

GRZEGORZ BORUTA

PODSTAWY EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ

PODSTAWY NIEZAWODNOŚCI

Każdy wyrób techniczny (też urządzenie) produkowany jest z pewnym przeznaczeniem – w okresie eksploatacji powinien wypełniać określone funkcje przy spełnianiu wymagań zdefiniowanych przez jego projektanta lub wytwórcę.

Zakres i rodzaj tych wymagań precyzowane są w dokumentacji technicznej w postaci podstawowych parametrów pracy (właściwości eksploatacyjnych).

Dla samochodu mogą to być np.: moc silnika, prędkość maksymalna, zużycie paliwa itp..

Dla komputera mogą to być np.: pobór prądu, pojemność pamięci, szybkość działania, jakość (rozdzielczość i czas odświeżania) monitora itp..

Zdolność obiektu technicznego do spełniania powierzonych mu funkcji zgodnie z założonymi warunkami charakteryzuje jego **niezawodność**.

Niezawodność jest cechą całego obiektu technicznego, np. urządzenia.

W każdym obiekcie można wyróżnić jego układy funkcjonalne, zespoły, elementy, dla których również mogą być wyznaczone funkcje i wymagania techniczne.

Pewne funkcje użytkowe mogą być realizowane nie przez pojedyncze obiekty, lecz przez zbiór jednorodnych lub różnych obiektów pracujących jako system.

Dlatego przy omawianiu niezawodności wygodne jest używanie pojęcia obiektu, rozumianego, w zależności od potrzeb, jako pojedynczy element, zespół, układ, kompletne urządzenie lub zbiór urządzeń. Taki sposób podejścia pozwala na uogólnienie rozważań nad niezawodnością obiektów technicznych w postaci dyscypliny naukowej.

Teoria niezawodności – nauka zajmująca się badaniami występowania i przewidywania uszkodzeń oraz określaniem metod zapewnienia żądanej niezawodności.

Niezawodność obiektu jest kształtowana we wszystkich fazach jego istnienia: konstrukcji, produkcji i eksploatacji. Badanie niezawodności jest bardzo ważne dla powstania obiektu o wysokiej niezawodności (odpowiedniej wartości parametrów definiujących niezawodność).

Teoria niezawodności, jako nauka, posługuje się określonym zakresem pojęć podstawowych, które wymagają ścisłego zdefiniowania, przede wszystkim niezawodności jako właściwości obiektu.

Niezawodność obiektu – jego właściwość polegająca na jego zdolności do spełniania wyznaczonych mu funkcji zgodnych z przeznaczeniem w danych warunkach i danym czasie eksploatacji.

Niezawodność może być rozpatrywana w odniesieniu do obiektu użytkowanego zgodnie z przeznaczeniem.

Wymagania mogą dotyczyć funkcjonowania lub zachowania zdolności przez określoną wartość miary eksploatacji, wykonania określonej ilości pracy, spełnienia zadanej misji itp..

Warunki eksploatacji, w odniesieniu do urządzeń, są określone przez warunki atmosferyczne, obciążenia, jakość zasilania a także technikę użytkowania i obsługi / naprawiania.

Czas jest istotny zwłaszcza dla urządzeń użytkowanych i obsługiwanych ze zmienną intensywnością w długich okresach czasu.

Jeżeli wielkością charakteryzującą zdolność obiektu do spełniania stawianych mu wymagań jest prawdopodobieństwo spełnienia tych wymagań, to niezawodność może być rozumiana jako **prawdopodobieństwo tego, że obiekt będzie prawidłowo spełniał swoje zadania w danych warunkach przez określony czas** – niezawodność jest wielkością losową, a jej badanie i określenie musi być oparte na metodach probabilistycznych i statystyki matematycznej.

Jeśli prawidłowe spełnianie zadań przez obiekt nazwać po prostu sukcesem to: niezawodność jest to **prawdopodobieństwo sukcesu**.

Przy określaniu niezawodności konieczne jest jednoznaczne zdefiniowanie **stanu niezawodnościowego obiektu**. Dla oceny niezawodności urządzeń najczęściej przyjmuje się (podobnie jak w diagnostyce) założenie **dwustanowości**. Wyróżnia się stany **zdatności i niezdatności**.

Zdatność jest to stan obiektu, w którym ma on zdolność wykonywania wyznaczonych mu funkcji zgodnie z parametrami określonymi w dokumentacji technicznej.

Stany zdatności i niezdatności są jednoznacznie zdefiniowane przez wymagania zawarte w dokumentacji technicznej, a przejścia między nimi nazywają się **uszkodzeniem i naprawą**.

Stan zdatności jest stanem, w którym parametry określające pewne właściwości urządzenia związane z jego pracą nie przekraczają pewnych dopuszczalnych wartości granicznych.

Rozważając stany niezawodnościowe obiektu, niezawodność można zdefiniować jako **prawdopodobieństwo tego, że obiekt będzie zdatny (sprawny technicznie) dla określonej wartości miary jego eksploatacji**.

Biorąc pod uwagę to, że stany niezawodnościowe obiektu określone są przedziałami wartości określonych parametrów jego pracy, to niezawodność definiuje się jako **prawdopodobieństwo tego, że wartości parametrów określających istotne właściwości obiektu nie przekroczą dla określonej wartości miary jego eksploatacji dopuszczalnych granic w określonych warunkach eksploatacji**.

Niezawodność jest właściwością ogólną, na którą składają się: poprawność działania, trwałość, naprawialność i zachowawczość.

Poprawność działania (nieuszkodzalność, bezawaryjność) – właściwość obiektu polegająca na zachowaniu zdolności do pracy w ciągu określonego przedziału miary eksploatacji bez nieplanowych, wymuszonych uszkodzeniami przestojów. Charakteryzuje zdolność obiektu do ciągłego funkcjonowania bez uszkodzeń. Jej miarą jest resurs pracy bez zakłóceń (uszkodzeń), przy czym zakłóceniami nie są planowane obsługiwania / naprawy. Miarą może też być prawdopodobieństwo tego, że urządzenie rozpoczynające pracę wykona ją do zamierzonego końca, np. pojazd wysłany w trasę powróci do miejsca postoju.

Trwałość – właściwość obiektu polegająca na zachowaniu w wymaganych granicach głównych parametrów roboczych określających jego stan zdadności. Trwałość jest mierzona ilością wykonanej pracy przez obiekt (np. dla pojazdu – przebiegiem), zaś ilość tej pracy przewidzianej do wykonania do osiągnięcia stanu granicznego można powiązać z resem docelowym. Trwałość „zużywa się” w okresie eksploatacji.

Naprawialność – właściwość obiektu polegająca na przystosowaniu go do odnowy stanu zdadności przez zapobieganie i usuwanie uszkodzeń drogą obsług / napraw bez wymiany zespołów na nowe. Oznacza zbiór właściwości określających pracochłonność i koszt obsług, łatwość dostępu, podatność diagnostyczną (przygotowanie do wykrywania uszkodzeń) itp.. Wyróżnia się obiekty naprawialne i nienaprawialne.

Zachowawczość – właściwość obiektu polegająca na zachowaniu ustalonych wartości wskaźników eksploatacyjnych w trakcie okresu przechowywania i transportu (celowego wyłączenia z użytkowania i obsługiwanian / naprawianian). Określa stopień przystosowania obiektu do przechowywania i transportu, odporność na działanie czynników środowiska i intensywność procesów starzeniowych urządzeń przechowywanych przez długie okresy czasu jako zapas eksploatacyjny. Z zachowawczością związana jest także pracochłonność czynności przygotowawczych, zabiegów obsługowych podczas przechowywania oraz czynności po okresie przechowywania.

Niezawodność jest z kolei elementem **jakości – ogółu cech obiektu, określających stopień spełniania przez niego wymagań użytkownika**. Oprócz niezawodności, na jakość składają się m. in. **koszt, ekonomia eksploatacji, funkcjonalność, efektywność, ergonomia, estetyka**.

W odniesieniu do wyrobów przemysłowych określa się jakość projektową i jakość wykonania.

Analiza niezawodności pozwala na porównanie właściwości obiektów danego typu, np. pojazdów różnych marek.

W przypadku obiektów złożonych o ich niezawodności decyduje zazwyczaj niewielka liczba elementów stanowiących główne przyczyny uszkodzeń, zatrzymań, napraw i spadku gotowości eksploatacyjnej. Badanie niezawodności pozwala na określenie ich „słabych miejsc” i wskazuje potrzebę podjęcia przedsięwzięć konstrukcyjnych, technologicznych lub eksploatacyjnych mających na celu poprawę ich niezawodności.

Podstawowe charakterystyki i parametry niezawodności

Charakterystyki i parametry niezawodności stanowią ilościową miarę cech niezawodności.

Uszkodzenia obiektów mają charakter losowy – ich opis może być podany za pomocą odpowiednich rozkładów prawdopodobieństwa i ich parametrów.

W teorii niezawodności **ogólną miarą eksploatacji jest resurs poprawnej pracy**, który jest zmienną losową ciągłą.

Dla urządzeń resurs można wyrazić za pomocą indywidualnej miary eksploatacji (np. przebieg dla pojazdu) lub ogólnie czasem pracy i w efekcie resurs poprawnej pracy będzie oznaczany odpowiednio jako zmienne losowe **L** (indywidualna miary eksploatacji) lub **T** (czas).

W teorii niezawodności wyróżnia się dwa typy obiektów:

- nienaprawialne – zwykle proste, pracujące do chwili uszkodzenia (np. żarówka, bezpiecznik); dla tych obiektów poprawność działania i trwałość oznaczają tę samą cechę niezawodności,
- naprawialne – zwykle złożone, po wystąpieniu uszkodzenia podlegające naprawie w celu odtworzenia stanu zdatności.

Podstawowe charakterystyki niezawodności opisują **niezawodność obiektów nienaprawialnych**. Są stosowane jednak także dla **obiektów naprawialnych**:

- w okresie do wystąpienia pierwszego uszkodzenia,
- dla okresów pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami (przy założeniu, że podczas naprawy następuje pełne odtworzenie potencjału eksploatacyjnego obiektu),
- w odniesieniu do całego okresu eksploatacji urządzenia jeżeli pomija się fakt występowania uszkodzeń i napraw (trwałość jest tu poprawnością działania mierzoną do chwili likwidacji).

Funkcja zawodności $F(l)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia obiektu w przedziale miary eksploatacji $(0, l)$.

Jest dystrybuantą miary eksploatacji i w sensie probabilistycznym oznacza prawdopodobieństwo tego, że zmienna losowa L ma wartość mniejszą od l : $F(l) = P(L < l)$.

Określa zawodność obiektu: prawdopodobieństwo tego, że dla miary eksploatacji l obiekt jest już niezdatny.

Funkcja niezawodności $R(l)$ – prawdopodobieństwo niewystąpienia uszkodzenia obiektu w przedziale miary eksploatacji $(0, l)$.

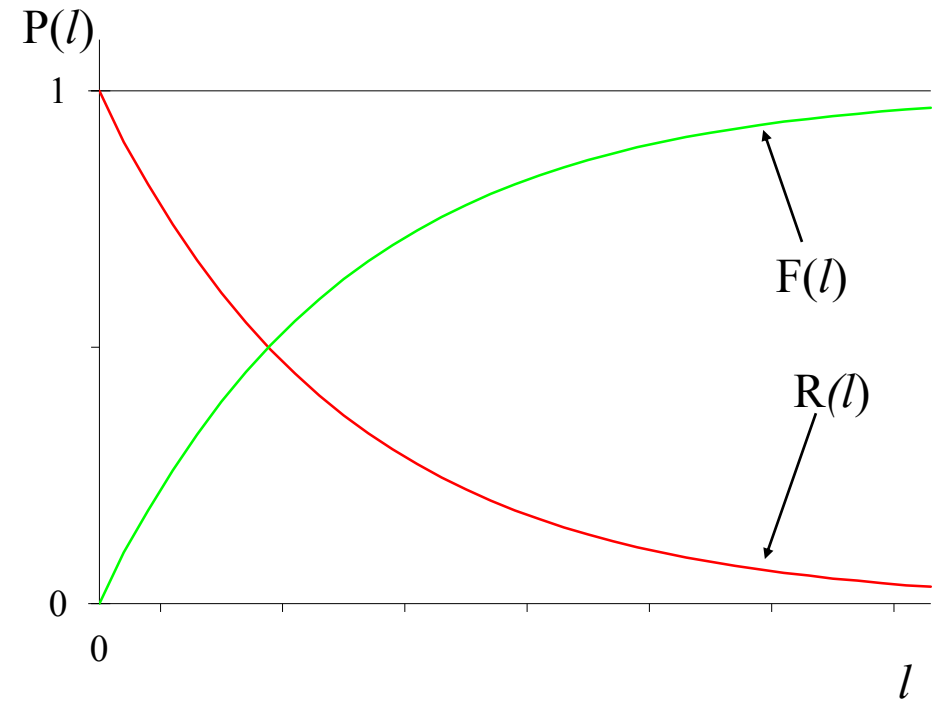
Jest uzupełnieniem dystrybuanty miary eksploatacji do jedności i w sensie probabilistycznym oznacza prawdopodobieństwo tego, że zmienna losowa L ma wartość nie mniejszą od l : $R(l) = P(L \geq l)$.

Określa niezawodność obiektu: prawdopodobieństwo tego, że dla miary eksploatacji l obiekt jest jeszcze zdalny.

$$F(l) + R(l) = 1$$

Funkcja zawodności jest funkcją niemalejącą – dla zwiększenia miary eksploatacji obiektu wzrasta prawdopodobieństwo jego uszkodzenia.

Funkcja niezawodności jest funkcją nierosnącą – dla zwiększenia miary eksploatacji obiektu maleje prawdopodobieństwo jego nieuszkodzenia.

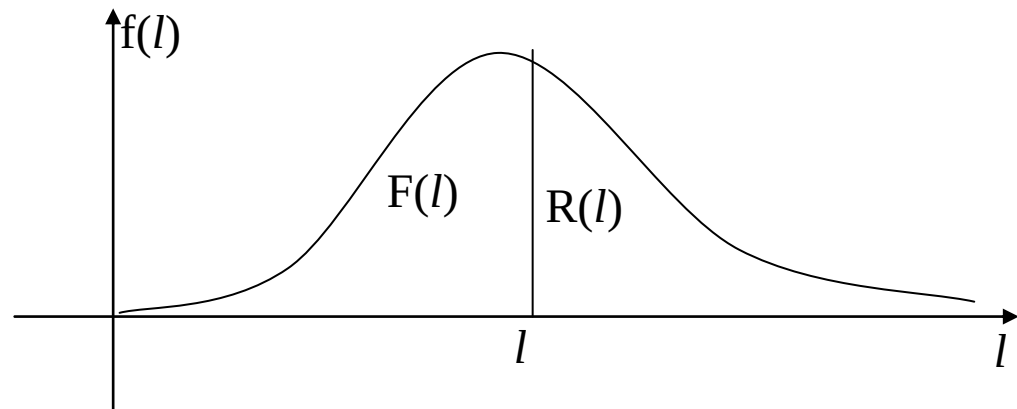


Gęstość prawdopodobieństwa (ciągły rozkład prawdopodobieństwa) występowania uszkodzeń $f(l)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia obiektu dla miary eksploatacji l przypadające na jednostkę tej miary.

$$f(l) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{F(l, l + \Delta l)}{\Delta l} = \frac{dF(l)}{dl} = -\frac{dR(l)}{dl}$$

$$F(l) = \int_0^l f(l) dl$$

$$R(l) = \int_l^{\infty} f(l) dl$$



Intensywność występowania uszkodzeń $\lambda(l)$ – prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia uszkodzenia obiektu dla miary eksploatacji l przypadające na jednostkę tej miary, jeżeli pracował on poprawnie do wartości miary eksploatacji l (czyli pod warunkiem, że nie uległ on uszkodzeniu w przedziale miary eksploatacji $(0, l)$).

$$\lambda(l) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{Q(l, l + \Delta l)}{\Delta l} = \frac{dQ(l)}{dl} = -\frac{1}{R(l)} \frac{dR(l)}{dl} = -\frac{d \ln R(l)}{dl}$$

$$\int_0^l \lambda(l) dl = -\ln R(l)$$

$$R(l) = e^{-\int_0^l \lambda(l) dl}$$

Często zamiast znajomości całego przebiegu funkcji charakteryzujących niezawodność obiektu wystarcza znajomość tylko pewnych liczbowych wartości charakteryzujących zmienne losowe L lub T , czyli parametrów niezawodności.

Podstawowymi **parametrami niezawodności** są:

– **oczekiwany resurs poprawnej pracy μ_L** , definiowany jako wartość oczekiwana (przeciętna)

zmiennej losowej L (lub T):
$$\mu_L = E(L) = \int_0^{\infty} l f(l) dl = \int_0^{\infty} R(l) dl,$$

– **odchylenie standardowe σ resursu poprawnej pracy**, które jest miarą rozproszenia zmiennej losowej wokół jej wartości oczekiwanej. Odchylenie standardowe jest pierwiastkiem kwadratowym z wariancji:

$$\sigma^2 = E\left((L - E(L))^2\right) = \int_0^{\infty} (l - \mu_L)^2 f(l) dl = \int_0^{\infty} l^2 f(l) dl - \mu_L^2 = E(L^2) - (E(L))^2.$$

Parametrom tym można przypisać sens fizyczny:

- oczekiwany resurs prawnej pracy pozwala na ocenę jakości konstrukcji i trwałości materiałów urządzenia,
- odchylenie standardowe resursu prawnej pracy charakteryzuje jakość technologii produkcji i jakość eksploatacji urządzenia.

Znając wzajemne zależności pomiędzy funkcjami $F(l)$, $R(l)$, $f(l)$ i $\lambda(l)$ oraz parametrem μ_L uzyskuje się także:

$$F(l) = 1 - e^{-\int_0^l \lambda(l) dl}$$

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{R(l)} = \frac{f(l)}{\int_l^\infty f(l) dl}$$

$$f(l) = \lambda(l) e^{-\int_0^l \lambda(l) dl}$$

$$\mu_L = \int_0^\infty R(l) dl = \int_0^\infty e^{-\int_0^l \lambda(l) dl} dl$$

Metody wyznaczania charakterystyk niezawodności

Badania niezawodności urządzeń prowadzone są dla ściśle określonych celów, wynikających z potrzeb producenta lub eksploatatora.

Szczególne znaczenie poznawcze i aplikacyjne mają badania realizowane w normalnych warunkach eksploatacji, w których urządzenie podlega oddziaływaniu czynników naturalnych wymuszających jej starzenie.

W wyniku przeprowadzonych badań eksploatator lub producent uzyskuje informacje o zaistniałych uszkodzeniach urządzenia (lub jego układów funkcjonalnych i elementów) dla dyskretnych wartości miary eksploatacji lub czasu.

Na **plan badań niezawodności** składają się trzy elementy: $\{N, Y, Z\}$:

N – liczba badanych obiektów w próbie,

Y – sposób badania: B – bez wymiany uszkodzonych elementów na nowe,

W – z wymianą uszkodzonych elementów na nowe,

Z – kryterium zakończenia badań:

T – do z góry zadanej wartości miary eksploatacji,

R – do wystąpienia określonej liczby uszkodzeń,

(T,R) – do zadanej wartości miary eksploatacji lub do wystąpienia określonej liczby uszkodzeń w zależności co pierwsze wystąpi, przy czym wartości T i R mogą być stałe lub funkcjami miary eksploatacji albo czasu kalendarzowego.

Wybór odpowiedniego planu eksploatacji spośród $\{N, B, T\}$, $\{N, B, R\}$, $\{N, B, (T,R)\}$, $\{N, W, T\}$, $\{N, W, R\}$, $\{N, W, (T,R)\}$ zależy od warunków techniczno-organizacyjnych, celu badań, charakteru obiektu badań i wymaganej dokładności oszacowania charakterystyk niezawodności. Najbardziej dokładne wyniki otrzymuje się dla obserwacji prowadzonych do chwili wystąpienia $R = N$ uszkodzeń (do chwili uszkodzenia wszystkich badanych obiektów).

Niech:

N - liczba obiektów badanych,

$n(l)$ - liczba obiektów znajdujących się w stanie zdatności dla wartości miary eksploatacji l ,

$m(l)$ - liczba obiektów znajdujących się w stanie niezdatności dla wartości miary eksploatacji l ,

$m(\Delta l) = n(l - \Delta l) - n(l) = m(l) - m(l - \Delta l)$ - liczba obiektów uszkodzonych w przedziale miary eksploatacji $(l - \Delta l, l)$.

Oczywiście: $n(l) + m(l) = N$

$$0 \leq n(l) \leq N \quad \text{i} \quad 0 \leq m(l) \leq N$$

$n(0) = N$ i $m(0) = 0$ dla przypadku zdatności wszystkich badanych obiektów,
których eksploatacja się zaczyna

$$n(l - \Delta l) \geq n(l) \quad \text{i} \quad m(l - \Delta l) \leq m(l)$$

Wtedy:

- empiryczna funkcja zawodności $F_e(l) = \frac{m(l)}{N} = \frac{N - n(l)}{N} = 1 - \frac{n(l)}{N} = 1 - R_e(l)$,

- empiryczna funkcja niezawodności $R_e(l) = \frac{n(l)}{N} = \frac{N - m(l)}{N} = 1 - \frac{m(l)}{N} = 1 - F_e(l)$,

- empiryczna gęstość prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń (ciągła)

$$f_e(l) = \frac{n(l - \Delta l) - n(l)}{N \cdot \Delta l} = \frac{m(l) - m(l - \Delta l)}{N \cdot \Delta l} = \frac{m(\Delta l)}{N \cdot \Delta l},$$

- empiryczna intensywność występowania uszkodzeń

$$\lambda_e(l) = \frac{n(l - \Delta l) - n(l)}{n(l) \cdot \Delta l} = \frac{m(l) - m(l - \Delta l)}{n(l) \cdot \Delta l} = \frac{m(\Delta l)}{n(l) \cdot \Delta l} = \frac{f_e(l)}{R_e(l)},$$

- empiryczna wartość oczekiwana ресурсu poprawnej pracy $L_0 = \int_0^{\infty} l f_e(l) dl = \int_0^{\infty} R_e(l) dl$,

- empiryczna wariancja ресурсu poprawnej pracy $\sigma^2 = \int_0^{\infty} l^2 f_e(l) dl - L_0^2$.

Zwykle rejestracji dokonuje się dla dyskretnych wartości miary eksploatacji l_i (np. co 1 miesiąc, 1 rok, 1000 km, 100 mth) dlatego korzysta się z wersji dyskretnej tych wzorów:

N - liczba obiektów badanych,

k - liczba obserwacji (badań) w trakcie eksploatacji,

i - numer obserwacji (badania),

$i = 0$ dla stanu początkowego (poprodukcyjnego, nowych maszyn, rozpoczynającego eksploatację),

$i = 1, \dots, k$ dla właściwych badań w trakcie eksploatacji,

n_i - liczba obiektów znajdujących się w stanie zdadności dla danej wartości miary eksploatacji l_i (dla i -tego pomiaru),

m_i - liczba obiektów znajdujących się w stanie niezdadności dla danej wartości miary eksploatacji l_i (dla i -tego pomiaru),

$m_{i-1,i} = n_{i-1} - n_i = m_i - m_{i-1}$ - liczba obiektów uszkodzonych w przedziale miary eksploatacji (l_{i-1}, l_i) o długości $\Delta l_i = l_i - l_{i-1}$ (pomiędzy pomiarami $i-1$ a i).

Oczywiście: $n_i + m_i = N$

$$0 \leq n_i \leq N \quad \text{ i } \quad 0 \leq m_i \leq N$$

$n_0 = N$ i $m_0 = 0$ dla przypadku zdadności wszystkich badanych obiektów
dla stanu początkowego

$$n_{i-1} \geq n_i \quad \text{ i } \quad m_{i-1} \leq m_i$$

Wtedy:

- empiryczna funkcja zawodności $F_{ei} = \frac{m_i}{N} = \frac{N - n_i}{N} = 1 - \frac{n_i}{N} = 1 - R_{ei}$,

- empiryczna funkcja niezawodności $R_{ei} = \frac{n_i}{N} = \frac{N - m_i}{N} = 1 - \frac{m_i}{N} = 1 - F_{ei}$,

- empiryczna funkcja prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń (dyskretna)

$$f_{ei} = \frac{n_{i-1} - n_i}{N \cdot \Delta l_i} = \frac{m_i - m_{i-1}}{N \cdot \Delta l_i} = \frac{m_{i-1,i}}{N \cdot \Delta l_i},$$

- empiryczna intensywność występowania uszkodzeń

$$\lambda_{ei} = \frac{n_{i-1} - n_i}{n_i \cdot \Delta l_i} = \frac{m_i - m_{i-1}}{n_i \cdot \Delta l_i} = \frac{m_{i-1,i}}{n_i \cdot \Delta l_i} = \frac{f_{ei}}{R_{ei}},$$

- wartość średnia ресурсu poprawnej pracy $L_0 = \frac{\sum_{i=1}^N L_{0i}}{N} = \sum_{i=1}^k R_{ei} \Delta l_i = \sum_{i=1}^k l_i f_{ei} \Delta l_i = \frac{\sum_{i=1}^k l_i m_{i-1,i}}{N}$,

gdzie: L_{0i} – realizacja okresu zdatności przez i -ty obiekt,

- empiryczna wariancja ресурсu poprawnej pracy $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{0i} - L_0)^2}{N}$.

Dokładne wyznaczenie dwóch ostatnich parametrów wymaga prowadzenia badań niezawodności do chwili uszkodzenia ostatniego obiektu.

Uzyskane rezultaty można przedstawić w postaci graficznej, a tej podstawie założyć konkretny typ rozkładu opisujący niezawodność badanych urządzeń. Np. jeżeli wykres empirycznej funkcji intensywności uszkodzeń jest stały, to można założyć, że niezawodność może być opisywana rozkładem wykładniczym. Oczywiście znanych jest wiele typów rozkładów i w celu wyboru najbardziej adekwatnego należy przeprowadzić wybrany test zgodności.

Najczęściej wykorzystywany jest test zgodności χ^2 (Pearsona), przydatny dla dowolnych rozkładów, lub test zgodności Kołmogorowa, o wiele „prostszy”, ale stosowany tylko dla rozkładów ciągłych.

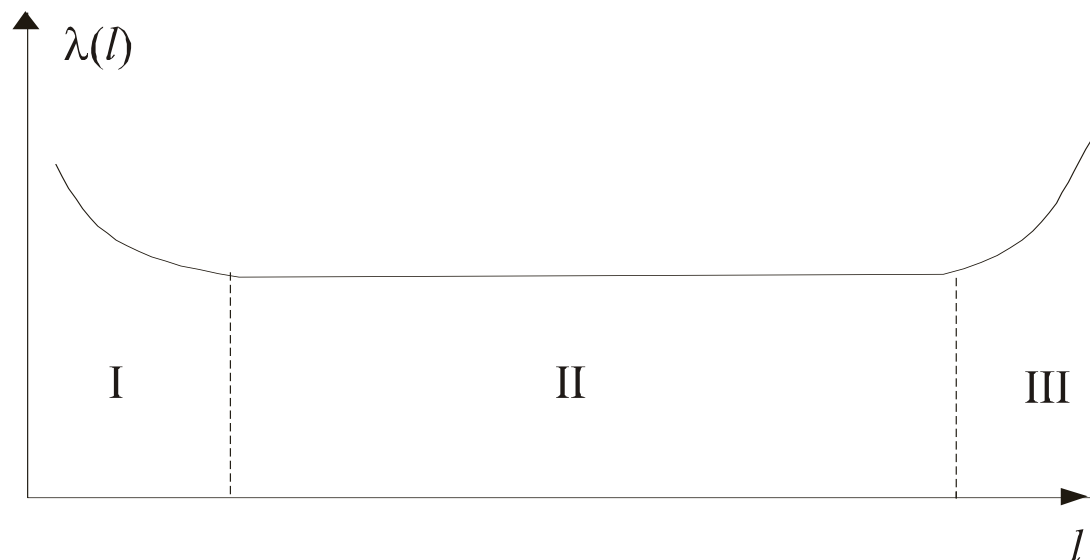
Przebieg intensywności występowania uszkodzeń typowy dla urządzeń:

Okres I, początkowy, docierania – duża intensywność występowania uszkodzeń, których przyczyną są błędy produkcyjne, takie jak wadliwy montaż, ukryte wady materiału itp. Okres docierania powinien zbiegać się z okresem gwarancyjnym.

Okres II, środkowy, normalnej, stałej eksploatacji – dominują uszkodzenia przypadkowe (o charakterze losowym) i w związku z tym intensywność uszkodzeń jest w przybliżeniu stała.

Okres III, końcowy, przyspieszonego zużycia starzeniowego – intensywność występowania uszkodzeń znacznie wzrasta wskutek osiągnięcia przez obiekt stanu granicznego.

Zwykle najdłużej trwającym i najważniejszym dla eksploatatora jest okres II eksploatacji, dla którego można przyjąć $\lambda(l) \approx \lambda = \text{const}$.



$\lambda(l) \approx \lambda = \text{const}$, co daje:

$$R(l) = e^{-\int_0^l \lambda dl} = e^{-\lambda l}$$

$$F(l) = 1 - R(l) = 1 - e^{-\lambda l}$$

$$f(l) = -\frac{dR(l)}{dl} = -\frac{de^{-\lambda l}}{dl} = \lambda e^{-\lambda l} = \lambda R(l) = \lambda(1 - F(l))$$

$$\mu_L = \int_0^{\infty} l f(l) dl = \int_0^{\infty} l \lambda e^{-\lambda l} dl = \frac{1}{\lambda}$$

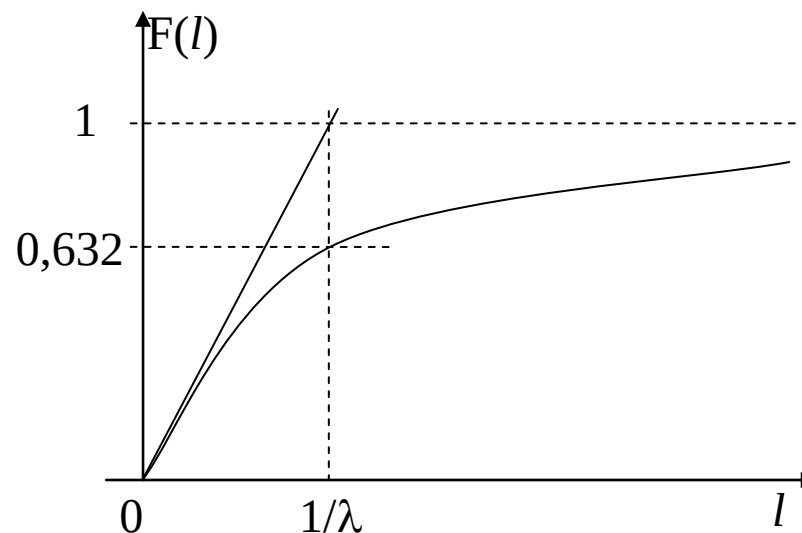
$$\sigma_L^2 = \int_0^{\infty} l^2 f(l) dl - \mu_L^2 = \int_0^{\infty} l^2 \lambda e^{-\lambda l} dl - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}$$

$$\sigma_L = \frac{1}{\lambda} = \mu_L$$

czyli wyrażenia definiujące **rozkład wykładniczy**

Wykres dystrybuanty $F(l)$ i gęstości $f(l)$ rozkładu wykładniczego

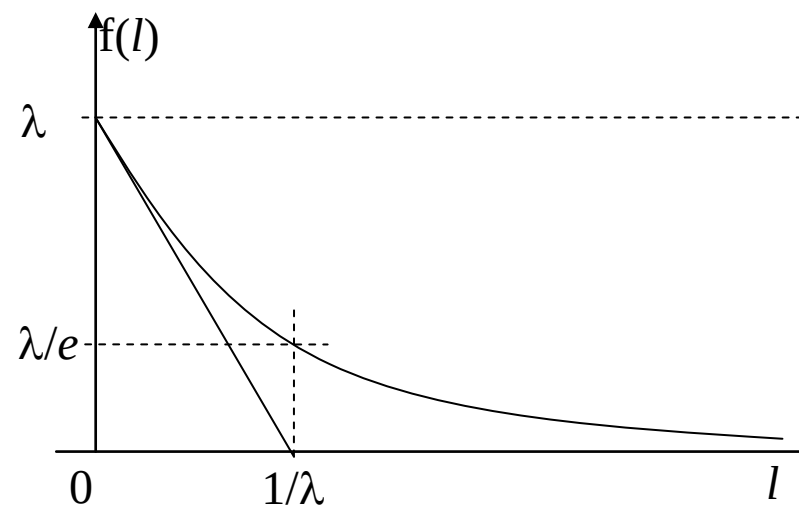
Oczekiwany resurs poprawnej pracy $\mu_L = \frac{1}{\lambda}$ można odczytać z wykresów jako współrzędną l punktu przecięcia stycznej do wykresów $F(l)$ lub $f(l)$ w punkcie $l = 0$ z prostymi $F(l) = 1$ lub $f(l) = 0$.



Dla $l = \mu_L = \frac{1}{\lambda}$ zachodzi

$$F\left(\frac{1}{\lambda}\right) = 1 - e^{-\lambda \frac{1}{\lambda}} = 1 - \frac{1}{e} = 0,632$$

$$f\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \lambda e^{-\lambda \frac{1}{\lambda}} = \frac{\lambda}{e}.$$



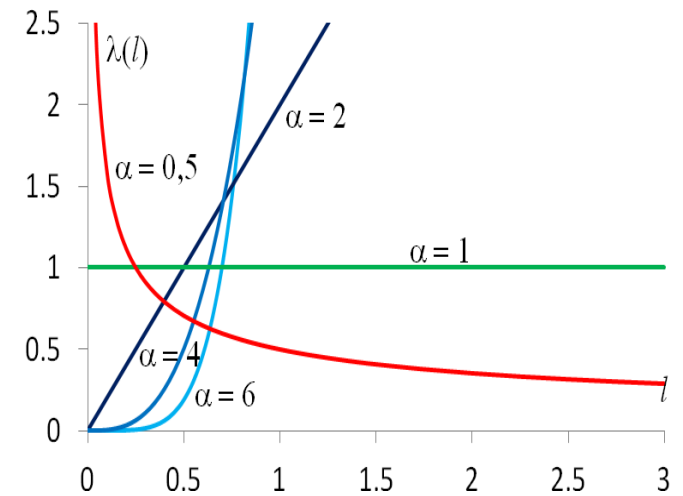
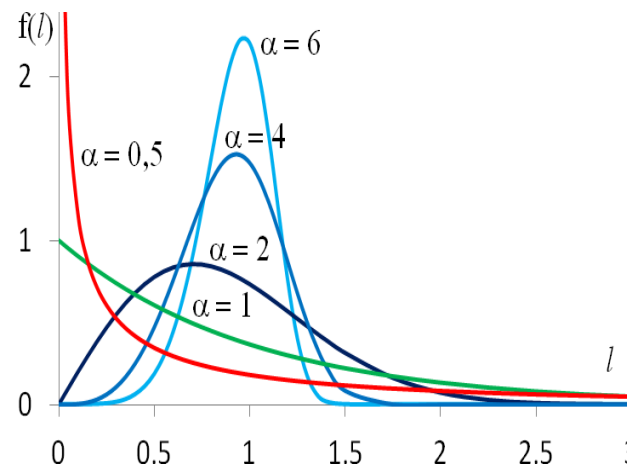
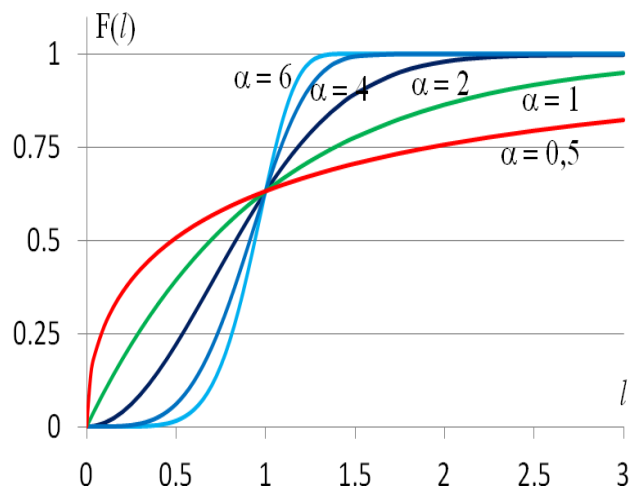
Większość obserwowanych rozkładów uszkodzeń maszyn można opisać **rozkładem Weibulla**:

$$\begin{aligned}
 R(l) &= e^{-\beta l^\alpha} & f(l) &= \alpha \beta l^{\alpha-1} e^{-\beta l^\alpha} \\
 F(l) &= 1 - e^{-\beta l^\alpha} & \lambda(l) &= \alpha \beta l^{\alpha-1} \\
 \mu_L &= \frac{1}{\sqrt[\alpha]{\beta}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) & \sigma_L^2 &= \frac{1}{\sqrt[\alpha]{\beta^2}} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]
 \end{aligned}$$

α i β - odpowiednio współczynniki kształtu i skali rozkładu Weibulla.

Przy odpowiednim doborze wartości parametrów α i β uzyskuje się lepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi niż w przypadku rozkładu wykładniczego, zależnego tylko od jednego parametru λ .

Szczególnym przypadkiem rozkładu Weibulla dla $\alpha = 1$ i $\beta \equiv \lambda$ jest rozkład wykładniczy.



wykresy dla $\beta = 1$

Czasem stosuje się postać $R(l) = e^{-\left(\frac{l}{b}\right)^\alpha} = \frac{1}{e^{\left(\frac{l}{b}\right)^\alpha}}$, w której współczynnik skali $\beta = \frac{1}{b^\alpha}$ jest

związany ze współczynnikiem $b = \frac{1}{\sqrt[\alpha]{\beta}}$ mającym wymiar miary eksploatacji.

Dla miary eksploatacji równej współczynnikowi b ($l = b$) otrzymuje się

$$R(b) = e^{-\left(\frac{b}{b}\right)^\alpha} = e^{-1^\alpha} = e^{-1} = \frac{1}{e} \approx 0,368 \quad \text{oraz} \quad F(b) = 1 - e^{-\left(\frac{b}{b}\right)^\alpha} = 1 - e^{-1} \approx 0,632 \quad - \quad \text{wartości}$$

otrzymane dla rozkładu wykładniczego dla miary eksploatacji równej oczekiwanemu ресурсowi poprawnej pracy maszyny.

Do opisu funkcji niezawodności wykorzystuje się też czasami rozkłady:

Pareto	$R(l) = (\beta l)^{-\alpha}$	$\lambda(l) = \frac{\alpha}{l}$
---------------	------------------------------	---------------------------------

Frecheta	$R(l) = 1 - e^{-(\beta l)^{-\alpha}}$	$\lambda(l) = -\alpha \beta l^{\alpha-1}$
-----------------	---------------------------------------	---

potęgowy	$R(l) = 1 - (\beta l)^{\alpha}$	$\lambda(l) = \frac{\alpha \beta (\beta l)^{\alpha-1}}{1 - (\beta l)^{\alpha}}$
-----------------	---------------------------------	---

też w postaciach używających współczynnika b mającego wymiar miary eksploatacji:

Frecheta	$R(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{b}\right)^{-\alpha}}$	$\beta = b^{\alpha}$
-----------------	--	----------------------

Pareto	$R(l) = \left(\frac{l}{b}\right)^{-\alpha} = \left(\frac{b}{l}\right)^{\alpha}$	$\beta = b^{\alpha}$
---------------	---	----------------------

potęgowy	$R(l) = 1 - \left(\frac{l}{b}\right)^{\alpha}$	$\beta = \frac{1}{b^{\alpha}}$
-----------------	--	--------------------------------

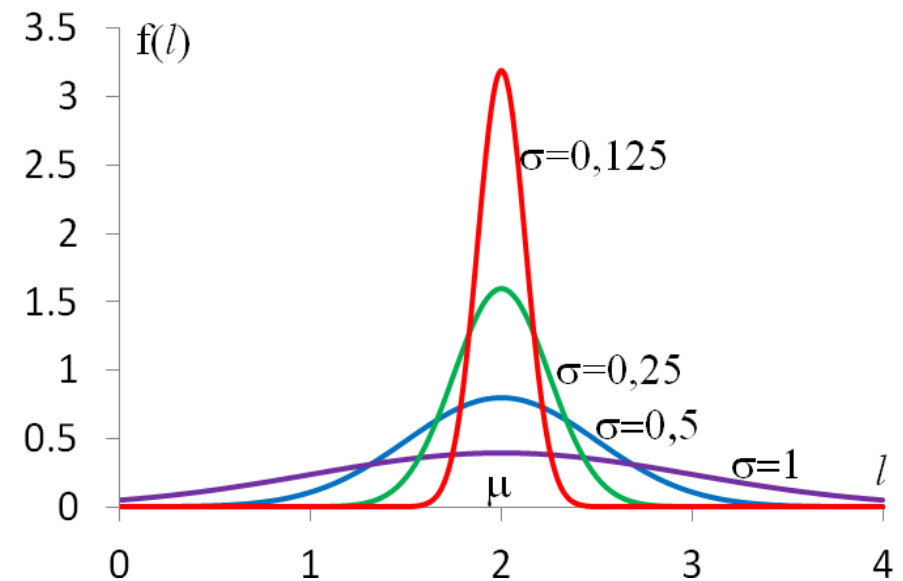
Uszkodzenia spowodowane bodźcami kumulującymi się (procesy starzenia, zużycie) w wielu przypadkach można dostatecznie dobrze opisywać **rozkładem normalnym** $N(\mu, \sigma)$.

Funkcja zawodności (dystrybuanta) rozkładu normalnego: $F(l) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^l e^{-\frac{(l-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} dl$.

Funkcja niezawodności: $R(l) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \int_l^{\infty} e^{-\frac{(l-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} dl$.

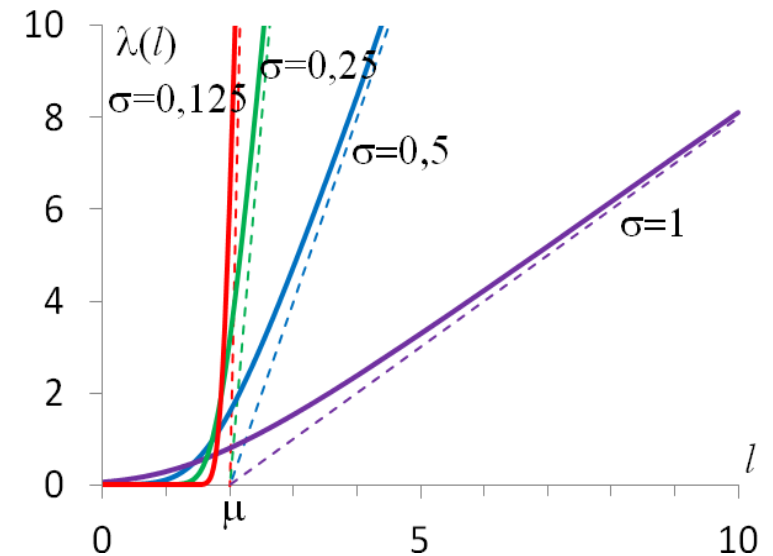
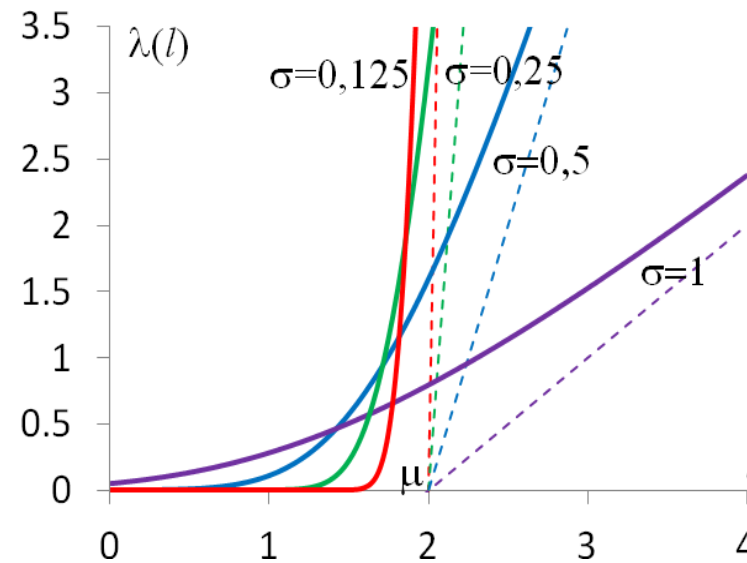
Gęstość prawdopodobieństwa występowania

uszkodzeń: $f(l) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}}$.



Intensywność
występowania
uszkodzeń:

$$\lambda(l) = \frac{e^{-\frac{(l-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}}}{\int_l^\infty e^{-\frac{(l-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} dl}$$



dla $l \rightarrow \infty$ ma asymptotę ukośną $\lambda(l) = \frac{l - \mu}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2}l - \frac{\mu}{\sigma^2}$ - osiąga wartość 0 dla $l = \mu$,

dla bardzo małych wartości σ uszkodzenia występują prawie wyłącznie się w czasie zbliżonym do oczekiwanego ресурсu poprawnej pracy μ .

Dobór odpowiedniego typu rozkładu do opisu niezawodności danego obiektu technicznego na podstawie wyników badań jego niezawodności następuje w oparciu o znane procedury statystyki matematycznej (np. testy zgodności).

Modele odnowy

W teorii niezawodności pod pojęciem odnowy rozumie się przywrócenie stanu zdolności obiektowi, który uległ uszkodzeniu – odnawiany obiekt jest obsługiwany / naprawiany, nie użytkowany.

Odnowa może polegać na:

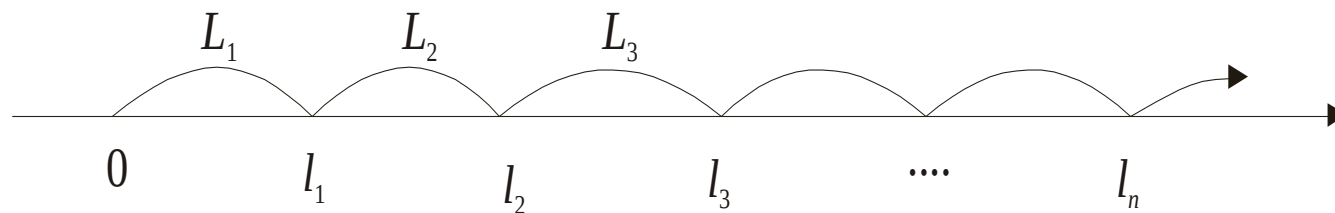
- wymianie uszkodzonego elementu na inny,
- obsłudze / naprawie przywracającej wszystkie pierwotne właściwości obiektu.

Wyróżnia się dwa typy modelu odnowy:

- model odnowy natychmiastowej (o zerowym czasie trwania),
- model odnowy o skończonym czasie trwania.

Model odnowy natychmiastowej – czas odnawiania obiektu jest pomijalnie mały w porównaniu z czasem jego użytkowania lub fakt jego uszkodzenia nie ma wpływu na funkcjonowanie systemu użytkowania, w którym może on być zastąpiony w okresie odnowy (obsługi / naprawy) przez inny egzemplarz obiektu tego samego typu.

Obiekt pracuje od chwili początkowej do chwili pierwszego uszkodzenia, która jest jednocześnie chwilą pierwszego odnowienia i dalej od tej chwili odnowienia do chwili drugiego uszkodzenia, która jest jednocześnie chwilą drugiego odnowienia itd.



$l_1, l_2, l_3, \dots$ - wartości miary eksploatacji, dla których nastąpiło uszkodzenie i odnowienie urządzenia,

$L_1, L_2, L_3, \dots$ - wielkości miary eksploatacji maszyny między kolejnymi uszkodzeniami i odnowieniami (zmiennie losowe); tworzą **strumień użytkowania**.

Jeżeli w procesie odnowy następuje pełne odtworzenie stanu zdatności, to zmiennie losowe L_i są niezależne i mają jednakowy rozkład – strumień użytkowania nazywa się **strumieniem prostym**. Jeżeli dodatkowo jest to rozkład wykładniczy z parametrem λ (nazywanym intensywnością użytkowania) to strumień nazywa się **strumieniem Poissona**.

Stan procesu odnowy urządzenia określa **liczba uszkodzeń (odnów) $K(l)$** (też zmienna losowa). Istnieje oczywisty związek między liczbą uszkodzeń a zużytą przez urządzenie wielkością miary eksploatacji do n -tego uszkodzenia:

$$P[K(l) \geq n] = P(l > l_n) = P(l > L_1 + L_2 + \dots + L_n) = F_n(l)$$

$F_n(l)$ - dystrybuanta sumarycznej wartości miary eksploatacji do n -tego uszkodzenia i odnowienia.

Prawdopodobieństwo tego, że do danej wartości miary eksploatacji l wystąpiło dokładnie n uszkodzeń $P[K(l) = n] = F_n(l) - F_{n+1}(l) = R_{n+1}(l) - R_n(l)$.

Podstawową charakterystyką procesu odnowy jest **funkcja odnowy $H(l)$** – wartość oczekiwana

liczby uszkodzeń:
$$H(l) = E[K(l)] = \sum_{n=0}^{\infty} n P[K(l) = n] = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(l).$$

Jeżeli znana jest funkcja odnowy, to oczekiwaną wartość liczby uszkodzeń w przedziale miary eksploatacji (l_1, l_2) można obliczyć ze wzoru $E[K(l_2) - K(l_1)] = H(l_2) - H(l_1)$.

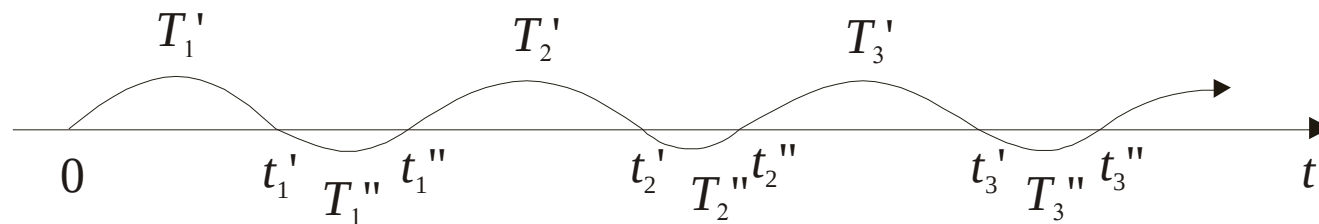
Funkcja gęstości odnowy – oczekiwana liczba uszkodzeń przypadająca na jednostkę miary

eksploatacji:
$$h(l) = \frac{dH(l)}{dl} = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(l).$$

W przypadku, gdy niezawodność urządzenia opisana jest rozkładem wykładniczym z parametrem $\lambda = \text{const}$ otrzymuje się: $H(l) = \lambda l$ i $h(l) = \lambda$.

Model odnowy trwającej w czasie – czas odnawiania obiektu nie jest pomijalnie krótki w porównaniu z czasem jego użytkowania (przebywania obiektu w stanie zdatności). Oznacza to, że system, w którym urządzenie jest eksploatowane, „odczuwa” skutki jego przebywania w systemie odnowy (obsługi / naprawy).

Obiekt pracuje od chwili początkowej do chwili pierwszego uszkodzenia, następnie jest odnawiany do chwili pierwszego odnowienia, dalej od tej chwili odnowienia do chwili drugiego uszkodzenia znów pracuje, potem znów jest odnawiany itd..



Celowe jest przyjęcie czasu jako miary eksploatacji.

Zmienne losowe: $T'_1, T'_2, \dots$ - czasy trwania kolejnych stanów zdatności, $T''_1, T''_2, \dots$ - czasy trwania kolejnych stanów niezdatności.

Chwile: $t'_1, t'_2, \dots$ - chwile kolejnych uszkodzeń, a $t''_1, t''_2, \dots$ - chwile kolejnych odnowień.

Chwile wystąpienia kolejnych uszkodzeń: $t'_i = t'_{i-1} + T'_i$, $t'_0 = 0$.

Chwile wystąpienia kolejnych odnowień: $t''_i = t'_i + T''_i$.

Powinno się dążyć do minimalizacji czasów trwania stanów niezdatności ze względu na koszty z tym związane, czyli:

- koszty samej odnowy (obsługi / naprawy / wymiany),
- koszty wynikające z wyłączenia obiektu z użytkowania (zmniejszenie możliwości operacyjnych przedsiębiorstwa oraz nakłady na dodatkowe obiekty pracujące (użytkowane) w zastępstwie obiektów odnawianych (nieużytkowanych)).

Jeżeli w procesie odnowy następuje pełne odtwarzanie stanu zdatności, to zmienne losowe T_i' i T_i'' są niezależne i mają jednakowe rozkłady, najczęściej przyjmowane jako wykładnicze o parametrach odpowiednio:

λ (intensywność użytkowania) dla użytkowania,

μ (intensywność odnawiania) dla odnawiania,

dla których dystrybuanty
$$\begin{cases} F'(t) = P(T_i' < t) = 1 - e^{-\lambda t} \\ F''(t) = P(T_i'' < t) = 1 - e^{-\mu t} \end{cases}$$

oraz wartości oczekiwane czasów zdatności i odnowy
$$\begin{cases} T_0' = \frac{1}{\lambda} \\ T_0'' = \frac{1}{\mu} \end{cases}$$

Rozpatrywany model odnowy można opisać za pomocą charakterystyk analogicznych jak dla modelu odnowy natychmiastowej (liczba uszkodzeń i liczba odnów, funkcja odnowy, funkcja gęstości odnowy).

Jednak bardziej przydatną dla eksploatatora informację zawiera tzw. **współczynnik gotowości** $k_g(t)$ – prawdopodobieństwo tego, że w chwili t obiekt znajduje się w stanie zdatności:

$$k_g(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P(t_i'' < t < t_{i+1}' + T_{i+1}') = \sum_{i=1}^{\infty} P\left(\sum_{k=1}^i (T_k' + T_k'') < t < \sum_{k=1}^i (T_k' + T_k'') + T_{i+1}'\right).$$

Najczęściej wykorzystuje się jego wartość asymptotyczną (stacjonarną):

$$k_g = \lim_{t \rightarrow \infty} k_g(t) = \frac{ET'}{ET' + ET''},$$

gdzie $ET' = \int_0^{\infty} R(t) dt$ - oczekiwany czas poprawnej pracy (przebywania w systemie użytkowania),

$ET'' = \int_0^{\infty} F(t) dt$ - oczekiwany czas odnawiania (przebywania w systemie odnawiania (obsługiwania / naprawiania)).

Dla odpowiednio dużej liczby n cykli praca-odnowa obie wartości oczekiwane można estymować za pomocą wartości średnich kolejnych czasów zdatności i niezdatności:

$$E T' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i' = T_0' \text{ i } E T'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i'' = T_0''.$$

Dla przypadku możliwości wykorzystania rozkładu wykładniczego do opisywania czasów trwania stanów zdatności i niezdatności otrzymuje się $k_g = \frac{T_0'}{T_0' + T_0''} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$.

Współczynnik k_g jest obliczany dla pełnego czasu eksploatacji (dla pełnego czasu trwania przebywania urządzenia w systemie odnowy) i określa nie tylko niezawodność urządzenia, ale także właściwości systemu eksploatacji (uwzględnia czasy oczekiwania na obsługę / naprawę oraz włączenia do użytkowania po obsłudze / naprawie).

Czasem celowe jest posługiwanie się parametrem niezawodności zależnym jedynie od właściwości urządzenia. Jest nim **współczynnik gotowości technicznej**: $k_{gt} = \frac{T_0'}{T_0' + T_{eo}}$ gdzie T_{eo} - oczekiwany czas efektywnej obsługi / naprawy.

Urządzenie jako system w sensie niezawodności

System w sensie niezawodności – zbiór elementów tworzących razem złożony obiekt i realizujących wspólnie cel działania.

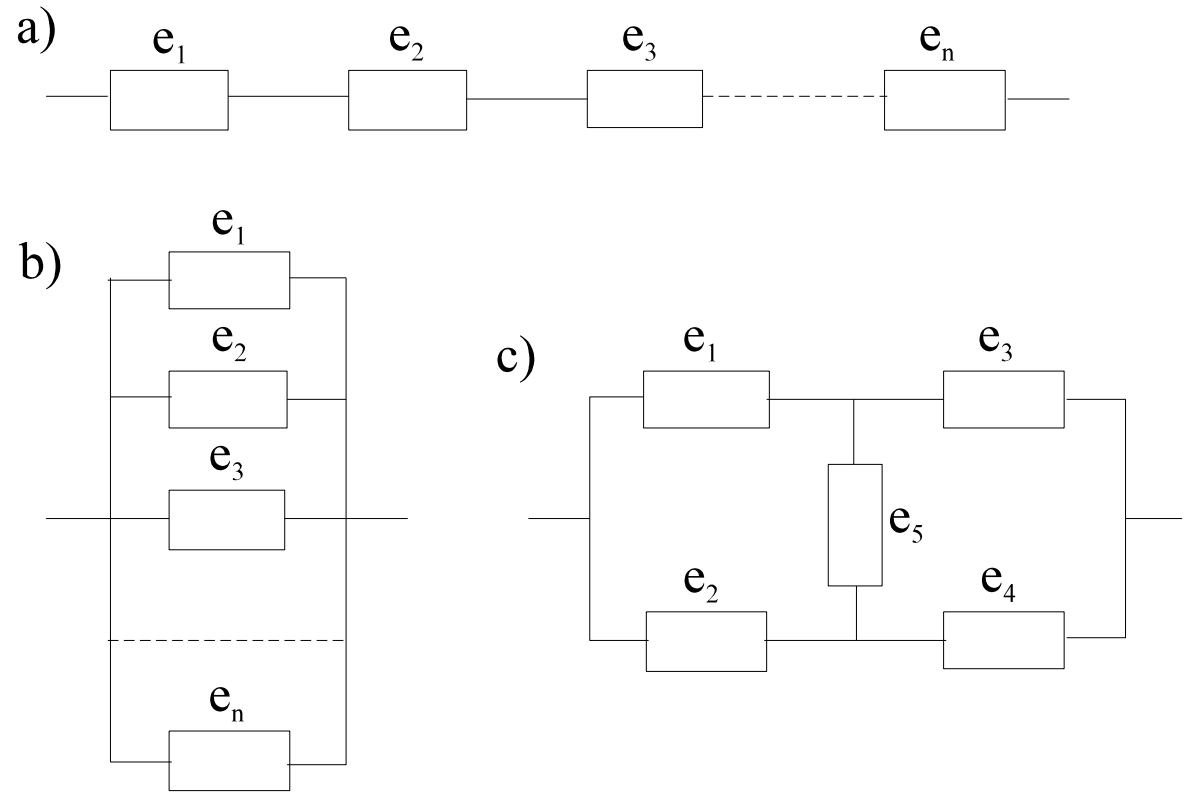
Zakłada się, że niezawodność elementów jest znana i każdy element uszkadza się niezależnie (uszkodzenie dowolnego elementu nie zmienia niezawodności innych elementów – elementy są niezależne w sensie niezawodności).

Oczywiście niezawodność pojedynczych elementów ma wpływ na niezawodność całego obiektu (systemu – zbioru elementów).

Elementy e_i systemu mogą pracować w różnych układach funkcjonalnych, wyrażających rodzaje połączeń, zależności między nimi.

Schematy systemów niezawodności o strukturze:

- a) szeregowej,
- b) równoległej,
- c) mostkowej.



Struktura szeregową – uszkodzenie dowolnego elementu powoduje uszkodzenie całego systemu.

Aby system pracował poprawnie dla wartości miary eksploatacji z przedziału $(0, l)$ konieczne jest aby w tym przedziale poprawnie pracowały wszystkie jego elementy.

Funkcja niezawodności systemu jest iloczynem funkcji niezawodności elementów składowych:

$$R(l) = R_1(l) R_2(l) \dots R_n(l).$$

$$e^{-\int_0^l \lambda(l) dl} = e^{-\int_0^l \lambda_1(l) dl} \cdot e^{-\int_0^l \lambda_2(l) dl} \cdot \dots \cdot e^{-\int_0^l \lambda_n(l) dl} = e^{-\int_0^l (\lambda_1(l) + \lambda_2(l) + \dots + \lambda_n(l)) dl}$$

Intensywność występowania uszkodzeń systemu o strukturze szeregowej jest sumą intensywności występowania uszkodzeń elementów składowych: $\lambda(l) = \lambda_1(l) + \lambda_2(l) + \dots + \lambda_n(l)$.

Jeżeli wszystkie elementy systemu mają jednakową funkcję niezawodności $R_1(l) = R_2(l) = \dots = R_n(l) \equiv R_0(l)$, to funkcja niezawodności systemu $R(l) = (R_0(l))^n$.

Jeżeli wszystkie elementy systemu mają jednakową intensywność występowania uszkodzeń $\lambda_1(l) = \lambda_2(l) = \dots = \lambda_n(l) \equiv \lambda_0(l)$, to intensywność występowania uszkodzeń systemu $\lambda(l) = n\lambda_0(l)$.

Jeżeli niezawodność elementów systemu można opisać za pomocą rozkładów wykładniczych to intensywność występowania uszkodzeń systemu $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$.

W szczególności gdy intensywność występowania uszkodzeń elementów systemu jest jednakowa $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n \equiv \lambda_0$, to intensywność występowania uszkodzeń systemu $\lambda = n\lambda_0$ oraz funkcja niezawodności systemu $R(l) = (R_0(l))^n = (e^{-\lambda_0 l})^n = e^{-n\lambda_0 l}$.

Oczekiwany resurs μ_L poprawnej pracy systemu można wyrazić za pomocą oczekiwanych resursów poprawnej pracy elementów: $\frac{1}{\mu_L} = \frac{1}{\mu_{L1}} + \frac{1}{\mu_{L2}} + \dots + \frac{1}{\mu_{Ln}}$.

Jeżeli niezawodność elementów systemu można opisać za pomocą rozkładów wykładniczych to oczekiwany resurs poprawnej pracy systemu $\mu_L = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$.

W szczególności gdy intensywność występowania uszkodzeń elementów systemu jest jednakowa $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n \equiv \lambda_0$, to oczekiwany resurs poprawnej pracy systemu $\mu_L = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{n\lambda_0} = \frac{\mu_{L0}}{n}$, μ_{L0} - oczekiwany resurs poprawnej pracy elementu składowego.

Struktura równoległa – uszkodzenie systemu następuje tylko wtedy, gdy uszkodzeniu ulegną wszystkie jego elementy.

Aby taki system pracował poprawnie dla wartości miary eksploatacji z przedziału $(0, l)$ wystarczy aby w tym przedziale poprawnie pracował choć jeden element.

Funkcja zawodności systemu jest iloczynem funkcji zawodności elementów składowych:

$$F(l) = F_1(l) F_2(l) \dots F_n(l).$$

$$1 - e^{-\int_0^l \lambda(l) dl} = \left(1 - e^{-\int_0^l \lambda_1(l) dl} \right) \cdot \left(1 - e^{-\int_0^l \lambda_2(l) dl} \right) \cdot \dots \cdot \left(1 - e^{-\int_0^l \lambda_n(l) dl} \right)$$

Intensywność występowania uszkodzeń systemu o strukturze równoległej nie jest sumą intensywności występowania uszkodzeń elementów składowych.

Jeżeli wszystkie elementy systemu mają jednakową funkcję zawodności $F_1(l) = F_2(l) = \dots = F_n(l) \equiv F_0(l)$, to funkcja zawodności systemu $F(l) = (F_0(l))^n$.

Jeżeli wszystkie elementy systemu mają jednakową intensywność występowania uszkodzeń

$$\lambda_1(l) = \lambda_2(l) = \dots = \lambda_n(l) \equiv \lambda_0(l), \text{ to funkcja zawodności } F(l) = (F_0(l))^n = \left(1 - e^{-\lambda_0 l} \right)^n.$$

Jeżeli niezawodność elementów systemu można opisać za pomocą rozkładów wykładniczych to

$$\mu_L = \frac{1}{\lambda_0} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) = \mu_{L0} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right).$$

Dla dużych wartości n : $\mu_L \approx \frac{1}{\lambda_0} (\ln n + c) = \mu_{L0} (\ln n + c)$, gdzie $c = 0,577\dots$

Z teorii niezawodności wywodzi się teorię bezpieczeństwa.

Bezpieczeństwo – właściwość obiektu charakteryzująca jego odporność na powstawanie sytuacji niebezpiecznych (występowaniu skutków wtórnych powodujących zagrożenia dla otoczenia – obiektów współpracujących, środowiska, ludzi).

Zagrożenie bezpieczeństwa – sytuacja, w której uszkodzenie obiektu może powodować uszkodzenia wtórne lub inne niepożądane procesy towarzyszące uszkodzeniu.

Zawodność bezpieczeństwa – podatność obiektu na powstawanie sytuacji niebezpiecznych.

Elementem systemu eksploatacji urządzeń jest człowiek (eksploatator, użytkownik, obsługujący / naprawiający, kierownik eksploatacji) – oprócz niezawodności urządzeń należy też rozważać niezawodność układu człowiek-urządzenie. Niezawodność tego układu określają:

- uszkodzenia urządzenia (części technicznej systemu),
- błędy człowieka.

Badania niezawodności człowieka to złożony proces teoretyczny i praktyczny, obejmujący badania z obszaru nauk technicznych oraz medycyny, fizjologii, psychologii, socjologii, ergonomii.

Opis matematyczny niezawodności człowieka może wykorzystywać te same funkcje i parametry, które są stosowane do opisu niezawodności urządzeń. Należy jednak pamiętać o istotnej różnicy między urządzeniami i ludźmi – ludzie są podatni na:

- stres, szczególnie silny w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa,
- panikę,
- zmęczenie przy długotrwałej pracy.

Błędy człowieka jako odbiornika informacji zawartej w docierającym do niego sygnale istotnym dla funkcjonowania danego systemu wynikają z:

- niedostrzeżenia (niezauważenia) sygnału istotnego,
- braku wyróżnienia sygnału istotnego wśród innych sygnałów – traktowania go za szum,
- nieprawidłowego odczytania informacji zawartej w sygnale istotnym (nadanie jej nieprawidłowego znaczenia),
- braku umiejętności prawidłowej reakcji w określonej sytuacji na prawidłowo odczytane informacje,
- braku możliwości prawidłowej reakcji w określonej sytuacji na prawidłowo odczytane informacje (prawidłowe działanie leży poza możliwościami człowieka),
- nieprawidłowego wykonywania prawidłowo rozpoznanych reakcji.

O efektach działania człowiek-operator powinien być informowany – bezpośrednio obserwowanym działaniem urządzenia lub wskazaniem urządzeń kontrolno-pomiarowych.

	człowiek	urządzenie
elastyczność	duża, zależna od indywidualnych predyspozycji	tylko w ramach przewidzianych w programie działania
zdolność do uogólnień	duża, zależna od indywidualnych predyspozycji	brak
zdolność uczenia się, wykorzystywania doświadczenia	duża, zależna od indywidualnych predyspozycji	brak – urządzenie nie zmienia się jeśli nie zostanie zmienione
czułość	wynika z fizjologii zmysłów	zależna od konstrukcji, urządzenie może odbierać sygnały niedostępne dla człowieka
koszt przygotowania do realizacji nowych zadań	wynika z kosztu edukacji	wynika z przekonstruowania, dla urządzeń złożonych może być wysoki, nawet nieopłacalny
rozpoznawanie nowych nietypowych sytuacji	naturalna	brak
zdolność do samodiagnozowania	wynika z fizjologii	wynika z obudowania systemami diagnostyki pokładowej
zdolność do samosterowania	naturalna	w zasadzie jeszcze brak, urządzenia autonomiczne są w fazie testów

stabilność, powtarzalność pracy	zmienna	wysoka
czas reakcji	zależny od refleksu	zależny od konstrukcji, może być o wiele krótszy niż u człowieka
wysiłek fizyczny	zależy od fizjologii	zależy od konstrukcji, ograniczony tylko wytrzymałością materiałów
zmęczenie	naturalne, wymaga przerw w pracy	brak, może się pojawić przy pracy w niezalecanych warunkach pracy
wpływ środowiska	wymagane warunki umożliwiające życie	ograniczony tylko konstrukcją, zwykle dużo mniejszy niż dla człowieka
występowanie zagrożeń	w ramach zainteresowania przeżyciem, na krótką metę mobilizacja sił i zaślepienie	brak wrażliwości
rozpraszanie uwagi	łatwe	brak

Obecność człowieka-operatora jest konieczna jeśli działaniu towarzyszy nieokreśloność, nieprzewidywalność, konieczność bieżącego podejmowania decyzji.

Automatyzacja jest wskazana jeśli człowiek-operator musi pracować na granicy swoich możliwości fizjologicznych lub w warunkach zagrażających jego zdrowiu i życiu.