with the others. Then quantitative reliability evaluation is performed through calculation of reliable operation probability with use reliable failure rate and repair for individual assembling section being considered as a system [1].

The following issues are presented in the present article:

- approximated method of reliability evaluation for assembling section.
- method of reliability evaluation for operating device being the essential element affecting the assembling section reliability.

### 2. Determination of general parameters of assembling system functioning

On grounds of data regarding failure rate distribution and trouble free operation of assembling system for various operation intervals time the following can be concluded:

1. W okresie rozruchu tj. dochodzenia do znamionowych parametrów funkcjonowania, zachodzi największa intensywność uszkodzeń by w końcowej fazie tego okresu przyjąć, w przybliżeniu wartość stałą;
2. Podczas eksploatacji zaczynają pojawiać się uszkodzenia o intensywności narastającej w czasie spowodowane zużywaniem się elementów roboczych oraz oprzyrządowania.

Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy systemu montażowego w okresie rozruchu określamy z rozkładu [2]:

$$P_{rozr}(t) = \exp[-t(\sum_1^P \lambda_p + \sum_1^R \lambda_r + \sum_1^U \lambda_u)] \quad (1)$$

Gdzie:

- $\lambda_p$  - intensywność uszkodzeń urządzeń roboczych i pomocniczych oraz elementów oprzyrządowania  $p = (1..P)$ ,
- $\lambda_r$  - intensywność uszkodzeń powstałych podczas wykonywania operacji technologicznej a związanych z oddziaływaniem narzędzia roboczego na montowany podzespół,  $r = (1..R)$ ,
- $\lambda_u$  - intensywność uszkodzeń spowodowanych błędami mocowania i pozycjonowania podczas montażu,  $u = (1..U)$ ,
- $t$  - czas pracy rozpatrywanego odcinka systemu montażowego.

Równanie (1) możemy zapisać także w postaci:

$$P_{rozr}(t) = \prod_1^A [1 - Q_a(t)] \quad (2)$$

Gdzie:

- $Q_a(t)$  - prawdopodobieństwo pojawienia się uszkodzeń przy czym  $A=P+R+U$ ,  $a = (1..A)$

Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy systemu montażowego podczas eksploatacji  $P_{eksp}$  określony jest dla stopniowo pojawiających się uszkodzeń:

$$P_{eksp}(t) = \prod_1^B [1 - Q_{b,\gamma}(t)] \quad (3)$$

Gdzie:

- $Q_{b,\gamma}$  - prawdopodobieństwo uszkodzenia urządzenia  $b$  wchodzącego w skład systemu montażowego i spowodowana tym zmiana wartości  $g$  parametru jego funkcjonowania,  $b=(1..B)$ .

### 3. Metoda analizy niezawodności pojedynczego urządzenia

Poniżej przedstawiono metodę określenia niezawodności elementów składowych urządzenia roboczego z wykorzystaniem grafów uszkodzeń. Teoria ta opisana w [3] umożliwia ocenę niezawodności urządzenia w powiązaniu z jego oddziaływaniem na prze-

1. During starting period i.e. required to achieve rated operation parameters, the failure rate is the highest and becomes approximately constant in the final phase of that period;
2. During operation, the value of failure rate increases due to wear of working elements and tooling.

The probability of failure free operation of assembly system during starting period can be determined by means of the following equation [2]:

$$P_{rozr}(t) = \exp[-t(\sum_1^P \lambda_p + \sum_1^R \lambda_r + \sum_1^U \lambda_u)] \quad (1)$$

Where:

- $\lambda_p$  - rate of failures for: tooling elements, work and auxiliary device,
- $\lambda_r$  - rate of failures those occurred during process operation and joint with influence work tool to assembled componet,
- $\lambda_u$  - rate of failures those caused during errors by positional and fasten to assembled componet,
- $t$  - working time for the section of assembling system under consideration.

Equation (1) can write as:

$$P_{rozr}(t) = \prod_1^A [1 - Q_a(t)] \quad (2)$$

Where:

- $Q_a(t)$  - probability of arising of failures where  $A=P+R+U$ ,  $a = (1..A)$

The probability of failure free operation of assembly system during operation  $P_{eksp}$  is determined for failures arising gradually:

$$P_{eksp}(t) = \prod_1^B [1 - Q_{b,\gamma}(t)] \quad (3)$$

Where:

- $Q_{b,g}$  - probability of failure device  $b$ , when getting to whole assembly system and change of value of functioning parameter ( $g$ ) resulting  $b=(1..B)$ .

### 3. Reliability method analysis of individual device

A method of reliability evaluation for operating device components by means of failures graphs has been presented below. The evaluation of device reliability associated with its influence on the course of process operation can be performed and any errors in

bieg operacji technologicznej oraz wskazuje błędy przygotowania elementu bazowego do przeprowadzenia na nim operacji technologicznej. Budowę grafu uszkodzeń rozpoczynamy od określenia głównego (podstawowego) uszkodzenia  $H$  a następnie przeprowadzamy analizę przyczyn jego powstania dążąc do racjonalnego stopnia dekompozycji. Wykorzystując graf uszkodzeń otrzymujemy:

- Usystematyzowane przedstawienie wszystkich możliwych przyczyn głównego zdarzenia i ich wzajemne powiązania,
- Analizę przyczyn niezadziałania,
- Parametry niezawodności systemu otrzymane w rezultacie ilościowej analizy grafu uszkodzeń.

Główne uszkodzenie  $H$  może być wynikiem awarii o charakterze:

- pierwotnym (początkowym),
- wtórnym,
- eksploatacyjnym.

W dowolnym przypadku połączenie danego typu awarii z wydarzeniami, które ją spowodowały odbywa się za pomocą operatorów:  $\wedge$  (i) oraz  $\vee$  (lub).

W artykule przedstawiono budowę grafu niezadziałania na przykładzie głowicy wkręcającej [4] przystosowanej do pracy na automatycznej linii montażowej. Wybór tego urządzenia spowodowany jest przeprowadzeniem jego wielostronnej analizy dotyczącej dekompozycji [5] oraz modularyzacji [6]. Grafy (rys.1) zbudowano dla trzech głównych uszkodzeń:

- brak ruchu roboczego końcówki wkręcającej -  $H_1$ ,
- brak technologicznego oddziaływania na element bazowy -  $H_2$ ,
- brak operacji technologicznej -  $H_3$ .

Rozpatrzmy urządzenie robocze oraz jego oddziaływanie w procesie technologicznym w kategoriach systemu, dla którego można określić uszkodzenie główne  $H$ . Możemy więc zapisać:

$$H = H(Y_1, \dots, Y_n) = H(Y) = \begin{cases} 1 & \text{gdy zachodzi główne zdarzenie} \\ & \text{principal event occurring} \\ 0 & \text{gdy nie występuje} \\ & \text{principal event not occurring} \end{cases} \quad (4)$$

$Y_i$  - bazowe zdarzenie grafu uszkodzeń,  $i=(1..n)$ .

Przyjmując:

$$Y_i = 1 - X_i \quad (5)$$

$$H(Y) = 1 - S(X) \quad (6)$$

$$S(X) = S(X_1, \dots, X_n) \quad (7)$$

Gdzie:

$S(X)$  - ogół stanów elementów podsystemu.

$$X_i = 1 - Y_i$$

preparation of basic element being the subject of process operation are indicated by means of a theory described in [3]. Construction of failures graph is commenced by determination of a principal (basic) failure  $H$  and then analysis of reasons thereof is carried out in order to achieve reasonable decomposition level. By means of failures graph the following results are obtained:

- Systematic presentation of all possible reasons of the principal event and their interrelations,
- Analysis of reasons of failure of operation,
- System reliability parameters obtained from quantitative evaluation of failure graph.

The principal (basic) failure  $H$  can be resulted from;

- Primary (initial) failure,
- Secondary failure,
- Operating failure.

In any case, connection of specific type of failure with the events being its reasons, is performed by means of operators:  $\wedge$  (and) as well as  $\vee$  (or).

An example of failure – of – operation graph construction for screwing head [4] adapted for integration with automatic assembly line has been presented in the present article. Such device has been selected after its thorough and multidirectional analysis in view of decomposition [5] and modularization [6]. Refer to graphs (Figure 1) for three (3) principal failures:

- Failure of operating movement of screwing end -  $H_1$ ,
- Failure of process interaction on basic element -  $H_2$ ,
- Failure of process operation -  $H_3$ .

Considering the operation device and its interaction in course of process in view of system for which the principal failure  $H$  can be determined, the following equations can be expressed:

$Y_i$  - basic event in failure graph;  $i (1..n)$

Assuming

$$Y_i = 1 - X_i \quad (5)$$

$$H(Y) = 1 - S(X) \quad (6)$$

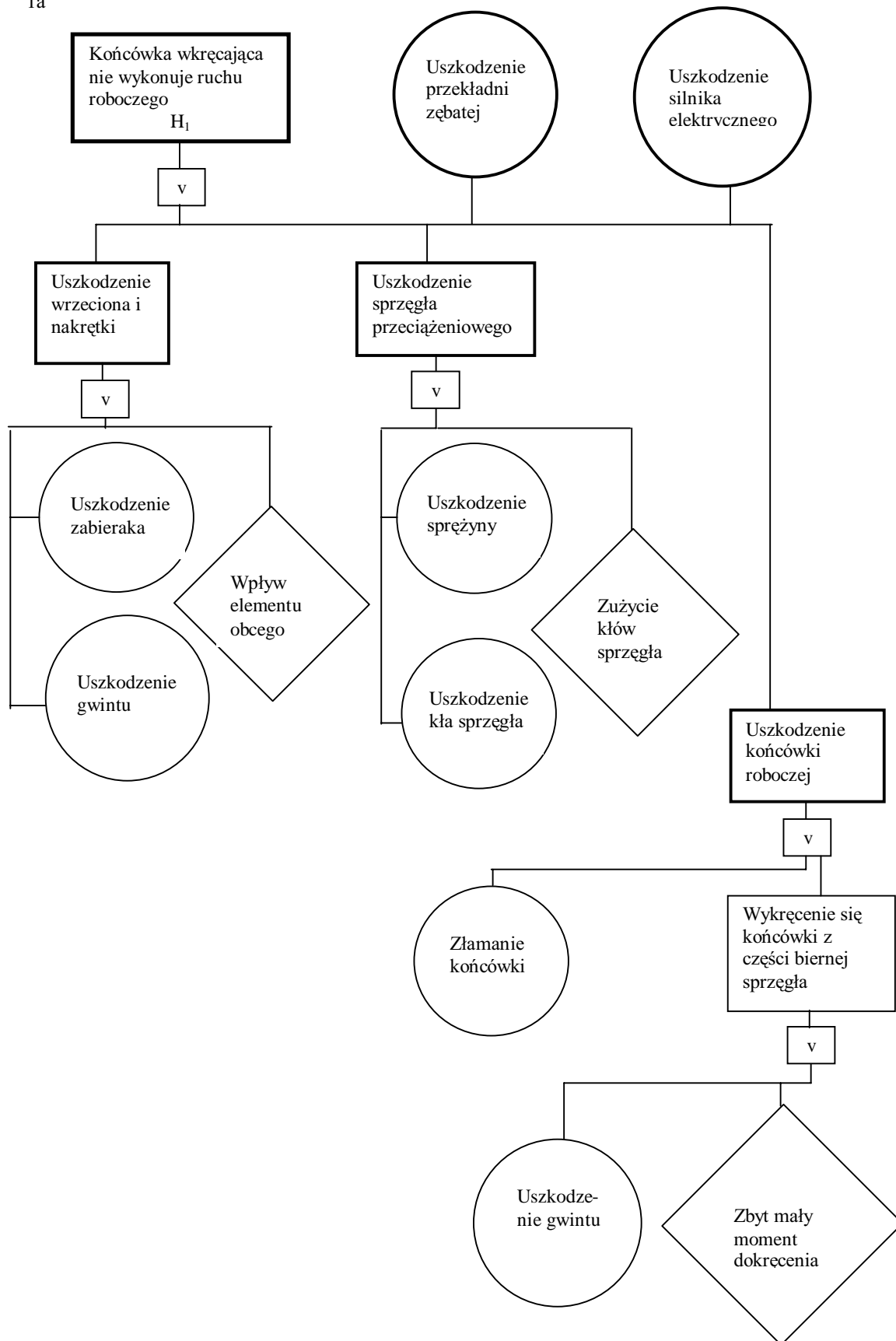
$$S(X) = S(X_1, \dots, X_n) \quad (7)$$

Where:

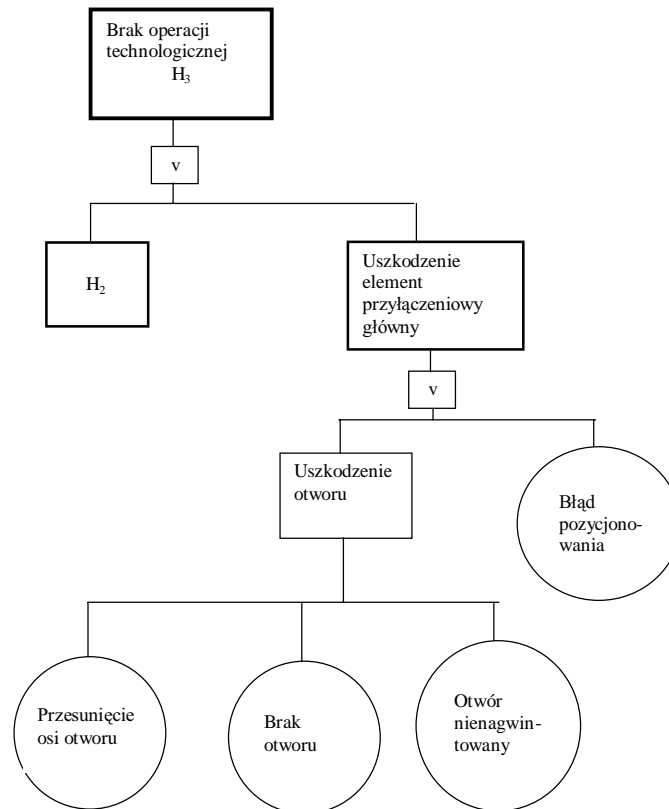
$S(X)$  – total number of subsystem elements conditions

$$X_i = 1 - Y_i$$

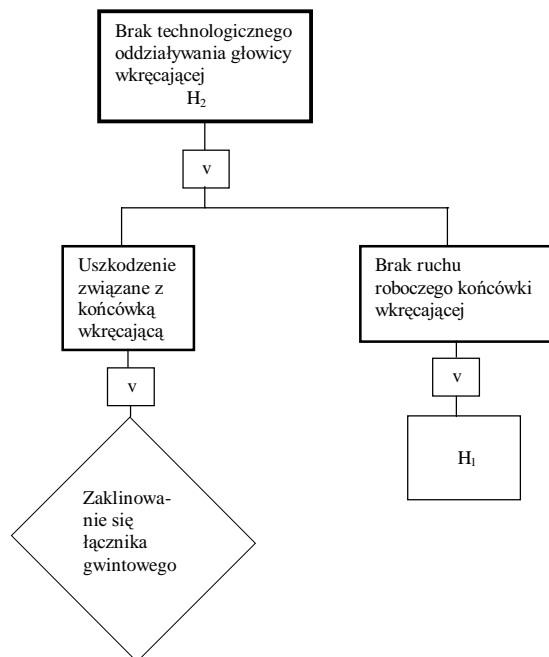
1a



1b



1c



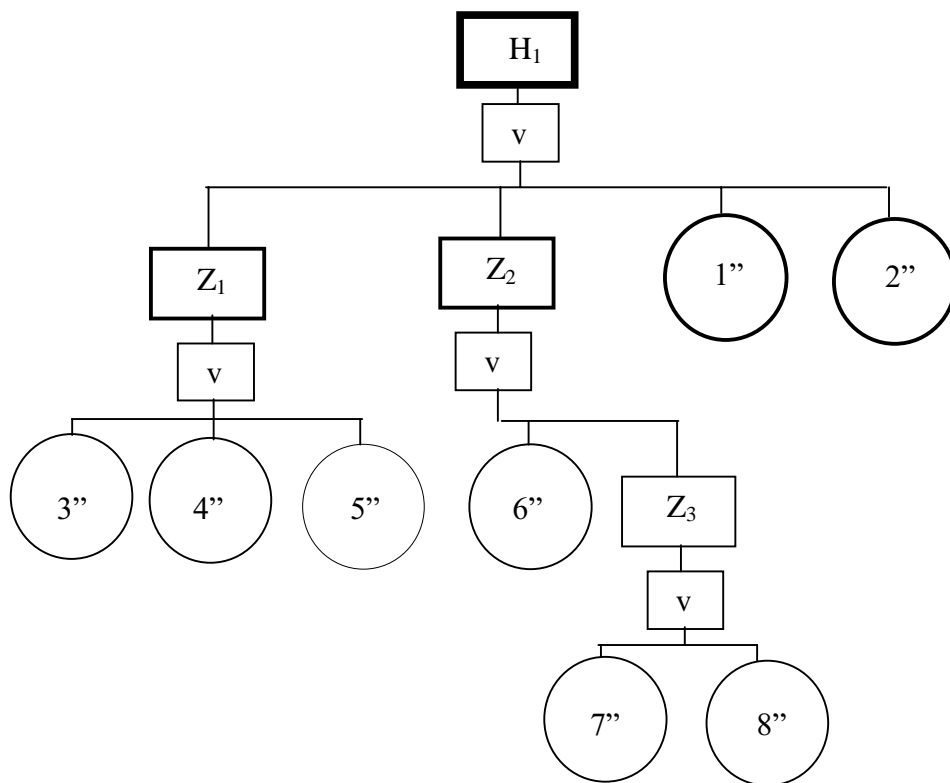
Rys.1. Budowa grafu uszkodzeń głowicy wkręcającej z wykorzystaniem podziału na uszkodzenia główne

Oznaczenia:

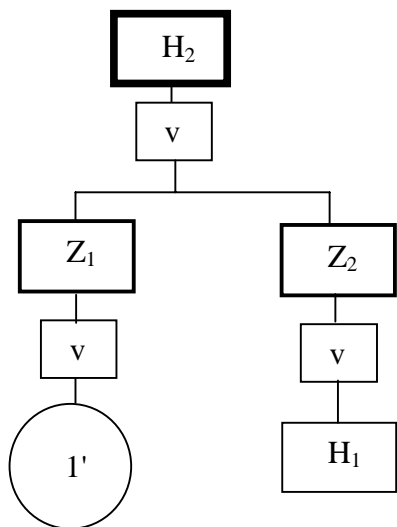
- uszkodzenie główne lub uszkodzenie składowe, które ulega dalszemu podziałowi,
- nie badane dalej uszkodzenie wtórne lub eksploatacyjne,
- pierwotne (początkowe) uszkodzenie.

Fig.1. Structure of screwing head failures graph by dividing into principal failures.

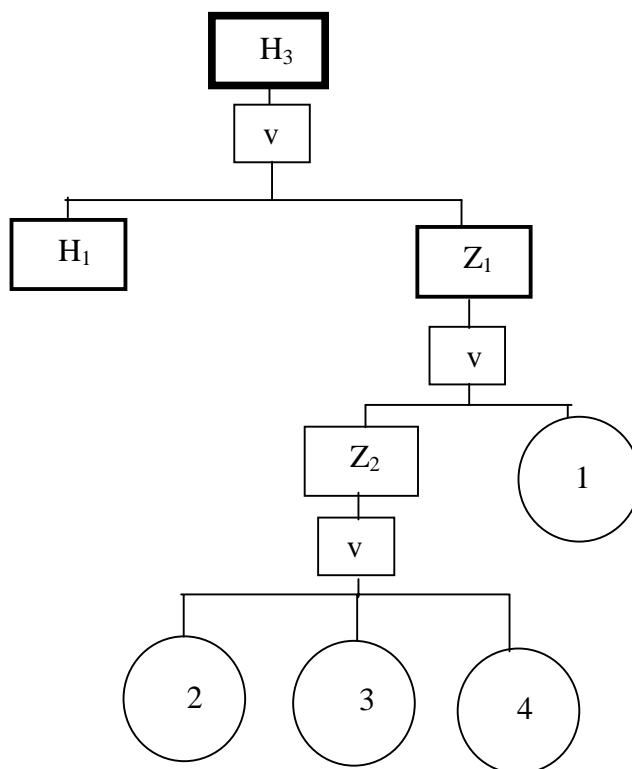
2a



2b



2c



Rys. 2. Sformalizowany zapis grafu uszkodzeń głowicy wkręcającej

Fig. 2. Formalised notation of screwing head failures graph

Stąd funkcja niezawodności tego systemu przyjmuje postać:

$$S(X) = 1 - H(Y) \quad (8)$$

W celu określenia wartości  $H(Y)$  dokonujemy formalizacji zapisu grafu uszkodzeń, przyjmując, że uszkodzenia dające się rozłożyć przyjmują oznaczenie  $Z_p$ , natomiast uszkodzenia pierwotne i eksploatacyjne otrzymują kolejne numery  $(1...n)$ . W celu otrzymania  $H(Y)$  wykorzystywana jest metoda minimalnych dróg i minimalnych cięć w odniesieniu do grafu uszkodzeń. Jeżeli oznaczymy minimalne cięcia przez  $\beta_m$  i dla każdego  $m \in (1, M)$  to:

$$H(Y) = \bigvee_{1 \leq m \leq M} \bigwedge Y_i = \max_{1 \leq m \leq M} \times \min_{Y_i \in \beta_m} Y_i \quad (9)$$

Jeżeli oznaczymy minimalne drogi cięcia przez  $a_l$  i dla każdego  $l \in (1, L)$  to:

$$H(Y) = \bigvee_{1 \leq l \leq L} \bigwedge Y_i = \min_{1 \leq l \leq L} \times \max_{Y_i \in a_l} Y_i \quad (10)$$

Dokonując cięcia gałęzi grafu (rys. 2) otrzymujemy składowe opisujące funkcję uszkodzenia  $H(Y)$ .

Weźmy pod uwagę uszkodzenie  $H_3$  (rys. 2c), gdzie bazowe uszkodzenia oznaczono cyframi 1, 2, 3, 4 - otrzymujemy tu następujące minimalne cięcia:

$\{H_3, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}$ , wtedy:

$$H(Y) = H_3 \vee Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4 \quad (11)$$

Analogicznie możemy zapisać równania dla uszkodzeń  $H_1$ :

$$H(Y) = Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4 \vee Y_5 \vee Y_6 \vee Y_7 \vee Y_8 \quad (12)$$

Oraz  $H_2$ :

$$H(Y) = Y_1 \vee H_1 \quad (13)$$

Otrzymana funkcja  $H(Y)$  umożliwia utworzenie strukturalnej funkcji  $S(X)$ . Przykładowo dla schematu - rys. 2c otrzymujemy:

$$H(Y) = (1 - Y_1) (1 - Y_2) (1 - Y_3) (1 - Y_4) (1 - Y_5) \quad (14)$$

Gdzie:  $Y_5$  - zmienna bazowa odpowiadająca modułowi  $H_2$

$$S(X) = 1 - (H(Y)) = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 \quad (15)$$

Funkcja  $S(X)$  umożliwia określenie współczynnika niezawodności badanego urządzenia. Po pierwszym uszkodzeniu  $i$  - tego elementu następuje czas naprawy  $t_{nap,ii}$  a następnie mamy do czynienia z czasem  $t_{got,ii}$  podczas którego urządzenie jest gotowe do pracy [1]. Stan elementu  $X_i(t)$  zmienia swoją wartość od 0 (uszkodzenie) do 1 (gotowość do pracy, sprawność), tak więc czas użytkowania urządzenia jest sumą czasów naprawy i gotowości do pracy. Jeżeli założyć, że wartości  $t_{got,ii}$  ( $i = 1...n$ ) posiadają jednakowe roz-

Reliability function for that system in the following form:

$$S(X) = 1 - H(Y) \quad (8)$$

In order to determine the value of  $H(Y)$ , formalisation of failure graph notation has been used assuming symbol  $Z_i$  for decomposable failures and assigning successive numbers  $(1...n)$  for primary and operation failures. The method using minimal travels and cuts relating to failures graph has been used to determine  $H(Y)$ . Using  $\beta_m$  for minimal cuts and for each  $m \in (1, M)$  :

$$H(Y) = \bigvee_{1 \leq m \leq M} \bigwedge Y_i = \max_{1 \leq m \leq M} \times \min_{Y_i \in \beta_m} Y_i \quad (9)$$

Using  $a_l$  for minimal travels and for each  $l \in (1, L)$  :

$$H(Y) = \bigvee_{1 \leq l \leq L} \bigwedge Y_i = \min_{1 \leq l \leq L} \times \max_{Y_i \in a_l} Y_i \quad (10)$$

In result of cutting the branches of graph (Figure 2), components describing the failure function  $H(Y)$  are obtained.

Considering the failure  $H_3$  (Figure 2c) with the basic failures indicated by means of digits 1, 2, 3, 4 - the following minimal cuts are obtained:

$\{H_3, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}$ , then:

$$H(Y) = H_3 \vee Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4 \quad (11)$$

Similar equations can be expressed for failures  $H_1$ :

$$H(Y) = Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4 \vee Y_5 \vee Y_6 \vee Y_7 \vee Y_8 \quad (12)$$

And  $H_2$

$$H(Y) = Y_1 \vee H_1 \quad (13)$$

Having determined function  $H(Y)$ , one can express function  $S(X)$ . For example in case of diagram illustrated in Figure 2c the following equation can be expressed:

$$H(Y) = (1 - Y_1) (1 - Y_2) (1 - Y_3) (1 - Y_4) (1 - Y_5) \quad (14)$$

Where:  $Y_5$  - basic variable corresponding to module  $H_2$

$$S(X) = 1 - (H(Y)) = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 \quad (15)$$

Having determined the structural function  $S(X)$ , one can determine reliability factor for the device under test. After the first failure of element (i) - reconstruction period takes place  $t_{odb1}$  and then the device is ready to operation during period  $t_{got,ii}$  [1]. The element status value  $X_i(t)$  is changed from 0 (failure) to 1 (operational readiness, efficiency). Therefore the time use device is a sum the time of operational readiness and the time of reconstruction period. Assuming identical distributions  $P(t)$  for  $t_{got,ii}$  ( $i = 1...n$ ) and identical

kłady  $P(t)$ , zaś  $t_{nap,ii}$  - jednakowe rozkłady  $G(t)$  i są niezależne, to prawdopodobieństwo gotowości do pracy  $i$ -tego elementu w czasie  $t$  określamy:

$$K_i(t) = P(X_i(t)=1) \quad (16)$$

Jeżeli  $t \rightarrow \infty$  to:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K_i(t) = \frac{t_{got}}{t_{got} + t_{nap}} = K_s(t) \quad (17)$$

Niestacjonarny współczynnik gotowości  $K_s(t)$  systemu oblicza się za pomocą strukturalnej funkcji  $S(X)$ :

$$K_s(t) = S[K_1(t)...K_n(t)] \quad (18)$$

Wykorzystując równania (15) i (18) otrzymujemy:

$$K_s(t) = K_1(t)K_2(t)K_3(t)K_4(t)K_5(t) \quad (19)$$

#### 4. Podsumowanie

Opisana metoda pozwala zbudować model niezawodności systemów technicznych charakteryzujących się dowolną strukturą. Oparta jest na analizie wpływu uszkodzenia (niezadziałania) elementów wybranego podsystemu, określa następstwa tych uszkodzeń na działanie całego systemu i określa warunki wystąpienia uszkodzeń każdego rodzaju.

#### Literatura

- [1] Nieoczym A.: *Zastosowanie dekompozycji systemu montażowego w określeniu jego parametrów funkcjonalnych* - Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Komitet Budowy Maszyn PAN, Poznań, vol.21, nr2,
- [2] Grigoriewa N., Szabajkiewicz W.: *Prognorizowanie niezawodności sborocznowo oborudowanija* (ros) - Materiały Konferencyjne XVII Sympozjonu PKM, Nałęczów 1995,
- [3] Rajnszkie K., Uszakow N.: *Ocena niezawodności sistem z ispolzowanijem grafow* (ros) - Moskwa 1988,
- [4] Nieoczym A., Buczek J.: *Analiza pracy głowicy do połączeń gwintowych*, Referaty Naukowe XVII Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Nałęczów 1995,
- [5] Nieoczym A.: *Dekompozycja wyrobu a właściwości wzajemnego oddziaływania części w procesie projektowania modułowych konstrukcji* - Folia Societatis Scientiarum Lublinensis. Technika, vol. 8, 1999,
- [6] Nieoczym A.: *Modułowa zasada konstruowania głowic wkręcających* – Technologia i Automatyzacja Montażu, nr3/1999.

distributions  $G(t)$  for  $t_{nap,ii}$  for independent events, operating readiness probability for conditions of element (i) at time (t) can determined as follows:

$$K_i(t) = P(X_i(t) = 1) \quad (16)$$

When  $t \rightarrow \infty$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K_i(t) = \frac{t_{got}}{t_{got} + t_{nap}} = K_s(t) \quad (17)$$

Non-stationary factor of system readiness  $K_s(t)$  is calculated by means of structural function  $S(X)$ :

$$K_s(t) = S[K_1(t)...K_n(t)] \quad (18)$$

By means of equations (15) and (18) the following can be obtained:

$$K_s(t) = K_1(t)K_2(t)K_3(t)K_4(t)K_5(t) \quad (19)$$

#### 4. Final conclusions

A model of reliability can be created for technical systems being characterised by optional structure. This method basing upon analysis of effect of failure (failure of operating) of a subsystem select determines the consequences of such failures for operation of whole system and determines conditions resulting in each type of failures.

---

**Dr inż. Aleksander Nieoczym**

*Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn*

*Politechnika Lubelska*

*ul. Nadbystrzycka 36,*

*20-618 Lublin*

*nieoczym@archimedes.pol.lublin.pl*

---