

FAILURE RATE, BATHTUB CURVE AND RELIABILITY OF COMPONENTS AND SYSTEMS

J. Menčík*

Summary: *The paper defines the failure rate λ and explains its characteristic development in time (bathtub curve). It also explains the difference between the mean time between failures (MTBF) and useful life, and shows the use of failure rate λ for reliability evaluation and in design. The shape parameter of Weibull distribution for times to failure is related to the bathtub curve and can indicate the basic reasons for some kinds of failures. The second part of the paper is devoted to the methods for reliability increasing, especially in design stage: Failure mode and effect analysis, Fault tree analysis, robust design, computer simulation, testing of all components before assembling, proof testing and diagnostics.*

1. Úvod

Intenzita poruch λ udává pravděpodobnost vzniku poruchy určitého zařízení za jednotku času a je jednou ze základních charakteristik spolehlivosti. Spolu se střední dobou mezi poruchami slouží jako východisko pro stanovení potřeby náhradních dílů, i pro porovnávání spolehlivosti různých součástí, strojů, dopravních prostředků a dalších zařízení. Při návrhu složitěho výrobku, který má mít zaručenou jistou spolehlivost, se volí jednotlivé prvky s takovými intenzitami poruch, aby výsledná intenzita nepřekročila přípustnou hodnotu. Intenzita poruch také informuje o vývoji spolehlivosti určitého objektu v průběhu jeho života, a ze známého průběhu λ je možné usuzovat na základní příčiny poruch a popřípadě uskutečnit potřebné změny v konstrukci. V příspěvku jsou ukázány průběhy intenzity poruch v závislosti na jejich příčinách, je ukázána souvislost mezi tímto průběhem a tvarem Weibullova rozdělení, a jsou naznačeny cesty ke zvyšování spolehlivosti, zejména v etapě návrhu výrobku.

2. Základní pojmy

Intenzita poruch (λ) je charakteristikou spolehlivosti součástí nebo objektů neopravitelných, a vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou lze během jednotkového časového intervalu očekávat poruchu u součástí, které až do tohoto okamžiku zůstaly v provozu. Je definována výrazem

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \approx \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \Delta t}, \quad (1)$$

* Prof. Ing. Jaroslav Menčík, CSc.: Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Studentská 95; 532 10 Pardubice; e-mail: jaroslav.mencik@upce.cz

kde $f(t)$ je hustota pravděpodobnosti vzniku poruchy v čase t , a $R(t)$ je pravděpodobnost, že daný objekt vydrží bez poruchy od uvedení do provozu až do okamžiku t . Výraz vpravo je pro výpočet z provozních záznamů; N je celkový počet sledovaných výrobků, $n(t)$ je počet výrobků porušených od uvedení do provozu v čase 0 až do okamžiku t , a $\{n(t+\Delta t) - n(t)\}$ je počet poruch vzniklých mezi časem t a časem $t+\Delta t$.

U obnovovaných objektů se po poruše daný prvek opraví nebo vymění za nový, takže jejich počet zůstává stále stejný. V tomto případě se místo intenzity poruch používá výraz parametr proudu poruch (Λ), a platí

$$\Lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t} ; \quad (2)$$

někdy se i zde užívá označení intenzita poruch. Jednotkou intenzity poruch nebo parametru proudu poruch je počet poruch za hodinu, vztažený na jeden výrobek (hod^{-1}). Jsou ovšem možná i jiná vyjádření, např. počet poruch na 1 km apod.

3. Vanová křivka

V závislosti na příčinách poruch existují tři základní časové průběhy intenzity poruch:

I. Intenzita poruch klesá s dobou provozu (část I křivky na obr. 1)

Tento případ se vyskytuje v období po uvedení součásti nebo zařízení do provozu. Příčinou jsou nedostatky v konstrukčním návrhu nebo skryté materiálové vady a chyby při montáži, ale také (u složitějších zařízení) současný výskyt několika parametrů na hranicích tolerancí, kdy při montáži apod. se jejich kombinace již dostane mimo povolené meze. V těchto případech se porucha projeví již v okamžiku uvedení do provozu nebo krátce po něm. Po jejím odhalení se vadné součásti vyřadí, takže porucha ze stejné příčiny již nenastane. Počet takovýchto poruch proto postupně klesá až k nule. Do této kategorie patří i chyby obsluhy při práci s novým zařízením. Podobně u nových počítačových programů se mohou vyskytnout chyby, které po odladění programu vymizí.

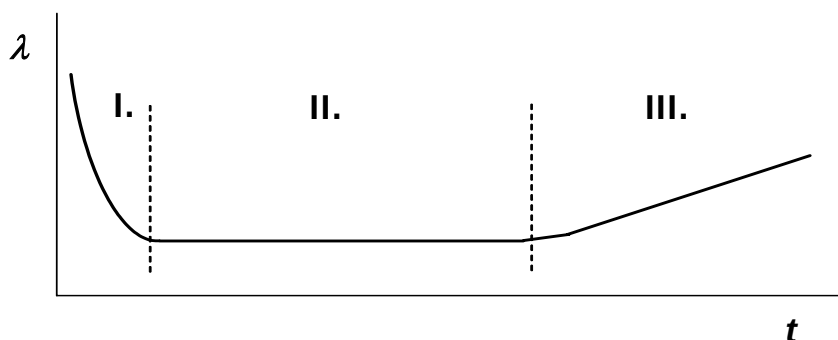
II. Intenzita poruch nezávisí na době provozu (část II křivky na obr. 1)

Jedná se o poruchy, které nesouvisí se stavem nebo stářím zařízení, a může k nim dojít kdykoliv. Jsou způsobovány vnějšími vlivy, jako je přetížení (např. přepětí v síti nebo chyba obsluhy), zemětřesení, povodeň, úder blesku, náraz vozidla. Někdy může být příčinou i vada materiálu. Protože se jedná o poruchy z různých důvodů, je jejich intenzita zhruba konstantní, $\lambda(t) = \text{konst.}$

III. Intenzita poruch s dobou provozu roste (část III křivky na obr. 1)

Zpravidla jde o poruchy, které nastávají až po určité době provozu, například v důsledku opotřebení, únavy, koroze nebo oxidace. U polymerních materiálů je to zase stárnutí účinkem záření nebo ozónu. Po uplynutí jisté doby počet těchto poruch postupně narůstá, a po určitém čase jsou vyřazeny všechny součásti nebo výrobky.

Při provozu může docházet současně k výskytu poruch ze všech uvedených příčin. Výsledná intenzita poruch je rovna součtu jednotlivých intenzit. V nejobecnějším případě má λ průběh podle obr. 1, který se označuje jako vanová křivka. Celkovou dobu života zařízení lze rozdělit na tři etapy: I – etapa časných poruch, II – etapa ustáleného provozu (etapa užitečného života), a III – etapa stárnutí a dožívání.



Obr. 1 Vývoj intenzity poruch během života výrobku – vanová křivka

Průběh intenzity poruch podle obr. 1 je zcela obecný, a vyskytuje se např. i u živých bytostí. Naproti tomu u technických zařízení může být časový průběh λ odlišný. Jestliže již při návrhu zařízení je otázce spolehlivosti věnována dostatečná péče, je možné intenzitu časných poruch výrazně snížit, nebo dokonce tuto etapu prakticky vyloučit. Takovýto výrobek může mít velmi dlouhou záruční dobu, což je výhodou v konkurenčním prostředí. Také existují zařízení, kde si po uvedení do provozu prostě nemůžeme dovolit žádnou poruchu. Příkladem je družice nebo kardiostimulátor. V poslední době proto byla vyvinuta řada postupů, které předcházejí výskytu časných poruch; některé z nich zmíníme později.

Po odeznění časných poruch následuje období ustáleného provozu (II), kdy je intenzita poruch poměrně nízká a přibližně konstantní. Po ní přichází etapa stárnutí a dožívání (III). Tato etapa se vyskytuje u neopravovaných objektů s určitým převládajícím způsobem porušení (např. opotřebením nebo únavou). Jestliže u složitějšího zařízení součást vyměníme při poruše anebo před vyčerpáním jejího technického života, zařízení funguje dále. Takovéto obnovované zařízení může být v provozu teoreticky po neomezenou dobu – prakticky do vyřazení kvůli morálnímu zastarání. V takovém případě dochází k výpadkům jen v důsledku náhodných a nepředvídatelných poruch, a „vanové“ křivce chybí závěrečná část s rostoucí intenzitou poruch.

4. Střední doba mezi poruchami a užitečný život

Spolehlivost obnovovaných objektů v etapě ustáleného provozu lze charakterizovat jednak pomocí intenzity poruch, jednak pomocí střední (průměrné) doby mezi poruchami (MTBF):

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (3)$$

kde $\sum T_i$ je součet dob provozu a n je počet poruch vzniklých během určitého časového úseku.

Střední doba mezi poruchami je rovna převrácené hodnotě intenzity, resp. parametru proudu poruch v daném intervalu. Jestliže intenzita poruch je například $\lambda = 1 \times 10^{-6} \text{ hod}^{-1}$, je střední doba mezi poruchami $MTBF = 1/\lambda = 10^6$ hodin. Skutečnost, že se střední doba mezi poruchami udává ve stejných jednotkách jako životnost, může vést k jejich záměně. Mezi oběma veličinami je však zásadní rozdíl. Střední doba mezi poruchami (MTBF) odpovídá ploché části vanové křivky, zatímco užitečný život odpovídá začátku jejího strmého nárůstu, tzn. začátku dožívání (obr. 1). Rozdíl ukážeme na příkladu. Životnost žárovky je dva tisíce hodin. Střední doba mezi poruchami, uváděná výrobcem, je naproti tomu jeden milion hodin.

Tento údaj může svádět k představě, že všechny výrobky, nebo jejich převážná část, vydrží milión hodin. Ve skutečnosti to znamená, že během prvních dvou tisíc hodin provozu přestane z nejrůznějších příčin svítit velice málo žárovek – přibližně jedna z miliónu za hodinu provozu. Během dvou tisíc hodin se tedy porouchá pouze 2000×10^{-6} , tj. dvě tisíciný z celkového počtu žárovek. Po uplynutí doby, uváděné jako technický život, v našem případě 2000 hodin, začne docházet k přepalování vláken, počet poruch prudce narůstá, a mezi dobou 2000 a 3000 hodin se přepálí všechny žárovky. Při jednání s dodavatelem nebo zákazníkem je proto vždycky nutno si ujasnit, o kterém parametru se hovoří.

5. Použití intenzity poruch pro posuzování spolehlivosti

Intenzitu poruch nebo parametr proudu poruch lze užívat k porovnávání spolehlivosti různých součástí nebo zařízení, při plánování přibližné spotřeby náhradních dílů a při navrhování zařízení se zadanou požadovanou spolehlivostí. Nejjednodušším případem je ustálený provoz s konstantní intenzitou poruch. Průměrný počet poruch n , který můžeme očekávat během doby Δt ve skupině N součástí (stejněho druhu) o intenzitě poruch A , vypočítá ze vztahu

$$n = A \times \Delta t \times N \quad . \quad (4)$$

Při posuzování spolehlivosti nebo při navrhování složitých objektů se vychází z blokového schématu spolehlivosti. Z hlediska spolehlivosti jsou jednotlivé prvky uspořádány buď v sérii, paralelně, nebo kombinovaně. Prvky jsou v sérii, jestliže porucha jakéhokoliv prvku znamená poruchu celého zařízení. O paralelním uspořádání hovoříme, jestliže výpadek zařízení nastane teprve při poruše všech prvků.

Velmi jednoduchá situace je u zařízení, sestávajících ze součástí řazených v sérii, přičemž intenzita poruch každé součásti je konstantní. V takovém případě se výsledná intenzita poruch vypočítá jako součet intenzit poruch jednotlivých součástí,

$$A = \sum A_i \quad ; \quad (5)$$

A_i znamená intenzitu poruch i -té součásti; součet se provádí pro všech $i = 1 \dots N$ součástí. Tímto způsobem můžeme ze známých intenzit poruch prvků určit, jaká bude v období ustáleného provozu výsledná intenzita poruch A nebo střední doba mezi poruchami

$$MTBF = 1/A \quad . \quad (6)$$

Vzorec (5) s rozepsanou pravou stranou je výhodný také v tom, že dává přehled o významu jednotlivých prvků z hlediska spolehlivosti. Je-li nutno zvýšit spolehlivost určitého zařízení, zaměříme se přednostně na součásti nebo uzly s nejvyšší intenzitou poruch, neboť takovéto změny budou nejúčinnější. Podobně při navrhování zařízení se zadanou spolehlivostí volíme jednotlivé prvky s takovými hodnotami (A_i), aby výsledná intenzita poruch (5) nepřekročila přípustnou hodnotu. Střední dobu mezi poruchami je také možno využít při optimalizaci uspořádání opravitelných zařízení (a při volbě součástí) s cílem dosáhnout minimálních nákladů životního cyklu. Podrobnosti jsou v příspěvku Menčík (2005).

Hodnoty intenzity poruch elektrotechnických součástek nebo mechanických prvků lze najít v katalogích nebo vyžádat od výrobce. Můžeme je také získat z provozních záznamů o poruchách: průměrnou intenzitu poruch dostaneme jako převrácenou hodnotu střední doby mezi poruchami, stanovené podle vztahu (3). K přesnějšímu určení se užívají standardní postupy, založené na statistických metodách.

Práce s konstantními intenzitami poruch je pohodlná, a proto se v katalogích uvádějí intenzity poruch i pro součásti, u kterých dochází k opotřebení, jako jsou např. ložiska

v elektrických přístrojích. V takových případech bývají uvedeny průměrné hodnoty λ , odpovídající různým dobám provozu, např. pro 10000 hodin nebo 50000 hodin. Je proto vždycky nutno si ujasnit, jakým podmínkám provozu daná hodnota λ odpovídá.

Při složitějším uspořádání navrhovaného zařízení, s kombinacemi sériového a paralelního řazení prvků, nebo při časově proměnlivých hodnotách $\lambda(t)$ vzorec (5) nestačí, a výslednou intenzitu poruch je nutno počítat jinými metodami, např. simulační technikou Monte Carlo.

6. Intenzita poruch a rozdělení dob do poruchy

Doby do poruchy jednotlivých výrobků kolísají z nejrůznějších náhodných příčin. Chování v takovém případě lze popsat pomocí rozdělení pravděpodobnosti. Velmi vhodné je **Weibullovo rozdělení**. Distribuční funkce F , která udává pravděpodobnost vzniku poruchy během doby t , má v tomto případě tvar:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{a}\right)^b\right), \quad (7)$$

kde a je tzv. parametr měřítka, b je parametr tvaru rozdělení, a t_0 je prahová (nejnižší možná) hodnota, která se někdy uvažuje rovná nule. Parametry rozdělení lze v konkrétním případě vypočítat ze souboru naměřených dob do poruchy. Pravděpodobnost poruchy F je vázána s pravděpodobností R , že k poruše nedojde, vztahem $F(t) = 1 - R(t)$.

Weibullovo rozdělení může aproximovat různé časové průběhy vzniku poruch. Parametr tvaru b úzce souvisí s časovým průběhem intenzity poruch. Je-li $b < 1$, intenzita poruch s časem klesá (úsek I vanové křivky), je-li $b = 1$, je intenzita poruch konstantní (úsek II), a je-li $b > 1$, intenzita poruch s časem narůstá (úsek III). Z hodnoty parametru b je tedy možno usuzovat i na všeobecnou příčinu poruch (konstrukční závady, nezvládnutá výroba, vnější vlivy, nedostatečné dimenzování při namáhání na únavu apod.). Na základě analýzy konkrétních příčin pak lze navrhnout nápravná opatření.

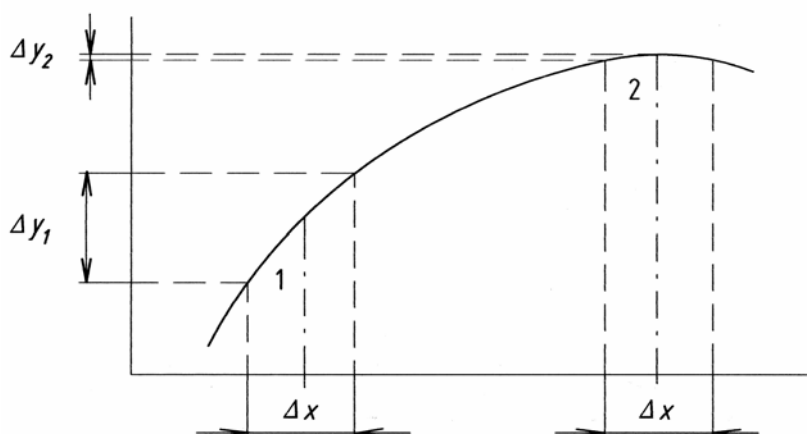
7. Cesty ke zvyšování spolehlivosti

Nejúčinněji lze přispět k vysoké spolehlivosti výrobku v etapě návrhu. K tomu existuje celá řada cest. Ještě před vlastním návrhem je nutno specifikovat podrobně požadavky na zařízení a pracovní podmínky, které se mohou při provozu vyskytnout. V první etapě návrhu je vhodné provést analýzu způsobů a následků poruch (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA). To je formalizovaná procedura, při které se kolektiv odborníků z projekce, výroby a montáže, i zástupce budoucího uživatele snaží při společných diskusích již během návrhu zjistit všechny možné příčiny budoucích poruch a jejich následky. U každé potenciální poruchy se bodově ohodnotí její závažnost, pravděpodobnost výskytu a možnost včasného odhalení. Součin těchto tří čísel dává tzv. míru rizika (risk priority number, RPN). Pak se z možných poruch vyberou ty, jejichž míra rizika přesahuje určitou hodnotu, a konstrukce se upravuje tak, aby se buď zcela vyloučily, nebo aby je bylo možno včas zjistit, anebo aby se alespoň zmírnily jejich následky.

Dalším nástrojem je analýza stromu poruchových stavů a jejich příčin (Fault Tree Analysis, FTA). Zde se naopak vychází z možných závažných poruch celého zařízení, a hledají se prvotní příčiny, resp. poruchy jednodušších součástí, které by nakonec vedly k úplné poruše. Při návrhu složitých zařízení s mnoha prvky lze užít strom poruch k vytvoření

blokového diagramu spolehlivosti, a ze známých spolehlivostí jednotlivých prvků, vyjádřených pomocí intenzit poruch nebo středních dob mezi poruchami, počítat pravděpodobnost vzniku poruchy celého zařízení během určité doby, anebo střední dobu mezi poruchami. Blokový diagram spolehlivosti také ukazuje rozdělení spolehlivostí mezi jednotlivé prvky a kritická místa. Při zvyšování spolehlivosti se zaměřujeme přednostně na prvky méně spolehlivé. Existují postupy pro optimální alokaci spolehlivostí jednotlivým prvkům (Rao, 1992, Holub, 1997, Vintř, 1997). Pro zvýšení spolehlivosti se někdy s výhodou užívá zálohování. Jindy je naopak možno několik součástí nahradit prvkem jedním, plnícím stejnou funkci. Integrované obvody, které nahradily tisíce součástek (tj. potenciálních zdrojů poruch), přispěly k výraznému zvýšení spolehlivosti elektronických zařízení.

Zvýšit spolehlivost lze také využíváním zásad tzv. robustního designu. Obecně není vždy možné zabránit odchylkám všech vstupních veličin od jmenovitých hodnot. Robustní design se snaží najít takové jmenovité hodnoty vstupních veličin (tj. pracovní bod), při kterých bude citlivost výstupní veličiny na jejich kolísání co nejmenší (bod 2 na obr. 2). Někdy tak lze zvýšit spolehlivost zařízení i při zmírnění požadavků na tolerance vstupních veličin. Nezbytnou součástí tohoto přístupu je analýza citlivosti výstupu na kolísání vstupů. Po nalezení pracovního bodu pak je nutno stanovit tolerance vstupních veličin. Otázkám citlivostní analýzy a přiřazování tolerancí jsou věnovány příspěvky (Menčík, 2000, 2001).



Obr. 2. Princip robustního designu: v bodě 2 je veličina y méně citlivá na kolísání vstupní veličiny x než v bodě 1.

K vysoké spolehlivosti dále přispívá důkladné ověření vhodnosti návrhu počítačovou simulací (využívající např. metodu konečných prvků) a zkouškami prototypu. Ve výrobě je zase nutná důsledná vstupní kontrola parametrů všech materiálů a polotovarů, a vyřazení těch, které nesplňují předepsané požadavky. Nemusí to být pouze měření rozměrů nebo jiných parametrů. Někdy se polotovar nebo i hotový výrobek ještě před namontováním vystaví vyššímu zatížení, než je maximální hodnota předpokládaná při provozu. Například u tlakových nádob se provádí tzv. tlaková zkouška. U dílů z křehkých materiálů se při podobných zkouškách, označovaných jako proof-test, dokonce přetížením zničí všechny nevyhovující kusy, takže do provozu se uvedou pouze součásti dostatečně pevné. Některé výrobky se před opuštěním závodu podrobují tzv. zahořování, tj. několikahodinovému provozu, někdy se zvýšeným zatížením. Naopak použití vysoce spolehlivých, ověřených součástí a prvků často odstraňuje nezbytnost zkoušek celého výrobku.

Důležitým prostředkem pro snižování výskytu poruch a prostojů během provozu je vytipování možných postupných poruch, a monitorování veličin, které charakterizují jejich rozvoj. Na základě výsledků diagnostiky je možné předpovídat budoucí vývoj a včas uskutečnit opravu nebo výměnu dané součásti nebo skupiny.

8. Poděkování

Tato práce vznikla v rámci řešení grantu GAČR č. 103/05/2066.

9. Literatura

- Holub, R. (1997) Ekonomické aspekty kvantifikace požadavků na spolehlivost systémů a jejich prvků. Konf. *Inženýrská mechanika '97*, Svratka. Editors: Jiří Náprstek and Jiří Minster. ITAM ASCR, Praha, Vol. III, str. 87 – 92.
- Menčík, J. (2005) Optimalizace návrhu technických objektů z hlediska nákladů souvisejících se spolehlivostí. Konference *Opotřebení, spolehlivost, diagnostika 2005*. Brno, 25. – 26.10.2005, Univerzita obrany, Brno, str. 125 – 130.
- Menčík, J. (2000) Effective methods of sensitivity analysis in structural optimisation. Int. Conf. *Engineering Mechanics 2000*, Svratka. Editors: Jiří Náprstek and Jiří Minster. ITAM ASCR, Prague, 2000. Vol. IV, pp. 97 - 102.
- Menčík, J. (2001) Reliability-based parameter optimization and tolerancing in structural design. In: R.B. Corotis, G.I. Schuëller and M. Shinozuka: *Structural safety and reliability* (Proc. Conf. Icosar '01). A.A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 188, plný text na CD-ROM.
- Rao, S. S. (1992) *Reliability-Based Design*. McGraw-Hill, New York.
- Vintr, Z. (1997) Příspěvek ke kvantifikaci požadavků na spolehlivost složitých mechanických systémů a jejich prvků. Konf. *Inženýrská mechanika '97*, Svratka. Editors: Jiří Náprstek and Jiří Minster. ITAM ASCR, Praha, Vol. III, str. 115 – 120.