

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im. gen. broni K. Świerczewskiego

INSTYTUT ORGANIZACJI I TECHNIKI DOWODZENIA
KURS BADAŃ OPERACYJNYCH

9

ppłk mgr inż. Antoni ZON

NIEZAWODNOŚĆ WIELKICH SYSTEMÓW
(Skrypt)



4310

REMBERTÓW WRZESIEŃ 1965



AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im. gen. broni K. Świerczewskiego

INSTYTUT ORGANIZACJI I TECHNIKI DOWODZENIA
KURS BADAŃ OPERACYJNYCH

9

ppłk mgr inż. Antoni ZON

NIEZAWODNOŚĆ WIELKICH SYSTEMÓW
(Skrypt)



4310

REMBERTÓW

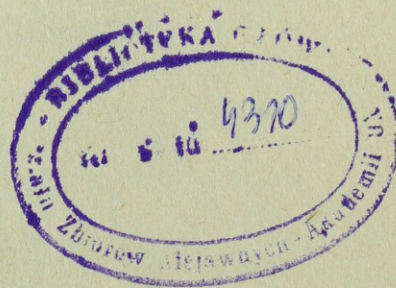
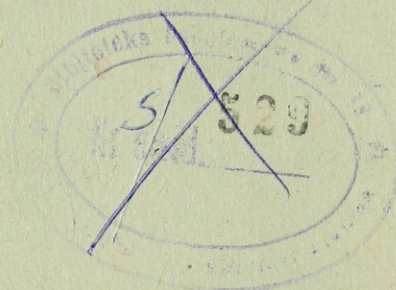
WRZESIEŃ

1965

AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im.gen.broni K. Świerczewskiego

INSTYTUT ORGANIZACJI I TECHNIKI DOWODZENIA
KURS BADAŃ OPERACYJNYCH

Ppłk mgr inż. Antoni ZOŃ
NIEZAWODNOŚĆ WIELKICH SYSTEMÓW



WARSZAWA

WRZESIEŃ

1965 r.

SPIS TREŚCI

	str.
Rozdział I. Geneza wielkich systemów	4
Rozdział II. Ogólne wiadomości o niezawodności wielkich systemów	8
1. Metody badania niezawodności wielkich systemów	8
2. Bezawaryjność systemu	14
3. Uszkodzenia wielkich systemów	16
4. Regeneracja wielkich systemów	18
5. Czasowy wykres pracy systemu	20
6. Gotowość systemu	22
Rozdział III. Modele matematyczne dla badań niezawodności oraz charakterystyki niezawodności systemów	25
1. Ogólne zasady bezawaryjności systemu	25
2. Wykładniczy /eksponencjalny/ rozkład bezawaryjności	33
3. Normalny rozkład bezawaryjności	36
4. Rozkład bezawaryjności w oparciu o funkcję gamma	41
5. Rozkład bezawaryjności Weibulla	44
6. Ilościowe charakterystyki niezawodności	47
Rozdział IV. Wpływ warunków eksploatacji i reżimów pracy na niezawodność systemów	61
1. Ogólna charakterystyka warunków pracy wielkich systemów	61
2. Metody obliczania bezawaryjności systemu przy działaniu obciążeń statycznych	69
3. Awaryjność elementów w zależności od warunków i reżimów pracy systemu	81
Rozdział V. Sposoby podwyższania oraz metody obliczania niezawodności wielkich systemów	90

	str.
1. sposoby podwyższania niezawodności wielkich systemów . . .	90
2. Obliczanie niezawodności wielkich systemów	111
Zakończenie	126
Załącznik nr 1.	127
Załącznik nr 2	131
Literatura	133

Rozdział I.

GENEZA WIELKICH SYSTEMÓW

Aby móc mówić o niezawodności ściśle i z uwzględnieniem cech ilościowych, konieczne należy ustalić znaczenie słowu "wielki system". Zagadnieniom tym jak dotąd nie poświęcono zbyt wiele miejsca w literaturze technicznej. Wiadomo, że w matematyce słowo "system" oznacza zazwyczaj "zbiór praw". W technice często określamy słowem "system" grupę niezależnych elementów połączonych wspólnym celem-wykonaniem wyznaczonego zadania.

Systemy zbudowane przez człowieka pod względem zastosowań można podzielić na kilka grup: kierowane przez człowieka, półautomatyczne, całkowicie automatyczne mniejsze i bardzo dużych wymiarów.

Budowa bardzo złożonych systemów stała się możliwa dzięki szybkiemu wzrostowi asortymentu elementów z których składają się systemy.

Do znanych już elementów takich jak: lampy elektronowe, oporniki, kondensatory, cewki, transformatory, proste przekaźniki, wyłączniki, przełączniki i przewody - obecnie doszły najprzeróżniejsze półprzewodniki, fotodiody, przetworniki, czujniki izotopowe, elementy impulsowej techniki mikrofalowej itd.

Rozwój przemysłu radioelektronicznego umożliwił masową produkcję zminiaturyzowanych elementów doskonałej jakości, pozwalających na montowanie dużych układów funkcjonalnych o wysokim stopniu niezawodności działania.

Jest to zasadnicze osiągnięcie ostatnich czasów, o dużym znaczeniu dla rozwoju nowoczesnej techniki. Masowość produkcji elementów elektronicznych, ich miniaturyzacja i subminiaturyzacja oraz możliwość działania przy znacznie zmniejszonych poborach mocy to warunki bez

których nie do pomyślenia jest nowoczesna technika wyrażająca się maszynami matematycznymi i układami automatycznej regulacji procesów produkcji.

Należy szczególną uwagę zwrócić na zagadnienia miniaturyzacji urządzeń. Dzięki miniaturyzacji w znacznym stopniu można zmniejszyć wymiary i ciężar a także zwiększyć niezawodność urządzeń elektronicznych. Stało się to konieczne ze względu na rozwój nowych gałęzi nauki i techniki takich jak: technika raketowa, kosmonautyka technika obliczeniowa, cybernetyka, bionika i wiele innych wymagających stosowania szczególnie złożonego wyposażenia elektronicznego. Poszukiwanie dróg znacznego zmniejszenia wymiarów i ciężaru oraz zwiększenia niezawodności spowodowało z kolei rozwój nowych kierunków technologii i konstrukcji wytwarzania układów. Zastosowanie mikroelektroniki pozwoliło zwiększyć współczynnik wypełnienia konstrukcji. Współczesna miniaturowa aparatura pokładowa z zastosowaniem lamp ma średnią gęstość montażu 0,1 elementów na 1 cm^3 , przy zastosowaniu półprzewodników 1,5 - 2 elementów na 1 cm^3 . Znane kierunki mikrominiaturyzacji pozwalają zwiększyć gęstość montażu dla mikromodułów od 10 - 20, dla mikrowarstw /mikroukłady/ od 100 - 200 i elektroniki molekularnej /układy monolityczne/ do powyżej 1000 elementów na 1 cm^3 [1] /tabela 1.1/.

Tabela Nr.1.1

Konstrukcja	Ilość elementów w 1 dcm^3	Średnia intensywność uszkodzeń / % na 1000 godz. /
Zwykła	35	1,0
Elementy miniaturowe	175	0,5
Elementy subminiaturowe	1750	0,1
Mikromoduly	21000	0,01
Mikroukłady	88000	0,01
Układy monolityczne	$/1,75 - 3,5/ \cdot 10^6$	pomijalna

Opracowanie technologii produkcji niezawodnych i miniaturowych elementów elektronicznych spowodowało możliwość łączenia tych elementów w wielkie obiekty elektroniczne - maszyny matematyczne. W wyniku tego powstały układy składające się z dużej ilości elementów i wykonujące wiele operacji. Układy takie w zależności od zastosowania są półautomatyczne, lub całkowicie automatyczne, oczywiście pod względem ilości elementów będą mniejsze i większe. W toku dalszego omawiania będziemy je nazywać wielkimi systemami. Dotychczas nie udało się jeszcze uczonym i inżynierom określić pojęcia - wielki system /W.S/.

W/g A.J. Lenera [4] można wskazać na następujące cechy, które z reguły obserwuje się w WS:

- a/ możliwość wydzielenia pewnych części podsystemów;
- b/ istnienie celu działania dla każdego podsystemu i możliwość oceny efektywności jego działania na podstawie funkcjonału, zależnego od oddziaływań sterujących, przyłożonych do danego podsystemu;
- c/ istnienie ogólnego celu działania W.S. i możliwość oceny efektywności jego działania na podstawie funkcjonału zależnego od ruchu każdego podsystemu;
- d/ współdziałanie w W.S. ludzi, maszyn i oddziaływanie środowiska;
- e/ istnienie szeregu sprzężeń wewnątrz podsystemów i międzypodsystemami;
- f/ konieczność organizacji rozgałęzień sieci informacyjnej, zapewniającej funkcjonowanie systemu i optymalizację jego działania.

Pojęcie WS istotnie zależy od punktu widzenia i celu badania. Odniesienie danego układu do klasy WS dokonuje się nie tylko na podstawie struktury rozpatrywanego układu ale także na podstawie celu rozważania. Ten sam układ dla rozwiązania określonego zadania

może być w pewnych przypadkach traktowany jako WS, winnych jako automatyczny, czy półautomatyczny system bądź też jako klasyczne połączenie obiektu i układu sterującego.

Przykładem WS wojskowych mogą być systemy obrony morskiej, powietrznej czy lądowej terytorium poszczególnych państw. Najbardziej rozpowszechnione w naszym kraju są systemy wykorzystane w obronie powietrznej kraju.

Rozdział II

OGÓLNE WIADOMOŚCI O NIEZAWODNOŚCI WIELKICH SYSTEMÓW

Zagadnienie niezawodności WS nieznalazło jak dotąd szerszego naświetlenia w literaturze światowej. W niniejszym opracowaniu zostaną omówione ogólne wiadomości dotyczące niezawodności WS, ze szczególnym zwróceniem uwagi na modele matematyczne wg których należy badać niezawodność wielkich systemów. Również dość obszernie zostaną omówione warunki eksploatacji i reżimy pracy oraz ich wpływ na niezawodność wielkich systemów.

1. Metody badania niezawodności wielkich systemów.

W czasie eksploatacji WS są narażone na działania obciążeń mechanicznych /wibracje, uderzenia, stałe przyspieszenia/ i przeciążenia elektryczne /napiecie, prąd, moc/. Pracują w różnych warunkach środowiskowych /temperatura, wilgotność, ciśnienie/.

Wpływ wymienionych czynników na system uwidacznia się w postaci odchylenia parametrów od wartości nominalnych.

Odchylenia te mogą być tak duże, że system może być niezdolny do normalnej pracy.

Jeżeli system nie pracuje z wymaganą dokładnością uważany jest za uszkodzony. W celu określenia jak zachowuje się system w czasie eksploatacji wprowadzono pojęcie - niezawodność systemu.

Niezawodność - jest jedną z charakterystyk jakości systemu.

Niezawodność systemu jako jakościowa charakterystyka określa możliwość systemu w wypełnianiu zadanych mu funkcji i zadań.

Przy WS jakościową charakterystyką niezawodności nie należy posługiwać się do naukowego rozpracowania zasad projektowania, produkcji i

eksploatacji systemu.

Ilościowe znaczenie niezawodności WS należy określać na podstawie analizy parametrów technicznych systemu w warunkach eksploatacyjnych.

Na parametry techniczne ma wpływ szereg czynników /schematy, konstrukcja, produkcja, eksploatacja/, których uwzględnienie jest niemożliwe, dlatego przy analizie ilościowej należy posługiwać się: teorią prawdopodobieństwa, teorią procesów przypadkowych i statystyki matematycznej.

Pod ilościowym określeniem niezawodności WS będziemy rozumieć prawdopodobieństwo wypełnienia przez system zadanych funkcji w ustalonym czasie przy zadanych warunkach eksploatacyjnych.

Zewnętrzne warunki środowiskowe wpływają na zmianę wyjściowych parametrów systemu, oraz zmianę charakterystyk poszczególnych elementów. Tak więc system będzie w różnych stanach zabezpieczających wykonanie zadanych funkcji, Jednakże przy tych różnorodnych stanach jakości wypełnianych funkcji przez system nie będzie jednakowa. Jeżeli np. parametry na wyjściu systemu będą w granicach tolerancji, to system pracuje idealnie. Przy odchyleniu parametrów poza granice tolerancji, system pracuje gorzej jakościowo t.j. z mniejszą efektywnością.

Pod efektywnością stanu systemu lub efektywnością parametru systemu będziemy rozumieć prawdopodobieństwo wykonania przez system zadanych funkcji przy określonym parametrze.

Jeżeli system może znajdować się w dużej ilości stanów, to niezawodność określa się wzorem:

$$R(t, \xi) = \sum_{i=1}^k E(P_i) P_i(t, \xi) \quad /2.1/$$

gdzie: $P_i(t, \xi)$ - prawdopodobieństwo i-tego stanu systemu przy warunkach eksploatacyjnych ξ .

$E(P_i)$ efektywność i-tego stanu

t - wymagany czas pracy

k - liczba stanów

W wypadku ciągłych zmian parametrów niezawodność systemu określi wzór:

$$R(t, \xi) = \int E(\beta) w(\beta, t, \xi) d\beta \quad /2.2/$$

gdzie: $E(\beta)$ - efektywność stanu systemu charakteryzująca się parametrem β

$w(\beta, t, \xi)$ - gęstość prawdopodobieństwa parametru β , przy warunkach eksploatacyjnych ξ

Wzór /2.2/ wykazuje, że przy ocenie jakości zasadniczą charakterystykę może być niezawodność systemu.

Oceny dokładności lub niezawodności można dokonać obliczając efektywność stanu systemu. Na przykład, jeżeli efektywność równa się jedności dla przyjętych parametrów w granicach tolerancji oraz równa się zeru dla wszystkich pozostałych parametrów, to wzór /2.2/ daje ocenę dokładności systemu. W ten sposób wzór /2.2/ świadczy o nierozzerwalnym połączeniu oceny dokładności z niezawodnością WS.

Dla oceny jakości WS wystarczająca jest charakterystyka niezawodności wykonywania zadanych funkcji w różnych położeniach i w tym przypadku niezawodność pokrywa się z efektywnością systemu.

Niemniej jednak należy pamiętać, że efektywność jest znacznie szerszym i pełniejszym kryterium jakości WS.

W ogólnym przypadku niezawodność - to tylko jedna z głównych składowych efektywności systemu.

W celu uproszczenia analizy celowym jest rozpatrzyć trzy główne parametry charakteryzujące niezawodność większości WS a mianowicie: bezawaryjność, regenerację i gotowość.

Tymi parametrami wystarczająco można scharakteryzować niezawodność urządzeń tak ilościowo jak i jakościowo.

Często niezawodność systemu charakteryzuje się tylko bezawaryjnością, co nie w każdym przypadku jest słuszne. Wyjaśnimy to przykładowo.

Założmy, że system w określonym czasie np. w czasie zmiany winien zabezpieczyć wyprodukowanie określonej ilości produktów. Prawdopodobieństwo jednego uszkodzenia w czasie zmiany określono np. 0,4 .

Widać z powyższego, że prawdopodobieństwo uszkodzenia nie w pełni charakteryzuje jakość systemu, gdyż nieuwzględnia możliwości ustalenia zdolności do pracy w pewnym odstępie czasu. Jeżeli wykrycie i usunięcie uszkodzenia trwa krócej, to prawdopodobieństwo wykonania przez system założonych zadań wzrasta. Gdy wykrycie i usunięcie uszkodzenia w rozpatrywanym przykładzie zajmuje 2 % czasu roboczego to można powiedzieć, że niezawodność WS wynosi 98% w ten sposób niezawodność systemu charakteryzuje bezawaryjność i regenerację.

Ważnym parametrem /jak tu wspomniano powyżej/ jest gotowość systemu. Gotowość systemu określa się jako bezawaryjność i możliwość regeneracji.

Analizę parametrów niezawodności WS przeprowadza się w warunkach statycznych i dynamicznych. Niezawodność systemu przy założonym schemacie i konstrukcji zależy w zasadzie od dwóch parametrów: wymaganego okresu bezawaryjnej pracy i warunków eksploatacji systemu. Gdy te warunki ustalą się, to rozpatrywane jest zadanie statycznie. Wtedy bazuje się na podstawach teorii prawdopodobieństwa. W wypadku gdy wspomniane parametry nie są ustalone - należy rozpatrywać zadanie dynamiczne. Zasadnicze zależności i równania w warunkach dynamicznych są bardzo złożone w porównaniu do warunków statycznych. Do tych obliczeń wykorzystuje się funkcję rozkładu prawdopodobieństwa, teorie funkcji przypadkowych a często korzysta się z momentów rozkładu,

np. średniego czasu międzyawaryjnego czy średniego czasu regeneracji.

Przy projektowaniu WS należy zabezpieczyć maksymalną bezawaryjność z równoczesnym ograniczeniem ciężaru, wymiarów itp. Również należy wybrać optymalne metody obsługi - eksploatacji. Zasadnicze cechy jakości systemu ujawniają się w pełni dopiero w okresie eksploatacji. Dlatego nazwano je eksploatacyjnymi cechami systemu, a ich charakterystyki ilościowe, miary - kryteriami eksploatacyjnymi.

W statycznej teorii eksploatacji systemów dynamicznych na podstawie dorobku teorii masowej obsługi są nadal rozwijane:

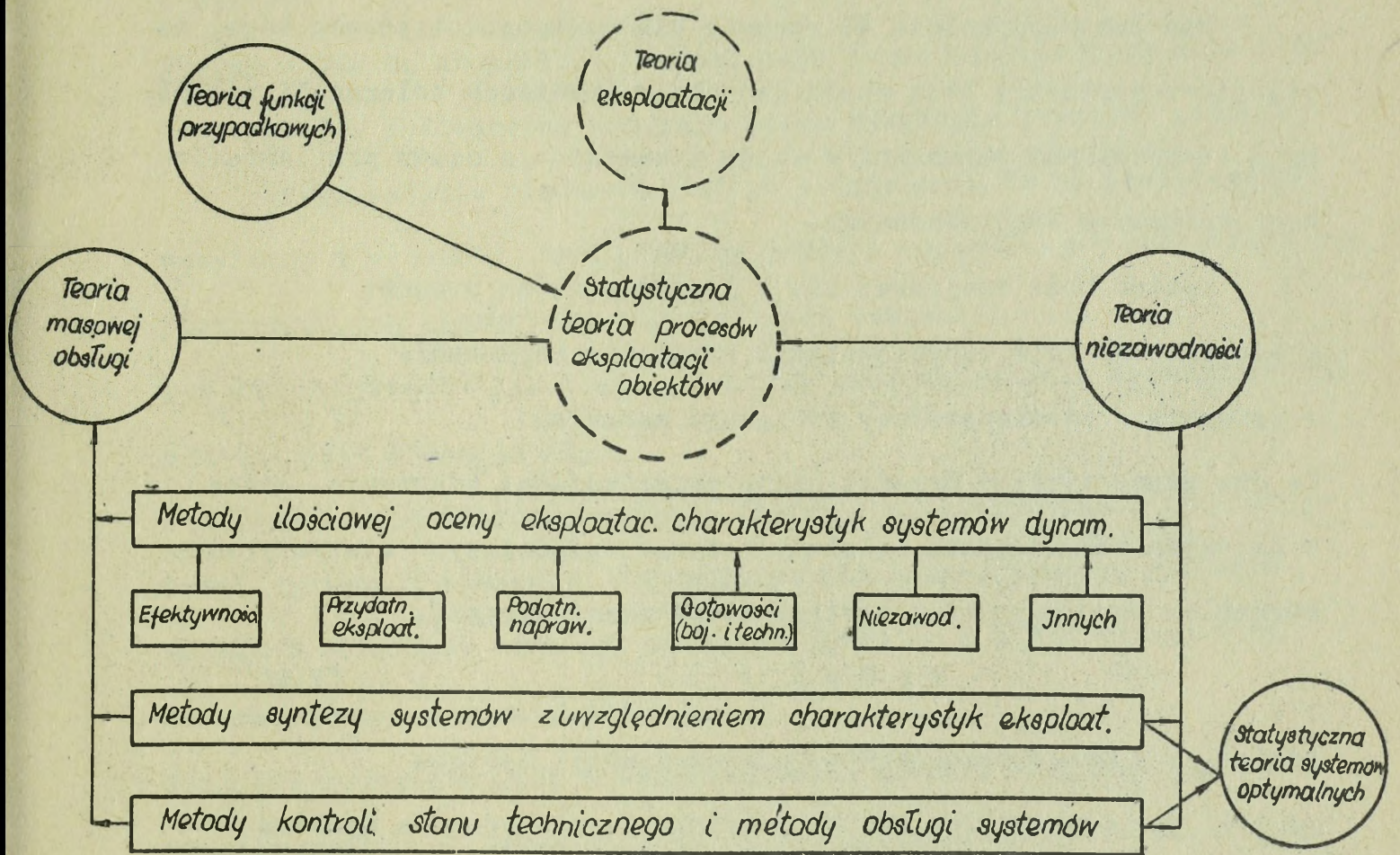
- metody ilościowej oceny efektywności kontroli, profilaktyki, przydatności eksploatacyjnej, podatności naprawczej, gotowości technicznej i bojowej, niezawodności i inne;
- metody syntezy systemów z uwzględnieniem charakterystyk eksploatacyjnych;
- metody kontroli stanu technicznego i metody obsługi systemów

/rys. 2.1/.

Tak więc kryteriami eksploatacji zajmuje się teoria eksploatacji bazująca na aparacie matematycznym teorii funkcji przypadkowych, przyjmując za podstawę model matematyczny stosowany do badań układów dynamicznych w teorii drgań i teorii regulacji automatycznej oparty na wykorzystaniu n -wymiarowej przestrzeni fazowej, w tym przypadku przestrzeni - zbioru stanów lub parametrów.

Taki model badania wykazuje głęboką łączność teorii niezawodności i teorii masowej obsługi z ogólną teorią funkcji przypadkowych. Metody badań procesu eksploatacji oparte na powyższym modelu pozwalają głębiej poznać zjawiska będące przyczyną niepomyślnych zdarzeń [2].

Oprócz tego stosowanie metod podwyższania niezawodności np. przez rezerwowanie elementów daje możliwość utworzenia systemu o bardzo wysokiej bezawaryjności /o czym będzie mowa w rozdziale V/.



Rys. 2.1. Model badania teorii eksploatacji.

2. Bezawaryjność systemu

Bezawaryjność systemu jest jednym z głównych składowych określających niezawodność WS /patrz rozdz.III p-kt 6/.

Pod bezawaryjnością WS rozumie się prawdopodobieństwo tego, że wyjściowe parametry będą znajdować się w granicach tolerancji założonych technicznymi warunkami w ciągu wyznaczonego czasu przy określonych warunkach środowiskowych.

System może znajdować się w jednym z dwóch stanów:

- niesprawnym /nie odpowiadającym wymaganym warunkom/;
- sprawnym /odpowiadającym wymaganym warunkom.

Te dwa stany systemu przedstawiają przeciwstawne zdarzenia, które w dalszych rozważaniach będziemy nazywać zasadniczym statystycznym równaniem bezawaryjności systemu które można wyrazić:

$$P + Q = 1 \qquad /2.3/$$

gdzie: P - prawdopodobieństwo bezawaryjności systemu

Q - prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia systemu.

WS przedstawia sobą kompleks oddzielnych układów i przyrządów, niepowiązanych ze sobą w fabryce operacjami montażowymi, ale posiadający ogólne eksploatacyjne przeznaczenie. W wielkim systemie jako całości można wydzielić szereg prostych systemów i podsystemów.

Bezawaryjność WS może służyć zaledwie ogólnej charakteryzacji systemu, niepozwalającej prześledzić wpływu bezawaryjności oddzielnych jego części na bezawaryjność WS jako całości.

W celu przeprowadzenia analizy i oceny bezawaryjności WS należy go podzielić na układy, przyrządy i elementy.

Pod pojęciem element przyrządu, układu czy systemu rozumiemy jego konstrukcyjną samodzielność - zbiór niepodzielnych części i materiałów, posiadających określone przeznaczenie i wypełniający określoną czynność.

Przyrząd - urządzenie posiadające samodzielną konstrukcję i eksploatacyjny przeznaczenie a składa się z połączonych między sobą elementów i węzłów.

System - już na początku określono jako grupę niezależnych elementów i przyrządów połączonych wspólnym celem wykonania pewnego zadania.

Przy analizie niezawodności po podzieleniu WS na poszczególne przyrządy i elementy, można według jakości zasadniczych charakterystyk poszczególnych elementów, obliczyć jego bezawaryjność.

Tak dla przyrządów jak i dla elementów przy określaniu bezawaryjności słuszne jest równanie /2.3/.

W dalszych rozważeniach powiązań między charakterystykami bezawaryjności systemu i elementu, charakterystyki bezawaryjności systemu, układu i przyrządu będziemy oznaczać symbolem P a charakterystyki bezawaryjności elementu przez - p.

Przy wyprowadzaniu wzorów obliczeniowych można posługiwać się tak charakterystykami bezawaryjności jak i przeciwnymi wielkościami t.j. prawdopodobieństwem powstania uszkodzenia - Q.

Przy tym w zależności od konkretnego zadania jest właściwa ta lub druga charakterystyka. Podamy to na przykładzie.

Niech bezawaryjność traktu wzmacniającego pewnego systemu wynosi

$$P_0 = 0,99.$$

W wyniku zastosowania rezerwowania, bezawaryjność traktu wzrasta do

$$P = 0,9999.$$

Należy ocenić stopień polepszenia bezawaryjności traktu wzmocnienia.

Stopień wzrostu bezawaryjności będziemy oceniać współczynnikiem Sp,

przedstawiającym stosunek bezawaryjności ulepszonych schematów do

bezawaryjności nieulepszonych schematów:

$$Sp = \frac{P}{P_0} = \frac{0,9999}{0,99} = 1,01$$

Stopień zmniejszenia prawdopodobieństwa powstania uszkodzenia, oceniamy współczynnikiem S_Q , przedstawiającym stosunek odpowiadający prawdopodobieństwu zaistnienia uszkodzenia w ulepszonym i nieulepszonym schemacie:

$$S_Q = \frac{Q}{Q_0} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-2}} = 1 \cdot 10^{-2}$$

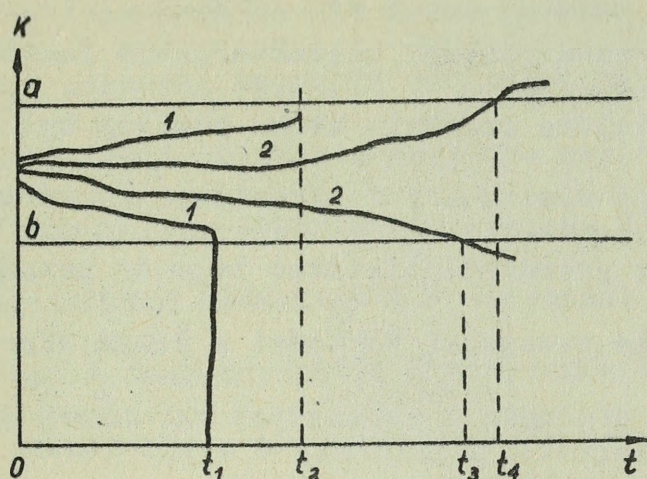
Jeżeli posłużymy się współczynnikiem S_p to bezawaryjność systemu wzrosła 1,01 razy, lub o 1 %, co na pierwszy rzut wydaje się niezbyt dużo, chociaż w rzeczywistości bezawaryjność systemu znacznie wzrosła.

Nawet gdyby ulepszyć schemat idealnie że $P \approx 1.0$, to stopień wzrostu bezawaryjności oceniany współczynnikiem S_p będzie niewiele większy od 1%. Korzystając natomiast ze współczynnika S_Q widać odrazu, że prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia po ulepszeniu schematu zmalało 100 razy. Widać z powyższego, że drugi współczynnik wyraźniej odzwierciedla tę samą zmianę.

3. Uszkodzenia wielkich systemów

Określenie uszkodzenie WS jako wyjście parametru poza granice ustalonej tolerancji jest zbyt ogólnym pojęciem i wymaga szczegółowego wyjaśnienia zwłaszcza przy analizie bezawaryjności. Wykorzystanie ogólnego określenia uszkodzenia zwłaszcza przy projektowaniu WS, może spowodować niewłaściwą ocenę bezawaryjności rezerwowanych schematów.

W czasie eksploatacji zmiana parametru wyjściowego-systemu, przedstawia funkcję przypadkową. Jeżeli z jakichś przyczyn parametr k wyjdzie poza granice tolerancji - to oznacza przejście systemu ze stanu sprawnego w stan niesprawny. Oznacza to przeciążenie jednej z granic a lub b funkcji przypadkowej /rys.2.2./.



Rys. 2.2. Rodzaje zmian parametrów systemu w funkcji czasu.

Przy tym wyjście parametru poza granice tolerancji może przechodzić skokowe /wykres 1/ lub płynnie /wykres 2/.

Dla większości systemów i przyrządów uszkodzenia starzeniowe - narastające płynnie przy niewielkich odchyłkach parametru poza granice tolerancji, zwykle nie powodują uszkodzenia systemu a tylko są przyczyną zmiany efektywności, w zależności od wielkości odchyłki parametru poza granice tolerancji. Natomiast uszkodzenie skokowe w nierezerwowanym systemie powoduje niesprawność systemu.

Jeżeli uszkodzenia skokowe i starzeniowe są niezależne, to prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy systemu określa się wzorem:

$$P_s = P_{sk} \cdot P_{starz} \quad /2.4/$$

gdzie: P_{sk} - prawdopodobieństwo bezawaryjności systemu przy uszkodzeniach skokowych.

P_{starz} - prawdopodobieństwo bezawaryjności systemu przy uszkodzeniach starzeniowych.

4. Regeneracja wielkich systemów

Regeneracja tak jak bezawaryjność charakteryzuje jakość WS. Regenerację WS określa się wieloma cechami, które powinny być uwzględniane w czasie analizy jakości systemu. Pod ilościową wartością regeneracji systemu rozumiemy prawdopodobieństwo tego że parametry jego będą ustalone na poziomie wymaganej wartości w danym okresie czasu, przy wykwalifikowanej obsłudze i ustalanych warunkach środowiskowych.

Regeneracja WS w znacznym stopniu wpływa na gotowość systemu przy wykonywaniu określonego zadania jak również na koszty eksploatacyjne systemu. Regeneracja systemu może być przeprowadzana dwoma sposobami:

- profilaktycznie /planowo/;
- dorywczo-poprawkowo /nieplanowo/.

Profilaktyczne regeneracje /strojenie, regulacja, czyszczenie, smarowanie itp czynności/ przeciwdziałają uszkodzeniom, t.zn. zabezpieczają ciągłe funkcjonowanie.

Profilaktyczna regeneracja przewiduje również wymianę węzłów i elementów, które posiadają graniczne wartości parametrów.

Dorywczo-poprawkową regenerację przeprowadza się przy uszkodzeniach systemu. Wtedy reguluje się parametry systemu lub zamienia detale, które uległy uszkodzeniu, względnie powodują niedopuszczalne zmiany parametrów systemu w czasie pracy.

Regeneracja i niemożliwość regeneracji są przeciwstawne. Dlatego podobnie jak w przypadku bezawaryjności systemu, zasadnicze równanie regeneracji ma postać:

$$P_N + Q_N = 1$$

/2.5/

Regenerację systemu określa się dwoma grupami zasadniczych czynników: Pierwszą grupę stanowią czynniki odnoszące się do schematu i konstrukcji systemu jak: złożoność systemu, wzajemna zamienność oddzielnych węzłów i bloków, konstrukcyjne wyposażenie systemu dla ułatwienia obsługi, dostęp do oddzielnych elementów i tp. czynniki.

Analiza każdego z tych czynników przedstawia bardzo złożone zadania.

Druga grupa składa się z eksploatacyjnych czynników takich jak: doświadczenie, przygotowanie i sztuka obsługi przez personel, metodyka kontroli systemu, właściwość zaopatrywania w części zamienne itp.

Większość czynników określających regenerację systemu trudno określić ilościowo a tym bardziej eksperymentalnie. Dlatego systemy należy tak projektować aby wykluczyć w maksymalnym stopniu czynniki niemożliwe do oceny.

Regenerację można usprawniać idąc w trzech kierunkach:

- a/ wmontowywanie w system kontrolnej aparatury lub zastosowanie specjalnych testerów;
- b/ rozpracowanie metod kontroli i wyposażenie w elementy do okresowej wymiany tych, których parametry w znacznym stopniu uległy zmianie na skutek starzenia się;
- c/ ponowny podział funkcji wypełnianych przez elementy przy powstaniu uszkodzenia i samostrojenia parametrów systemu.

W tym przypadku strukturę systemu wybiera się w ten sposób, żeby elementy przejmujące na siebie funkcje uszkodzonych elementów /większe obciążenie/ były w stanie zabezpieczyć efektywną pracę systemu do chwili zakończenia wykonywania przez system stojącego zadania. W takim przypadku uszkodzone elementy wymienia się w czasie wykonywania prac profilaktycznych.

Praktyczniejszą i wygodniejszą charakterystyką regeneracji okazuje się przyrost regeneracji.

Pod pojęciem przyrostu regeneracji rozumiemy część usuniętych uszkodzeń w odstępie ustalonego czasu regeneracji z ogólnej ilości występujących w systemie w czasie pracy - t .

Przyrost regeneracji określa się iloczynem prawdopodobieństwa powstania jednego lub więcej uszkodzeń w okresie pracy t , przy czasie t_N potrzebnym na regenerację $/t_N < t /$.

$$\Delta P_N = Q P_N \quad /2.6./$$

Przyrost regeneracji wykorzystuje się przy ocenie niezawodności i gotowości systemu.

Na przykład: w okresie cyklu pracy systemu na skutek zaistnienia uszkodzenia musi wystąpić przerwa w pracy potrzebna na regenerację trwającą - t_N .

Wtedy niezawodność systemu zostanie wyrażona wzorem:

$$R = P + \Delta P_N \quad /2.7./$$

Podstawiając do /2.7/ wartość /2.6/ oraz mając na uwadze wzór /2.3/, otrzymamy równanie niezawodności regeneracji systemu w postaci:

$$R = P + /1 - P/ P_N \quad /2.8/$$

Równanie powyższe poglądowo ilustruje możliwość zabezpieczenia wysokiej niezawodności WS przez podwyższenie bezawaryjności $/P/$ lub regeneracji $/P_N/$.

W czasie opracowania, wykonania i eksploatacji systemu, należy wybrać najbardziej optymalne obydwie wartości.

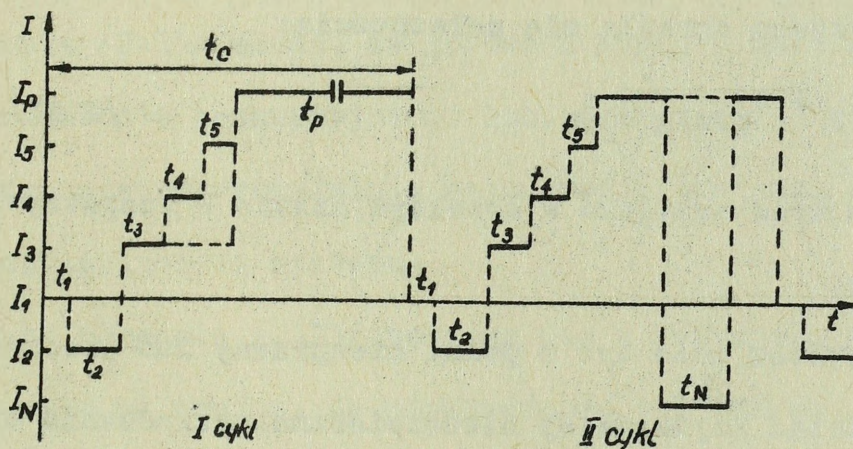
5. Czasowy wykres pracy systemu

Każdy system w zasadzie przez określony czas pracuje nieprzerwanie. Dlatego przeważnie dla WS zgodnie z ich przeznaczeniem ustala się czasowy wykres pracy. Jest on wyrażony jako determinowana funkcja czasowa oraz przypadkowa funkcja czasowa. Czas potrzebny na

przygotowanie jest nieprzypadkową funkcją czasową, a moment włączenia WS. do pracy i wymagany odstęp czasu bezawaryjnej pracy - przypadkowa wartość czasowa.

Może być przypadek, że WS przed włączeniem go do pracy przechodzi okres przygotowawczy: strojenie, sprawdzenie parametrów itp, a następnie występuje stan właściwej pracy. Taki stan systemu może powtarzać się co pewien czas.

Wymagany wykres pracy systemu w czasie może być przedstawiony w postaci cykli roboczych /rys. 2.3/.



Rys. 2.3. Czasowy wykres pracy systemu.

W ogólnym przypadku wymagany cykl pracy może charakteryzować się następującymi stanami systemu:

- 1/ w położeniu włączone I_1 - w czasie t_1 ;
- 2/ w stanie okresowych i profilaktycznych przedsięwzięć I_2 - w czasie t_2 ;
- 3/ nieprzeciążony reżim pracy I_3 - w czasie t_3 , gdy pracuje tylko część schematów systemu;
- 4/ podgrzewanie systemu I_4 - w czasie t_4 ;

- 5/ kontrola systemu I_5 - w czasie t_5 ;
- 6/ stan roboczy systemu I_6 - w okresie czasu t_p ;
- 7/ stan uszkodzenia I_N w odstępie czasu t_N .

Ogólny czas trwania cyklu pracy określa się sumą czasów poszczególnych stanów

$$t_c = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_p. \quad /2.9/$$

W celu uproszczenia obliczeń pewne czynności nazwiemy przygotowaniem systemu do pracy

$$t_{\text{przyg.}} = t_3 + t_4 + t_5 \quad /2.10/$$

Wtedy cykl pracy systemu określa się zależnością:

$$t_c = t_1 + t_2 + t_{\text{przyg.}} + t_p. \quad /2.11/$$

Uszkodzenie systemu może nastąpić w dowolnym czasie w rozpatrywanym przedziale czasowym.

Przy uszkodzeniu, system może być w pełni niesprawny lub pracujący z obniżoną wydajnością. Najbardziej niebezpieczne uszkodzenia systemu są w czasie jego pracy lub nieusunięte uszkodzenia w okresie przygotowawczym do pracy.

W większości przypadków czas regeneracji systemu jest wielkością przypadkową, którą można określić na podstawie rozkładów prawdopodobieństwa /patrz rozdz.III/.

6. Gotowość systemu

Pod gotowością systemu rozumie się prawdopodobieństwo tego, że system w rozpatrywanym momencie czasu jest gotowy do bezbłędnego wypełnienia swego zadania w wyznaczonym okresie czasu.

W statystycznym ujęciu ogólnym wskaźnikiem gotowości jest ilość gotowych do pracy systemów w ustalonym okresie czasu.

W ogólnej postaci gotowość systemu określa się przez prawdopodobieństwo uszkodzeń Q i niemożliwość regeneracji Q_N w/g poniższego wzoru:

$$P_Q = 1 - Q Q_N \quad /2.12/$$

Przyrost regeneracji można również wykorzystać do obliczenia gotowości systemu.

Podstawiając do wzoru /2.12/ wartość prawdopodobieństwa nieregeneracji systemu $Q_N = 1 - P_N$ i wykorzystując wzór /2.6/ otrzymamy:

$$P_Q = 1 - /1 - P_N/ Q = P + \Delta P_N = P + P_N Q \quad /2.13/$$

Z równania /2.13/ widać, że gotowość systemu może być podwyższona kosztem wzrostu bezawaryjności lub regeneracji.

W wypadku nieprzeprowadzania regeneracji systemu, gotowość określa się bezawaryjnością systemu.

Widać, że równanie /2.13/ pokrywa się z równaniem /2.7/. Jednakże należy mieć na uwadze, że niezawodność oblicza się na pewien okres czasu a gotowość - dla ustalonego momentu czasu.

Praktycznie interesuje nas ocena gotowości systemu według ilości uszkodzeń i prawdopodobieństwa ich regeneracji. Jeżeli prawdopodobieństwo powstania określonej liczby uszkodzeń i prawdopodobieństwo usunięcia tych uszkodzeń znamy, to gotowość systemu określimy ze wzoru:

$$P_Q = P + \sum_{i=1}^{\infty} Q_i P_{Ni} \quad /2.14/$$

gdzie:

Q_i - prawdopodobieństwo powstania w systemie i - tego uszkodzenia.

P_{Ni} - prawdopodobieństwo regeneracji i - tego systemu.

Najbardziej pełną gotowość WS można przedstawić na podstawie dynamicznego stanu bezawaryjności i regeneracji co ze względu na wąskie ramy niniejszego opracowania nie będzie omówione.

Rozdział III

MODELE MATEMATYCZNE DLA BADAN NIEZAWODNOCI ORAZ CHARAKTERYSTYKI NIEZAWODNOCI SYSTEMOW

1. Ogólne zasady bezawaryjności systemu.

Czas trwania bezawaryjnej pracy systemu jest wielkością przypadkową. Najbardziej odpowiednimi charakterystykami wielkości przypadkowych są prawa rozkładu.

W teorii prawdopodobieństwa podstawową funkcją rozkładu lub prawem rozkładu wielkości przypadkowej - τ , jest rosnąca funkcja $Q / t /$, wyrażająca prawdopodobieństwo nierówności $\tau < t$.

Jeżeli przypadkowa wielkość τ charakteryzuje moment uszkodzenia elementu, to prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu przedstawia integralną funkcję rozkładu momentów uszkodzenia systemu.

W teorii niezawodność WS w niektórych przypadkach wygodniej nazywać integralną funkcją rozkładu wielkości przypadkowej τ - malejącą funkcją $P / t /$, wyrażającą prawdopodobieństwo nierówności $\tau \geq t$. Jeżeli przypadkowa wielkość τ charakteryzuje czas bezawaryjnej pracy systemu, to bezawaryjność w zależności od wymaganego przedziału czasu pracy systemu przedstawia integralną funkcję rozkładu przedziału czasowego pracy systemu.

Początkowe wartości funkcji $Q / t /$ i $P / t /$ dla systemu który rozpoczynamy eksploatować po wyprodukowaniu i okresie sezonowania w zakładzie produkcyjnym, można określić z następującego warunku: czas bezawaryjnej pracy i moment uszkodzenia elementu są wielkościami dodatnimi.

W początkowym momencie przy $t = 0$ system jest całkowicie sprawny.

Wychodząc z powyższego założenia początkową wartość funkcji $P / t /$

i $Q / t /$ należy przyjąć:

$$P / 0 / = 1 \quad \text{i} \quad Q / 0 / = 0$$

Pochodna funkcji $Q /t/$ daje gęstość prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu $\varphi /t/$, a pochodna funkcji $P /t/$ - gęstość prawdopodobieństwa przedziału czasu bezawaryjnej pracy systemu - $\rho /t/$.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ(t)}{dt} &= \varphi(t) \\ \frac{dP(t)}{dt} &= \rho(t) \\ \varphi(t) &= -\rho(t) \end{aligned} \right\} \quad /3.1/$$

Gęstość prawdopodobieństwa jest odwrotnie proporcjonalna do czasu - i w zależności od tego w jakiej wielkości wyrażono t może być: 1/godz; 1/min itd.

Gęstość prawdopodobieństwa $\varphi /t/$ wyraża częstotliwość z jaką oddzielne systemy łącznie, które zaczęto eksploatować w momencie $t = 0$ będą miały uszkodzenia w przedziale czasu $t, t + \Delta t$.

Biorąc pod uwagę to, że funkcja $\rho /t/$ jest ujemna, wskazanym będzie przy obliczaniu posługiwać się z integrowaną funkcją rozkładu czasu bezawaryjnej pracy systemu t.j. bezawaryjnością $P /t/$ lub prawdopodobieństwem uszkodzenia - $Q /t/$ i gęstością prawdopodobieństwa uszkodzenia systemu $\varphi /t/$.

Jeżeli znane są funkcje $P /t/$ lub $Q /t/$ to łatwo określić bezawaryjność systemu w wymaganym okresie czasu pracy t.j. w przedziale czasu od 0 do t_{wp} .

$$\left. \begin{aligned} P &= P(t_{wp}) \\ Q &= \int_0^{t_{wp}} \varphi(t) dt \\ P &= 1 - \int_0^{t_{wp}} \varphi(t) dt = \int_{t_{wp}}^{\infty} \varphi(t) dt \end{aligned} \right\} \quad /3.2./$$

Z funkcji $P /t/$ i $\Psi /t/$ nie można bezpośrednio ocenić wpływu poprzedniego okresu eksploatacji systemu na bezawaryjność przy jego dalszej eksploatacji.

Obecnie wyprowadzimy wzór dla oceny bezawaryjności systemu, który przepracował czas α w jakimś dodatkowym przedziale czasowym t .

Wprowadzimy pojęcie względnej gęstości prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu $\Lambda /t/$ - przedstawiającej chwilową częstotliwość uszkodzeń systemu w momencie czasu t przy założeniu braku uszkodzeń systemu w chwili czasu $- t$.

Znajdziemy związek między względną gęstością prawdopodobieństwa $\Lambda /t/$ a rozpatrywanymi powyżej charakterystykami: bezawaryjnością $P /t/$ i gęstością prawdopodobieństwa uszkodzenia systemu $\Psi /t/$.

Dla większej pogładowości wykorzystamy podstawową zależność iloczyn prawdopodobieństwa. Oznaczmy przez A zdarzenie sprzyjające, polegające na tym, że w przedziale czasu od 0 do t nie wystąpi uszkodzenie systemu, a przez B zdarzenie polegające na pojawieniu się uszkodzenia systemu w przedziale czasu $t_1 t + \Delta t$.

Wówczas prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu w przedziale czasowym $t_1 t + \Delta t$ przedstawia prawdopodobieństwo równoczesnego wystąpienia zdarzeń A i B co według zależności iloczynu określa się wzorem:

$$P /A \cdot B/ = P /A/ \cdot P /B/A/$$

/3.3/

gdzie: $P(B/A)$ - umowne prawdopodobieństwo t.zn. prawdopodobieństwo pojawienia się zdarzenia B przy warunku, że zaistniało zdarzenie A.

Ponieważ prawdopodobieństwo pojawienia się dwóch i więcej uszkodzeń w przedziale czasowym $t, t + \Delta t$ jest małe, to czynniki mnożenia można przedstawić następująco:

$$\begin{aligned} P(A \cdot B) &= \varphi(t) dt \\ P(A) &= P(t) = 1 - Q(t) \\ P(B/A) &= \Lambda(t) dt \end{aligned} \quad /3.4/$$

Podstawiając wzory /3.4/ do wyrażenia /3.3/ otrzymamy:

$$\Lambda(t) e^{t} = \frac{\varphi(t) dt}{P(t)} = \frac{\varphi(t) dt}{1 - Q(t)} \quad /3.5/$$

Korzystając z wyrażenia /3.5/ określimy bezawaryjność systemu w czasie t po okresie czasu α jaki poprzednio przepracował system. W tym celu scałkujemy wyrażenie /3.5/

$$\int_{\alpha}^{\alpha+t} \Lambda(\tau) d\tau = \int_{\alpha}^{\alpha+t} \frac{\varphi(\tau) d\tau}{1 - Q(\tau)}$$

Biorąc pod uwagę, że

$$\varphi(\tau) d\tau = dQ(\tau) = -dP(\tau)$$

otrzymamy:

$$\begin{aligned} - \int_{\alpha}^{\alpha+t} \Lambda(\tau) d\tau &= \int_{\alpha}^{\alpha+t} \frac{dP(\tau)}{P(\tau)} \quad /3.6/ \\ - \int_{\alpha}^{\alpha+t} \Lambda(\tau) d\tau &= \ln P(\tau) \Big|_{\alpha}^{\alpha+t} \end{aligned}$$

określimy prawą stronę równania

$$\ln P(\tau) \Big|_{\alpha}^{\alpha+t} = \ln \frac{P(\alpha+t)}{P(\alpha)} \quad /3.7/$$

Zależność pod znakiem logarytmu naturalnego w/g wzoru względnego prawdopodobieństwa można napisać w następującej postaci:

$$P(t/\alpha) = \frac{P(\alpha+t)}{P(\alpha)} \quad /3.8/$$

Funkcja $P(t/\alpha)$ określa bezawaryjność systemu w przedziale czasu $\alpha, \alpha+t$ przy warunku, że system przepracował okres α .

Funkcja $P(t/\alpha)$ może być określona wzorem:

$$P(t/\alpha) = e^{-\int_{\alpha}^{\alpha+t} \lambda(\tau) d\tau} \quad 3.9$$

Jest to wzór dla oceny bezawaryjności systemu, który przepracował czas w dodatkowym przedziale czasowym t .

W szczególnym przypadku gdy $\alpha = 0$ t.zn. dla nowego systemu według wzoru /3.9/ można ocenić bezawaryjność systemu dla przedziału czasowego od 0 do t .

Wzór ten przyjmuje wtedy postać:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad /3.10/$$

W ten sposób względna gęstość prawdopodobieństwa czasu uszkodzeń systemu stała się wygodną charakterystyką pozwalającą w powiązaniu z wzorem /3.9/ dać ocenę bezawaryjności systemu w zależności od wymaganego przedziału, czasem pracy systemu z uwzględnieniem poprzedniego okresu eksploatacji systemu.

Oprócz tego, jak zobaczymy to dalej, zastosowanie względnej gęstości prawdopodobieństwa $/t/$ znacznie upraszcza obliczanie bezawaryjności systemu gdy znana jest bezawaryjność elementów.

Do oceny bezawaryjności elementów, która w większości wypadków oznacza niezawodność elementów wykorzystuje się zależności między rozpatrzonymi charakterystykami bezawaryjności analogicznie do otrzymanych powyżej.

W teorii niezawodności względne prawdopodobieństwo czasu uszkodzenia często nazywa się intensywnością uszkodzenia lub niebezpieczeństwem uszkodzenia systemu, przyrządu lub elementu. Intensywność uszkodzeń ma wymiar $1/t$ a często $1/\text{godz}$.

Koniecznym jest wyprowadzenie zależności między względną i bezwzględną intensywnością uszkodzeń równoznaczną z zależnością /3.8/ dla bezawaryjności.

Intensywność uszkodzeń można wyrazić jako stosunek ilości systemów niesprawnych, w małym przedziale czasowym Δt do ilości sprawnych systemów na początku rozpatrywanego przedziału t .

Założmy, że poddaliśmy badaniom N - systemów. W związku z tym dla małego przedziału Δt można napisać:

$$\Lambda(t + \Delta t/\alpha) = \frac{N[Q(\alpha + t + \Delta t) - Q(\alpha + t)]}{\Delta t N[1 - Q(\alpha + t)]}$$

przechodząc do przedziału czasu gdy Δt dąży do zera otrzymamy:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Lambda(t + \Delta t/\alpha) &= \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(\alpha + t + \Delta t) - Q(\alpha + t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{1 - Q(\alpha + t)} \quad /3.11/ \\ \Lambda(t/\alpha) &= \frac{\psi(\alpha + t)}{1 - Q(\alpha + t)} = \frac{\psi(\alpha + t)}{P(\alpha + t)} \end{aligned}$$

Z powyższego widać, że intensywność uszkodzeń systemu, który uprzednio przepracował odcinek czasu można określić wzorem:

$$\Lambda(t/\alpha) = \Lambda(\alpha + t) \quad /3.12/$$

Podobnie jak wprowadziliśmy intensywność uszkodzeń - wprowadzimy pewność uszkodzenia.

Pewność uszkodzenia przedstawia się stosunkiem gęstości prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia do prawdopodobieństwa uszkodzenia:

$$\mu(t) = \frac{\varphi(t)}{Q(t)} \quad /3.13/$$

W rozważaniach powyższych bezawaryjność systemu określiliśmy intensywnością uszkodzeń, obecnie prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu określimy pewnością uszkodzenia, całkując wyrażenie /3.13/ w przedziale od t do ∞ .

$$\int_t^{\infty} \mu(\tau) d\tau = \int_t^{\infty} \frac{dQ(\tau)}{Q(\tau)}$$
$$\int_t^{\infty} \mu(\tau) d\tau = \ln Q(\tau) \Big|_t^{\infty}$$

Pewność uszkodzenia bezpośrednio charakteryzuje bezawaryjność systemu. podobnie jak to było przy gęstości prawdopodobieństwa wzór 3.2.

$$-\int_t^{\infty} \mu(\tau) d\tau = \ln Q(t)$$
$$Q(t) = e^{-\int_t^{\infty} \mu(\tau) d\tau} \quad /3.14/$$

Analizując powyższe wzory dochodzimy do związku między podstawowymi charakterystykami bezawaryjności systemu to znaczy: bezawaryjnością $P(t)$, prawdopodobieństwem uszkodzenia $Q(t)$, gęstością prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia $\varphi(t)$, gęstością prawdopodobieństwa przedziałów czasu bezawaryjnej pracy $\rho(t)$, intensywnością uszkodzeń $\Lambda(t)$ i pewnością uszkodzeń $\mu(t)$.

$$\left. \begin{aligned} a). P(t) \cdot \Lambda(t) - Q(t) \mu(t) &= 0 \\ b). \varphi(t) &= \frac{\Lambda(t) - \mu(t)}{\Lambda(t) + \mu(t)} \\ c). \Lambda(t) + \mu(t) &= \frac{\varphi(t)}{P(t) Q(t)} \\ d). \varphi(t) &= P(t) \Lambda(t) = Q(t) \cdot \mu(t) \\ e). \Lambda(t) \cdot \mu(t) &= \frac{[\varphi(t)]^2}{P(t) \cdot Q(t)} \\ f). \Lambda(t) &= - \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} \\ g). \mu(t) &= \frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{dQ(t)}{dt} \end{aligned} \right\} /3.15/$$

Przy ocenie niezawodności WS oprócz charakterystyk przedstawiających funkcje czasowe bezawaryjnej pracy, wygodnie jest posługiwać się także wieloma współczynnikami niezawodności o których będzie mowa w punkcie 6 niniejszego rozdziału.

Dla dokładnej analizy niezawodności WS należy znać nie tylko dane statystyczne o uszkodzeniach systemów ale również teoretyczne prawa rozkładu czasu bezawaryjnej pracy i czasu regeneracji systemu.

Teoretyczny rozkład czasu bezawaryjnej pracy systemu będziemy nazywać prawem bezawaryjności. Na przykład jeżeli rozkład przedziałów czasowych bezawaryjnej pracy systemu odpowiada eksponencjalnej /exp/ funkcji, to można mówić o eksponencjalnym prawie bezawaryjności systemu itd.

2. Wykładniczy /eksponencjalny/ rozkład bezawaryjności.

Eksponencjalny rozkład czasu bezawaryjnej pracy stosuje się do analizy WS, które były poddane sezonowaniu [6] a także dla systemów pracujących w ciężkich warunkach atmosferycznych i pod działaniem mechanicznym obciążeń. Eksponencjalny rozkład jest charakterystyczny zwłaszcza dla uszkodzeń skokowych.

Podstawowymi charakterystykami bezawaryjności przy eksponencjalnym rozkładzie są:

a/ bezawaryjność systemu;

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t} \quad /3.16/$$

gdzie Λ - parametr rozkładu

b/ prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu;

$$Q(t) = 1 - e^{-\Lambda \cdot t} \quad /3.17/$$

c/ gęstość prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu;

$$\varphi(t) = \Lambda \cdot e^{-\Lambda \cdot t} \quad /3.18/$$

d/ intensywność uszkodzeń

$$\Lambda(t) = \frac{\varphi(t)}{P(t)} = \Lambda \quad /3.19/$$

Tc, że intensywność uszkodzeń nie zależy od czasu /t/ jest podstawową właściwością eksponencjalnego rozkładu:

e/ funkcja pewności uszkodzeń

$$\mu(t) = \frac{\varphi(t)}{Q(t)} = \Lambda \cdot \frac{e^{-\Lambda \cdot t}}{1 - e^{-\Lambda \cdot t}} = \frac{\Lambda}{e^{\Lambda \cdot t} - 1} \quad /3.20/$$

Charakterystyki bezawaryjności przy rozkładzie eksponencjalnym

przedstawiono na rys. 3.1.

Dla rozkładu eksponencjalnego spełnione są warunki początkowe:

$$P / 0 / = 1$$

$$Q / 0 / = 0$$

Można wykazać, że nadzieja matematyczna M i średni błąd kwadratowy są zgodne z parametrem rozkładu

$$M = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad /3.21/$$

Początkowy moment drugiego rzędu eksponencjalnego rozkładu

$$\alpha_2 = \int_0^{\infty} t^2 e^{-\lambda \cdot t} dt = 2 \cdot \frac{1}{\lambda} = 2M^2 \quad /3.22/$$

Średni błąd kwadratowy czasu uszkodzenia systemu δ określimy wzorem

$$\delta = \sqrt{\alpha^2 - M^2} = M = \frac{1}{\lambda} \quad /3.23/$$

Stosunek nadziei matematycznej czasu bezawaryjnej pracy do średniego błędu kwadratowego dla eksponencjalnego rozkładu jest równy jedności

$$K = \frac{M}{\delta} = 1$$

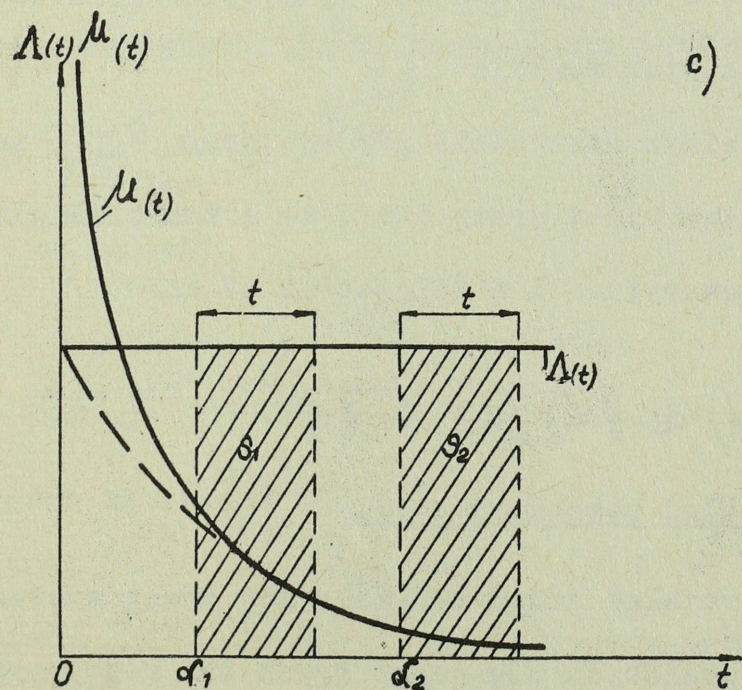
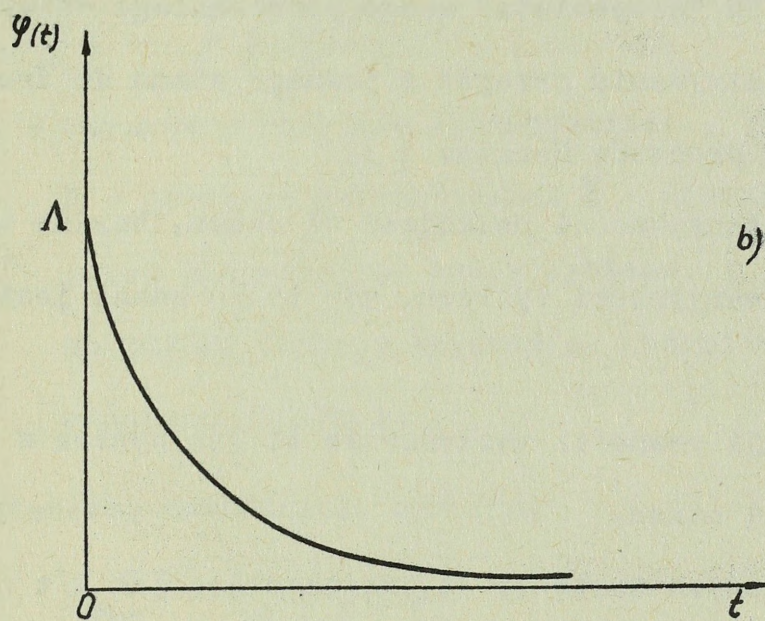
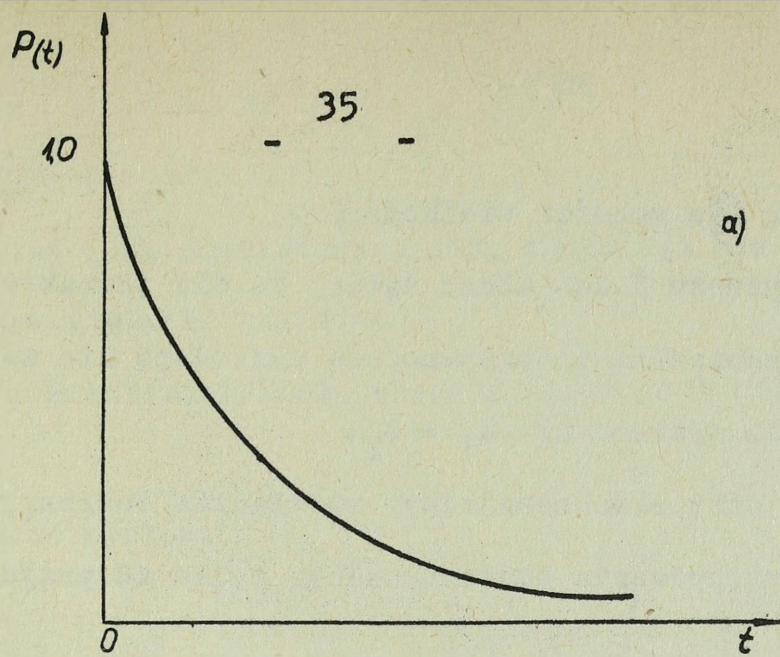
Ten przypadek jest przydatny przy orientacyjnej ocenie możliwości systemu, dzięki zastosowaniu aproksymacji statystycznych danych o uszkodzeniach korzystając z rozkładu eksponencjalnego.

Podstawową zaletą tego rozkładu jest to, że intensywność uszkodzeń $\lambda / t /$ jest wielkością stałą i stanowi odwrotność średniego czasu bezawaryjności pracy systemu.

Przeanalizujemy wpływ poprzedniego działania /pracy lub konserwacji/ systemu na jego bezawaryjność przy dalszej eksploatacji. Załóżmy, że system przepracował do rozpatrywanego momentu

α - godzin. W tym celu należy wyliczyć przedział zgodnie z wzorem /3.9/.

$$P(t/\alpha) = e^{-\int_{\alpha}^{\alpha+t} \lambda dt} = e^{-\lambda t} \quad /3.24/$$



Rys. 3.1. Charakterystyki bezawaryjności przy rozkładzie eksponencjalnym.

W otrzymany wzór nie wchodzi wielkość α .

Oprócz tego z wykresu 3.lc. widać także, że dla jednakowych wartości t powierzchnia ograniczona intensywnością uszkodzeń nie zależy od czasu użytkowania systemu np. $S_1 = S_2$.

Widać z tego że przy eksponencjalnym rozkładzie bezawaryjności systemu w przyszłości, uszkodzenia systemu zależą tylko od przyczyn przypadkowych.

Oznacza to, że WS "niepamięta" swego poprzedniego działania, w wyniku czego przy rozpatrywaniu przejść z jednego stanu do drugiego należy stosować teorię procesów Markowa [3].

Niezależność intensywności uszkodzeń od czasu, bardzo upraszcza obliczenia bezawaryjności systemu, gdy tylko znana jest bezawaryjność elementów.

Co zaś do funkcji pewności uszkodzenia to jak wynika z wzoru /3.20/ jest ona funkcją czasu.

Przy czym dla małych wartości t ma przebieg jak $1/t$ a dla dużych wartości t przebiega jak gęstość prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu t.zn. jak funkcja $\Lambda e^{-\Lambda \cdot t}$

Przy eksponencjalnym rozkładzie gdy wielkość t/M jest mała albo średni czas bezawaryjnej pracy duży, to można posługiwać się liniową zależnością bezawaryjności w zależności od czasu

$$P(t) \approx 1 - \frac{t}{M} = 1 - \Lambda t$$

/3.25/

3. Normalny rozkład bezawaryjności.

Normalny rozkład czasu bezawaryjnej pracy systemu stosuje się przy wolno zmieniających się parametrach lub gdy przypadkowa część skokowych uszkodzeń jest całkowicie mała, t.zn. dla systemów pracujących w sprzyjających warunkach eksploatacji.

Normalny rozkład jest charakterystyczny zwłaszcza dla wolnozmiennających się /starzeniowych/ uszkodzeń.

Podstawowymi charakterystykami bezawaryjności przy normalnym rozkładzie są:

a/ bezawaryjność systemu

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(\tau-M)^2}{2\delta^2}} d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(\tau-M)^2}{2\delta^2}} d\tau \quad /3.25/$$
$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-M}{\delta}\right)$$

gdzie: M, δ - parametry rozkładu a mianowicie:

M - nadzieja matematyczna, δ - średni błąd kwadratowy czasu bezawaryjnej pracy systemu, $\Phi\left(\frac{t-M}{\delta}\right)$ - normowana funkcja Laplace'a, której wartości podano w załączniku Nr 1;

b/ prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu;

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t-M}{\delta}\right) \quad /3.26/$$

c/ gęstość prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\delta^2}} \quad /3.27/$$

d/ intensywność uszkodzeń

$$\Lambda(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta} \cdot \frac{e^{-\frac{(t-M)^2}{2\delta^2}}}{0,5 - \Phi\left(\frac{t-M}{\delta}\right)} \quad /3.28/$$

e/ funkcja pewności uszkodzeń

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta} \cdot \frac{e^{-\frac{(t-M)^2}{2\delta^2}}}{0,5 + \Phi\left(\frac{t-M}{\delta}\right)} \quad /3.29/$$

Z podanych wzorów /3.25 - 3.29/ widać, że normalny rozkład przedziałów czasu prawidłowej pracy można stosować dla oceny bezawaryjności systemu w tym przypadku gdy nadzieja matematyczna czasu

bezawaryjnej pracy /M/ jest znacznie większa od średniego błędu kwadratowego

$$M \gg \delta$$

Wtedy spełniony jest warunek początkowy że:

$$P /0/ = 1$$

$$Q /0/ = 0.$$

Gdy nie jest spełniony warunek początkowy o czas $t > 0$, to dane statystyczne mogą być aproksymowane rozkładem zbliżonym do normalnego, a podstawowe charakterystyki bezawaryjności będzie można otrzymać po wprowadzeniu sprowadzonej gęstości prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu.

Ta sprowadzona gęstość $\varphi' /t/$ musi odpowiadać podstawowej właściwości gęstości prawdopodobieństwa $\varphi /t/$, a mianowicie: wielkość przedziału od gęstości do wszystkich możliwych wartości zmiennej całkowania powinna być równa jedności. Ten warunek można spełnić odrzucając wartości funkcji gęstości dla $t < 0$ i odpowiednio zwiększając współrzędne funkcji, t.zn. zmieniając układ.

W ten sposób sprowadzona funkcja gęstości prawdopodobieństwa będzie się równała:

$$\varphi'(t) = k \varphi(t) \quad /3.30/$$

Znajdziemy wartość współczynnika k, wychodząc z tego, że winien być spełniony warunek:

$$\int_0^{\infty} \varphi'(t) dt = \int_0^k \varphi(t) dt = 1 \quad /3.31/$$

stąd współczynnik zmiany współrzędnych gęstości prawdopodobieństwa

$$k = \frac{1}{\int_0^{\infty} \varphi(t) dt} = \frac{1}{1 - \int_0^{\infty} \varphi(t) dt} \quad /3.32/$$

a sprowadzona funkcja gęstości równa się

$$\varphi'(t) = \frac{\varphi(t)}{1 - \int_0^{\infty} \varphi(t) dt} \quad /3.33/$$

Przy normalnym rozkładzie - bezawaryjność systemu w znacznym stopniu zależy od poprzedniego działania systemu /wielkość / . Wynika to z tego, że intensywność uszkodzeń wzrasta z upływem czasu /rys.3.2.c/. Jeżeli oznaczymy zakreśloną na rys. 3.2.c. powierzchnie wyrażeniem:

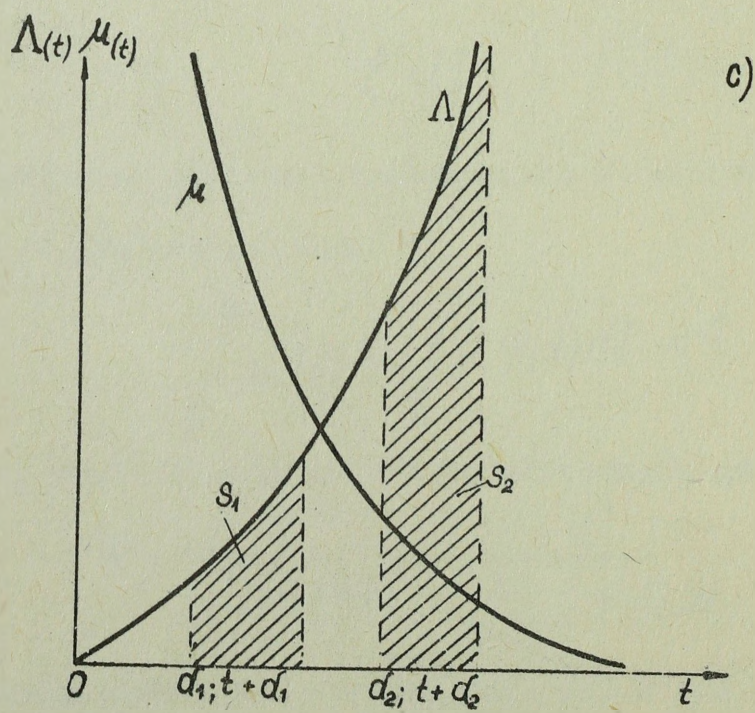
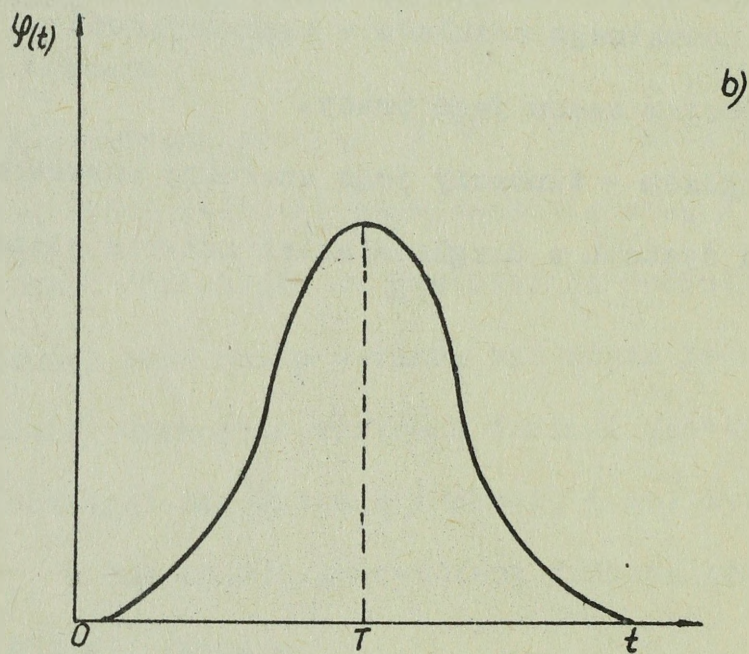
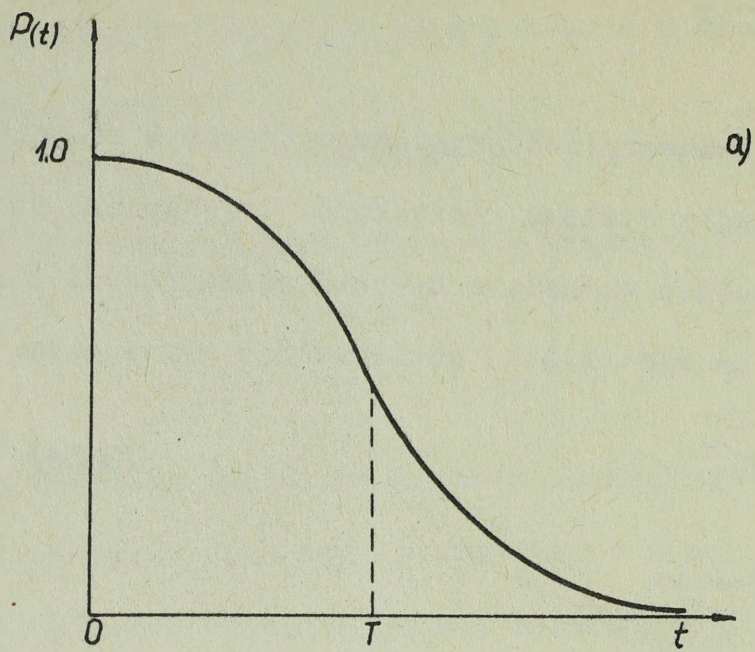
$$S = \int_{\alpha}^{\alpha+t} \Lambda(\tau) d\tau \quad /3.34/$$

to $S_1 < S_2$, będzie równocześnie

$$P(t/\alpha_1) > P(t/\alpha_2)$$

Wynika stąd wniosek, że dla normalnego rozkładu - bezawaryjność systemu szybko maleje ze wzrostem czasu jego pracy.

Ta właściwość normalnego rozkładu - tłumaczy jego szerokie zastosowanie dla oceny bezawaryjności systemu z uwzględnieniem zużycia elementów.



Rys. 3.2. Charakterystyki bezawaryjności przy rozkładzie normalnym.

4. Rozkład bezawaryjności w oparciu o funkcję Gamma.

W praktyce inżynierskiej funkcja Gamma / Γ / jest często wykorzystywana do określenia rozkładu czasu uszkodzeń systemów elektronicznych jak i mechanicznych, zwłaszcza w procesie udoskonalania systemów stosując rezerwowanie elementów.

Podstawowymi charakterystykami bezawaryjności w tym przypadku są:

a/ gęstość prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu;

$$\varphi(t) = \frac{1}{(\gamma-1)! M_1} \cdot \left(\frac{t}{M_1}\right)^{\gamma-1} e^{-\frac{t}{M_1}} \quad /3.35/$$

gdzie γ , M_1 - parametry rozkładu.

b/ prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu;

$$Q(t) = \frac{1}{(\gamma-1)! M_1} \int_0^t \left(\frac{\tau}{M_1}\right)^{\gamma-1} e^{-\frac{\tau}{M_1}} d\tau \quad /3.36/$$

c/ bezawaryjność systemu;

$$P(t) = e^{-\frac{t}{M_1}} \sum_{i=0}^{\gamma-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{t}{M_1}\right)^i \quad /3.37/$$

gdy wartość /3.37/ przedstawimy do /3.36/ otrzymamy wzór na

Q /t/ w postaci:

$$Q(t) = 1 - \sum_{i=0}^{\gamma-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{t}{M_1}\right)^i e^{-\frac{t}{M_1}} \quad /3.38/$$

d/ intensywność uszkodzeń

$$\Lambda(t) = \frac{1}{(\gamma-1)! M_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{M_1}\right)^{\gamma-1}}{\sum_{i=0}^{\gamma-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{t}{M_1}\right)^i} \quad /3.39/$$

e/ funkcja pewności uszkodzeń;

$$\mu(t) = \frac{1}{(\gamma-1)! M_1} \left(\frac{t}{M_1}\right)^{\gamma-1} \frac{e^{-\frac{t}{M_1}}}{1 - e^{-\frac{t}{M_1}} \sum_{i=0}^{\gamma-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{t}{M_1}\right)^i} \quad /3.40/$$

Rozkład bezawaryjności w/g funkcji Γ odpowiada początkowym warunkom $P / 0 / = 1$ i $Q / 0 / = 0$.

Nadzieję matematyczną najwygodniej obliczyć posługując się gęstością prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia

$$M = \frac{1}{(\gamma-1)!} \int_0^{\infty} \left(\frac{t}{M_1}\right)^{\gamma} e^{-\frac{t}{M_1}} dt \quad /3.41/$$
$$M = \frac{\gamma! M_1}{(\gamma-1)!} = \gamma M_1$$

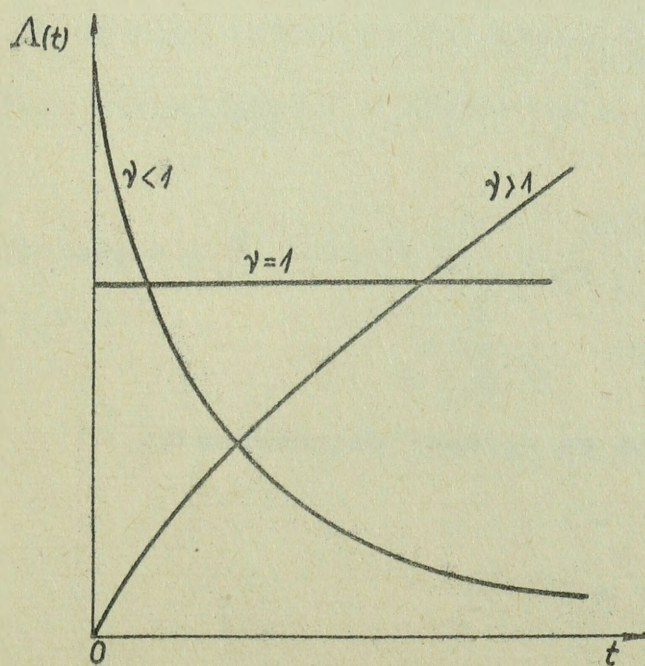
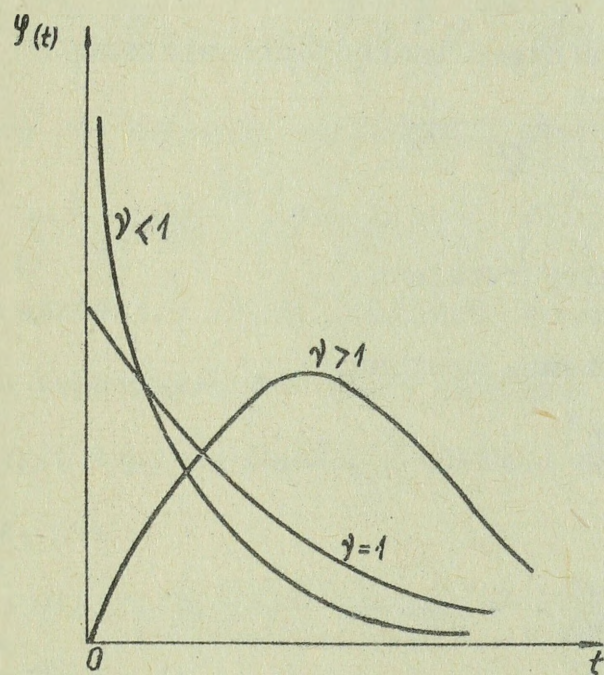
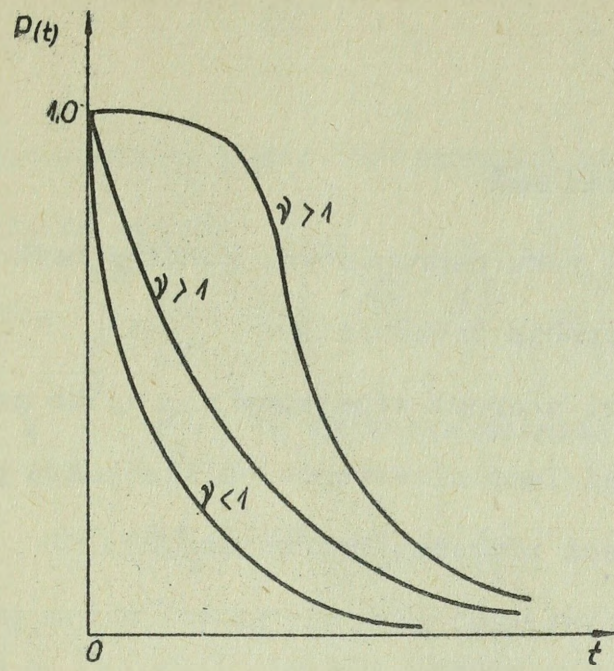
Należy pamiętać, że M_1 dla rozkładu Γ jest parametrem i nie odpowiada nadziei matematycznej M .

Dobierając odpowiednie parametry γ i M_1 rozkładu, można otrzymać różny stopień wpływu poprzedniego okresu eksploatacji na bezawaryjność systemu w przyszłości.

Dla $\gamma > 1$ intensywność uszkodzeń wzrasta /Rys.3.3.c/, przy $\gamma = 1$ jest stała a dla $\gamma < 1$ maleje.

Poszczególne charakterystyki bezawaryjności w oparciu o funkcję gamma pokazano na rys. 3.3.

Z powyższego wynika, że w przypadku gdy $\gamma = 1$ rozkład Γ sprowadza się do rozkładu eksponencjalnego a przy $\gamma > 1$ zbliża się do rozkładu normalnego.



Rys. 3.3. Rozkład bezawaryjności w oparciu o funkcję gamma.

5. Rozkład bezawaryjności Weibulla

Wallodi Weibull w 1951 roku zaproponował rozkład uszkodzeń lamp próżniowych poddanych próbie trwałości.

Obecnie rozkład Weibulla jest szeroko stosowany nie tylko przy badaniu charakterystyk bezawaryjności lamp elektronowych ale także przy badaniu wytrzymałości i długotrwałości urządzeń mechanicznych.

Podstawowymi charakterystykami bezawaryjności w tym przypadku są:

a/ gęstość prawdopodobieństwa czasu uszkodzenia systemu;

$$\varphi(t) = \frac{\gamma t^{\gamma-1}}{M_1} e^{-\frac{t^\gamma}{M_1}} \quad /3.42/$$

gdzie: M_1 i γ - parametry rozkładu.

b/ prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu;

$$Q(t) = 1 - e^{-\frac{t^\gamma}{M_1}} \quad /3.43/$$

c/ bezawaryjność systemu;

$$P(t) = e^{-\frac{t^\gamma}{M_1}} \quad /3.44/$$

d/ intensywność uszkodzeń;

$$\Lambda(t) = \frac{\gamma t^{\gamma-1}}{M_1} \quad /3.45/$$

e/ funkcja pewności uszkodzeń

$$\mu(t) = \frac{\gamma t^{\gamma-1}}{M_1} \frac{1}{e^{-\frac{t^\gamma}{M_1}} - 1} \quad /3.46/$$

Dla tego rozkładu spełnione są warunki początkowe:

$$P(0) = 1$$

$$Q(0) = 0$$

Nadzieję matematyczną czasu bezawaryjnej pracy systemu oblicza się przez wyliczenie całki:

$$M = \int_0^{\infty} \frac{\gamma t^{\gamma-1}}{M_1} \cdot e^{-\frac{t^\gamma}{M_1}} dt$$

oznaczając $x = \frac{t^\gamma}{M_1}$, to nadzieja matematyczna przyjmie postać:

$$M = M_1^{\frac{1}{\gamma}} \Gamma\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad /3.47/$$

gdzie $\Gamma\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)$ jest funkcją gamma.

$$\Gamma\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{\gamma}} e^{-x} dx$$

W analogiczny sposób można wyliczyć i średni błąd kwadratowy

$$\sigma^2 = M_1^{\frac{2}{\gamma}} \left[\Gamma\left(\frac{2}{\gamma} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \right] \quad /3.48/$$

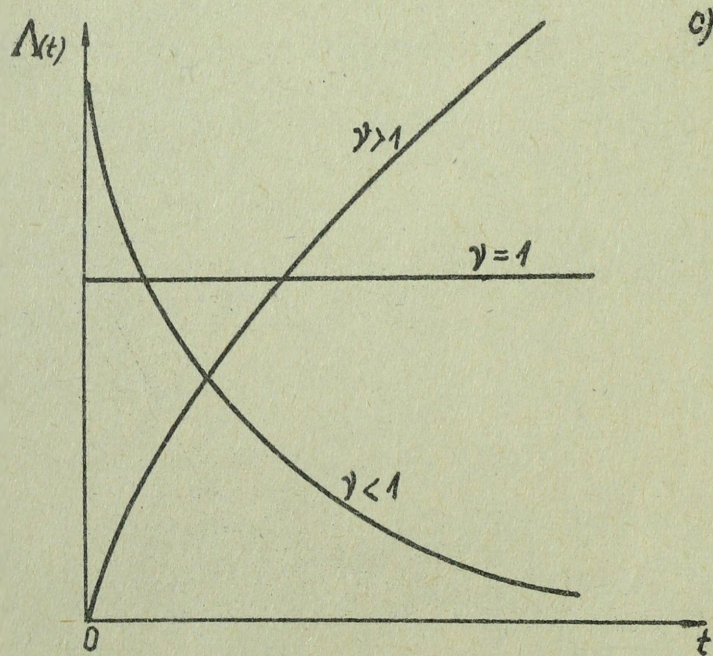
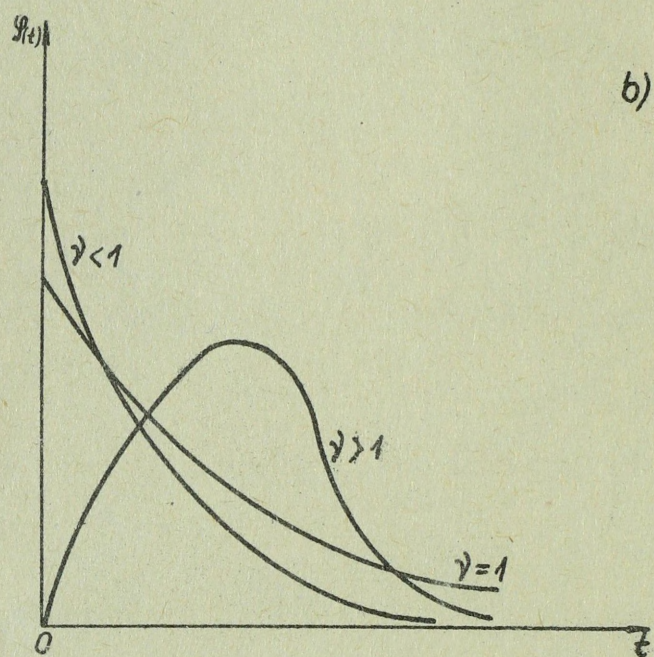
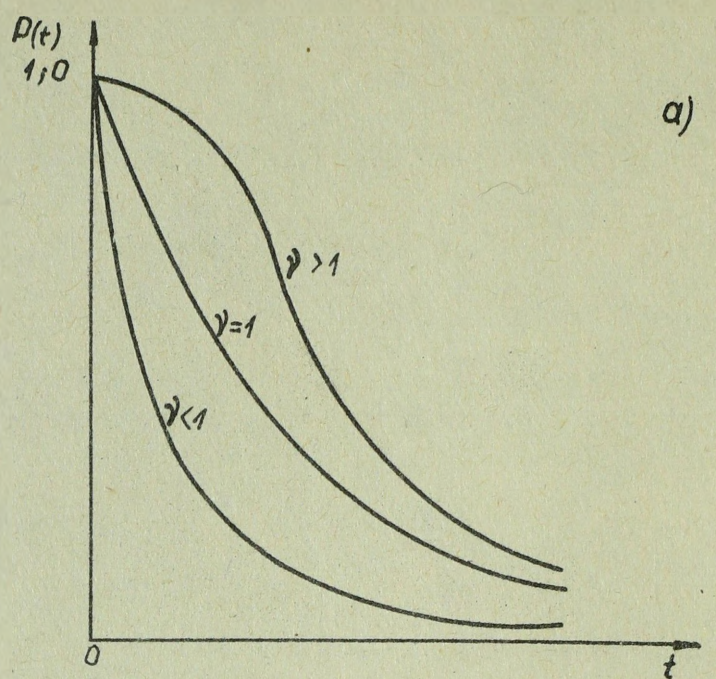
Jak widać z wyrażenia /3.47/ parametr M_1 nie jest nadzieją matematyczną czasu bezawaryjności pracy systemu.

Charakterystyki bezawaryjności w oparciu o rozkład Weibulla przedstawiono na rys. 3.4.

Z rys. 3.4c. widać, że przy wartości $\gamma = 1$ otrzymujemy przebieg jak w wypadku rozkładu eksponencjalnego.

Ze wzrostem γ stopień wpływu poprzedniego okresu eksploatacji systemu na jego bezawaryjność w czasie dalszej eksploatacji silnie narasta.

Normalnie współczynnik γ zmienia się od 1 do 2 a dla lamp próżniowych wynosi 1,7.



Rys. 3.4. Charakterystyki bezawaryjności przy rozkładzie Weibulla.

6. Ilościowe charakterystyki niezawodności.

W punktach od 1 do 5-go niniejszego rozdziału omówiono najbardziej dogodnie charakterystyki oceny niezawodności WS, analizując je w/g kilku modeli matematycznych takich jak: rozkład normalny, eksponencjalny, Weibulla i oparty o funkcję gamma.

W praktycznej działalności często spotykamy się z wieloma charakterystykami i współczynnikami określającymi ilościowo niezawodność systemu. W niniejszym punkcie omówimy z nich te, które są najczęściej spotykane.

a. Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy - $P(t)$.

Pod pojęciem prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy systemu rozumiemy prawdopodobieństwo tego, że system będzie posiadał wszystkie parametry w granicach tolerancji w okresie pewnego określonego czasu i przy określonych warunkach eksploatacji.

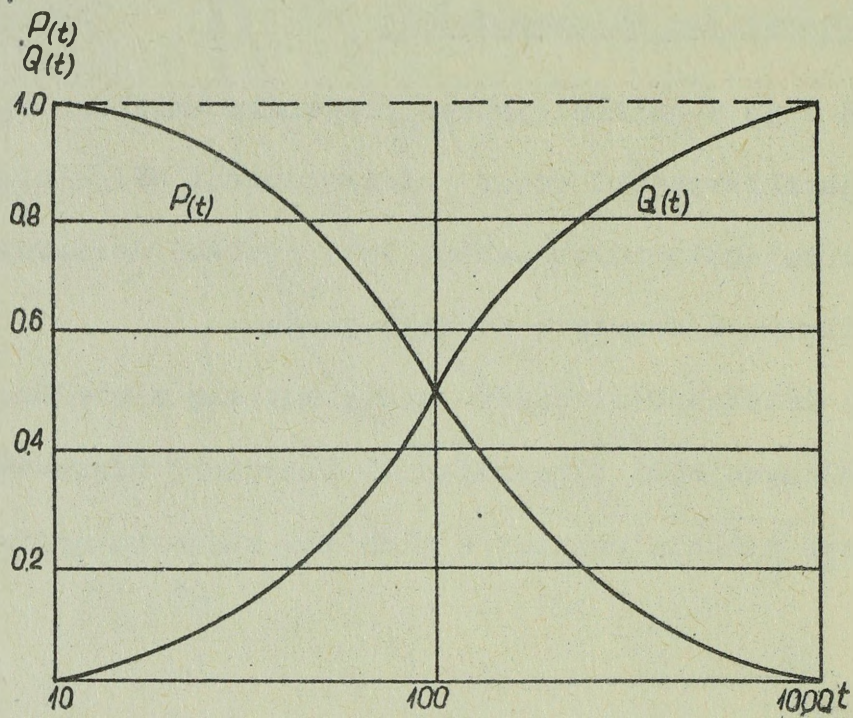
Prawdopodobieństwo sprawnej pracy można określić zależnością:

$$0 \leq P(t) \leq 1$$

. /3.49/

Przy początkowej wartości $P(0) = 1$ i $Q(0) = 0$ oraz końcowej wartości $P(\infty) = 0$ i $Q(\infty) = 1$ przy czym zawsze jest spełnione równanie /2.3/. Gdzie $Q(t)$ - oznacza prawdopodobieństwo uszkodzenia.

Na rys.3.5 przedstawiono zależności $P(t)$ i $Q(t)$ przy normalnym rozkładzie bezawaryjności.



Rys. 3.5. Rozkład prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy $P(t)$ i prawdopodobieństwa uszkodzenia w funkcji czasu.

b. Średni czas międzyawaryjny - T_{sr}

Średni czas międzyawaryjny - odpowiada nadziei matematycznej czasu sprawnej pracy.

Średni statystyczny czas sprawnej pracy - T_{sr} można obliczyć ze wzoru:

$$T_{sr} \approx \frac{\sum_{i=1}^N t_{pi}}{n_i} = \frac{T_{pi}}{n_i} \quad /3.50/$$

gdzie: t_{pi} - czas sprawnej pracy i-tego systemu

N - liczba badanych systemów

n_i - liczba uszkodzeń i-tego systemu.

Średni czas sprawnej pracy jest jedną z najbardziej poglądowych ilościowych charakterystyk niezawodności. Według tej wartości można wnioskować o niezawodności elementów i systemów, zgrubnie określać ilość zapasowych elementów w celu zabezpieczenia pracy w określonym dłuższym terminie i tp.

Wadą tej charakterystyki T_{sr} jest to, że jako nadzieja matematyczna przypadkowej wartości, nie w pełni charakteryzuje czas sprawnej pracy. W celu dostatecznie pełnego zobrazowania tej charakterystyki należy znać oprócz średniego statystycznego czasu sprawnej pracy jeszcze odchylenia - δ od wartości T_{sr} . Mając t.zw. przedział ufności możemy określić rzeczywisty średni czas międzyawaryjny - $T_{sr}^{/r/}$ /patrz lit. poz. 6 punkt 3/.

Średni czas sprawnej pracy wygodny jest do oceny niezawodności zwłaszcza prostych elementów, których po uszkodzeniu nie remontuje się t.j. takich jak: oporniki, kondensatory, lampy elektronowe itp.

c. Średni czas między dwoma sąsiednimi uszkodzeniami - t_{sr} .

Średni czas między dwoma sąsiednimi uszkodzeniami nazywa się nadzieją matematyczną czasu sprawnej pracy systemu między jednym a drugim uszkodzeniem.

Przybliżony średni czas między dwoma sąsiednimi uszkodzeniami - t_{sr} badanego systemu może być wyliczony ze wzoru

$$t_{sr} \approx \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{n} \quad /3.51/$$

gdzie: t_{pi} - czas sprawnej pracy badanego systemu między $i - 1$ a i -tym uszkodzeniem.

n - ilość uszkodzeń w czasie prób t .

Jeżeli badania przeprowadza się z kilkoma systemami to

$$t_{sr} \approx \frac{\sum_{i=1}^N t_{sr i}}{N} \quad /3.52/$$

gdzie: $t_{sr.i}$ - średni czas sprawnej pracy między dwoma sąsiednimi uszkodzeniami i -tego systemu obliczony wg wzoru /3.51/.

N - liczba systemów poddanych badaniom.

Średni czas sprawnej pracy między sąsiednimi uszkodzeniami jest jednym z poglądowych charakterystyk niezawodności.

d. Awaryjność - λ /t/.

Awaryjność można określić jako ilość uszkodzonych systemów /urządzeń, elementów/ w jednostce czasu w stosunku do średniej liczby sprawnie pracujących w danym przedziale czasu.

Awaryjność uszkodzenia λ /t/ oblicza się z wzoru

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N(t) \Delta t} \quad /3.53/$$

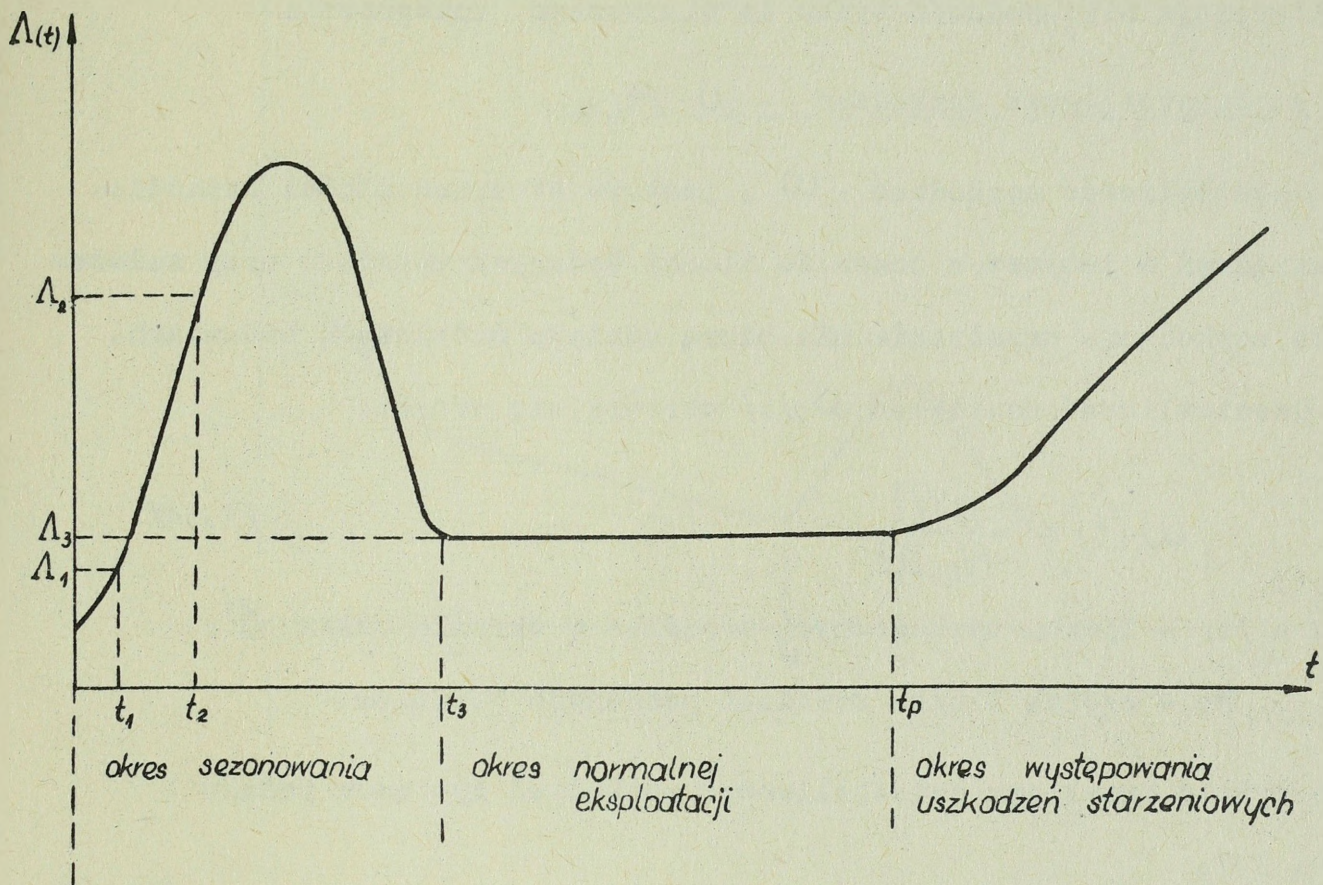
gdzie: $n/t/$ - liczba uszkodzonych systemów w okresie czasu Δt .

$$N(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}$$

gdzie: N_{i-1} - liczba sprawnie pracujących systemów na początku czasu Δt .

N_i - liczba sprawnie pracujących systemów w końcu czasu Δt .

Awaryjność większości elementów zmienia się w czasie jak to pokazano na rys. 3.6.



Rys. 3.6. Zmiana awaryjności w zależności od czasu t

Przedział I charakteryzuje się dużą zmianą awaryjności uszkodzeń. Tłumaczy się to tym, że w początkowym okresie eksploatacji ulegają uszkodzeniom elementy mające wady ukryte - wewnętrzne. W przedziale II awaryjność jest prawie stała [patrz lit. poz. 6 punkt 2]. Przedział III charakteryzuje się narastaniem uszkodzeń spowodowanych zużyciem się elementów /starzeniem/.

Awaryjność - $\lambda / t /$ jest zasadniczą ilościową charakterystyką niezawodności prostych elementów. Przy pomocy charakterystyk awaryjności poszczególnych elementów można najprościej ilościowo scharakteryzować niezawodność WS. Krzywe $\lambda / t /$ należy wykorzystywać do oceny niezawodności elementów i systemów, których nie remontuje się.

W systemach pracujących po wymianie uszkodzonych elementów awaryjność charakteryzuje niezawodność tylko do pierwszego uszkodzenia.

e. Częstotliwość uszkodzeń - ω /t/.

Częstotliwość uszkodzeń - ω , jest to stosunek ilości uszkodzonych urządzeń w jednostce czasu do ilości badanych urządzeń przy założeniu, że uszkodzone urządzenia nie biorą udziału w dalszych badaniach.

Częstotliwość uszkodzeń ω /t/ określa się wzorem:

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N_0 \Delta t} \quad /3.54/$$

gdzie: n /t/ - liczba uszkodzonych urządzeń w okresie czasu Δt .

N_0 - ogólna liczba urządzeń poddanych badaniom.

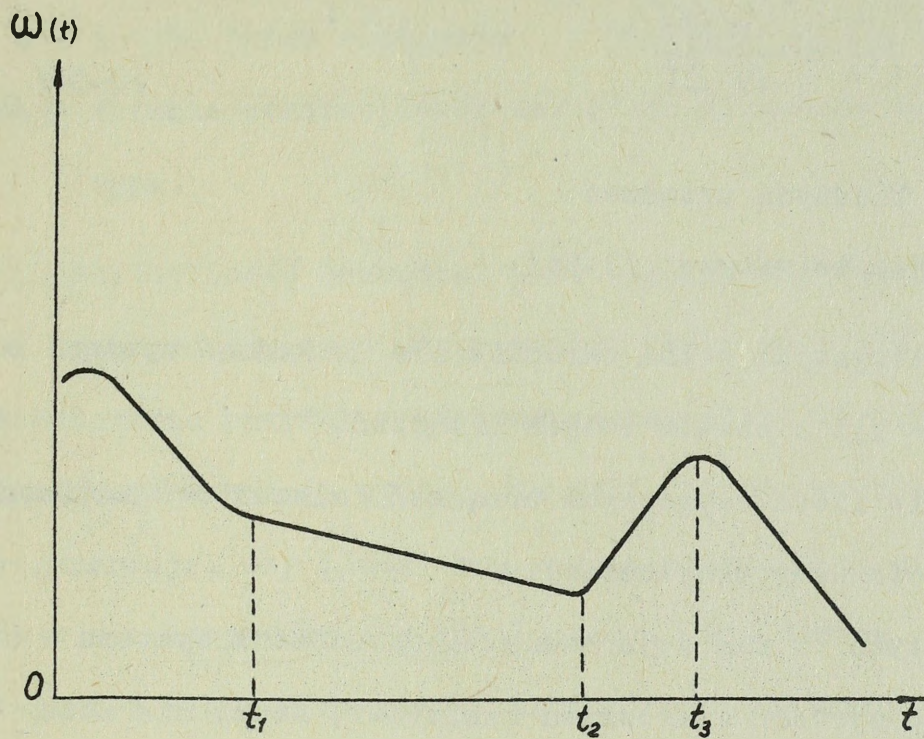
Typowy wykres przebiegu częstotliwości uszkodzeń systemów podano na rys. 3.7.

Krzywa ta posiada trzy charakterystyczne okresy podobnie jak charakterystyka awaryjności.

Zaletą tej charakterystyki jest to, że wg jej wartości można sądzić o ilości urządzeń które mogą wyjść z eksploatacji za jakiś określony czas. Powyższa charakterystyka jest szczególnie przydatna do oceny niezawodności systemu w okresie pracy bojowej.

f. Średnia częstotliwość uszkodzeń - ω_{sr} .

Średnia częstotliwość uszkodzeń - ω_{sr} jest to stosunek ilości uszkodzonych urządzeń w jednostce czasu do ogólnej ilości badanych urządzeń, przy założeniu, że wszystkie uszkodzone urządzenia zamienia się nowymi, to znaczy ilość badanych urządzeń nie ulega zmianie w okresie całego badania.



Rys.3.7. Wykres częstotliwości uszkodzeń w funkcji czasu- t

Srednią częstotliwość uszkodzeń określa się wzorem:

$$\omega_{sr}(t) = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} \quad /3.55/$$

gdzie: N - liczba badanych urządzeń.

n, Δt - jak we wzorze /3.54/.

Według tej charakterystyki można określić ile uszkodzeń wystąpi w okresie od t do t + Δt z powodu i-tych urządzeń.

To pozwoli określić ilość zapasowych urządzeń /elementów/ koniecznych do normalnej długotrwałej eksploatacji.

Charakterystyka ta nie daje oceny niezawodności systemu w czasie pracy bojowej, np. systemu kierowania rakietami, który nie może działać w okresie trwania uszkodzenia. Należy zaznaczyć, że jeżeli nie występuje starzenie elementów i $\lambda = \text{const}$, to średnia częstotliwość uszkodzeń równa się awaryjności

$$\omega_{sr}(t) = \lambda(t) = \text{const.}$$

co bezpośrednio wynika z wzorów /3.53/ i /3.55/

g. Sumaryczna częstotliwość uszkodzeń = Λ /t/.

Sumaryczna częstotliwość uszkodzeń - jest to ilość uszkodzeń systemu w jednostce czasu przypadająca na jeden egzemplarz.

Wartość tę określamy ze wzoru

$$\Lambda(t) = \frac{n(t)}{\Delta t} \quad /3.56/$$

gdzie: n - ilość uszkodzeń systemu w czasie Δt .

t - czas sprawnej pracy systemu.

Przy określaniu Λ /t/ uszkodzone elementy wymienia się lub remontuje i system dalej się bada. W wypadku gdy system składa się z szeregu elementów to

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^m N_i \omega_{sr i}(t) \quad /3.57/$$

gdzie: N_i - liczba elementów i-tego typu w systemie

m - liczba typów elementów

$\omega_{sr i}$ - średnia częstotliwość uszkodzeń elementów i-tego typu.

Sumaryczna częstotliwość uszkodzeń jest wygodną charakterystyką niezawodności urządzeń długiego użytkowania, które mogą być remontowane.

Przedstawione powyżej ilościowe charakterystyki niezawodności nie w pełni charakteryzują system, na przykład nie podają czasu potrzebnego na regenerację, czy ilości koniecznych przeglądów i remontów w ustalonym okresie eksploatacji itp. danych.

Z tego też względu do oceny niezawodności WS wprowadzono jeszcze szereg współczynników, z których kilka omówimy poniżej.

h. Współczynnik profilaktyki - K_{pr}

Współczynnik profilaktyki określamy jako stosunek ilości godzin zużytych na wykonanie prac profilaktycznych i remonty systemu do ilości godzin sprawnej pracy wziętej w tym samym okresie czasu /tydzień, m-c lub rok/ t.j.

$$K_{Pr} = \frac{t_{pr} + t_N}{t_p} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pr i} + t_{Ni}}{\sum_{i=1}^n t_{pi}} \quad /3.58/$$

Współczynnik profilaktyki uwzględnia nie tylko niezawodność systemu, ale także jakość eksploatacji, podatność na remont itp. Tę charakterystykę wykorzystuje się przy planowaniu roboczo-godzin na remonty i prace profilaktyczne.

i. Współczynnik efektywności profilaktyki - K_{epr}

Współczynnik efektywności profilaktyki określa skuteczność wszystkich przedsięwzięć profilaktycznych. Współczynnik K_{epr} określa się z zależności:

$$K_{epr} = \frac{m}{m+n} \quad /3.59/$$

gdzie: m - ilość uszkodzeń usuniętych w czasie przeprowadzania prac profilaktycznych,

n - ilość uszkodzeń powstałych w czasie pracy systemu.

Czym ten współczynnik jest większy, tym na wyższym poziomie była przeprowadzona profilaktyka. Świadczy to o stosowaniu skuteczniejszych metod przewidywania uszkodzeń.

j. Współczynnik częstotliwości profilaktyki - K_{ω}

Współczynnik częstotliwości profilaktyki - K_{ω} jest to stosunek ilości remontów i ilości przeglądów wymagających przestoju systemu do jego sprawnej pracy oraz z czasem zużytych na remonty i prace profilaktyczne, t.j.

$$K_{\omega} = \frac{n + m}{t_p + t_s} \quad /3.60/$$

gdzie: n - ilość remontów

m - ilość przeglądów profilaktycznych

t_p - czas sprawnej pracy

$t_{\Sigma} = t_{pr} + t_N$ - czas zużyty na profilaktykę i czasy zużyte na remont.

k. Współczynnik przestoju - K_p

Współczynnik przestoju systemu określa się jako stosunek sumarycznej ilości godzin potrzebnych na wykrycie i usunięcie zaistniałych uszkodzeń / T_{Σ} / do ogólnego czasu bezawaryjnej pracy systemu, w ciągu określonego czasu długotrwałej eksploatacji.

$$K_p = \frac{T_{\Sigma}}{T_p} \quad /3.61/$$

l. Współczynnik gotowości - K_g

Współczynnik gotowości systemu określa się jako stosunek czasu sprawnej pracy do ogólnego czasu sprawnej pracy i wymuszonego

przeestoju wziętego na pewien okres t.j.

$$K_G = \frac{T_p}{T_p + T_N} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{Ni}} \quad /3.62/$$

Współczynnik gotowości i współczynnik przeestoju związane są między sobą zależnością

$$K_G = 1 - K_p \quad /3.63/$$

l. Współczynnik uszkodzeń - K_{NN}

Współczynnik uszkodzeń określa się jako stosunek liczby uszkodzeń systemu spowodowanych uszkodzeniami jednego typu elementów do ogólnej liczby uszkodzeń powstałych w systemie.

Współczynnik K_{NN} określa się wyrażeniem:

$$K_{NN} = \frac{n_i}{n} \quad /3.64/$$

Współczynnik uszkodzeń elementów pozwala wyciągnąć wnioski co do niezawodności i celowości podwyższenia jej jeżeli chodzi o niektóre elementy. Ten współczynnik określa bezwzględną niezawodność elementów. Współczynnik ten nie uwzględnia ilości elementów w systemie. Z tego też względu nie można wg niego wnioskować o niezawodności elementów. W związku z powyższym wprowadzono pojęcie współczynnika uszkodzeń uwzględniającego ilość elementów.

m. Względny współczynnik uszkodzeń - K_{NW}

Względny współczynnik uszkodzeń określa się wzorem:

$$K_{NW} = \frac{\frac{n_i}{N_i}}{\frac{n}{N}} = \frac{n_i N}{n N_i} \quad /3.65/$$

gdzie: n_i - ilość uszkodzeń systemu spowodowana uszkodzeniami i-tego elementu

n - ogólna ilość uszkodzeń systemu

N_i - liczba elementów i-tego typu w systemie.

N - ogólna liczba elementów w systemie.

Ponieważ powyższa charakterystyka niezawodności uwzględnia ilość elementów w systemie, to wg jej wielkości można wnioskować o niezawodności poszczególnych elementów jak również o niezawodności całego systemu.

n. Współczynnik zużycia elementów = K_e

Współczynnik zużycia elementów w systemie określa się stosunkiem ilości wymienionych elementów spowodu uszkodzeń oraz w okresie prac profilaktycznych za pewien dłuższy okres eksploatacji /m-c,rok/ do ogólnej ilości tego typu elementów w systemie.

Współczynnik zużycia lub często zwany rozchodowania elementów - K_e określa się wzorem:

$$K_e = \frac{n_i + N_i}{N_i \Delta t} \quad /3.66/$$

gdzie: n_i - ilość wymienionych elementów i-tego typu spowodu uszkodzenia

N_i - ilość elementów i-tego typu wymienionych w procesie profilaktyki.

N_i - ogólna ilość i-tych elementów w systemie.

t - czas w okresie którego dokonano badań.

Dużą zaletą tej charakterystyki jest to, że wg jej wartości można wnioskować o wymaganej ilości elementów potrzebnych do zabezpieczenia normalnej eksploatacji w pewnym określonym czasie.

o. Współczynnik kosztów eksploatacji - K_c

Współczynnik kosztów eksploatacji określa się jako stosunek kosztów eksploatacji jednego egzemplarza systemu w ciągu roku do kosztów wyprodukowania tego systemu.

$$K_c = \frac{C_e}{C} \quad /3.67/$$

Wszystkie wyżej omówione współczynniki mogą być wykorzystane do oceny niezawodności systemu w okresie jego eksploatacji /a nie pracy bojowej/.

Między wyżej wymienionymi ilościowymi charakterystykami istnieją następujące zależności [9]:

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad /3.68/$$

$$T_{sr} = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad /3.69/$$

$$\omega(t) = \frac{-dP(t)}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad /3.70/$$

$$K_{NN} = N_i \frac{\omega_{sr i}(t)}{\Lambda(t)} \quad /3.71/$$

$$K_{pr} = t_{\Sigma} \Lambda(t) \quad /3.72/$$

$$K_p = \Lambda \frac{t_{\Sigma sr}}{1 + \Lambda t_{\Sigma sr}} \quad /3.73/$$

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^m N_i \omega_{sr i}(t) \quad /3.74/$$

$$K_G = \frac{1}{1 + \Lambda t_{\Sigma sr}} \quad /3.75/$$

gdzie: t_{Σ} - średni czas wymuszonego przestoju /remont, profilaktyka/

N_i - ilość elementów i-tego typu w systemie

N - ogólna ilość elementów w systemie

m - ilość typów elementów

Jeżeli przyjąć, że sezonowanie systemu zakończono w czasie do t_3 /rys. 3.6/, a w czasie pracy bojowej nie zachodzi starzenie elementów, oczywiście w sensie krótkotrwałym, to awaryjność elementów będzie stała /odcinek t_3 do t_p na rys. 3.6/. Przy $\lambda = \text{const}$ zależności między poszczególnymi ilościowymi charakterystykami niezawodności w okresie pracy bojowej mają postać:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= \exp(-\lambda t) \\ T_{sr} &= \frac{1}{\lambda} \\ \omega(t) &= \lambda e^{-\lambda t} \\ K_{NN} &= N_i \frac{\lambda_i}{\lambda} \\ K_{NW} &= N \frac{\lambda_i}{\lambda} \end{aligned} \right\} /3.76/$$

Podane powyżej równania /3.76/ są słuszne tylko w tym wypadku gdy w systemie mają miejsce tylko uszkodzenia skokowe.

W wypadku występowania uszkodzeń spowodowanych przekroczeniem tolerancji parametrów wyjściowych, zależności /3.76/ są niesłuszne.

W okresie dłuższej eksploatacji systemu występują uszkodzenia na skutek normalnego zużywania się elementów. Wtedy uszkodzenia występują według rozkładu normalnego. Ocena niezawodności systemu wg tej czy innej ilościowej charakterystyki zależy od tego jaka strona niezawodności najbardziej nas interesuje w konkretnym przypadku.

Rozdział IV.

WPEŁYW WARUNKÓW EKSPLOATACJI I REZIMÓW PRACY
NA NIEZAWODNOŚĆ SYSTEMÓW

1. Ogólna charakterystyka warunków pracy wielkich systemów.

Jak już wspomniano w rozdziale II pkt 1 wielki system w całości jak i jego oddzielne elementy w czasie eksploatacji znajdują się pod działaniem różnych czynników, które będziemy nazywać - obciążeniami.

Charakterystyczną cechą elektronowych systemów w porównaniu do systemów mechanicznych jest większa różnorodność obciążeń działających na ten pierwszy.

Według zjawisk fizycznych, obciążenia można podzielić na następujące zasadnicze grupy:

- a/ obciążenia mechaniczne - wibracje, stale działające przyspieszenia, udarność;
- b/ obciążenia klimatyczne - temperatura, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne, promieniowanie słoneczne, pył, piasek;
- c/ obciążenia elektryczne - prąd, napięcie, moc;
- d/ obciążenie radioaktywne - promieniowanie gamma / γ / , prąd neutronów.

Obciążenia mechaniczne.

Obciążenia mechaniczne działają na systemy pracujące na ruchomych obiektach takich jak aparaty latające, elektrowozy, okręty itp. Oprócz tego obciążenia mechaniczne występują w czasie transportu a także przy eksploatacji.

Wielkość obciążeń mechanicznych dla różnych warunków pracy podaję w tabeli Nr41.

Tabela Nr41.

Rodzaj obiektu	wibracje	Przyspieszenia stałe	udarność
Okrety	$f = 0 \div 60 \text{ Hz}$ $h = 2,5 \text{ mm}$ $a = 10 \text{ g}$	$a = / 1 \div 3 / \text{ g}$	$a = / 15 \div 30 / \text{ g}$
Samoloty tłokowe	$f = 0 \div 200 \text{ Hz}$ $h = 1,5 \text{ mm}$ $a = 7 \text{ g}$	podłużne $a_x = / 2 \div 3 / \text{ g}$ poprzeczne $a_y = / 0,5 \div 1 / \text{ g}$ pionowe $a_z = / 1 - 3 / \text{ g}$	$a = 15 \text{ g}$
Samoloty odrzutowe	$f = 0 \div 2000 \text{ Hz}$ $h = 1,8 \text{ mm}$ $a = 8 \text{ g}$	$a_x = / 4 \div 6 / \text{ g}$ $a_y = / 0,5 \div 1,5 / \text{ g}$ $a_z = / 2 \div 4 / \text{ g}$	$a = / 15 \div 30 / \text{ g}$
Samochody	$f = 2 \div 15 \text{ Hz}$ $h = 3 \text{ mm}$	$a = 0 \div 3 \text{ g}$	Przy upadku na beton z wysokości $l = 0,8 \text{ m}$.
Transport kolejowy	$f = 4 \div 20 \text{ Hz}$ $h = 3 \text{ mm}$	$a = 0 \div 3 \text{ g}$	Przy upadku na beton z wysokości $l = 0,8 \text{ m}$.

Uwaga: f - częstotliwość wibracji

h - amplituda wibracji

a - przyspieszenia

l - wysokość

Dane w tabeli Nr 4.1 charakteryzują obciążenia mechaniczne działające na cały system.

Co zaś się tyczy obciążeń mechanicznych działających na oddzielne elementy, to występuje duża różnorodność wielkości.

Obciążenia mechaniczne powodują następujące uszkodzenia charakterystyczne:

- 1/ przenoszenie poślizgów i obrotów na inne podzespoły i elementy;
- 2/ obrywanie elementów;
- 3/ obłuzowania spoin;
- 4/ niszczenie włókien żarzenia w lampach elektronowych;
- 5/ stuki styczników;
- 6/ zwarcia na krótko między przewodami i detalami;
- 7/ rozwieranie normalnie zwartych styków;
- 8/ zwieranie normalnie rozwartych styków;
- 9/ uszkodzenie uzwojeń transformatorów;
- 10/ zniszczenia elementów konstrukcji.

Obciążenia klimatyczne .

Obciążenia klimatyczne działające na WS zależą od położenia geograficznego w którym pracuje system a także od warunków pracy systemu /stacjonarne, polowe i tp/ .

Posługując się uproszczoną klasyfikacją geograficznych obszarów kuli ziemskiej w zależności od ilościowych wartości obciążeń klimatycznych, możemy wydzielić cztery zasadnicze klimaty:

- chłodny;
- umiarkowany;
- gorący suchy /pustynny/;
- gorący wilgotny /tropikalny/.

Klimat chłodny - charakteryzuje się w okresie większości czasu ujemną temperaturą - /50 - 55/°C. W ^{nie}w których rejonach średnia temperatura wynosi - 70°C, a minimalna - 87°C. /np. radzieckie stacje obserwacyjne na Antarktydzie/. W innym rejonie tego klimatu maksymalna temperatura dochodzi do + 40°C, a średnia temperatura wynosi około + 30°C. Widać z tego, że w strefie klimatu chłodnego występują duże wahania temperatur. Amplituda tych wahań dochodzi do 100°C. Średnia maksymalna wilgotność równa się 80% przy temperaturze + 20°C. Możliwa jest znacznie większa wilgotność, co przy dużych wahaniami temperatur doprowadza do oblodzenia elementów systemu pracującego na otwartej przestrzeni.

Klimat umiarkowany - posiada średnią ujemną temperaturę - 30°C, a minimalną ujemną - 45°C. Średnia dodatnia temperatura dochodzi do + 35°C, a maksymalna może przekroczyć + 45°C. Względna wilgotność przy temperaturze + 20°C wynosi 80 %, ale możliwy jest wzrost wilgotności nawet powyżej 90 % przy temperaturze + 20°C.

Klimat pustynny - cechują właściwości takie jak: wysoka temperatura, mała wilgotność powietrza oraz nagłe w ciągu doby i roku wahania temperatury.

Najwyższa średnia temperatura wynosi + 40°C, a maksymalna temperatura może osiągnąć + 55°C. Minimalna ujemna temperatura wynosi - 17°C. Wahania temperatur w okresie doby dochodzą do 50°C. Średnia względna wilgotność wynosi 20 % przy temperaturze + 20°C.

Dla większości rejonów suchej strefy charakterystyczne jest wysokie

zapylenie atmosfery oraz duży poziom radiacji.

Klimat tropikalny - charakteryzuje się wysoką wilgotnością powietrza, przy podwyższonej temperaturze. Roczne wahania temperatur na obszarach w tym klimacie są mniejsze od wahań dobowych. Średnia maksymalna temperatura wynosi $+ 30^{\circ}\text{C}$, a rzadko dochodzi do $+ 45^{\circ}\text{C}$. Minimalna temperatura w niektórych rejonach tego klimatu może osiągnąć $- 10^{\circ}\text{C}$. Średnia względna wilgotność wynosi 80 % - 95%. Natomiast maksymalna względna wilgotność osiąga 98 % przy temperaturze $+ 35^{\circ}\text{C}$.

W klimacie tropikalnym jest duża ilość osadu. Ciśnienie atmosferyczne w tej samej szerokości geograficznej, przy różnych klimatach mało ulega zmianom. Natomiast w zależności od wysokości nad poziomem morza znacznie ulegają zmianie: temperatura, wilgotność i ciśnienie. Jest to spowodowane realizacją słońca.

W rezultacie działania obciążeń klimatycznych uszkodzenia WS posiadają następujący charakter:

- 1/ zmiana wartości stałych elektrycznych /RLC itp/;
- 2/ rozmiększanie izolacji;
- 3/ obniżanie elastyczności izolacji;
- 4/ zmiana trwałości konstrukcji elementów;
- 5/ utrata właściwości smarujących, a tym samym wzrost tarć mechanicznych;
- 6/ krótkie zwarcia spowodowane pogorszeniem się izolacji powietrza /ze wzrostem wysokości/.

Z powyższego widać, że obciążenia klimatyczne mają bardzo ujemny wpływ na pogorszenie się niezawodności systemu.

Obciążenia elektryczne.

Obciążenia elektryczne są określane najczęściej dla elementów, rzadziej dla podzespółów czy systemu.

Wielkość obciążenia elektrycznego zależy od dokładności schematu elektrycznego oraz od konstrukcji schematu. Obciążenia elektryczne określa reżim pracy elementu.

Dla większości elementów elektrycznych ustala się nominalne wartości obciążenia elektrycznego. Reżimy pracy elementów często charakteryzuje się współczynnikami:

Współczynnik obciążenia prądowego K_I , który wyraża się stosunkiem działającego prądu na element I_d , do jego nominalnej wartości I_n

$$K_I = \frac{I_d}{I_n} \quad /4.1/$$

Współczynnik obciążenia napięciowego - K_u , który wyraża się stosunkiem napięcia przyłożonego do elementu U_d , do jego nominalnej wartości U_n .

$$K_u = \frac{U_d}{U_n} \quad /4.2/$$

Współczynnik obciążenia względem mocy - K_w , który wyraża się stosunkiem mocy działającej na nadany element do mocy nominalnej

$$K_w = \frac{W_d}{W_n} \quad /4.3/$$

Charakterystycznymi uszkodzeniami powstającymi w wyniku działania obciążeń elektrycznych są:

- 1/ krótkie zwarcia elementów spowodowane przebiciami;
- 2/ obrywanie się elementów na skutek przepaleń.

Wielkości obciążeń elektrycznych w dużym stopniu zależą od reżimów pracy systemu.

W ustalonym reżimie pracy, rzeczywista wartość obciążenia jest bliska wartości obliczonej i winna być mniejsza od nominalnej, dlatego współczynnik obciążenia jest mniejszy od jedności.

W przejściowych reżimach wielkość obciążenia może wielokrotnie przewyższać nawet wartość nominalną. Wtedy współczynnik obciążenia jest większy od jedności. Taki przypadek występuje w momencie włączania i wyłączania WS. W tych właśnie momentach pojawia się największa ilość uszkodzeń systemu.

Obciążenia radioaktywne.

Radioaktywne promieniowanie ma miejsce w wypadku zastosowania w urządzeniach WS napędu termojądrowego. Jak wykazują dane przedstawione w pracy [20], największy wpływ /w sensie ujemnym/ na systemy elektroniczne mają neutrony i promieniowanie gamma. Przy ocenie wpływu termojądrowego promieniowania na poszczególne rodzaje elementów WS, w pierwszym rzędzie określa się wpływ realizacji czyli dopuszczalną dawkę radiacji.

Oprócz wyżej rozpatrzonych obciążeń, na bezawaryjną pracę WS mają wpływ również czynniki biologiczne /patrz lit.6 pkt 7/, a wśród nich szczególnie pleśń. W wyniku działania pleśni ulegają zmianie charakterystyki elektryczne, maleje wytrzymałość materiału itp.

Z powyższego rozpatrzenia warunków pracy WS wynika, że pracują one w warunkach bardzo złożonego kompleksu obciążeń. Analitycznie wszystkich obciążeń nie można rozpatrzeć, gdyż niektóre z nich charakteryzują się kilkoma parametrami. W związku z tym analizę upraszcza się, zakładając dla każdego elementu główne obciążenia. W tym celu przeprowadzimy klasyfikację obciążeń nie według ich fizycznych właściwości w przyrodzie, ale wg wpływu na system lub

oddzielny element.

Wychodząc z powyższego wydzielimy trzy grupy obciążeń:

- a/ obciążenia naprężeniowe;
- b/ obciążenia katalityczne;
- c/ obciążenia pasywne.

Obciążenia naprężeniowe.

Obciążenia naprężeniowe występują gdy element lub system jest w naprężeniu. Naprężenia występują pod działaniem obciążeń mechanicznych lub elektrycznych. Obciążenia naprężeniowe wywołują uszkodzenia w tym przypadku, gdy będą przekraczały dopuszczalne wartości.

Obciążenia katalityczne.

Obciążenia katalityczne same sobą niepowodują naprężeń w elementach lub w systemie, a więc bez naprężeń niepowstają uszkodzenia. Jednakże obciążenia katalityczne zmieniają wytrzymałość materiałów lub pogarszają fizyczne, chemiczne lub elektryczne parametry. Do tej grupy zakwalifikujemy obciążenia klimatyczne spowodowane zmianami temperatury, wilgotności, ciśnienia atmosferycznego oraz promieniowaniem słonecznym.

Obciążenia pasywne.

To takie warunki pracy systemu, które same sobą nie powodują naprężeń w elementach systemu, ani też nieprzeciwdziałają obciążeniom.

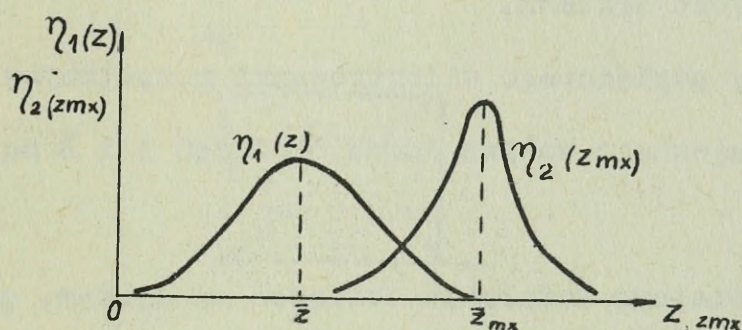
W zasadzie te obciążenia wpływają na odpowiedni wybór materiałów i konstrukcji systemu.

W większości wypadków obciążenia wyrażają się przypadkowymi funkcjami czasowymi.

W najprostszym przypadku można nieuwzględniać współzależnych powiązań między różnymi typami obciążeń a liczy obciążenia statycznie niezależnymi

Jeżeli zmianę obciążeń w czasie można przedstawić stacjonarnym przypadkowym procesem, to na podstawie ilościowych charakterystyk można dokonać rozdzielenie obciążeń jako przypadkowych wartości. W celu określenia prawdopodobieństwa obciążenia według znanego realizującego się przypadkowo procesu, należy podzielić ogólny czas obserwacji na dostatecznie małe odstępy czasu i określić obciążenia w każdym przedziale. W ten sposób można utworzyć funkcję gęstości prawdopodobieństwa obciążeń $\eta_1(z)$.

Analogicznie można utworzyć funkcję gęstości prawdopodobieństwa maksymalnej wartości obciążeń - zapisując w określonym odstępie czasu maksymalne obciążenia. Wzajemny rozkład wspomnianych gęstości prawdopodobieństw przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa obciążenia i gęstości jego maksymalnej wartości.

2. Metody obliczania bezawaryjności systemu przy działaniu obciążeń statycznych.

Możliwość przeciwdziałania obciążeniom nazywa się - względna wytrzymałością systemu.

W czasie analizy wpływu warunków eksploatacyjnych i reżimów pracy na system, względna wytrzymałość będzie występowała jako ekwiwalent bezawaryjności.

Wytrzymałość charakteryzuje się nie tylko brakiem zewnętrznym uszkodzeń ale także zaoszczędzaniem parametrów w pewnym dopuszczalnym przedziale.

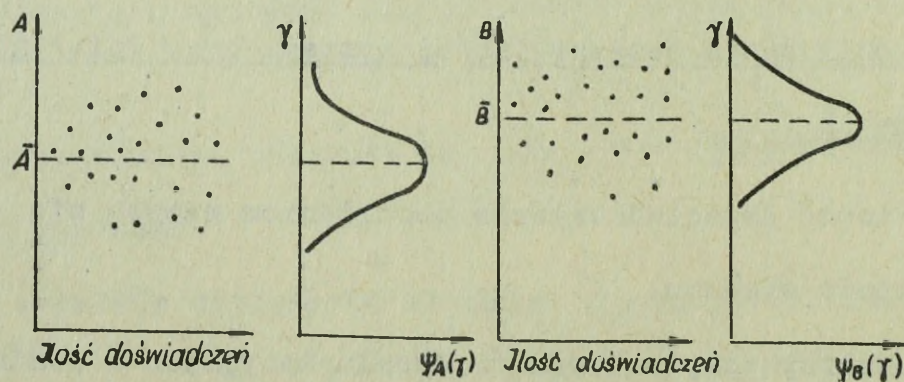
Wytrzymałość systemu uwarunkowana jest dużą ilością czynników związanych z właściwościami materiałów, z których został wykonany system oraz technologii wykonania itp. Wytrzymałość podobnie jak obciążenie jest wartością przypadkową. Charakterystyki wytrzymałości przedstawia się na podstawie statystycznych wartości.

Oczywistym jest, że na system i jego elementy obciążenia działają kompleksowo. Jednakże w praktyce z wystarczającą dokładnością jest przeprowadzenie analizy bezawaryjności, uwzględniając tylko główne /jedno lub dwa/obciążenia. Dalej wytrzymałość elementów lub systemu rozpatrujemy w zależności od tych głównych obciążeń.

Należy również rozpatrywać wzajemne oddziaływanie poszczególnych obciążeń na wytrzymałość systemu.

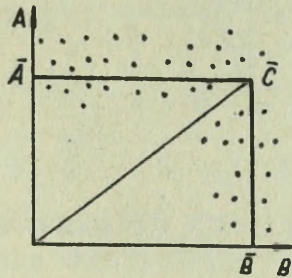
W celu bardziej poglądowego zilustrowania rozpatrzmy uproszczony przykład oceny wzajemnego wpływu dwóch obciążeń A i B na wytrzymałość systemu.

Założmy, że przy oddzielnym działaniu obciążeń na system, gęstość prawdopodobieństwa wytrzymałości γ ma kształt jak podano na rys. 4.2.



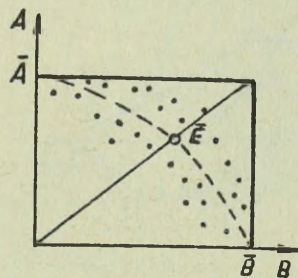
Rys. 4.2. Gęstość prawdopodobieństwa wytrzymałości przy różnych obciążeniach /A, B/.

W wypadku równoczesnego przyłożenia do systemu obydwu obciążeń, wytrzymałość będzie miała charakterystykę jak na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Rozkład wytrzymałości w wypadku równoczesnego przyłożenia do systemu dwóch obciążeń /A i B/.

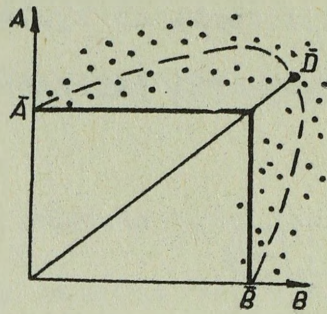
Przy przeniesieniu poszczególnych punktów uszkodzeń systemu do wewnątrz strefy prostokąta określającego średnią wartość wytrzymałości przy wzajemnym oddziaływaniu obciążeń A i B, widać, że wytrzymałość systemu zmniejszyła się, jak to pokazano na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Zmniejszenie wytrzymałości przy działaniu dwóch obciążeń /A i B/.

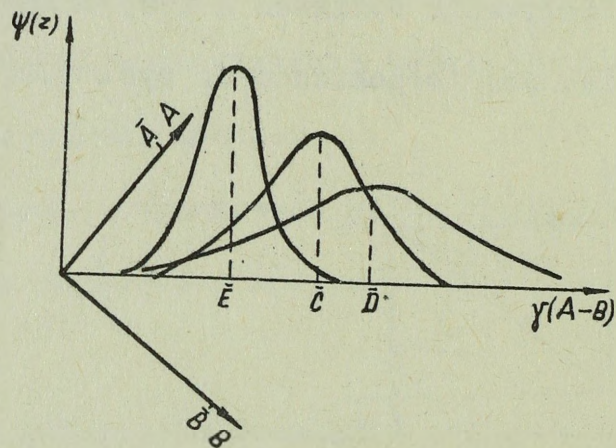
W wypadku równoczesnego działania obciążeń A i B gdy poszczególne punkty uszkodzeń systemu przemieszczają się na zewnątrz prostokąta obrazującego średnią wartość wytrzymałości, to wzajemny wpływ obciążeń będzie sprzyjający, t.zn. wytrzymałość systemu wzrośnie

/rys. 4.5./



Rys. 4.5. Wzrost wytrzymałości przy działaniu dwóch obciążeń /A i B/.

Można wykreślnie przedstawić równania obydwu obciążeń A i B, dając jednakowe współrzędne . Ocenę wzajemnego wpływu obciążeń na wytrzymałość systemu przeprowadza się wtedy według wykresu jaki podano na rys. 4.6. gdzie \bar{E} , \bar{C} , \bar{D} są średnimi wartościami wytrzymałości.



Rys. 4.6. Gęstość prawdopodobieństwa wytrzymałości przy dwóch obciążeniach /A i B/.

Rozpatrzmy metodykę obliczania bezawaryjności systemu przy jednym obciążeniu statycznym. Założymy, że obciążenie i wytrzymałość systemu są przypadkowymi wartościami, a charakteryzują się gęstością prawdopodobieństwa obciążenia $\eta /z/$ i gęstością prawdopodobieństwa wytrzymałości $\psi /z/$.

Należy zaznaczyć, że tak obciążenie jak i wytrzymałość określa się w jednakowych jednostkach.

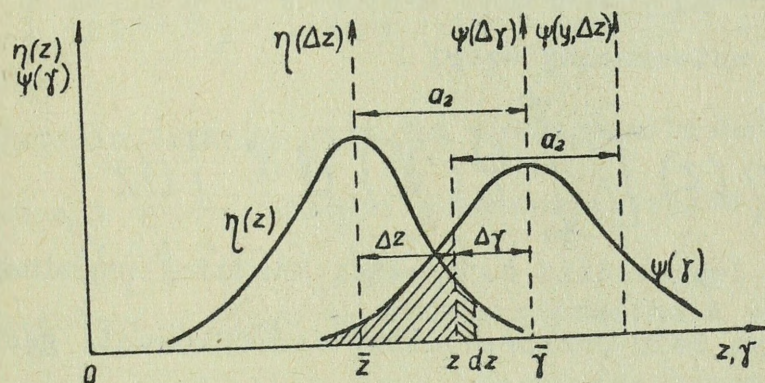
Warunki wytrzymałości lub bezawaryjności określają, że niema w systemie takiego stanu aby obciążenie przekroczyło jego wytrzymałość co oznacza się nierównością:

$$Z \leq \gamma \quad /4.4/$$

gdzie: Z - obciążenie działające na system

γ - wytrzymałość systemu.

W celu otrzymania wzorów obliczeniowych posłużymy się wykresami gęstości prawdopodobieństwa obciążenia $\eta /z/$ i gęstości prawdopodobieństwa $\psi (\gamma)$ podanymi na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Wykresy rozkładu $\eta /z/$ i $\psi / \gamma /$ do określania bezawaryjności elementów.

Prawdopodobieństwo tego, że obciążenie występuje w przedziale od Z do $Z + dz$ można obliczyć ze wzoru:

$$P_{\eta} = \eta /z/ dz \quad /4.5/$$

Prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia systemu przy działaniu obciążenia na poziomie z , określa się przez scałkowanie prawdopodobieństwa wytrzymałości:

$$P_{\psi} = \int_0^z \psi (\gamma) d\gamma \quad /4.6/$$

Prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia systemu przy obciążeniu na poziomie Z z uwzględnieniem prawdopodobieństwa jego powstania określa się jako prawdopodobieństwo złożonego zdarzenia w postaci dwóch prawdopodobieństw P_η i P_ψ

$$Q = P_\eta \cdot P_\psi \quad /4.7/$$

w celu określenia prawdopodobieństwa zaistnienia uszkodzenia systemu dla wszystkich możliwych wartości obciążeń, należy przecałkować wyrażenie:

$$Q = \int_0^\infty \eta(z) \left[\int_0^z \psi(\gamma) \right] dz \quad /4.8/$$

W ogólnym przypadku dolna granica całkowania może być minus nieskończoność, co daje uniwersalny wzór:

$$Q = \int_{-\infty}^\infty \eta(z) \left[\int_{-\infty}^\infty \psi(\gamma) d\gamma \right] dz \quad /4.9/$$

Wzór /4.9/ można doprowadzić do postaci bardziej wygodnej w użyciu praktycznym. W tym celu przeprowadzimy ześrodkowanie gęstości prawdopodobieństwa $\eta/z/$ i $\psi(\gamma)$, to znaczy przeniesiemy początek współrzędnych dla każdej z gęstości w punkty odpowiadające nadziei matematycznej obciążenia i wytrzymałości w wyniku czego otrzymamy:

$$Q = \int_{-\infty}^\infty \eta(\Delta z) \left[\int_{-\infty}^{\Delta z} \psi(\Delta \gamma) d\Delta \gamma \right] d\Delta z \quad /4.10/$$

gdzie: $\Delta z = \bar{z} - \bar{\gamma}$

\bar{z} - nadzieja matematyczna obciążenia

$\bar{\gamma}$ - nadzieja matematyczna wytrzymałości.

W powyższym wyrażeniu /4.10/ zamienimy zmienną $\Delta \gamma$ przez wprowadzenie nowej zmiennej y .

$$\Delta \gamma = y + \Delta Z$$

W wyniku tego otrzymamy następujący wzór na obliczenie prawdopodobieństwa zaistnienia uszkodzenia:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\Delta Z) \left[\int_{-\infty}^{az} \psi(y + \Delta z) dy \right] d\Delta Z \quad /4.11/$$

W odróżnieniu od wyrażenia /4.9/ we wzorze /4.11/ całka podwójna posiada już niezmienny przedział całkowania az , określający wzajemny rozkład gęstości $\eta/z/$ i $\psi(\gamma)$. Dlatego we wzorze /4.11/ można zmienić kolejność całkowania:

$$Q = \int_{-\infty}^{az} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\Delta z) \psi(y + \Delta z) d\Delta z dy \quad /4.12/$$

Wewnętrzny przedział jest funkcją zmienną y , którą oznaczmy - $g/y/$.

$$g(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\Delta z) \psi(y + \Delta z) d\Delta z \quad /4.13/$$

$g/y/$ - przedstawia funkcję gęstości prawdopodobieństw odpowiadającą kompozycji dwóch gęstości prawdopodobieństw

$$\eta(\Delta z) \text{ i } \psi(y)$$

Wzór /4.13/ potwierdza fizyczne zjawisko powstania uszkodzenia systemu w wypadku gdy wartość obciążenia przekracza wytrzymałość, co oznacza, że:

$$z \geq y$$

Aby określić prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu, należy znać rozkład przypadkowej wielkości y , określającej nierówność

$$z - \gamma \geq y$$

Prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia systemu w ogólnym przypadku określa wzór

$$Q = \int_{-\infty}^{az} g(y) dy \quad /4.14/$$

W szczególnym przypadku gdy obciążenie i wytrzymałość podporządkowują się rozkładowi normalnemu /patrz rozdz. III p-kt 3/, gęstości prawdopodobieństwa obciążenia i wytrzymałości wyrażają się poniższymi wzorami:

$$\eta(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_z} \cdot e^{-\frac{(z-\bar{z})^2}{2\delta_z^2}} \quad /4.15/$$

$$\psi(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_\gamma} \cdot e^{-\frac{(\gamma-\bar{\gamma})^2}{2\delta_\gamma^2}} \quad /4.16/$$

Jak wiadomo z teorii prawdopodobieństwa 17 wypadkowa dwóch normalnych rozkładów po zsumowaniu algebraicznym dwóch przypadkowych wartości, daje normalny rozkład z następującymi charakterystykami:

- nadzieje matematyczne $a_2 = \bar{z} - \bar{\gamma}$

- średni błąd kwadratowy $\delta = \sqrt{\delta_z^2 + \delta_\gamma^2}$

gdzie: δ_z - średni błąd kwadratowy obciążenia

δ_γ - " " " wytrzymałości.

Gęstość prawdopodobieństwa $g/y/$ w tym wypadku wyrazi się w postaci

$$g/y/ = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta} \cdot e^{-\frac{(y-a_2)^2}{2\delta^2}} \quad /4.17/$$

Przy normalnych rozkładach wytrzymałości i obciążenia prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia systemu określi się ze wzoru:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\delta_z^2 + \delta_\gamma^2}} \int_{-\infty}^{\bar{z}-\bar{\gamma}} e^{-\frac{[y-(\bar{z}-\bar{\gamma})]^2}{2(\delta_z^2 + \delta_\gamma^2)}} dy \quad /4.18/$$

W czasie obliczania prawdopodobieństwa zaistnienia uszkodzenia systemu w/g wzoru /4.18/ wygodniej jest posługiwać się tablicami normalnych funkcji Laplace'a Φ /z/. Wtedy wzór /4.18/ przyjmie postać

$$Q = 0,5 + \Phi \left(\frac{\bar{z} - \bar{\gamma}}{\sqrt{\delta_z^2 + \delta_\gamma^2}} \right)$$

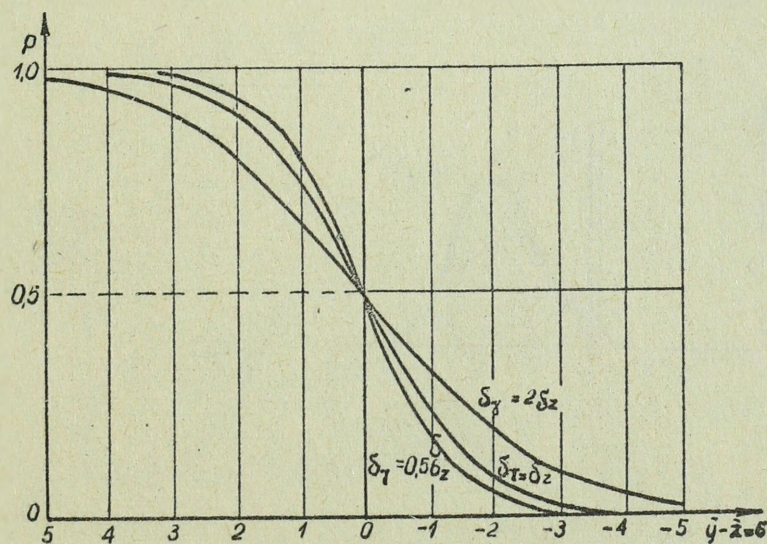
Wykorzystując jedną z właściwości funkcji wyrażającą się tym, że

$$\Phi(-Z) = -\Phi(Z)$$

to zasadnicze równanie bezawaryjności systemu przy normalnym rozkładzie przyjmuje postać

$$P = 0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{y} - \bar{z}}{\sqrt{\delta_z^2 + \delta_y^2}}\right) \quad /4.19/$$

Na rys. 4.8 podano wykres ilustrujący zmianę bezawaryjności systemu w zależności od różnych wzajemnych stosunków między charakterystykami wytrzymałości i charakterystykami obciążenia. Z wykresu wynika, że przy założonym rozkładzie obciążenia w celu zabezpieczenia wysokiej niezawodności systemu należy zapewnić aby dyspersja wytrzymałości była kilkakrotnie mniejsza od dyspersji obciążenia. Osiągnąć to można, zabezpieczając w procesie produkcji wysoką jednorodność systemu. Oprócz tego proponuje się aby różnica między nadziejami matematycznymi, którą będziemy nazywać współczynnikiem zapasu wytrzymałości była stała [6]



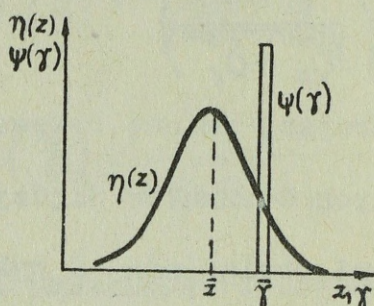
Rys. 4.8. Bezawaryjność w zależności od wartości wytrzymałości i obciążenia.

W przypadku jednorodnej wytrzymałości systemu, bezawaryjność

można wyrazić wzorem:

$$P = 0,5 + \Phi \left(\frac{\bar{\gamma} - \bar{z}}{\delta_z} \right) \quad /4.20/$$

a przebieg gęstości prawdopodobieństw jak na rys. 4.9.

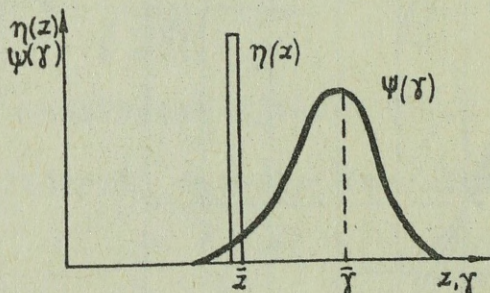


Rys. 4.9. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa $\psi(\gamma)$ i $\eta(z)$ przy jednorodnej wytrzymałości.

W wypadku mało zmieniającego się obciążenia, bezawaryjność systemu można wyrazić wzorem:

$$P = 0,5 + \Phi \left(\frac{\bar{\gamma} - \bar{z}}{\delta_z} \right) \quad /4.21/$$

a obciążenia jak przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.10. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa $\psi(\gamma)$ i $\eta(z)$ przy mało zmiennym obciążeniu.

W wypadku gdy nie można ustalić według jakiego rozkładu przebiega obciążenie i wytrzymałość, obliczenie bezawaryjności wzorem /4.11/ byłoby bardzo trudne. W takim przypadku prawdopodobieństwo

powstania uszkodzenia określa się z pewnym przybliżeniem, wykorzystując metodę Strzeleckiego [7], którą przedstawimy w dużym skrócie. W tym celu na rys. 4.11 zaznaczymy punkt przecięcia się dwóch krzywych literką "0".

Prostopadła opuszczona z punktu "0" na oś odciętych podzieli płaszczyznę na dwie części S_1 i S_2 . Wielkości płaszczyzn S_1 i S_2 określimy z wyrażen:

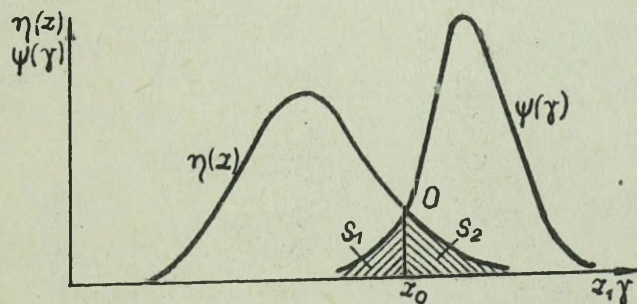
$$S_1 = \int_0^{z_0} \psi(\gamma) d\gamma \quad /4.22/$$

$$S_2 = \int_{z_0}^{\infty} \eta(z) dz \quad /4.23/$$

Wartość S_1 wyraża prawdopodobieństwo tego, że wytrzymałość systemu jest mniejsza niż z_0 , a wartość S_2 przedstawia obciążenie przewyższające poziom z_0 .

Wartości obliczone z wyrażen /4.22/ i /4.23/ charakteryzują prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu, wyrażając:

$$Q > S_1 S_2 \quad /4.24/$$



Rys. 4.11. Przybliżona metoda określania bezawaryjności.

Prawa część powyższej nierówności uwzględnia tylko prawdopodobieństwo jednoczesnego zaistnienia takiego zdarzenia, że obciążenie przewyższy poziom Z_0 , a wytrzymałość będzie poniżej tego poziomu. Inne możliwe przypadki uszkodzeń systemu nie są uwzględniane.

W podobny sposób można rozpatrzyć bezawaryjność systemu zestawiając iloczyn $/1-S_1/ /1 - S_2/$. Mnożnik $/1 - S_2/$ odpowiada warunkowi, przy którym obciążenie nie przewyższa poziomu Z_0 , a mnożnik $/1 - S_1/$ odpowiada wytrzymałości większej niż Z_0 .

Iloczyn tych wielkości jest ekwiwalentem bezawaryjności - systemu.

Gdyby nie rozpatrywać wszystkich możliwych przypadków takich jak na przykład gdy nie występuje uszkodzenie przy wytrzymałości mniejszej od wartości Z_0 , to bezawaryjność można określić przy pomocy nierówności:

$$P > /1 - S_1/ /1 - S_2/ \quad /4.25/$$

Rozwijając prawą stronę nierówności i wykorzystując zasadnicze równanie bezawaryjności $P + Q = 1$ otrzymamy ocenę prawdopodobieństwa zaistnienia uszkodzenia systemu:

$$1 - P < S_1 + S_2 - S_1 \cdot S_2 \quad /4.26/$$

Dokładność prawdopodobieństwa zaistnienia uszkodzenia obliczona metodą przybliżoną wynosi:

$$S_1 S_2 < Q < S_1 + S_2 - S_1 S_2 \quad /4.27/$$

Jak wynika z wzorów /4.18/ i /4.21/ bezawaryjność systemu zależy od różnicy nadziei matematycznej obciążenia i wytrzymałości oraz od dyspersji tych wielkości. Dlatego przy obliczaniu bezawaryjności stawia się nieco ostrzejsze wymagania, które uwzględniałyby obydwie charakterystyki.

Często wygodniej posłużyć się pojęciem względnego wzorcowego błędu, przedstawiającego stosunek średniego błędu kwadratowego do nadziei matematycznej.

Względny wzorcowy błąd można napisać w postaci:

- dla obciążenia

$$\sigma_z = \frac{\delta_z}{\bar{z}}$$

- dla wytrzymałości

$$\sigma_r = \frac{\delta_r}{\bar{r}}$$

Zakładając, że niewystępuje wzajemne oddziaływanie między obciążeniem i wytrzymałością, względny wzorcowy błąd dla funkcji $y(y)$ związanej z warunkiem uszkodzenia systemu zależnością $z - r \geq y$ wynosi

$$\sigma = \frac{\sqrt{\delta_z^2 + \delta_r^2}}{\bar{r} - \bar{z}} \quad /4.28/$$

Odwrotność względnego wzorcowego błędu podobnie jak w mechanice budowlanej nazywa się współczynnikiem zapasu, co wyraża się

$$K = \frac{1}{\sigma} = \frac{\bar{r} - \bar{z}}{\sqrt{\delta_z^2 + \delta_r^2}} \quad /4.29/$$

W tabeli Nr4.2 podaję prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia w zależności od współczynnika zapasu.

Tabela Nr4.2

0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
0,5	$4 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$

3. Awaryjność elementów w zależności od warunków i reżimu pracy systemu.

Badanie wpływu warunków otaczających i reżimów pracy na awaryjność systemu jest bardzo złożonym zadaniem.

Oprócz wymienionych w powyższym punkcie obciążeń, duży wpływ na bezawaryjność elementów posiada częstotliwość włączania i wyłączania elementów.

Z danych statystycznych wynika, że znaczna część uszkodzeń powstaje w czasie włączania lub wyłączania systemu oraz w pierwszych dziesięciu minutach pracy cyklu roboczego. W tych momentach jak to podaje literatura [18] powstaje około 25 % uszkodzeń.

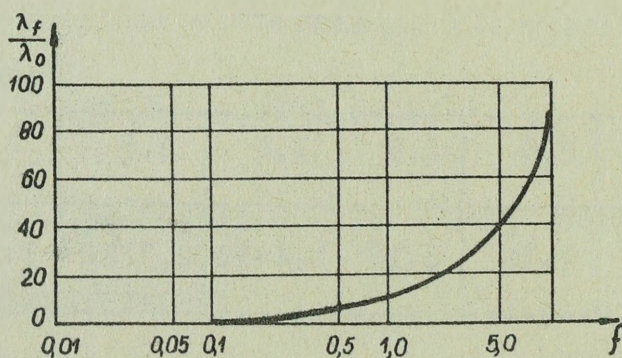
Intensywność uszkodzeń wzrasta z częstotliwością cykli pracy. Wzrost tej intensywności można obliczyć w pewnym przybliżeniu ze wzoru:

$$\lambda_f = \lambda_0 \left[1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0} (f) \right] \quad /4.30/$$

gdzie:

- λ_0 - awaryjność elementu przy ciągłej pracy /bez włączeń i wyłączeń/,
- λ_1 - awaryjność elementów w ciągu jednego cyklu pracy,
- f - ilość cykli włączenie - wyłączenie w czasie jednej jednostki czasu.

Zależność awaryjności od częstotliwości włączeń przedstawiono na rys. 4.12.



Rys. 4.12. Zależność awaryjności od częstotliwości włączeń.

Z wykresu powyższego widać że przy 5-ciu włączeniach na godzinę, awaryjność uszkodzeń wzrosła około 40 razy.

Awaryjność w zależności od częstotliwości włączeń należy uwzględnić w czasie opracowania zasad eksploatacji danego systemu.

W wielu przypadkach gdy system pracuje z krótkimi przerwami bardziej celowym może okazać się obniżenie reżimu pracy systemu zamiast wyłączania go z pracy. Oczywiście należy przeanalizować stopień dodatkowego zużycia resursu.

W niektórych systemach awaryjność elementów elektrycznych określa się w szczególności wielkością obciążenia napięzeniowego i katalitycznego. Przy czym pierwszy rodzaj obciążeń nosi charakter elektryczny /napięcie, prąd moc/. Obciążenie katalityczne, to przede wszystkim działanie temperatury plusowej. Awaryjność spowodowaną tymi dwoma rodzajami obciążeń określa się ze wzoru:

$$\lambda = \lambda_n \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^l \cdot r^{(t^0 + t_n)} \quad /4.31/$$

gdzie:

- λ_n - awaryjność w nominalnych warunkach
- U_n - nominalna wartość napięcie
- U_d - rzeczywista wartość napięcia
- t_n - nominalna temperatura
- t - temperatura rzeczywista
- l, r - współczynniki.

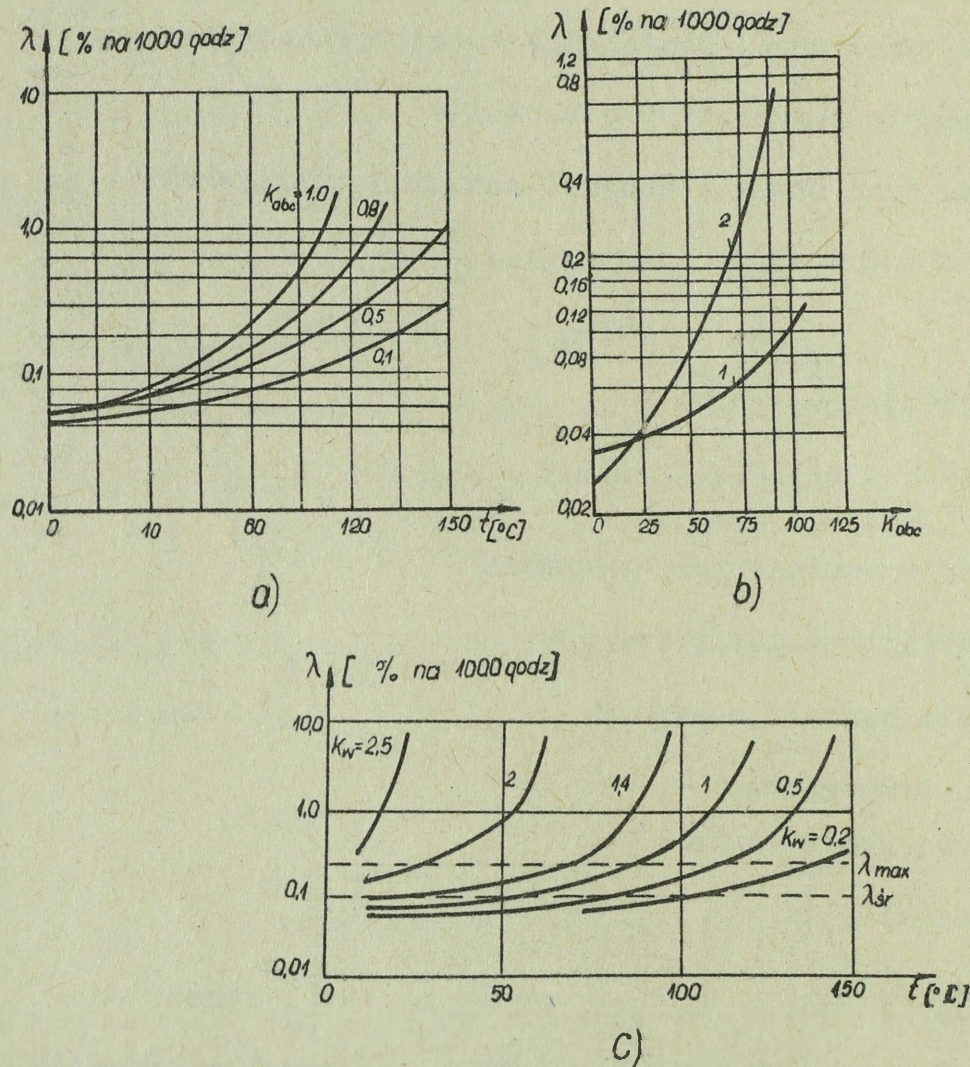
W zależności od rodzaju elementu wartość współczynnika l wynosi od 4 do 10, natomiast r - od 1.02 do 1.15 [19]. Wartości te określa się eksperymentalnie.

Awaryjność oporników w zależności od mocy przenoszonej i temperatury [10] można obliczyć ze wzoru:

$$\lambda = \lambda_n \frac{B[t^0 - t_n^0 + R_t \cdot W_n \left(\frac{W}{W_n} - 1 \right)]}{(273^0 + t^0 + R + W)(273 + t^0 + R_t \cdot W_n)} \quad /4.32/$$

Ze wzorów /4.31/ i /4.32/ wynika, że awaryjność podstawowych elementów WS takich jak: kondensatory, oporniki, diody półprzewodnikowe

itp. zależy od współczynników obciążenia określonych wzorami /4.1/ - /4.3/ oraz od temperatury. Przykłady ilustrujące zależność awaryjności oporników od współczynników obciążenia i temperatury, podano na rys. 4.13, a przykłady awaryjności kondensatorów w zależności od tych samych współczynników podano na rys. 4.14.



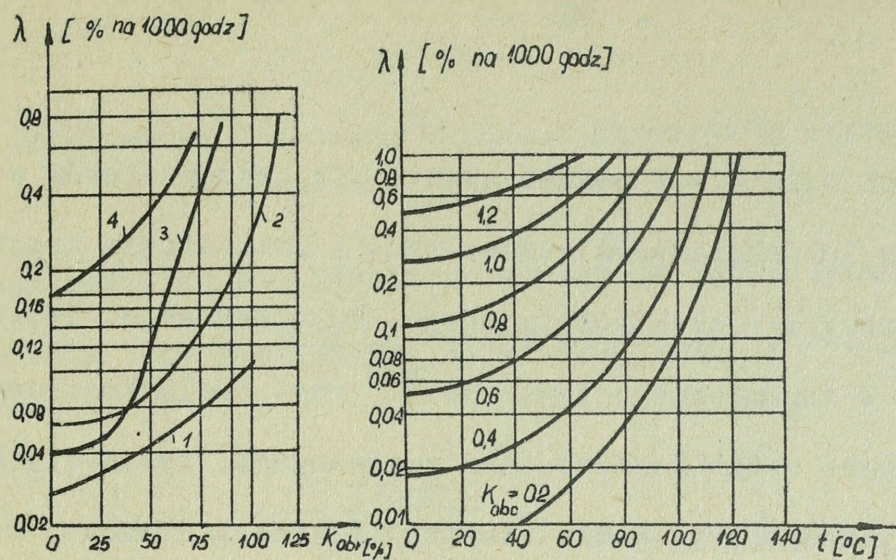
Rys. 4.13. Zależność awaryjności oporników od współczynników obciążenia i temperatury.

Rys. a. awaryjność dużego objętościowo opornika /1W/,

Rys. b. krzywa 1 - awaryjność opornika węglowego, krzywa 2 - awaryjność opornika drutowego.

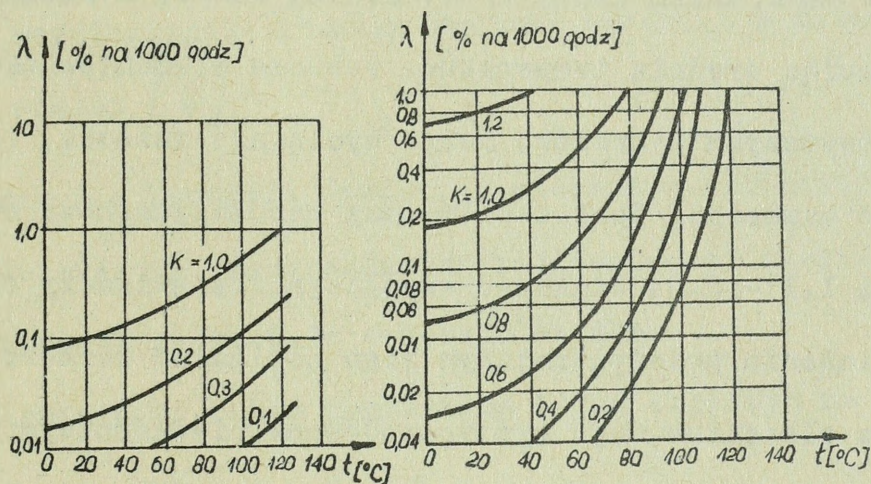
Rys. c. awaryjność opornika w zależności od współczynnika

K_w .



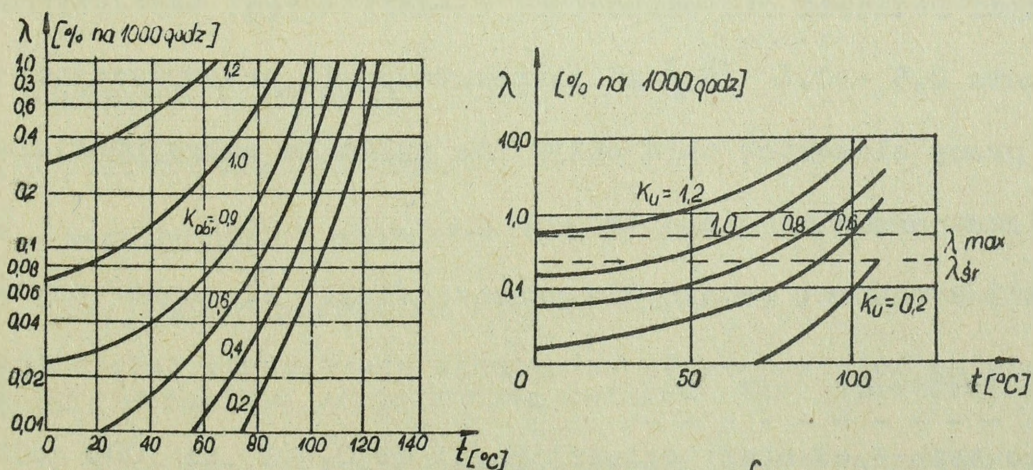
a)

b)



c)

d)



e)

f)

Rys. 4.14. Zależność awaryjności kondensatorów od współczynników obciążenia i temperatury.

Na rysunkach 4.14 a - f podano awaryjność kondensatorów w funkcji temperatury lub obciążenia gdzie: rys. a przedstawia krzywe dla kondensatorów: 1 - elektrolitycznego, 2-papierowego, 3-ceramicznego 1-go typu^{x/}, 4-ceramicznego 2-go typu^{xx/}; rys. b-dla kondensatora ceramicznego, rys. c-dla kondensatora papierowego; rys.d-dla kondensatora elektrolitycznego; rys.e-dla elektrolitycznego suchego, rys. f - dla ceramicznego.

Na rys. 4.13 c. i rys. 4.14 f. poziomymi liniami przerywanymi oznaczono średnią i maksymalną awaryjność, według danych z załącznika Nr 2.

Przyjmując średnią temperaturę roboczą elementów około 30 - 50°C. z analizy powyższych wykresów, można wyciągnąć wniosek, że maksymalna intensywność uszkodzeń jest wprost proporcjonalna do współczynnika obciążenia, który wynosi 1,1 - 2.0. Wielkość współczynnika świadczy o pracy elementu przy obciążeniu przewyższającym jego nominalną wartość.

Przebiegi elementów mogą być spowodowane niewłaściwym zaprojektowaniem, uszkodzeniami innych elementów, przeciążeniami podczas włączania i wyłączania lub zmianami reżimów pracy systemu.

Zaleconymi reżimami dla większości elementów jest współczynnik obciążenia 0,5 - 0,6 [9] a temperatura nie przewyższająca + 50°C.

Reżimy pracy elementów mają wpływ nie tylko na awaryjność, ale także na zasadnicze parametry elementów.

Zazwyczaj producent podaje dla poszczególnych elementów odpowiednie dopuszczalne tolerancje. Te tolerancje praktycznie zapewniają

- - - - -

x/ 1-go typu - elementy o awaryjności do 0,0025 na 1000 godz. pracy

xx/ 2-go typu - elementy o awaryjności do 0,01 na 1000 godz. pracy.

z dostateczną dokładnością nominalne wartości parametrów używanych elementów.

Podstawową charakterystyką odchylenia parametru od jego nominalnej wartości jest średni błąd kwadratowy, który wyliczymy ze wzoru:

$$\delta_{fab} = \frac{\beta_n \cdot \epsilon_{fab}}{K} \quad /4.33/$$

gdzie:

β_n - nominalna wartość parametru danego elementu

ϵ_{fab} - względna tolerancja fabryczna

K - współczynnik, którego wartość wynosi 4 a nawet więcej [8]

Na podstawie danych z kontroli produkcji elementów służących do wykonania WS stwierdzono, że rozkład nadziei matematycznej i średniego błędu kwadratowego ma kształt ściętego stożka.

Wartości odchylenia przy takim rozkładzie można obliczyć ze wzorów:

$$\delta^2 = \frac{K^2}{9} \Delta^2 \quad /4.34/$$

$$\Delta > 3\delta \quad /4.35/$$

gdzie: a, b - granice tolerancji

Δ - połowa pola tolerancji

K, α - współczynniki charakteryzujące rozkład błędów oraz wzajemnego położenia krzywej rozkładu i pola tolerancji.

Przy rozkładzie normalnym gdzie krzywa rozkładu jest symetryczną w stosunku do pola tolerancji i posiada średni błąd kwadratowy odpowiadający nierówności

$$\Delta > 3\delta$$

współczynniki mają wartość $K = 1, \alpha = 0$.

Pod działaniem czynników zewnętrznych parametry elementów zmieniają się. Oddziaływanie to może być dwóch rodzajów: -powodujące nie-odwracalny wpływ; -powodujące odwracalny wpływ na elementy.

Oddziaływanie powodujące nieodwracalny wpływ związane jest z powstaniem w systemie błędów systematycznych, które w większości przypadków mogą być usunięte w wyniku okresowej regulacji, strojenia czy wprowadzania sygnałów kompensujących dany błąd.

W czasie projektowania systemu i wyznaczania tolerancji dla poszczególnych elementów, należy uwzględnić możliwe zmiany parametrów owstające na skutek działania warunków otaczających. Do tego dodatkową informacją będzie względna nadzieja matematyczna dolnych i górnych odchyień i względny średni błąd kwadratowy rozpatrywanego elementu. Aby obliczyć względną nadzieję matematyczną odchylenia jakiegoś parametru, należy zsumować algebraicznie wszystkie odchylenie przy działaniu różnych obciążeń, co wyraża się wzorem:

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad /4.36/$$

Względny średni błąd kwadratowy dla jednej i tej samej wartości K oblicza się z zależności:

$$\delta^2 = \left(\frac{\bar{\delta}}{K}\right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{K}\right)^2 \quad /4.37/$$

Posługując się danymi z literatury [21] określimy możliwe względne tolerancje wartości oporników z masy przy różnych obciążeniach według tabeli Nr43. Widzimy, że dolne względne odchylenie wartości opornika przy oddziaływaniu szeregu obciążeń równocześnie określa następująca wartość

$$\delta_d = - 0,085 \pm 0,067$$

górne względne odchylenie

$$\delta_g = + 0,17 \pm 0,05$$

Tabela Nr 3

Warunki	Dolna odchylenia		Górna odchylenia	
	$\bar{\epsilon}_d$	ϵ_d	$\bar{\epsilon}_g$	ϵ_g
Względna tolerancja fabryczna	0	$\pm 0,05$	0	$\pm 0,05$
odchylenia przy $t = + 85^{\circ}\text{C}$	0	$\pm 0,04$	0	0
odchylenia przy $t = - 54^{\circ}\text{C}$	0	0	+ 0,12	0
odchylenia starzeniowe	- 0,05	$\pm 0,02$	0	0
Zmiany spowodowane spawaniem	- 0,02	0	0	0
Przy maksymalnym obciążeniu	0	0	+ 0,05	0
100 W prądem stałym	- 0,015	0	0	0
Sumaryczna wartość	- 0,085	$\pm 0,067$	+ 0,17	$\pm 0,05$

Dla rozpatrywanego przykładu przy nominalnej wielkości opornika

$R = 1000$ ze względną tolerancją fabryczną wynosi

$$R_d = 915 \pm 67 \Omega$$

$$R_g = 1170 \pm 50 \Omega$$

Oczywiście odchylenia te należy uważać za maksymalne i bardzo rzadko spotykane, gdyż w praktyce nie mogą wystąpić wszystkie obciążenia jednocześnie.

Tym nie mniej takie obliczenia odchyleni poszczególnych parametrów pozwolą właściwie podejść do projektowania, produkcji jak i eksploatacji WS.

Rozdział V.

SPOSOBY PODWYŻSZANIA ORAZ METODY OBLICZANIA
NIEZAWODNOŚCI WIELKICH SYSTEMÓW

1. Sposoby podwyższania niezawodności wielkich systemów

W czasie projektowania, produkcji jak i eksploatacji WS należy zapewnić wymaganą a czasami nawet maksymalną niezawodność wielkiego systemu w okresie użytkowania. W skomplikowanych WS w praktyce często nie udaje się osiągnąć maksymalnej niezawodności, a nawet trudno zapewnić, przy normalnym podejściu do projektowania, produkcji i eksploatacji, nominalną niezawodność systemu. Z tego względu w czasie projektowania jak i produkcji oraz eksploatacji systemu należy zastosować specjalne przedsięwzięcia skierowane na podwyższanie niezawodności WS.

Możliwe przedsięwzięcia i sposoby podwyższania niezawodności WS są bardzo różnorodne i wymagają od twórców projektowania długich badań naukowych jak i dużej teoretycznej znajomości oraz inżynierskiego doświadczenia i pomysłowości.

Naturalnie, że dokładne rozpatrzenie wszystkich różnorodnych przedsięwzięć i sposobów podwyższania niezawodności jest bardzo trudne i wymaga naświetlenia dużej ilości zagadnień co przekracza ramy niniejszego skryptu. Zagadnieniom tym zostanie poświęcony oddzielny skrypt.

Nie mniej jednak poznanie chociaż ogólnych metod i zasad podwyższania niezawodności WS posiada duże znaczenie, gdyż pozwoli właściwie ukierunkować prace związane z prowadzeniem na wyposażenie wysokoniezawodnych systemów, bez których nawet najbardziej słuszne decyzje w praktycznych zagadnieniach mogłyby być mało efektywne.

Sposoby podwyższania niezawodności WS rozpatrzemy w stosunku do trzech głównych etapów przez które przechodzi system to jest:

projektowanie, produkcja i eksploatacja /patrz poz. 6 p-kt 8/.

Należy pamiętać, że tylko zespolonymi sposobami każdego z tych etapów można osiągnąć wysoką niezawodność interesującego nas systemu.

Tym nie mniej decydujący wpływ na niezawodność WS wykazuje szczególnie etap projektowania /patrz poz. 6 rys. 82/.

W czasie projektowania systemu wybiera się jego zasadę pracy, strukturę, schemat oraz konstrukcyjne opracowanie całości jak i oddzielnych podsystemów, przyrządów itd.

Gdyby na etapie projektowania nie uwzględniono zagadnień związanych z niezawodnością systemu, a tym bardziej gdyby zaistniały pewne niedokładności, to zabezpieczenie niezawodności systemu kosztem przedsięwzięć podjętych na dwóch ostatnich etapach /produkcja, eksploatacja/ byłoby bardzo trudne.

W każdym razie wymaga to wtedy dużych nakładów materialnych a często praktycznie nie daje się zrealizować. Dlatego przy projektowaniu systemu musi być zabezpieczony wymagany poziom niezawodności systemu.

Projektowanie systemu rozpoczyna się od wyboru zasady pracy systemu. Przy tym główną uwagę należy zwrócić na wybór jak najbardziej prostego schematu, posiadającego możliwie najmniejszą ilość elementów i połączeń między nimi. To wymaganie wynika z tego, że w nierezzerwowanych systemach prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu w pierwszym przybliżeniu jest proporcjonalne do ilości elementów.

Duży wpływ na bezawaryjność systemu posiada wybór stabilizacji schematu. W stabilnym według zasady działania schemacie zwraca się szczególną uwagę na minimalne sprzężenia między parametrami poszczególnych elementów.

Należy zapewnić jak najmniejszy wpływ odchyłeń parametrów poszczególnych elementów na wielkość błędu w sygnale na wyjściu systemu.

Tak więc sposób wyboru prostego i stabilnego według zasady działania schematu jest jednym z głównych przedsięwzięć zabezpieczających wysoką bezawaryjność systemu tak przy skokowych jak i starzeniowych uszkodzeniach. Niekiedy wybór prostego według ilości elementów i równocześnie stabilnego schematu związane jest z pokonaniem wielu sprzeczności.

Jako przykład można podać zaprojektowanie wzmacniaczy dla dowolnego systemu.

W celu zabezpieczenia stabilności WS, współczynnik wzmocnienia uzyskuje się przez zastosowanie optymalnego sprzężenia zwrotnego.

Zastosowanie optymalnego sprzężenia zwrotnego w celu otrzymania sumarycznego wymaganego współczynnika związane jest ze zwiększeniem ilości stopni wzmocnienia, to znaczy wzrostem ogólnej ilości elementów w systemie.

Wzrost stabilności współczynnika wzmocnienia powoduje potencjalny wzrost możliwości skokowych uszkodzeń w schemacie.

Prawdopodobieństwo uszkodzenia w nierezzerwowanym systemie w pierwszym przybliżeniu równa się sumie prawdopodobieństw uszkodzenia wszystkich elementów:

$$Q_s \approx nQ$$

/5.1/

gdzie:

- Q - prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu w przypadku jednokowej niezawodności wszystkich elementów;
- n - ilość elementów w systemie.

Oczywiście bezawaryjność niezawodnego systemu zależy nie tylko od ilości ale i od jakości elementów. Dlatego przy projektowaniu należy wybierać najbardziej dobre i perspektywiczne elementy.

W pierwszym rzędzie bezawaryjność elementów zależy, jak wiemy z rozdziału IV od warunków i reżimów pracy elementów.

Z tego względu w czasie projektowania przyjmuje się znacznie mniejsze reżimy pracy od nominalnych. Stopień zmniejszenia obciążenia zależy od konkretnego zadania.

Duży wpływ na bezawaryjność systemu mają warunki pracy a szczególnie działające na system i elementy mechaniczne i klimatyczne obciążenia.

W czasie projektowania należy maksymalnie zmniejszać wpływ zewnętrznych i wewnętrznych obciążeń na system i jego elementy. To zadanie w zasadzie rozstrzyga właściwy wybór konstrukcji przyrządów, podsystemów i systemów w całości.

Przy dodatkowych konstrukcyjnych zabiegach, podnoszących bezawaryjność należy uwzględnić metody obniżania wpływu mechanicznych obciążeń kosztem zastosowania specjalnych kształtów urządzeń, amortyzatorów itp.

Wpływ klimatycznych obciążeń można osłabić przez właściwą konstrukcję podzespołów i bloków z takim wyliczeniem aby zapewnić wymianę podwyższonej temperatury stosując sztuczne chłodzenie, czy uszczelnianie przed wilgocią.

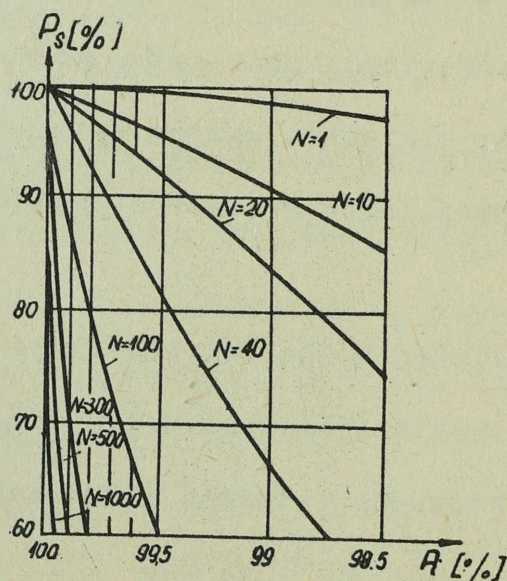
Przy rozpracowaniu schematu i konstrukcji należy przeanalizować przedsięwzięcia zwiększające niezawodność systemu w czasie eksploatacji a w szczególności: blokową konstrukcję systemu, zastosowanie standartowych i ujednoliconych podzespołów i bloków, łatwość remontów, przeglądów oraz obsługi itp.

Na etapie projektowania, efektywnymi sposobami podwyższającymi niezawodność WS są:

- a/ wybór prostych i stabilnych schematów uwzględniających także możliwość podwyższania niezawodności systemu w czasie eksploatacji;
- b/ zastosowanie najlepszych jakościowo i perspektywicznych elementów;
- c/ obniżanie reżimów pracy;
- d/ zastosowanie sprzężeń zwrotnych;
- e/ rezerwowanie elementów, podzespołów.

Wybór prostych i stabilnych schematów.

Wybór prostych schematów jest mało efektywnym sposobem podwyższania niezawodności systemu. Na rys. 5.1 przedstawiono zależność prawdopodobieństwa sprawnej pracy systemu w zależności od ilości elementów N i prawdopodobieństwa ich sprawnej pracy P_i przy założeniu, że wszystkie elementy są równo niezawodne $/P_i/$.



Rys. 5.1. Zależność $P_s = f /P_i/$ przy różnych ilościach elementów.

Z rysunku widać, że jeżeli $P_i = 0,99$ to prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemów wynosi $P_s = 0,66$. Aby prawdopodobieństwo sprawnej pracy podnieść do $P_s = 0,83$ należałoby zmniejszyć ilość elementów nie mniej niż dwa razy.

Zmniejszenie ilości elementów w schemacie jest bardzo trudnym zadaniem. Znaczne uproszczenie schematu może spowodować pogorszenie dokładności, zmniejszenie ilości zadań, które system mógł wykonywać. W związku z tym nasuwa się wniosek, że podwyższanie niezawodności systemu przez uproszczenie schematu jest ograniczone.

Wybór elementów wysokiej jakości:

Wygodniej jest podnosić niezawodność systemu wybierając elementy o znanej wysokiej awaryjności.

Z rys. 5.1. widać, że aby podnieść prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemu z 0.66 do 0.83, to znaczy o 17 %, należy podnieść prawdopodobieństwo sprawnej pracy elementu o 0,5 %, to jest z 0,99 do 0,995 dla systemu składającego się z 40 elementów. Ze wzrostem ilości elementów efekt ten przejawia się jeszcze silniej. Stąd wniosek, że podwyższanie niezawodności systemu wyborem elementów wysokiej jakości, t.zn. o dużym prawdopodobieństwie sprawnej pracy jest jak najbardziej celowe. W związku z tym nieodzownym jest wszystkie elementy klasyfikować według awaryjności. Firma RCA /USA/ dokonała podziału wszystkich elementów pod względem awaryjności na 7 grup /tab. Nr 5.1/.

Grupy te ze względu na wysokość awaryjności rzutują o zastosowaniu danych elementów.

Tabela Nr 5.1.

Nazwa grupy	Umowne oznaczenie	Awaryjność /na 1000 godz.pracy/	Zastosowanie
1	2	3	4
Masowego użytku	0	0,20	Elementy tej grupy stosuje się w urządzeniach masowego użytku, nie wymagających oceny wg charakterystyk ilościowych.

1	2	3	4
Niskiej jakości	R	0,015	Elementy tej grupy stosuje się w urządzeniach niezbyt ważnych ale wymagających ilościowych charakterystyk
Standart wojskowy	S	0,005	w urządzeniach wojskowych ogólnego użytku
Standart niedociążony	DS	0,0015	Do urządzeń jak grupa S, gdzie wzrost niezawodności uzyskuje się przez zastosowanie reżimów pracy poniżej nominalnych.
Wysokiej jakości	T	0,0005	
Wysokiej jakości niedociążony	DT	0,0001	Zastosowanie jak grupa T, wzrost niezawodności kosztem niedociążenia
Najwyższej jakości	U	0,00005	W urządzeniach o największych wymaganiach pod względem niezawodności.

Obniżenie reżimów pracy.

Wpływ reżimów pracy na niezawodność systemu szeroko omówiono w rozdziale IV. Na rysunkach 4.13 i 4.14 przedstawiono wykreślnie zależności niezawodności w stosunku do obciążeń naprężeniowych i klimatycznych. Z rysunków w/w widać, że obniżając reżim pracy elementów szczególnie przeciążonego znacznie zwiększamy bezawaryjność systemu.

Jeżeli elementy pracują w reżimie niedociążenia, w porównaniu z nominalnym reżimem, to dalsze obniżanie obciążenia daje mało efektywne rezultaty.

Na przykład: niech $\lambda t = 0,02$, to prawdopodobieństwo sprawnej pracy wyniesie $P / t / = e^{-0,02} = 0,98$. Zmniejszywszy współczynnik obciążenia dwukrotnie, otrzymamy $\lambda t = 0,01$, a $P / t / = e^{-0,01} = 0,99$. Z powyższego widać, że zmniejszenie obciążenia dwukrotnie powoduje wzrost prawdopodobieństwa sprawnej pracy tylko o 1 %. Znaczne obniżanie reżimów pracy elementów jest niewskazane również i z tego względu, że powoduje wzrost ciężaru i gabarytów urządzenia. Dlatego wybór reżimu pracy elementów należy przeanalizować następująco:

Znając schemat zasadniczy WS, założyć wymaganą wartość prawdopodobieństwa sprawnej pracy systemu. Reżim pracy wybieramy tak, aby prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemu nie było mniejsze od założonej wartości. Przy obliczeniach założymy, że niezawodność ma rozkład eksponencjalny a wszystkie elementy jednotypowe są równoniezawodne. Wtedy bezawaryjność systemu określimy wzorem:

$$P_s(t) = e^{-t \sum_{i=1}^m \lambda_i n_i} \quad /5.2/$$

Rozwiązując równanie odnośnie $\lambda_i n_i$ otrzymamy.

$$n_1 \lambda_1 + n_2 \lambda_2 + \dots + n_k \lambda_k = K \quad /5.3/$$

gdzie: $K = K_0 + \sum_{\alpha=K+1}^m \lambda_\alpha \cdot n_\alpha$

$$K_0 = - \frac{\ln P_s(t)}{t}$$

λ_α, n_α - awaryjność i ilość takich elementów, które nie mają wpływu na niezawodność lub zmiana reżimu ich pracy jest niemożliwa.

Awaryjność jak wiemy z rozdziału IV zależy od wielu czynników takich jak: temperatura, obciążenia itp.

Przy projektowaniu podstawowego schematu interesuje nas przede wszystkim dobór temperatury - T i obciążenie - K_{obc} .

Mając zależności $\lambda_i = f / K_{obc}, T^{\circ}$, reżimy pracy elementów, dobiera się w następujący sposób: według wzoru /5.3/ na płaszczyźnie dwóch zmiennych sporządza się rodzinę prostych $\lambda_i = f (\lambda_i)$ i porównuje z zależnościami $\lambda = f / K_{obc}, T^{\circ}$ /patrz rys. 4.13 i 4.14/.

W wypadku gdyby ani jedna wartość wzięta z rodziny prostych $\lambda_i = f [\lambda_i]$ nieodpowiadała ani jednej wartości $\lambda = f / K_{obc}, T^{\circ}$, to oznacza, że niemożliwe jest dopasowanie reżimów pracy elementów odpowiadających założonej niezawodności. W takim przypadku obowiązkowo należy dobrać inne zasadnicze elementy schematu lub wykorzystać inne metody podwyższania niezawodności.

Sprzężenia zwrotne:

Jeżeli w nierezzerwowanym systemie nie udało się osiągnąć wymaganej bezawaryjności sposobami omówionymi powyżej, można zastosować sprzężenia zwrotne.

Zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego pozwala stabilizować parametry oddzielnych podzespołów czy podsystemów, przez co zmniejsza się prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia spowodowanego starzeniem się elementów.

W szeregu przypadkach wygodnie jest zastosować dodatnie sprzężenia zwrotne.

Rezerwowanie elementów, podzespołów:

Perspektywicznym i efektywnym sposobem podwyższania niezawodności jest rezerwowanie elementów lub podzespołów. Dlatego też temu sposobowi poświęcimy nieco więcej uwagi.

W pełni rezerwowanym systemie uszkodzenie jednego lub kilku elementów czy podzespołów nie powoduje uszkodzenia systemu.

Można wydzielić następujące metody rezerwowania stosowane w WS:

- 1/ stałe rezerwowanie;
- 2/ rezerwowanie z zastosowaniem logicznych schematów.

Przy stałym rezerwowaniu, które często nazywa się pasywnym, rezerwowe urządzenia są włączone na stałe do schematu i pozostają włączone do momentu remontu uszkodzonego urządzenia. Stałe rezerwowanie cechuje prosty schemat, możliwość zastosowania do różnych konstrukcji /systemów, przyrządów, podzespołów, elementów/, a także do sprzężeń wewnątrz elementów.

Zasadniczą wadą rezerwowania pasywnego jest zmiana parametrów schematu i reżimów przy uszkodzeniach rezerwowanych urządzeń, co w szeregu przypadkach jest niedopuszczalne. Również do wad tego rezerwowania należy wzrost ciężaru, objętości, kosztów aparatury i skomplikowanie eksploatacji. Ciężar systemu przy stałym rezerwowaniu może być znacznie zmniejszony dzięki zastosowaniu mikrominiaturyzacji /patrz rozdz. I/.

Rezerwowanie z zastosowaniem logicznych schematów zwane aktyw-
nym, pozwala częściowo wyeliminować wady rezerwowania pasywnego. Pozwala zapewnić niezmiennosc parametrów schematu przy uszkodzeniach elementów. Takie rezerwowanie zwiększa niezawodność systemu przy jednoczesnym zaoszczędzaniu ресурсu rezerwowych urządzeń będących w stanie nieobciążonym.

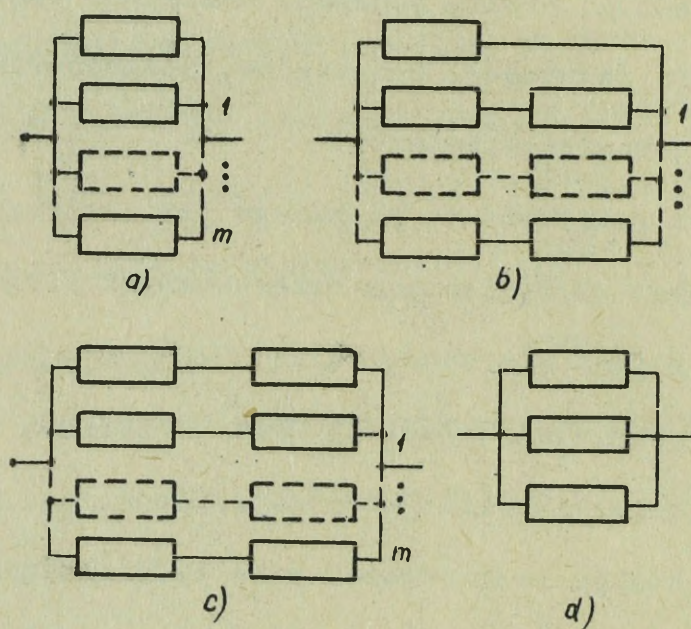
Rezerwowanie aktywne powiązane jest z zastosowaniem dodatkowych urządzeń w postaci wskaźników uszkodzeń, przełączników itp. Te dodatkowe urządzenia w porównaniu z pasywnym rezerwowaniem mogą być źródłem uszkodzeń oraz zwiększają ciężar i koszt systemu. Te wady winny być uwzględniane przy projektowaniu systemu.

Wybór tej lub innej metody rezerwowania zależy od konkretnych warunków to znaczy od przeznaczenia i warunków pracy systemu.

Analiza efektywności wielokrotnego rezerwowania.

Należy wyjaśnić w jakim stopniu podwyższa się niezawodność systemu ze wzrostem wielokrotności rezerwowania.

Rozpatrzmy często spotykane sposoby rezerwowania przedstawione na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Sposoby rezerwowania urządzeń /elementów/

Na rys. 5.2.a. przedstawiono przypadek ogólnego rezerwowania systemu lub oddzielnych elementów czy bloków, przy wykorzystaniu aktywnego rezerwowania z urządzeniami przełączającymi bez uwzględnienia ich awaryjności lub pasywnego rezerwowania bez urządzeń przełączających.

Rys. 5.2b odpowiada przypadkowi aktywnego rezerwowania, gdy każdy rezerwowany system /element, blok/ podłącza się przy pomocy przełączającego urządzenia.

Przy tym prawdopodobieństwo podłączenia rezerwy przy sprawnej pracy systemu podstawowego /rezerwowanego/ równa się zero, a w podstawowym

systemie niema urządzeń przełączających. Przy uwzględnieniu niezawodności przełączającego urządzenia podstawowego systemu będziemy mieli na schemacie dwa elementy połączone w szereg co podano na rys. 5.2c. Uszkodzenia systemu powstają z powodu mechanicznych jak i elektrycznych wad elementów lub wyjścia charakterystyk poza dopuszczalne granice. Przy tym mogą być przypadki zwarć, obrywów, nagłe zmiany charakterystyki w górę lub w dół /patrz rys. 2.2/. Przy takich uszkodzeniach nie można zabezpieczyć systemu rezerwowaniem w postaci prostego dublowania, ponieważ niewiadomo który z dwóch elementów zostanie uszkodzony.

W takim przypadku jest potrzebny trzeci dublujący element. Ten przypadek rezerwowania przedstawiono na rys 5.2.d.

Uszkodzenie systemu w tym przypadku występuje przy uszkodzeniu dwóch lub wszystkich trzech elementów. Przy niesprawności dowolnego jednego elementu, system jest sprawny.

Prawdopodobieństwo sprawnej pracy dla przedstawionych przypadków można wyrazić równaniami w postaci:

- dla schematu rys. 5.2.a

$$P_a /t/ = 1 - [1 - P_0 /t/]^{m+1} = 1 - [1 - e^{-\lambda_0 t}]^{m+1} \quad /5.4/$$

- dla schematu rys. 5.2.b.

$$P_b /t/ = 1 - [1 - P_0 /t/] [1 - P_0 /t/ \cdot P_1 /t/]^m = \\ = 1 - [1 - e^{-\lambda_0 t}] [1 - e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t}]^m \quad /5.5/$$

- dla schematu rys. 5.2.c.

$$P_c /t/ = 1 - [1 - P_0 /t/ P_1 /t/]^{m+1} = 1 - [1 - e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t}]^{m+1} \quad /5.6/$$

- dla schematu rys. 5.2.d.

$$P_d /t/ = 3 P_0^2 - 2 P_0^3 = e^{-2\lambda_0 t} (3 - 2e^{-\lambda_0 t}) \quad /5.7/$$

gdzie:

$\lambda_0 P_0$ - awaryjność, prawdopodobieństwo sprawnej pracy rezerwowanego elementu /urządzenia/.

$\lambda_1 P_1$ - awaryjność, prawdopodobieństwo sprawnej pracy urządzenia przyłączającego rezerwowe elementy.

m - ilość rezerwowych elementów /urządzeń/ dla każdego rezerwowanego elementu (wielokrotności rezerwowania).

Obliczymy średni czas sprawnej pracy systemu dla wszystkich przypadków podanych na rys. 5.2. W tym celu do równania $T_{\text{sr}} = \int_0^{\infty} P(t) dt$ za $P(t)$ podstawiamy wartości P_a, P_b, P_c, P_d , i dokonujemy całkowania.

Otrzymamy następujące wyrażenia na średni czas sprawnej pracy.

$$T_{\text{sr a}} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i} \quad /5.8/$$

$$T_{\text{sr b}} = \frac{1}{\lambda_0} + \sum_{i=1}^m (-1)^i C_m^i \frac{1}{(\lambda_0 + \lambda_1) + \lambda_0} \sum_{j=0}^m (-1)^j C_m^j \frac{1}{i(\lambda_0 + \lambda_1)} \quad /5.9/$$

$$T_{\text{sr c}} = \frac{1}{\lambda_0 + \lambda_1} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i} \quad /5.10/$$

$$T_{\text{sr d}} = \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{\lambda_0} \quad /5.11/$$

Wiadomo, że średni czas sprawnej pracy i awaryjność połączone są zależnością $T_{\text{sr}} = \frac{1}{\lambda_0}$, więc wyrażenia /5.8/ - /5.11/ dla wszystkich rozpatrywanych przypadków można napisać w postaci:

$$\frac{T_{\text{sr}}}{T_{\text{sr o}}} = K_1 \quad /5.12/$$

gdzie: $T_{\text{sr o}}$ - średni czas sprawnej pracy nierezerwowanego systemu /elementu/

K_1 - współczynnik określający wzrost bezawaryjności w wyniku zastosowania rezerwowania.

Dla rozpatrywanych przypadków ma on postać:

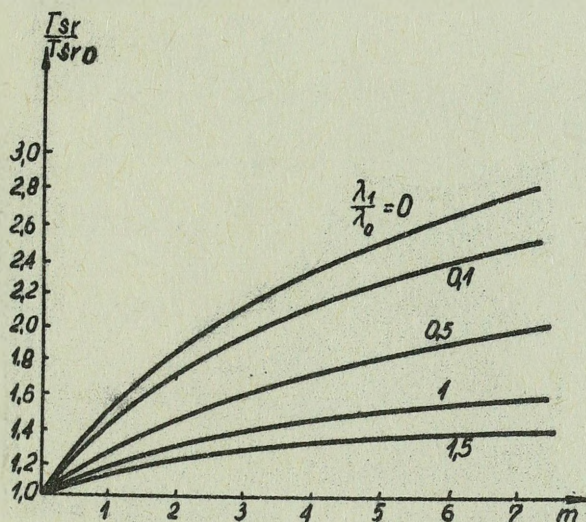
$$K_1 = \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i} \quad /5a13/$$

$$K_b = 1 + \sum_{i=1}^m (-1)^i C_m^i \frac{1}{i(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_0}) + 1} - \sum_{i=1}^m (-1)^i C_m^i \cdot \frac{1}{i(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0})} \quad /5.14/$$

$$K_c = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} \quad /5.15/$$

$$K_d = \frac{5}{6} \quad /5.16/$$

$\frac{T_{sr}}{T_{sr0}}$ w zależności od wielokrotności rezerwowania dla pierwszego i drugiego przypadku przy różnych stosunkach $\frac{\lambda_1}{\lambda_0}$ przedstawiono na rys. 5.3. /H/.



Rys. 5.3. Zależność $\frac{T_{sr}}{T_{sr0}}$ w funkcji m przy różnych wartościach

Z powyższego rysunku widać, że zwiększanie średniego czasu sprawnej pracy daje największy efekt przy małych wartościach wielokrotności rezerwowania. Tak na przykład dublowanie pozwala zwiększyć średni czas sprawnej pracy aparatury 1,5 raza w przypadku idealnych urządzeń rezerwowych.

Dwukrotne rezerwowanie - zwiększa średni czas sprawnej pracy o 1.84 raza. Dalszy wzrost wielokrotności rezerwowania staje się mniej efektywnym. Przy $m = 10$ średni czas sprawnej pracy wzrasta tylko trzykrotnie, kiedy ciężar i gabaryty wzrastają jedenastokrotnie.

Przy urządzeniach przełączających o małej niezawodności ($\frac{\lambda_1}{\lambda_0} \geq 1$) efekt ten jest jeszcze gorszy. Na przykład przy niezawodności urządzenia przełączającego równej niezawodności systemu to jest

$\lambda_1 = \lambda_0$ średni czas sprawnej pracy wzrasta półtora raza dopiero przy sześciokrotnym rezerwowaniu.

Przy uwzględnieniu niezawodności urządzenia przełączającego podstawowego systemu i wszystkich przełączających się urządzeń rezerwowych /przypadek c na rys. 5.2/ może się okazać, że średni czas sprawnej pracy rezerwowanego systemu jest mniejszy od średniego czasu nierezerwowanego systemu.

Znajdziemy zależność wielokrotności rezerwowania od niezawodności przełączających urządzeń, przy której rezerwowanie daje zysk w postaci zwiększenia średniego czasu sprawnej pracy.

W tym celu wyrażenie /5.15/ przyrównamy do jedności, wtedy otrzymamy:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \sum_{l=1}^m \frac{1}{1+l} \quad /5.17/$$

Zależność tę przedstawiono na rys. 5.4 /9/.

Z rysunku widać, że ze zmaleniem niezawodności przełączających urządzeń, wzrosła wielokrotność rezerwowania.

Jeżeli urządzenia przełączające i system są równo niezawodne ($\lambda_1 = \lambda_0$), to trzykrotne rezerwowanie praktycznie nie daje zysku wzrostu średniego czasu sprawnej pracy.

Z analizy średniego czasu sprawnej pracy systemu należy wyciągnąć następujący wniosek: znaczne zwielokrotnianie rezerwowania **nawet** przy idealnych urządzeniach przełączających nie daje istotnego podwyższania niezawodności. Najbardziej celowym jest dublowanie lub najwyżej dwukrotne rezerwowanie. Przy mało niezawodnych urządzeniach przełączających rezerwowanie staje się niecelowe w porównaniu

z innymi metodami podwyższania niezawodności. Lecz wyciągnięty powyżej wniosek nie oznacza jeszcze, że wielokrotne rezerwowanie aparatury systemu na przykład kierowania raketami jest niecelowe.

Rozpatrzmy zysk w niezawodności systemu, stosując różną wielokrotność rezerwowania oceniając prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia - $Q = 1 - e^{-\lambda t}$.

Dla przypadków wyżej rozpatrywanych przedstawionych na rys. 5.2. zysk w niezawodności wyrazi się zależnościami:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = (1 - e^{-\lambda_0 t})^m \quad /5.18/$$

$$\frac{Q_b}{Q_0} = [1 - e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t}]^m = [1 - e^{-(K+1)\lambda_0 t}]^m \quad /5.19/$$

$$\frac{Q_c}{Q_0} = \frac{[1 - e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t}]^{m+1}}{1 - e^{-\lambda_0 t}} = \frac{[1 - e^{-(\lambda+1)\lambda_0 t}]}{1 - e^{-\lambda_0 t}} \quad /5.20/$$

$$\frac{Q_d}{Q_0} = 1 + e^{-\lambda_0 t} (1 - 2e^{-\lambda_0 t}) \quad /5.21/$$

gdzie $K =$

Zależność $\frac{Q}{Q_0}$ podano na rys. 5.5. /19/.

Z powyższego rysunku widać, że ze wzrostem m , przy małych wartościach $\lambda_0 t$ otrzymamy znaczny zysk w niezawodności. Za wzrostem $\lambda_0 t$ zwiększenie wielokrotności rezerwowania nie daje istotnego podwyższenia niezawodności.

Z podanych krzywych /rys. 5.5./ wynika, że nawet przy niskiej niezawodności urządzeń przełączających zwielokrotnianie rezerwowania daje istotne podwyższenie niezawodności, chociaż średni czas sprawnej pracy zmienił się nieznacznie. Przy małych wartościach $\lambda_0 t$ uzyskujemy ten sam efekt jak w przypadku zastosowania idealnych urządzeń przełączających.

Stąd nasuwa się wniosek, że rezerwowanie jest szczególnie dobre w systemach pracujących w krótkim okresie czasu.

Na przykład w systemie gdzie urządzenia przełączające rezerwowe elementy mają jednakową niesprawność z rezerwowanym systemem, to przy $\lambda_{ot} = 0,6$, ośmiokrotne rezerwowanie zmniejszy prawdopodobieństwo uszkodzenia dwunastokrotnie. Dla systemów o dużych wartościach λ_{ot} zysk zrezerwowania jest znacznie mniejszy. Przy $\lambda_{ot} = 2$, ośmiokrotne rezerwowanie zmniejsza prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia o 1,2 raza.

W trzecim przypadku, /rys.5.2.c/ przy małych wartościach efekt pozostaje ten sam, tylko krzywe $\frac{Q_e}{Q_0} = f(\lambda_{ot})$ narastają szybciej niż dla drugiego przypadku /rys. 5.5/.

Czwarty przypadek rezerwowania jest wygodny gdy $\lambda_{ot} < 2$.

Z powyższych rozważań wynika, że wielokrotne rezerwowanie jest celowe w systemach przeznaczonych dla krótkotrwałej pracy, a efekt jest tym większy czym mniejsze jest λ_0 , to znaczy czym mniej niezawodna jest aparatura. To ostatecznie stwierdzenie, że efekt jest tym lepszy, czym bardziej niezawodne urządzenia czy systemy rezerwujemy, ^{nie} jest tak pocieszające gdyż zależy nam szczególnie na podwyższeniu niezawodności małoniezawodnych urządzeń a nie tych które i bez tego są wysokoniezawodne.

Porównamy rezerwowanie z innymi metodami podwyższania niezawodności. Wszystkie rozpatrzone dotychczas sposoby z wyjątkiem rezerwowania sprowadzały się do istoty zmniejszania awaryjności. Dlatego w ogólnym przypadku średni czas i prawdopodobieństwo sprawnej pracy nierezerwowanego systemu o podwyższonej niezawodności można zapisać w postaci

$$T_{sr} = \frac{g}{\lambda_0} \quad /5.22/$$

$$P/t/ = e^{-\frac{\lambda_0}{g} \cdot t} \quad /5.23/$$

gdzie: λ_0 - awaryjność systemu, w którym nie podejmowano żadnych sposobów podwyższania niezawodności,

\mathcal{S} - współczynnik określający ile razy zmniejszyła się awaryjność w rezultacie przedsięwziętych sposobów podwyższenia niezawodności.

Z wyrażenia /5.22/ widać, że średni czas sprawnej pracy rośnie liniowo ze wzrostem Z .

Dla rozpatrywanych powyżej przypadków /patrz rys.5.2/ na podstawie wyrażen /5.18/ do /5.21/ i /5.23/ zysk w niezawodności przy rezerwowaniu w porównaniu z innymi metodami wyrazi się:

$$\frac{Q_a}{Q_s} = \frac{(1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}}{1 - e^{-\frac{\lambda_0}{\mathcal{S}} t}} \quad /5.24/$$

$$\frac{Q_b}{Q_s} = \frac{(1 - e^{-\lambda_0 t}) [1 - e^{-(k+1)\lambda_0 t}]^m}{1 - e^{-\frac{\lambda_0}{\mathcal{S}} t}} \quad /5.25/$$

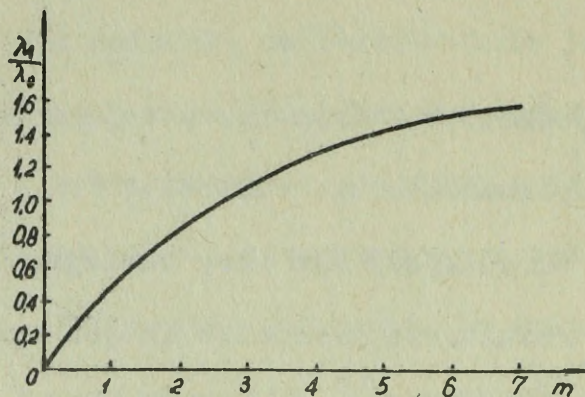
$$\frac{Q_c}{Q_s} = \frac{[1 - e^{-(k+1)\lambda_0 t}]^{m+1}}{1 - e^{-\frac{\lambda_0}{\mathcal{S}} t}} \quad /5.26/$$

$$\frac{Q_d}{Q_s} = \frac{1 - e^{-2\lambda_0 t} (3 - 2e^{-\lambda_0 t})}{1 - e^{-\frac{\lambda_0}{\mathcal{S}} t}} \quad /5.27/$$

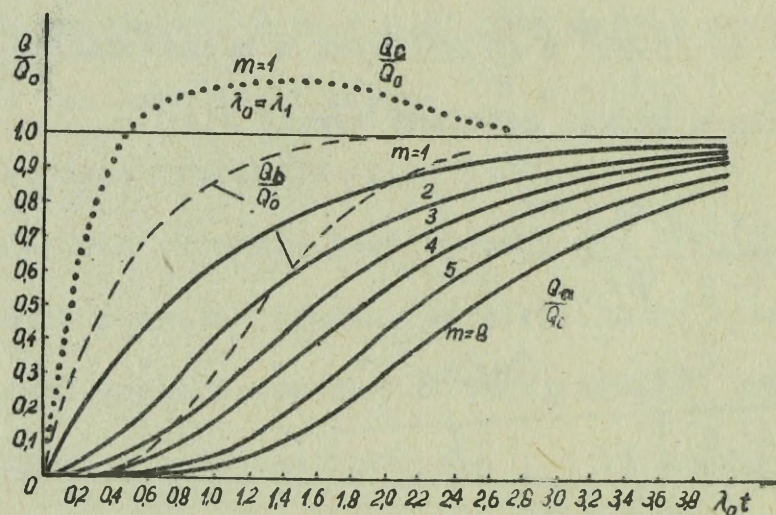
Zależność $\frac{Q_i}{Q_s}$ dla wyżej omawianych przypadków podano na rys.5.6.

Wszystkie krzywe rozpoczynają się w punkcie zerowym i asymptotycznie zbliżają się do jedności przy dużych wartościach $\lambda_0 t$ [15].

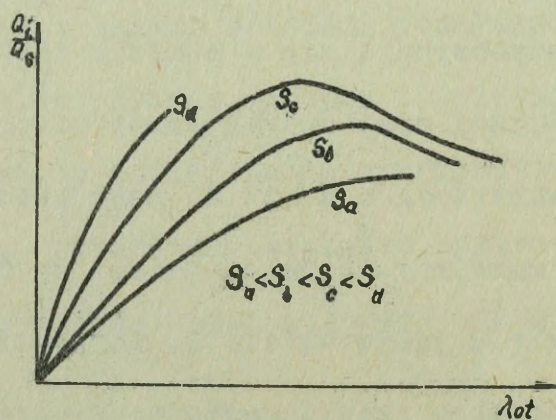
Przy odpowiednich wartościach \mathcal{S} i K mogą przechodzić przez jedność i osiągnąć maksimum. Z tego wynika, że przy małych wartościach $\lambda_0 t$ bez względu jakie będzie \mathcal{S} , rezerwowanie jest najbardziej efektywnym sposobem podwyższania niezawodności. Jednakże przy małej wartości $\lambda_0 t$, rezerwowanie w porównaniu do innych sposobów może być trudne do zrealizowania.



Rys. 5.4. Wykres zależności $\frac{\lambda_1}{\lambda_0}$ w funkcji „m”



Rys. 5.5. Wykresy zależności $\frac{Q}{Q_w}$ „funkcji λ_{ot} dla przypadków a,b,c z rys. 5.2.



Rys. 5.6. Wykresy zależności $\frac{Q_1}{Q_s}$ w funkcji λ_{ot} dla przypadków b,c,d z rys. 5.2

Aby osiągnąć wysoką niezawodność WS, nie stosuje się jednej metody podwyższania niezawodności a dwie lub więcej.

Jednym ze sposobów otrzymania wysokiej niezawodności WS jest metoda rezerwowania przez zastosowanie samostrojących i samoregulujących się systemów.

Kombinowane zastosowanie pasywnego rezerwowania i metod samostrojenia parametrów, pozwala wyeliminować niedociągnięcia właściwe pasywnemu rezerwowaniu. W przypadku gdyby wystąpiły odchylenia parametrów poza granice tolerancji, to układ nie będzie przeciwdziałał, co jest jego wadą.

Większe możliwości podwyższenia niezawodności są w wypadku zastosowania samoorganizujących się systemów, w których przy uszkodzeniu oddzielnych elementów lub zmianie zewnętrznych warunków ulega zmianie struktura systemu, polegająca na rozdzieleniu funkcji między jego oddzielne elementy. Przykładem wysokiego przygotowania na warunki otaczające, są żywe organizmy, w których występuje bezpośrednio rezerwowanie większości organów, przez co organizm posiada wysoki stopień rezerwowania najdrobniejszych komórek, które mogą rozdzielać funkcje między oddzielne elementy.

Jednym z najważniejszych przedsięwzięć zabezpieczających wysoką bezawaryjność systemu, na etapie produkcji jest dokładne przestrzeganie technologicznego procesu.

Przestrzeganie technologicznego procesu winno się zaczynać od wstępnej kontroli materiałów i produktów stosowanych w systemie. Przestrzeganie jakościowo dobrej zagłady materiałów. Właściwa organizacja kontroli jakości produkcji jest ważnym elementem podwyższającym bezawaryjność systemu.

Szczególnie niebezpieczne są uszkodzenia ukryte, spowodowane naruszeniem technologii procesu. Te uszkodzenia jest najtrudniej

wykryć w czasie kontroli produkcji. Na przykład nieprzestrzeganie technologicznego procesu termicznego obrubki rdzenia transformatorowego nie można wykryć w toku kontroli produkcji. Tym niemniej uszkodzenia te uwidaczniają się podczas eksploatacji przy przekroczeniu reżimów temperatur.

Niezawodność systemu w okresie eksploatacji może być gruntownie podwyższona szczególnie w początkowym okresie eksploatacji przez zastosowanie sezonowania w warunkach produkcyjnych w pewnym okresie czasu /patrz rys. 3.6./.

Jeżeli sezonowanie przeprowadzono przy obciążeniu wyższym od nominalnego, to można usunąć większość fabrycznych w tej liczbie i ukrytych uszkodzeń.

Utrzymanie wysokiej niezawodności WS w czasie eksploatacji jest możliwe poprzez następujące sposoby:

- prognozowanie uszkodzeń;
- wykorzystanie metod kontroli okresowej;
- zastosowanie specjalnych urządzeń do szybkiego określenia uszkodzeń;
- naukowe metody profilaktycznych przeglądów;
- zapewnienie należytych warunków przechowywania itp.

Z czynników subiektywnych ważną rolę w podwyższaniu niezawodności WS przypada personelowi obsługującemu dany system /jego przygotowanie techniczne, doświadczenie i inne wartości/.

Jak wynika z rozważań w całym powyższym punkcie, wysoką niezawodność można zapewnić tylko wtedy gdy wykorzystamy wszystkie sposoby podwyższania niezawodności na etapie projektowania i produkcji oraz wszystkie metody utrzymania niezawodności w procesie eksploatacji.

2. Obliczanie niezawodności wielkich systemów.

Obliczanie niezawodności WS sprowadza się do określenia ilościowych charakterystyk niezawodności, według znanych charakterystyk niezawodności poszczególnych podsystemów czy urządzeń.

Poniżej zostanie przedstawionych kilka metod obliczania niezawodności WS.

Pierwsza metoda zakłada, że system jest niesprawny w wypadku uszkodzenia jednego z elementów przy nierezwowanym schemacie lub przy uszkodzeniu pozostałych rezerwowych elementów.

Prawdopodobieństwo uszkodzenia jednego elementu nie zależy od uszkodzenia drugiego elementu w systemie. Przy takim założeniu prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemu obliczymy ze wzoru:

$$P_s = \prod_{i=1}^n P_i \quad /5.28/$$

gdzie: P_i - prawdopodobieństwo sprawnej pracy i -tego elementu

n - ilość elementów w systemie.

Gdy będziemy rozpatrywać sprawną pracę w pewnym określonym czasie to

$$P_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt}$$

/5.29/

wtedy

$$P_s(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt}$$

/5.30/

gdzie: $\lambda_i / t /$ - awaryjność elementu i -tego typu.

Druga metoda zakłada, że system jest niesprawny, gdy jedna z charakterystyk wyjdzie poza granice tolerancji. Przy tej metodzie charakterystyki mają rozkład normalny. Przy dużej ilości elementów o jednakowej i dużej niezawodności prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia oblicza się ze wzoru:

$$Q_s \approx 1 - e^{-nQ} \approx nQ \quad /5.31/$$

W przypadku gdy poszczególne elementy nie są równoniezawodne, należy obliczać ze wzoru:

$$Q_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) \quad /5.32/$$

Przy eksponencjalnym rozkładzie niezawodności, prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemu obliczymy z postaci:

$$P_s /t/ = \prod_{i=1}^n P_i(t) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad /5.33/$$

Awaryjność systemu $-\lambda_s$ przy powyżej wymienionym rozkładzie oraz średni czas jego sprawnej pracy $T_{sr\ s}$, będą wyrażone poprzez charakterystyki elementów w następującej postaci:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad /5.34/$$

$$T_{sr\ s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{sr\ i}}} \quad /5.35/$$

Obliczenie ilościowych charakterystyk niezawodności według wzorów /5.33/, /5.34/ i /5.35/ jest bardzo trudne, gdyż wymaga znajomości awaryjności wszystkich elementów wchodzących w skład systemu. Dlatego często zakłada się, że wszystkie elementy jednego typu mają jednakową awaryjność.

Wtedy wzory /5.33/ - /5.35/ będą miały postać:

$$P_s(t) = e^{-t \sum_{i=1}^m n_i \lambda_i} \quad /5.36/$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^m n_i \lambda_i \quad /5.37/$$

$$T_{sr.s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i \frac{1}{T_{sr.i}}} \quad /5.38/$$

gdzie: n_i - ilość elementów i -tego typu

m - ilość grup elementów.

Z ostatnich wzorów /5.36/ - /5.38/ wynika, że do obliczenia ilościowych charakterystyk niezawodności systemu wystarczy znać jego schemat elektryczny /ilość elementów i ich typ/ oraz średnią awaryjność elementów wszystkich typów.

Eksponencjalny rozkład niezawodności charakteryzuje się tą wadą, że jest słuszny na odcinku czasu gdzie $\lambda(t) \approx \text{const}$ /patrz rys. 3.6./.

Dla odcinków czasu gdzie $\lambda(t) \neq \text{const}$, wartości $P_s /t/$ i $T_{sr.s}$. należy obliczać ze wzorów

$$P_s(t) = e^{-t \sum_{i=1}^m n_i \lambda_i(t) dt} \quad /5.39/$$

$$T_{sr.s} = \int_0^{\infty} P_s(t) dt \quad /5.40/$$

Obliczane ilościowe charakterystyki według wzorów /5.36/ - /5.38/ nieuwzględniając realnych warunków pracy elementów. Jak wiadomo awaryjność zależna jest od reżimu i warunków pracy elementów.

Przy obliczeniach reżimów pracy biorąc pod uwagę eksponencjalny rozkład niezawodności można korzystać w zależności /5.36/ - /5.38/ nie uwzględniając realnych warunków pracy elementów. Jak wiadomo awaryjność zależna jest od reżimu i warunków pracy elementów.

Przy obliczeniach reżimów pracy biorąc pod uwagę eksponencjalny rozkład niezawodności można korzystać z zależności /5.36/ - /5.38/, ale należy podstawiać do wzorów awaryjność odpowiadającą realnym reżimom pracy poszczególnych elementów będących w schemacie systemu. Zależności $\lambda = f / K_{obc}$, T^0 dla niektórych elementów podano na rys. 4.13 i 4.14.

Metoda obliczania niezawodności oparta na eksponencjalnym rozkładzie niezawodności jest słuszna i przy rezerwowanym łączeniu elementów.

Rozpatrzmy wzory do obliczania niezawodności systemu przy ogólnym i rozdzielnym rezerwowaniu.

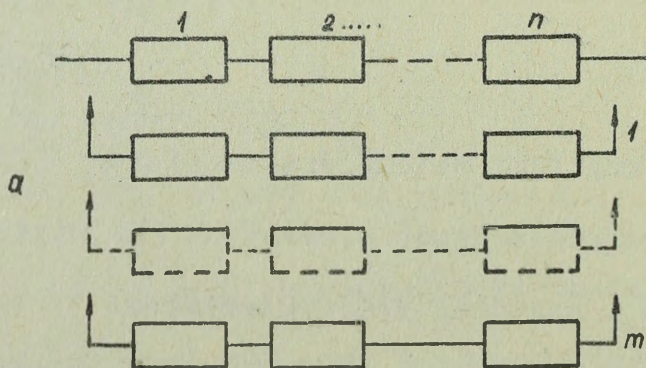
Rezerwowanie ogólne.

Najprostszy schemat rezerwowania ogólnego przedstawiono na rys. 5.7.

gdzie: n - ilość podstawowych elementów w systemie

m - ilość rezerwowych stopni.

Przy założeniu, że uszkodzenie jest zdarzeniem przypadkowym i niezależnym, prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia



Rys. 5.7. Rezerwowanie ogólne.

systemu $Q_{so}/t/$ z "m" rezerwowanymi stopniami, będzie równe obliczonemu prawdopodobieństwu powstania uszkodzenia podstawowego i rezerwowanego stopnia, co się wyrazi wzorem:

$$Q_{so}/t/ = \prod_{i=1}^{m+1} Q_i(t) \quad /5.41/$$

Prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemu:

$$P_{so}/t/ = 1 - Q_{so}/t/ = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} Q_i(t) \quad /5.42/$$

Jeżeli rezerwowane i wszystkie rezerwowe elementy /układy/ są jednakowej niezawodności, to prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemu można wyrazić wzorem:

$$P_{so}/t/ = 1 - Q_i^{m+1}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t)\right]^{m+1} \quad /5.43/$$

albo przy $\lambda(t) = const.$

$$P_{so}/t/ = 1 - \left[1 - e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}\right]^{m+1} \quad /5.44/$$

W przypadku gdy wszystkie elementy posiadają jednakową niezawodność to wzór /5.43/ przyjmie postać:

$$P_{so}/t/ = \quad \quad \quad /5.45/$$

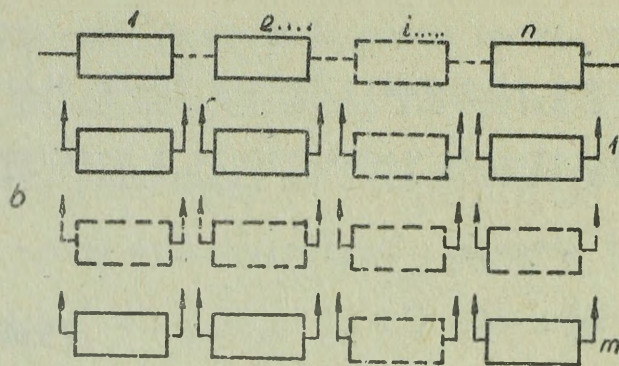
Rezerwowanie rozdzielne.

Najprostszy schemat rezerwowania rozdzielnego przedstawiono na rys. 5.8.

gdzie: n - ilość podstawowych elementów w systemie

m - ilość rezerwowych elementów do każdego rezerwowanego elementu.

P_i - prawdopodobieństwo sprawnej pracy i-tego elementu.



Rys. 5.8. Rezerwowanie rozdzielne.

Prawdopodobieństwo tego, że nastąpi uszkodzenie systemu z powodu i -tego elementu jest równe prawdopodobieństwu uszkodzenia i -tego elementu i wszystkich elementów rezerwujących go.

$$Q_{i0}(t) = \prod_{i=1}^{m+1} Q_i = \prod_{i=1}^{m+1} [1 - R_i(t)] \quad /5.46/$$

Natomiast prawdopodobieństwo sprawnej pracy i -tego elementu i wszystkich rezerwowych do niego wynosi:

$$P_{i0}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} [1 - P_i(t)] \quad /5.47/$$

Jeżeli przyjąć, że rezerwowane i rezerwowe elementy są jednakowo niezawodne to,

$$P_{i0}(t) = 1 - [1 - P_i(t)]^{m+1} \quad /5.48/$$

W wypadku gdy grupy elementów są funkcjonalnie połączone w układzie podstawowym, to znaczy w szereg /n/, wtedy prawdopodobieństwo sprawnej pracy całego systemu równa się iloczynowi prawdopodobieństw sprawnej pracy poszczególnych grup to znaczy:

$$P_{sr}(t) = \prod_{i=1}^n P_{i0}(t) = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - P_i)^{m+1}] \quad /5.49/$$

Jeżeli prawdopodobieństwo sprawnej pracy wszystkich elementów będzie równe, to prawdopodobieństwo sprawnej pracy całego systemu będzie:

$$P_{sr}(t) = \left\{ 1 - [1 - P(t)]^{m+1} \right\}^n \quad /5.50/$$

lub przy $\lambda(t) = const$

$$P_{sr}(t) = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - e^{-t\lambda_i})^{m+1}] \quad /5.51/$$

Obliczanie ilościowych charakterystyk niezawodności metodą eksponencjalnego prawa rozkładu niezawodności jest najprostsze, przez co jest szeroko stosowane w praktyce.

Metodę tę można wykorzystywać przy obliczaniu niezawodności systemów tak jednorazowego użytku /rakiety/, jak i wielokrotnego gdy zastosowano wymianę elementów mało niezawodnych /przed rozpoczęciem pracy przeprowadza się krótkoterminowe sezonowanie/.

Współczynnikowa metoda oceny niezawodności WS.

Pamiętamy, że przy eksponencjalnym rozkładzie /rozdz.III pkt. 2 / dokonano następujących założeń:

1. uszkodzenia są zdarzeniami przypadkowymi i niezależnymi;
2. uszkodzenie dowolnego elementu powoduje uszkodzenia całego systemu;
3. awaryjność uszkodzeń $\lambda /t/ = const$
4. awaryjność (λ) wszystkich elementów WS w zależności od warunków eksploatacyjnych zmienia się w jednakowym stopniu.

Pierwsze trzy założenia oznaczają słuszność rozkładu eksponencjalnego i prawidłowość równania

$$P /t/ = \exp /- \lambda t /$$

Czwarte założenie oznacza, że przy różnych warunkach eksploatacji słuszne jest równanie:

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_0} = K_i = \text{const} \quad /5.52/$$

gdzie:

λ_0 - awaryjność elementu WS, która jest znana z wiarygodnością.

Element posiadający awaryjność λ_0 w niniejszym punkcie będziemy nazywać zasadniczym elementem systemu.

Dla większości elementów masowej produkcji WS podobne założenia są w znacznym stopniu słuszne.

Na przykład, zależność awaryjności oporników λ_R i kondensatorów λ_C od współczynników obciążenia może być aproksymowana wyrażeniami

w postaci

$$\lambda_R = a_n K_{obc} [(b_n K_{obc})^2 + 1]^{n_R K_{obc}}$$

$$\lambda_C = a_c K_{obc} [(b_c K_{obc})^2 + 1]^{n_c K_{obc}}$$

Współczynniki b_R, b_C zależą od typów oporników i kondensatorów, ale zawsze są mniejsze od jedności.

Przy $K_{obc} < 1$ słuszne jest wyrażenie:

$$K_i = \frac{\lambda_c}{\lambda_R} = \frac{a_c}{a_R} = \text{const.} \quad /5.53/$$

Przyjmując, że wszystkie elementy jednego typu są o jednakowej niezawodności i uwzględniając równanie /5.52/, wtedy wzory /5.45/ można przedstawić w postaci:

$$P_s(t) = \exp(-t \lambda_0 \sum_{i=1}^m K_i n_i) \quad /5.54/$$

$$\lambda_s = \lambda_0 \sum_{i=1}^m K_i n_i \quad /5.56/$$

$$T_{sr.s} = \frac{1}{\lambda_0 \sum_{i=1}^m K_i n_i} = \frac{T_{sr.0}}{\sum_{i=1}^m K_i n_i} \quad /5.57/$$

gdzie: $T_{\text{śro}}$ - średni czas sprawnej pracy systemu uwzględniający uszkodzenia zasadniczego elementu.

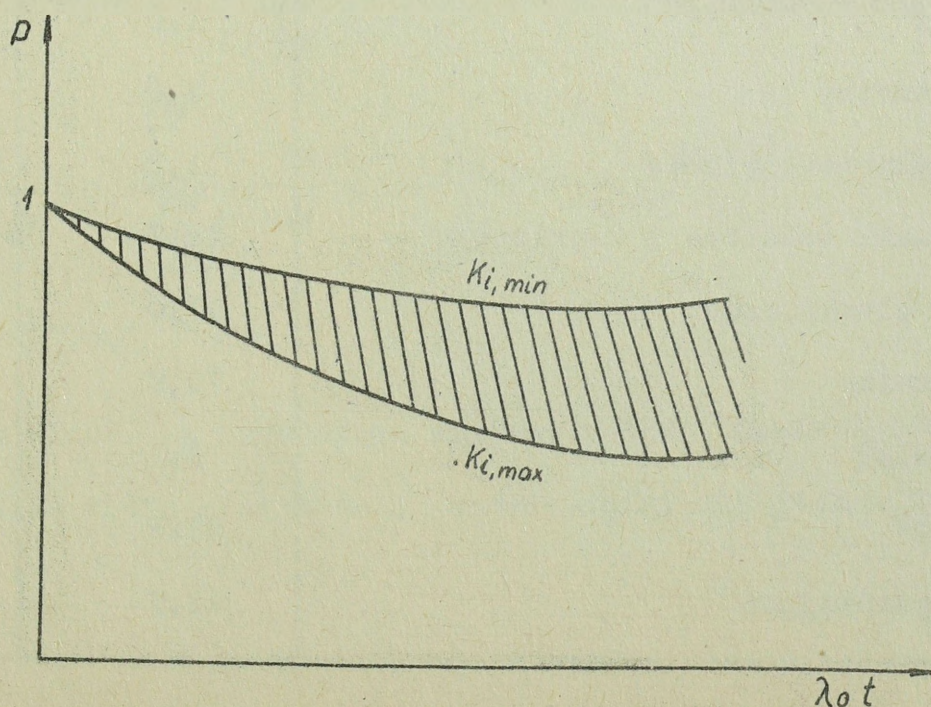
Z powyższych wyrażeń /5.54/ - /5.57/ widać, że dla określenia ilościowych charakterystyk niezawodności systemu nie konieczne musi się znać niezawodność poszczególnych elementów wchodzących w WS. Wystarczy znać oprócz współczynnika niezawodności K_i , ilość elementów systemu oraz bezawaryjność zasadniczego elementu.

Współczynnik niezawodności - K_i można otrzymać na podstawie danych o awaryjności elementów, które można uzyskać podczas eksploatacji dowolnego WS.

Wartości współczynników K_i są bardzo różne nawet dla jednych i tych samych elementów, gdyż zależą od reżimów pracy, jakości obsługi itp. Z tego względu celowym jest obliczać $P_s / t /$, λ s/t/ i $T_{\text{śr.s.}}$ dla maksymalnych i minimalnych wartości K_i .

Przykładową zależność $P_s = f / \lambda \text{ ot} /$ dla $K_{i,\text{min}}$ i $K_{i,\text{max}}$ podano na rys. 5.9. /13/. Z rysunku widać, że prawdopodobieństwo sprawnej pracy systemu będzie znajdowało się wewnątrz zakreślonego obszaru.

Przy pomocy takich wykresów można w prosty sposób obliczyć ilościowe charakterystyki niezawodności przy zmiennych warunkach pracy systemu.



Rys. 5.9. Graficzne przebiegi $P / t /$ przy $K_{i,\text{max}}$ i $K_{i,\text{min}}$.

W rzeczywistości przy założeniu, że $K_i = \text{const}$ ze zmianą warunków eksploatacji, zmienia się tylko skala krzywej $P_s = f / \lambda_{ot}$

W tabeli Nr 5.2 podano wartości współczynników niezawodności K_{imin} i K_{imx} szeregu elementów wchodzących w skład maszyn matematycznych, systemów okrętowych i aparatów latających, gdzie jako element zasadniczy wzięto opornik. Z tabeli wyłączono wartości K_i znacznie odbiegające od K_{imin} i K_{imx} . Takie pojedyncze wartości K_i uważano jako niewiarygodne.

W czasie obliczania niezawodności konkretnego systemu, tablice współczynników niezawodności winno się udokładniać.

Tabela Nr 5.2.

Nazwa elementu	Wartość K_{imin}	Wartość K_{imx} .
Lampy próżniowe	18,3	26,6
Lampy generacyjne	70,0	77,0
Kondensatory	0,33	0,61
Kondensatory tantalowe	10,7	15,3
Oporniki	1,0	1,0
Potencjometry	7,2	12,0
Diody półprzewodnikowe	11,7	15,4
Prostowniki selenowe i kupritowe	16,7	20,0
Silniki elektryczne	17,0	22,0
Przetwornice	70,0	100,0
Przekaźniki	3,3	5,5
Żyroskopy	97,5	100,0
Kinie opóźniające	62,5	93,4

Udokładnienia obowiązkowo należy dokonać w tym wypadku gdy w systemie zastosowano specjalne przedsięwzięcia mające na celu podwyższenie niezawodności na przykład w celu obniżenia reżimu pracy oddzielnych elementów.

Sposób współczynnikiowy pozwala z dużą dokładnością porównać niezawodność systemów lub podsystemów, mając tylko przybliżone dane o ilościowych charakterystykach niezawodności elementów.

Na przykład dla dwóch systemów lub podsystemów, stosując wzory /5.54/ - /5.57/ można zapisać:

$$P_1(t) = \exp(-t \lambda_0 \sum_{i=1}^{m_1} K_i n_{i1})$$

$$\lambda_1 = \lambda_0 \sum_{i=1}^{m_1} K_i n_{i1}$$

$$T_{sr.1} = \frac{T_{sr.0}}{\sum_{i=1}^{m_1} K_i n_{i1}}$$

$$P_2(t) = \exp(-t \lambda_0 \sum_{i=1}^{m_2} K_i n_{i2})$$

$$\lambda_2 = \lambda_0 \sum_{i=1}^{m_2} K_i n_{i2}$$

$$T_{sr.2} = \frac{T_{sr.0}}{\sum_{i=1}^{m_2} K_i n_{i2}}$$

$$\frac{T_{sr.1}}{T_{sr.2}} = \frac{\sum_{i=1}^{m_2} K_i n_{i2}}{\sum_{i=1}^{m_1} K_i n_{i1}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\ln P_2(t)}{\ln P_1(t)}$$

/5.58/

Ze wzorów widać, że porównywać systemy według niezawodności można, znając tylko skład elementów i współczynniki ich niezawodności.

Przy tym niekoniecznie należy znać ilościowe charakterystyki niezawodności elementów, w tym również i zasadniczego elementu.

Stosunek $\frac{\sum_{i=1}^{m_1} K_{ini}}{\sum_{i=1}^{m_2} K_{inix}}$ zmienia się znacznie mniej niż współczynniki K_{imin} i K_{inx} .

Dlatego porównanie niezawodności systemu /podsystemu/ sprowadza się z dużą dokładnością.

Metodę współczynnikową obliczania niezawodności wykorzystuje się na etapie projektowania WS, co znacznie upraszcza obliczanie ilościowych charakterystyk niezawodności oddzielnych podsystemów czy systemów w postaci:

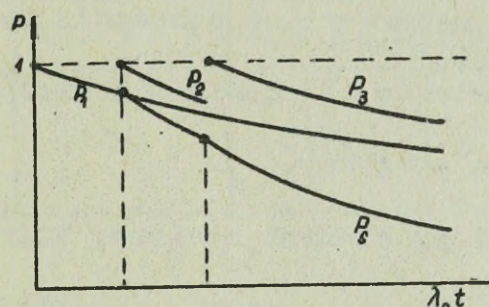
$$\sum_{i=1}^m n_i k_i$$

Mając tablice wartości współczynników niezawodności szeregu elementów, konstruktorów może odpowiednio dobrać n_i elementów oraz ich ilości w danym schemacie. W przypadku gdy nieuda się odpowiednio wypełnić schematu przyjętymi ilościami wynikającymi z postaci $\sum_{i=1}^m n_i k_i$ to oznacza, że należy zastosować specjalne przedsięwzięcia w celu podwyższenia niezawodności systemu.

Po obliczeniu niezawodności wyżej omówionym sposobem można określić prawdopodobieństwo sprawnej pracy według podsystemów wykreslić krzywe $P = f(\lambda_0 t)$ dla poszczególnych podsystemów na jednym wykresie. Pozwoli to poglądowo porównać podsystemy według niezawodności i znaleźć słabe miejsca systemu, ustalić kierunki podwyższenia ich niezawodności.

Charakterystyczną zaletą większości WS a wśród nich zwłaszcza systemów kierowania raketami jest to, że nie wszystkie bloki systemu pracują nieprzerwanie od momentu włączenia do wyłączenia. W różnych odstępach czasu może pracować ta lub inna część systemu.

Z tego względu krzywe $P = f(\lambda_0 t)$ dla poszczególnych bloków czy podsystemów winny być rozmieszczone w czasie jak to podano na rys. 5.10.



Rys. 5.10. Przebiegi $P / t /$ dla trzech podsystemów oraz przebieg sumaryczny systemu.

W celu wyliczenia prawdopodobieństwa sprawnej pracy systemu w tym przypadku posługujemy się zasadą mnożenia poszczególnych prawdopodobieństw.

W trakcie obliczania pewną trudność stanowi przypadek gdy krzywe $P = f(\lambda_0 t)$ poszczególnych podsystemów nie pokrywają się, co oznacza, że nie wszystkie podsystemy pracują jednocześnie. Gdyby tego nieuwzględniono, obliczone prawdopodobieństwo sprawnej pracy byłoby obniżone w stosunku do rzeczywistego.

Istotnym jest także wybór ilości elementów /bloków, podsystemów/, które winny być uwzględniane w czasie obliczania niezawodności.

Często w WS są elementy /bloki, podsystemy/, których niesprawność powoduje tylko pogorszenie niektórych charakterystyk systemu,

a uszkodzenie innych elementów powoduje niewłaściwą pracę systemu.

W czasie obliczania niezawodności wystarczy uwzględniać tylko te

elementy /bloki, podsystemy/, których uszkodzenie powoduje niesprawność systemu.

Posługując się współczynnikiem metodą obliczania niezawodności wygodnie jest zastosować następującą kolejność obliczania:

1. Precyzuje się pojęcie uszkodzenia systemu
2. Zestawia się schemat obliczenia niezawodności t.zn. podaje się połączenia podstawowe i rezerwowe. W schemacie tym uwidocznią się czasowy podział pracy podsystemów. Elementy nie pracujące cały czas należy wydzielić w oddzielne podgrupy.
3. Wybiera się zasadniczy element systemu, którego awaryjność znana jest z dużą wiarygodnością np. opornik czy kondensator itp.
4. Zestawia się tablicę obliczeniową Nr 5.3.
5. Według danych z tabeli 5. 3. wykonuje się dla każdego bloku zależności $P = f / \lambda_0 t /$ dla maksymalnych i minimalnych wartości współczynników niezawodności.

Tabela Nr 5.3.

L.p	Typ element	BLOK Nr. 1				
		n_i	$K_{i \max}$	$n_i K_{i \max}$	$K_{i \min}$	$n_i K_{i \min}$
1						
2						
⋮						
m						
				$\sum_{i=1}^m n_i K_{i \max}$		$\sum_{i=1}^m n_i K_{i \min}$
L.P	Typ element					
		n_i	$K_{i \max}$	$n_i K_{i \max}$	$K_{i \min}$	$n_i K_{i \min}$
1						
2						
⋮						
m						
				$\sum_{i=1}^m n_i K_{i \max}$		$\sum_{i=1}^m n_i K_{i \min}$

6. Zestawia się tablicę odpowiednich wartości średnich czasów sprawnej pracy bloków na przykład jak to podano w tabeli Nr 5.4

Tabela Nr 5.4

Nazwa bloku	blok Nr 1	blok Nr 2	blok Nr 3	blok Nr 4	blok Nr 5
$\frac{T_{sr i}}{T_{sr 1}}$	1	0,73	0,65	0,95	0,8

Stosunek $\frac{T_{sr i}}{T_{sr 1}}$ wylicza się według wzorów /5.58/ i danych z tabeli Nr 5.3.

Tabela Nr 5.4. pozwala poglądowo porównać niezawodność poszczególnych bloków i wykryć najmniej niezawodne bloki w WS.

7. Według danych z tabeli Nr 5.3 dotyczących K_{imx} i K_{imin} wykonuje się wykresy prawdopodobieństwa sprawnej pracy systemu w funkcji λ_{ot} .

8. Na podstawie znanego czasu ciągłości pracy systemu oraz awaryjności zasadniczego elementu λ_0 wylicza się prawdopodobieństwo sprawnej pracy całego systemu

9. Znając prawdopodobieństwo sprawnej pracy wylicza się następujące ilościowe charakterystyki niezawodności.

Metoda wyżej opisana jest wygodna gdy chcemy obliczyć niezawodność systemu z pewnym przybliżeniem.

Nie można z pomocą tej metody obliczać ilościowych charakterystyk niezawodności przy wzajemnym oddziaływaniu na siebie parametrów poszczególnych elementów, krócej mówiąc, jest właściwa przy spełnionych założeniach.

ZAKOŃCZENIE

Niniejszy skrypt p.t. "Niezawodność wielkich systemów" jest dalszą kontynuacją skryptu pierwszego opracowanego dla kursu badań operacyjnych p.t. "Podstawy teorii i techniki niezawodności" wydanego przez ASG w 1964 roku.

Czytelnicy, którzy pragną szerzej zapoznać się z niektórymi zagadnieniami poruszonymi tylko problemowo w skrypcie, mogą znaleźć interesujące ich materiały w literaturze pod odpowiednią pozycją w spisie literatury, a w treści skryptu podanej w nawiasie kwadratowym [].

Skrypt został opracowany dla kursu Badań Operacyjnych, na którym słuchacze znają matematykę wyższą, dlatego czytelnik, który nie spotykał się z matematyką wyższą dla łatwiejszego posługiwania się materiałem zawartym w skrypcie powinien zapoznać się z elementami matematyki wyższej.

Normowana funkcja Laplace'a

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{\tau^2}{2}} d\tau$$

Setne wartości dla Z

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	120	160	199	239	279	319	359
0,1	0,0398	438	478	517	557	596	636	675	714	753
0,2	793	832	871	910	948	987	026	064	103	141
0,3	0,1179	217	255	293	331	368	406	443	480	517
0,4	554	591	628	664	700	736	772	808	844	879
0,5	915	950	985	019	054	088	123	157	190	224
0,6	0,2257	291	324	357	389	422	454	486	517	549
0,7	580	611	642	673	703	734	764	794	823	852
0,8	881	910	939	967	995	023	051	078	106	133
0,9	0,3159	186	212	238	264	289	315	340	365	389
1,0	413	437	461	485	508	531	554	577	599	621
1,1	643	665	686	708	729	749	770	790	810	830
1,2	849	869	888	907	925	944	962	980	997	015
1,3	0,4032	049	066	082	099	115	131	147	162	177
1,4	192	207	222	236	251	265	279	292	306	319
1,5	332	345	357	370	382	394	406	418	429	441
1,6	452	463	474	484	495	505	515	525	535	545
1,7	554	564	573	582	591	599	608	616	625	633
1,8	641	649	656	664	671	678	686	693	699	706
1,9	713	719	726	732	738	744	750	756	761	767
2,0	772	778	783	788	793	798	803	808	812	817
2,1	821	826	830	834	838	842	846	850	854	857
2,2	860	864	867	871	874	877	880	883	886	889
	996	474	906	263	545	755	894	962	962	893
2,3	892	895	898	900	903	906	908	911	913	915
	759	559	296	969	581	133	625	060	437	758
2,4	918	920	922	924	926	928	930	932	934	936
	025	237	397	506	564	572	531	493	309	128
2,5	0,4937	939	941	942	944	946	947	949	950	952
	903	634	323	968	574	139	664	151	600	012
2,6	953	954	956	957	958	959	960	962	963	964

Z	Setne wartości dla Z									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	388	729	035	308	547	754	930	074	189	274
2,7	965	966	967	968	969	970	971	971	972	973
	330	358	359	333	280	202	099	972	821	646
2,8	974	975	975	976	977	978	978	979	980	980
	449	229	988	726	443	140	818	476	116	738
2,9	981	981	982	983	983	984	984	985	985	986
	342	929	498	052	589	111	618	110	588	051
3,0	986	986	987	987	988	988	988	989	989	989
	501	938	361	772	171	558	933	297	650	992
3,1	990	990	990	991	991	991	992	992	992	992
	324	646	957	260	553	836	112	378	636	886
3,2	993	993	993	994	994	994	994	994	994	994
	129	363	590	810	024	230	429	623	810	991
3,3	995	995	995	995	995	995	996	996	996	996
	166	335	499	658	811	959	103	242	376	505
3,4	996	996	996	996	997	997	997	997	997	997
	631	752	869	982	091	197	299	398	493	585
3,5	997	997	997	997	997	998	998	998	998	998
	674	759	842	922	999	074	146	215	282	347
3,6	998	998	998	998	998	998	998	998	998	998
	409	469	527	583	637	689	739	787	834	879
3,7	998	998	999	999	999	999	999	999	999	999
	922	964	004	043	080	116	150	184	216	247
3,8	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	274	305	333	359	385	409	433	456	478	499
3,9	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	519	539	557	575	593	609	625	641	655	670
4,0	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	683	696	709	721	733	744	755	765	775	784
4,1	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	793	802	811	819	826	834	841	848	854	861
4,2	0,4999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	867	872	878	883	888	893	898	902	907	911
4,3	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	915	918	922	925	929	932	935	938	941	943

Z	Setne wartości dla Z									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4,4	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	946	948	951	953	955	957	959	961	963	964
4,5	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	966	968	969	971	972	973	974	976	977	978
5,0	999									
	997									

U w a g a: Rozpoczynając od $Z = 2,2$ wartość funkcji podaje się do siódmego miejsca po przecinku, np. $\phi(4) = 0,4999683$.

Awaryjność elementów

wg firmy "Martin i K" /USA/ z 1958 r.

Nazwa elementu	Awaryjność na 1 godz.pracy
1	2
Przekaźniki	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Kondensatory	$0,005 \cdot 10^{-3}$
Kondensatory /tantalowe/	$0,153 \cdot 10^{-3}$
Przerywacze obwodów	$0,003 \cdot 10^{-3}$
Linie opóźniające	$0,934 \cdot 10^{-3}$
Diody	$0,04 \cdot 10^{-3}$
Diody /germanowe/	$0,4 \cdot 10^{-3}$
Przetwornice	$0,28 \cdot 10^{-3}$
Silniki elektryczne	$0,17 \cdot 10^{-3}$
Prądnice	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Żyroskopy	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Filtry	$0,003 \cdot 10^{-3}$
Obwody radiowe	$0,003 \cdot 10^{-3}$
Żarówki oświetleniowe i kontrolne	$0,003 \cdot 10^{-3}$
Magnetrony	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Potencjometry	$0,12 \cdot 10^{-3}$
Oporniki	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Pobudzacze	$0,003 \cdot 10^{-3}$
Cewki indukcyjne	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Seneroidy	$0,005 \cdot 10^{-3}$
Wyłączniki	$0,012 \cdot 10^{-3}$

1	2
Selsiny	$0,035 \cdot 10^{-3}$
Stabilizatory temperatury	$0,006 \cdot 10^{-3}$
Przełączniki czasowe /programowane/	$0,003 \cdot 10^{-3}$
Transformatory	$0,03 \cdot 10^{-3}$
Tranzystory	$0,06 \cdot 10^{-3}$
Wibratory	$0,004 \cdot 10^{-3}$
Lampy elektronowe	$0,204 \cdot 10^{-3}$
Zawory	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Pompy	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Zbiorniki paliwa	$0,001 \cdot 10^{-3}$
Tablice rozdzielcze energii elektrycz.	$0,019 \cdot 10^{-3}$
Membramy	$0,005 \cdot 10^{-3}$
Zawory paliwowe	$0,025 \cdot 10^{-3}$
Urządzenia połączeniowe	$0,008 \cdot 10^{-3}$
Mufy elektryczne	$0,094 \cdot 10^{-3}$

L I T E R A T U R A

1. M. Owczynnikow
S. Paszkowski
W. Żelazowski - Zastosowanie najnowszych zdobyczy radioelektroniki w dziedzinie wojskowej.
Myśl Wojskowa Nr 4. Wyd. MON 1965 r.
2. W. Żelazowski - Uogólnione kryterium niezawodności eksploatacyjnej systemów radioelektronicznych
/Ref. wygłoszony w Mar.Woj.1965/ WAT.
3. D.H. Chorafas - Procesy statystyczne i niezawodność urządzeń.
Wyd. PWT W-wa 1963.
4. A.I. Lerner - Zadania teorii sterowania wielkimi systemami.
Praca zbiorowa. Wyd. PAN 1964.
5. J. Felicki - Zagadnienia niezawodności wielkich systemów.
Praca zbiorowa. Wyd. PAN 1964.
6. A. Zoń - Podstawy teorii i techniki niezawodności.
Wyd. ASG W-wa 1964.
7. W.W. Bołotin - Statisticeskoje metody w stroitielnoj
mechanikie. Gostrojzdat 1961
8. N.W.Dunin-Borkowski - Teoria wierojatnostiej i matiematiczeskaja
statistika w tiechnikie /obszczaja czast/
wyd.GTTI 1955.
9. I.M. Malikow - Osnowy, tieorii i rasczieta nadzieźnosti
Wyd. Sudpromgiz 1960.
10. B.S.Šotskow
S.Je. Rostkowskaja - Charakteristika nadzieźnosti soprotiwlenij
i kondensatorów.
Awtomatika i telemiechanika 1960 Z. XXI. Nr 5.
11. E.G. Wentcel - Teoria wierojatnostej
Izd. "Nauka" Moskwa 1964.
12. Nadieźnost naziemnowo radioelektronowo oborudowanija pod
red. Szulejkina Sowietskoje radio 1957.
13. A.M. Połowko - Koefficijentnyj mietod rasczieta nadzieźnosti
słożnych automaticzeskich sistem.
Wyd. AN. SSSR OTN Energietiki i awtomatiki
Nr 6.1960.
14. W.J. Siforow - O mietodach rasczieta nadzieźnosti raboty
sistem sodierżaszczich bolszoje cziszko
elementów. Wyd. AN SSSR OTN Nr 6.1954.
15. Ch.L. Smolicki
Cukrew - Kwoprosu ob optimalnom rezerwirowanii
apparatury. Wyd. AN SSSR OTN. Energetika
i awtomatika Nr 4. 1959.

16. A.D, Epifanow - Nadieźnosti awtomaticzeskich sistem.
Wyd. Maszynostrojenije 1964.
17. Aviation Week, 1960 Sept 5, vol. 73, No 10.pp81,83,87.
18. Bazovsky Reliability: Theory and Practice Prentice Hall 1961.
19. Krolm C.A. Reliability Analysis Technigues Proceedings of the
IRE 1960, II, vol 48, No 2 pp 176 - 192.
20. Dummer Electronic Equipment Reliability 190.

Wydrukowano w 103 egz.

Egz.nr 1-100 Bibl.Jawna

Egz.nr 101-103 - autor

Wyk: ppłk A.Zoń

CW-0-XV-2792

