CZESŁAW KULIK

ALGORYTMY ANALIZY NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW

Problematyka niezawodności obejmuje szeroką klasę zagadnień związanych ze strukturą fizyczną elementów systemów, ich własnościami, warunkami otoczenia, rodzajami i przyczynami odmów pracy, oceny niezawodności zbioru elementów, metodami podwyższania niezawodności, metodami poszukiwania optymalnych systemów itp.

Niezawodność urządzenia określa się drogą oszacowania prawdopodobieństwa tego, że spełni ono postawione zadanie, przy czym rozróżnia się pojęcie niezawodności początkowej, określającej niezawodność badanego elementu w chwili rozpoczęcia pracy oraz funkcji niezawodności określającej wpływ czasu pracy badanego elementu na jego niezawodność. W praktyce zazwyczaj nie znana jest funkcja niezawodności i wnioskuje się o niej na podstawie wyników badania próbki losowej, pobranej z interesującego nas zbioru elementów.

Celem niniejszej pracy jest sformułowanie problemu w sposób umożliwiający jego rozwiązanie za pomocą modelu komputerowego, omówienie algorytmów ułatwiających statystyczną analizę niezawodności systemów, zaproponowanie algorytmów tworzenia ciągów liczb losowych oraz przykładowe przedstawienie algorytmów obliczania liczbowych charakterystyk niezawodności systemów. Ze względu na rozpowszechnione korzystanie przez inżynierów z programów komputerowych w języku ALGOL, przykłady programów rozwiązywania określonych zadań analizy niezawodności systemów zostały podane właśnie w tym języku.

I. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Praca systemu (elementu) do pierwszej awarii (odmowy) charakteryzuje się losowym czasem bezodmownej pracy. Jeśli system w momencie $t=0$ rozpoczyna pracę, a w momencie czasu $t=\tau$ następuje odmowa pracy, to możemy przyjąć, że τ jest czasem życia systemu (elementu), czasem jego bezodmownej pracy. τ jest wielkością losową o określonym prawie rozkładu.

$$Q(t)=P(\tau<t)$$

Prawdopodobieństwo bezodmownej pracy systemu P lub elemetu p_i (gdzie i — numer elementu) oznacza, że τ będzie równe lub większe od czasu t, w ciągu którego określa się prawdopodobieństwo bezodmownej pracy:

$$P(t)=1-Q(t)=P(\tau \geqslant t)$$

Częstość występowania odmów pracy jest to gęstość prawdopodobieństwa odmów $a(t)$:

$$a(t)=\lim_{\Delta t \to 0} \frac{p(t)-P(t+\Delta t)}{\Delta t}=-P'(t)=Q'(t)$$

Między częstością odmów $a(t)$, prawdopodobieństwem bezodmownej pracy $P(t)$ i prawdopodobieństwem odmowy $Q(t)$, występują jednoznaczne powiązania:

$$Q(t)=\int_0^t a(t)\,dt$$

i

$$P(t)=1-\int_0^t a(t)\,dt$$

Przy badaniu niezawodności pracy systemów bezwarunkowych, jako kryteria niezawodności używa się stosunki lub różnice rzeczywistej i idealnej charakterystyki jakości pracy systemu. Jakość pracy ocenia się za pomocą wskaźników efektywności. Pod pojęciem wskaźnik efektywności systemu rozumie się taką liczbową charakterystykę systemu (funkcjonał procesu jego. funkcjonowania [1]), która ocenia stopień przysposobienia systemu do wypełniania postawionych przed nim zadań.

Jeśli chce się ocenić stopień obniżenia efektywności systemu wskutek odmowy pracy elementów, to można do tego celu posłużyć się wskaźnikiem efektywności systemu F. Niezawodność elementów można opisać charakterystykami stochastycznymi np. prawdopodobieństwem bezodmownej pracy w zależności od czasu, prawdopodobieństwem zatrzymania pracy w zależności od czasu, rozkładem szeregu odmów pracy i innymi. Następnie można obliczyć wartość F_i wskaźnika F przy założeniu, że wszystkie elementy systemu są absolutnie niezawodne. Prócz tego można obliczyć wartość F_d zakładając, że odmowy mogą wystąpić z intensywnością odpowiadającą zadanymi charakterystykami stochastycznymi. Wówczas jako wskaźnik niezawodności pracy systemu bezwarunkowego można przyjąć

$$\Delta F=|F_i-F_d|$$

lub

$$K_c=\frac{Fd}{F_i}$$

[1] W tym przypadku można mówić o funkcjonałach jako wielkościach zmiennych, zadanych na zbiorze procesów funkcjonowania systemu.

albo

$$K_w = \frac{F_{d_i}}{F_i}$$

gdzie F_{di} — efektywność systemu przy rzeczywistej niezawodności elementów i-tego typu.

Dla systemów warunkowych

$$F_d = HF_i$$

gdzie H — prawdopodobieństwo bezodmownej pracy systemu w ciągu czasu jego funkcjonowania, tj. $H=P(t)$. Z tego wynika, że

$$F_d = P(t) F_i,$$

a stąd $$K_c = \frac{P(t) F_i}{F_i} = P(t)$$

Podobnie współczynnik W_w dla systemów warunkowych na podstawie równania

$$F_{d_i} = p_i(t) F_i$$

można zapisać jako

$$K_w = \frac{p_i(t) F_i}{F_i} = p_i(t)$$

Ponieważ przy określaniu tych wskaźników występują duże trudności obliczeniowe, można je szacować na podstawie doświadczeń statystycznych modelowanych ná komputerze przy zadanych niezawodnościach elementów systemu.

II. ALGORYTMY UŁATWIAJĄCE STATYSTYCZNĄ ANALIZĘ NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW

Ogólna charakterystyka algorytmów analizy niezawodności systemów. W systemach bezwarunkowych jako określający je parametr służy wskaźnik jakości funkcjonowania systemu (wskaźnik efektywności) np. dla układu elektronicznego telewizora jako efektywność można przyjąć prawdopodobieństwo wypełnienia postawionego przed nim zadania.

Przy odmowie pracy pojedynczego elementu w systemie bezwarunkowym może wystąpić jedna z trzech ewentualności:

— odmowa taka nie wpłynie na pracę systemu jako całości,

— odmowa pracy pojedynczego elementu spowoduje odmowę pracy całego systemu,

— odmowa pracy pojedynczego elementu spowoduje tylko pogorszenie jakości funkcjonowania systemu.

Przedstawienie systemu jako bezwarunkowego umożliwia badanie wszystkich możliwych stanów systemu, jakie on przyjmuje w procesie funkcjonowania w realnych warunkach.

Przy rozpatrywaniu systemów warunkowych bada się tylko dwa stany systemu:

— system pracuje tzn. określające go parametry leżą w wymaganych przedziałach,

— system nie pracuje.

Badanie niezawodności systemów bezwarunkowych będzie rozumiane jako badanie wpływu niezawodności elementów systemu na jakość jego pracy.

Ocena wpływu niezawodności elementów systemu na jego efektywność jest dokonywana za pomocą wskaźnika niezawodności ΔF, współczynników odpowiedniości (celowości) K_c i wpływu K_w.

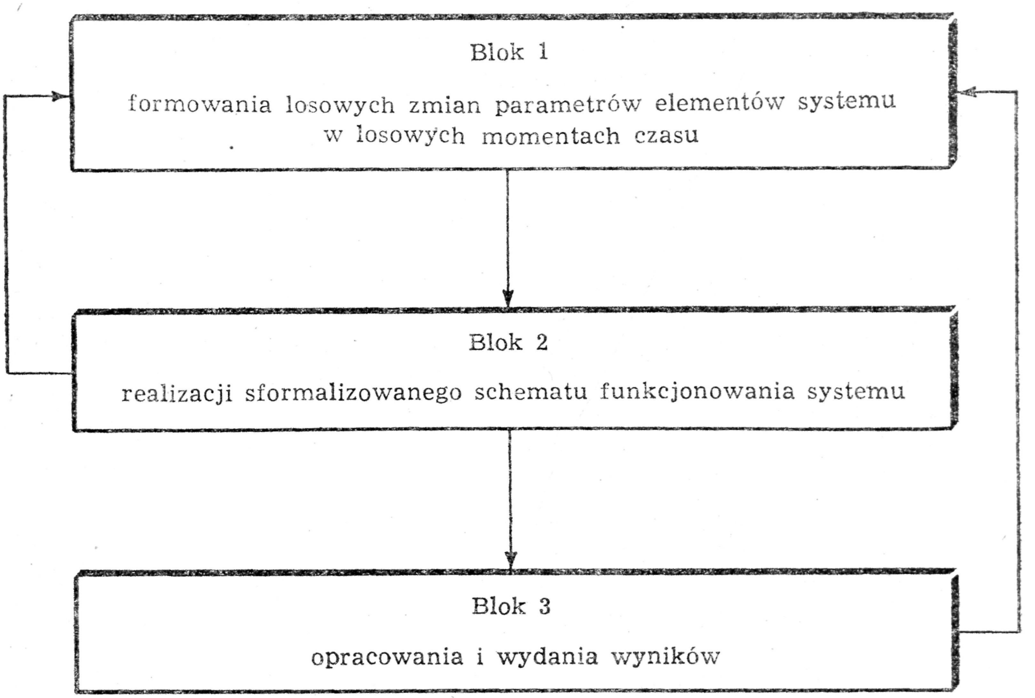
Analizę niezawodności systemu prowadzi się w dwóch etapach:

1) wstępny (orientacyjny) system przedstawia się jako warunkowy,

2) ostateczny system przedstawia się jako bezwarunkowy.

Statystyczne algorytmy analizy niezawodności warunkowych i bezwarunkowych systemów buduje się zgodnie ze schematem (ryc. 1), w którym wyróżnia się trzy podstawowe bloki. Dwa z (nich — pierwszy i trzeci dotyczą obu rodzajów przedstawienia systemu, a drugi blok dla każdego rodzaju systemu interpretuje się inaczej.

W systemach bezwarunkowych ten blok zabezpiecza modelowanie pracy konkretnego systemu z uwzględnieniem zadanej dokładności (zadanej jakości) wypełnienia postawionych przed systemem zadań.



Ryc. 1. Schemat blokowy statystycznego algorytmu analizy niezawodności systemów warunkowych i bezwarunkowych

W systemach warunkowych przedstawiających w wiadomym stopniu hipotetyczne systemy operatory drugiego bloku z reguły realizują zależność między bezawaryjnym (bezodmownym) czasem pracy systemu t_c, a czasem jego zatrzymania (remontu) t_{w_c} są one parametrami systemu dla danego rodzaju przedstawienia i bezawaryjnym czasem pracy elementów systemu t_i i czasem zatrzymania (remontu) t_{w_i} tj. zależnością postaci.

$$\begin{aligned} t_c &= (t_1, \dots, t_n, t_{w_1}, \dots, t_{w_n}) \\ t_{w_c} &= (t_1, \dots, t_n, t_{w_1}, \dots, t_{w_n}) \end{aligned} \tag{1}$$

Zależność (1) może być bardziej złożona, lecz jest to zawsze zależność między t_c i t_w i $\{t_i\}$ i $\{t_{w_i}\}$ $(i = 1, \dots, n)$. We wzorze (1) każde t jest wartością odpowiedniej wielkości losowej. Tak więc w ogólnej postaci stochastyczny algorytm określania parametrów systemów warunkowych określa się wzorem:

$$\begin{aligned} T_c &= f(T_1, \dots, T_n, T_{w_1}, \dots, T_{w_n}) \\ T_{wc} &= (T_1, \dots, T_n, T_{w_1}', \dots, T_{w_n}), \end{aligned} \tag{2}$$

gdzie: $T_1, T_2, \dots, T_n, T_{w_1}, T_{w_n}$ — wielkości losowe, z (których każda charakteryzuje się odpowiednim prawem rozkładu

$$a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t), a_{w_1}(t), \dots, a_{w_n}(t).$$

Algorytmy analizy niezawodności warunkowych systemów są wymienne i jednorodne dla dowolnych struktur systemów takiego przedstawienia.

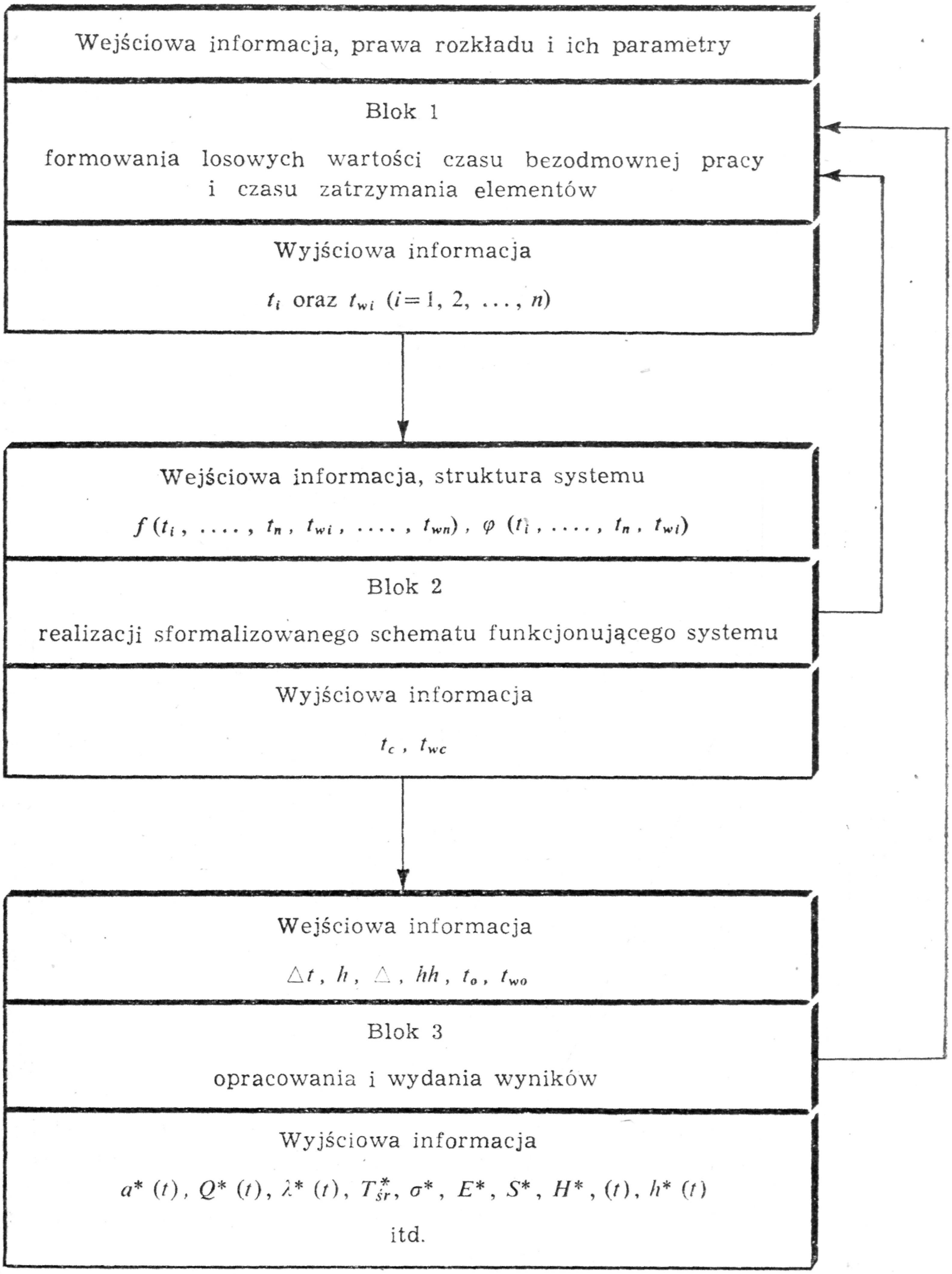
W systemach bezwarunkowych ten blok algorytmu przekazuje swoją postać i cechy charakterystyczne każdemu z algorytmów analizy niezawodności systemów tego rodzaju przedstawienia.

Ogólny schemat blokowy statystycznego algorytmu analizy niezawodności systemów warunkowych jest przedstawiony na ryc. 2. Dla wszystkich przypadków połączenia elementów w systemach warunkowych pierwszy i trzeci blok rozpatrywanego algorytmu nie zmienia się, ponieważ charakter wejściowy i wyjściowy informacji pozostaje taki sam.

Aktualnie zostały opracowane i szeroko zastosowane analityczne algorytmy badania niezawodności systemów przy podstawowym i rezerwowym połączeniu elementów (metody ustalania niezawodności systemów przy kolejnym i rezerwowym połączeniu elementów). Można je podzielić na dwie grupy.

Pierwsza grupa obejmuje algorytmy analizy niezawodności systemów (ANS) przy kolejnym i rezerwowym połączeniu elementów dla nagłych (niespodziewanych) odmów pracy. Wszystkie te algorytmy cechują niektóre lub wszystkie podane niżej wady:

— możliwość określenia za ich pomocą tylko jednej — dwóch liczbowych charakterystyk niezawodności,



Ryc. 2. Schemat blokowy statystycznego algorytmu analizy niezawodności systemów warunkowych

— określenie prawdopodobieństwa jako liczby, a nie jako funkcji czasu,

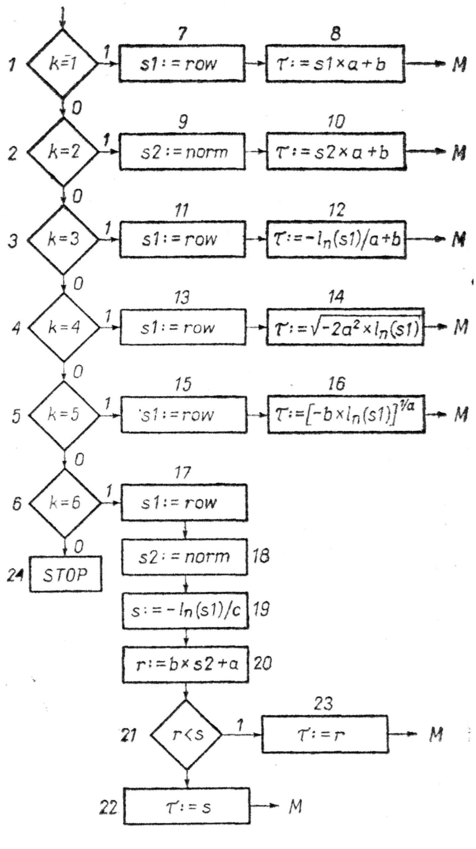
— zależność struktury algorytmu od postaci prawa rozkładu czasu powstania odmów,

— trudność budowy pewnych liczbowych charakterystyk niezawodności, takich jak $h(t)$, $t_{śr}$, K_r,

— niemożność zastosowania tych algorytmów do badania rezerwowych systemów z remontem.

Druga grupa algorytmów analizy niezawodności warunkowych systemów obejmuje algorytmy analizy niezawodności dla przypadku kolejnych odmów.

Ogólną wadą tych algorytmów jest złożoność wykorzystywania, wy-



Ryc. 3. Schemat blokowy tworzenia ciągów liczb losowych o rozkładzie równomiernym, normalnym, wykładniczym, Rele, Weibulla i uogólnionym

magająca zastosowania komputera dla systemów nawet z niewielką liczbą elementów, niemożność zastosowania ich do analizy systemów rezerwowych, trudności obliczenia związków korelacyjnych między odmowami.

Algorytmy analizy systemów bezwarunkowych w ogóle nie są dotąd opracowane.

III. ALGORYTMY TWORZENIA CIĄGÓW LICZB LOSOWYCH

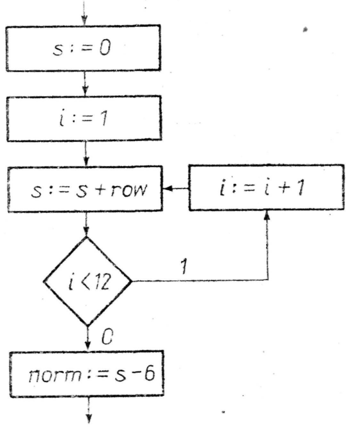
Ułożenie programu rozwiązania określonych zadań jest przeważnie trudnym i pracochłonnym procesem. Automatyzacja tego procesu jest związana z wprowadzeniem pośredniczących języków algorytmicznych i budową translatorów tych języków na język wewnętrzny maszyny. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych języków algorytmicznych jest ALGOL-60, dlatego zostanie on wykorzystny do zapisu programów algorytmów analizy niezawodności systemów.

Przy badaniu niezawodności systemów metodą statystycznego modelowania niezbędne są liczby losowe o różnych prawach rozkładu.

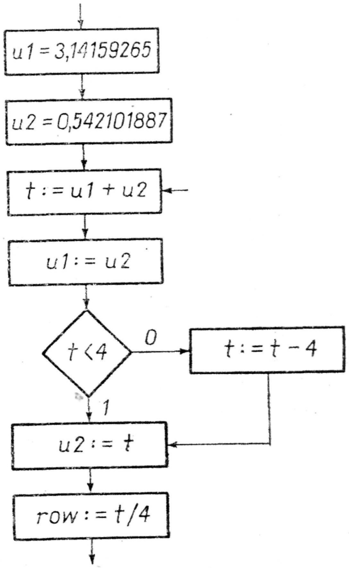
Schemat blokowy algorytmu otrzymywania liczb losowych o równomiernym normalnym, wykładniczym, Rele, Weibulla i uogólnionym prawie rozkładu przedstawia ryc. 3.

Pierwszych sześć operatorów określa rodzaj prawa rozkładu. Jeśli zadana lub określana wartość *k* jest równa 1, to otrzymywane liczby mają rozkład równomierny: przy $k=2$ — rozkład normalny itd.

Operatory 7, 9, 11, 13, 15, 17, 18 realizują zwrócenie się do procedur otrzymywania równomiernie (w przedziale 0÷1) lub normalnie $(M_{(x)}=0, \sigma_{(x)}=1)$ rozłożonych liczb. Schematy blokowe procedur otrzymywania normalnie (norm), równomiernie (row) rozłożonych liczb są przedstawione na ryc. 4 i ryc. 5.



Ryc. 4. Schemat blokowy procedury norm



Ryc. 5. Schemat blokowy procedury ROW

Operator 8 przekształca liczby row w liczby równomiernie rozłożone w przedziale od a do b.

Operator 10 przekształca liczby norm w liczby posiadające rozkład normalny z $M_{(x)}=a$ oraz $\sigma_{(x)}=b$.

Operator 12 oblicza wartości liczb losowych posiadające osunięty rozkład wykładniczy z wartością parametru równą a i osunięciem b.

Operatory 14 i 16 obliczają wartości liczb losowych o rozkładzie Rele i Weilbulla.

W celu otrzymania liczb losowych posiadających rozkład uogólniony, oblicza się dwie liczby — liczbę s posiadającą rozkład wykładniczy z parametrem a (operator 19), i liczbę r posiadającą rozkład normalny z $M_{(x)}=a$, oraz $\sigma_{(x)}=b$ (operator 20). Mniejszą z tych dwóch liczb wykorzystuje się jako liczbę charakteryzującą się rozkładem uogólnionym (operatory 21, 22, 23). Większej liczby nie wykorzystuje się.

Opis procedur otrzymywania liczb row, norm i r, w języku ALGOL-60 można przedstawić następująco:

```
real procedure row;
begin real t;
t:=u1+u2;
u1:=u2;
if t≥4 then t:=t−4;
u2:=t;
row:=t/4 end;
real procedure norm;
begin real s;
integer i;
for i:=1, . . , 12 do s:=s+row;
norm:=s−6 end;
real procedure τ(k, a, b, c);
valne k, a, b, c;
integer k;
real a, b, c;
begin real r, s, s1, s2;
switch L:=l1, l2, l3, l4, l5, l6;
s1:=row;
s2:=norm;
go to L [k];
l1:τ:=a×s1+b;
go to M;
l2:τ:=d+b×s2;
go to M;
l4:τ:=sqrt (−2×d×a×ln(sl));
go to M;
l5:τ:=(−b×ln⟨sl⟩)↑(1/a);
```

go to M;
$l6{:}r{:}=a\times b\times s2$;
$s{:}=-ln(sl)\times c$;
$\tau{:}=if\, r<s$ then r else s;
M:end;

Uwagi: Zmienne *u1, u2* są opisane w bloku zewnętrznym. Po opisaniu wszystkich procedur następują operatory przypisujące zmiennym *u1, u2* początkowe wartości *u1*=3,14159265; *u2*=0,542101887.

IV. ALGORYTMY OBLICZANIA LICZBOWYCH CHARAKTERYSTYK NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW, PRACUJĄCYCH DO PIERWSZEJ ODMOWY

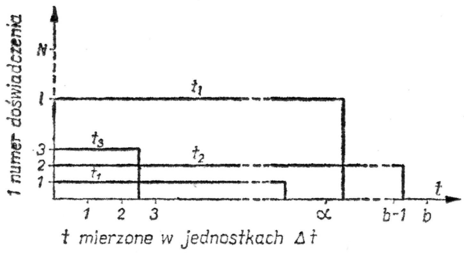
Wejściową informacją dla algorytmów obliczania liczbowych, statystycznych charakterystyk niezawodności systemów pracujących do pierwszej odmowy, będzie zbiór wartości t zmiennej losowej T, otrzymanych w wyniku przeprowadzenia określonej liczby doświadczeń.

W celu otrzymania potrzebnych charakterystyk cały przedział obserwowanych wartości zmiennej losowej czasu pracy bez odmowy, systemu T, podzielimy na h przedziałów. Wielkość każdego przedziału można zapisać jako

$$\frac{t}{h}=\Delta t.$$

Ustalmy liczbę trafień wartości T_c do każdego przedziału po przeprowadzeniu N doświadczeń. Oczywiście numer przedziału a, na który przypadła odmowa w l-tym doświadczeniu (ryc. 6), można określić według wzoru

$$\alpha_l=E\frac{t_c}{\Delta t}$$



Ryc. 6. Czasowy szkic losowej sytuacji, wytworzonej dla 1-, 2-, ... l-tego doświadczenia, w przypadku nie zatrzymującego się systemu

gdzie $E\ (t_c/\Delta t)$ — całkowita część argumentu $(t_c/\Delta t)$, t_c — wartość zmiennej losowej T_c w l-tym doświadczeniu. Jeśli m_α jest to liczba trafień wielkości T do przedziału α, to każdemu przedziałowi po N doświadczeniach będą odpowiadały określone liczby $m_1, \ldots, m_\alpha, \ldots, m_h$; dzieląc każdą z tych liczb przez ogólną liczbę doświadczeń otrzymamy statystyczną częstotliwość odmów systemu w przedziale α:

$$a_\alpha^*(t)=\frac{m_\alpha}{\Delta t N}$$

(gwiazdką zaznaczono statystyczny charakter otrzymywania tych charakterystyk).

W celu otrzymania statystycznego prawdopodobieństwa odmowy pracy systemu zestawmy szereg liczb:

$$\begin{aligned}&C_1=m_1,\\&C_2=m_1+m_2,\\&\dots\dots\dots\\&C_\alpha=m_1+\dots+m_\alpha,\\&C_h=m_1+\dots+m_\alpha+\dots+m_h\end{aligned}$$

Teraz statystyczne prawdopodobieństwo odmów może być obliczone według wzoru:

$$Q_\alpha^*(t)=\frac{C_\alpha}{N}$$

gdzie $Q_\alpha^*(t)$ — statystyczne prawdopodobieństwo odmowy w czasie 0-t_α. W celu otrzymania T^*, $\sigma_{(x)}^*$, As_k^* i $Ku_{(x)}^*$ niezbędne jest obliczenie sum:

$$t_1=\sum_{l=1}^{N} t_{cl}, \qquad t_2=\sum_{l=1}^{N} t_{cl}^2$$

$$t_3=\sum_{l=1}^{N} t_{cl}^3, \qquad t_4=\sum_{l=1}^{N} t_{cl}^4.$$

Tutaj t_{cl} — czas bezawaryjnej pracy systemu w l-tym doświadczeniu. Wówczas statystyczny średni czas bezawaryjnej pracy określa się wyrażeniem:

$$\bar{T}^*=\frac{1}{N}t_1.$$

Odchylenie średnie czasu bezawaryjnej pracy oblicza się według wzoru

$$\sigma_{(x)}^*=\sqrt{\frac{t_2}{N}-(\bar{T}^*)^2}$$

Współczynnik asymetrii określa się wyrażeniem:

$$A_{s_k}^*=\frac{\mu_3}{(\sigma_{(x)}^*)^3}$$

gdzie

$$\mu_3=\frac{t_3}{N}-3\bar{T}^*\frac{t_2}{N}+2(\bar{T}^*)^2.$$

Kurtozę można zmierzyć za pomocą współczynnika

$$K_u^* = \frac{\mu_4}{(\sigma_{(x)}^*)^4} - 3$$

gdzie

$$\mu_4 = \frac{t_4}{N} - 4\bar{T}^* \frac{t_3}{N} + \sigma_{(x)}^* \frac{t_2}{N} (\bar{T}^*)^3 - 3(\bar{T}^*)^4$$

Wartość λ^* (t_α) można obliczać według wzoru

$$\lambda^*(t_\alpha) = \frac{m_\alpha}{(N - C_\alpha)\Delta t}\,.$$

Powyższe miary pozwalają na przedstawienie algorytmu otrzymania statystycznych charakterystyk niezawodności

$$a^*(t),\ Q^*(t),\ \bar{T}^*,\ \sigma_{(x)}^*,\ As_k^*,\ K_u^*,\ \lambda^*(t),$$

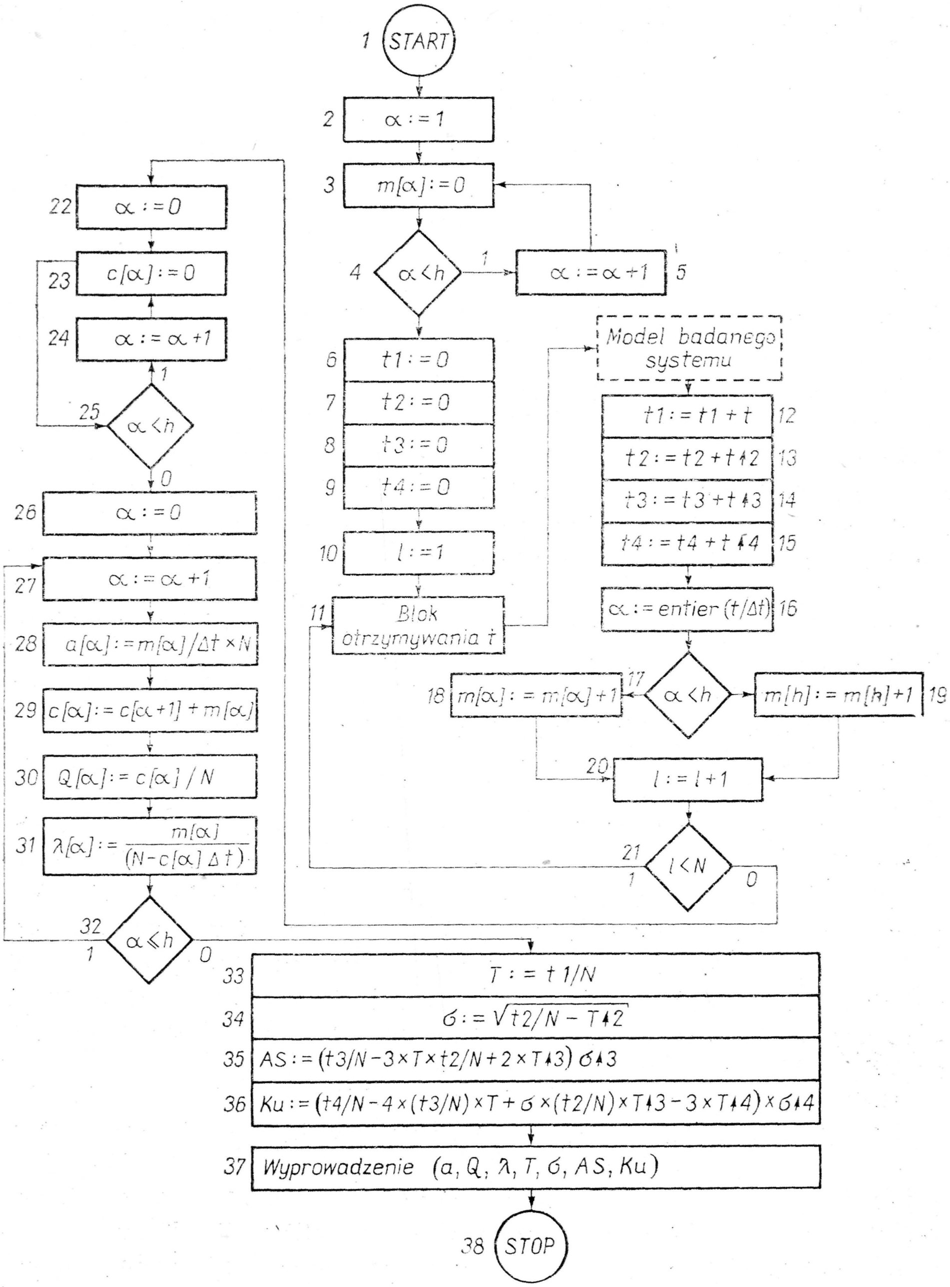
w postaci schematu blokowego, przedstawionego na ryc. 7.

Schemat ten składa się z 38 operatorów. Operator 1 zabezpiecza wprowadzenie informacji do maszyny. Grupa operatorów 2, 3, 4, 5 jest przeznaczona do oczyszczania komórek pamięci, przechowujących liczbę odmów. Ta grupa pracuje w następujący sposób: w operatorze 2 indeksowi przypisuje się początkową wartość równą jeden. Następnie operator 3 przypisuje identyfikatorowi m wartość 0. Operator logiczny 4 sprawdza czy wszystkie komórki są oczyszczone tj. $\alpha = h$. Jeśli warunki operatora 4 są spełnione, tj. jeszcze nie wszystkie komórki są oczyszczone, sterowanie przekazuje się operatorowi 5 będącemu licznikiem. Operator 5 zwiększa wartość indeksu α o jednostkę i znowu przekazuje sterowanie operatorowi 3. Cykl powtarza się do tej pory, dopóki spełniane są warunki operatora logicznego 4. Gdy tylko warunki operatora 4 przestaną być spełniane, sterowanie przekazuje się następnemu operatorowi 6. Operatory 6-10 przypisują identyfikatorom *t1, t2, t3, t4* początkowe (zerowe) wartości.

Operator 11 przypisuje początkową (zerową) wartość indeksowi *l*. Ten operator wypełnia złożoną operację otrzymywania liczb losowych o zadanym'prawie rozkładu. Szczegółowy schemat blokowy operatora 11 został przedstawiony na ryc. 3.

Operatory 12-15 są przeznaczone do otrzymywania sum, niezbędnych do obliczenia średniego czasu bezawaryjnej pracy $\bar{T}^*$ — odchylenia średniego $\sigma_{(x)}$ współczynnika asymetrii *AS** i kurtozy *Ku**. Operatory te pracują identycznie, dlatego wystarczy rozpatrzeć pracę tylko jednego z nich, np. trzynastego.

Operator 13 dokonuje przypisania identyfikatorowi *t2 wartości t2+* $+t^2$ Początkową wartość identyfikatora *t2* nadaje się operatorem 7, dla-



Ryc. 7. Schemat blokowy otrzymywania statystycznych charakterystyk niezawodności

tego wartość identyfikatora $t2$ po otrzymaniu pierwszej liczby losowej t będzie wynosić $t2=0+t^2$.

Po otrzymaniu drugiej liczby losowej wartość identyfikatora $t2$ wyniesie $t2+t^2$, gdzie wartość $t2$ w prawej części odpowiada wartości $t2= =0+t2$ otrzymana w wyniku wykonania operatora 13 w pierwszym cyklu. W ten sposób w wyniku wykonania operatora 13 N razy, identyfikator $t2$ przyjmie wartość sumy kwadratów N liczb losowych t, otrzymywanych za pomocą operatora 11.

Operator 16 dokonuje obliczenia wielkości $\alpha=E(t/\Delta t)$, tj. określa numer przedziału, do którego trafiła wielkość losowa t w danym doświadczeniu.

Logiczny operator 17 bada warunek $\alpha<h$, lub inaczej mówiąc określa czy wartość α nie przekracza granic maksymalnie dopuszczalnej wartości h. Jeśli warunek $\alpha<h$ jest spełniony, to sterowanie przekazuje się operatorowi 18. Operator 18 zwiększa m, tj. liczbę trafień wielkości t do danego przedziału, o jednostkę (początkową wartość wszystkich wielkości m_α przyjmuje się równą zero). Jeśli jednak warunek $\alpha<h$ nie jest spełniony, tj. wielkość okazała się większa od maksymalnie dopuszczalnej wartości, to sterowanie przekazuje się według strzałki ze znakiem 0 do operatora 19. Operator 19 zwiększa o jednostkę liczbę trafień do starszego przedziału.

W ten sposób, jeśli wielkość a przewyższa wartość h, to przyjmujemy ją równą h i zwiększamy liczbę trafień wielkości t do starszego przedziału α o jednostkę.

Operator 20 (licznik liczby realizacji) dodaje jedynkę do liczby zbadanych realizacji. Otrzymaną liczbę porównuje się z zadaną liczbą realizacji N (operator 21) i jeśli $1<N$, to generowanie liczb losowych t kontynuuje się. W przeciwnym przypadku sterowanie przekazuje się operatorowi 22, od którego rozpoczyna się grupa operatorów 22 - 25 realizująca oczyszczanie komórek przeznaczonych do przechowywania sum C_α. Operacje dokonywane za pomocą tego operatora są identyczne w stosunku do opisanej grupy operatorów 2-5.

Następna grupa operatorów dokonuje obliczeń liczbowych charakterystyk niezawodności. Operator 26 przypisuje indeksowi α początkową (zerową) wartość. Operator 27 pełni rolę licznika przedziału, dla których dokonuje się obliczenia liczbowych charakterystyk niezawodności. Operator 28 dokonuje obliczeń statystycznej częstotliwości odmów dla α — tego przedziału. Operator 29 określa sumę liczb m niezbędną do obliczenia prawdopodobieństwa odmów, przy czym przy zwróceniu się do operatora 29 za pierwszym razem $(\alpha=1)$ otrzymywana wartość $C_1=C_0+ +m_1=0+m_1$ pokrywa się z wartością t, tj. z liczbą trafień zmiennej losowej t, do pierwszego przedziału.

Przy drugim zwróceniu się; $C_2=C_1+m_2=m_1+m_2$ itd. Operatory 30 i 31 dokonują odpowiednio obliczania wartości prawdopodobieństw odmów i niebezpieczeństwa odmów dla danego α — tego przedziału. Logiczny operator 32 dokonuje badania liczby przedziałów α, dla których już zostały obliczone wartości α, Q, λ. Jeśli obliczenia zostały wykonane dla wszystkich przedziałów, to sterowanie przekazuje się następnej grupie operatorów, w przeciwnym przypadku sterowanie znowu przywraca się operatorowi 24 i kontynuuje się obliczanie charakterystyk liczbowych α, Q, λ dla pozostałych przedziałów. Operatory 33, 34, 35, 36 dokonują obliczenia wartości średniego czasu bezawaryjnej pracy $\overline{T}^*$ — odchylenia średniego $\sigma^*_{(x)}$, współczynnika asymetrii As^* i kurtozy Ku^*. Przy tym w charakterze sumy losowych wielkości t wykorzystuje się identyfikator otrzymany w operatorze 12, a w charakterze sum kwadratów, sześcianów i czwartych potęg — identyfikatory $t2$, $t3$ i $t4$ odpowiednio.

Po obliczeniu $\overline{T}^*$, $\sigma^*_{(x)}$, As^* i Ku^*, wyniki obliczeń są drukowane i na tym kończy się proces modelowania.

Na podstawie algorytmu przedstawionego na ryc. 7 został zestawiony program w języku ALGOL-60.

```
begin integer N, h, a, k, 4, l;
real u1, u2, u3, t, t1, t2, t3, t4, Δt, x, y, z;
array d [1:3], p [1:4];
real procedure row;
begin . . . end;
real procedure norm;
begin . . . end;
real procedure τ (k, a, b, c);
begin . . . M: end;
U1:=3,14159265; U2:= .542101887;
input (d, p);
N:=d[1];
h:=d[2]; Δt:=d[3];
k:=p[1];
x:=p[2];
y:=p[3]; x:=p[4];
output (d, p);
begin array m [1:h];
for α:=1, . . . , h do m[α]:=0;
t1:=t2:=t3:=t4:=0;
for l:=1, . . . , N do begin
begin model end;
t1:=t1+t;
t2:=t2+txt;
t3:=t3+t↑3;
t4:=t4+t↑4;
α:=entier (t/Δt)+1;
if:α<h then m[α]:=m[α]+1;
```

```
else m[h]:=m[h]+1 end;
begin array a, q, λ [1:h], C[0:h];
for α :=0, . . . , h do C [α] :=0;
for α:=1, . . . , h do begin a[α]:=m[α]/(N×Δt);
C[α]:=C[α−1]+m[α];
U3 : =N−C[α];
U4 : =U3;
if U4=0 then U3 : =10−4;
Q[α] : =C[α]/N;
λ[α] : =a[α]×N/U3 end;
begin real T, s. Ku, σ;
array g[1 : 4];
g[1] : =T : =T1/N;
g[2] : =σ : =sqrt(t2/N−t↑2);
g[3] : =s : =(t3−3×t×t2+2×N×T↑3)/(N×σ↑3);
g[4] : =Ku : =(t4−4×t×t3+σ×t2×t↑2−3×N×T↑4///(N×σ↑4)−3;
output (a, g, λ, g) end
end end end.
```

ANALYSIS ALGORITHMS OF INFALLIBILITY SYSTEMS

Summary

The infallibility of system may be defined as the probability of task fulfilment. One has to distinguish the beginning infallibility and the infallibility function which expresses the influence of time upon the infallibility of system.

In practice the function is unknown and therefore it has to be estimated on the basis of sampling. The author shows us how to estimate the function with help of computer model.