

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST

Novotná holávka 5, 116 68 Praha 1

**39. SETKÁNÍ
ODBORNÉ SKUPINY PRO SPOLEHLIVOST**

pořádané výborem Odborné skupiny pro spolehlivost
k problematice

**Zrychlené zkoušky
bez poruchovosti a možnosti
jejich praktické aplikace**



**Materiály z 39. setkání
odborné skupiny pro spolehlivost**

Brno, červen 2010

OBSAH:

Zrychlené zkoušky bezporuchovosti – základní principy a možnosti realizace	1
<i>Ing. David VALIŠ, Ph.D., Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně</i>	
Zrychlená zkouška bezporuchovosti u elektronického systému automobilu	21
<i>prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně</i>	
Příklad aplikace zrychlené zkoušky bezporuchovosti u mechanických prvků	27
<i>Prof. Ing. Jiří STODOLA, Dr.Sc., Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně</i>	
Příklad zrychlení zkoušky bezporuchovosti intenzifikační provozního režimu	34
<i>Ing. Michal VINTR, Ph.D., VUT v Brně</i>	

ZRYCHLENÉ ZKOUŠKY BEZPORUCHOVOSTI – ZÁKLADNÍ PRINCIPY A MOŽNOSTI REALIZACE

Ing. David VALIŠ, Ph.D.

Univerzita obrany, Kounicova 65, 662 10 Brno, david.valis@unob.cz

1. Úvod

Zkoušky spolehlivosti jsou nedílnou a neopominutelnou součástí všech moderních programů spolehlivosti. V širších souvislostech jsou součástí zabezpečování kvality a jakosti každého výrobku. V tomto zespatřování hlavní důvod provádění zkoušek spolehlivosti.

Cílem všech prací v této oblasti je nalézt uspokojivou odpověď na čtyři základní okruhy problémů:

1. jak *stanovit* optimální požadavky na spolehlivost;
2. jak tyto požadavky *zabezpečit* (vyprojektovat) současně s vývojem výroby výrobku;
3. jak *ověřit* skutečně dosaženou úroveň spolehlivosti výrobku;
4. jak a čím nejlépe (optimálně) zabezpečit *spolehlivý provoz* výrobku.

Potřeba provádění zkoušek spolehlivosti vyplývá dále z obecné (společenské a podnikové) potřeby pronikavě zvýšit úroveň jakosti a spolehlivosti všech výrobků v souvislosti se zabezpečením jejich konkurenční schopnosti na náročných světových trzích. V ekonomice se prosadily tržní vztahy a dochází k zavádění moderních a ve světě uznávaných systémů řízení jakosti podle ustanovení ISO norem řady 9000. V nich se klade důraz především na potřebu průkaz a trvalého ověřování vysoké jakosti výrobků a tedy i průkaz vysoké úrovně jejich spolehlivosti. Z praktického hlediska to znamená vyvinout a zpracovat účinné a efektivní zkušební postupy, založené na resp. reálném specifičnosti zákonitostí oboru spolehlivosti systémů.

Základem pro rozhodnutí při procesu inženýrského návrhu mají být měřitelné a reprodukovatelné informace. V většině případů k tomu bývá nutné provést některý druh zkoušek.

Účelem zkoušení bezporuchovosti je poskytnout objektivní a reprodukovatelná data o bezporuchovosti objektu. To vyžaduje, aby zkušební podmínky popsané v plánu zkoušky a metody použité pro zpracování výsledků zkoušek byly pokud možno co nejvíce reprodukovatelné a aby použité zkušební vzorky byly reprezentativní.

Podrobnější cíle zkoušek bezporuchovosti mohou být následující:

- určení/ověření (odhad) číselných hodnot ukazatelů bezporuchovosti;
- objevení „slabých“ míst objektu a provedení úkonů směřujících ke zlepšení výrobku;
- kontrola výpočtů a předpovědí u činěných během etapy návrhu (například pro ověření, že jsou rezervy návrhu řízené);
- odhalení faktorů způsobujících poruchy objektu, aby se provedly nějaké činnosti směřující k odstranění těchto faktorů;
- stanovení vlivu technologických procesů na bezporuchovost;
- zpracování optimalizované údržby systému;
- zlepšení robustnosti, odolnosti proti poruchám a provozní bezpečnosti;
- zlepšení výkonnosti a jakosti výrobku;
- snížení počátečního nákladu a nákladů životního cyklu výrobku;
- analýza podmínek při používání (provozních podmínek) a jejich vlivu na bezporuchovost;
- zjištění oprávněnosti ukazatelů bezporuchovosti a technické dokumentaci;
- vyhodnocení nákladů na některé etapy životního cyklu.

Specifikace zkoušky bezporuchovosti má obsahovat:

- podmínky řízení provozu;
- cíle zkoušek;
- vyjádření účelů zkoušky;
- podmínky výběru zkoušebních vzorků a typů zkoušky;
- specifikace požadavků týkajících se znaků a parametrů zkoušebních vzorků (viz IEC 60300-3-4);
- uspořádání zkoušky;
- sběr a zpracování zkoušebních dat;
- vyhodnocení výsledků zkoušky a jejich využití;
- ověření metodiky zkoušky.

Je třeba poznamenat, že zkoušení bezporuchovosti je pouze jeden z několika možných prvků programu spolehlivosti (viz IEC 60300-2). Cílem tohoto programu je zlepšit efektivnost činností týkajících se bezporuchovosti při návrhu, vývoji a výrobě nového zařízení.

Klasifikace podle všeobecného účelu

Ze statistického hlediska mohou být zkoušky bezporuchovosti klasifikovány podle svého všeobecného účelu, jako je:

- odhad ukazatelů bezporuchovosti objektu („určovací zkoušky“);
- ověřování ukazatelů bezporuchovosti uvedených například ve smlouvě nebo ve „ověřovací zkoušky“);

srovnávání dvou návrhů nebo dvou výrobků z hlediska bezporuchovosti („srovnávací zkoušky“).

Klasifikace podle místa zkoušky

Zkoušky bezporuchovosti mohou být klasifikovány podle místa, kde se tyto zkoušky provádějí, jako:

1. laboratorní zkoušky;
2. zkoušky v provozu.

Klasifikace podle doby získávání výsledků

Zkoušky bezporuchovosti mohou být dále klasifikovány podle doby nutné pro získání požadované informace použitémi podmínkami zkoušky jako:

1. normální zkouška-zkouška za jmenovitých podmínek namáhání trvající bez omezení tak dlouho, až je dosažen požadovaný úroveň hodnosti výsledků zkoušky;
2. zkrácená zkouška-zkouška za jmenovitých podmínek namáhání, které se ukončí v kratší době než bylo původně plánováno, nebo než dojde k poruše v všech zkoušených objektech;
3. zrychlená zkouška-zkouška, při níž se použijí namáhání vyšší, než jsou jmenovité hodnoty, nebo zkouška zhuštěná dobou či zhuštěnými cykly, nebo zkouška sestupně novým namáháním.

2. Podstata zrychlených zkoušek bezporuchovosti

Jak již bylo uvedeno výše, podstatou zrychlených zkoušek je zkoušení objektu při vyšších zatíženích, než je zatížení nominální. Realizace takových zkoušek může být v podmínkách laboratoru nebo v provozu.

Účelem zrychlených zkoušek je rovněž zjištění nebo ověření ukazatelů bezporuchovosti pomocí statistického vyhodnocení výsledků zkoušek. Kromě toho lze zkoušky použít k identifikaci potenciálních příčin poruch, ke kterým může v provozu dojít. Dalším účelem je rovněž:

- zjištění nedostatku návrhu,
- určení/stanovení nebo ověření dalších ukazatelů spolehlivosti – pohotovosti a udržovatelnosti;
- ověření dosažených nutných opatření pro zlepšení bezporuchovosti/pohotovosti;

- jiné.

Tovševezhušť ěnýchnebozrychlených časovýchobdobích.

2.1 Obecný popis metod zrychlených zkoušek – klasifikace, metody, a typy zrychlování zkoušek

Metodyzrychlenýchzkoušekmohoubýtrozdělenydotřískupin:

- typA:kvalitativnízrychlenézkoušky;
- typB:kvantitativnízrychlenézkoušky;
- typC:kvantitativnízkouškysezhušť ěným časema/nebozhušť ěnýmprovád ěnímprocesu.

2.1.1 TypA:kvalitativnízrychlenézkoušky

Tyto typy zkoušek jsou navrženy pro identifikaci slabých míst nebo potenciálně slabých míst v návrhu a rovněž tak slabých míst způsobených během výrobního procesu a totakových, které nebyly identifikovány žádnou jinou analytickou metodou během návrhového období produktu. Z obrázku 1 níže je možné konstatovat, že tyto záje jsou mimo oblast vnějšího kruhu (D), často dokonce mimo oblast UOL (Upper Operating Limit – horní hranice provozu) a LOL (Lower Operating Limit – dolní hranice provozu). Cílem tohoto typu zkoušek není kvantifikovat bezporuchovost objektu, ale zjistit nebo odhalit ta slabá místa produktu během období návrhu, o kterých můžeme předpokládat, že by mohly nastat rovněž během užitého provozu a mohly by skutečně vést k poruše. Zlepšení návrhu a výrobního procesu produktu, která jsou založena na výsledcích těchto zkoušek, vedou k odolnějšímu objektu, u něhož neočekává mnohem vyšší bezporuchovost v provozu a v podmínkách extrémních opakujících se zatížení (jež mohou být specificky zminěna v návrhových specifikacích produktu).

Proces návrhu produktu využívající výsledky a procesu tohoto typu zkoušek zvyšuje bezporuchovost díky minimalizaci některých způsobů poruch díky zvyšování odolnosti a nižším museli prokazovat cílovou hodnotu bezporuchovosti nebo museli přiběžně měřit zlepšení bezporuchovosti. Tyto zkoušky jsou obvykle prováděny s vysokou úrovní zatížení, že mají být ideálními případy poruchy přímo pozorovány. Účelem je identifikace způsobů poruch, slabých vazeb v návrhu a hranice mezi funkčními limity (horní a dolní UOL a LOL).

2.1.2 TypB:kvantitativnízrychlenézkoušky

Tento typ zrychlených zkoušek využívá kvantifikovatelné faktory zrychlení, které jsou založeny jak na fyzikálních mechanizmech specifických typů poruch (nebo typů způsobů poruch), tak na souvisejících dobách expozice určitým specifickým zatížením. Porucha nebo rozdělení způsobů poruchy je stanoveno z informací shromážděných během různých zrychlených zkoušek. Informace ze zkoušky může být kromě výpočtu a stanovení faktoru zrychlení využita pro různé výpočty bezporuchovosti, tam kde je to nutné nebo prakticky použitelné. Z tohoto důvodu pravděpodobnost bezporuchového provozu objektu může být odhadnuta z pravděpodobnosti bezporuchového provozu nebo pravděpodobnosti výskytu jednotlivých způsobů poruchy pro každou úroveň očekávaného zatížení. Pokud je to nutné pro analýzu dat z jiných druhů zkoušek (např. program rozstupu bezporuchovosti) může být stanoven faktor zrychlení využit pro přepočítání dat do doby poruchy, „ze zrychlené zkoušky do reálného času“ pro daný typ prostředí, ve kterém by se objekt mohl reálně v provozu nacházet.

Jiným způsobem otom, jak získat informace z těchto typů zkoušek je zkoušet vzorky součástí nebo objektů na specifické druhy a způsobů poruch a na vliv specifických prostředí na výskyt poruchy. Toto slouží ke stanovení použitelného rozdělení typu poruchy a zjištění/stanovení faktoru zrychlení, který by mohl následně být použit pro výpočet pravděpodobnosti výskytu určitého způsobu poruchy. Tato informace může být užitečná pro organizaci přípravu a provedení následných zkoušek v budoucnosti. Úroveň zatížení u zkoušky typu B může být rovněž ilustrován na obrázku 1 což představuje část, která je mimo vnitřní kruh (I) ale pod úrovní zatížení, které je možné aplikovat pro zrychlené zkoušky HALT (Highly Accelerated Life Testing – Vysoce zrychlené zkoušky životnosti). Ty mohou být právě mezi vnitřním a vnějším kruhem (D) ale pod úrovní zatížení UDL/UDL

(Upper/Lower Destruction Limit – horní/dolní hranice destrukce) a úroveň potenciální destrukce. Ekvivalent trvání takových zkoušek ve vztahu k životu objektu UUT (Unit Under Test – Zkoušená jednotka, někdy i DUT – Device Under Test – Zkoušené za řízení) musí způsobit kumulativní poškození, jež může mít hranice zakumulativním poškozením způsobeným očekávanými zatíženími během normálního technického života produktu. Tyto hranice potom udávají míru bezporuchovosti produktu během sledované doby t .

2.1.3 Typ C: kvantitativní zkoušky se zhušťovacím časem a/nebo zhušťovacím prováděním procesu

Tyto typy zkoušek jsou nejčastěji využívány k odhadu technického života komponent tam, kde je vliv opotřebení během normálního používání dominantním faktorem, který vede k těmto charakteristickým způsobům poruch. Jedná se například o spínače, klávesnice, relé, kontakty nebo ložiska. Data z těchto typů zkoušek jsou často analyzována za využití Weibullova rozdělení a často ve formě nazývané tzv. „náhlá smrt“ – pro více informací viz ČSN EN 61649.

Zkoušky typu C – zhušťování doby – jsou také často používány pro identifikaci otázek a zkoušky integrace systému (jako například interakce softwaru a hardwaru), dále pro zjišťování způsobů poruch, které jsou specifické pro provozní stavy (například provozní cykly pro jakoukoliv událost mechanického a elektrického cyklického namáhání), a rovněž pro prostory, kde je rozsah namáhání široký, při čemž je ale jasně specifikováno, že zatížení prostory pod určitou mezí způsobí významné poškození produktu. Když jsou během těchto zkoušek zvyšovány úrovně zatížení, lze je ilustrovat v obrázku 1 stejným způsobem jako zkoušky typu B. Pokud se ale jedná pouze o zhušťování doby nebo zhušťování prováděné události, potom pozici zkoušky lze ilustrovat uvnitř válce definovaného vnitřním kruhem (E) a dobou t_1 .

2.1.4 Zrychlování zatížení

Snížení doby zkoušení je často dosahováno skrze zvyšování namáhání nad úroveň, které jsou pro podmínky provozu nebo prostory provozu objektu navrženy. Zvýšená úroveň namáhání je příčinou důsledku trvalého poškození ekvivalentního k tomu, jež je očekáváno v provozním životě objektu. To vše ale podstatně zkrácené doby.

2.1.5 Zhušťování prováděné události

Pokud je namáhání opakované, jako například cyklické spínání a vypínání, potom může být zkouška zrychlována zvýšením rychlosti opakování samotného namáhání – zhušťování prováděné události. Tento způsob je obzvláště užitečný v případech, kde samotná úroveň namáhání nemůže být zvýšena/zrychlována. V tomto případě ustanovení principielně pro četuskutečnějších operací stejné, stejně jako důsledek kumulativního poškození. Pozornost by měla být věnována tomu, že vyšší intenzita opakování namáhání může způsobit a způsobit výskyt takových způsobů poruch, které by se nevyskytly v normálním provozu. Příklady mohou být zahřívání v plastických částech, vibrace, které nejsou utlumeny před dalším následujícím zatížením a softwarové sekvenční, které nejsou ukončeny před dalším následujícím signálem.

2.1.6 Zhušťování doby

Zhušťování doby je druhem zrychlování zkoušky, která může být použita v některých podmínkách, kdy se do úvahy berou pouze zkoušky, v nichž je počítána doba produktu v provozu nebo vestavky, kdy vykonává požadovanou funkci například mezeň, ale při čemž tento stav produkuje významné poškození. Rovněž známé jako odstranění „nepoškozujících expozic“. Podmínky, za kterých může být tento typ zrychlování používán jsou takové, kdy provozní namáhání a jejich kumulativní poškození jsou podstatně vyšší než v jiném provozním způsobu například mimoprovozním nebo při záloze. K použití tohoto předpokladu je nutné, aby kumulativní poškození během období nižším namáháním bylo zanedbatelné v porovnání s kumulativními poškozeními během období vyšším namáháním.

Níže uvedený obrázek znázorňuje, kromě jiných výše uvedených souvislostí, koncept, ve kterém jsou požadavky specifikací transformovány do specifikací návrhu. Časová osa znázorňuje dobu

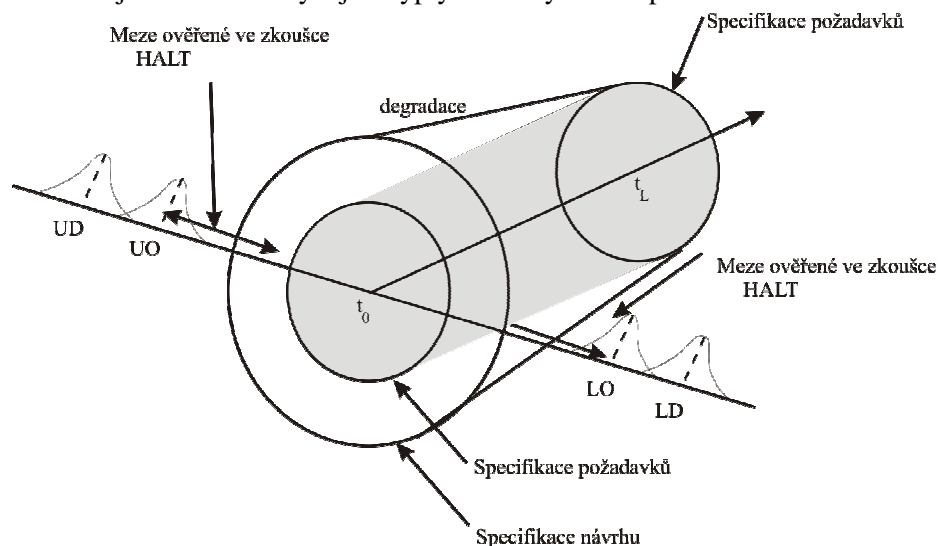
provozu nebo použití produktu. Kolmokr časové ose jsou znázorněny specifikace a namáhání (např. vysoká a nízká teplota, úroveň vibrace, apod.). Čím dále od časové osy, čím vyšší jsou hodnoty specifikací a namáhání. Projednoduchoštspecifikace jsou symbolizovány jako kruhy pojímající právě různé typy specifikací.

Specifikace požadavků je reprezentována šedým kruhem sestříděm v době dodání t_0 . Nicméně se o čekává, že požadavky specifikací budou naplněny nejenom v době dodání produktu t_0 , ale také během celého užitečného života produktu (např. v průběhu doby t_L). Proto jsou oba kruhy symbolizující požadavky specifikací identické a pouze posunuté v čase. Protože se o čekává, že produkt se bude během používání opotřebovávat, je třeba zvít tuto skutečnost do úvahy už v návrhu. Proto je průměr vnějšího kruhu, který reprezentuje požadavky návrhu, větší, než je průměr kruhu, který reprezentuje specifikace požadavků.

Různé typy zkoušek mohou být nyní ilustrovány za využití tohoto obrázku jako modelu koncepcí zkoušek.

Díky šedé oblasti lze znázornit funkční zkoušení produktu. V této oblasti se nesmí vyskytnout žádná porucha během doby zkoušky. Zrychlené zkoušky typu B a C (např. Zrychlené degrační zkoušky ADT – Accelerated Degradation Testing) mohou být ilustrovány jako degrační linie. Pokud degrační linie klesne pod specifikace požadavků, potom může být produkt prohlášen za porouchaný (pokud je ovšem takové chování stanoveno jako porucha). Pokud je produkt zkoušen v době t_0 nesmí se vyskytnout žádná porucha pro úroveň zatížení až do úroveň velkého kruhu v čteně – pokud se jedná o druhý zkoušek sloužících k prokázání výkonnosti.

Nicméně je holou skutečností, že zkoušky bez výskytu poruchy poskytují pouze omezené informace. Protože není známo, jestli by se objekt býval porouchal pokud by úroveň namáhání byla jen o něco málo vyšší než ta, která byla použita. Aby bylo možné odhadnout hranice mezi specifikacemi návrhu a zkoušenou jednotkou je tedy nutné zvýšit úroveň namáhání až do výskytu poruchy ve zkoušce typu A, například zkoušky postupným/stupňovitým namáháním nebo zkoušky typu HALT. Hranice ověřené v této zkoušce jsou znázorněny jako zkoušky HALT s horními a dolními provozními namáháními, stejně jako horní a dolní úroveň destruktivního namáhání. Tento proces samozřejmě předem do úvahy nejistoty výrobních procesů.



Obr. 1 Klasifikace typů zkoušek v závislosti na specifikacích

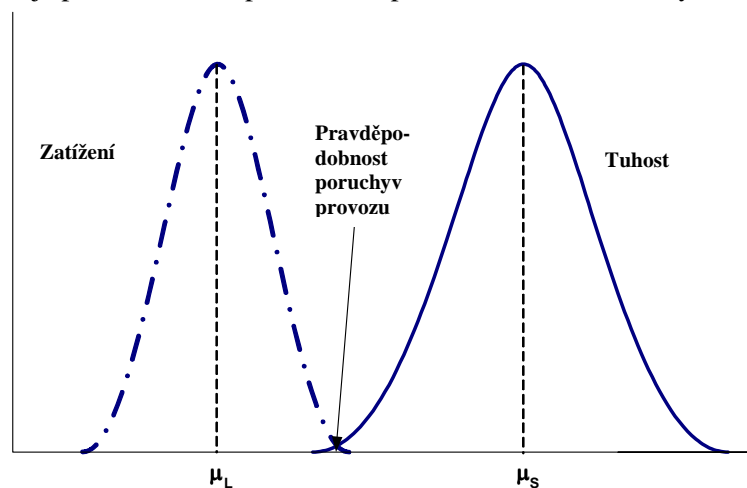
3. Typické modely zrychlených zkoušek

3.1 Typ A: Kvalitativní zrychlené zkoušky – HALT a HASS

Metodologie HALT slouží k rychlému výskytu poruch a k identifikaci a snížení slabých míst návrhu produktu za účelem zvýšení odolnosti během používání produktu v provozu. Tento typ zkoušek obecně není zamýšlen k tomu aby se zabýval měřením, ale aby zvyšoval bezporuchovost produktu

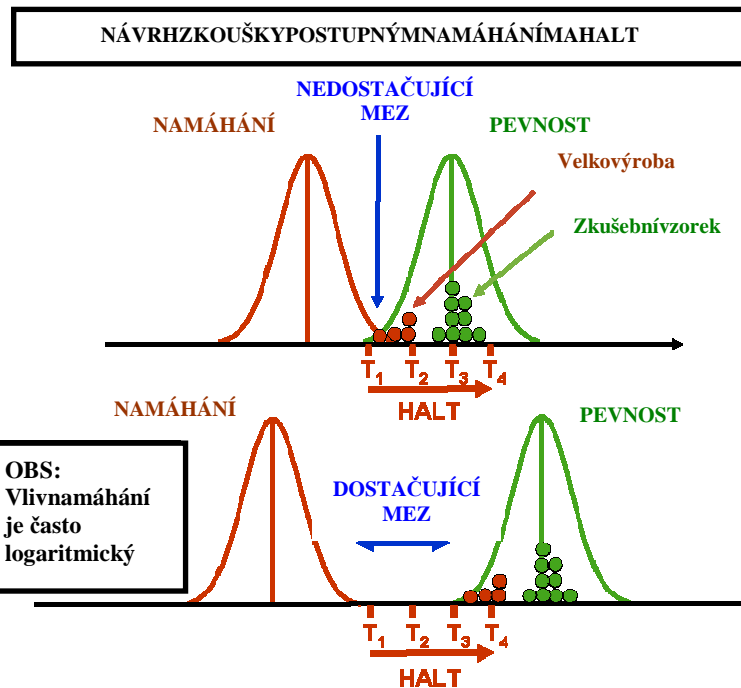
díky eliminaci způsobů poruch snižší hranici mezi namáháním (zatížením) v provozu a mezi pevností produktu (viz například obrázky 2a a 2b). Tento typ zrychlených zkoušek pouze identifikuje potenciální způsob poruchy a vede k rozvoji a zlepšení procesu pro zvolený typ namáhání. Ze zkušeností se zkouškami HALT vyplývá, že většina produktů jako celek je velmi odolná vzhledem k použitému namáhání, ale kolik málo komponent nebo návrhových detailů je výrazně slabších než zbytek. Základní myšlenkou zkoušek HALT je nalezení těchto kolik málo komponent nebo detailů návrhu a učinit je tak odolnější jako je zbytek produktu. Tímto způsobem je odolný produkt dosažen bez použití celkové komplexní rekonstrukce všech komponent a návrhových detailů.

Na obrázku 2a jsou uvedeny vztahy mezi mezí pevností a rozdělením namáhání. Předpokládá se, že namáhání v provozu z různých použití, klimatických podmínek, apod. lze modelovat pomocí rozdělení namáhání. Zde je pro ilustraci uvedeno normální rozdělení. Pevnost produktu se bude měnit s ohledem na řízení materiálu a procesy výroby. Totéž lze rovněž modelovat rozdělením namáhání, které je na obrázku 2a rovněž v tomto případě představováno normálním rozdělením. V případě rozsáhlé kontroly kvality výroby se stává, že rozdělení pevnosti je řízeno a je velmi úzké. Tento přístup je sice velmi precizní se zaručenými pozitivními výsledky, ale je rovněž velmi nákladný. Nicméně jej lze nalézt například v prostředí leteckého průmyslu a leteckých aplikací. Pokud se mez pevnosti / pevnost produktu a jeho rozdělení namáhání překrývají, potom se můžeme stát, že namáhání překročí pevnost produktu a může porouchat. Tento jev je překrytí senazývá vzájemné ovlivnění pevnosti a namáhání. Tato část – průnik – je primárně stanovená v návrhu produktu. Takový produkt bude mít tzv. mezní / okrajovou úroveň bezporuchovosti, zatímco produkt s větší vzdáleností mezi těmito dvěmi rozděleními bude odolnější proti změnám v podmínkách provozu a změnám ve výrobě.



Obr. 2a Vztah mezi pevností produktu a použitým zatížením

Dále na obrázku 2b je uvedeno, že soubory vyrobené pro zkoušení jsou často vprůměrné pevnosti nebo mírně vyšší. Děje se tak proto, že jsou obvykle vyráběny jako speciální prototypy s maximálním dohledem a pozorností managementu. Jakmile je produkt masově vyráběn, může se klidně stát, že budou běžně vyráběny i prvky z oblasti rozdělení nižší pevnosti. Pokud by byly zkoušeny první soubory v běžných zkouškách namáhání pouze za účelem zkoušet úroveň namáhání T_1 , potom by zkouška úspěšně prošla. Existuje zde ale neadekvátní hranice tak, že pozdější produkce způsobí poruchy v provozu. Pouze zvyšování úrovně zatížení na T_2, T_3, T_4 , atd. je možné verifikovat zda je hranice vhodná pro zahrnutí změn ve výrobních procesech. Toto je hlavní myšlenkou, která je základem zkoušek postupného namáhání a zkoušek typu HALT. Rovněž je to odpovědí na otázku, proč je tyto typy zkoušek možné provádět s daleko menším rozsahem zkušebního vzorku než konvenční zkoušení.



Obr.3b Nár. ústnamáhání pro detekci snížení slabých míst a zvýšení pevnosti a hranice odolnosti

Metody HALT jsou a měly by být vnímány jako zjišťovací zkoušky, ne jako kvantitativní zkoušky zlepšení návrhu. Je pomocí nich možné identifikovat nejslabší vazby způsobů poruch v návrhu pro daný typ (dané typy) namáhání. Pokud tento způsob poruchy souvisí s namáháním v prostředí použití produktu, může být úroveň namáhání odhadnuta pouze inženýrským odhadem posuzujícím hranice mezi zatížením a řívkou pevnosti a zahrnující rovněž očekávané obměny, jak výrobního procesu, tak očekávaného prostředí použití. Pokud se nejslabší vazba v produktu porouchá první, zkoušky HALT jsou dále použitelné pro detekci druhých, třetích a dalších následných na sebe navazujících vazeb. To se děje tak dlouho, až není možné pozorovat žádné nové, platné způsoby poruch, nebo do té doby, dokud není dosaženo technologického limitu pro zkoušený systém.

Princip a rámec pro který jsou zkoušky typu HALT navrženy daleko přesahuje prostředí použití produktu, stejně jako specifikace návrhu. Namáhání jsou obvykle zavedena v krátkých dobách trvání, přičemž cílem je vyvolat skryté poruchy a posílit produkt tak, jak je technicky a ekonomicky možné a dosažitelné. Zkoušky HALT jsou schopné identifikovat způsob poruch, ale ne jejich časové závislosti.

Zařízení ve zkoušce má být monitorováno se funkcí, která může celou zkoušku za účelem detekce ztráty funkcí. Pokud není možné provádět soustavné sledování, má být produkt zkoušen, pokud je úroveň namáhání konstantní. Níže je popsána stručně typická posloupnost zkoušky podle principů HALT.

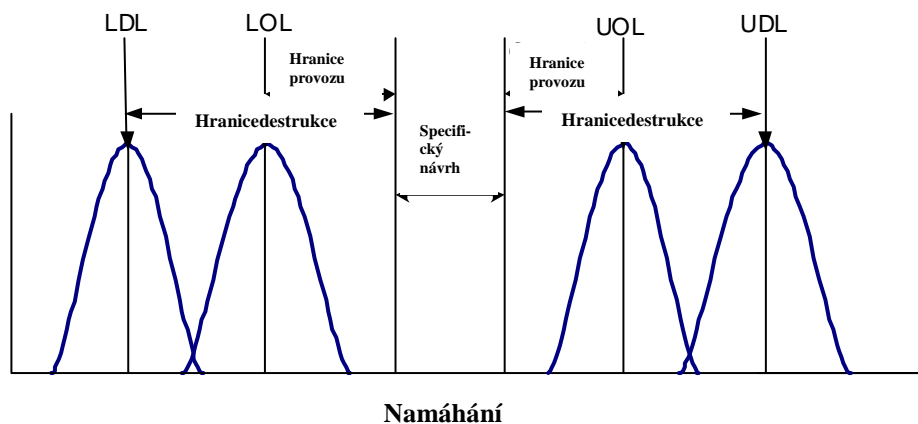
- Krok 1. Stanoví se úroveň namáhání, na které bude zkouška zastavena, pokud se UUT neporouchá.
- Krok 2. Nastavení: Umístění UUT do stendu HALT a provedení všech nutných propejení pro přívod energie, signálů do a z, kontaktů pro sledování funkcí UUT, apod. Úroveň namáhání na UUT má být sledována pomocí senzorů (např. teplotní senzory, akcelerometry, apod.). Speciální pozornost a péče má být věnována tomu, aby se zajistilo, že kontakty jsou schopny odolat namáhání, která jsou ve zkoušce použita. V některých případech musí být ta část UUT, která je vystavena vyššímu namáhání, vyjmuta ze stendu, takže HALT není u této části použita. Pokud je zkoušený prvek vystaven vibracím, musí být uchyten tak, aby nebyly jeho části, nebo prvek jako celek výrazně tlumeny, apod.
- Krok 3. Zahájení zkoušení: UUT musí být funkčně použitelné předtím, než je zkouška podle profilu HALT zahájena. Monitorovací zařízení má být rovněž vyzkoušeno zohledem

na funkčnost před tím, než je zkouška započata. Rovněž je třeba prověřit všechny kontakty a propojení mezi UUT a přístroji s ohledem na integritu a způsobnost odolávat namáháním vestevu HALT, například vysokých rychlost proudění vzduchu.

- Krok4: Zvýšení používaného namáhání na požadovanou úroveň. Pokud je UUT sledováno nepřetržitě, lze úroveň namáhání zvyšovat postupně plynule. Pokud není trvalé nepřetržité sledování možné, mají být úroveň namáhání zvyšována po krocích a postupně. Tím je docíleno aby se UUT stabilizoval na každé úrovni před tím, než je zkoušena jeho funkčnost za účelem sběru vhodných informací o poruše (pokud se porucha vyskytla). Poté je úroveň namáhání snížena takto, aby bylo možné vidět zda se funkce UUT ustálila/obnovila do požadované úrovně – někdy též po opětovném nastavení (resetu). Pokud se funkčnost ustálila/obnovila je úroveň namáhání funkce UUT ukončilo svou schopnost vykonávat funkci označeno za provozní mez/mez provozu (OL – Operational Limit).
- Krok5: Úroveň namáhání je zvyšována až do momentu kdy UUT není schopná dále obnovovat svou funkci, když úroveň namáhání poklesne. Tato úroveň namáhání se nazývá DL (Destruction Limit – mez destrukce). V některých případech může být funkce obnovena pokud je namáhání odejmuto a dokonce i tehdy, kdy se vyskytne trvalé poškození (například lom). Z tohoto důvodu je řízení pomocí detekce je použito tam, kde je UUT vystavena například nízké úrovni vibrací během zkoušky funkce za účelem aktivace přechodných / pomíjivých poruch. Poté je UUT prohlédnuto a pokud je potřeba, vyjmuto (i jen dočasně) ze zkoušky. To za předpokladu, že již bylo shromážděno dostatečné množství informací o ke stanovení způsobu poruchy, a pokud je to možné i kořenové příčiny poruchy. V některých případech je možné, že UUT bude trvale vyjmuto ze zkoušení za účelem analýzy poruch. Zato ho předpokladulze podle formátu zkoušky buď vložit UUT nově a ve zkoušce pokračovat, nebo nikoliv. Tam kde to je možné, má být porucha odstraněna/opravena, přičemž slabé části návrhu mají být posíleny (například podpora nebo výplně) nebo ochráněny (například provedení chladičového vzduchu nebo naopak izolace objektu). Poté by měla zkouška pokračovat za účelem hledání nových slabých míst návrhu.
- Krok6: Pokračuje se až do dosažení mezní hodnoty stanovené v kroku 1.
- Krok7: Opakuje se postup od kroku 2 až do kroku 5 s jiným typem namáhání (například horký vzduch). Tradiční profily HALT používají následující sekvenci: nízká teplota, vysoká teplota a poté cyklování mezi vysokou a nízkou provozní teplotou.
- Krok8: Opakuje se proces od kroku 2 do kroku 5 s cyklováním mezi UOL a LOL.
- Krok9: Pro obvyklé formáty zkoušek HALT nyní zopakovat kroky 2-5 nyní s vibracemi a rázovým impulzy.
- Krok10: Pro tradiční formáty HALT nyní kombinovat teplotní cykly (Krok 7) a vibrace (Krok 8).
- Poté se opakují Kroky 2-5 pro kombinované namáhání.
- Krok11: Provede se analýza poruchy – stím, že se určí, který způsob poruchy se může vyskytnout na nižší úrovni namáhání v podmínkách provozu. Odhadne se dále hranice možností návrhu stím, že se vezmou do úvahy nejhorší podmínky provozu a rozdílnosti ve výrobním procesu.
- Krok12: Provede se záznam zkoušky. Poté, co jsou prakticky realizována zlepšení a pokud je to možné, má být UUT opět zkoušeno za účelem ověření zlepšení.

Vzávislosti na typu produktu a jeho citlivosti je možné měnit pořadí typů namáhání během zkoušky. Vlastní hodnota namáhání nicméně není hlavní okolností, na kterou by se měla zkouška HALT soustředit. Cílem je snažit se o neustálé zlepšování produktu do úrovně stanovené obchodními a technickými podmínkami a náklady účinné technologie.

Provozní mez zmeze destrukcí produktu mohou být názorně formou obrázku viz obrázek 3 jak o rozdělení namáhání.



Obr.3 Meze provozu a mezí likvidace jako funkce použitého namáhání

V obrázku 3 jsou soupatrné oblasti mezené následovně:

- LDL – Lower Destruct Limit – dolní hranice destrukce
- LOL – Lower Operating Limit – dolní provozní limit
- UOL – Upper Operating Limit – horní provozní limit
- UDL – Upper Destruct Limit – horní provozní limit

Obrázek 3 je příkladem toho, že omezené namáhání může ovlivnit životnost objektu. Tímto příkladem mohou být tepelné namáhání, kde obě, jak nízká, tak vysoká teplota ovlivní funkčnost produktu. Tyto vlivy mohou být symetrické, jako jsou vlivy pro nízké a vysoké teploty mohou ležet v určité vzdálenosti od jmenovitého namáhání daného návrhem. Jak je uvedeno na obrázku 3, všechny tyto meze mohou být nastaveny, jak jednáno průběhem rozdělení. Tato rozdělení mohou mít určité standardní odchylky, a k tomu, aby bylo možné stanovit HALT, je nutné udát omezení hranic, které umožní konečnému produktu uplatnit tyto změny, aniž by se vyskytla porucha v provozu. Ačkoliv je na obrázku 3 uvedena závislost pouze pro namáhání teplotou, mohou být u zkoušek HALT úspěšně použity i jiné druhy namáhání. V případě jiných typů namáhání, se může stát, že nízké úrovně namáhání neexistují (jako například může být uvedeno například mechanické namáhání), ale mohou existovat jinými druhy namáhání jako například elektrické namáhání adokonce vlhkost.

3.1.1 Možné typy namáhání a jejich použití

První, primární, základní a/nebo typicky používaná namáhání ve zrychlených zkouškách a zkouškách HALT jsou následující:

- teplota;
- tepelné cyklování;
- vibrace/rázy;
- napětí;
- kombinace vibrací/rázů a tepelného cyklování.

Ve zkouškách mohou být samozřejmě použity i jiná namáhání, která jsou specifická ve vztahu k danému produktu. Jedná se například o určité cykly dané frekvence v čase – například u mikroprocesoru, změny napětí nebo napájení, vlivy určitých znečišťujících látek nebo rozpouštědel, jejich určité kombinace atd. ...

Ověření určitých hranic zlepšení produktu provedené jako odezva zvaná HALT slouží ke zvýšení pravděpodobnosti toho, že produkt bude odolný a bez poruchovější v provozu. Při čemž maximální hodnoty zatížení jsou stanoveny následovně.

- mezímateriálu a mezí technologií použitými pro daný materiál a komponenty;
- maximálním dosažitelným namáháním, které lze pomocí dostupných technologií a za řízení vytvořit.

Jen nutné poznamenat, že použité úrovně namáhání nemají překročit mezní mezí materiálu, kde by mohly změnit fyzikální nebo chemické charakteristiky materiálu. Je naprosto normální, že se během zkoušky objeví některé křehké materiály při použití UUT, přičemž je zřejmé, že tyto části nejsou navrženy na namáhání normálně používaným během HALT. Pokud je to však možné, mají být tyto křehké části během zrychlených zkoušek chráněny nebo data o jejich poruchách nemají být zohledňována při vyhodnocení. Příkladem ochrany křehkých částí je například řízení chlazení pomocí chladicího vzduchu k nim, nebo naopak izolace proti vystavení studenému vzduchu, jejich speciální odpružení mimo UUT pro eliminaci použitých vibrací a rázů nebo dokonce jejich vyjmutí mimo zkoušky (i mimo standy HALT) ale za dodržení jejich vzájemného propojení s ostatními komponentami UUT.

3.1.2 Vysoce zrychlené zkoušky namáháním – HAST (Highly Accelerated Stress Tests)

Tento typ zkoušek může být považován jako mezi lehlý mezí kvalitativními typy zkoušek A a B. Tento typ zkoušek je obzvláště oblíbený v průmyslu výroby elektronických součástí, kde je široce rozšířen a používán jako více efektivní. Je tzv. „lepší“ alternativou k mnohem delším zkouškám „Teplota – Vlhkost – Přetíž. (THB)“ – zkouška v „tlakovém hrnci“, která má dobu trvání 1000 hodin. Obvyklým namáháním ve zkoušce HAST je teplo a vlhkost, kde se zkoumá koroze kovových kondensátorů, diod a tenkých odporů. Komponenty jsou obvykle zatěžovány přetíž. během zkoušky. Dokonce ačkoliv tyto zkoušky nepředávají numerické odhady bezporuchovosti, jsou použity pro efektivní opětovnou kvalifikaci zkoušek k poskytnutí jistoty, že bezporuchovost komponent není ovlivněna kompromisy způsobenými změnami v komponentách samotných. Doba trvání zkoušek HAS v průmyslové praxi výroby komponent představuje zhruba 100 hodin a úroveň namáhání je obvykle 130°C a vlhkost 85%.

Jako další techniky zkoušení existují například metody HASS (Highly Accelerated Stress Screening) a HASA (Highly Accelerated Stress Audit). Metody HASS jsou používány pro řízení produktu a jednotek, při kterých se ve zkoušce využívají namáhání podstatně vyšší než ta, které jsou očekávána za normálních provozních podmínek. Nicméně jsou podstatně nižší než ta, při kterých může dojít k podstatnému zkrácení technického života produktu v provozu. Tyto úrovně aplikované ve zkouškách jsou založeny na úrovni chýšněných během zkoušek v programu HALT. Zkoušky s řízením mohou být provedeny na 100% produkovaných jednotek (HASS) nebo na vybraném vzorku (HASA). Účelem řízení je určení jakéhokoli výrobního poškození, následovaného analýzou poruchy a nutnými nápravnými opatřeními a snížení počtu skrytých poruch. Výsledné zlepšení provozní bezporuchovosti se děje snížením počtu provozovaných komponent, u kterých nebyl prokázán výskyt latentních výrobních vad, a ne kvůli změnám vnitřní výroby bezporuchovosti vlivem návrhu.

Úrovně namáhání v HASS (Highly Accelerated Stress Screening) / HASA (Highly Accelerated Stress Audit) jsou nazývány řízení vyřazováním. Tím řízení vyřazováním sestává z kombinovaných namáhání s úrovněmi těsně v provozních mezích. Účelem takového řízení je vyřadit výrobní vady, které by mohly vést k dočasným nebo trvalým poruchám. K detekci poruch je nutné monitorovat funkce UUT během řízení, jelikož některé provozní neobvyklosti nemusí být odhaleny ani během provozních kontrol, které následují po zkoušce. Dále není bohužel možné detekovat kdy během řízení vyřazováním je možné detekovat poruchu funkce. Tím řízení vyřazováním může kombinovat některé různé typy namáhání a úrovně namáhání. Nepřetržité monitorování má poskytnout funkční pokrytí, jež má být tak souvislé, jak jenom je to možné. Pokrytí monitorování a efektivita monitorování má být optimalizována před začátkem procesu vývoje řízení. Proces monitorování má podpořit analýzu a řešení nových řízení.

Typické řízení vyřazováním produktu vyžaduje dobu použití namáhání v rozmezí od 3 minut do jedné hodiny. Další doba bude potřebná pro nastavení zkušebního a monitorovacího řízení. Metoda HASS je ideálně vhodná pro pilotní projekty nebo pro situace zvyšování produkce. Je to dáno tím, že intenzita produkce je malá a tedy 100% řízení lze jednoduše docílit. Metoda HASS může pokračovat i během normální produkce produktů, které jsou klasifikovány jako velmi kritické, jež

jsou vyráběny ve velmi malých objemech. Metoda HASA obvykle metodou HASS doplňuje a to pro případy již vyztužených produktů s cílem dále snížit nebo eliminovat použití metod HASA u prokázaných zavedených efektivních řídicích procesů produkce.

Výhody metod HASS a HASA:

- výběr vzorků a omezení návrhové hranice;
- velikost vzorku pro stanovení specifických způsobů poruch je malá;
- jedná se o rychlý způsob stanovení dominantních způsobů poruch pro specifické typy namáhání, jež jsou a mohou být jednoduše kombinovány (trvání zkoušky je obvykle do 3 dní);
- jedná se o efektivní analýzu kompromisů ve vztahu k informacím a stanovení nutných nápravných zásahů;
- jedná se o efektivní řízení produktů v relativně krátkém časovém období;
- umožňuje eliminaci slabých nebo defektních komponent z hlavního posuzovaného vzorku (zvyšování jakosti a bezporuchovosti).

Nevýhody metod HASS a HASA:

- možnost vyvolání způsobů poruch, jež by se normálně v podmínkách provozu neudály;
- potenciál pro nadbytečné zlepšení návrhových mezí (nadměrné zlepšení návrhu);
- výsledná úroveň bezporuchovosti není známá;
- omezená statistická spolehlivost dat ve zkoušeném výsledku (buď přehnané nadhodnocení nebo podcenění návrhových mezí);
- zkoušení nepopíše všechny vzájemné výsledky vícenásobných způsobů poruch;
- není praktické pro rozměrné a velké produkty, velmi malé produkty a produkty s rozdílnou křehkostí;
- jedná se zde o omezené typy typů namáhání (primární teploty, vibrace, rázy a teplotní cykly);
- nemožnost ohodnotit meze návrhu pro namáhání ovlivněná souběžnými jinými typy namáhání, které nejsou pokryty zkoušebními metodami typu HALT.

Přístrojové vybavení a zařízení pro provedení zkoušek HALT a HASS.

Níže je uvedeno minimální nutně požadované vybavení – za řízení, které je pro provedení zkoušek potřebné. Níže jsou uvedeny i některé aspekty a způsobilosti, které jsou nutné pro teplotní cyklování v komorách.

- je požadována minimální počáteční intenzita 25°C za minutu. Za účelem udržení doby zkoušení na minimální hodnotě má být posouzeno použití teplotních komor, u kterých je intenzita počáteční teploty vysoká;
- rozsah teplot komor má být dostatečně velký proto, aby bylo možné namáhat UUT k jeho technologickým limitům, a to především jednotlivých komponent a použitých materiálů;
- zajistit nepřetržitý průtok vzduchu kolem UUT k zajištění maximálního přestupu tepla;
- při stanovování počáteční intenzity má být zvážena a posouzena hmota (z hlediska), z které je UUT vyrobeno. Speciálně potom pro HASS/HALT.

Některé důležité aspekty pro vibrační řízení pro zkoušky:

- náhodné vibrace nebo opakující se rázy produkující kvazi-náhodné vibrace;
- odezva zkoušeného objektu musí být adekvátní UUT (typicky mezi 20 Hz – 20 kHz);
- vibrační řízení má být schopno poskytnout vstup do UUT ve více než jedné ose současně. Je preferováno šest stupňů volnosti.

3.2 Typ BaC – kvantitativní zrychlené zkoušební metody

Účelem kvantitativních zrychlených zkoušek je odhad jednoho nebo více ukazatelů spolehlivosti – pohotovosti, bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištění údržby. Jsou to zejména

intenzita poruchy, pravděpodobnost poruchy, pravděpodobnost bezporuchového provozu, doba do poruchy nebo střední doba provozu mezi poruchami (MTBF). Obvyklým účelem kvantitativních zrychlených zkoušek je stanovení doby technického života komponent srovnáním provozním životem (daným například opotřebením), nebo stanovení (kvantifikace) a zlepšení pravděpodobnosti bezporuchového provozu systémů nebo komponent. Proto je velmi vhodná Weibullová analýza (viz například ČSN EN 61649).

3.2.1 Fyzikální báze proměty kvantitativních zrychlených zkoušek typu B

Obvyklým cílem ve zrychlených zkouškách je měření pravděpodobnosti bezporuchového provozu a ověření přijatelnou bezporuchovost produktů během krátkého časového intervalu. Tedy cílem zrychleného zkoušení je zrychlit kumulovanou intenzitu poškození pro platné určitě opakující se namáhání zrychlením mechanismů poruchy (platný mechanismus poruchy je takový, který očekáváme, že během podmínek technického života skutečně nastane).

Abychom ale mohli zrychlit zkoušky bezporuchovosti, je nutné znát zevrubně a rozumět potenciálně možným mechanismům poruch a provozním namáháním a namáháním dle prostředí jak pro systém tak pro jiný produkt. Těchto požadavků lze docílit například analýzou poruch navrženého produktu provedenou v souladu s předpokládanými podmínkami provozu a profilem použití (vhodnou volbou je například analýza FMEA/FMECA, viz ČSN EN 60812). Efektivní opatření potom mohou být provedena nejenom pro zabránění jejich výskytu, v předem stanovených podmínkách namáhání nebo v předem stanoveném technickém životě, ale mohou být rovněž uskutečněna efektivně během zrychleného zkoušení pro zlepšení produktu. Zrychlené opotřebením nebo zkoušení bezporuchovosti bylo rozpoznáno jako hodnotná činnost pro posuzování bezporuchovosti vysoce spolehlivých elektronických, elektromechanických a mechanických systémů. Použití zvýšených namáhání je obvykle provedeno kvůli:

- provedení odolnějšího návrhu a zlepšení výrobního procesu skrze systematické zkoušení postupným namáháním a zvyšováním hranic namáhání skrze opatření po vzniku poruch (zkoušení ústředí bezporuchovosti);
- provádění zrychlených zkoušek životnosti v laboratořích za účelem měření a ověření pravděpodobnosti bezporuchového provozu v provozním nasazení.

Rozsah zrychlování, obvykle nazýván jako faktor zrychlení (AF – Acceleration Factor) je stanoven jako poměr technického života v podmínkách používání technického životu v podmínkách zrychleného zkoušení. Tento faktor zrychlení je nutný pro kvantitativní extrapolaci ukazatelů bezporuchovosti (jako doby do poruchy a intenzity poruch) z prostředí zrychleného zkoušení do prostředí obvyklého provozního použití – to samozřejmě na odůvodnitelné úrovni konfidence (matematické hladiny spolehlivosti výsledku). Faktor zrychlení závisí na parametrech hardwaru (například vlastnosti materiálu, architektura produktu) UUT, v použitých podmínkách namáhání, podmínkách namáhání zrychlených zkoušek a platných mechanismech poruch. Tedy, každý platný způsob poruchy UUT má svůj vlastní faktor zrychlení a podmínky zkoušky (například cykly UUT, úroveň namáhání, historie namáhání, trvání zkoušky) a to musí být tedy přizpůsobeno a založeno na těchto faktorech zrychlení. Fyzikální proces poruchy znamená, že každý způsob poruchy je uvažován odděleně a hranice pro dobu technického života nebo pro požadovanou pravděpodobnost bezporuchového provozu je ověřována pro každý z nich. Na základě tohoto přístupu má každý způsob poruchy své vlastní rozdělení pravděpodobnosti a tedy i intenzitu jevu. V ostatních případech je výsledek kombinován s odhadovanou pravděpodobností bezporuchového provozu pro celý produkt.

Zkouška typu B může být provedena na základě zdokonalení robustnosti zatížení (jako například tepelné – teplota, teplotní cykly, intenzita změny teploty), chemické zatížení (například vlhkost, korodující chemické látky jako kyseliny a soli), elektrické zatížení (například pohotovostní stav, proměnné napětí, elektrický proud, napětí) a mechanické zatížení (například kvazi-statické cykly mechanických deformací, vibrace, a ráz/impuls/pád/náraz). Zrychlené prostředí může obsahovat kombinaci těchto zatížení. Interpretace výsledků pro kombinovaná zatížení a extrapolace výsledků ve vztahu k reálnému životnímu cyklu vyžaduje kvantitativní pochopení reálných interakcí různých namáhání ve zkoušce například v případě každého typu namáhání celkovému poškození.

Výhody zkoušek typu „B“:

Zrychlování namáhání během zkoušky poskytuje kvantitativní informace o pravděpodobnosti bezporuchového provozu zkušeneho produktu, přičemž:

- tento typ zkoušky může být navržený pro kombinovaná namáhání rovněž za účelem simulace interaktivní důsledky těchto typů namáhání a realistického posuzování bezporuchovosti produktu;
- zrychlování zkoušky může být prováděno efektivně za účelem umožnění reprezentovat ve zkoušce kumulativní projevy poškození jako během provozu.

Nevýhody zkoušek typu „B“:

- přítomtoformátuzkoušekexistujírizika,žezrychlovánínamáhánímůžepřekročít fyzikální vlastnostimateriálu v produktu a způsobit nepředvídatelná poškození;
- dále existují rizika, že zrychlení v kombinaci s více druhy namáhání může způsobit dodatečná nepředpokládaná poškození produktu, které by se ale nestalo během obvyklého použití.

3.2.2 Zrychlené zkoušky typu C – zhuštění doby (C₁) a dĺostí (C₂)

U zkoušky typu C₁ je zhuštění doby dosaženo eliminací doby vypnutí („OFF-time“), resp. nevyužití doby mimo provoz („non-operational time“ – idle/dormant time) pomocí zhuštění doby cyklu při provádění funkce skrze soustředění se pouze na stav provozu (zapnuto/spuštěno). Navíc pokud je produkt vystaven širokému rozsahu namáhání, je obvyklé, že nejvyšší namáhání (u primárních namáhání) způsobí nejvíce poškození přičemž existují některé úrovně namáhání – obvyklých namáhání během používání, která v porovnání s primárními namáháními mohou být považována za zata, která způsobí zanedbatelná poškození. Každé vystavení namáhání pod zvolenou hranici namáhání u daného poškození lze považovat za namáhání způsobující zanedbatelné poškození a může být vyřazeno ze zkušebního programu. Příkladem zhuštění doby cyklu funkce je například, když je trvání zkoušky prováděno po dobu 24 hodin denně, když například vešm obvyklém provozním prostředí je provoz pouze například 8 hodin denně. Topředstavuje zhuštění doby faktorem 3, přičemž každý den zkoušení je ekvivalentní 3 dnům obvyklého provozu.

Výhody zkoušek se zhuštěnou dobou:

- produkt s minimální nebo krátkou dobou použití v provozu lze v porovnání s kalendářní dobou zkoušet po velmi krátkou dobu, která je ale v relaci s jeho skutečnou provozní dobou. Příkladem může být sněžná dráha, která je použita pouze jednou sezónu v roce a to pouze v případě, že není dostatek sněhu a podmínky pro jeho použití jsou vhodné. Dokonce i tehdy když je používáno se očekává, že bude v provozu v průměru pouze po dobu několika hodin. V tomto případě existují několik primárně poškozujících namáhání jako jsou vibrace, namáhání v pohonu, opotřebování lopatek, apod. Po zbytek roku je systém zagaržován a chráněn proti vlivům prostředí. Přitom všem má sněžová dráha očekávanou požadovanou dobu života minimálně deset let, ale pokud jsou podmínky, je používáno několikrát v měsíci po dobu maximálně 4 měsíců v průměru několik hodin (např. 2 hodiny). Tedy se požaduje, aby byl systém zkušeno na ekvivalentní dobu používání cca 240 hodin. Z toho vyplývá, že zkouška funkce po dobu 300 hodin poskytne již dobrou hodnotu prokazání pravděpodobnosti bezporuchového provozu sněžové dráhy na vysoké hladině matematické spolehlivosti.
- V relativně krátkých dobách trvání zkoušky na jmenovité zatížení není důvod pro zvyšování namáhání a tedy není důvod pro stanovování faktorů zrychlení, protože existuje riziko na přetížení UUT.

Nevýhody zkoušek se zhuštěnou dobou:

- soustředění se pouze na provozní dobu znamená posuzování pouze ze provozního prostředí jeho vztaženými způsobem poruch, zatímco způsobem poruch, které nastanou mimo tuto dobu (mimo provoz) mohou být úmyslně/neúmyslně opomenuty. Takovéto způsobem poruch mohou být pro produkt dokonce více poškozující, protože jsou výsledkem namáhání, která možná nejsou výrazně nižší než ta, kdy je produkt používán, ale jsou používána po

odůvodněně delší dobu k tomu, aby způsobila to samé nebo větší kumulativní poškození, než jsou namáhání používaná během provozu.

- Připosuzování stejného příkladu se sněhovým dělem, předpokládáme, že po dobu desetiletí což je asi po dobu 87600 hodin se sněhovým dělem vystaveno extrémním nízkým teplotám po dobu asi 20000 hodin, které vedou k poruchám materiálu vlivem prostřídání. Velmi vysoké teploty po dobu asi 6000 hodin vedou ke stárnutí jiných materiálů jako jsou plasty, pryže, nátěry, lepidla. Dále teplotní výkyvy vedou po dobu asi 7200 hodin ke strukturálním změnám a poškozením a vlhkost, jež působí po dobu minimálně 30000 hodin způsobuje korozi. Zkoušky pouze na provozní vlivy by zcela jistě nezohlednily vlivy těchto faktorů prostředím provozního profilu.
- Pro produkty, kde je doba aktivní funkce podstatně kratší než doba pasivní-neaktivní, je nutné kombinovat dobu zrychleného zkoušení pro provozní období se zkouškami, které jsou rovněž schopny zrychlovat pasivní období (např. korozní zkoušky, zkoušky vlhkosti, apod.). V některých případech, může být produkt předpřipraven před započtením zkoušek pomocí zhušťování doby tak, že se použijí některá namáhání z období pasivních dob jako je například vlhkost, skladování v chladném místě, sluneční záření nebo mechanické zatížení jako vibrace a rázy, jež simulují podmínky mimo provoz. Účelem takového předpřipravení v podmínkách jakoby mimo provoz je simulace vzájemných vztahů jednotlivých způsobů poruch během aktivního používání spolu se způsobem poruch, které vznikají během skladování. Tyto poruchy vysoce ovlivňují způsob poruch během použití. Například koroze sněhového děla vy výrazně mohla ovlivnit následující vliv vibrací na strukturu produktu.

U zkoušek typu C₂ je zhušťování událostí používáno opakovaním jevu, které má (to opakování) podstatně vyšší frekvenci/intenzitu než ty, které jsou používány v běžném užívání produktu. Například, zapínání/vypínání výše uvedeného sněhového děla by mohlo být zhuštěno do období několika hodin při použití cyklu zapnutí/vypnutí nepřetržitě opakovaně. Z toho vyplývá, že například předpokládaná doba 120 zapnutí a vypnutí po předpokládanou dobu 10 let by představovala relativně velmi krátkou zkoušku.

Typy zkoušek C₂ mohou být kombinovány se zkouškami zhušťování času za účelem dalšího zrychlování. To může vést k velmi krátké zkoušce s prokázáním „vysoké bezporuchovosti“, nicméně v tomto případě by platila mnohá opatření/varování/uvědomění při provádění takto zrychlovaných zkoušek kombinovaným zrychlováním. Například rychlé použití opakujících se namáhání může ovlivnit výsledky zkoušek z hlediska kumulativních poškození, aj.

Zkouška zhušťování událostí může být rovněž kombinovaná se zkouškami zrychlování namáhání pro další zkrácení doby zkoušky. Varování a upozornění jsou nutná již v případě přípravy takové zkoušky, protože doba zhušťování může ovlivnit zrychlování namáhání. Například rychlé cyklování zapínání/vypínání UUT může vést k velmi krátkým dobám v podmínkách vypnutí, což například neumožní UUT aby dostatečně a správně vychládlo. To může následně vést k dodatečnému/nechtěnému, tepelnému, zrychlování zkoušky a projevu určitých typů poruch. Rovněž tak, tento typ zrychlování může opomenout typy poruch daných „nepoužíváním“, jako je například opotřebování/zhoršování stavu materiálu.

Výhody zkoušek typu C₂ je to, že v krátké době při zrychlování opakování namáháním může být kumulativní poškození opakováno v rámci mnohem kratšího období než je tomu při běžném používání.

Nevýhodou zkoušek typu C₂ je to, že tento typ zkoušení může produkovat negativní důsledky poruch při používání nepřetržitých namáhání ve způsobu, že vyvolává poruchy, které by se normálně nevyskytly. Například mechanické části, u kterých se projevuje mechanismus opotřebování kde se během provozu vyskytují tření způsobí, že nadměrně a nepřetržitě třením může produkovat nadměrné množství tepla, které dále vyvolává takové poruchy, jež by se jinak buď nevyskytly nebo by byly zpožděny v čase dříve existujících období chlazení. Jiným příkladem mohou být například únavové úzpůsobené opakujícími namáháními, které neumožní odlehčení a uvolnění materiálu.

3.2.3 Mechanismy poruch návrhových zkoušek

V rámci prováděných zrychlených zkoušek je nutné významně zvýšit význam správné a správně provedené analýzy poruch. Pochopení mechanismů poruch je důležité pro návrh provedení zrychleného technického života nebo jiné zkoušky tak, jak je uvedeno v popisu fyzikálního projevu a mechanismu poruchy založeném na návrhu bezporuchové metodologii predikce (tím je poskytnuto to, že předpovědi o poruchách jsou založeny na jejich fyzikálním popisu). K dosažení těchto cílů musí být identifikovány racionální metody, které mají provázat výsledky zrychlených zkoušek kvantitativně ve vztahu k bezporuchovosti nebo intenzitám poruch v podmínkách používání za využití matematických transformací pro faktory zrychlování. Rozsah zrychlování doby během zrychlené zkoušky je musí být samozřejmě stanoven kvantitativně a založený na fyzikálních mechanismech platných způsobů poruch. Zrychlené zkoušky životnosti setožitě snažit redukovat dobu, která je zapotřebí k tomu, aby bylo možné poruchu pozorovat. V některých případech je to prakticky možné bez toho, aniž by se musela měnit rovnice pro okamžitou intenzitu poruchy. Nicméně, pokud ke změně funkce intenzity poruchy dojde, je dále nazývána jako „model proporcionální funkce poruchy“.

Rovnocenně je důležité rozumět provozním namáháním a namáháním plynoucím z prostředí, jež napomáhají vzniku způsobů poruch, které jsou založeny na fyzikálním projevu a procesu poruchy. Toto modelování namáhání slouží jako základní bod pro začátek zrychlování. Jak se touto základní časovou linií zachází je extrémně důležité, když namáhání se budou měnit tak, jak se bude vyvíjet používání produktu.

3.3 Metody postupů řízení zrychlování jednotlivým a vícenásobným namáháním

Dále jsou uvedeny některé jednotlivé a vícenásobné způsoby namáhání UUT během zrychlených zkoušek. U níže uvedených modelů se jedná o tzv. modely namáhání pro zjištění životnosti tak, že úroveň poškození za jednotku času ve zkoušce je patřičně zrychlováno zvyšováním úrovně namáhání.

Nejčastěji využívané vztahy jsou:

- Inverzní mocninový zákon, který se používá ke zrychleným zkouškám tehdy, když je uvažováno jiné namáhání než jenom například pouze konstantní teplota, jako například elektrické, mechanické, chemické atd.
- Arrheniův model intenzity reakce, který se používá pro namáhání konstantními teplotami a je založen například na předpokladu, že absolutní teplota má vliv na rychlost chemických reakcí.
- Eyringův model, který je používán pro případy, kde teplota a vlhkost jsou hlavními úrovněmi namáhání. Tento model je odvozen z kvantové mechaniky.

S uvedenými modely zrychlování je možné získat například analyzovat data ze zkoušek. Modely jsou založeny na stanovení analytických modelek pro stanovení charakteristických parametrů zrychleného technického života. Z využití faktorů zrychlení jsou stanoveny parametry korespondující s použitým prostředím a jsou posléze využity pro projekci bezporuchovosti tak, jak je potřeba. Modely zrychlení mají být pokud možno ověřeny z využití například grafického znázornění zkušebních dat.

3.3.1 Inverzní mocninový model

Tento model je použitelný pro:

- dynamická namáhání jako jsou rázy (typy určitých pulsů) a vibrace (jak sinusoidní tak náhodné);
- klimatická namáhání jako je například teplotní cyklování, teplotní změny (rázové teplotní cyklování), vlhkost, sluneční záření, nebo kterékoliv jiná klimatická namáhání skumulativní schopnost poškození;

Tento model je velmi jednoduchý na pochopení a použití a je velmi jednoduše použitelný pro jakýkoliv typ rozdělení pravděpodobnosti poruchy. Jsou rovněž možná grafická řešení a jednotlivé parametry mohou být rovněž stanoveny za využití metodologie maximální věrohodnosti.

Charakteristiky, které reprezentují bezporuchovost produktů v čase, jako charakteristický život, střední život, střední doba do poruchy, jsou pomocí inverzního mocninného modelu reprezentovány jako:

$$L(S) = C^{-1} \cdot S^{-m}$$

kde S – jenamáhání;

C – je konstanta ($C > 0$) stanovuje se;

m – je parametr, který závisí na chování namáhání, rovněž se stanovuje;

$L(S)$ – technický život, nebo jiná, předem stanovená doba trvání, jako funkce namáhání

Inverzní mocninový zákon je jednoduchý, pokud je zakreslen nebo vyjádřen v logaritmické podobě. Zde se stanoví rovnou linií se sklonem stanoveným hodnotou m , a ochrání číjící funkce bodě – konstantě C :

$$\ln[L(S)] = -m \cdot \ln(S) - \ln(C)$$

Inverzní mocninový model je použitelný pro všechny typy rozdělění pravděpodobnosti obvykle používané v teorii spolehlivosti.

Faktor zrychlení je potom stanoven vztahem:

$$A_{S_IPL} = \frac{L(S_{Use})}{L(S_{Test})} = \frac{C^{-1} \cdot S_{Use}^{-m}}{C^{-1} \cdot S_{Test}^{-m}} = \left(\frac{S_{Test}}{S_{Use}} \right)^m$$

kde:

$L(S_{Use})$ – je technický život jako funkce namáhání ve vlastním použití;

$L(S_{Test})$ – je technický život jako funkce namáhání použité ve zkoušce.

V rovnici výše jsou indexy „Test“ a „Use“ vyjádřením zrychlených podmínek zkoušky a nezrychlených podmínek zkoušky.

Parametr „ C “ se v případě zrychlování zkoušky vykrátí, nicméně ale parametr m je nutné stanovit pro daný objekt a typ namáhání. Pokud tento parametr není okamžitě známý, je možné jej stanovit na základě již uskutečněných zkoušek na stejné komponentě nebo objektu při různých úrovních namáhání až do dosažení poruchy. Data ze zkoušky jsou následně analyzována za účelem stanovení typu rozdělění pravděpodobnosti a jeho parametru. Parametr rozdělění, jež koresponduje s technickým životem je poté zakreslen jako funkce namáhání do grafu s logaritmickými souřadnicemi. Při čemž sklon příčné linie stanovuje hodnotu parametru m zatímco negativní hodnota průsečíku bude hodnotou parametru „ C “. U tohoto procesu, ač na první pohled vypadající velmi jednoduše, se může stát, že bude mít velmi složitý průběh a to především u složitých systémů sestávajících z více než jedné komponenty. To v důsledku může představovat dlouhodobé zkoušení a rozsáhlý počet vzorků v souboru. Nicméně na druhou stranu i použití velmi volně odhadnutých a stanovených parametrů zrychlení může vést k velkým výpočetním nepřesnostem a chybám už při návrhu zrychlené zkoušky. Pokud se zrychluje doba technického života komponenty ve zkoušce pomocí specifického namáhání mají být poruchy dobře pochopeny a seskupovány do skupin podle stejného způsobu poruchy proto, aby zaručily použitá namáhání produkují stejné mechanismy poruchy.

Kromě všech uvedených výhod má tento model i určitá nevýhody. Jednoduchost modelu může vést k chybám při zajištění příslušných parametrů souvisejících s technickým životem různých druhů rozdělění pravděpodobnosti.

Často není možné díky omezením časem a náklady možné stanovit parametry inverzního mocninného modelu, přestože jsou použity běžné průměrné hodnoty, které ale mohou být zavádějící.

Zkoušení a z doporuchy, které je statisticky obtížné vyžaduje velký počet vzorků, které mají být zkoušeny a z doporuchy na všech úrovních zvolených namáhání. Komponenty nižších úrovních namáhání mohou vyžadovat dlouhou dobu zkoušení a je stříže mají zároveň vysokou úroveň bezporuchovosti, potom se jeví, že velikost souboru musí být velmi velká, a doba zkoušky bude skutečně hodně dlouhá.

Speciální pozornost a výstraha je na místě v případě, kdy se používá předpokládaná hodnota parametru m_p řevzatá z jiného, zdánlivě podobného, produktu.

3.3.2 Arrheniův model

Arrheniův model je založen na vyjádření intenzity reakce jako funkce typu komponenty a absolutní teploty T . Tento model předpokládá, že reakce UUT je proporcionálně vztažená k teplotě. Uvedená reakce je vyjádřena následovně:

$$R(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T}}$$

kde:

A – je konstanta (ne funkce teploty);

E_a – aktivní energie (eV)

k_B – Boltzmannova konstanta = $8,617385 \cdot 10^{-5}$ eV/K

T – absolutní teplota (K)

Funkce, která potom reprezentuje bezporuchový život je potom vyjádřena jako funkce teploty:

$$L(T) = C \cdot e^{\frac{D}{T}}$$

K tomu, abychom mohli vyjádřit výše uvedenou rovnici jako přímku, je použita následující logaritmická podoba:

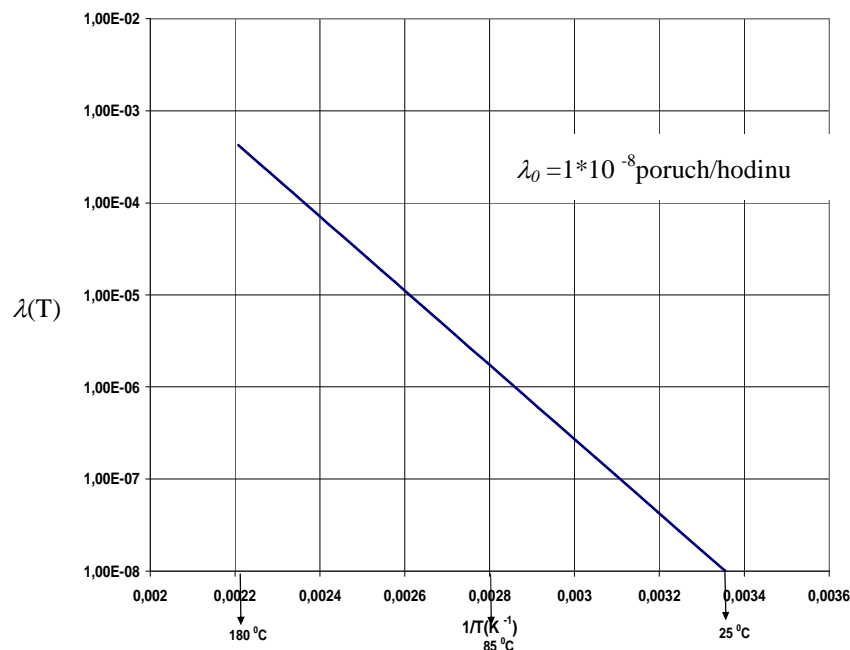
$$\ln[L(T)] = \frac{D}{T} + \ln(C)$$

kde:

T – je proměnná teploty

$\ln(C)$ – je průsečík přímky

Příklad je uvedený na obrázku 4.



Obr. 4 Příklad průběhu pro Arrheniův reakční model

Faktor zrychlení je potom nalezen jako prostý řádí použití, tak prostý řádí zkoušky jako poměr dvou intenzit reakcí a jejich vztahem:

$$A_{S_Arrh} = \frac{L(T_{Use})}{L(T_{Test})} = \frac{C \cdot e^{\frac{E_a}{k_B \cdot T_{Use}}}}{C \cdot e^{\frac{E_a}{k_B \cdot T_{Test}}}} = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{Use}} - \frac{1}{T_{Test}} \right)}$$

kde:

T_{Use} a T_{Test} jsou teploty při použití a provozu vstupních Kelvina;

k_B je Boltzmannova konstanta = $8,62 \cdot 10^{-5}$;

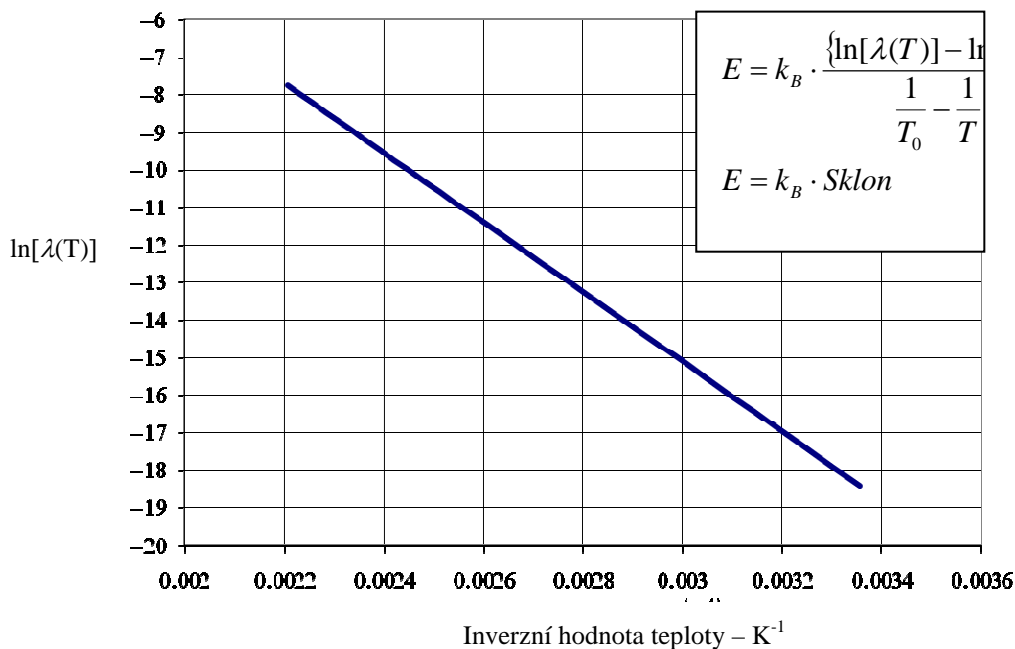
E_a je aktivní energie (eV)

Parametr E (aktivní energie) musí být pro Arrheniův model známý. Aktivní energií lze odhadnout podle známých vztahů (někdy je to velmi náročné na čas). Výrobci komponent stanovují aktivní energii pro platné případy poruch pokaždé, když posuzují novou technologii při výrobě komponenty. Odhad bývá zpravidla prováděn na zkušebních strukturách, nikoliv na fungujících komponentách. Odhadovaná aktivní energie je poté použita u všech komponent využívajících technologii posuzování. Poté bude dodávatel komponenty schopen stanovit aktivní energii pro předvídané případy poruch dané jednotlivé komponenty.

Aktivní energií lze být stanoveny znázorněny v obrázku 4 a vyřešením rovnice použité pro vyjádření intenzity poruchy

$$E = k_B \cdot \frac{\{\ln[\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)\}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}}$$

$$E = k_B \cdot \text{Sklon}$$



Obr.5 Průběh stanovení aktivní energie

kde:

$\lambda_0 = 1 \cdot 10^{-8}$ poruch/hodinu

$\ln(\lambda_0) = -18,421$

$T_0 = 25^\circ C$

$\ln(\lambda_f) = -7,7645$

$T_f = 180^\circ C$

$E_a = 0,8 eV$

Arrheniův model je použitelný na množství statistických rozdělení používaných v analýzách bezporuchovosti. Při čemž jeho použitelnost je dána podmínkami, kde se očekává vystavení tepelnému namáhání konstantní teplotou. Očekává se, že tento vliv expozice potom má potenciál způsobit kumulativní poškození materiálu, tedy změnu jeho fyzikálních a elektrických vlastností.

Model není použitelný pro poškození způsobené nízkou teplotou. Pro takové typy poškození se doporučuje, aby byla provedena zkouška dle poruchy ke stanovení specifického modelu.

Výhodou tohoto modelu je jednoduchost jeho použití a pokud je daný způsob poruchy čistě závislý na absolutní teplotě, je schopný generovat realistické zrychlení zkoušky.

Nevýhodou modelu je jeho jednoduchá použitelnost pro jednotlivé komponenty, jejichž intenzity poruch jsou vskutku závislé a aktivované teplotou. Pro sestavy sestávající z různých elektronických a mechanických částí je někdy obtížné tento model použít, protože komponenty budou mít často různou aktivaci energie.

3.3.3 Eyringův model

Obdobně jako Arrheniův model je i Eyringův model primárně využitelný pro zkoušky tepelným namáháním, kde teplota je hlavním zrychlujícím faktorem procesu. Na rozdíl od Arrheniova modelu je Eyringův model využitelný ale i pro jiné typy namáhání, jež jenom teplota, jedná se například o vlhkost a některé chemické reakce.

Funkce vztahující očekávanému technickému životu je dána následujícím vztahem:

$$L(S_E) = \frac{1}{S_E} \cdot e^{-\left(A - \frac{B}{S_E}\right)}$$

kde:

A a B jsou parametry funkce, jež má být stanovena zkouškou nebo aproximována hodnotami z literatury;

S_E – je namáhání použité v tomto modelu (obvykle absolutní teplota v stupních Kelvina);

$L(S_E)$ – je ukazatel technického života jako například MTTF, charakteristický život, polovina charakteristického života, apod.

Faktor zrychlení pro tento model je dán vztahem:

$$A_{S-E} = \frac{L(L_{Use})}{L(L_{Test})} = \frac{\frac{1}{S_{E_Use}} \cdot e^{-\left(A - \frac{B}{S_{E_Use}}\right)}}{\frac{1}{S_{E_Test}} \cdot e^{-\left(A - \frac{B}{S_{E_Test}}\right)}} = \frac{S_{E_Test}}{S_{E_Use}} \cdot e^{B \left(\frac{1}{S_{E_Use}} - \frac{1}{S_{E_Test}} \right)}$$

kde:

S_{E_Use} a S_{E_Test} – jsou namáhání použité v zkoušce.

B – je konstanta, kterou je nutné stanovit pomocí jiných zkoušek nebo přibližně na základě doporučení literatury

Eyringův model může být použit pro všechny typy matematických rozdělení hustoty pravděpodobnosti, které jsou v analýzách bezporuchovosti standardně používány. Matematické hladiny spolehlivosti mohou být stanoveny pro jednotlivé parametry nebo funkce na základě provedení vhodné statistiky.

Výhody modelu:

Model je relativně jednoduchý a nyní je použitelný i pro jiná namáhání, než jsou tepelná. Pokud je parametr B známý, je pomocí tohoto modelu možné realizovat skutečně přesnou zrychlenou zkoušku.

Nevýhody modelu:

Podobně jako u Arrheniova modelu je znalost parametru B kritickou informací pro korektní zrychlení zkoušky. Už pro produkty se střední složitostí se přesnost zrychlení zkoušky může stát spornou prorozdílné komponenty materiálu, které mají rozdílnou hodnotu parametrů konstanty B .

Kromě těchto typů základních modelů zrychlených zkoušek existují ještě některé další. Pro omezení prostoru a času však uvádíme jenom jejich stručný pohled. Rovněž tak jejich použití je specifické ve vztahu ke UUT a podmínkám zkoušení. Někdy méně pro kompletní doplnění informace je jejich vyjádření asi vhodné. Jedná se o:

- Modely zrychlování, které se mění s časem – například model namáhání pokročilých.
- Modely namáhání, které závisí na opakování použitých úroveň namáhání – například únavové modely.
- Jiné modely zrychlování založené na zrychlování doby provádění údržby.
- Zkoušky životnosti

4. Závěr

Uvedený materiál prezentuje stručný pohled zrychlených zkoušek bez poruchovosti technických objektů – hardwaru. Jedná se jako základní klasifikaci, tak uvezení některých klíčových modelů pro přípravu a stanovení formátu zkoušky. Poměrně důležitou oblastí, která zde nebyla diskutována je sběr dat ze zkoušky a jejich statistické zpracování. Samotný sběr dat je klíčovou podmínkou úspěšného vyhodnocení zkoušky. Celý matematický aparát pro analýzu a testování statistických dat představuje samostatnou oblast matematiky, které zde nebyla věnována pozornost. Kromě zrychlených zkoušek hardwaru existují rovněž zrychlené zkoušky softwaru. Těm ale nebyla zde věnována pozornost.

5. Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován v rámci výzkumného záměru Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany Brno č. VZ0FVT0000401 s podporou Ministerstva obrany České republiky.

Použitá literatura:

- [1] Hobbs, G.K. *Accelerated Reliability Engineering HALT and HASS*. New York: John Wiley and Sons, 2000.
- [2] Chan, A.H., Englert, P.J. *Accelerated stress testing handbook*. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [3] Kececioglu, D. *Reliability Engineering Handbook – Volume I a II*. New York: Prentice Hall, 1991.
- [4] Nelson, W. *Accelerated testing: Statistical methods for reliability data*. New York: John Wiley and Sons, 2004.
- [5] Nelson, W. *Applied Life Data Analysis*. New York: John Wiley and Sons, 1982.
- [6] ČSN IEC 61649 *Testy dobré shody, konfidenční intervaly a dolní konfidenční meze pro data s Weibullovým rozdělením*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [7] IEC 61123 Ed. 1.0 *Reliability testing - Compliance test plans for success ratio*. Geneva: IEC, 1991.
- [8] ČSN EN 61124 *Zkoušení bezporuchovosti - Ověřovací zkoušky pro konstantní intenzitu porucha konstantní parametr proud poruch*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [9] ČSN EN 60300-3-5 *Management spolehlivosti - Část 3-5: Návod k použití - Podmínky při zkouškách bezporuchovosti a principy statistických testů*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [10] IEC 60605-2 Ed. 1.0 *Equipment reliability testing - Part 2: Design of test cycles*. Geneva: IEC, 1994.
- [11] ČSN EN 60721 (všechny části) *Klasifikace podmínek prostředí*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

ZRYCHLENÁ ZKOUŠKA BEZPORUCHOVOSTI U ELEKTRONICKÉHO SYSTÉMU AUTOMOBILU

prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc.

Univerzita obrany, Kounicova 65, 662 10 Brno, zdenek.vintr@unob.cz

1. Úvod

Elektronický modul vyráběný pro použití u osobních automobilů obsahuje procesor s programovatelnou pamětí typu „flash“ (dále jen paměť). Do této paměti je při výrobě modulu uložen program pro řízení modulu. U částí vyrobených modulů nebylo při programování paměti dodrženo předepsané technologické postupy, což může zvýšit pravděpodobnost samovolné změny uložených instrukcí a chybou činnosti modulu. Tato skutečnost byla zjištěna až poté, co relativně velké množství „chybně“ naprogramovaných modulů bylo nainstalováno do vozidel, která byla dodána konečným zákazníkům. Při případné samovolné změně vloženého programu při provozu může dojít k poruchám s vážnými důsledky.

K ověření možnosti vlivu nedodržení výrobního postupu na pravděpodobnost vzniku samovolné změny programu bylo rozhodnuto využít zrychlené zkoušky bezporuchovosti modulu. Podstata zkoušky spočívala v tom, že za stejných podmínek byla souběžně zkoušena sada „správně“ naprogramovaných modulů a sada „chybně“ naprogramovaných modulů a porovnávala se ve zkoušce prokázána úroveň bezporuchovosti obou sad modulů.

Příspěvek prezentuje přípravu, provedení a vyhodnocení zrychlené zkoušky bezporuchovosti modulu.

2. Základní parametry zkoušky

Vzhledem k tomu, že zkoumaný elektronický modul je výrobkem určeným pro použití u osobních automobilech, byly všechny nezbytné parametry pro realizaci zrychlené zkoušky stanoveny s využitím příslušných norem charakterizujících životní cyklus automobilu a podmínky zkoušek jeho komponent. V popisovaném případě byly využity podnikové standardy automobilky BMW.

2.1 Profil životního cyklu.

Příslušná norma [1] uvádí, že střední technický život elektrických a elektrických komponent vozidlových systémů je 17 let. Tento údaj dle normy vychází z následujících předpokladů:

- elektrické a elektronické systémy na vozidle patří k těm, u nichž se nepředpokládá, že jsou v provozu vystaveny degradaci činnosti opotřebování a dále se předpokládá, že mohou být během provozu vozidla při vzniku poruchy jednou nebo i vícekrát nahrazeny srovnatelnými (totožnými) systémy;
- jestliže je střední technický život systémů 17 let znamená to, že po uplynutí této doby se může porušit v průměru 63,7% všech těchto prvků.

Zvýše uvedeného je zřejmé, že norma implicitně u elektrických a elektrických komponent vozidlových systémů předpokládá exponenciální rozdělení dob mezi poruchami.

Norma [2] dále doporučuje u vozidel se středním technickým životem 17 let uvažovat následující časovou strukturu složek doby provozu:

ujetá vzdálenost:	300000 km,
doba aktivního provozu (operating time):	$t_B = 6000$ hodin,
nevyužitá doba (dormant time)	$t_S = 143016$ hodin.

Zuvedených údajů lze snadno zjistit, že se u osobních automobilů průměrně předpokládá jen necelá hodina provozu denně. Jakkoli tento údaj může být přehrávaný, je třeba ho brát jako údaj vysoce věrohodný, protože tento údaj byl poskytnut příslušným producentem určeným pro využití v podrobných informacích provozu mnoha set tisíc vozidel během záruční doby.

2.2 Simulace životního cyklu

Při realizaci každé zrychlené zkoušky je zásadním problémem výběr vhodného modelu pro určení podmínek zkoušky a stanovení příslušného faktoru zrychlení. V případě zkoušeného modulu byla zkouška realizována plně v souladu s doporučeními příslušných podnikových norem. [1] a [2].

Tyto normy se ředepisují u elektrických a elektronických komponent vozidel pomocí Arrheniova modelu, kdy zrychlení zkoušky dochází zvyšováním teploty, při které je výrobek zkoušen. Obecně lze faktor zrychlení zkoušky vyjádřit následujícím podílem:

$$F = \frac{L_{Use}}{L_{Test}} \quad (1)$$

kde: L_{Use} - technický život komponenty za teploty běžného použití,
 L_{Test} - technický život komponenty při zkušební teplotě.

Norma [1] uvádí, že pro elektrické a elektronické komponenty vozidel lze faktor zrychlení vyjádřit následujícím vztahem:

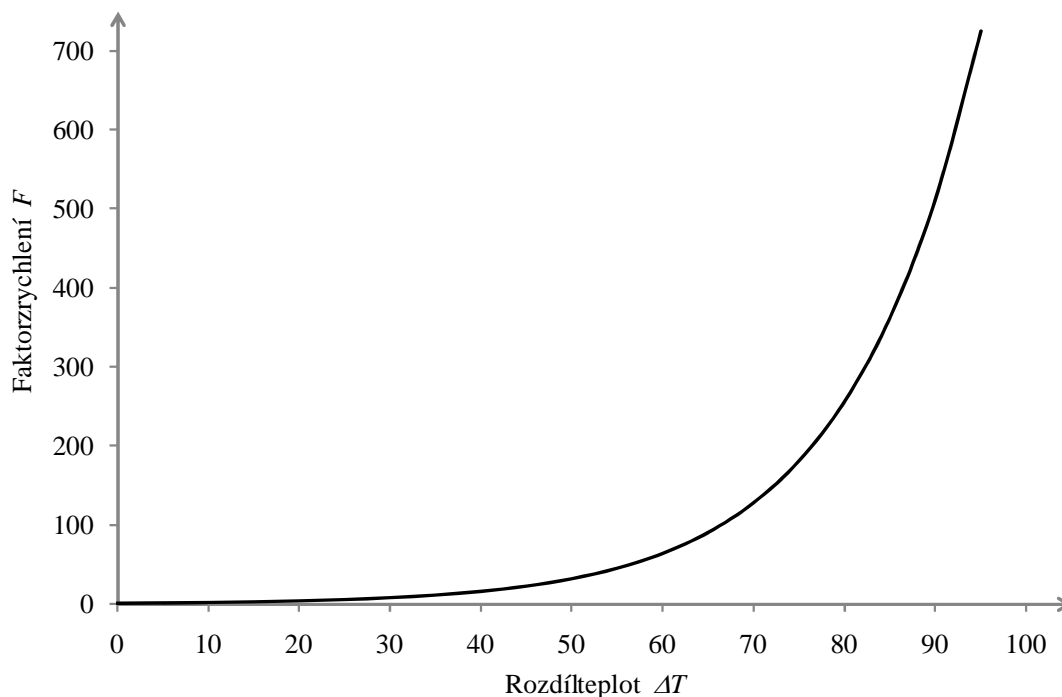
$$F = 2^{\Delta T / 10^{\circ}C}, \quad (2)$$

kde ΔT je rozdíl mezi zkušební teplotou a teplotou, ve které se zkoušená komponenta nachází při běžném použití:

$$\Delta T = T_{Test} - T_{Use}, \quad (3)$$

kde: T_{Test} - zkušební teplota,
 T_{Use} - teplota při běžném použití.

Zuvedené vyplývá, že každým zvýšením zkušební teploty o $10^{\circ}C$ se čas zdvojnásobí intenzita poruch zkoušené komponenty. Pro nejvyšší zrychlení zkoušky je tedy třeba dosáhnout nejvyššího rozdílu mezi provozní a zkušební teplotou (viz Obr. 1).



Obr. 1 Závislost faktorů zrychlení na rozdíl teplot ΔT

Zkušební teploty však není možné zvyšovat neomezeně, protože při překročení určitých teplot se změní charakter vznikajících poruch a výsledky zkoušky potom nelze transformovat na podmínky normálního provozu.

Velmi důležité je také správné určení teploty při běžném použití, která reprezentuje průměrnou teplotu, ve které se komponenta nachází při běžném použití. Zde je třeba rozlišovat teplotu při aktivním provozu a teplotu v době kdy vozidlo není využito.

Provozní teplota závisí především na dvou parametrech, na umístění komponenty ve vozidle a na klimatickém pásmu, ve kterém je vozidlo provozováno. Odpovídající teplotu lze určit svyžitím příslušné normy [2]. Při uvažovaném umístění modulu ve vozidle (motorový prostor) a daném klimatickém pásmu normou doporučuje uvažovat teplotu:

$$T_{Use}(operating\ time) = 60^{\circ}\text{C}$$

V době kdy vozidlo není v provozu je teplota použití rovná průměrné teplotě v daném klimatickém pásmu. Předpokládá se totiž, že vozidlo parkuje venku (mimo temperované prostory). V našem případě normou doporučuje užití teploty:

$$T_{Use}(dormant\ time) = 25^{\circ}\text{C}$$

Zkušební teploty byly stanoveny také svyžitím doporučení příslušné podnikové normy [1], přičemž pro zkušební teplotu pro simulaci nevyužití doby byla zvolena vyšší než pro simulaci aktivní doby provozu:

$$T_{Test}(operating\ time) = 80^{\circ}\text{C},$$

$$T_{Test}(dormant\ time) = 95^{\circ}\text{C}.$$

Svyžitím uvedených teplot pomůžeme stanovit odpovídající faktory zrychlení. Pro simulaci doby aktivního provozu platí:

$$F(operating\ time) = 2^{\Delta T / 10^{\circ}\text{C}} = 2^{(80-60)/10} = 4$$

pro simulaci nevyužití doby platí:

$$F(Dormant\ Time) = 2^{\Delta T / 10^{\circ}\text{C}} = 2^{(95-25)/10} = 128.$$

S využitím těchto údajů potom lze určit dobu, po kterou musí probíhat zkouška, aby byl simulován celý technický život komponenty. Vhodnou úpravou rovnice (1) obdržíme vztah pro dobu simulace:

$$t_{Simul} = \frac{t}{F}, \quad (4)$$

kde: t_{Simul} - doba simulace v rámci zrychlené zkoušky,

t - doba za podmínek běžného použití.

Pokud do rovnice dosadíme údaje z životního profilu (viz kap. 2.1) a příslušné faktory zrychlení, obdržíme pro dobu simulace aktivní doby provozu:

$$t_{O\ Simul} = \frac{t_B}{F} = \frac{6\ 000\ \text{hours}}{4} = 1\ 500\ \text{hodin}$$

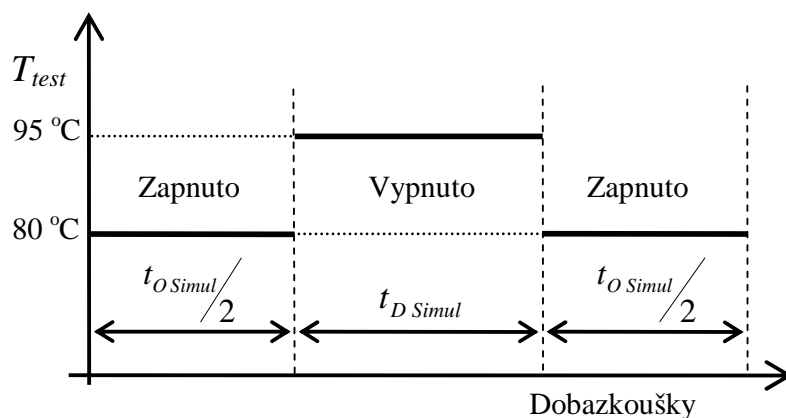
pro dobu simulace nevyužití doby:

$$t_{D\ Simul} = \frac{t_S}{F} = \frac{143\ 016\ \text{hours}}{128} = 1\ 117\ \text{hodin}.$$

3. Realizace zkoušky

3.1 Podmínky zkoušky

V souladu s doporučením podnikové normy [1] byla doba simulace doby aktivního provozu rozdělena do dvou částí tak, že první polovina byla realizována na počátku zkoušky a druhá závěrem. Mezi těmito dvěma úseky byla provedena simulace nevyužitých dob (viz Obr.2).



Obr.2 Časové schéma zkoušky

Během simulace byl průběžně kontrolována správná činnost modulu a to tak, že byl pravidelně spouštěn autotest modulu a kontrolovány jeho výsledky. Během simulace aktivní doby provozu byla kontrola prováděna každou hodinu a během simulace nevyužitých dob provozu 6x denně (viz Tab.1).

Tab.1 Podmínky zkoušky

Část zkoušky	Stav modulu	Doba simulace [hodin]	Teplota v zkušební komoře [°C]	Časový interval mezi kontrolami funkčnosti [hodin]
1.	zapnut	750	80	4
2.	vypnut	1117	95	24
3.	zapnut	750	80	4

Z údajů uvedených v tabulce je možné určit celkovou dobu nutnou k realizaci zkoušky:

$$t_{Simul} = t_{D\ Simul} + t_{O\ Simul} = 2\ 617\ \text{hodin} = 109\ \text{dnů}.$$

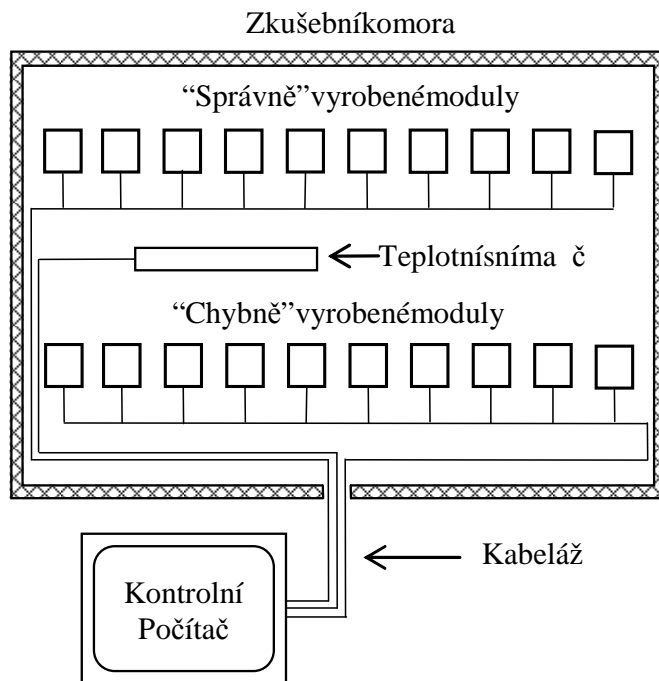
3.2 Průběh zkoušky

Vlastní zkouška byla provedena tak, že do tepelné komory bylo současně vloženo 10 modulů „správně“ naprogramovaných a 10 modulů „chybně“ naprogramovaných. Všechny moduly byly napojeny na kontrolní počítač, který udržoval teplotu na stanovené úrovni a s stanovenou frekvencí prováděl kontrolu funkčnosti modulů a zaznamenával výsledky provedených kontrol (viz Obr.3)

V případě poruchy byl porouchaný modul vyměněn z modulu novým, že ve zkoušce bylo stále 10 + 10 modulů. Kumulovanou dobu, která byla v rámci zkoušky simulována tak lze pro každou skupinu modulů určit vzhledem k následujícímu vztahu:

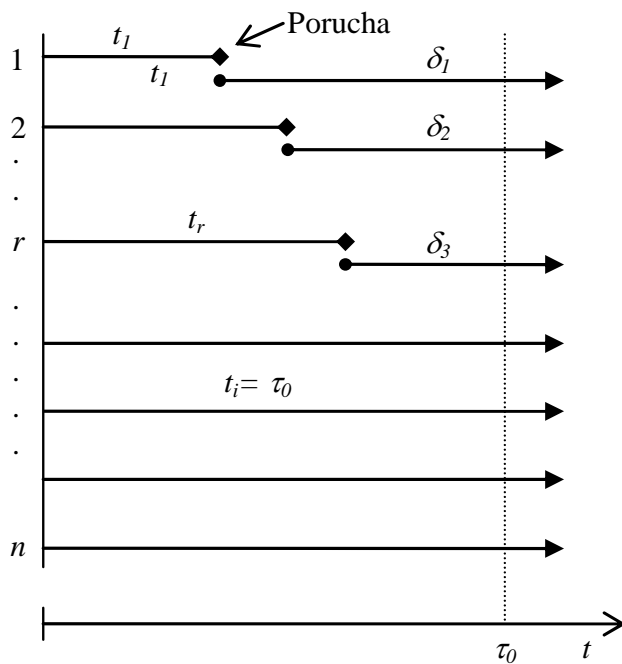
$$t_C = n \cdot t_B, \quad (5)$$

kde: n -počet modulů v skupině,
 t_B -dobaaktivního provozu během životního cyklu modulu.



Obr. 3 Úspora řádání zkoušky

Možný průběh zkoušky takto organizované zkoušky je schematicky zaznamenána Obr. 4, kde τ_0 vyjadřuje celkový čas simulace aktivní doby provozu.



Obr. 4 Zkušební plán

4. Vyhodnocení výsledků zkoušky

Popisovaná zkouška byla vyhodnocena jednorázově po jejím ukončení a to tak, že byla vypočtena střední doba provozu do poruchy pro obě skupiny zkoušených modulů a výsledky byly vzájemně porovnány k posouzení toho, zda chyba programování modulu má vliv na bezporuchovost přístroje.

K vyhodnocení souboru informací ze zkoušky byl použit výpočet dolní meze jednostranného konfidenčního intervalu střední doby do poruchy dle normy [3]. Protože se jednalo o zkoušku ukončenou časem, realizovanou snahou o dosažení cíle, byl výpočet proveden využitím následujícího vztahu:

$$MTTF_L = \frac{2t_c}{\chi^2_\alpha(\nu)}, \quad (6)$$

kde: $\chi^2_\alpha(\nu)$ - kvantil rozdělení chí-kvadrát pro ν stupňů volnosti a konfidenční úroveň α .

Počet stupňů volnosti ν se pro každý jednotlivý případ vyhodnocení stanoví dle následujícího vztahu [3]:

$$\nu = 2r + 2 \quad (7)$$

kde r je počet zaznamenaných poruch v příslušném vzorku

Hodnoty kvantilu rozdělení χ^2 se jsou tabelizovány a pro potřeby vyhodnocení výsledků zkoušky byly uřčeny s ohledem na dohodnutou konfidenční úroveň $\alpha=95\%$.

Kumulovaná doba zkoušky byla uřčena využitím vztahu (5) pro předpokládané doby provozu modulu (viz kap. 2.1) $t_B=6000$ hodin a počet zkoušených výrobků u každém vzorku $n=10$:

$$t_c = n \cdot t_B = 10 \cdot 6000 = 60000 \text{ hodin}.$$

Konkrétní výsledky provedené zkoušky zde nelze prezentovat, protože vzhledem k jejich charakteru jsou ze strany výrobce modulu považovány za důvěrné. Možné výsledky vyhodnocení zkoušky pro různé počty zaznamenaných poruch jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2 Vyhodnocení výsledků zkoušky

Počet zaznamenaných poruch r	0	1	2	3	4	5
Počet stupňů volnosti ν	2	4	6	8	10	12
$\chi^2_{0,95}(\nu)$	6,0	9,5	12,6	15,5	18,3	21,0
$MTTF_L$ [hodin]	20000	12631	9523	7741	6557	5714

5. Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován v rámci výzkumného záměru Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany Brno č. VZ0FVT0000401 s podporou Ministerstva obrany České republiky.

6. Použitá literatura:

- [1] GS 95003-1 Electrical/Electronic Assemblies in Motor Vehicles. General Information (BMW Group Standard). München: BMWAG, 2001.
- [2] GS 95003-4 Electrical/Electronic Assemblies in Motor Vehicles. Climatic Requirements (BMW Group Standard). München: BMWAG, 2003.
- [3] ČSN IEC 60605-4 Zkoušení bezporuchovosti zařízení – Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení – Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní interval a toleranční interval.

APLIKACE ZRYCHLENÉ ZKOUŠKY BEZPORUCHOVOSTI MECHANICKÝCH PRVKŮ

Prof. Ing. Jiří Stodola, DrSc.

Univerzita obrany, Kounicova 65, 662 10 Brno, jiri.stodola@unob.cz

Abstrakt

Příspěvek pojednává o problematice zkoušek bezporuchovosti mechanických prvků u jednorázového použití, konkrétně u valivých ložisek. Zkoušky jsou chápány jako základní experimentální prostředek k určení nebo ověření úrovně bezporuchovosti, jejich důležitých ukazatelů. Příspěvek je zaměřen na metodiku zrychlených, resp. zprůběžných zkoušek valivých ložisek automobilů.

1. Úvod

Cílem zkoušek spolehlivosti je obvykle nalezení kvantitativních měřic (číselných, funkčních, aj.), ukazatelů a charakteristik spolehlivosti. Znalost těchto hodnot umožňuje řešit relativně široký okruh problémů, např.:

- nalézt kritické prvky a soustav výrobu a také možnost nastavení výroby,
- ověřit předikované, popř. vypočtené hodnoty v etapě projektu, návrhu, konstrukce,
- prokázat požadované ukazatele spolehlivosti v etapě projektu, návrhu, konstrukce, vývoje výroby, popř. provozu,
- ověřit jakost technologického procesu výroby, účinnost údržbového systému, vliv provozních podmínek, zatížení, atd.,
- získat podklady k hodnocení výroby a jejího řízení.

Při zkouškách spolehlivosti se provádějí vybrané parametry, které definují technický stav objektu, tj. určují kritérium poruchy (mezního stavu). Zkoušky spolehlivosti je nutno realizovat v režimech a podmínkách stanovených technickou dokumentací, včetně technické obsluhy (údržby, oprav). Při zkouškách vybereme určitý reprezentativní vzorek, jehož velikost stanovíme buď na základě znalosti zákona rozdělení, tj. parametrickou metodou nebo, není-li zákon rozdělení znám, neparametrickou metodou s využitím variačního koeficientu, Gama funkce, aj., resp. stanovené (požadované) pravděpodobnosti bezporuchového provozu a tabulek, udávajících minimální počet členů výběru.

Předmětem zkoušek mohou obecně být:

- vzorky materiálů (zkoušky odolnosti proti potřežení, pevnost, korozivzdornost aj.),
- konstrukční detaily, spoje a kinematické dvojice (zkoušky ložisek, ozubení aj.),
- skupiny (zkoušky převodovek, motorů, řídicích a ovládacích systémů aj.),
- výrobky jako celek (automobily aj.).

Jako výsledek (skutečně naměřený nebo vypočtený) při zkouškách spolehlivosti získáme dvě skupiny charakteristik:

1. Charakteristiky procesu stárnutí a rozrušování, kterým odpovídá jistý stupeň poškození výrobku (mechanismus procesu úpotřežení, koroze, únavy, lomů atd.).
2. Charakteristiky změny velikosti vstupních parametrů výrobku (pevnost, účinnost, nosnost, výkon, trvanlivost aj.), u nichž překročení přípustné hranice tolerance vede ke ztrátě provozuschopnosti (poruše).

Předmět, způsob a základní cíle zkoušky spolehlivosti jsou stanoveny v plánu a metodice zkoušek. Z nich vyplývají principy, pravidla, přesný rozvrh zkoušek a kritéria pro jejich ukončení a vyhodnocení.

1. Druhy metodik zkoušek

Podle různých kritérií můžeme rozdělit zkoušky spolehlivosti například na zkoušky:

a) podle časového hlediska:

- dlouhodobé,
- zrychlené.

b) podle spolehlivostních ukazatelů a charakteristik, kterých chceme získat na:

- zkoušky bez poruchovosti,
- zkoušky udržovatelnosti, aj.

c) podle způsobu provádění zkoušek:

- laboratorní v předepsaných podmínkách,
- zkoušky na zkušební (zkušební stolici, stavu),
- zkoušky na polygonu (typické provozidlo),
- provozní zkoušky aj.

d) podle účelu:

- určující cílem určité známé hodnoty ukazatelů (bodových nebo intervalových),
- ověřovací cílem ověřit dosažené číselné ukazatele,
- vývojové cílem například ověřit změny důležitých spolehlivostních vlastností aj.

e) podle způsobu ukončení:

- zkoušky ukončené až po poruše všech n objektů výběrového souboru (dlouhodobé zkoušky), v případě, že zkouška je ukončena dříve než dojde k poruše všech zkoušených objektů, jedná se o zkoušku zkrácenou,
- zkoušky ukončené po uplynutí předem stanovené doby t ,
- zkoušky ukončené po výskytu předem stanoveného počtu poruch r ,
- zkoušky ukončené dosažením předem stanovených podmínek přijetí nebo zamítnutí aj.

Před zkouškou se připravuje plán zkoušky, závislosti na charakteru výrobku, na účelu zkoušky, ovlivňujících ukazatelích, podmínkách zkoušky, předpokládaném zákonu rozdělení náhodné veličiny, ekonomice aj. Výchozím podkladem je zkušební plán, který je metodikou pro realizaci konkrétní zkoušky. Zkušební plán se označuje kombinací písmen v hranatých závorkách:

[...]

První písmeno (n) označuje rozsah výběru (počet zkoušených výrobků). Druhé písmeno (U , R nebo M) označuje činnost po vzniku poruchy, kdy U značí, že neobnovované výrobky nejsou porušeny nahrazovány. R značí, že neobnovované výrobky jsou ihned po poruše nahrazovány dobrými. M značí, že výrobky se po poruše obnovují (opravují, vyměňují za dobré aj.). Třetí písmeno označuje zakončení zkoušky, kde t znamená, že zkouška je ukončena po uplynutí předem určené doby, r znamená, že zkouška je ukončena po výskytu stanoveného počtu poruch s , že zkouška je ukončena podle pravidel tzv. postupné metody zkoušky. Například (n, U, r) označuje zkušební plán, založený na pozorováních n neopravovaných výrobků a zkouška je ukončena po poruše r -tého výrobku při tom platí, že $r < n$. Při zkouškách spolehlivosti se řetavají dvě protichůdné tendence:

1. Přání získat co nejúplnější charakteristiky spolehlivosti;
2. Snaha o krátkost a nízké náklady zkoušek

Faktor času je zpravidla základním kritériem při výběru metody a dalších parametrů zkoušek spolehlivosti. V těchto případech využíváme s výhodou zrychlených zkoušek spolehlivosti. U zrychlených zkoušek rozlišujeme:

- **zkrácené zkoušky**, kdy využíváme metodu zhuštění časového průběhu zkoušek (odstranění prostojů, nepřetržitá pracovní doba aj.) nebo/a zvýšení přesnosti měření výstupních parametrů (moderními měřicími metody, extrapolace, statistické zpracování aj.);
- **zpřísněné zkoušky**, které jsou založeny na intenzifikaci probíhajícího procesu, vyvolávajících náhlé či degradační procesy (zostření režimu zkoušek tj. vyšší zatížení, rychlost, teploty, nasycení prostředím vhodným abrazivem, vibrace, zostření vlivu faktorů okolního prostředí aj.).

Zkoušky spolehlivosti ve reálném provozním režimu pro účely, například v oblasti vozidel, jsou obvykle velmi dlouhá a tato získání informací je často zbytečně nákladné a zpožděné, které masivně snižuje jejich vypovídací hodnotu a praktickou použitelnost. Zkrácení času a tím i nákladů při získání nezbytných informací o spolehlivosti je možno realizovat cestou zrychlených zkoušek. Při tomto zrychlenou zkouškou nazýváme takovou zkoušku, která umožní odhadnout potřebné základní ukazatele spolehlivosti v době kratší, než je doba skutečného provozu stroje, resp. jeho části tj. zkouška, kdy během doby zkoušení t_z získáme odhady ukazatelů spolehlivosti platné pro celou dobu provozu t , přičemž platí relace $t_z < t$. Následující postup zrychlené zkoušky má obecnou použitelnost. Při tomto se zabýváme takovou zrychlenou zkouškou, kdy při příslušném mechanismu poruch, který vede ke zkrácení technického života vozidla, zvýšenému výskytu poruch aj., odpovídá model umožňující přepočítat získané výsledky na normální provozní podmínky. Tento druh zrychlené zkoušky nazýváme zpřísněnou (zostřenou) zkouškou.

Obecně pro exaktní formulaci zrychlené zkoušky nejprve definujeme zkušební režim (zatížení), míru technického života a funkci zrychlení zkoušky spolehlivosti. Režimem nazveme vektor $X = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ charakterizovaný množinou složek, které představují soubor hodnot působících faktorů, například teplot, tlaků, zatížení, vibrací, vlhkosti, prašnosti, koroze, namáhání aj. Složky $x_i(t), i = 1, 2, \dots, n$, jsou obvykle funkcí času a podle jejich druhu může být režim X náhodný nebo deterministický.

Mají-li dva režimy $X = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ a $Y = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$ stejný počet složek, resp. liší-li se pouze v jedné z nich při rovnosti ostatních, tj. platí-li $x_i(t) = y_i(t), i \neq k, x_k(t) \neq y_k(t)$, pak takové režimy lze charakterizovat jejich odlišnými složkami $X = x_k(t), Y = y_k(t)$. Tento případ je jednodušší a v technické praxi jevíce rozšířený.

Provozním režimem X_p nazveme takový režim, v němž žádná složka nepřekročí hranice hodnot, které jsou stanoveny technickými podmínkami. Kodha vlivu provozního režimu na procesy porušování výrobku musí být zavedena odpovídající míra, například míra technického života. Nechť

$$\omega = F_x(t), \quad (1)$$

je pravděpodobnost poruchy, případně míra proměnlivosti některého parametru, resp. pracovní charakteristika sledovaného objektu v režimu X aj. Argumentem funkce $F_x(t)$ může být libovolná funkce času, například počet pracovních cyklů. Napodobu zamíru technického života, odpovídající úroveňni budeme považovat čas

$$T_x^{(\omega)} = F_x^{-1}(\omega), \quad (2)$$

kde $F_x^{-1}(\omega)$ je funkce inverzní k funkci $\omega = F_x(t)$. Jestliže úroveň ω je definovaná jako pravděpodobnost poruchy p , tj. $\omega = p$, pak $T_x^{(p)}$ je zřejmě 100% kvantil rozdělení $F_x(t)$ doby života objektu. Zavedený pojem míry technického života umožňuje formulovat definici zpřísněného režimu Z . Režim Z se nazývá zpřísněným vzhledem k režimu X (symbolicky píšeme $Z > X$), jestliže pro libovolnou úroveň ω platí nerovnost

$$T_z^{(\omega)} < T_x^{(\omega)}, \quad (3)$$

tím je definován tzv. princip zpřísnění. Z uvedeného vyplývá, že možnost zpřísněných zkoušek spolehlivosti závisí na existenci funkčního vztahu, který váže míry technického života a režimy provozu strojního výrobku. Podle (2) lze obecně uvažovat funkční vztah

$$T_x^{(\omega)} = \varphi(X, \omega), \quad (4)$$

jenž nám umožní formulovat další definici. Funkci zrychlení zkoušky spolehlivosti nazveme funkcí

$$g(X, Z, \omega) = \frac{T_x^{(\omega)}}{T_z^{(\omega)}} \quad (5)$$

jestliže taková funkce existuje v oblasti režimů E a vektory $X, Z \in E$. Funkce (5) je dána poměrem měr technického života režimů X a Z pro danou úroveň ω . Její existence je postačující

podmínkou pro řešení úlohy zpřesněné zkoušky spolehlivosti. Funkce zrychlení má pak následující vlastnosti:

$g(X, Z, \omega)$ je kladná funkce, klesající podle X a rostoucí podle Z .

Pro velkou třídu strojních výrobků, například vozidel a jejich částí, funkce zrychlení zkoušky nezávisí na oblastech režimů E a úrovní ω , tj.

$$g(X, Z, \omega) = g(X, Z) = c, \quad (6)$$

kde c je konstanta, která je pouze funkcí režimů X a Z . Tento případ se nazývá lineární, nebo t závislost $T_X^{(\omega)}$ na $T_Z^{(\omega)}$ lze podle (5) napsat ve tvaru

$$T_x^{(\omega)} = c \cdot T_z^{(\omega)} \quad (7)$$

a představuje přímku procházející počátkem se směrnicí c . Konstanta c se nazývá koeficientem zrychlení.

Metodika zrychlených zkoušek je založena na znalosti zákonitostí spojených s provozem výrobku v různých režimech. Odhad spolehlivosti například vozidla nebo jeho části v příslušném režimu lze získat pomocí transformací výše uvedených vztahů a pojmů, při přechodu z jednoho režimu na druhý pomocí matematického modelu, který popisuje chování objektu z hlediska technického života v oblasti daných režimů, a který v sobě zahrnuje režimy zkoušek. Takový model můžeme zavést na základě principu, který spočívá v tom, že v oblasti režimů E závisí spolehlivost vozidla na velikosti vyčerpání technického života, ale zároveň nezávisí na tom, jak k tomu došlo. Tento princip se nazývá fyzikální princip spolehlivosti a můžeme jej vyjádřit rovnicí

$$F_x(t_x) = F_z(t_z). \quad (8)$$

Pracuje-li výrobek (součást) v postupně souběžných režimech silového (momentového) nebo rychlostního zatížení

$$X = \begin{cases} x_1, & \text{pro } 0 \leq t < t_1 \\ x_2, & \text{pro } t_1 \leq t < t_1 + t_2 \\ \vdots \\ x_v, & \text{pro } \sum_{i=1}^{v-1} t_i \leq t < \sum_{i=1}^v t_i \end{cases}$$

ve kterých na každém stupni bylo dosaženo úrovně $i = 1, 2, \dots, v$, lze fyzikální princip spolehlivosti kvantitativně vyjádřit vztahem

$$T_z^{(\omega_k)} = t_1 g(Z, X_1, \omega_1) + \sum_{i=2}^k \{T_x^{(\omega_i)} g(Z, X_i, \omega_i) - T_x^{(\omega_{i-1})} g(Z, X_i, \omega_{i-1})\} \quad (9)$$

Vztah (9) se získá z podmínky rovnosti úrovní ω při přechodu ze stupně na stupeň n tj.

$$\omega_i(T_{xi}) = \omega_j(T_{xj}), \quad (10)$$

což je modifikované vyjádření vztahu (8) a pro lineární případ se vztah (9) zjednoduší na tvar

$$T_z^{(\omega_k)} = \sum_{i=1}^k t_i g(Z, X_i), \quad (11)$$

kde t_i je doba zkoušení v režimu X_i a

$$\sum_{i=1}^k \frac{t_i}{T_{xi}^{(\omega_k)}} = 1. \quad (12)$$

Z praxe je známo, že pro velkou třídu výrobků, například pro ložiska, spalovací motory, vozidla, atd., platí při provádění zrychlených zkoušek lineární vztahy. Platí-li v oblasti E lineární vztahy, pak

vždy jeden soubor výrobků se zkouší ve zpřísněném režimu $Z \in E$. Současně se zkouší druhý soubor analogických výrobků jednou z následujících metod (obecně lze pro lineární případ formulovat šest metod).

2. Vybrané metody zkoušek

2.1 Metoda 1

Do dosažení úrovně ω_1 v režimu $X \in E$, jenž odpovídá provozním podmínkám, odhadneme koeficient zrychlení z vztahu (7) pro úroveň ω_1 , resp. ω_i .

Metodu lze zpřesnit tak, že realizujeme zkoušku v režimu X do úrovní $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$, pro $k < n$ a vypočítáme průměrný koeficient zrychlení

$$\bar{c} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k c_j, \quad (13)$$

kde pro výpočet c_j použijeme rovnici (7).

2.2 Metoda 2

Předpokládáme, že rozdělení doby poruchy $F(t)$ je v obou případech režimů $X, Z \in E$ dáno dvouparametrickým Weibullovým rozdělením, jehož distribuční funkce budeme uvažovat ve tvaru

$$F_x(t_x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t_x}{d_x}\right)^{b_x}\right), \quad (14)$$

jde-li o provozní režim X , resp.

$$F_z(t_z) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t_z}{d_z}\right)^{b_z}\right), \quad (15)$$

jde-li o zpřísněný režim.

Z platnosti fyzikálního principu spolehlivosti (8) s uvažovanými vztahy (14) a (15), dostaneme

$$\left(\frac{t_x}{d_x}\right)^{b_x} = \left(\frac{t_z}{d_z}\right)^{b_z}, \quad (16)$$

Aby platil předpoklad linearity, musí se parametry tvaru rozdělení rovnat, tj. $b_x = b_z$, takže

$$\frac{t_x}{d_x} = \frac{t_z}{d_z}. \quad (17)$$

2.2.1 Podle definice funkce zrychlení zkoušky pro lineární případ (5) a (6) je proto

$$c = \frac{t_x}{t_z} = \frac{d_x}{d_z}, \quad (18)$$

neboli koeficient zrychlení c lze odhadnout pomocí parametrů měřítka obou rozdělení v šem za předpokladu, že hodnoty argumentů obou souborů nejsou transformovány.

Poznámka:

Jako praktický aplikační příklad byla zvolena zrychlená zkouška bezporuchovosti i valivých ložisek, které jsou velmi exponovanými prvky strojů. Konkrétně se jedná o ložisko ZKL6006VKHB (ČSN ISI 281), používané ve skupinách automobilů. Technický život a mezní stav bývá u ložisek

vyjádřen celkovým počtem otáček, který ložiska dosáhnou, nebo častěji celkovou dobou provozu v hodinách. Pro ložiska je navíc definován pojem trvanlivost, který se vztahuje na únavové poškození kontaktních ploch. Z praxe je známo, že skutečnou trvanlivost ložiska je mimořádně obtížné predikovat, projevuje se zde výrazné stochastické chování, které vyžaduje statistický přístup při výpočtu využitím experimentálně stanovených parametrů. Proto se zavádí trvanlivost výpočetní, která se stanovuje statisticky ze skutečných trvanlivostí zkoušených ložisek. Ke zkoušení se používá náhodně vybraný soubor obvykle 20 ložisek. Z dlouhodobých experimentů bylo zjištěno, že trvanlivost valivých ložisek L_N , vyjádřená počtem otáček je přibližně nepřímo úměrná třetí mocnině zatížení ložiska F^3 . Potom součin $F^3 \cdot L_N$ je konstantní pro určitý typ ložiska. Tato konstanta C se nazývá základní dynamická únosnost a je definována jako takové zatížení ložiska v N, při kterém ložisko dosáhne 10^6 otáček do vzniku pitting. Obecně pro různé typy valivých ložisek platí

$$L_N = \left(\frac{C}{F}\right)^3 \cdot 10^6 \text{ v počtech otáček, resp. } L_h = \left(\frac{C}{F}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \text{ v provozních hodinách (n je počet otáček ložiska za minutu).}$$

3. Závěr

Popsaná metodika zrychlených, resp. zpřísněných zkoušek může být teoretickým základem, umožňujícím praktický postup při zkouškách různých výrobků. V příspěvku je stručně uvedena metodika zpřísněných zkoušek, vyžadující přepočet (pomocí koeficientu zrychlení) na podmínky běžného provozu. Zkoušky se zrychleným časovým průběhem pak nevyžadují přepočty na normální provoz. Jedná-li se o zkoušky, které využívají zrychleného modelu celého provozního nasazení, pak pravděpodobně nelze najít univerzální metodiku, ale každý případ je nutno řešit individuálně, podle režimu provozu, povahy vlastností zkoušeného stroje jsou částí

4. Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován v rámci výzkumného záměru Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany Brno č. VZ0FVT0000401 s podporou Ministerstva obrany České republiky.

Literatura:

- [1] BUCKLEY, H. D. Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication, Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [2] ČASNÝ, O.-STODOLA, J.: Zrychlené zkoušky spolehlivosti strojních výrobků. Sborník VA Brno řady B (technická) Č.3, Brno, 1988 (str.37–45)
- [3] DANĚK, A.-ŠIROKÝ, J.-FAMFULÍK, J.: Výpočetní metody obnovy dopravních prostředků. Institut dopravy FSV ŠB–TU Ostrava, 1999, ISBN 80-7086-122-41-7
- [4] HOLUB, R.: Zkoušky spolehlivosti. (Stochastické metody) Skripta VAS-1590, Brno 1992
- [5] HOLUB, R.: Zkoušky spolehlivosti. (Metodika) Skriptum VAS-618, Brno 1994
- [6] HOLUB, R.-VINTR. Z.: Základy spolehlivosti. Skripta VAS-2257, Brno 2002
- [7] CHALLEN, M.J., MCLEAN, L.J. and OXLEY, L.B.P.: Plastic Deformation of a Metal Surface in Sliding Contact with a Hard Wedge: Its Relation to Friction and Wear, Proc. Roy. Soc., London, Series A, Vol.394, 1984, pp.161-181
- [8] JAROŠ, F.: Metodika zrychlených zkoušek spolehlivosti při zpřísněných režimech. Praha, SVÚS, 1974
- [9] KOŽÍŠEK, J.: Management jakosti. ČVUT Praha. 1999 ISBN 80-01-01930-6
- [10] LIPTÁK, P., STODOLA, J.: Spolehlivost strojů a zařízení určených pro speciální techniku. Monografie. Trenčínská univerzita A. Dubčeka. Trenčín 2009. ISBN 978-80-8075-418-1
- [11] MIKISKA, A.: Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. Vydavatelství ČVUT Praha,

2004ISBN80-01-02868-2

- [12] PÍŠTĚK, V. - NOVOTNÝ, P. - STODOLA, J. - KAPLAN, Z. - RAMÍK, P.: Virtual Engine – a Tool for Military Truck Reliability Increase. AVTR TONATO podporovaný projekt CZ001. VUT Brno, Univerzita obrany Brno, Otto-von-Guricke University Magdeburg. Publikováno ve elektronické podobě AVTPBW. Paříž 2004
- [13] SODA, N. KIMURA, Y and TANAKA, A.: Wear of Some F.C.C. Metals during Unlubricated Sliding Part I: Effects of Load, Velocity and Atmospheric Pressure, Wear, Vol. 33, 1975, pp. 1-16.
- [14] STACHOWIAK, W.G. and BATCHELOR, W.A.: Engineering Tribology. 3rd edition. Elsevier Inc. ISBN 0-7506-7836-4 (str. 553-574).
- [15] STODOLA, J.: Provozní spolehlivost a diagnostika. Vysokoškolská učebnice U-1183. Brno, 2002 ISBN 80-85960-43-5
- [16] STODOLA, J.: Provozní spolehlivost automobilů. Skripta VA, Brno, 1984, S-373/IaII
- [17] STODOLA, J.: Zpřísněné zkoušky spolehlivosti strojních součástí. 6. mezinárodní vědecká konference TRANSFER 2004. Trenčín 2004 ISBN 80-8075-030-0, EAN 978808750305 (str. 448-453)
- [18] STODOLA, J.: Metodika zrychlených zkoušek spolehlivosti strojních výrobků. TD2004-DIAGON 2004. Zlín 2004 ISBN 80-7318-195-9 (str. 47-54)
- [19] STODOLA, J. – STODOLA, P. (2009). Operation Reliability and Diagnostics of Mechanical Systems. Transactions of FAMENA. Volume 33, No. 1. Zagreb 2009. ISSN 1333-1124 (pp 47-56)
- [20] VORLÍČEK, Z.: Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů. Skripta FS ČVUT, Praha, 1991 ISBN 80-01-00510-0

PŘÍKLAD ZRYCHLENÍ ZKOUŠKY BEZPORUCHOVOSTI INTENZIFIKACÍ PROVOZNÍHO REŽIMU

Ing. Michal VINTR, Ph.D.

Vysoké učení technické, Brno, mvintr@seznam.cz

1. Úvod

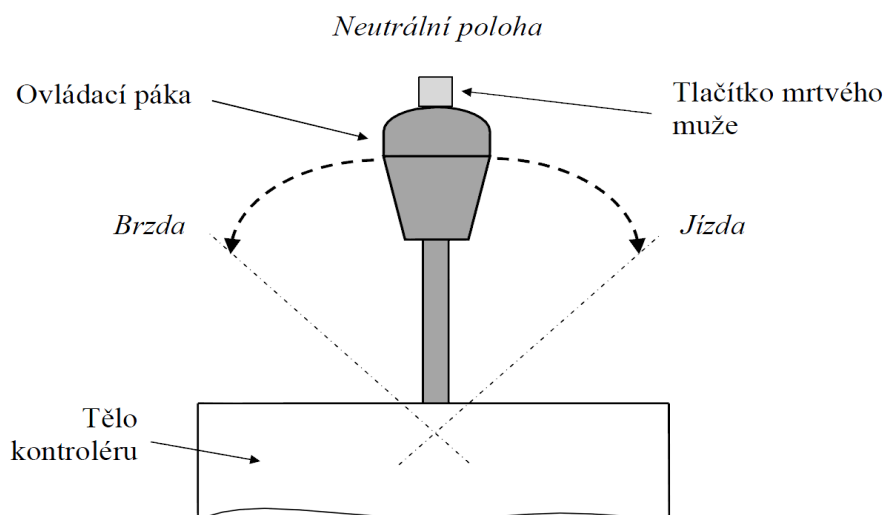
Cílem tohoto příspěvku je prezentovat reálný příklad zkoušky bezporuchovosti a životnosti zařízení, při níž byla využita intenzifikace provozního režimu zařízení. V první části příspěvku je stručně charakterizována výchozí situace, v druhé části je popsán navržený způsob realizace zkoušky a jsou nastíněny možné scénáře průběhu zkoušky a v poslední části je provedeno vyhodnocení realizované zkoušky bezporuchovosti a životnosti.

U zařízení, která například nepracují v nepřetržitém režimu nebo mají mezi jednotlivými pracovními cykly prodlevy, je možno popotřebu zkoušek intenzifikovat jejich provozní režim. To lze dosáhnout například nepřetržitým zkoušením, zkrácením nebo úplným zrušením prodlev mezi pracovními cykly. Uvedeným přístupem lze mnohdy i několikrát násobně zkrátit čas nezbytný pro realizaci doby provozu potřebné pro provedení zkoušky.

2. Výchozí situace

Autor článku dlouhodobě spolupracuje s předním českým výrobcem elektromechanických komponent kolejových vozidel při řešení problémů v oblasti spolehlivosti a bezpečnosti. V rámci spolupráce se autor mimo jiné spolupodílel na návrhu a vyhodnocení zkoušky bezporuchovosti a životnosti produktu vyvinutého a vyrobeného u daným výrobcem.

Produktem byl řídicí kontrolér, který byl určen pro zabudování do ovládacího panelu strojvedoucího elektrické lokomotivy. Kontrolér byl určen pro ovládání jízdy a brzdění lokomotivy. Kontrolér měl jednu ovládací páku, kterou byl pohybem vpravo ovládána jízda a pohybem vlevo brzda. Kontrolér byl také vybaven tzv. „tlačítkem mrtvého muže“ (dead man's switch). Schematické znázornění kontroléru je uvedeno na Obr. 1.



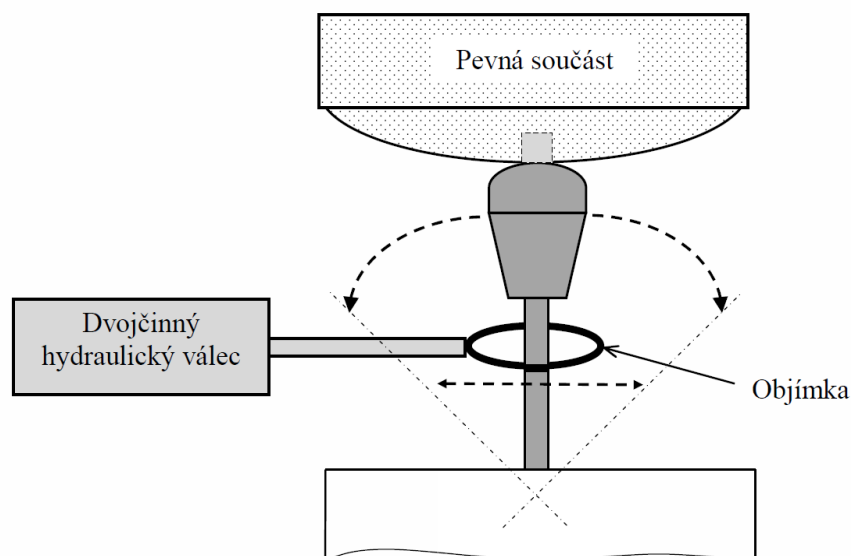
Obr. 1 – Schematické znázornění řídicího kontroléru.

Kontrolér byl určen pro zabudování do elektrické lokomotivy, jejíž životní cyklus byl charakterizován následovně:

- roční kilometrový проб ěh: 200000 km;
 - počet hodin pod nap ětím: 4380 h;
 - prům ěrný denní po čet hodin pod nap ětím: 12 h;
 - prům ěrná rychlost pohybu: 80 km/h;
 - roční po čet hodin v pohybu: 2500 h (= 200000 km / 80 km/h)
- U řídícího kontrol ěru bylo p ředpokládáno následující pracovní vyt ížení:
- prům ěrný po čet vykonaných cykl ů za jeden den provozu: 137;
 - prům ěrný po čet vykonaných cykl ů za hodinu provozu: 11,42 (= 137 cykl ů / 12 h).
- V rámcí jednoho cyklu se p ředpokládalo:
- jedno p řesunutí ovládací páky kontrol ěru z polohy neutrální do krajní polohy jízda a zp ět;
 - jedno p řesunutí ovládací páky kontrol ěru z polohy neutrální do krajní polohy brzda a zp ět;
 - dvojitá stisknutí tlačítka mrtvého muže.
- Konečným zákazníkem (výrobce lokomotivy) bylo v rámcí p řejímky požadováno provedení zkoušky bezporuchovosti a zkoušky životnosti řídícího kontrol ěru. Konkrétn ě bylo zákazníkem požadováno 90% konfidencí prokázat, že řídící kontrol ěr spl ňuje následující požadavky:
- užitečný život (životnost): $t = 30$ rok ů
 - střední doba provozu mezi poruchami: $MTBF = 30000$ h

3. Návrh zkoušky

Pro pot řebu provedení zkoušky muselo být první řad ě navrženo a sestaveno zkušební za řízení, které by simulovalo reálný provoz řídícího kontrol ěru. Schéma navrženého zkušebního za řízení je uvedeno na Obr. 2. Řídící kontrol ěr byl upevn ěn do zkušebního za řízení. Pohyb páky řídícího kontrol ěru byl realizován prost řednictvím dvoj činného hydraulického válece opat řeného objímkou. Stisk tlačítka mrtvého muže byl realizován p ři každém p řechodu páky p řes neutrální polohu prost řednictvím tvarované pevné sou části. V každé krajní poloze páka setrvala po dobu 0,5 až 1 sekundy. Celková doba cyklu (pohyb: neutrální – jízda – neutrální – brzda – neutrální) byla 3 až 5 sekund.



Obr. 2 – Schematické znázorn ění zkušebního za řízení.

Na takto navrženém zkušebním za řízení bylo možno následně provést požadovanou zkoušku bezporuchovosti a životnosti. K dispozici pro provedení zkoušky byl jeden prototyp řídícího

kontroléru. Aby bylo prokázáno splnění požadavku na životnost ($t=30$ roků) bylo potřeba zkoušet prototyp pojistnou „ekvivalentní“ dobu (T_1). Během této doby nesmělo dojít k poruše žádných hlavních komponent řídicího kontroléru. Doba, po kterou bylo potřeba provádět zkoušku byla stanovena využitím následujícího vztahu [5],[7]:

$$t \geq \frac{2 \cdot T_1}{\chi_c^2(2 \cdot r + 2)}$$

kde: t =užitečný život (životnost); T_1 =ekvivalentní doba zkoušky; $\chi_c^2(2r+2)$ =hodnota chí-kvadrát rozdělení pro $(2r+2)$ stupňů volnosti na úrovni konfidence C ; C =požadovaná konfidence úroveň; r =počet započítatelných poruch vzniklých během zkoušky.

Hodnota požadovaného užitečného života $t = 30$ roků a hodnota konfidence $C = 0,9$ byly známy. Během zkoušky životnosti nesmělo dojít k poruše, proto bylo uvažováno $r=0$. Ekvivalentní doba zkoušky (která je při jednom prototypu rovna době, po kterou bylo nezbytné je zkoušet) byla vypočítána následovně:

$$T_1 \geq \frac{t \cdot \chi_c^2(2 \cdot r + 2)}{2} \Rightarrow \frac{30 \cdot 4,6}{2} \Rightarrow 69 \text{ roků}$$

K prokázání požadované životnosti $t=30$ roků bylo nezbytné zrealizovat provoz odpovídající minimálně 69 roků bez dosažení mezního stavu. Provoz 69 roků odpovídal následujícímu počtu cyklů řídicího kontroléru:

$$69 \text{ roků} \times 2500 \text{ h} \times 11,42 \text{ cyklu} = 1969950 \text{ cyklů}$$

Vzhledem ke skutečnosti, že zkušební zařízení bylo schopno vykonat jeden cyklus za 3 až 5 sekund, bylo u zkoušky možno provoz řídicího kontroléru simulovat několikrát násobně rychleji, než probíhá ve skutečnosti. Z předpokladu nepřetržité činnosti zkušebního zařízení bylo možno provoz 69 roků teoreticky realizovat (zkoušku provést) za:

$$(3 \text{ až } 5 \text{ sekund} \times 1969950 \text{ cyklů}) / (24 \text{ h} \times 3600 \text{ sekund}) = 69 \text{ až } 114 \text{ dnů}$$

Při členění doby potřebné k provedení zkoušky bylo třeba počítat také s časem nezbytným na provádění preventivní a nápravné údržby jak zkoušeného řídicího kontroléru, tak zkušebního zařízení. Bylo také třeba počítat s časem nezbytným pro pravidelnou kontrolu správné funkce zkoušeného řídicího kontroléru.

4. Scénář zkoušky

Před provedením samotné zkoušky byly analyzovány možné scénáře (příběhy) zkoušky z hlediska splnění požadavku na bezporuchovost. Při analýze bylo uvažováno, že je k dispozici jeden prototyp a že během zkoušky provede právě 1969950 cyklů, které odpovídají 69 roků provozu. Bylo také předpokládáno, že vznik poruch kontroléru se řídí exponenciálním rozdělením.

Při dalších výpočtech byl pro určení dolní konfidenční meze hledaného ukazatele ($MTBF$) použit následující vztah [5],[7]:

$$MTBF \geq \frac{2 \cdot T}{\chi_c^2(2 \cdot r + 2)}$$

kde: $MTBF$ =střední doba provozu mezi poruchami; T =ekvivalentní doba zkoušky; $\chi_c^2(2r+2)$ =hodnota chí-kvadrát rozdělení pro $(2r+2)$ stupňů volnosti na úrovni konfidence C ; C =požadovaná konfidence úroveň; r =počet započítatelných poruch vzniklých během zkoušky.

Započítatelné poruchy jsou takové poruchy, které jsou brány při vyhodnocení zkoušky v úvahu. Mezi započítatelné poruchy byly zahrnuty zejména poruchy vzniklé v důsledku vad konstrukce a výrobních vad. Mezi nezapočítatelné poruchy byly řazeny zejména poruchy vzniklé v důsledku nesprávné funkce zkušebního zařízení.

Při hodnocení možných scénářů zkoušky byla předpokládána hodnota ekvivalentní doby zkoušky $T=1969950$ cyklů a hodnota konfidence $C=0,9$. Scénáře, podle kterých mohla zkouška proběhnout, jsou uvedeny v Tab.1.

Scénář číslo	Počet započ. poruch	Hodnotachí-kvadrát rozdělení	Prokázána střední doba provozu mezi poruchami		Splnění požadavku na bezporuchovost
			MTBF[cykly]	MTBF[h]	
-	r	$\chi_c^2(2 \cdot r + 2)$	MTBF[cykly]	MTBF[h]	-
1	0	4,6	856500	75000	Ano
2	1	7,8	505115	44231	Ano
3	2	10,6	371689	32547	Ano
4	3	13,4	294022	25746	Ne

Tab.1–Možné scénáře zkoušky.

Z uvedených možných scénářů zkoušky je zřejmé, že splnění požadavku na bezporuchovost $MTBF = 30000$ h bude prokázáno v případě, že v průběhu zkoušky vzniknou nejvýše dvě započitatelné poruchy. V případě, že vzniknou tři nebo více započitatelných poruch, splnění požadavku nebude prokázáno.

5. Vyhodnocení provedené zkoušky

Na navrženém a sestaveném zkušebním zařízení byla provedena zkouška bezporuchovosti a životnosti jednoho prototypu řídicího kontroléru. Zkouška probíhala dle zkušebního plánu [$n=1$; M ; $\tau_0=1969950$ cyklů].

V rámci zkoušky bylo bez dosažení mezního stavu (tzn. bez poruchy hlavních komponent) realizováno 1975000 cyklů zkoušky trval celkem 108 dní. Během zkoušky byly zaznamenány dvě započitatelné poruchy.

Na základě výsledků zkoušky byla s konfidencí $C=0,9$ prokázána následující hodnota střední doby provozu mezi poruchami:

$$MTBF \geq \frac{2 \cdot 1975000}{\chi_{0,9}^2(2 \cdot 2 + 2)} \Rightarrow \frac{3950000}{10,6} \Rightarrow 372641 \text{ cyklů} \Rightarrow 32630 \text{ h}$$

Počet realizovaných cyklů během zkoušky lze přepočítat následovně:

$$1975000 \text{ cyklů} / (2500 \text{ h} \times 11,42 \text{ cyklu}) = 69,17 \text{ roku}$$

Provedenou zkouškou bylo prokázáno, že řídicí kontrolér splňuje požadavky na bezporuchovost ($MTBF=30000$ hodin) a životnost ($t=30$ let).

6. Závěr

Prezentovaný praktický příklad ukázal, že u některých typů zařízení je možno značným způsobem intenzifikovat jejich provozní režim a toho využít pro potřeby provádění zkoušek bezporuchovosti a životnosti. Bylo mimo jiné ukázáno, že intenzifikací provozního režimu lze provoz odpovídající 72 roků realizovat za necelý rok. Příkladem také nastínil jakým způsobem provést intenzifikaci provozního zatížení u zařízení, jehož dobu provozu lze vyjádřit v počtu realizovaných pracovních cyklů.

7. Použitá literatura:

- [4] HOLUB, R.: *Zkoušky spolehlivosti*. Brno: Vojenská akademie v Brně, 1992.
- [5] HOLUB, R. – VINTR, Z. *Spolehlivost letadlové techniky (elektronická učebnice)*. Brno: VUT FSI, 2001.
- [6] ČSN IEC 60300-3-5 *Management spolehlivosti – Část 3-5: Návod k použití – Podmínky pro řízení zkouškách bezporuchovosti a principy statistických testů*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [7] ČSN IEC 60605-4 *Zkoušení bezporuchovosti za řízení – Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení – Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [8] MIL-HDBK-781A. *Handbook for Reliability Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production*. Washington: Department of Defense, 1996.

Název: Zrychlené zkoušky bezporuchovosti a možnost jejich praktické aplikace

Kolektiv autorů

Počet stran: 39

Tisk: 1. vydání 2010, Brožovaná vazba

Vydala: Česká společnost pro jakost, Novotného lávka 5, 11668 Praha 1, www.csq.cz

ISBN 978-80-02-02062-2