

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Návrh zkoušek spolehlivosti formule SAE
Testing Proposal Reliability of Formula SAE

Student :

Bc. Jan Šťáva

Vedoucí diplomové práce :

doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Štáva**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 20 Silniční doprava
Téma: **Návrh zkoušek spolehlivosti formule SAE**
Testing Proposal Reliability of Formula SAE

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Analýza pravidel formule FSAE z hlediska spolehlivosti
3. Stanovení vhodných typů a postupů zkoušek spolehlivosti
4. Návrh zkoušek spolehlivosti pro vybrané systémy formule
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Pravidla formule FSAE 2013
[2] Virtuální vzdělávání v dopravě. Dostupné na:
http://issuu.com/michdor/docs/m11_text?e=7481937/2859112
[3] Life Data Analysis Reference [online]. Tucson: ReliaSoft Corporation, 2007. Dostupné z
<<http://www.weibull.com/>>
[4] Accelerated Life Testing Analysis [online]. [cit. 2009-11-16]. Dostupné z WWW:
<<http://www.weibull.com/acceltestwebcontents.htm>>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

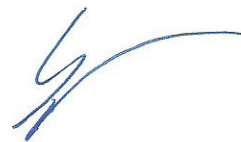
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě1.10.2014.....

.....*Y. Káňa*.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....1.10.2014.....

.....*Jan Štáva*.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jan Štáva

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Antonína Slavíčka 3, Prostějov, 79604

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Famfulíkovi, Ph.D za cenné rady a pomoc při vypracování diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠTÁVA, J. *Návrh zkoušek spolehlivosti formule SAE: diplomová práce*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2014, 71 s. Vedoucí práce: Famfulík, J.

Diplomová práce se zabývá návrhem spolehlivostních zkoušek na studentskou formuli SAE. V úvodní části jsou analyzována pravidla formule z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti. V další části jsou popsány vhodné typy a postupy zkoušek spolehlivosti. Následuje přehled zkušebních plánů a vyhodnocování spolehlivostních zkoušek. V poslední části jsou na základě analýzy stromu poruchových stavů pro vybraný systém formule, kterým byla zvolena brzdová soustava, provedeny návrhy zkoušek spolehlivosti.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŠTÁVA, J. *Testing Proposal Reliability of Formula SAE: Master Thesis*, Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2014, 71 p. Thesis head: Famfulík, J.

The master thesis deals with testing proposal reliability of student Formula SAE. In opening part the formula rules are analyzed in terms of safety and reliability. The next section describes the appropriate types of reliability tests and procedures, followed by a list of test plans and evaluation of reliability tests. In the last section are made suggestions of reliability tests based on the fault tree analysis of the selected formula system, which was brake system.

Obsah

Seznam zkratk a termínů	8
1. Úvod.....	9
2. Soutěž Formule SAE	10
3. Analýza pravidel z hlediska bezpečnosti	12
3.1 Požadavky na konstrukci rámu	12
3.2 Požadavky na kokpit	15
3.3 Požadavky na brzdový systém	17
3.4 Další bezpečnostní prvky	18
3.4.1 Deformační člen.....	18
3.4.2 Bezpečnostní pásy.....	21
3.4.3 Výbava pilota.....	23
4. Stanovení vhodných metod a postupů zkoušek spolehlivosti.....	24
4.1 Základní pojmy	25
4.2 Rozdělení zkoušek spolehlivosti	26
4.3 Vybrané typy rozdělení náhodných veličin.....	27
4.4 Zkušební plány	30
4.4.1 Rozdělení zkušebních plánů	30
4.4.2 Extrémní případy zkušebních plánů	33
4.5 Analýza stromu poruchových stavů	34
5. Brzdová soustava	38
5.1 Brzdová soustava formule Student.....	39
5.2 Analýza stromu poruchových stavů	41
6. Návrh zkoušek spolehlivosti	47
7. Závěr	66
8. Použitá literatura	68

Seznam zkratek a termínů

C	konfidenční úroveň
FTA	Fault tree analysis
$f(t)$	hustota pravděpodobnosti
$F(t)$	distribuční funkce popisující p-st poruchy
$R(t)$	bezporuchovost
T_{AKU}	akumulovaný pracovní čas
r	počet poruch během zkoušky
\hat{T}_{SD}	dolní odhad střední hodnoty
\hat{T}_{SH}	horní odhad střední hodnoty
t_0	doba trvání zkoušky
α	hladina významnosti
λ	intenzita poruch
μ	střední hodnota
ν	stupeň volnosti
σ	směrodatná odchylka
τ [h]	doba trvání zkoušky v hodinách
$\chi^2_{2\nu, 1-\alpha}$	hodnota statistiky chí-kvadrát

1. Úvod

Spolehlivost může být chápána jako určitá vlastnost zkoumaných objektů (výrobků, systémů), která je objektem našeho zájmu a kterou se snažíme ovlivňovat s využitím různých analýz, výpočtů nebo zkoušek. Spolehlivost je tedy velmi důležitá vlastnost. Jedná se o schopnost systému nebo daného výrobku plnit požadovanou funkci. Důležitá je jak pro technické systémy, tak i pro výrobky nebo procesy v různých oblastech techniky. Nejdříve byla spolehlivost definována jako pravděpodobnost, se kterou bude zkoumaný objekt schopný plnit svou funkci po stanovenou dobu v daných provozních podmínkách. V současnosti je spolehlivost spíše definována jako obecná schopnost určitého výrobku plnit požadovanou funkci stanovenou dobu a v daných podmínkách [2]. Spolehlivost se popisuje pomocí spolehlivostních parametrů. To jsou veličiny, jejichž hodnoty můžeme analyticky, numericky nebo empiricky určit. Pomocí těchto veličin je následně vyjádřena míra spolehlivosti systému.

Diplomová práce se zabývá návrhem zkoušek spolehlivosti na studentskou formuli SAE. Spolehlivost a bezpečnost studentské formule nebo i jiných závodních vozidel představuje vlastně klíčovou roli. Ochrana posádky vozidla nebo pilota v případě formule SAE je nesmírně důležitým kritériem při návrhu nových modelů těchto vozidel. V automobilovém sportu jsou tak na spolehlivost kladeny vysoké nároky. Požaduje se vysoká bezporuchovost jednotlivých částí. Poruchu lze definovat jako částečnou případně úplnou ztrátu schopnosti provozu nějakého prvku. Na bezpečnost pilota má přitom největší vliv celková konstrukce vozidla.

V diplomové práci jsou navrženy zkoušky spolehlivosti pro vybranou část formule, kterou byla zvolena brzdová soustava. Ta představuje velmi důležitou část vozidla týkající se aktivní bezpečnosti. Na základě analýzy stromu poruchových stavů, která se zabývá identifikací a zkoumáním podmínek či faktorů, které mohou způsobit nebo přispět k výskytu vrcholové události, jsou navrženy právě doby spolehlivostních zkoušek.

Z důvodu absence dat o bezporuchovosti jsme nuceni provést návrh některých zkoumaných jevů na základě odhadu. Po jízdách zkouškách a sběru potřebných dat a informací bude možné jednotlivé parametry upřesnit a upravit dle potřeby.

2. Soutěž Formule SAE

Formula SAE je konstrukční soutěž pro studenty vysokých škol s technickým zaměřením. Vznikla v USA v roce 1981. Od roku 1998 také existuje evropská část soutěže, Formula Student. Obě tyto soutěže mají stejný cíl a téměř stejná pravidla. Každý rok se v rámci Formula Student/SAE pořádají soutěže po celém světě. V současné době se seriálu Formula Student/SAE účastní téměř 500 univerzitních týmů z celého světa v kategoriích spalovacích a elektrických motorů.

Formule Student je tedy konstrukční úkol. Vzhledem, k velké konkurenci by měl navrhovaný vůz disponovat velkým výkonem. Musí být dále spolehlivý, levný nebo snadno udržovatelný. Úkolem je tedy navrhnout vůz, který co nejlépe splňuje předchozí požadavky. Jedná se o fiktivní výběrové řízení na vývoj vozu formulového typu. Monopost musí být dobře ovladatelný, výkonný, spolehlivý a bezpečný zároveň. Vůz by měl být také esteticky na úrovni, pohodlný a využívat co nejvíce běžně dostupných součástí. Produkční plán je 1000 vozů za rok. Potenciálním zákazníkem by měl být víkendový neprofesionální závodník autokrosu nebo sprintu. Týmy mají za úkol vyvinutý vůz představit prostřednictvím jednoho prototypu. Studenti tak během vývoje získávají zkušenosti s týmovou prací na projektu od stadia prvních návrhů až po realizaci vozidla. Dalším důležitým faktorem je dodržení rozpočtu kdy je nutné si uvědomit, že jednotlivé návrhy a konstrukce vozu se musí podřít požadavkům na cenu. Soutěž je dále zaměřena na testování vozu při statických a dynamických zkouškách, při testovacích jízdách a zároveň na ověření vlastností jako jsou používané materiály formule, konstrukční prvky nebo design.

Vítězný tým každého závodu je určen na základě bodového hodnocení závodních disciplín. Je třeba zdůraznit, že nevyhrává nejrychlejší vůz. Hodnotí se všechny zmíněné prvky tedy bezpečnost, spolehlivost, ovladatelnost nebo marketingový plán pro prodej a cena navrhnutého monopostu. To vše se vyhodnocuje a boduje.

Struktura soutěže Formule Student je rozdělena do několika soutěžních disciplín. Ty zahrnují veškeré podmínky a dodržování stanovených pravidel, které jsou popsány v dokumentu Formula SAE rules. Ten bývá ještě následně doplňován pravidly pro jednotlivé nadcházející soutěže. Týmy se pak na okruhu případně v uzavřeném areálu

střetávají při statických a dynamických disciplínách. V součtu může každý tým dosáhnout až 1000 bodů. V celkovém hodnocení lze získat více bodů za dynamické disciplíny.

Statické disciplíny

- technická kontrola – zjišťuje se, zda vůz splňuje pravidla soutěže, velký důraz je přitom kladen na bezpečnost pilota
- design – hodnotí se technická kvalita vozu, nejen jak vypadá, ale také jaká řešení byla při konstrukci vozu použita
- hodnocení nákladů na výrobu
- prezentace - marketingový plán, kde se hodnotí jak dobře je tým schopen prodat svůj závodní vůz

K tomu aby mohlo vozidlo postoupit do závodu, neboli dynamické části musí úspěšně absolvovat bezpečnostní testy, které jsou součástí technické kontroly. Bez jejich splnění nemůže vůz pokračovat v soutěži. Bezpečnostní testy nejsou nijak bodově hodnoceny. [1]

Součástí bezpečnostních testů jsou následující kontroly:

- technická a bezpečnostní kontrola
- náklonová zkouška - test náklonu
- zkouška brzdného účinku
- test hluku výfukové soustavy

Součástí technické kontroly je výstup z vozu, kdy každý z jezdců oblečený v předepsané výstroji s rukama na volantu a zapnutými pásy musí opustit vůz do 5 sekund, včetně odpásování a sundání volantu. Měření času končí v okamžiku, jakmile je pilot mimo vůz oběma nohama na zemi. [1]

Test náklonu

Před testem náklonu se provádí tankování benzínu a následně se hodnotí objem nádrže. Během náklonového testu se formule na stendu nakloní o 45° a zkoumá se únik kapalin, následně pak dojde k naklonění o 60° kde se zjišťuje, zda se formule nepřevrhne. [1]

Test hluku

Při testu hluku dochází k měření hlučnosti vozu, kde pro daný motor je stanovena určitá hodnota otáček pro měření. [1]

Test brzd

Testem brzd projdou pouze ty vozy, které po krátkém rozjezdu zabrzdí tak, že současně zablokují všechna 4 kola. Během testu musí být motor stále spuštěn a nesmí dojít k jeho zhasnutí. [1]

Dynamické disciplíny

- Akcelerační – hodnotí se zrychlení vozu na trati dlouhé 75 m s pevným startem
- Skid Pad – jízda na trati ve tvaru osmičky pro zhodnocení kvalit podvozku, hodnotí se čas průjezdu
- Autokros – jízda na technické trati, při které se hodnotí zrychlení, brzdění a ovladatelnost
- Vytrvalostní závod – závod na trati dlouhé 22 km, součástí je měření spotřeby paliva

3. Analýza pravidel z hlediska bezpečnosti

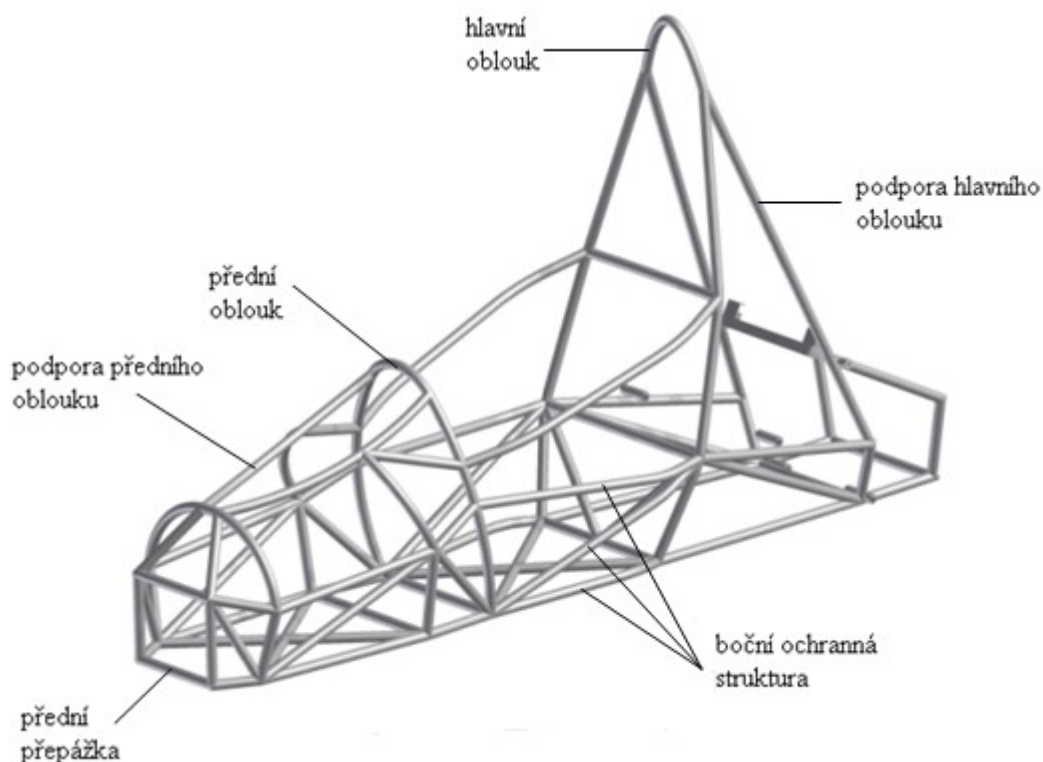
Bezpečnost v závodech ať už formulových nebo jiných závodních vozidel představuje vůbec klíčovou část. Na tratích je bezpečnost zabezpečována jednak komisaři, technikou i dalšími opatřeními. Následující část je věnována bezpečnosti a to jak jezdce, tak bezpečnostním požadavkům na konstrukci formule popsanými v dokumentu Formula SAE rules. Technické předpisy jsou v rámci možností docela volné a z velké části se zabývají právě bezpečností. Zmíněna je tak krátce konstrukce rámu, brzdová soustava nebo příklady používaných bezpečnostních prvků.

3.1 Požadavky na konstrukci rámu

Rámy závodních vozů jsou svařované trubkové konstrukce, jejímž primárním úkolem je zajistit co nejmenší deformaci karoserie v případě nehody. Předpisy pro ochranné rámy se částečně odlišují u jednotlivých vozů používaných v různých sportovních disciplínách (na základě stupně úprav, objemu motoru, stáří atd.)

Hlavní částí pravidel pro konstrukci rámu vozidla Formule Student je bezpečnost pilota. Na základě toho se odvíjí veškeré předpisy pro konstrukci celého rámu od předního ochranného oblouku až po hlavní ochranný oblouk. Pravidla se věnují vlastní konstrukci

rámu a následně uvádí rovněž požadavky na materiály jeho jednotlivých konstrukčních částí. Na obr. 3.1 je znázorněn model rámu naší studentské formule a jeho hlavní části.



Obr. 3.1 Hlavní části rámu

Důležitou bezpečnostní částí rámu je boční ochranná struktura tzv. Side Impact. Tato konstrukce chrání pilota v případě bočního nárazu. Musí být složena nejméně ze tří trubkových členů, které se nachází na každé straně od řidiče sedícího v přirozené poloze pro řízení

Umístění požadovaných trubkových členů je následující: [1]

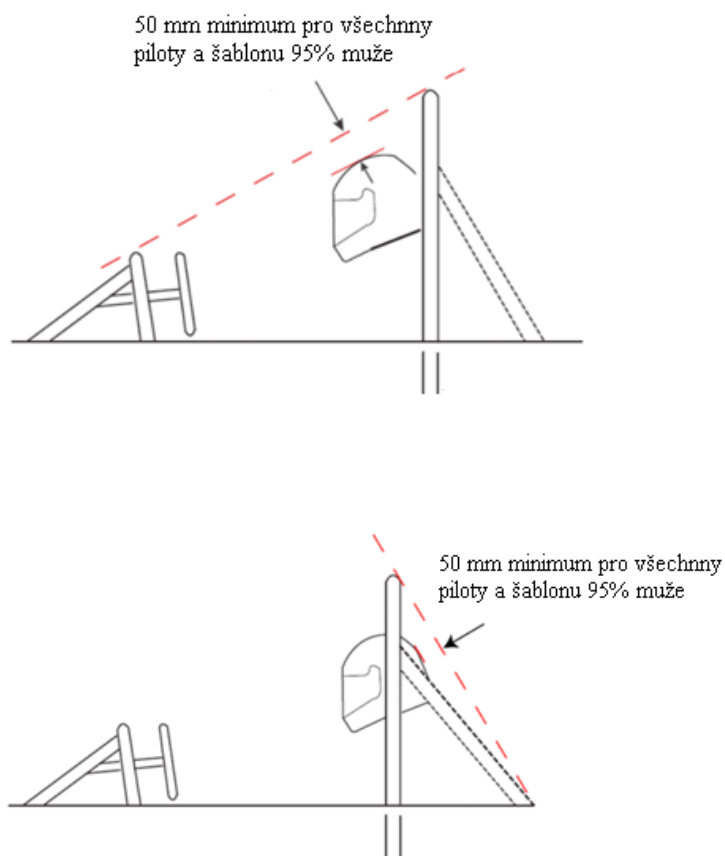
- horní člen ochranné struktury musí spojovat hlavní oblouk a přední oblouk a být umístěn ve výšce 300 až 350 mm nad zemí v případě, že je ve vozidle usazen pilot o hmotnosti 77 kg
- dolní člen ochranné struktury musí být připojen k dolní části hlavního oblouku a dolní části předního oblouku.
- diagonální výztuha jakožto prostřední člen musí spojovat horní a spodní člen ochranné struktury

Pro čelní nárazovou strukturu platí, že chodidla a nohy pilota musí být kompletně umístěny v hlavní konstrukci rámu. Když se pilotovy chodidla dotýkají pedálů, v bočním a předním pohledu nesmí žádná část pilotových chodidel nebo noh vyčnívat nad nebo mimo hlavní konstrukci rámu. [1]

Požadavky na hlavní a přední ochranný oblouk

V této části pravidel je největší důraz kladen na prostor kolem pilota. Na obr. 3.2 je vidět omezení, které se týká prostoru pro pilotovu helmu. Toto omezení má největší vliv na výšku a tvar hlavního a předního oblouku rámu. Ochranné oblouky smí být vyrobeny pouze z oceli. Pilotova hlava a ruce se nesmí dotknout země v jakékoliv poloze po překlopení. Je-li pilot usazen v pozici pro řízení a připoután bezpečnostními pásy, musí být zachována minimálně 50 mm vzdálenost mezi helmou a: [1]

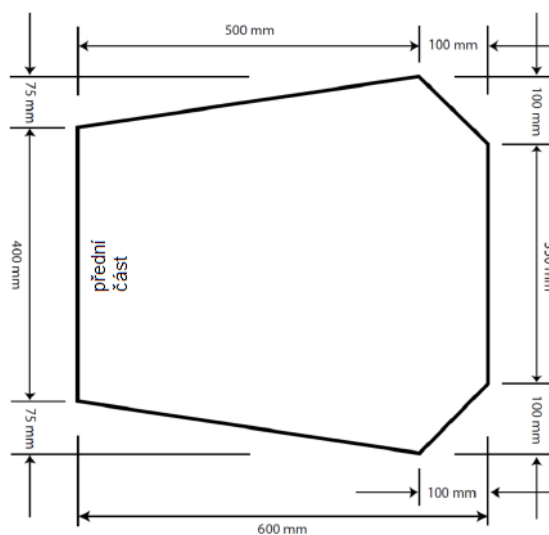
- tečnou mezi nejvyšším bodem hlavního a předního ochranného oblouku
- tečnou mezi nejvyšším bodem hlavního ochranného oblouku a nejnižším bodem šikmé vzpěry tohoto oblouku



Obr. 3.2 Předpisy pro prostor helmy pilota [1]

3.2 Požadavky na kokpit

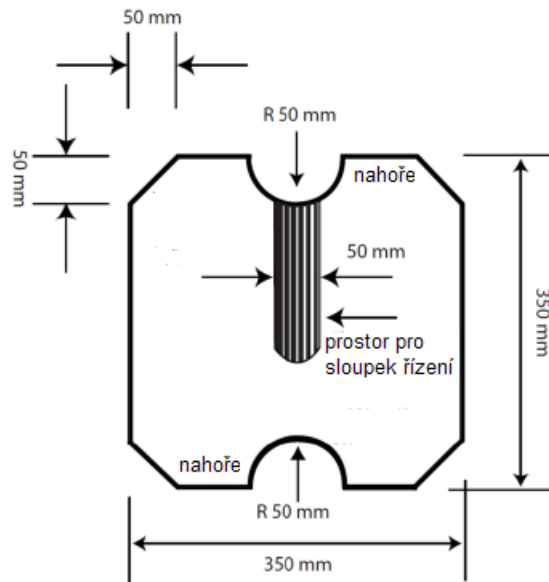
V následujících odstavcích jsou uvedeny příklady některých důležitých pravidel a podmínek, které se věnují kokpitu. Jejich splnění je důležité pro bezpečnost a ochranu pilota. Kontrola minimálních rozměrů kokpitu se provádí pomocí následující šablony znázorněné na obr. 3.3 [1]



Obr. 3.3 Šablona pro kontrolu minimálního prostoru pilota [1]

- **prostor pro nohy pilota**

Při technické prohlídce dochází ke kontrole prostoru pro nohy pilota a to kontrolní šablonou se stanovenými rozměry, znázorněnou na obr. 3.4. Šablona se vloží do kokpitu do míst pilotových nohou a to do vzdálenosti 100 mm od nejdále umístěného pedálu v nefunkční tedy nesešlápnuté poloze. [1]



Obr. 3.4 Šablona prostoru pro nohy pilota [1]

- **firewall**

Firewall, neboli protipožární přepážka, musí oddělit prostor pilota od všech částí dodávek paliva, motoru nebo chladicích kapalin. Jedná se o nepropustnou plochu z tuhého žáruvzdorného materiálu. Musí zajišťovat ochranu krku pilota. Protipožární přepážka musí být v takové výšce, že jakákoliv z částí palivového systému, chladicího systému, olejového systému nebo motoru nesmí být přímo viditelná z místa 100 mm nad helmou nejvyššího pilota. [1]

- **tepelná izolace**

V případě, kdy je řidič usazen v normální poloze pro řízení, musí být správně zajištěna tepelná izolace tak, aby chránila pilota před popálením od kovu nebo jiného materiálu, který se může zahřát nad teplotu 60 °C. Izolace může být vně kokpitu nebo uvnitř u sedadla pilota případně integrovaná do protipožární přepážky a chrání před přenosy tepla jako je vedení, proudění, záření. [1]

Součástí pravidel pro část věnující se prostoru kokpitu je zajištění bezpečnosti pilota v případě havárie rychlým opuštěním kokpitu a následného výstupu z vozu. Jedná se o v předchozí kapitole již zmíněný výstup z vozu.

3.3 Požadavky na brzdový systém

Brzdová soustava představuje velmi důležitou část vozidla týkající se aktivní bezpečnosti. Slouží ke zpomalování rychlosti vozidla nebo k úplnému zastavení.

V případě brzdového systému musí formule splňovat řadu kritérií uvedených v dokumentu Formula SAE rules, které jsou popsány v následujících bodech.

- 1) Vozidlo musí být vybaveno brzdovým systémem, který působí na všechna čtyři kola a je ovládán jedním ovládacím prvkem
- 2) Brzdová soustava musí mít 2 nezávislé hydraulické okruhy zapojené tak, aby v případě poruchy některé části hydraulického okruhu byl zajištěn postačující brzdný výkon alespoň na dvou kolech.
- 3) Každý hydraulický okruh musí mít vlastní zásobník brzdové kapaliny.
- 4) Na zadní nápravě v místě diferenciálu je přijatelné použít jednu samostatnou brzdu.
- 5) Brzdový systém musí být schopen zastavit všechna čtyři kola (v průběhu testu).
- 6) Je zakázáno nahrazovat hydraulický brzdový systém jiným typem.
- 7) Je zakázáno používat plastové prvky a hadičky pro vedení brzdové kapaliny.
- 8) Brzdový systém musí být chráněn štíty (kryty), které jej chrání při selhání hnacího ústrojí nebo v případě drobné kolize s některou součástí v jeho blízkosti.
- 9) Žádná část brzdového systému se nesmí promítat pod spodní úroveň rámu vozidla.
- 10) Brzdový pedál musí být navržen tak, aby vydržel odolat zatížení 2000 N a nedošlo přitom k selhání brzdového systému nebo pedálu.
- 11) Brzdový pedál musí být vyroben z kovových materiálů jako hliník, ocel, titan.
- 12) Brzdový systém musí obsahovat spínač, který signalizuje přeběhnutí brzdového pedálu. Musí být instalován tak, aby v případě jeho aktivace došlo k vypnutí zapalování a palivového čerpadla.
- 13) Spínač musí být navržen tak, aby neumožňoval řidiči opětovnou aktivaci.

- 14) Spínač přeběhnutí brzdového pedálu musí obsahovat analogově ovládané komponenty. Použití digitálně programovaných ovladačů je zakázáno.
- 15) Vozidlo musí být rovněž vybaveno červeným brzdovým světlem s černým pozadím. Světlo musí být umístěno na zadní části vozu, vertikálně mezi osou kol a rameny řidiče. Světlo musí být dobře viditelné a při jasném slunci.

Způsoby testování brzdového systému

Brzdový systém je dynamicky testován a musí prokázat schopnost zablokování všech čtyř kol a zastavení vozidla v přímém směru na konci akcelerační jízdy specifikované dohlížejšími inspektory.

Po rozjetí je řidičem vypnut motor a při brzdění se musí zablokovat všechna čtyři kola. Test je splněn, pokud jsou všechna čtyři kola najednou zablokována a motor je vypnut.

3.4 Další bezpečnostní prvky

V následující kapitole jsou uvedeny některé bezpečnostními prvky pro vozidlo Formule Student.

3.4.1 Deformační člen

Důležitým bezpečnostním prvkem vozidla je Impact Attenuator, neboli deformační člen. Jedná se o prvek pasivní bezpečnosti sloužící k ochraně řidiče v případě nárazu či vzniklé nehody. Jde v podstatě o nárazník umístěný v přední části vozidla. Při nárazu pohlcuje energii formule, čímž snižuje nebezpečnou hodnotu zpomalení, která působí na řidiče na hodnotu bezpečnou a zmírňuje tím následky vzniklého nárazu. Má pyramidový tvar a nejčastěji bývá vyroben z hliníkové nebo polymerové pěny.

Co se týče požadavků na deformační člen pro soutěže Formule Student, ty jsou každoročně popsány v pravidlech Formule SAE. Pravidla, která se týkají deformačního členu, se dělí v podstatě na 2 části. V první části se popisuje deformační člen a jeho instalace. Druhá část mluví o předpisech a různých údajích potřebných pro následné testování a zkoušení deformačního členu.

➤ Požadavky na deformační člen – první část [1]

Deformační člen musí být:

- a) připevněn na přední přepážce rámu
- b) dlouhý nejméně 200 mm v podélné ose vozidla
- c) vysoký nejméně 100 mm a široký 200 mm ve vzdálenosti minimálně 200 mm od přední přepážky rámu
- d) navržen tak, aby při nárazu nemohl proniknout přední přepážkou
- e) bezpečně a přímo připevněn k přední přepážce rámu tak aby nezatěžoval nenosné části

Upevnění deformačního členu musí být zkonstruováno tak, aby v případě, kdy dojde k nárazu mimo osu vozidla, převedl adekvátní silové zatížení. Deformační člen se k přední přepážce rámu upevňuje pomocí plechu tzv. Anti-Intrusion plate – bezpečnostního ochranného plechu. Ten v případě nárazu zabraňuje penetraci deformačního členu a chrání nohy pilota, aby nedošlo k vniknutí nějakého cizího tělesa. Pravidla předepisují možnost volby 2 materiálů pro bezpečnostní plech [1].

2 varianty použití bezpečnostního plechu

- ocelový – minimální tloušťka 1,5 mm, rozměry nesmí být menší než obrys středových os profilů přední přepážky
- hliníkový – minimální tloušťka 4 mm, rozměry nesmí přesahovat vnější obrys přední přepážky

Bezpečnostní plech se může připevnit k rámu buď pomocí šroubů, kde je podmínkou použití nejméně 4 šroubů průměru 8 mm a pevnostní třídy 8.8. U tohoto způsobu upevnění musí být rozměry plechu stejné jako vnější krajní rozměry přední přepážky rámu. Další možností upevnění je přivaření plechu k přední přepážce. V tomto případě stačí, když plech bude mít rozměry dosahující do rozměrů středových os trubkových profilů, ze kterých je přední přepážka rámu svařena [1].

V našem případě byl použit bezpečnostní plech z hliníku, který bude připevněn k rámu pomocí 4 šroubů.

Standardní deformační člen

Jednotlivé týmy mohou využít možnost nákupu standardního deformačního členu. Ten je vyroben z materiálu Dow Impaxx™ 700, jedná se o polystyrén vyráběný protlačováním přes formu. Takto zakoupený deformační člen splňuje všechna kritéria a požadavky na něj kladené organizátory soutěže. V takovém případě je nevýhodou nutnost přizpůsobit rozměry přední přepážky rámu tomuto deformačnímu členu. Při použití standardního deformačního členu navíc každý tým obdrží penalizaci a jsou mu odečteny určité body. Na následujícím obr. 3.5 je znázorněn standardní deformační člen a v tab. 3.1 popsány jeho základní rozměry [1].



Obr. 3.5 Standardní deformační člen

Tab. 3.1 Rozměry standardního deformačního členu

Rozměry [mm]	
délka	254
výška	305
šířka	356

Pro nákup standardního deformačního se rozhodl také náš tým a jeho cena je přibližně 150 €.



Obr. 3.6 Umístění deformačního členu

➤ Požadavky na deformační člen – druhá část

Ve druhé části pravidel pro deformační člen se popisují testovací podmínky a dosažení předepsaných hodnot. Každý tým pak musí předložit údaje a výsledné hodnoty z experimentálních zkoušek, kde se ověřuje funkčnost deformačního členu [1].

Parametry zkoušení

- deformační člen je připevněn k objektu s celkovou hmotností 300 kg a naráží proti pevné bariéře
- rychlost nárazu 7 m/s
- průměrné hodnoty zrychlení (zpomalení) nesmí překročit za celý proces nárazu 20g's
- max. hodnota zpomalení nesmí během nárazu být větší než 40g's
- celková vstřebaná energie musí být alespoň 7350 J
- deformace plechu nesmí být větší než 25,1 mm

3.4.2 Bezpečnostní pásy

Bezpečnostní pásy se používají pro zvýšení bezpečnosti pilotů a pro snížení následků případné nehody. Patří tak mezi zádržné bezpečnostní systémy. Pilota zejména v případě čelního nárazu udrží v takové poloze, ve které se zamezí možnosti poranění od některé z částí vozu.

Podle pravidel FSAE je možné zvolit následné systémy uchycení:

- **pětibodový systém**

- 76 mm široký břišní pás, stejně široké pásy přes ramena a 51 mm široké popruhy stehenní bránící podklouznutí.

- **šestibodový systém**

- 76 mm široký břišní pás, stejně široké pásy přes ramena a 51 mm široké popruhy stehenní bránící podklouznutí.

- **sedmibodový systém**

- stejný systém jako u šestibodového, jen má 3 popruhy bránící podklouznutí a to 1 z pětibodového a 2 z šestibodového systému

Na obr. 3.7 je ukázán příklad pětibodového bezpečnostního pásu.



Obr. 3.7 Pětibodový bezpečnostní pás

Břišní popruhy musí obepínat pánev pilota. Nesmí být vedeny přes hrany sedadla ale skrz sedadlo pro správné obepnutí pánve.

Ramenní popruhy musí obepnout pilota kolem hrudi a musí být uchyceny za pilotem ke konstrukci rámu.

Stehenní popruhy u šestibodového systému mohou být ukotveny pomocí stejných kotvících bodů, jako využívají břišní popruhy.

Bezpečnostní postroj by měl být dle pravidel vyměněn po 2 letech od jeho vyrobení a to zejména kvůli stárnutí materiálu. Bezpečnostní pásy musí být pevně utaženy po celou dobu jízdy.

3.4.3 Výbava pilota

Do vybavení pilota spadají následující doplňky, které musí mít každý pilot dle pravidel soutěže. Pilot je musí mít na sobě kdykoliv je v kokpitu a současně běží motor. Veškeré vybavení musí splňovat všechny předepsané požadavky.

- **závodní helma**

Podle pravidel musí být závodní helma dobře přiléhající, uzavřená přilba a musí splňovat certifikace norem. Helmy s otevřeným průzorem nejsou schváleny. Všechny helmy, které mají být použity v soutěži, musí být předloženy během technické kontroly, kde dojde k jejich schválení. Součástí helmy je obličejový štít vyrobený z odolných a schválených materiálů.

- **závodní rukavice**

Závodní rukavice musí být vyrobeny z odolného nehořlavého materiálu. Není přijatelné použití rukavic, které jsou vyrobeny pouze z kožených materiálů bez využití ohnivzdorných látek.

- **závodní kombinéza**

Kombinézou se rozumí jeden kus obleku vyrobený minimálně ze dvou vrstev. Musí být z nehořlavého materiálu a pokrývat tělo ok krku až po kotníky a zápěstí. Oblek musí být certifikován jednou z následujících norem a být takto označen.

- SFI 3-2A / 5 (nebo vyšší)

- FIA Standardní 1986

- FIA Standardní 8856-2000

- **spodní prádlo a obuv**

Důrazně se doporučuje, aby všichni závodníci nosili spodní prádlo z protipožárních materiálů, které má rovněž pokrývat tělo od krku až po kotníky a zápěstí.

Závodní obuv musí být taktéž vyrobena z požáru odolných materiálů a splňovat certifikované normy.

- **doplňková výbava**

Každý tým musí mít rovněž alespoň 2 suché chemické hasicí přístroje s hmotností 0,9 kg nebo pěnové přístroje s objemem 1,75 litů. Oba přístroje musí být předloženy spolu

s vozidlem na technickou kontrolu. Jeden přitom musí být dostupný týmu v místě paddocku a druhý doprovází vozidlo při jeho přemístění. Ruční hasicí přístroje nesmějí být ve vozidle.

Co se týká ohnivzdorných materiálů tak pravidly uváděné a schválené jsou tyto následující materiály: Carbon X, Indura, Nomex, Polybenzimidazol a Proban. Trička, ponožky, nebo jiné spodní prádlo vyrobené ze syntetických materiálů jsou zakázány.

4. Stanovení vhodných metod a postupů zkoušek spolehlivosti

Zkoušky spolehlivosti se používají k experimentálnímu stanovení životnosti a spolehlivosti. Při stanovování životnosti se zjišťuje doba technického života, čímž dostaneme pouze jeden údaj. Při zkouškách spolehlivosti jsou výstupem spolehlivostní ukazatele. Provádění těchto zkoušek v praxi je zejména u vozidel spojeno s velkými obtížemi. Doba takového zkoušení je značně dlouhá a v důsledku toho dochází k nárůstu nákladů. Při stanovení spolehlivosti se obvykle vychází z údajů získaných při provozu vozidla. Důležité jsou tak záznamy o jednotlivých poruchách, době provozu nebo údržby [3].

Zkoušky spolehlivosti mají za cíl experimentálně určit nebo ověřit ukazatele spolehlivosti. Za ukazatel se považuje takový typ a parametr rozdělení náhodné veličiny, která daný zkoumaný jev popisuje.

Typy zkoumaných jevů jsou např.:

- doba do poruchy (bezporuchovost)
- doba údržby (udržovatelnost)
- logistické zpoždění údržby (zajištěnost údržby)
- pohotovost
- doba života výrobku (životnost)

4.1 Základní pojmy

Vybrané základní pojmy, které se vztahují ke zkouškám spolehlivosti [6].

Zaručovaný ukazatel

Ukazatel, který je zaručovaný po stanovenou dobu a s určitou pravděpodobností, tj. s určitou konfidenční úrovní nebo konfidenční pravděpodobností.

Konfidenční úroveň

Je pravděpodobnost, se kterou se ukazatel spolehlivosti nachází ve stanovených mezích, tzn. v předem stanoveném konfidenčním intervalu.

Konfidenční interval

Je interval omezený horní a dolní mezí, do něhož padne ukazatel spolehlivosti s předem danou pravděpodobností.

Hladina významnosti α

Je pravděpodobnost, že dojde k zamítnutí nulové hypotézy, ačkoliv ona platí.

Riziko spojené se zkouškami spolehlivosti

Je pravděpodobnost, s jakou výrobek nevyhoví požadavkům na spolehlivost.

Riziko výrobce – pravděpodobnost, se kterou dobré výrobky budou ve zkoušce (vlivem náhodných okolností) prohlášeny za nevyhovující.

Riziko odběratele – pravděpodobnost, se kterou budou nevyhovující výrobky ve zkoušce (vlivem náhodných okolností) prohlášeny za dobré.

Zkušební plán

Je soubor pravidel popisující způsoby provedení zkoušky.

Ekvivalentní doba zkouška

Je hromadná doba provozu veškerých zkoušených výrobků. Její hodnota závisí na době trvání zkoušky, počtu zkoušených výrobků, počtu poruch a typu zkušebního plánu.

4.2 Rozdělení zkoušek spolehlivosti

Zkoušky spolehlivosti můžeme rozdělit podle různých hledisek, podle cíle nebo podle účelu ke kterému slouží [2].

Rozdělení podle cíle zkoušky

- **zkoušky určující**

Jejich cílem je pomocí experimentálních dat určit typ rozdělení náhodné veličiny a následně parametry rozdělení. Před samotnou zkouškou nejsou k dispozici žádné předpoklady o rozdělení náhodné veličiny nebo parametrech rozdělení. Určující zkoušky se využívají, pokud zkoumáme neznámý výrobek nebo nějaký jev.

- **zkoušky ověřovací**

Cílem zkoušek je pomocí experimentálních dat ověřit, jestli se hodnoty posuzovaných ukazatelů shodují s předem danými požadavky. Při ověřovacích zkouškách je znám typ rozdělení, zároveň se využívají zkušenosti z předcházejících zkoušek s podobnými výrobky a ověřují se dosažené parametry rozdělení.

- **zkoušky zkrácené**

Cílem zkoušek je ověřovat stanovené ukazatele za podmínek, kdy je zkouška ukončena předtím, než dojde k poruše u všech zkoušených subsystémů. Nachází uplatnění u výrobků, které mají vícekrát stejnou konstrukční skupinu. Příkladem může být čtyřválcový spalovací motor, který má 4 shodné písty. Zkouška motoru tak skončí při poruše prvního pístu a nečeká se na poruchy zbylých pístů.

- **zkoušky zrychlené**

Provádí se ve zvláštních pracovních podmínkách a jejich prostřednictvím můžeme získat informaci o spolehlivostních ukazatelích dřív, než by tomu bylo u normální zkoušky. Cílem je tak získat informace v kratší časové lhůtě.

Rozdělení podle účelu zkoušky

- **typové zkoušky**

Účelem zkoušky je získání informací o spolehlivostních vlastnostech funkčních vzorků a prototypů. Ověřují se použitá řešení a zpravidla se nepovažuje provést interpretaci číselných charakteristik na sériovou produkci.

- **periodické**

Při zkouškách je cílem získávat informace o sériově vyráběné produkci. Na základě výsledků zkoušek vybraných výrobků se posuzují vlastnosti celkové série.

4.3 Vybrané typy rozdělení náhodných veličin

Při výpočtu různých veličin ve spolehlivosti jako např. doby do poruchy, doby mezi poruchami, počet poruch za časový interval, nabývají tyto veličiny různých hodnot s určitou pravděpodobností, takže se jedná o náhodné veličiny. Náhodná veličina nabývá libovolných hodnot v určitém intervalu v případě, že reprezentuje např. čas, nebo může nabývat určité hodnoty [2].

Pak se rozlišují následující náhodné veličiny:

- **spojitá náhodná veličina**
- **diskrétní náhodná veličina**

K popisu rozdělení pravděpodobnosti se používají tyto základní charakteristiky:

- distribuční funkce
- doplněk distribuční funkci
- hustota pravděpodobnosti
- pravděpodobnostní funkce
- intenzita náhodné veličiny
- střední hodnota
- rozptyl
- kvantil

Vybraná rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny

- **Exponenciální rozdělení**

Exponenciální rozdělení se používá při popisu doby do výskytu nějakého náhodného jevu např. poruchy. Rozdělení se využívá pro systémy, kde dochází k výskytu náhodných a náhlých poruch bez předchozího opotřebení. Je definováno jedním parametrem λ - intenzita poruch.

hustota pravděpodobnosti $f(t)$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad \lambda > 0, t \geq 0 \quad (4.1)$$

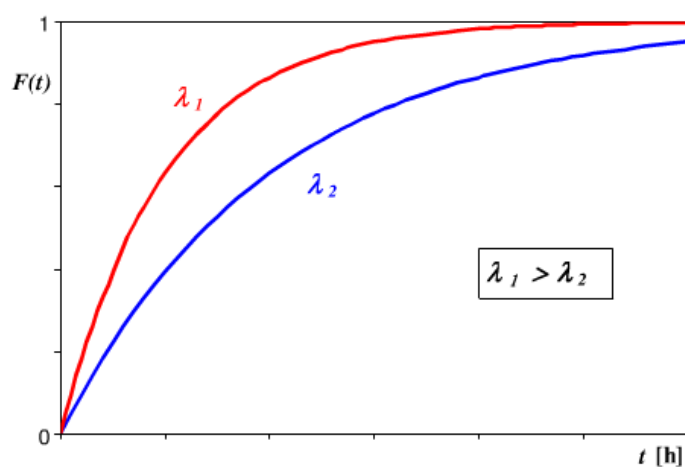
kde:

t – hodnota náhodné veličiny T [h]

λ – intenzita poruch [h^{-1}]

distribuční funkce $F(t)$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4.2)$$



Obr. 4.1 Průběh distribuční funkce pro různé intenzity poruch [3]

bezporuchovost $R(t)$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.3)$$

intenzita poruch $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \lambda = \text{konst.} [\text{h}^{-1}]$$

Exponenciální rozdělení se označuje často, jako rozdělení bez paměti tzn., že pravděpodobnost, že zařízení je v bezporuchovém stavu nějakou určitou dobu není závislá na tom, zda bylo v bezporuchovém stavu už někdy dříve. Není tedy závislá na stáří zařízení. [2]

- **Weibullovo rozdělení**

Ve spolehlivosti se Weibullovo rozdělení v mnoha případech používá při popisu náhodné veličiny zejména díky možnosti jeho variability, tzn., že změnou parametrů může nahradit i jiná rozdělení pravděpodobnosti

distribuční funkce $F(t)$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-c}{t_0}\right)^m} \quad (4.4)$$

kde:

t – hodnota náhodné veličiny T [h]

m – parametr tvaru

t_0 – parametr měřítka [h]

c – parametr polohy [h]

Je-li parametr polohy $c = 0$, pak je distribuční funkce $F(t)$ dána:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.5)$$

hustota pravděpodobnosti $f(t)$

$$f(t) = \frac{m}{t_0} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.6)$$

bezporuchovost $R(t)$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.7)$$

intenzita poruch $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{m-1} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (4.8)$$

kde:

t – hodnota náhodné veličiny T [h]

m – parametr tvaru

t_0 – parametr měřítka [h]

4.4 Zkušební plány

U spolehlivostních zkoušek se neprovádí zkoušení všech vyrobených výrobků, nýbrž jen jejich část a zkoušky spolehlivosti jsou založeny na náhodném výběru. Zkušební plány používáme v důsledku nemožnosti provádění zkoušek spolehlivosti u všech vyrobených výrobků a to převážně z časového nebo ekonomického hlediska. Během zkoušek spolehlivosti navíc dochází k destrukci výrobků nebo takovému poškození, že už není možné je dále prodat. Nečeká se tedy na poruchu všech výrobků, ale zkouška je omezena počtem dopředu zvolených výrobků a podle potřeby se zkouška omezí dobou jejího trvání případně počtem poruch. Zkušební plán tedy udává pravidla, která udávají průběh a způsob ukončení zkoušky na zkušebních vzorcích. Provádí se ověření parametrů rozdělení základního souboru, takže ty zkoušky spolehlivosti, které využívají zkušební plány, lze považovat za zkoušky ověřovací. Výpočet jednotlivých ukazatelů spolehlivosti se řídí podle typu souboru resp. typu zkušebního plánu. [2]

4.4.1 Rozdělení zkušebních plánů

Zkušební plány lze rozdělit do následujících základních typů:

- **úplný zkušební plán**

Z dané populace se provede náhodný výběr výrobků. V případě úplného zkušebního plánu se čeká, než dojde k poruše všech zkoušených výrobků, ty se v tomto případě neobnovují ani nenahrazují. Zkouška tak skončí, až dojde k poruše posledního zkoušeného výrobku.

- **zkušební plán cenzurovaný počtem poruch r-plán**

V tomto případě skončí zkouška, jakmile dojde k předem stanovenému počtu poruch r_0 . Náhodnou veličinou je tedy čas neboli doba do poruchy. Po poruše se výrobky buďto nenahrazují, případně se můžou nahradit a opravit.

- **zkušební plán cenzurovaný dobou do poruchy t - plán**

Zkouška skončí po uplynutí předem stanovené doby trvání zkoušky. V tomto případě se zjišťuje počet poruch, které se vyskytnou u zkoušených výrobků. Po poruše se výrobky buďto nenahrazují, případně se můžou nahradit a opravit.

- **zkušební plán progresivně cenzurovaný**

Je smíšený zkušební plán cenzurovaný jednak počtem poruch a zároveň i dobou trvání zkoušky. V jedné skupině výrobků se posuzuje počet poruch a druhá skupina je limitována dobou zkoušky.

Značení zkušebních plánů:

n..... počet zkoušených výrobků

U..... výrobek je po poruše vyřazen ze zkoušky, není vyměněn ani opraven

R..... výrobek je po poruše nahrazen novým

M..... výrobek je po poruše opraven a vrací se do zkoušky

r_0 maximální počet poruch během zkoušky, v okamžiku r_0 -té poruchy zkouška končí

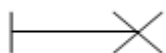
τ_0 doba trvání zkoušky, v okamžiku dosažení τ_0 času zkouška končí

Časové veličiny zkušebních plánů

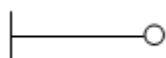
Časové veličiny popisují, jak se chovají výrobky během zkoušek spolehlivosti prováděných pomocí zkušebních plánů. Je-li v rámci zkušebního plánu stanovena maximální doba zkouška, mohou nastat následující případy: [2]

- nastane-li u jednoho výrobku v čase t_i porucha a doba t_i je menší než doba zkoušky τ_0 ,

$t_i \leq \tau_0$, označujeme tento stav následujícím symbolem:



- nastane li porucha výrobku v průběhu zkoušky dříve, než uplyne stanovená doba zkoušky τ_0 , jedná se o neukončený interval a tento stav se označuje následujícím symbolem:



Důležitá časová veličina je akumulovaný pracovní čas T_{AKU} , který reprezentuje celkový čas, po který byly všechny výrobky během doby zkoušky v provozu. Jeho výpočet se odvíjí od zvoleného typu zkušebního plánu, jak je uvedeno v tab. 4.1

Tab. 4.1: Výpočet akumulovaného pracovního času [3]

r-plán	U	$T_{AKU} = \sum_{i=1}^{r_0} t_i + (n - r_0) \cdot \tau$
	R	$T_{AKU} = n \cdot \tau$
	M	$T_{AKU} = \sum_{i=1}^{r_0} (\tau - O_i) + (n - r_0) \cdot \tau$
t-plán	U	$T_{AKU} = \sum_{i=1}^{r_0} t_i + (n - r_0) \cdot \tau_0$
	R	$T_{AKU} = n \cdot \tau_0$
	M	$T_{AKU} = \sum_{i=1}^{r_0} (\tau_0 - O_i) + (n - r) \cdot \tau_0$

kde:

τ – doba zkoušky, od počátku do vzniku r_0 -té poruchy [h]

r – počet vzniklých poruch během zkoušky

O_i – potřebný čas na opravu i -tého výrobku [h]

Zkoušky prováděné pomocí takových zkušebních plánů se v případě prvku popsaného exponenciálním rozdělením vyhodnocují podle následujícího vzorce:

$$\hat{T}_{SD} \geq \frac{2 \cdot T_{AKU}}{\chi_{2v, 1-\alpha}^2} \quad [\text{h}] \quad (4.9)$$

kde:

\hat{T}_{SD} - dolní odhad střední hodnoty [h]

T_{AKU} - akumulovaný pracovní čas [h]

$\chi_{2v,1-\alpha}^2$ - hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti na úrovni konfidence

$$C = 1 - \alpha$$

4.4.2 Extrémní případy zkušebních plánů

Tyto případy jsou důležité z toho důvodu, že umožňují vyhodnotit i takovou zkoušku, kdy se zkouší pouze jediný výrobek nebo prvek. Lze použít tedy v případech, kdy se nemusí vyrábět celá série, ale postačí limitované série o počtu několika kusů. U automobilového sportu jsou právě tyto případy důležité.

- zkouška jediného výrobku bez poruchy

Zkouška je limitována časem a jedná se tak o t-plán tzn., že do stanoveného času nevznikne porucha výrobku. V tomto případě tak není znám údaj o době do poruchy, víme ale, jak dlouho výrobek pracoval, než vznikla porucha. Jelikož známe dobu, po kterou nevznikla porucha tak chceme uskutečnit odhad střední doby do poruchy celého souboru.

Dolní odhad střední doby do poruchy v případě exponenciálního rozdělení je tak následující:

$$\hat{T}_{SD} \geq \frac{2 \cdot \tau_0}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (4.10)$$

kde:

\hat{T}_{SD} - dolní odhad střední doby do poruchy

τ_0 - doba trvání zkoušky

$\chi_{2v,1-\alpha}^2$ - hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti na úrovni konfidence

$$C = 1 - \alpha$$

Dolní odhad střední doby do poruchy pro Weibullovo rozdělení

$$(\hat{T}_{SD})^m \geq \frac{2 \cdot T_{AKU}^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (4.11)$$

kde:

m – parametr tvaru Weibullova rozdělení

- zkouška jediného výrobku do první poruchy

Zkouška může být limitována časem zkoušky, kdy se tedy jedná o t-plán, tzn., že do stanoveného času vznikne porucha. Jedná se tak o zkoušku jediného výrobku ukončenou poruchou. Nebo může být zkouška limitována vznikem první poruchy, kdy se tedy zkouška považuje za r-plán.

$$\hat{T}_{SD} \geq \frac{2 \cdot \tau}{\chi_{2v, 1-\alpha}^2} \quad (4.12)$$

kde:

τ - doba trvání zkoušky

4.5 Analýza stromu poruchových stavů

Analýza stromu poruchových stavů ve zkratce FTA (Fault tree analysis) se věnuje identifikaci a analýze různých podmínek či faktorů, které mohou zapříčinit výskyt nebo přispět k výskytu potenciální vrcholové události. Touto událostí bývá zejména zhoršení fungování systému, snížení bezpečnosti případně zhoršení jiných důležitých provozních systémů. Velmi často se používá při analyzování bezpečnosti různých systémů, ať už se jedná např. o dopravní systémy nebo kterékoliv jiné, kde se vyžaduje vyhodnocení bezpečnosti provozu. Analýzou stromu poruch lze rovněž posuzovat analýzu pohotovosti a udržitelnosti.

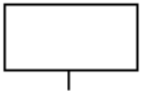

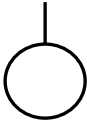
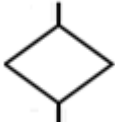




Jedná se o klasickou deduktivní metodu a patří mezi speciální orientované grafy. Vrcholová událost reprezentuje poruchu a stav, kdy daný systém není schopen plnit požadované funkce. Strom poruch se následně rozvíjí k objektům a prvkům systému, jejichž porucha způsobuje vznik vrcholové události [3].

Rozeznáváme 2 přístupy k analýze FTA:

- kvalitativní
- kvantitativní

V případě kvalitativního přístupu se nesleduje četnost výskytu událostí nebo pravděpodobnost událostí a jednotlivých faktorů, které k nim přispívají. V tomto případě se provede podrobná analýza poruchových stavů a daný přístup je znám jako kvalitativní FTA.

Tab. 4.2 Často používané značky pro FTA [5]

značka	název	popis
	Vrcholová událost	Blok s názvem nebo popisem vrcholové události (Top jevu)
		Blok s názvem nebo popisem události, případně s uvedením pravděpodobnosti výskytu
	Základní (primární) událost	Událost na nejnižší úrovni, pro kterou je k dispozici pravděpodobnost výskytu nebo informace o bezporuchovosti
	Nerozvíjená událost	Primární událost, která reprezentuje část systému, která dosud nebyla rozvíjena
	Hradlo OR (Nebo, logický součet)	Výstupní událost nastane tehdy, jestliže nastane jakákoliv ze vstupních událostí
	Hradlo AND (A, i, logický součin)	Výstupní událost nastane pouze tehdy, jestliže nastanou všechny vstupní události
	Hradlo TRANSFER	Hradlo naznačující, že je tato část systému rozvíjena v jiné části nebo na jiné straně diagramu
	Hradlo INHIBIT (Blokování)	Výstupní události nastanou pouze tehdy, jestliže nastanou obě vstupní události, z nichž jedna je podmínková

V kvantitativním přístupu se posuzuje proces nebo systém, kde všechny nebo většina základních událostí ať už se jedná třeba o poruchové stavy, má v daném modelu nějakou pravděpodobnost výskytu. Kvantitativní analýza se používá v případě, jsou-li známy pravděpodobnosti primárních událostí. Následně mohou být vypočteny pravděpodobnosti výskytu mezilehlých událostí a vrcholové události. V tomto přístupu je pak konečným výsledkem pravděpodobnost výskytu vrcholové události, která reprezentuje pravděpodobnost bezporuchového provozu nebo pravděpodobnost poruchového stavu. [5]

Při kvantitativním hodnocení FTA se dosadí konkrétní hodnoty pravděpodobností jednotlivých primárních událostí a přímo je vyjádřena pravděpodobnost vrcholové události. Kvantitativní část tedy navazuje na konstrukci stromu poruch a jeho popis strukturální funkcí pomocí Boolovy algebry. Při tomto hodnocení FTA se zabýváme hodnocením poruchových stavů systému.

Sériový systém

Následujícím vzorcem je vyjádřena pravděpodobnost bezporuchové provozu vrcholového systému, který se skládá z n nezávislých prvků.

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) \quad (4.13)$$

kde:

$R(t)$ – p-st bezporuchového provozu

Z výrazu v podobě pravděpodobnosti bezporuchového provozu vyplývá, že musejí být provozuschopné prvky 1 i 2, aby byl systém provozuschopný.

U analýzy FTA se využívá opačná logika. Poruchový výstup vznikne při poruše jedné součásti, nebo při poruše druhé součásti atd. Proto je sériový systém reprezentován hradlem OR.

Matematika při použití hradla OR je shodná s matematikou pro sériové systémy s tím rozdílem, že je vyjádřena v podobě pravděpodobnosti poruchy $F(t)$. Jedná se o pravděpodobnostní doplněk k pravděpodobnosti bezporuchové provozu.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (4.14)$$

kde:

$F(t)$ – p-st poruchy

$R(t)$ – p-st bezporuchového provozu

V případě pravděpodobnosti nežádoucího následku při využití hradla OR skládajícího se z n nezávislých událostí je výpočet následující

$$F(t) = 1 - [1 - F_1(t)] \cdot [1 - F_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_n(t)] \quad (4.15)$$

kde:

$F(t)$ – p-st poruchy

V tomto případě má systém poruchu, pokud nastane porucha jakékoliv z jeho součástí.

Paralelní systém

Spojování událostí pomocí hradla AND se používá v případě, pokud výstupní událost nastane pouze tehdy, jestliže současně nastanou všechny události na vstupu hradla. Pro analýzu bezporuchovosti se označuje jako paralelní systém. Systém je tak provozuschopný, pokud jakákoliv z jeho součástí, nejméně jedna z nich je provozuschopná. Porucha systému tedy nastane, pokud všechny jeho součásti mají poruchu.

$$F(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (4.16)$$

kde:

$F(t)$ – p-st poruchy

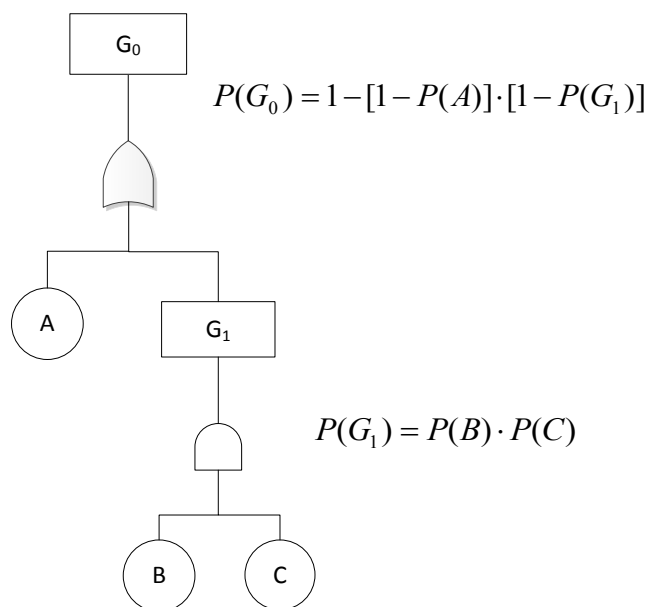
$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (4.17)$$

kde:

$R(t)$ – p-st bezporuchového provozu

Na následujícím obrázku 4.2 je naznačen příklad výpočtu stromu poruchových stavů. S využitím předchozích vztahů určujeme pravděpodobnost od nejnižších primárních událostí až po vrcholovou událost. Postupně od spodu projdeme všechna hradla stromu

poruch a na základě jejich typu určíme pravděpodobnost nastoupení jevu (uvažujeme pravděpodobnost poruchy). V případě hradla typu OR se pravděpodobnost nastoupení jevu určí podle vzorce (4.15). Při použití hradla AND se pravděpodobnost nastoupení jevu určí podle vzorce (4.16).



Obr. 4.2 Příklad výpočtu stromu poruchových stavů

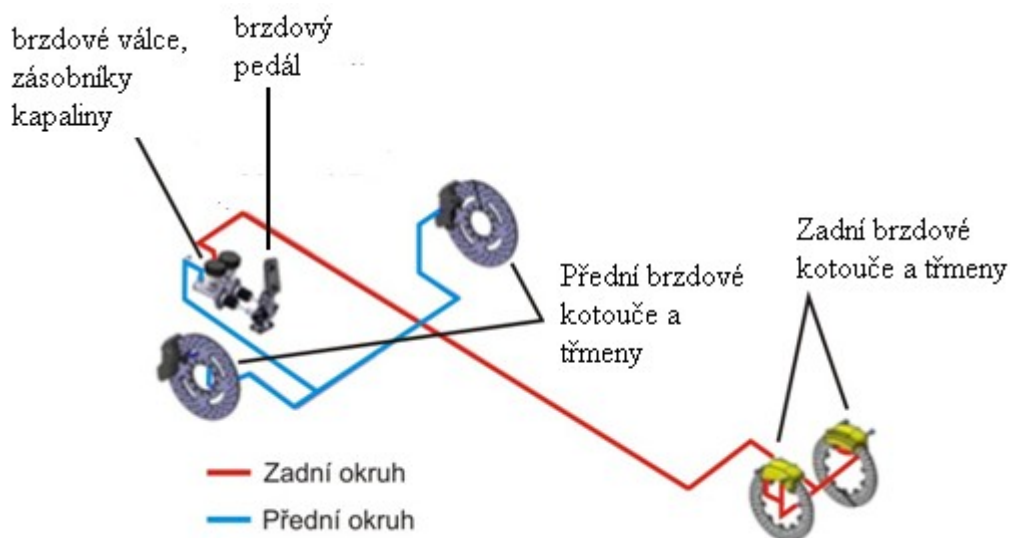
5. Brzdová soustava

Brzdová soustava představuje velmi důležitou část vozidla týkající se aktivní bezpečnosti. Slouží ke zpomalování rychlosti vozidla nebo k úplnému zastavení. Brzdové soustavy ve velké většině pracují na principu zvětšování odporu tření. Při brzdění vozidla se zmenšuje pohybová energie, která se následně přeměňuje na teplo. Brzdy jsou ovládány pouze nohou řidiče a jejich účinek musí být odstupňovaný. Brzdná síla musí působit optimálně na všechna 4 kola a při brzdění nesmí dojít k vychýlení vozidla z přímého směru.

Brzdění vozidla se dosahuje záměrně vyvolaným třením mezi rotujícími a pevnými částmi brzd. Mechanická energie vložená do tohoto děje se mění téměř úplně v energii tepelnou. Brzdové zařízení obsahuje ústrojí pro dodávku energie, ovládací ústrojí, převod a vlastní brzdu. Vlastní brzda je ta část brzdové soustavy, ve které vznikají síly působící proti pohybu vozidla.

5.1 Brzdová soustava formule Student

Studentská formule je podobně jako sériové osobní automobily vybavena dvojicí nezávislých okruhů, kdy jeden okruh ovládá přední brzdy a druhý okruh slouží k ovládání brzd zadních.



Obr. 5.1 Schéma brzdové soustavy [7]

Brzdová soustava je hydraulická a tlak v tomto systému je vyvíjen pomocí hlavních brzdových válců. Oba okruhy jsou vybaveny jedním brzdovým válcem. Tyto oddělené nezávislé okruhy jsou velmi důležité pro případy poruchy. Pokud dojde k závadě na jednom okruhu např. předním, je pilot schopen bezpečně zastavit prostřednictvím zadních brzd. Výrazně se tak eliminuje riziko úplného selhání brzdného účinku.

U závodních vozů, kde jsou brzdové okruhy rozděleny pro přední nápravu a zadní nápravu zvlášť, se používá tzv. rozdělovač brzdných sil. Ten je umístěn mezi brzdovým pedálem a táhlem hlavních brzdových válců. Jde o systém regulace rozdělení síly jdoucí od brzdového pedálu na brzdové válce přední a zadní nápravy. Tento mechanismus je možné pomocí bowdenu ovládat i z dosahu řidiče během jízdy a jezdec tak může optimálně regulovat poměr brzdných momentů na nápravách dle potřeby.



Obr. 5.2 Pedálová soustava [8]

Jak je vidět na obr. 5.1 jsou v brzdovém systému formule použity kotoučové brzdy. V současnosti používají závodní vozidla výhradně brzdové kotouče zejména pro lepší brzdné a údržbové vlastnosti.

V případě použití velkých brzdových kotoučů je pak možné použití i rozměrnějších brzdových destiček, čímž se docílí většího tření a tedy i brzdné síly. Vyšší počet pístků vede k rovnoměrnějšímu rozložení sil na brzdovou destičku. Na přední nápravě se tak používají větší brzdové třmeny než na nápravě zadní. Důvodem je, že při brzdění dochází ke změně zatížení přední nápravy, kdy se hmotnost vozu přesouvá právě na přední nápravu, a proto jsou zde potřebné i výkonnější brzdy. Zmařená energie se v brzdách mění na teplo, které je nutné následně odvádět. Využívá se k tomu náporový vzduch, který je přiváděn chladícími kanály. Na předních brzdách byly zvoleny pevné brzdové třmeny se 4 písty a na zadních brzdách plovoucí třmeny se 2 písty.



Obr. 5.3 Pevný brzdový třmen a brzdový kotouč

Předpisy pro závodní monopost říkají, že v rozvodech brzdové kapaliny nesmí být použity plastové hadice. Brzdové hadice musí být opatřeny ocelovým opletem, který je chrání před porušením a zabraňuje možným deformacím. K tomu může docházet při intenzivním brzdění vozidla s následným vlivem vysokého tlaku brzdové kapaliny.

Brzdová kapalina je základní prvek používaný pro přenos síly mezi hlavním brzdovým válcem a brzdovými válečky (písty) na kolech. Nachází se v hydraulickém brzdovém obvodu a každému brzdovému okruhu je určena jedna nádobka na brzdovou kapalinu. Levá obsluhuje přední a pravá zadní okruh. Jejich velikost se pohybuje od 100 do 250 cm³. Brzdová kapalina je nestlačitelná a navržena tak, aby dokázala odolávat vysokým teplotám bez změny svého stavu, což zamezuje vytváření vzduchových bublin, které by mohly způsobit nepředvídatelné potlačení reakce brzd na sešlápnutí brzdového pedálu.

5.2 Analýza stromu poruchových stavů

V kapitole 4.5 byl vysvětlen postup konstrukce FTA. Následně byly sestaveny stromy poruch popisující možné poruchy brzdové soustavy. Analýza FTA byla vypracována pro následující 3 vrcholové události:

- brzda nebrzdí
- brzda přibrzdí
- malá účinnost brzd

Pro každou tuto událost byl vypracován strom poruchových stavů vedoucí na jednotlivé primární události. Ten tedy představuje možnosti poruch prvků, které mohou nastat a přispívají ke vzniku vrcholové události.

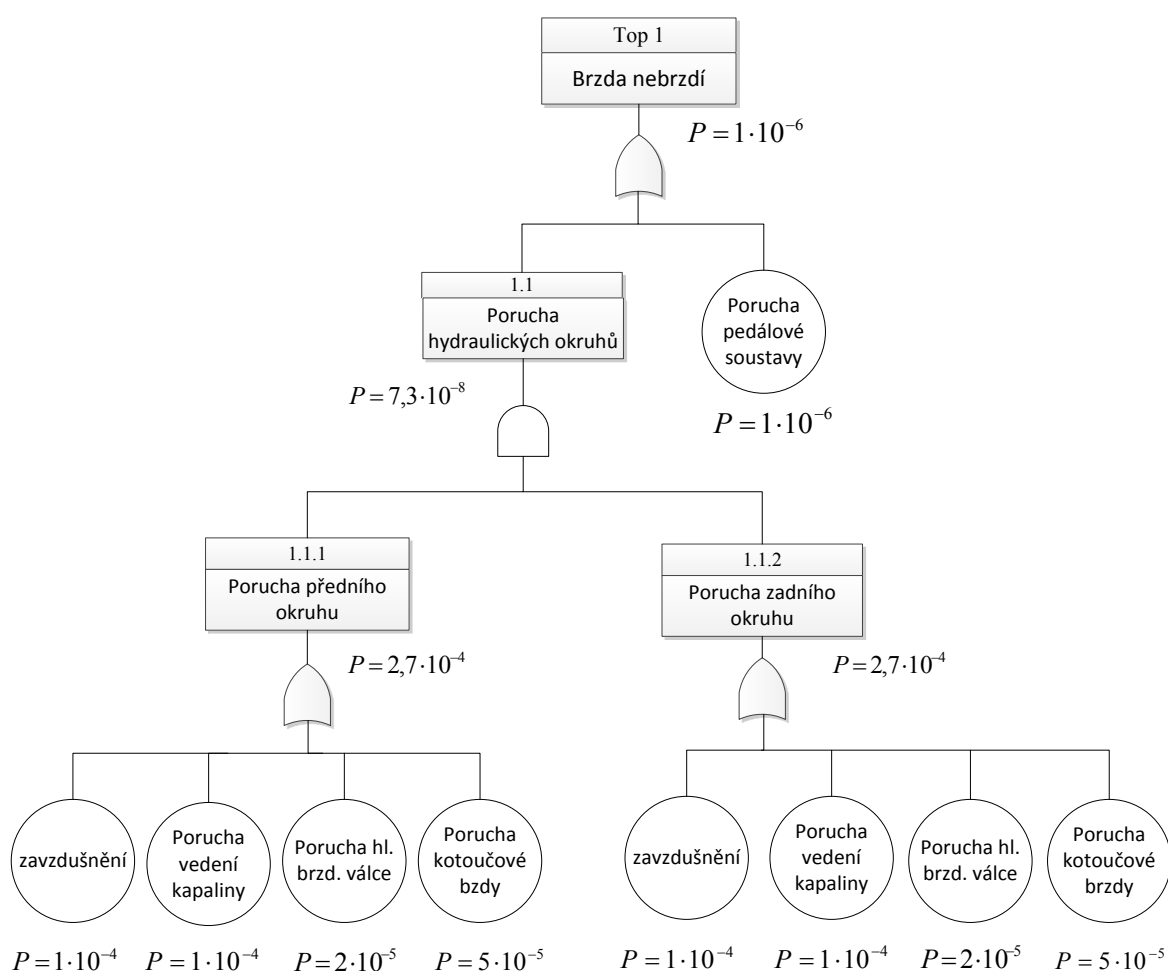
Při kvantitativním hodnocení FTA byly následně jednotlivým primárním událostem přiděleny konkrétní hodnoty pravděpodobností poruch. Z důvodu absence dat o bezporuchovosti se tak jedná o zvolené hodnoty. Pomocí pravidel uvedených v kapitole 4.5 následně mohou být vypočteny pravděpodobnosti výskytu mezilehlých událostí a vrcholové události. Vypočet byl proveden pomocí programu Excell, který je součástí přílohy.

FTA brzda nebrzdí

Na obr. 5.4 je znázorněn strom poruch pro vrcholovou událost kdy brzda vůbec nebrzdí. Pomocí hradla OR je strom dále rozvinut na poruchu hydraulických okruhů nebo poruchu pedálové soustavy.

V případě pedálové soustavy může vést k úplné ztrátě brzdného účinku poškození nebo ulomení pedálu, případně rozdělovače brzdných sil.

Hydraulické okruhy jsou pomocí hradla AND rozděleny na poruchu předního a zadního okruhu. K nefunkčnosti brzdového systému by tak muselo dojít k poruše na obou okruzích současně.



Obr. 5.4 FTA brzda nebrzdí

Porucha vedení kapaliny může být způsobena poškozeným vedením např. prasklou hadicí.

Zavzdušnění může vzniknout při používání degradované kapaliny se sníženým bodem varu.

V případě poruchy brzdového válce se může jednat o úplné zadření pístu brzd. válce, prasklý brzdový válec nebo poškozené těsnění v brzdovém válci.

U poruchy kotoučové brzdy se může jednat o poškozené těsnění pístů brzdových třmenů, úplné zadření pístů brzdových třmenů, rozlomené brzdové destičky, prasklý brzdový kotouč nebo brzdový třmen.

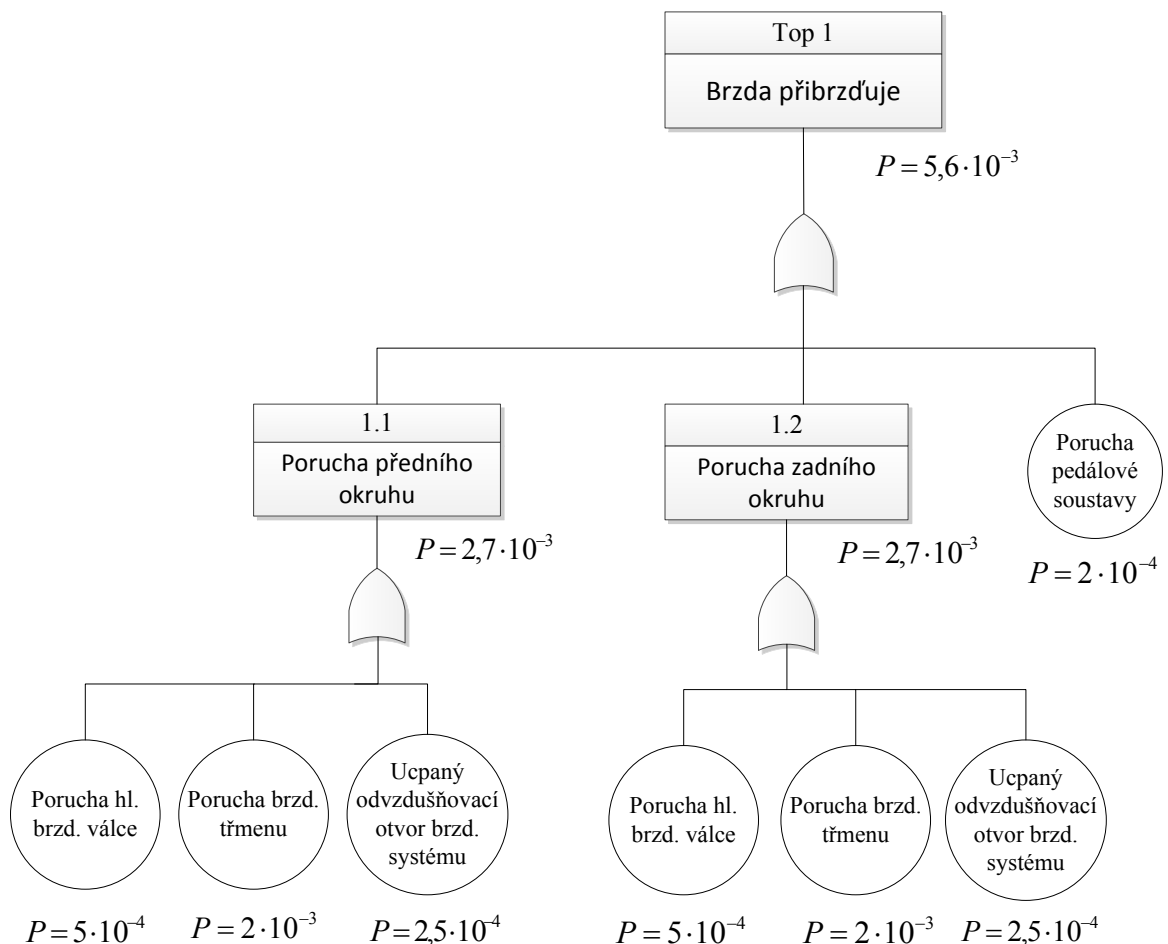
Dříve než dojde k naprosté nefunkčnosti brzdového systému, zapříčiní většinou uvedené závady zmenšenou účinnost brzd nebo jejich přibrzdování. Při pravidelné výměně brzdové kapaliny v předepsané lhůtě, sledování jejího množství, testování bodu varu kapaliny a při provádění kontrol stavu brzdové soustavy (destičky, pedálová soustava) je nefunkčnost celého brzdového systému u dvouokruhové soustavy velice nepravděpodobná. Muselo by dojít k velmi vážným závadám na obou okruzích současně, nebo k úplné destrukci pedálové soustavy.

FTA brzda přibrzdí

Na obr. 5.5 je znázorněn strom poruch pro případ přibrzdování. Vrcholovou událostí je tedy stav, kdy brzda přibrzdí. To mohou způsobit závady, které jsou pomocí hradla OR rozděleny na poruchu předního nebo zadního okruhu nebo poruchu pedálové soustavy.

V případě pedálové soustavy může vést k přibrzdování např. prasklá pružina pedálu nebo předřetížení uložení pedálu nebo sférického ložiska pedálového mechanismu

Brzdové okruhy jsou pak hradlem OR rozděleny na další možné poruchy zapříčiňující možnost přibrzdování.



Obr. 5.5 FTA brzda přibrzdí

Přibrzdování může u brzdového válce vyvolat snížená pohyblivost pístu vlivem vniknutí nečistot kolem poškozených prachovek, začínající koroze v brzdovém válci nebo prasklá pružina brzdového válce.

Při poruše brzdového třmenu se může jednat o sníženou pohyblivost pístů brzdového třmenu vlivem vniknutí nečistot kolem poškozených prachovek, začínající korozi v těle brzdového třmenu nebo sníženou pohyblivost uložení plovoucích třmenů u zadního okruhu.

K ucpání odvodušňovacího otvoru může dojít vniknutím nečistot.

Přibrzdováním brzd může docházet k nadměrnému opotřebenosti brzdových destiček a brzdových kotoučů, k vysoké teplotě brzdových kotoučů a příp. k jejich zvlnění. To má za následek zmenšení brzdné účinnosti a snížení jízdního komfortu. Při pravidelné výměně brzdové kapaliny v předepsané lhůtě, však k zadírání pístů brzdových válců a brzdových třmenů prakticky nedochází a při provádění pravidelných kontrol stavu prachovek

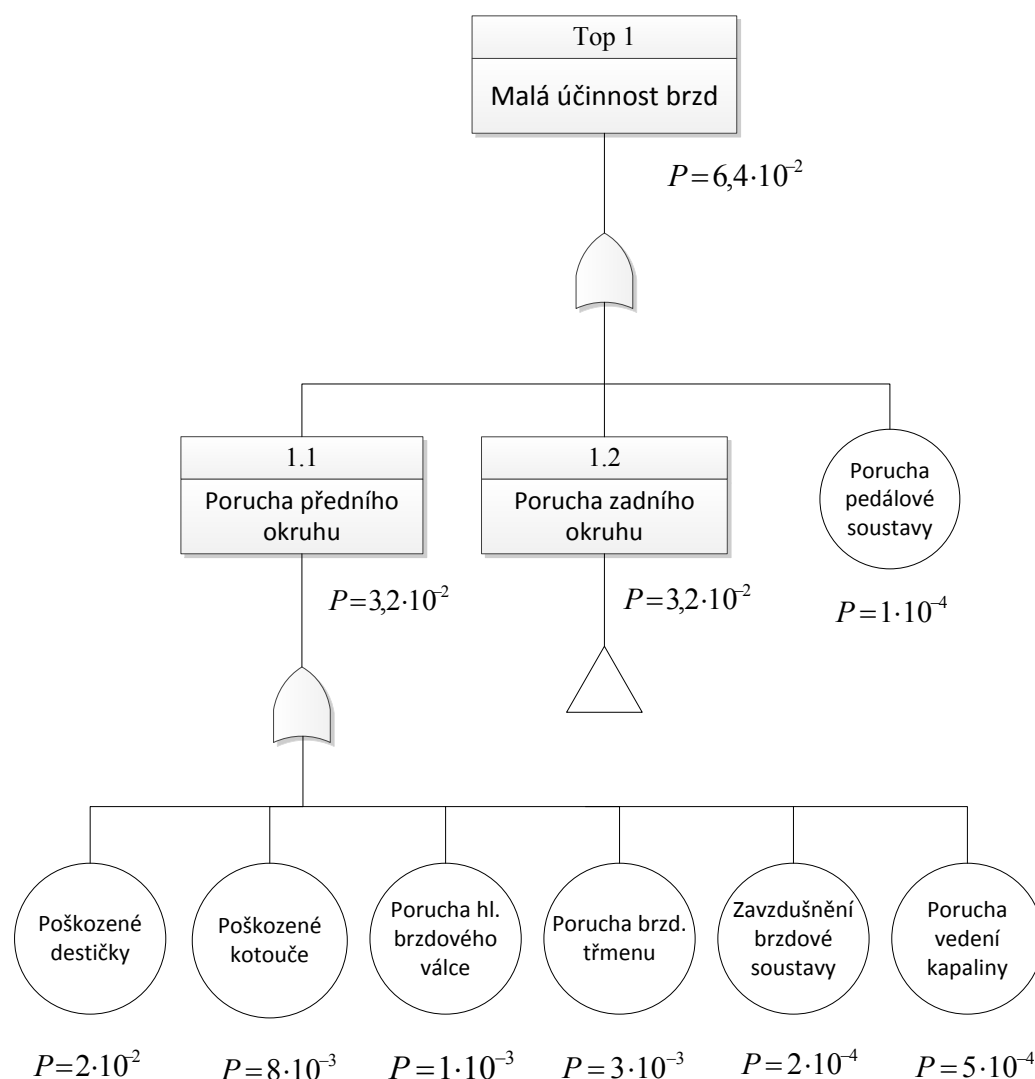
brzdových válců a třmenů a stavu pedálové soustavy je přibrzdování brzd málo pravděpodobné.

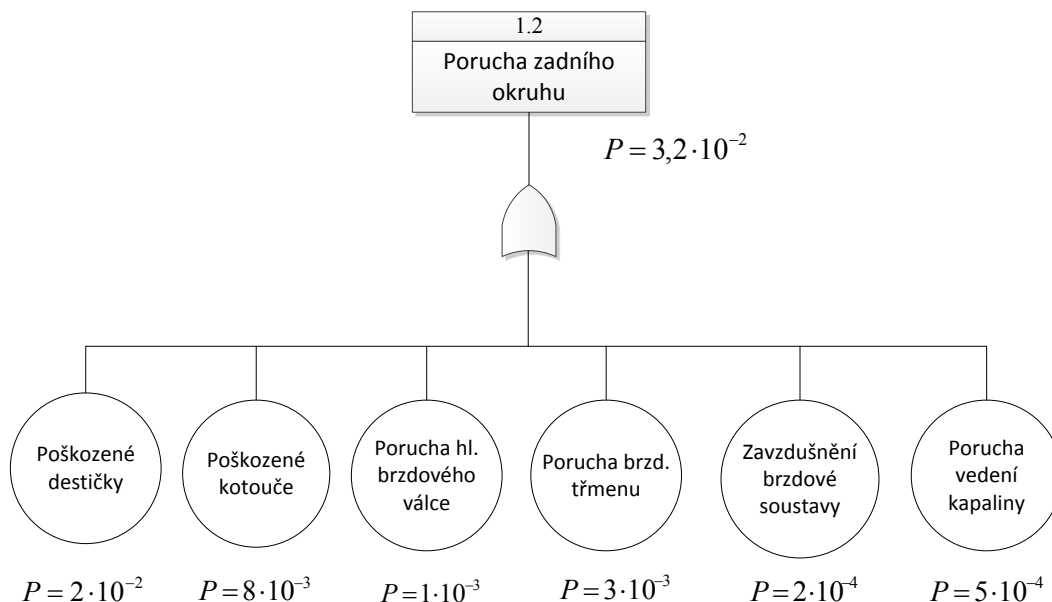
FTA malá účinnost brzd

Na obr. 5.6 je znázorněn strom poruch pro případ malé účinnosti brzd. Pomocí hradla OR je strom dále rozvinut na poruchu předního nebo zadního okruhu nebo poruchu pedálové soustavy.

V případě pedálové soustavy může menší účinnost brzd způsobit snížená pohyblivost brzdového pedálu nebo sférického ložiska pedálu, také nadměrné opotřebení a vznik velkých vůlí v pedálové soustavě mohou způsobit zadržávání pedálu a nepřesné rozdělení brzdných sil.

Brzdové okruhy jsou pak hradlem OR rozděleny na další možné poruchy zapříčiňující snížení brzdného účinku.





Obr. 5.6 FTA malá účinnost brzd

U brzdových destiček může docházet k velkému nebo nerovnoměrnému opotřebení způsobeném dlouhou dobou používání, nebo vniknutím nečistot mezi brzdové destičky a brzdový kotouč nebo sníženou pohyblivostí pístů brzdových třmenů a uložení u plovoucích třmenů. Vysoké teploty při brzdění mohou způsobit sklovitý nebo drolivý povrch destiček, což může vést k následnému snížení brzdného účinku.

V případě poruchy brzdového válce může dojít k poškození těsnění pístu, ke snížení pohyblivosti pístu vlivem vniknutí nečistot přes poškozené prachovky nebo začínající korozi v brzdovém válci.

U brzdových třmenů může rovněž docházet k poškození těsnění pístu brzdového třmenu, snížení pohyblivosti pístu brzdového třmenu vlivem vniknutí nečistot, začínající korozi uvnitř brzdového třmenu nebo k snížení pohyblivosti uložení plovoucích třmenů u zadního okruhu.

Zavzdušnění brzdové soustavy může vzniknout u znehodnocené kapaliny se sníženým bodem varu a jejím následným vřením při provozu. Nebo při malém množství kapaliny v brzdovém systému, což může být způsobeno poškozením zásobníku kapaliny nebo netěsností brzdové soustavy.

Porucha vedení kapaliny bývá způsobena únikem kapaliny z brzdového systému přes spoje a šroubení nebo poškozeným vedením.

K předcházení závad způsobujících sníženou účinnost brzd je třeba při servisních úkonech kontrolovat stav prachovek brzdových válců a třmenů, stav pedálové soustavy, dodržovat předepsané parametry brzdových destiček a kotoučů a termíny pro výměnu brzdové kapaliny. Při včasné výměně brzdové kapaliny nedochází ke korozi v hydraulickém systému a tím se zvyšuje jeho životnost a zmenšuje pravděpodobnost vzniku závad.

6. Návrh zkoušek spolehlivosti

Pokud známe pravděpodobnosti výskytu jednotlivých primárních událostí z předchozí analýzy FTA, můžeme pak pro ně navrhnout zkoušky spolehlivosti.

Dříve než dojde k naprosté nefunkčnosti brzdového systému, zapříčiní jednotlivé závady (kromě úplné destrukce pedálové soustavy nebo vedení kapaliny) zmenšenou účinnost brzd. Proto při návrhu spolehlivostních zkoušek vycházím z analýzy FTA pro malou účinnost brzdového systému.

V této kapitole jsou uvedeny příklady stanovení spolehlivostních zkoušek pro komponenty brzdové soustavy. U každé zkoušky je možné určit minimální ekvivalentní dobu, během které lze na dané úrovni konfidence prokázat splnění požadavků na spolehlivost. Nutnou podmínkou je, že zkouška musí proběhnout během minimální doby zkoušky bez poruchy.

Při výpočtu pracujeme s náhodnou veličinou. To znamená, že v případě kdy provádíme pouze jednu zkoušku, tak její výsledek může být zkreslený právě vlivem náhodného působení. Z toho důvodu je při zkouškách nutné najet více kilometrů nebo zkoušený celek musí pracovat po delší dobu, než je požadovaná minimální doba do poruchy. Takové zkoušky nám dají jistotu požadované bezporuchovosti. Dále se omezíme na případy, kdy sledovaná náhodná proměnná má exponenciální rozdělení. Zkoušky jsou prováděné pomocí zkušebních plánů a tedy s předpokladem že proběhnou bez poruchy.

Při zjišťování spolehlivostních parametrů vozidla se obvykle vychází z některého z následujících parametrů:

- čas – jak dlouho je výrobek schopen bezporuchového provozu
- vzdálenost – kolik km je výrobek v průměru schopen ujet do poruchy

Z důvodu absence dat o bezporuchovosti jsme nuceni provést návrh intervalů údržby na základě odhadu. Po jízdách zkouškách a sběru potřebných dat bude možné jednotlivé intervaly upřesnit, tzn., dle potřeby je budeme moci prodloužit, případně zkrátit.

Pro potřeby výpočtu je tak nutné určit intervaly výměny jednotlivých brzdových komponentů. Pro zvolené intervaly pak budou napočítány spolehlivostní zkoušky. Např. u brzdových destiček uvedu výpočet spolehlivostní zkoušky pro případ, kdy bych uvažoval jejich výměnu po každém závodním víkendu. U jiných komponentů méně náchylných na poruchu jsou zvolené intervaly delší a uvedeny v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Interval výměny

komponenty	interval výměny
brzdové destičky	1 závodní víkend
brzdové kotouče	3 závodní víkendy
brzdové válce	1 závodní sezóna
brzdové třmeny	1 závodní sezóna
pedálová soustava	1 závodní sezóna
vedení kapaliny	1 závodní sezóna

Závodní víkend se skládá:

- vytrvalostní závod - délka 22 km
- osmička – délka 1 km
- akcelerace – délka 75 m
- autokros
- trénink

Při výpočtu uvažuji, že formule během závodního víkendu absolvuje všechny disciplíny a tak v součtu spolu s tréninkem najede kolem 30 km. Předpokládám, že závodní sezóna se bude skládat z 6 závodů plus testování mezi jednotlivými závody. Odhadem tak můžu určit najetou vzdálenost během závodní sezóny na 330 km.

Dále je v případě některých komponentů brzdové soustavy nutné zjistit počet vykonaných cyklů během závodní sezóny. Na základě počtu najetých kilometrů během závodních víkendů a odhadnuté brzdové vzdálenosti (10%), jsem odhadem určil počet vykonaných cyklů připadajících na testování a následný závodní víkend na 1000 cyklů. Při 6 závodních víkendech je to tedy 6000 cyklů během závodní sezóny.

Než přistoupíme k jednotlivým výpočtům, stanovíme si počet stupňů volnosti pro rozdělení chí-kvadrát

$$\nu = 2 \cdot (r + 1) \quad (6.1)$$

kde:

r – počet poruch, ν našem případě uvažujeme $r = 0$

$$\nu = 2 \cdot (r + 1) = 2 \cdot (0 + 1) = 2$$

Zkouška brzdových destiček

Destičky a následně i brzdové kotouče je možné sledovat od nabrzděné vzdálenosti. Pokud známe množství najetých km formule během závodního víkendu, můžeme odhadnout nabrzděnou dráhu. Při předpokladu, že brzdíme 10% ujeté dráhy, vyjde nám brzdná dráha za závodní víkend 3000 m.

U brzdových destiček počítám s pravděpodobností poruchy $4 \cdot 10^{-2}$, tedy že s 96% pravděpodobností odjedeme závodní víkend bez závady způsobující menší účinnost brzd.

- počet nabrzděných metrů během závodního víkendu: $l = 3000$ m
- pravděpodobnost poruchy brzdových destiček jednoho okruhu $P = 2 \cdot 10^{-2}$



Obr. 6.1 Brzdové destičky [9]

Brzdové destičky zkusíme v páru a každému páru následně přiřadíme pravděpodobnost poruchy.

Bezporuchovost jednoho páru destiček

$$R_L = R_P = \sqrt{R_C} = \sqrt{0,98} = 0,989$$

Pravděpodobnost poruchy jednoho páru brzdových destiček

$$P_L = P_p = 1 - R_L$$

$$P_L = P_p = 1 - 0,989 = 0,01$$

Při výpočtu vycházíme ze vzorce (4.2) pro vyjádření distribuční funkce exponenciálního rozdělení, ze které lze po úpravě vyjádřit intenzitu poruch λ .

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

$$\ln[1 - F(l)] = -\lambda \cdot l$$

$$\lambda = \frac{-\ln[1 - F(l)]}{l} = \frac{-\ln[1 - 0,01]}{3000}$$

$$\lambda = 3,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$$

Převrácenou hodnotou intenzity poruch můžeme dopočítat střední dráhu do poruchy L_S

$$L_S = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{3,36 \cdot 10^{-6}}$$

$$L_S = 297\,000 \text{ m} = 297 \text{ km}$$

Zkoušky prováděné pomocí zkušebních plánů se v případě prvků popsaných exponenciálním rozdělením vyhodnocují podle vzorce (4.9). Ze vzorce pak můžeme vyjádřit akumulovaný pracovní čas, v tomto případě akumulovanou dráhu. Uvažujeme případ zkoušky jednoho prvku na úrovni konfidence $C = 0,7$ používané při vývoji prototypu.

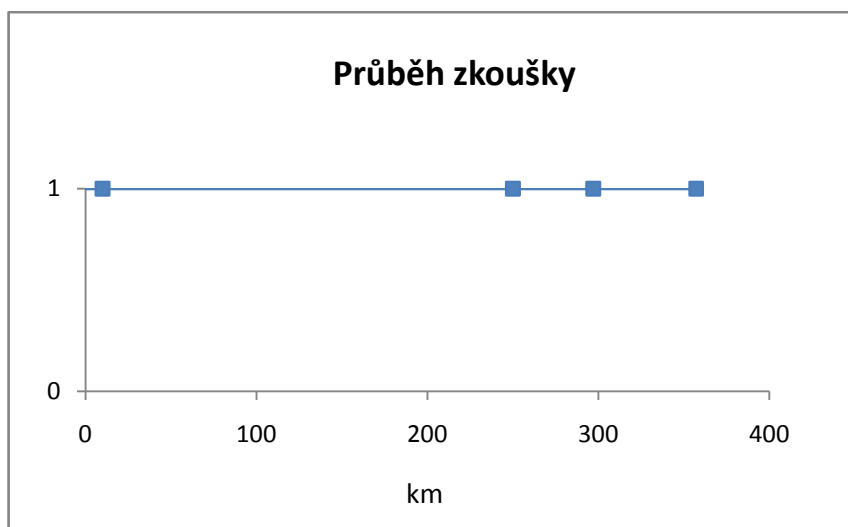
$$L_{AKU} \geq \frac{L_S \cdot \chi_{C,v}^2}{2} = \frac{\chi_{C,v}^2}{2 \cdot \lambda}$$

Vzorec je pak vhodné pro zjednodušení upravit do podoby, kdy znaménko větší nebo rovno se nahradí znaménkem rovná se.

$$L_{AKU} = \frac{297 \cdot 2,407}{2}$$

$$L_{AKU} = 357 \text{ km}$$

Z výpočtu vyplývá, že k prokázání splnění požadavku na spolehlivost je třeba při běžné zkoušce nabrzdit s brzdovými destičkami 357 km, což vyjadřuje délku zkoušky. Na následujícím obrázku 6.2 je znázorněn průběh zkoušky s vyznačenými kontrolními body.



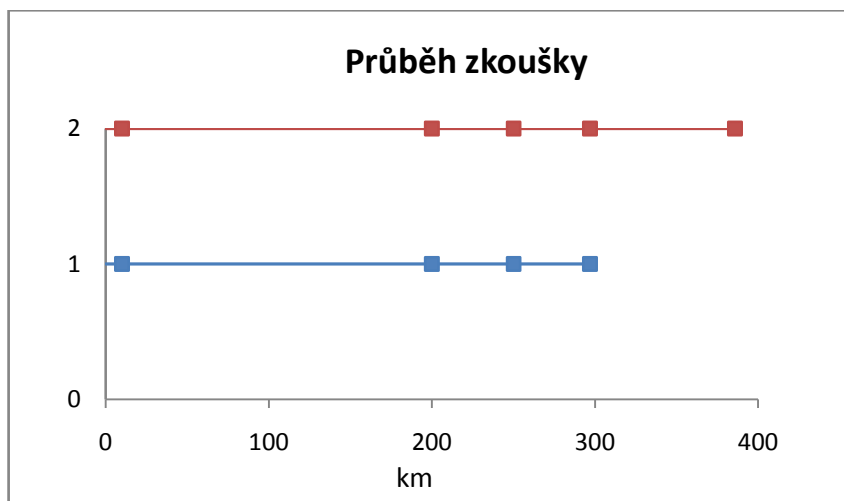
Obr. 6.2 Graf průběhu zkoušky brzdových destiček

Při změně konfidenční úrovně na hodnotu $C = 0,9$ používané u běžných sériových výrobků docílíme navýšení akumulované dráhy.

$$L_{AKU} \geq \frac{L_S \cdot \chi_{C,v}^2}{2} = \frac{297 \cdot 4,605}{2}$$

$$L_{AKU} = 683 \text{ km}$$

V tomto případě tak můžeme do zkoušky zařadit 2 páry brzdových destiček, přičemž první zkoušíme minimálně do hodnoty L_S a druhý až do zbývající hodnoty akumulované dráhy danou rozdílem $L_{AKU} - L_S$ (386 km). Průběh takové zkoušky je pak znázorněn na obr. 6.3



Obr. 6.3 Graf průběh zkoušky brzdových destiček

Tab. 6.2 Zkouška brzdových destiček

podmínky zkoušky	sledované poruchy	ostatní sledované vady
zkušební zařízení 80% dovolené max. teploty při 50% max. přitlačné síly	poškození destiček opotřebení na min. mez	ztráta účinnosti brzd drolení povrchu spékání hlučnost

Zkouška brzdových kotoučů

- počet nabrzděných metrů během 3 závodních víkendů a testování: $l = 16500 \text{ m}$
- pravděpodobnost poruchy brzdových kotoučů jednoho okruhu $P = 8 \cdot 10^{-3}$



Obr. 6.4 Brzdové kotouče

Stejně jako u brzdových destiček stanovíme pravděpodobnost poruchy jednoho kotouče, která je $P = 4 \cdot 10^{-3}$

Intenzita poruch brzdového kotouče

$$\lambda = \frac{-\ln[1 - F(l)]}{l} = \frac{-\ln[1 - 0,004]}{16500}$$

$$\lambda = 2,43 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$$

Při známé hodnotě intenzity poruch můžeme dopočítat střední dráhu do poruchy L_S

$$L_S = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,43 \cdot 10^{-7}}$$

$$L_S = 4108 \text{ km}$$

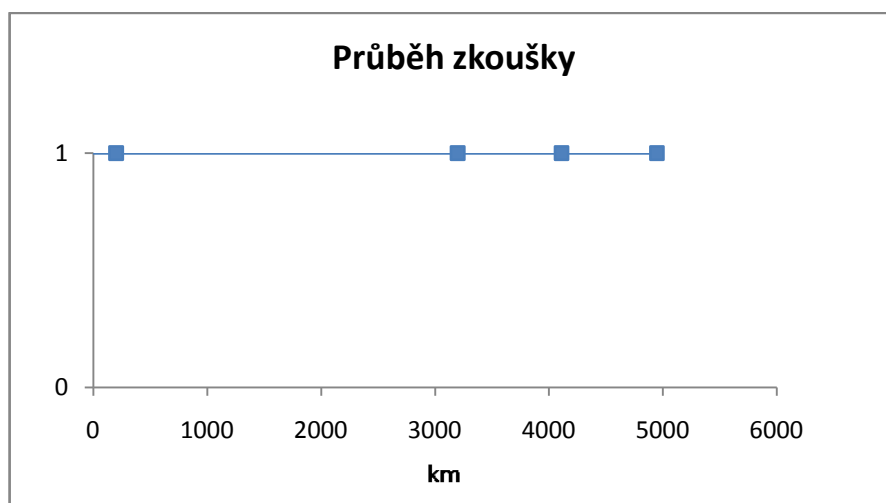
Uvažujeme případ zkoušky jednoho prvku na úrovni konfidence $C = 0,7$. Akumulovaná dráha je pak rovna:

$$L_{AKU} \geq \frac{\chi_{C,v}^2}{2\lambda} = \frac{\chi_{0,7,2}^2}{2\lambda}$$

$$L_{AKU} = \frac{4,605}{2 \cdot 2,43 \cdot 10^{-7}}$$

$$L_{AKU} = 4946 \text{ km}$$

Z výpočtu vyplývá, že k prokázání splnění požadavku na spolehlivost je třeba při běžné zkoušce nabrzdit s brzdovým kotoučem 4946 km, což vyjadřuje délku zkoušky.



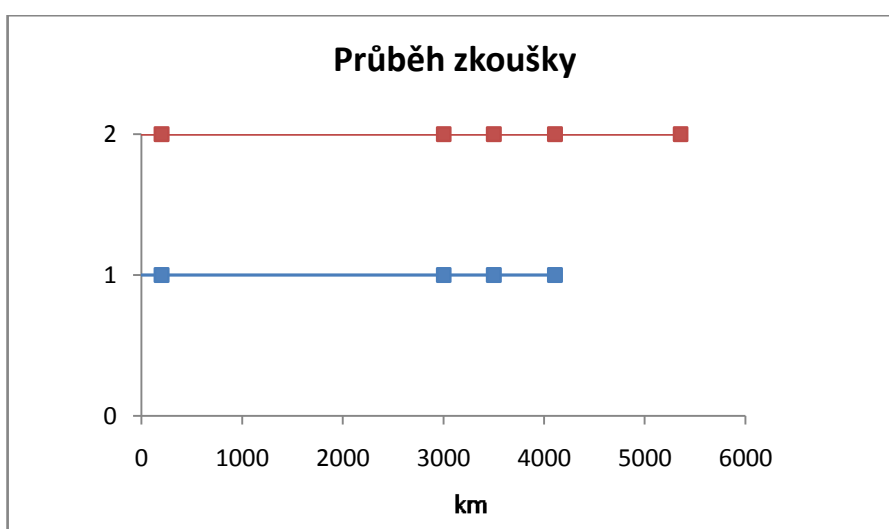
Obr. 6.5 Graf průběhu zkoušky brzdového kotouče

Při změně konfidenční úrovně na hodnotu $C = 0,9$

$$L_{AKU} \geq \frac{\chi_{0,9,2}^2}{2\lambda} = \frac{4,605}{2 \cdot 2,43 \cdot 10^{-7}}$$

$$L_{AKU} = 9460 \text{ km}$$

V tomto případě je již akumulovaná dráha více než dvojnásobně větší než střední dráha do poruchy. Do zkoušky tak můžeme zařadit 2 ks. brzdových kotoučů, přičemž jeden je zkoušen do střední dráhy do poruchy L_S a druhý do zbývající akumulované dráhy $L_{AKU} - L_S$ (5352 km). Průběh zkoušky s kontrolními body je znázorněn na obr. 6.6.

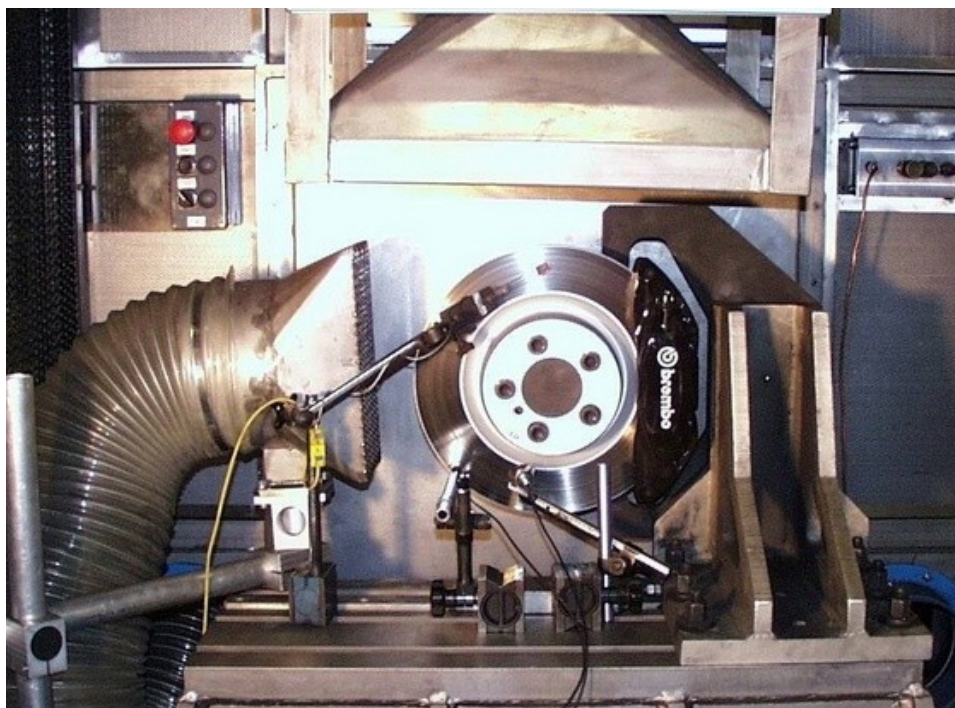


Obr. 6.6 Graf průběhu zkoušky brzdových kotoučů

Tab. 6.3 Zkouška brzdového kotouče

podmínky zkoušky	sledované poruchy	ostatní sledované vady
zkušební zařízení 80% dovolené max. teploty při 50% max. přitlačné síly	poškození kotouče opotřebení na min. mez	ztráta účinnosti brzd hlučnost teplota kotouče házivost kotouče

Zkoušku brzdového kotouče a brzdových destiček provádíme na zkušebním zařízení společně a ukázka zkoušky brzdového kotouče je na obr. 6.7 případně na obrázku v příloze A.



Obr. 6.7 Zkouška brzdového kotouče [10]

Zkouška brzdového válce

- počet vykonaných cyklů během závodní sezóny: $n = 6000$
- pravděpodobnost poruchy brzdového válce $P = 1 \cdot 10^{-3}$



Obr. 6.8 Brzdový válec

Brzdové válce je možné sledovat od počtu vykonaných cyklů.

Intenzita poruch brzdového válce

$$\lambda = \frac{-\ln[1 - F(n)]}{n} = \frac{-\ln[1 - 0,001]}{6000}$$

$$\lambda = 1,66 \cdot 10^{-7} \text{ cyklus}^{-1}$$

Při známé hodnotě intenzity poruch můžeme dopočítat střední počet cyklů do poruchy N_S

$$N_S = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1,66 \cdot 10^{-7}}$$

$$N_S = 5,99 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

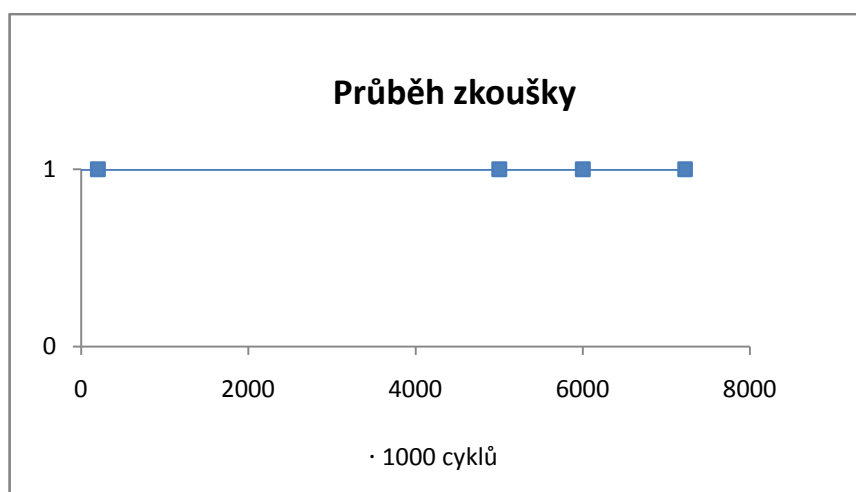
Uvažujeme případ zkoušky jednoho prvku na úrovni konfidence $C = 0,7$. Výpočet akumulovaných cyklů pak je:

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{C,v}^2}{2\lambda} = \frac{\chi_{0,7,2}^2}{2\lambda}$$

$$N_{AKU} = \frac{2,407}{2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-7}}$$

$$N_{AKU} = 7,27 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

Z výpočtu vyplývá, že k prokázání splnění požadavku na spolehlivost je třeba při běžné zkoušce vykonat brzdovým válcem $7,27 \cdot 10^6$ cyklů, což vyjadřuje dobu zkoušky. Na obrázku 6.9 je znázorněn průběh zkoušky s vyznačenými kontrolními body.



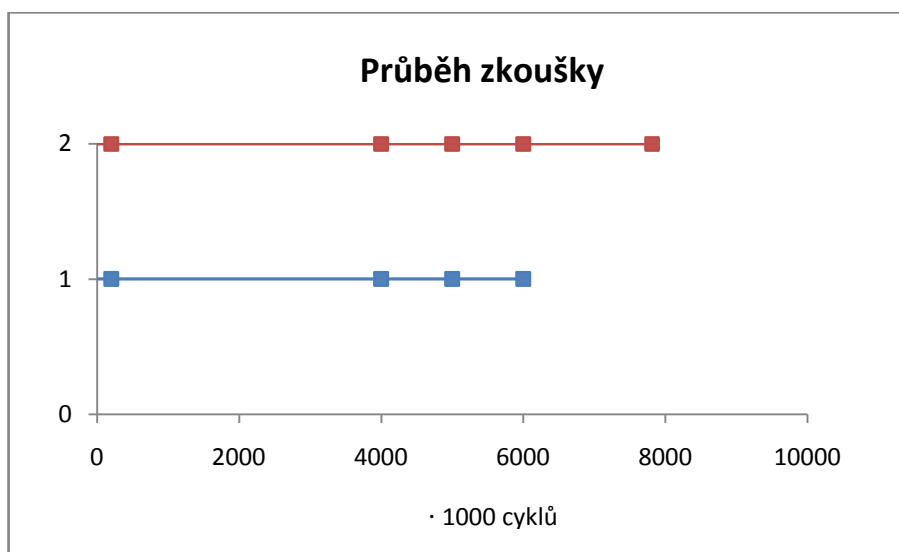
Obr. 6.9 Graf průběhu zkoušky brzdového válce

Při konfidenční úrovni $C = 0,9$

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{0,9,2}^2}{2\lambda} = \frac{4,605}{2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-7}}$$

$$N_{AKU} = 13,8 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

Do zkoušky tak můžeme zařadit 2 ks. brzdových válců, přičemž jeden je zkoušený do středního počtu cyklů do poruchy N_S a druhý do zbývajících cyklů daných rozdílem $N_{AKU} - N_S$ ($7,8 \cdot 10^6$ cyklů).



Obr. 6.10 Graf průběhu zkoušky brzdových válců

Tab. 6.4 Zkouška brzdového válce

podmínky zkoušky	sledované poruchy	ostatní sledované vady
automatické impulsní zařízení při 60% max. tlaku při správné jakosti kapaliny	netěsnost válce zadření pístu prasklá pružina válce	opotřebení válce opotřebení pístu válce opotřebení prachovek opotřebení těsnění

Zkouška brzdového válce se provádí na automatickém zařízení vyvíjejícím tlakové pulsace a simuluje se činnost brzdových třmenů tak, aby činnost válce odpovídala činnosti při provozu.

Zkouška brzdového třmenu

- počet vykonaných cyklů během závodní sezóny: $n = 6000$
- pravděpodobnost poruchy brzdových třmenů jednoho okruhu $P = 3 \cdot 10^{-3}$



Obr. 6.11 Brzdové třmeny [11]

Stav brzdových třmenů je možné sledovat od počtu vykonaných cyklů.

Bezporuchovost jednoho brzdového třmenu

$$R_L = R_p = \sqrt{R_C} = \sqrt{0,9997} = 0,9985$$

Pravděpodobnost poruchy brzdového třmenu

$$P_L = P_p = 1 - R_L$$

$$P_L = P_p = 1 - 0,9985 = 0,0015$$

Intenzita poruch brzdového třmenu

$$\lambda = \frac{-\ln[1 - F(n)]}{n} = \frac{-\ln[1 - 0,0015]}{6000}$$

$$\lambda = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ cyklus}^{-1}$$

Při známé hodnotě intenzity poruch můžeme dopočítat střední počet cyklů do poruchy N_S

$$N_S = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-7}}$$

$$N_S = 3,99 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

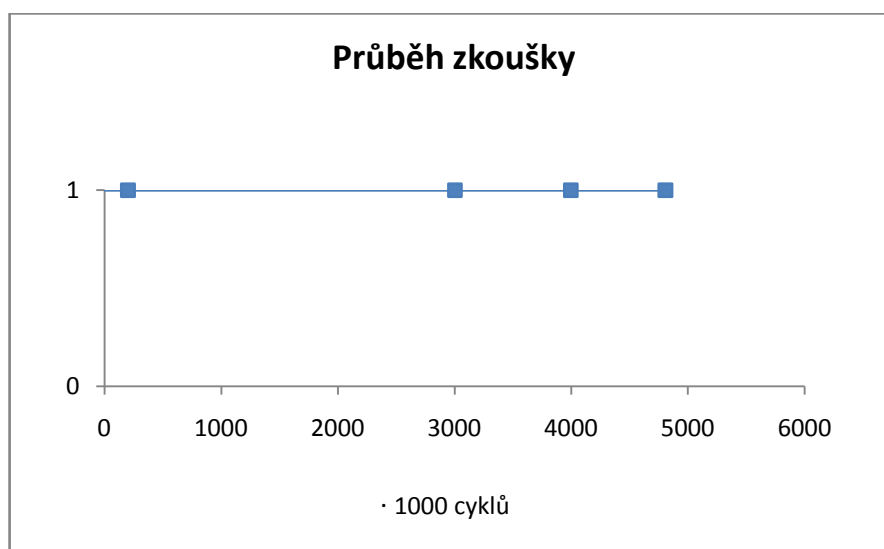
Uvažujeme případ zkoušky jednoho prvku na úrovni konfidence $C = 0,7$. Výpočet akumulovaných cyklů pak je:

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{C,v}^2}{2\lambda} = \frac{\chi_{0,7,2}^2}{2\lambda}$$

$$N_{AKU} = \frac{2,407}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7}}$$

$$N_{AKU} = 4,81 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

Z výpočtu vyplývá, že k prokázání splnění požadavku na spolehlivost je třeba při běžné zkoušce testovat brzdový třmen na $4,81 \cdot 10^6$ cyklů, což vyjadřuje dobu zkoušky.



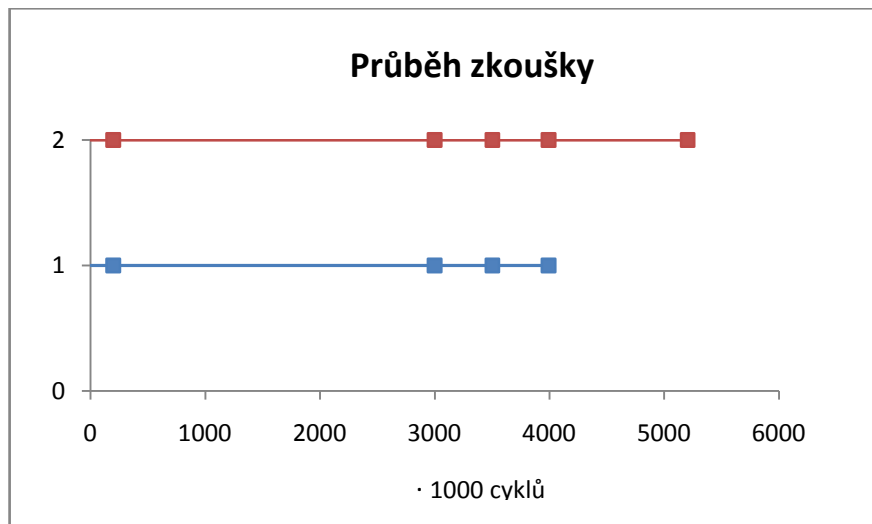
Obr. 6.12 Graf průběhu zkoušky brzdového třmenu

Při konfidenční úrovni $C = 0,9$

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{0,9,2}^2}{2\lambda} = \frac{4,605}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7}}$$

$$N_{AKU} = 9,19 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

Do zkoušky tak můžeme zařadit 2 ks. brzdových třmenů, přičemž jeden je zkoušen do středního počtu cyklů do poruchy N_S a druhý do zbývajících počtu akumulovaných cyklů daných rozdílem $N_{AKU} - N_S$ ($5,2 \cdot 10^6$ cyklů).



Obr. 6.13 Graf průběhu zkoušky brzdových třmenů

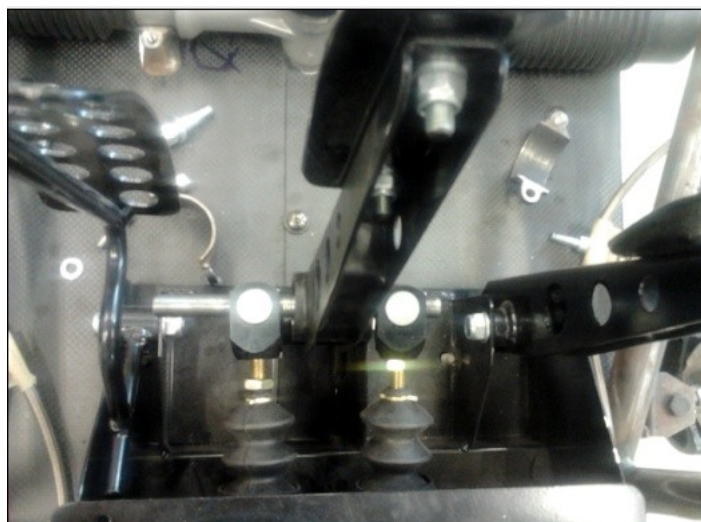
Tab. 6.5 Zkouška brzdového třmenu

podmínky zkoušky	sledované poruchy	ostatní sledované vady
automatické hydraulické impulsní zařízení při 60% max. tlaku při správné jakosti kapaliny	netěsnost zadření pístů třmenu zadření uložení třmenu	opotřebení pístů opotřebení třmenu opotřebení prachovek opotřebení těsnění opotřebení uložení třmenu

Zkouška brzdového třmenu se provádí na automatickém zařízení, které vyvíjí tlakové pulsace a nahrazuje činnost brzdového válce. Aby se činnost brzdového třmenu co nejvíce podobala stavu při provozu, opatří se třmeny destičkami i brzdovým kotoučem. Případně se uvedené díly nahradí materiálem stejných parametrů.

Zkouška pedálové soustavy

- počet vykonaných cyklů během závodní sezóny: $n = 6000$
- pravděpodobnost poruchy brzdového pedálu $P = 1 \cdot 10^{-4}$



Obr. 6.14 Pedálová soustava

Stav brzdového pedálu je tedy možné sledovat od počtu vykonaných cyklů.

intenzita poruch brzdového pedálu

$$\lambda = \frac{-\ln[1 - F(n)]}{n} = \frac{-\ln[1 - 0,0001]}{6000}$$

$$\lambda = 1,66 \cdot 10^{-8} \text{ cyklus}^{-1}$$

Při známé hodnotě intenzity poruch můžeme dopočítat střední počet cyklů do poruchy N_S

$$N_S = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1,66 \cdot 10^{-8}}$$

$$N_S = 59,99 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

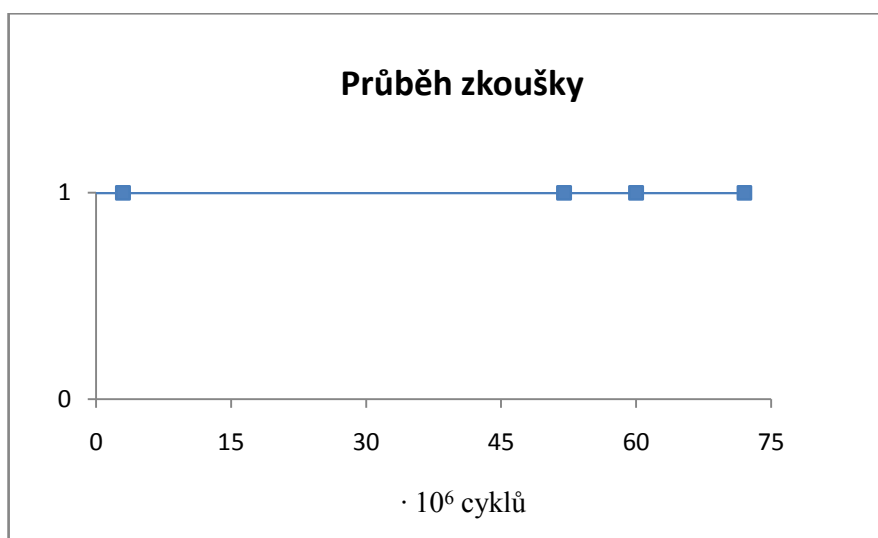
Uvažujeme případ zkoušky jednoho prvku na úrovni konfidence $C = 0,7$ Výpočet akumulovaných cyklů pak je:

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{C,v}^2}{2\lambda} = \frac{\chi_{0,7,2}^2}{2\lambda}$$

$$N_{AKU} = \frac{2,407}{2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-8}}$$

$$N_{AKU} = 72,23 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

Z výpočtu vyplývá, že k prokázání splnění požadavku na spolehlivost je třeba při běžné zkoušce vykonat brzdovým pedálem $72,23 \cdot 10^6$ cyklů, což vyjadřuje dobu zkoušky.



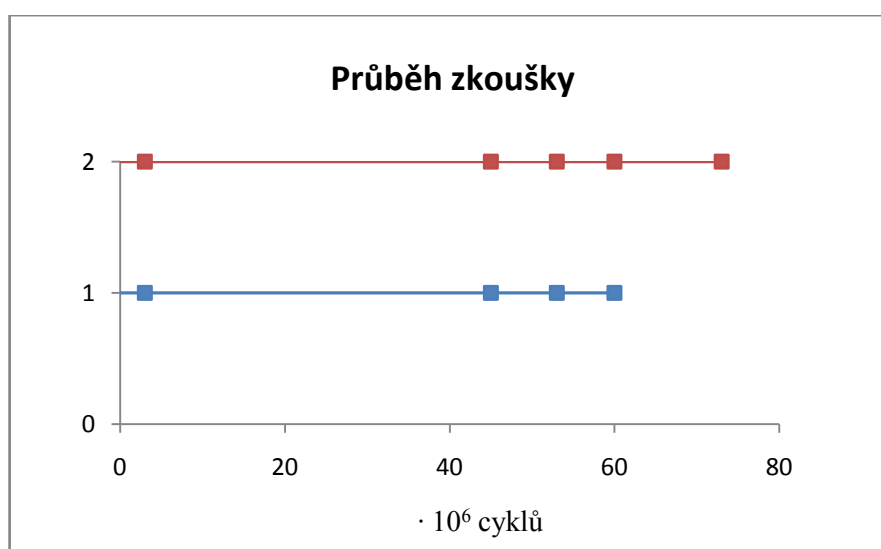
Obr. 6.15 Graf průběhu zkoušky brzdového pedálu

Při změně konfidenční úrovně na hodnotu $C = 0,9$

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{0,9,2}^2}{2\lambda} = \frac{4,605}{2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-8}}$$

$$N_{AKU} = 138,15 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

Do zkoušky tak můžeme zařadit 2 brzdové pedály, přičemž jeden je zkoušen do středního počtu cyklů do poruchy N_S a druhý do zbývajících počtu akumulovaných cyklů daných rozdílem $N_{AKU} - N_S$ ($78,16 \cdot 10^6$ cyklů).



Obr. 6.16 Graf průběhu zkoušky brzdových pedálů

Tab. 6.6 Zkouška pedálové soustavy

podmínky zkoušky	sledované poruchy	ostatní sledované vady
automatické impulsní zařízení při 60% max. tlaku	zadření uložení pedálu prasklá pružina prasknutí sférického ložiska prasknutí pohyblivých částí rozdělovače brzdných sil	opotřebení uložení pedálu opotřebení sférického ložiska

Zkouška pedálové soustavy se provádí pomocí automatického impulsního zařízení a přitom se simuluje činnost brzdového válce.

Zkouška vedení kapaliny

- počet vykonaných cyklů během závodní sezóny: $n = 6000$
- pravděpodobnost poruchy vedení kapaliny jednoho okruhu $P = 5 \cdot 10^{-4}$

Intenzita poruch vedení kapaliny

$$\lambda = \frac{-\ln[1 - F(n)]}{n} = \frac{-\ln[1 - 0,0005]}{6000}$$

$$\lambda = 8,33 \cdot 10^{-8} \text{ cyklus}^{-1}$$

Při známé hodnotě intenzity poruch můžeme dopočítat střední počet cyklů do poruchy N_S

$$N_S = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{8,33 \cdot 10^{-8}}$$

$$N_S = 12 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

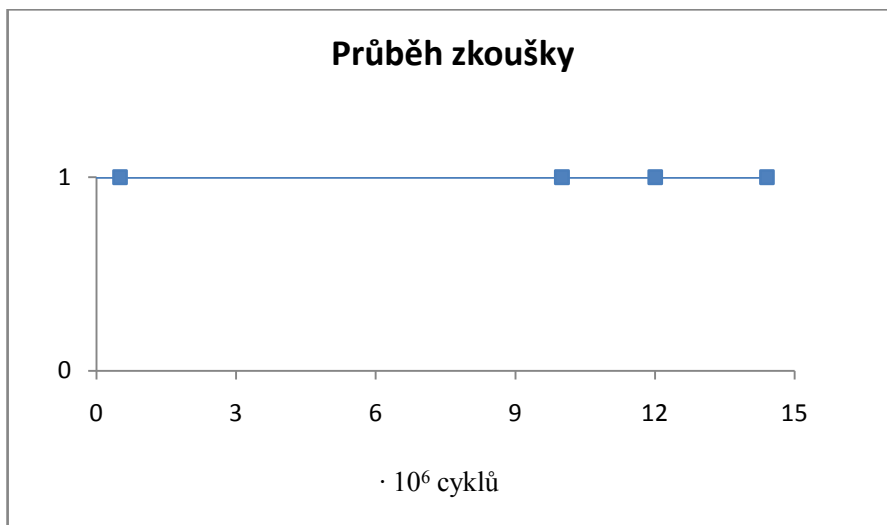
Výpočet akumulovaných cyklů pak je:

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{C,v}^2}{2\lambda} = \frac{\chi_{0,7,2}^2}{2\lambda}$$

$$N_{AKU} = \frac{2,407}{2 \cdot 8,33 \cdot 10^{-8}}$$

$$N_{AKU} = 14,44 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$

Z výpočtu vyplývá, že k prokázání splnění požadavku na spolehlivost je třeba při běžné zkoušce otestovat vedení kapaliny na $14,44 \cdot 10^6$ cyklů.

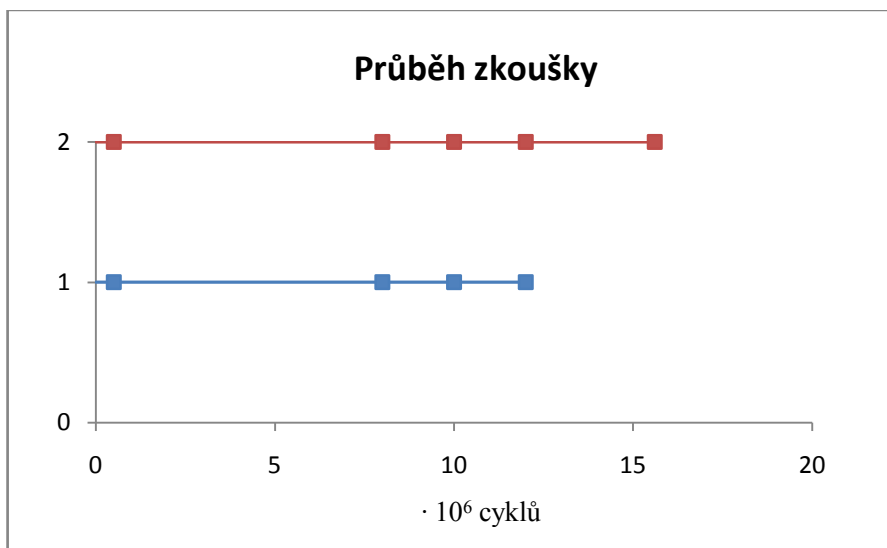


Obr. 6.17 Graf průběhu zkoušky vedení kapaliny

Při změně konfidenční úrovně na hodnotu $C = 0,9$

$$N_{AKU} \geq \frac{\chi_{0,9,2}^2}{2\lambda} = \frac{4,605}{2 \cdot 8,33 \cdot 10^{-8}}$$

$$N_{AKU} = 27,61 \cdot 10^6 \text{ cyklů}$$



Obr. 6.18 Graf průběhu zkoušky dvou vedení kapalin

Do zkoušky jsme tak mohli zařadit vedení kapalin 2 okruhů, přičemž jedno je zkoušeno do středního počtu cyklů do poruchy N_S a druhé do zbývajících počtu akumulovaných cyklů daných rozdílem $N_{AKU} - N_S$ ($15,61 \cdot 10^6$ cyklů).

Tab. 6.7 Zkouška vedení kapaliny

podmínky zkoušky	sledované poruchy
automatické hydraulické impulsní zařízení při správné jakosti kapaliny při 60% max. tlaku	prasknutí kapalinového vedení netěsnost spojů

Zkouška vedení kapaliny se provádí na automatickém zařízení, vyvíjejícím tlakové pulsace.

7. Závěr

Hlavním cílem diplomové práce byl návrh zkoušek spolehlivosti pro vybranou část vozidla formule Student.

Úvodní část je věnována stručné charakteristice soutěže Formula SAE s popisem jednotlivých statických či dynamických disciplín nebo bezpečnostních testů.

Další kapitola obsahuje analýzu pravidel z hlediska bezpečnosti. Zmíněna je tak krátce konstrukce rámu, brzdová soustava nebo příklady používaných bezpečnostních prvků.

Další kapitola se zabývá stanovením vhodných metod a postupů zkoušek spolehlivosti. Jsou zde uvedeny základní pojmy vztahující se ke zkouškám spolehlivosti, druhy a rozdělení zkoušek nebo část zabývající se zkušebními plány.

Vybranou částí vozidla pro výpočet spolehlivostních zkoušek byla zvolena brzdová soustava. Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí vozidla, která se týká aktivní bezpečnosti. Pro brzdovou soustavu byly vypracovány analýzy stromu poruchových stavů (FTA). Konkrétně pro 3 vrcholové události brzda nebrzdí, brzda přibrzdí a malá účinnost brzd. Pro každou tuto událost byl vypracován strom poruchových stavů vedoucí na jednotlivé primární události. Při kvantitativním hodnocení FTA byly následně jednotlivým primárním událostem přiděleny konkrétní hodnoty pravděpodobností poruch. Z důvodu absence dat o bezporuchovosti jsme byli nuceni provést návrh těchto pravděpodobností na základě odhadu. Jedná se tak o výpočtový model, ve kterém je možné po jízdách zkouškách a sběru potřebných dat jednotlivé parametry upřesnit.

Při výpočtu zkoušek spolehlivosti byly u jednotlivých komponentů brzdové soustavy použity pravděpodobnosti výskytu těchto primárních událostí z analýzy FTA pro malou účinnost brzdové soustavy. V případě ostatních analýz FTA by byl postup výpočtu pro tyto komponenty vyskytující se v daných stromech poruch s jinou pravděpodobností stejný.

Zkoušky spolehlivosti byly navrženy pro následující komponenty: brzdové destičky (brzdové segmenty), brzdový kotouč, brzdový válec, brzdový třmen, brzdový pedál a hydraulické vedení kapaliny. Nejedná se o zkoušky v provozu, ale jde o zkoušky dílenské, kde je možná jistá míra nejistot.

Do budoucna by bylo dobré zamyslet se nad použitím zrychlených zkoušek, které jsou u závodních vozidel výhodné. Díky zrychleným zkouškám lze aplikovat poznatky z vývoje do provozu se zaručenou spolehlivostí a dosáhnout tak zrychlení běžných zdlouhavých zkoušek spolehlivosti, čímž se šetří i náklady.

8. Použitá literatura

- [1] Formula SAE rules 2014. Formula SAE [online]. 2014 Dostupné z: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014_fsae_rules.pdf
- [2] FAMFULÍK, Jan, KRZYŽANEK, Radek a GALVAS, Peter. *Zkoušky spolehlivosti: (vybrané stochastické metody)*. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2010. ISBN 978-80-248-2277-8.
- [3] *Virtuální vzdělávání v dopravě* [online]. Dostupné z: http://issuu.com/michdor/docs/m11_text?e=7481937/2859112
- [4] DORDA, Michal. *Aplikace počítačů v provozu* [online]. 2014 Odhad parametrů základního souboru. Dostupné z: <http://home1.vsb.cz/~dor028/>
- [5] ČSN EN 61025. *Analýza stromu poruchových stavů*. 2007
- [6] HOLUB, Rudolf. *Spolehlivost letadlové techniky* [online]. Brno: VUT Brno, 2001 Dostupné z: <http://lu.fme.vutbr.cz/files/SpolehlivostLetadloveTechniky.pdf>
- [7] *Schéma brzdové soustavy* [online]. [cit. 2014-09-19]. Dostupné z: <http://www.cartech.cvut.cz/images/gallery/-75.jpg>
- [8] *Pedálová soustava* [online]. [cit. 2014-09-28]. Dostupné z: <http://www.ebay.co.uk/itm/Kit-Car-Cable-Clutch-Pedal-Box-Rally-Race-Performance-Track-OBPKC011-/121233859126>
- [9] *Brzdové destičky 43105-mw0-415* [online]. [cit. 2014-09-28]. Dostupné z: <http://r5.ru/kolodki-tormoznye-honda-00092999.html>
- [10] *The brake fixture* [online]. [cit. 2014-09-28]. Dostupné z: <http://www.tecsa-srl.it/en/dynocar.html>
- [11] *Honda CBR954 RR* [online]. [cit. 2014-09-28]. Dostupné z: <http://www.ebay.co.uk/itm/Honda-CBR-900-RR-Fireblade-954-Nissin-front-brake-calipers>

Seznam obrázků

Obr. 3.1 Hlavní části rámu.....	13
Obr. 3.3 Předpisy pro prostor helmy pilota	14
Obr. 3.4 Šablona pro kontrolu minimálního prostoru pilota.....	15
Obr. 3.5 Šablona prostoru pro nohy pilota.....	16
Obr. 3.6 Standardní deformační člen	20
Obr. 3.7 Umístění deformačního členu.....	21
Obr. 3.8 Pětibodový bezpečnostní pás.....	22
Obr. 4.1 Průběh distribuční funkce pro různé intenzity poruch.....	28
Obr. 4.2 Příklad výpočtu stromu poruchových stavů	38
Obr. 5.1 Schéma brzdové soustavy.....	39
Obr. 5.2 Pedálová soustava.....	40
Obr. 5.3 Pevný brzdový třmen a brzdový kotouč	40
Obr. 5.4 FTA brzda nebrzdí.....	42
Obr. 5.5 FTA brzda přibrzdí.....	44
Obr. 5.6 FTA malá účinnost brzd	45
Obr. 6.1 Brzdové destičky	49
Obr. 6.2 Graf průběhu zkoušky brzdových destiček	51
Obr. 6.3 Graf průběhu zkoušky 2 párů brzdových destiček	52
Obr. 6.4 Brzdové kotouče	52
Obr. 6.5 Graf průběhu zkoušky brzdového kotouče.....	14
Obr. 6.6 Graf průběhu zkoušky brzdových kotoučů.....	15
Obr. 6.7 Zkouška brzdového kotouče.....	16
Obr. 6.8 Brzdový válec	55
Obr. 6.9 Graf průběhu zkoušky brzdového válce	56
Obr. 6.10 Graf průběhu zkoušky brzdových válců.....	57
Obr. 6.11 Brzdové třmeny	58
Obr. 6.12 Graf průběhu zkoušky brzdového třmenu	59
Obr. 6.13 Graf průběhu zkoušky brzdových třmenů	60
Obr. 6.14 Pedálová soustava.....	61
Obr. 6.15 Graf průběhu zkoušky brzdového pedálu	62
Obr. 6.16 Graf průběhu zkoušky brzdových pedálů.....	62
Obr. 6.17 Graf průběhu zkoušky vedení kapaliny	64
Obr. 6.18 Graf průběhu zkoušky vedení kapaliny	64

Seznam tabulek

Tab. 3.1	Rozměry standartního deformačního členu	20
Tab. 4.1	Výpočet akumulovaného pracovního času	32
Tab. 4.2	Často používané značky pro FTA	35
Tab. 6.1	Interval výměny	48
Tab. 6.2	Zkouška brzdových destiček	52
Tab. 6.3	Zkouška brzdového kotouče	54
Tab. 6.4	Zkouška brzdového válce	57
Tab. 6.5	Zkouška brzdového třmenu	60
Tab. 6.6	Zkouška pedálové soustavy	63
Tab. 6.7	Zkouška vedení kapaliny	65

Seznam příloh

Příloha A: Obr. zkoušky brzdového kotouče

Příloha B: Výpočet analýzy FTA v programu EXCELL

Příloha C: Výpočet zkoušek spolehlivosti v programu EXCELL