



**České vysoké učení technické v Praze**

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

**Vliv různých režimů provozu turbodmychadla na očekávané  
únavové poškození**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Papuga, Ph.D.

**David Broulim**

2015

Praha



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Technická 4, 166 07 Praha 6

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: Davida Broulima

program: Teoretický základ strojího inženýrství

obor: bez oboru

Název tématu:

**Vliv různých režimů provozu turbodmychadla na očekávané únavové poškození**

Title:

**Effect of various turbocharger service regimes on its expected fatigue damaging**

Zásady pro vypracování:

1. Obeznamte se s postupem zpracování záznamů otáček turbodmychadel při únavové predikci v rámci ČZ a.s.
2. Převezměte záznamy z webových stránek agentury EPA, zadokumentujte dostupné informace o podmínkách jejich vzniku a analyzujte data aplikací SR\_Processor.
3. Srovnajte výstup jednotlivých záznamů z hlediska rain-flow matic i dalších výstupů této aplikace.
4. Proveďte porovnání výsledků únavových analýz rotoru turbodmychadla získaných aplikací CZservis\_Femfat.xls včetně analýzy rozdělení míry poškození v různých částech rain-flow matice při uvažování standardního materiálu dmychadlového kola (7075-T6) a turbínového kola (IN 713C) s parametry zadanými ze strany ČZ a.s.



Rozsah grafických prací: 10 stran

Rozsah průvodní zprávy: 35 stran

Seznam odborné literatury:

1. EPA website: <http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/nrcycles.htm> [shlédnuto 23.2.2015].
2. Papuga, J.: Zpracování provozních měření turbodmychadel pro únavovou analýzu, [Technická zpráva 12105/13/13]. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS ČVUT v Praze, Praha 2013.
3. Papuga, J.; Nesládek, M.; Hrubý, Z.; Jurenka, J.: CZ\_ServiceLoads\_US1405completeA.ppt. [Prezentace]. FS ČVUT v Praze, Praha 2014.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Papuga, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015


Datum odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé


*Posluchač bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.*

Zadání diplomové práce převzal dne:

  
.....  
diplomant

  
prof. Ing. Milan Růžička, CSc.  
.....  
vedoucí Ú 12 105



  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
.....  
děkan FS ČVUT v Praze

V Praze dne 30. 4. 2015



## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	David BROULIM
<b>Název BP:</b>	Vliv různých režimů provozu turbodmychadla na očekávané únavové poškození
<b>Anglický název:</b>	Effect of various turbocharger service regimes on its expected fatigue damaging
<b>Rok:</b>	2015
<b>Obor studia:</b>	bez oboru
<b>Ústav/odbor:</b>	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
<b>Vedoucí:</b>	Ing. Jan Papuga, Ph.D.
<b>Konzultant:</b>	Bohumír Šlajs
<b>Bibliografické údaje:</b>	počet stran 34 počet obrázků: 30 počet tabulek: 10 počet příloh: CD-ROM
<b>Klíčová slova:</b>	turbodmychadlo, EPA, rain-flow analýza, únavová predikce, dmychadlové kolo, turbínové kolo, Femfat, životnost
<b>Keywords:</b>	turbocharger, EPA, rain-flow analysis, fatigue prediction, charger wheel, turbine wheel, Femfat, lifetime
<b>Anotace:</b>	Bakalářská práce popisuje výpočetní cestu z hlediska únavové predikce na provozních záznamech ČZ a.s. Stejnou cestou analyzuje provozní záznamy agentury EPA. Výstupem práce je únavová analýza konkrétní konfigurace turbínového a dmychadlového kola se zadanými parametry ze strany ČZ a.s.
<b>Annotation:</b>	Bachelor Thesis describes computing way on the service regime records of ČZ a.s. in terms of fatigue prediction. Also analyzes service regimes of EPA agency the same way. The output of Bachelor Thesis is fatigue analysis of turbine wheel and charger wheel with material parameters and FEA models given by ČZ a.s.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a pouze s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Praze dne: .....

David Broulim



## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Janu Papugovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky a hlavně za trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat panu Bohumíru Šlajsovi a týmu z vývoje, kteří mě zasvětili do problematiky v rámci ČZ a.s.



## Obsah

1 Úvod.....	1
2 Zpracování záznamů otáček turbodmychadel v rámci ČZ a.s.....	2
2.1 Provozní záznamy.....	2
2.2 Výstupy měření.....	2
2.3 Příprava zátěžné historie.....	3
2.4 SR Processor.....	3
2.4.1 List Setup .....	5
2.4.2 List Total .....	6
2.4.3 List Llevels.....	6
2.4.4 List LDurs .....	7
2.4.5 List LChng .....	7
2.4.6 List LCint .....	8
2.5 Záznam traktor.....	9
2.5.1 Záznam traktor 2012-12.....	9
2.5.2 Záznam traktor 2013-02.....	9
2.5.3 Záznam traktor 2013-05.....	10
2.6 Záznam dodávka.....	11
2.7 Závěr.....	12
3 Provozní záznamy agentury EPA.....	13
3.1 Agentura EPA.....	13
3.2 Motivace a přístup k testu.....	13
3.3 Provozní záznamy.....	13
3.4 Vznik záznamů .....	13
3.5 Výstupy jednotlivých měření.....	14
3.6 Charakteristický záznam.....	15
3.7 Analyzování dat SR Processorem.....	17
3.7.1 Záznam Wheel Loader .....	17
3.7.2 Záznam backhoe .....	19
3.8 Závěr.....	21
4 Analýza výstupní zátěžné historie.....	21
4.1 Rain-flow .....	21
4.2 Zpracování rain-flow matic .....	24
4.3 Výstupy jednotlivých měření.....	25
4.4 Analýza dle Femfatu.....	26
4.5 Určení životnosti.....	27



4.6 Rain-flow matice záznamů ČZ .....	28
4.7 Rain-flow matice záznamů EPA.....	29
4.8 Komparace rain-flow matic .....	29
5 Únavové analýzy konkrétní konfigurace v rámci ČZ a.s. ....	30
5.1 Vstupy pro dmyhadlové kolo.....	30
5.2 Vstupy pro turbínové kolo .....	31
5.3 Výsledky.....	31
6 Závěr.....	33
7 Seznam použité literatury .....	34





$D$	[-]	Celkové kumulované poškození
$D_{er}$	[-]	Hodnota kritického poškození
$D_i$	[-]	Poškození od určitého kmitu
$F$	[-]	Kvadrát poměru okamžitých a maximálních provozních otáček
$M$	[ft/lb]	Točivý moment
$M_{NOR}$	[ft/lb]	Normalizovaný točivý moment
$M_{INT}$	[ft/lb]	Interpolovaný točivý moment
$n_i$	[-]	Četnost kmitu v zatěžovací historii
$N_i$	[-]	Četnost kmitu do poruchy
$P$	[-]	Poměr okamžitých a maximálních provozních otáček
$v$	[rpm]	Rychlost
$v_0$	[rpm]	Volnoběžná rychlost
$v_{MAX}$	[rpm]	Maximální rychlost



## 1 Úvod

V současné době se výrobci motorů snaží prodlužovat záruky na své produkty, aby drželi krok s konkurencí a aby uspokojili požadavky svých zákazníků. Vzhledem k tomuto faktu je proto nutné, aby tyto záruky garantovali nejen samotní výrobci, ale i subdodavatelé jednotlivých komponentů. Aby turbodmychadla firmy ČZ a.s. byla schopna plnit dané garance, je třeba verifikovat, zda je jejich současná konstrukce schopná odolat nejhorším možným provozním podmínkám po požadovanou záruční dobu. Tyto provozní režimy se u různých typů aplikací samozřejmě liší a na celkovou životnost turbodmychadla mají značný vliv.

Je tedy vhodné vytvořit univerzální pracovní nástroj, který by byl schopen pomocí výsledků a následných výpočtů jednotlivých měření predikovat životnost turbínového, popřípadě dmychadlového kola turbodmychadla.

Jako výchozí hodnoty byly zvoleny provozní záznamy od firmy ČZ a.s. pro případ traktor a případ dodávka a současně hodnoty od americké agentury EPA pro 7 typů těžkých pracovních strojů a celkem 16 různých režimů provozu.

Cílem této práce je tedy analyzovat provozní režimy jednotlivých aplikací pomocí zadaného softwaru a určit výslednou životnost v konkrétních částech konstrukce při zadaných podmínkách.



## 2 Zpracování záznamů otáček turbodmychadel v rámci ČZ a.s.

### 2.1 Provozní záznamy

ČZ a.s. realizuje měření turbodmychadel ve své vlastní režii pro různé typy aplikací. Prvním případem je traktor, druhým případem je dodávka řeznické firmy určená pro rozvoz masa po našem území. Je jasné, že tyto dvě aplikace mají naprosto odlišný provozní režim jízdy. Zatímco pro traktor se bude očekávat stálý a klidný provozní režim, který je spojený především s jízdou po poli, pro dodávku se bude předpokládat meziměstský režim jízdy spojený s častým brzděním a zrychlením.

Měření otáček turbodmychadla v provozu na jednotlivých aplikacích je snadno proveditelné. Pro měření je nutno osadit kompresorovou skříň turbodmychadla čidlem otáček. [1]

### 2.2 Výstupy měření

Změřené hodnoty jsou ukládány v textovém souboru viz *Obr. 1*. Jedná se o jednoduchý textový soubor, který je uveden několika řádky hlavičky, kde poslední řádek charakterizuje obsah následných dat. Jednotlivé sloupce, které jsou v tomto případě odděleny středníkem, popisují den začátku měření, čas změření jednotlivých veličin a frekvenci otáček v Hz, které je potřeba pro převod na ot/min vynásobit šedesáti.

```
"ALMEMO"; "BEREICH"; "Freq"; "NiCr"; "Freq"
"2590-4"; "KOMMENTAR"; "T"
"SD3.10"; "GW-MAX"; "10000,"
"ALMEMO.001"; "GW-MIN"; "0,"
"DATUM"; "ZEIT"; "M00: HZ"; "M02: rC"; "M20: Hz"
04.12.12;12:16:38.60;0;-;0,
;12:16:39.10;0;-;0,
;12:16:39.60;0;-;0,
;12:16:40.10;0;-;0,
;12:16:40.60;0;-;0,
;12:16:41.10;0;-;0,
;12:16:41.60;0;-;0,
;12:16:42.10;0;-;0,
;12:16:42.60;0;-;0,
;12:16:43.10;0;-;0,
;12:16:43.60;0;-;0,
;12:16:44.10;0;-;0,
;12:16:44.60;0;-;0,
;12:16:45.10;0;-;0,
;12:16:45.60;0;-;0,
;12:16:46.10;0;-;0,
;12:16:46.60;0;-;0,
;12:16:47.10;0;-;0,
;12:16:47.60;0;-;0,
;12:16:48.10;0;-;0,
```

*Obr. 1 – Ukázka textového souboru ze záznamu traktor*



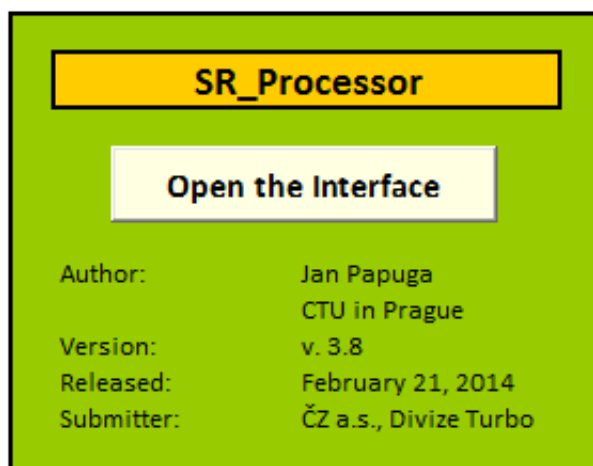
Pro následné vyhodnocení dopadu zatěžování je vhodné, aby vzorkovací frekvence byla dostatečně malá, protože je potřeba popsat extrémní zaznamenaných otáček co možná nejpřesněji. Nízká vzorkovací frekvence však skýtá úskalí v podobě objemného počtu dat. Pokud bychom uvažovali vzorkovací periodu 0,3 sekund, tak by se při běžném osmihodinovém provozu odečetlo 96 000 řádků záznamů. Například pro případ dodávka činí celková velikost dat 320MB.

### 2.3 Příprava zátěžné historie

Měření prováděné v ČZ a.s. představuje souvislý záznam časových údajů s připojenými hodnotami otáček v Hz. „Pro potřebu další analýzy dat je vhodné od sebe separovat záznamy z jednotlivých měření, aby mohla být v případě potřeby zpracována samostatná statistika a například výrazné překročení maximálních otáček spojeno s konkrétní provozní událostí.“ Dále je vhodné vytvořit kontinuální záznam změn otáček, který bude dále zpracováván na jednotlivé zátěžné cykly pomocí rain-flow procedury. (viz dále v *Kap. 4*). [2]

### 2.4 SR Processor

SR Processor (*Obr. 2*) je makro vytvořené Ing. Janem Papugou, Ph.D. v programu Visual Basic v rámci aplikace MS Excel. Jedná se o podpůrný software, který zohledňuje výše uvedené požadavky na přípravu zátěžné historie. [2]



*Obr. 2 – Okno SR Processoru*

Po spuštění makra se otevře uživatelské rozhraní (*Obr. 3*), kde si uživatel nahraje záznamy zatěžování.



Dále je třeba vyplnit jednotlivá pole, která slouží k identifikaci a pro následnou analýzu záznamu. „Sampling period“ značí vzorkovací periodu. Pole „Scale factor to Hz [-]“ znamená, kolikrát musí uživatel vynásobit hodnotu v daném sloupci, aby dostal měřítko v Herzích. „Row with the first column“ představuje řádek s první zaznamenanou hodnotou. V dalších polích uživatel vyplní sloupce se zaznamenanými otáčkami, časem a celkovým počtem sloupců. Jako oddělovač byl v tomto případě použit středník a jako desetinná značka čárka. „Treshold“ značí prahové záznamy v ot/min, pod které nebudou otáčky zaznamenávány. Jsou nastaveny na 5% mezních otáček. Na uvedeném obrázku je použito standardní nastavení, přičemž vzorkovací frekvence je nastavena na 0,3 sekundy. [2]

Service Record Processor

Select input file: C:\Users\David\Desktop\BAKALÁŘKA\CZ\_2014\3\_Avia\záznamy\2013\_07\_19 - ALMEMO - Avia.txt

Row 8, Column 5

```
"ALMEMO";"BEREICH:";;;"Freq";;;;;;;;;;;;;;"Freq"
"2590-4";"KOMMENTAR:";;;;;";;;;;;;;;;;;;"
"SD3.10";"GW-MAX:";;;;;;;;;;;;;10000,
"ALMEMO.001";"GW-MIN:";;;;;;;;;;;;;0,
"DATUM:";"ZEIT:";;;;;"M02: Hz";;;;;;;;;;;;;;"M22: Hz"
12.07.13;09:09:26.10;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:26.40;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:26.70;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:27.00;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:27.30;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:27.60;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:27.90;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:28.20;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
;09:09:28.50;;;0,;;;;;;;;;;;;;0,
```

**Separator**

Semicolon [ ; ]

Colon [ , ]

Tab [ <tab> ]

Space [ ]

**Decimal mark**

Comma [ 1,2345 ]

Point [ 1.2345 ]

**Record**

Sampling period [s]

Scale factor to Hz [-]

Row with the first item

Column with time scale

Column with revolutions

Other processed columns (comma separated)

Number of columns of a complete line

**Limit state**

Caused by:  Charger (C)  Turbine wheel (T)

Indicated by analysis:  Stress (S)  Modal (M)

**Service load**

Maximum [rot/min]

Threshold [rot/min]

Threshold in F [-]

**Run Analysis**

Obr. 3 – Uživatelské rozhraní SR Processoru 3. měření záznamu dodávka

Pro analýzu zátěžných podmínek různých řad turbodmychadel v různých aplikačních oborech je výhodné pracovat s hodnotami vztaženými k maximální provozním otáčkám. To lze vyjádřit dvěma způsoby.



Prvním zobrazením je lineární podíl okamžitých a maximálních otáček, označených jako parametr  $P$  viz (1). Druhé vyjádření vychází z kvadrátu otáček a označuje se jako parametr  $F$  (2). Parametr  $P$  je snadno pochopitelný z hlediska provozu. Parametr  $F$  vyjadřuje, jak se mění silové zatížení a tedy i napětí na tělese kvůli odstředivé síle, která je právě v kvadrátu k otáčkám. V této práci bude uvažován vzhledem k výše uvedeným poznatkům parametr  $F$ . Mezní hodnota otáček je pro oba případy nastavena na 150 000 ot/min.

$$P = \frac{\text{hodnota otáček [ot/min]}}{\text{maximální hodnota otáček [ot/min]}} \quad (1)$$

$$F = \left( \frac{\text{hodnota otáček [ot/min]}}{\text{maximální hodnota otáček [ot/min]}} \right)^2 \quad (2)$$

Následně si program otevře a vytvoří další soubor, který má stejný název a novou extenzi \*.out. Do tohoto souboru jsou zapisovány hodnoty pro následné zpracování procedurou rain-flow viz *Kap. 4*. Dalším výstupem jsou jednotlivé listy přidávané do \*.xls. souborů v rámci MS Excel ze kterého byla SR Processorem spuštěna. Na jednotlivých listech může uživatel vidět průběh zpracování. Listy jsou popsány v *Kap. 2.4.1 - 2.4.6*. [2]

#### 2.4.1 List Setup

Tento list rekapituluje zvolené možnosti v rozhraní SR Processoru (*Obr. 4*) při zpracování zátěžné historie. Jsou v něm vyznačeny volby vyplněné v uživatelském rozhraní (*Obr. 3*). Slouží především ke zpětné kontrole zadávaných parametrů. [3]

VERSION	3.8	21.II.14
PROCESSED FILE	C:\Users\David\...	
SEPARATOR	Semicolon [ ; ]	
DECIMAL MARK	Comma [ ,2345 ]	
SAMPLING PERIOD	0,3	
SCALE FACTOR	1	
FIRST ROW	7	
TIME COLUMN	2	
RESULT COLUMN	5	
OTHER READ COLUMNS		
NUMBER OF COLUMNS OF A VALID LINE	25	
LIMIT STATE CAUSED BY	Charger (C)	
LIMIT STATE INDICATED BY	Stress (S)	
MAXIMUM ROT/MIN	150000	
THRESHOLD	7500	0,0025

*Obr. 4 – Výstup listu Setup v SR Processoru pro 3. měření případu dodávka*



## 2.4.2 List Total

List označuje celkový přehled jednotlivých dnů měření. Shrnuje celkový čas turbodmychadla v provozu, maximální hodnotu parametru  $F$ , jemu příslušné maximální změřené otáčky turbodmychadla a prahovou hodnotu (Obr. 5). Zaznamenávají se pouze ty záznamy, kdy je turbodmychadlo v provozu a které se současně nacházejí nad prahovou hodnotou.

List slouží především k detekci nenulových záznamů přiřazených k jednotlivým dnům měření zaznamenaných na měřicím zařízení. [3]

File	TC in service [min]	Max. parameter F [-]	Max. rotations [rot/min]	Ratio of sub-threshold loads [%]
001_21.06.13.csv	26.4	0.78	132540	2.1%
007_24.06.13.csv	357.7	1.07	155520	2.5%
009_25.06.13.csv	566.6	1.07	154980	0.8%
011_26.06.13.csv	401.8	1.04	152940	0.9%
013_27.06.13.csv	356.5	1.03	152040	0.6%

Obr. 5 - Výstup listu Total v SR Processoru pro 3. měření případu dodávka

## 2.4.3 List Llevels

List shrnuje celkový čas strávený na jednotlivých úrovních otáček. Zde i v dalších zobrazených listech je použito podmíněné formátování, jehož cílem je opticky znázornit nejčastěji se vyskytující režimy provozu. (Obr. 6).

V první tabulce jsou hodnoty uvedené v minutách a ve druhé jejich procentuální rozdělení. Na svislé ose je hodnota parametru  $F$  do hodnoty 1,2, tedy přibližně do 1,1 násobku překročení maximálních provozních otáček. Na vodorovné ose jsou vypsány jednotlivé nenulové dny měření.

Největší četnost mají záznamy blízké se nule, které však negenerují prakticky žádné poškození.

Naopak se zvyšujícím se parametrem  $F$  není jejich procentuální zastoupení tak vysoké. [3]

P parameter	tions [rot/h]	001_12.07.13	007_15.07.13	009_16.07.13	011_17.07.13	013_18.07.13		P parameter	tions [rot/h]	001_12.07.13	007_15.07.13	009_16.07.13	011_17.07.13	013_18.07.13
0.01	15000	6	34	53	79	51		0.01	15000	58.4%	11.0%	8.5%	16.2%	12.6%
0.02	21213.2	0.89	29.98	83.64	73.47	38.21		0.02	21213.2	8.3%	9.8%	13.4%	15.2%	9.5%
0.03	25980.8	0.26	2.84	5.78	6.50	6.08		0.03	25980.8	2.4%	0.9%	0.9%	1.3%	1.3%
0.04	30000	0.37	2.41	5.78	4.67	4.12		0.04	30000	3.4%	0.8%	0.9%	1.0%	1.0%
0.05	33541	0.30	1.98	4.96	4.67	4.07		0.05	33541	2.8%	0.6%	0.8%	1.0%	1.0%
0.06	36742.3	0.35	2.95	6.80	5.27	4.28		0.06	36742.3	3.3%	0.7%	1.1%	1.1%	1.1%
0.07	39686.3	0.16	2.96	7.64	6.22	4.64		0.07	39686.3	1.5%	1.0%	1.2%	1.3%	1.1%
0.08	42426.4	0.08	4.06	8.30	7.08	5.97		0.08	42426.4	0.7%	1.3%	1.3%	1.5%	1.5%
0.09	46000	0.03	5.39	10.56	8.94	6.65		0.09	46000	0.3%	1.8%	1.7%	1.8%	1.6%
0.1	47434.2	0.02	6.50	13.04	9.58	7.08		0.1	47434.2	0.2%	2.1%	2.1%	2.0%	1.8%
0.11	49749.4	0.07	7.27	11.96	10.48	7.69		0.11	49749.4	0.6%	2.4%	1.9%	2.2%	1.9%
0.12	51961.5	0.07	6.51	11.00	8.79	8.13		0.12	51961.5	0.6%	2.1%	1.8%	1.8%	2.0%
0.13	54083.3	0.05	6.40	11.14	7.51	7.15		0.13	54083.3	0.5%	2.1%	1.8%	1.6%	1.8%
0.14	56124.9	0.06	6.31	9.99	7.41	6.07		0.14	56124.9	0.5%	2.1%	1.6%	1.5%	1.5%
0.15	58094.8	0.03	5.76	9.72	7.13	6.16		0.15	58094.8	0.3%	1.9%	1.6%	1.5%	1.5%
0.16	60000	0.04	4.94	7.36	5.87	5.09		0.16	60000	0.3%	1.6%	1.2%	1.2%	1.3%
0.17	61846.6	0.05	3.40	6.81	4.96	4.77		0.17	61846.6	0.4%	1.1%	1.1%	1.0%	1.2%
0.18	63639.6	0.04	2.83	5.86	4.33	4.15		0.18	63639.6	0.4%	0.9%	0.9%	0.9%	1.0%
0.19	65383.5	0.04	2.40	5.27	3.85	3.36		0.19	65383.5	0.3%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%
0.2	67082	0.22	2.33	4.15	3.68	2.92		0.2	67082	2.0%	0.8%	0.7%	0.8%	0.7%

Obr. 6 - Výřez listu Llevels v SR Processoru pro 3. měření případu dodávka



#### 2.4.4 List LDurs

Tento list sčítá dobu trvání jednotlivých cyklů strávených na různých zatěžovacích úrovních, který je rozdělený do 12 intervalů v minutách (*Obr. 7*). Neposuzují se zde individuální dny, nýbrž celá zátěžná historie jako celek. List slouží především ke zjištění, jak velké je zastoupení dlouhých cyklů, které mohou iniciovat vznik creepu.

load levels		duration not longer than [min]											
F parameter	tions [rot/]	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100	200	500
0.5	106066	44.12	17.06	15.58	5.59	1.71	0.30	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.51	107121	45.04	16.57	15.52	5.39	1.64	0.26	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.52	108167	45.33	16.08	15.42	5.23	1.48	0.26	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.53	109202	44.97	16.47	14.76	5.16	1.35	0.26	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.54	110227	44.51	16.17	14.60	5.13	1.28	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.55	111243	44.35	15.98	14.23	4.96	1.22	0.16	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.56	112250	44.54	16.14	13.58	4.87	1.15	0.16	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.57	113248	44.12	16.11	13.18	4.90	1.02	0.16	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.58	114237	44.51	15.58	12.82	4.54	0.95	0.13	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.59	115217	44.28	15.29	12.43	4.21	0.95	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6	116190	44.18	15.22	11.83	4.04	0.89	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.61	117154	43.89	14.73	11.41	4.04	0.82	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.62	118110	43.85	14.10	11.05	3.78	0.85	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	119059	43.49	14.00	10.65	3.85	0.76	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.64	120000	43.26	14.00	10.12	3.75	0.62	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.65	120934	43.33	13.45	9.83	3.45	0.62	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.66	121861	43.56	12.85	9.30	3.42	0.56	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.67	122780	43.29	12.39	9.30	2.96	0.56	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*Obr. 7 - Výřez listu LDurs v SR Processoru pro 3. měření případu dodávka*

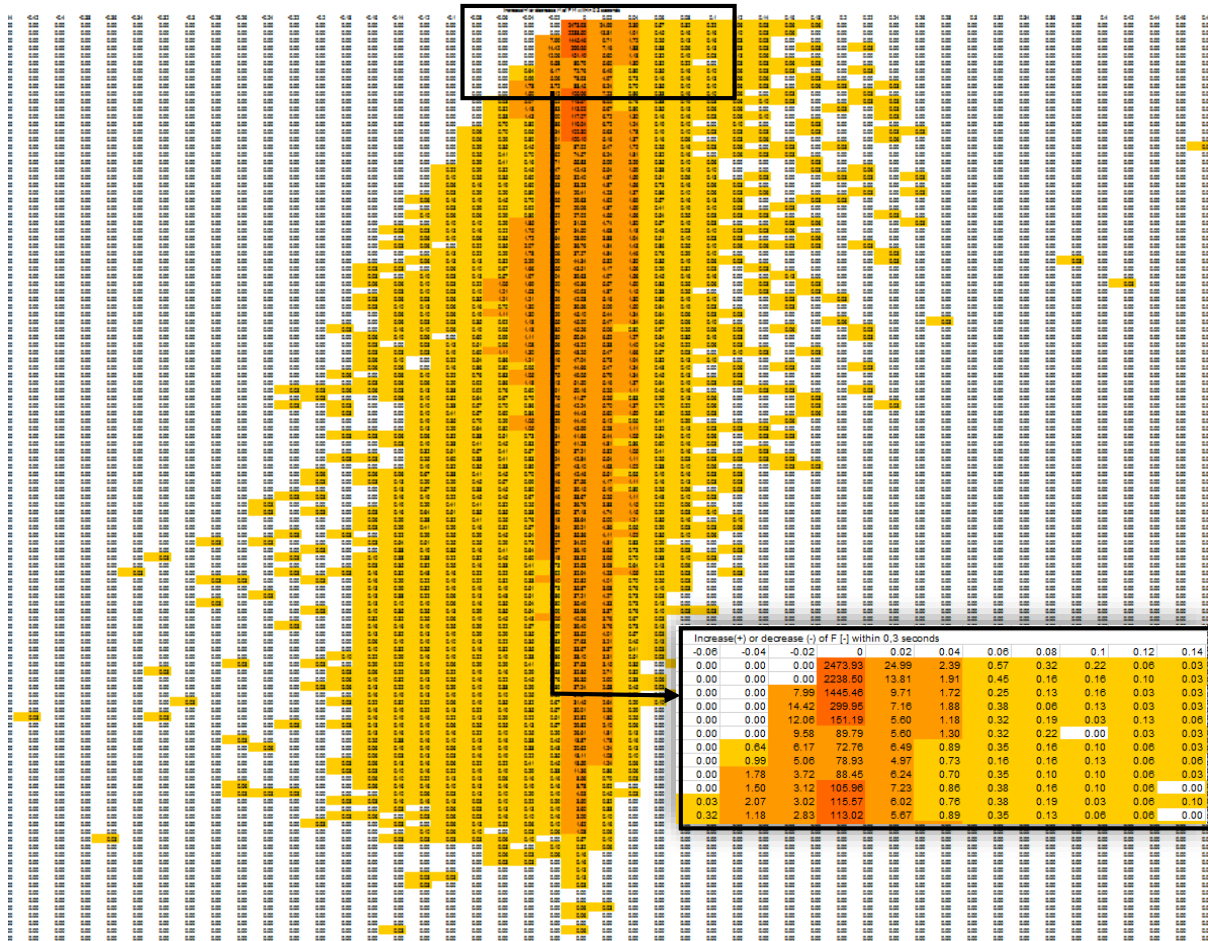
Obecně platí, že největší zastoupení mají cykly, které netrvají déle než 6 sekund. S rostoucím intervalem a také i s rostoucí hodnotou parametru  $F$  se počet cyklů na jednotlivých úrovních prudce snižuje. Pro uvedený příklad platí, že žádný z cyklů nepřesáhl dobu 10 minut. [3]

#### 2.4.5 List LChng

List zaznamenává četnost výskytu okamžitých změn mezi dvěma po sobě jdoucími hodnotami parametru  $F$ . Na svislé ose je znázorněn parametr  $F$  od nuly do 1,2. Na vodorovné ose je uprostřed změna parametru  $F$  rovna nule. Nalevo od ní se parametr zmenšuje, což znázorňuje zpomalování. Naopak napravo od nuly se parametr zvětšuje, což značí zrychlení. Opět platí, že nejčetnější zaznamenané hodnoty viz výše se pohybují kolem nuly. Z *Obr. 8* je patrné, že čím je parametr  $F$  větší, tím méně je častý proces zrychlování a naopak. Čím nižší má parametr  $F$  hodnotu, tím více se zvyšuje podíl zrychlení. Šířka mapy je závislá na dynamice měřeného stroje a zároveň na použité vzorkovací frekvenci.

Mapa zobrazená na *Obr. 8* náleží druhému záznamu případu dodávka, který se později ukázal jako znehodnocený. Je patrné, že se zde objevují osamělá vybarvená pole, jež značí prudké výkyvy otáček, které zaznamenalo měřicí zařízení. Správný záznam by měl být ucelený. Proto tento list může být indikátorem nepřesnosti jednotlivých měření. [3]





Obr. 8 - Výstup listu LChng v SR Processoru pro 2. měření případu dodávka

### 2.4.6 List LCint

List generuje deset tabulek, které monitorují trvání přechodu mezi definovanými hodnotami parametru  $F$ . Tabulky na levé straně listu značí nárůst zatěžování, pravé jeho pokles. Například na Obr. 9 pro označené pole s hodnotou 0,012 platí, že je zde celkem 12 výskytů zvýšení zatěžování z  $F=0,01$  do  $F=1$ , v rozsahu délky intervalu jedna až dvě minuty za tisíc provozních hodin. [3]

TxM	Number of occurrences per 1 hour									
	F parameter [-]		maximum duration of the interval [min]							
	from	to	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
	0	1	0	0	0,000	0,012	0,000	0,012	0,000	0,176
	0.01	1	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,141
	0.02	1	0	0	0,000	0,000	0,000	0,012	0,118	0,059
	0.03	1	0	0	0,012	0,024	0,012	0,047	0,129	0,012
	0.04	1	0	0	0,012	0,035	0,035	0,059	0,082	0,047

Obr. 9 – Tabulka TxM listu LChng v SR Processoru pro celkové měření případu traktor



## 2.5 Záznam traktor

Na přelomu roku 2012/2013 proběhlo provozní měření zatěžování turbodmychadla na traktoru. Měření proběhlo ve třech etapách a to v prosinci 2012, únoru 2013 a květnu 2013. Vzorkovací frekvence záznamu byla nastavena na 0,5 sekundy. Maximální provozní otáčky na tomto stroji byly nastaveny na 150 000 ot/min. Záznam již byl popsán v technické zprávě viz [2].

### 2.5.1 Záznam traktor 2012-12

V prosinci 2012 se z hlediska provozního režimu jednalo především o rozvoz močůvky po poli. Záznam otáček rotoru turbodmychadla byl monitorován po dobu 14 dnů, z nichž první a poslední den neproběhl celý. Kvůli zimnímu období byl traktor spíše nevyužit a z možných 80 provozních hodin bylo zjištěno pouze kolem 11 hodin provozu, viz *Tab. 1*. [2]

Z *Tab. 1* lze vyzorovat, že při provozu došlo k několika přesažením maximálních provozních otáček. K největšímu přesažení došlo během prvního měření, kde se zapsal jako největší cyklus v zátěžné historii  $F_{MAX}=1,1$ , což odpovídá 157 020 ot/min. Pro následnou analýzu jsou tyto cykly nejdůležitější, protože generují největší část poškození.

Datum	TD v provozu [min]	Max. parametr F [-]	Max. otáčky [ot/min]
4.12.2012	0.1	0.00	9000
5.12.2012_1	116.9	1.03	152160
5.12.2012	65.9	0.52	108300
6.12.2012	219.8	1.10	157020
7.12.2012	0.4	0.65	121020
10.12.2012	97.8	1.05	153720
12.12.2012	142.1	1.02	151620
17.12.2012	8.8	0.21	69300
<b>Celkem</b>	<b>651.8</b>	<b>minut</b>	
	<b>10.86</b>	<b>hodin</b>	
<b>Max. F</b>	<b>1.10</b>		

*Tab. 1 – První provozní záznam měření traktoru*

### 2.5.2 Záznam traktor 2013-02

Tento záznam obsahuje měření z druhé půlky prosince 2012 až února 2013. „Na měřicí jednotce či během zápisu selhala datace, takže určit přesné dny měřené je nemožné. Použitý skript proto označuje jednotlivá měření identickým datem a připojeným podtržítkem s pořadovou hodnotou výskytu měření s týmž názvem“, viz *Tab. 2*.



Dle zaznamenaných hodnot vidíme, že traktor stál opět většinu času nevyužit, protože z 24 jednotlivých měření nacházíme pouze 5 měření s delším provozním záznamem. V tomto období se jednalo z hlediska provozu především o tažné práce. [2]

Datum	TD v provozu [min]	Max. parametr F [-]	Max. otáčky [ot/min]
01.01.00_0	1.4	0.12	52140
01.01.00_1	68.6	0.47	102960
01.01.00_2	12.4	0.16	60600
01.01.00_3	7.0	0.28	79740
01.01.00_4	12.5	1.01	150720
01.01.00_5	7.6	0.43	98520
01.01.00_6	0.9	0.21	69000
01.01.00_7	76.6	1.03	152580
01.01.00_8	70.5	1.02	151560
01.01.00_9	32.9	0.40	94800
01.01.00_10	0.8	0.10	47340
01.01.00_11	19.3	0.27	78300
01.01.00_12	5.5	0.18	62760
01.01.00_13	5.1	0.43	98820
01.01.00_14	69.6	1.00	150360
01.01.00_15	124.7	0.99	149400
01.01.00_16	8.4	0.38	92520
01.01.00_17	18.2	0.41	96000
01.01.00_18	5.2	0.56	112140
01.01.00_19	73.8	0.99	149340
	620.7	hodin	
Celkem	10.34	minut	
Max. F	1.03		

Tab. 2 – Druhý provozní záznam měření traktoru

### 2.5.3 Záznam traktor 2013-05

Záznam obsahuje měření z května 2013. Během tohoto období bylo separováno 65 hodin provozních záznamů. Je tedy vidět, že byl traktor hojně využíván, konkrétně opět pro tažné práce. Měřicí jednotka znovu neměřila úplně správně, opět zde chybí označení konkrétního dne.

Datum	TD v provozu [min]	Max. parametr F [-]	Max. otáčky [ot/min]	Datum	TD v provozu [min]	Max. parametr F [-]	Max. otáčky [ot/min]
01.01.00_1	47.4	0.99	149100	01.01.00_21	241.8	0.97	147360
01.01.00_2	39.2	0.99	149520	01.01.00_22	270.0	0.99	149040
01.01.00_3	0.7	0.05	33480	01.01.00_23	140.5	0.93	144720
01.01.00_4	34.0	0.93	144960	01.01.00_24	319.8	0.99	148980
01.01.00_5	84.9	1.00	150240	01.01.00_25	282.1	0.95	146280
01.01.00_6	5.1	0.67	122760	01.01.00_26	80.1	0.99	149040
01.01.00_7	112.7	0.95	145920	01.01.00_27	176.6	0.94	146320
01.01.00_8	64.8	0.98	148320	01.01.00_28	114.0	0.92	144240
01.01.00_9	65.1	0.95	148400	01.01.00_29	120.4	0.90	142020
01.01.00_10	3.9	0.14	56580	01.01.00_30	194.2	0.95	146160
01.01.00_11	68.9	0.95	148400	01.01.00_31	152.7	0.98	148320
01.01.00_12	22.5	0.99	149220	01.01.00_32	70.3	0.81	135000
01.01.00_13	5.9	0.41	95700	01.01.00_33	90.6	0.92	144180
01.01.00_14	10.1	1.00	149760	01.01.00_34	37.6	1.00	150300
01.01.00_15	5.4	0.55	111120	01.01.00_35	40.9	0.38	92640
01.01.00_16	72.5	1.03	152220	01.01.00_36	160.9	0.96	146760
01.01.00_17	16.0	0.96	147000	01.01.00_37	50.3	0.95	146580
01.01.00_18	7.7	0.40	95160	01.01.00_38	141.4	0.96	147060
01.01.00_19	5.0	0.28	79020	01.01.00_39	113.0	0.93	144840
01.01.00_20	192.3	0.93	144480	01.01.00_40	246.1	0.91	143460
					3907.30	minut	
					65.12	hodin	
					Max. F	1.03	

Tab. 3 – Třetí provozní záznam měření traktoru



Vzhledem k tomu, že v druhém a třetím měření konal traktor tutéž práci, byly tyto měření pro následnou analýzu sloučeny. Při tažných pracích tedy bylo celkem naměřeno přes 75 hodin provozních záznamů.

## 2.6 Záznam dodávka

Měření zatěžování turbodmychadla na dodávce proběhlo v období 21. 6. – 19. 7. 2013. Turbodmychadlo bylo měřeno po celou tuto dobu (tj. 29 dnů) z nichž první a poslední den neproběhl celý. Měření bylo rozděleno do tří separátních souborů. Vzorkovací frekvence záznamů byla tentokrát nastavena na 0,3 sekundy.

První a třetí měření ukazuje, že dodávka byla využívána. Nachází se zde především data s delším časovým intervalem. Celkem z těchto dvou měření bylo vyseparováno přibližně 59 hodin provozních záznamů viz *Tab. 4*.

Datum	TD v provozu [min]	Max. parametr F	Max. otáčky [ot/min]
21.6.2013	26.4	0.78	132540
24.6.2013	357.7	1.07	155520
25.6.2013	568.6	1.07	154980
26.6.2013	401.8	1.04	152940
27.6.2013	356.5	1.03	152040
15.7.2013	305.6	1.15	160920
16.7.2013	622.0	1.08	155880
17.7.2013	483.4	1.15	161160
18.7.2013	403.5	1.10	157560
	3523.5	minut	
Celkem	58.73	hodin	
Max. F	1.15		

*Tab. 4 – První a třetí provozní záznam měření dodávky*

K největšímu přesažení došlo 17. 7., kde byl zapsán jako největší cyklus v zátěžné historii  $F_{MAX}=1,15$ , což odpovídá 161160 ot/min.

Z hlediska analýzy zátěžné historie se druhý záznam z období 1.7 – 12. 7 ukázal jako znehodnocený, za což pravděpodobně může uvolněný drát měřícího zařízení, který občasně způsobil náhlý výkyv signálu z jinak klidové polohy. Důkazem mohou být velmi vysoké hodnoty parametru  $F$ , z nichž nejvyšší je téměř  $F_{MAX}=2$ .

Identifikace znehodnoceného měření je velice důležitá a jako jeho indikátor nám slouží poměr signálů pod prahovou hodnotou viz *Tab. 5*. Hodnoty, které jsou akceptovatelné, se nachází pod 5% hranicí, čili vyhovují pouze dva záznamy s celkovou dobrou trvání necelých 12 hodin. Další příčinou nepřesného měření může být malá doba turbodmychadla v provozu.



Kvůli těmto okolnostem musíme prohlásit druhé měření za neplatné. Původní záznam se zredukoval na konečných 59 hodin provozních záznamů.

Datum	TD v provozu [min]	Max. parametr F [-]	Max. otáčky [ot/min]	Prahová hodnota
28.6.2013	16.4	0.57	113460	10.4%
1.7.2013	323.0	1.12	158700	1.2%
2.7.2013	366.3	1.10	157080	3.5%
3.7.2013	191.9	1.10	157380	65.0%
4.7.2013	349.8	1.01	150660	173.8%
5.7.2013	3.6	1.94	208980	857.9%
7.7.2013	24.9	1.07	155040	220.2%
8.7.2013	182.8	1.06	154500	388.7%
9.7.2013	81.0	1.47	181920	441.7%
10.07.2013	0.1	0.02	22920	842.9%
10.7.2013	50.6	0.55	111000	578.4%
11.7.2013	12.2	0.70	125880	2325.7%
12.7.2013	282.5	0.46	101400	65.0%
Celkem	1885.1	hodin		
	31.42	minut		
Max. F	1.94			

Tab. 5 – Znehodnocený záznam měření dodávky

## 2.7 Závěr

V této kapitole se čtenář obeznámil s postupem zpracování záznamů otáček při únavové predikci v rámci ČZ a.s. V Tab. 6 je vyznačena doba trvání jednotlivých, již separovaných nenulových záznamů pro aplikace traktor a dodávka. V následujících kapitolách budou tyto data dále analyzovány.

Aplikace	Datum	Vzorkovací frekvence [s]	Doba trvání [h]
Traktor	Prosinec 2012	0,5	10,8
	Únor 2013	0,5	10,3
	Květen 2013	0,5	65,1
Dodávka	Červen 2013	0,3	28,5
	Červenec 2013	0,3	31,4
	Červenec 2013	0,3	30,5

Tab. 6 – Celkový přehled záznamů měření traktoru a dodávky



## **3 Provozní záznamy agentury EPA**

### **3.1 Agentura EPA**

EPA (Environmental Protection Agency) je americká vládní instituce založená v roce 1970, která vznikla za účelem ochrany lidského zdraví a životního prostředí. Spadá přímo pod Federální vládu Spojených států amerických. Když Kongresem projde environmentální zákon, EPA jej zrealizuje vytvořením regulací. Mimo to také nastavuje národní standardy, které dané státy prosazují skrze své vlastní regulace. [4]

### **3.2 Motivace a přístup k testu**

Cílem daného výzkumu byl vývoj celosvětově harmonizovaného testu motorů pro osvědčení o měření emisí dopravních prostředků určených pro těžký provoz.

Podkladem pro tento test bylo celosvětové shromáždění a následná analýza jízdních vlastností a statistických informací o těchto strojích. Pro tyto účely byl vytvořen univerzální přechodný pracovní cyklus, který je charakterizován sérií různých rychlostí a jím závislých otáček motoru odpovídající městskému, venkovskému a dálničnímu režimu jízdy. Z této databáze následně vznikl celosvětově strukturalizovaný test WTVC (Worldwide Transient Vehicle Test) viz [5].

### **3.3 Provozní záznamy**

Provozní záznamy EPA sestávají z celkem 7 typů pracovních strojů a 4 různých režimů jízdy. Mezi tyto aplikace patří zemědělský traktor, pásový traktor, bagr, exkavátor, dva typy nakladačů a zařízení pro svařování. Pro všechny aplikace se předpokládá jejich typický provozní režim jízdy, přičemž u svařecího stroje a nakladačů je navíc zobrazen jejich přechodný pracovní cyklus pro vysoké hodnoty rychlosti a točivého momentu. Vzorkovací frekvence je jedna sekunda.

### **3.4 Vznik záznamů**

Záznamy EPA vznikly z univerzálního přechodného pracovního cyklu, který byl určen experimentálně pomocí shromážděných dat a jízdních vlastností těchto strojů, přičemž jsou známy základní parametry jednotlivých motorů použitých v testu.



K vytvoření normalizovaného pracovního cyklu je určen soubor „Normalization Spreadsheet“ v MS excel, který je volně ke stažení na webových stránkách testu viz [6]. Vstupními parametry jsou naměřené hodnoty rychlosti, točivého momentu a hodnota volnoběžných otáček, čili otáček, kdy motor běží bez zatížení. Tyto hodnoty se poté jednoduchým přepočtem vztáhnou k nejvyšší hodnotě rychlosti a interpolované hodnotě točivého momentu pro danou rychlost (3,4). Výsledky jsou vyjádřeny v procentech.

$$v_{NOR} = \frac{v - v_o}{v_{MAX} - v_o} 100 [\%] \quad (3)$$

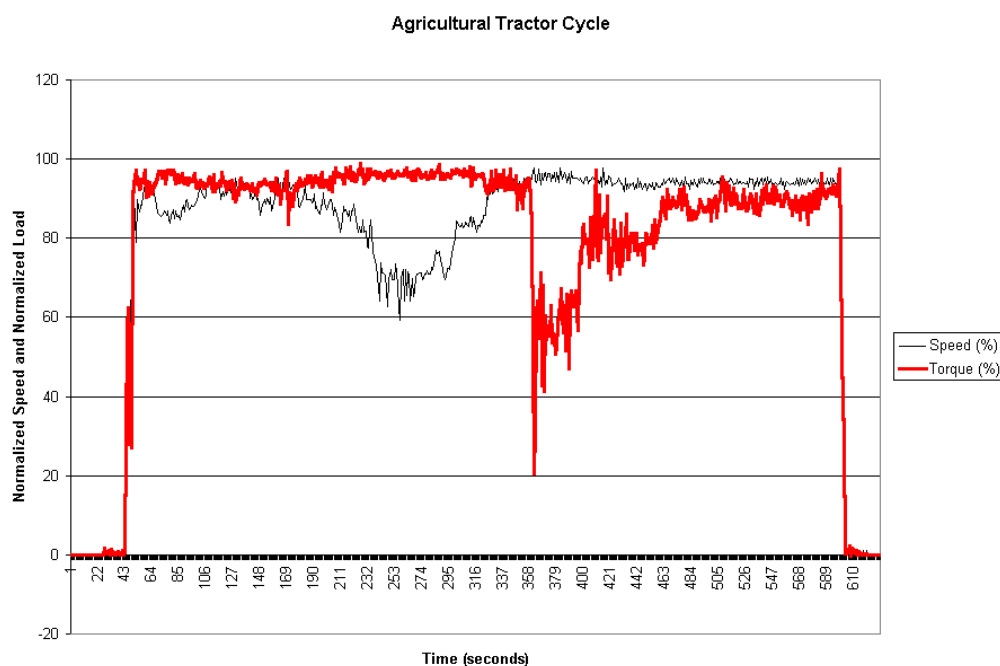
$$M_{NOR} = \frac{M}{M_{INT}} 100 [\%] \quad (4)$$

### 3.5 Výstupy jednotlivých měření

Výstupy měření, které jsou volně dostupné ke stažení na stránkách testu, sestávají z jednoduchého textového souboru naměřených hodnot rychlosti a točivého momentu vztažených k jejich maximálním hodnotám (*Obr. 10*) a grafu jejich závislostí na čase (*Obr. 11*).

```
010_agtract - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
US EPA Office of Mobile Sources
August 1999
NONREGULATORY NONROAD TRANSIENT DUTY CYCLES
Ag Tractor cycle
Time (sec) Speed (%) Torque (%)
0 0 0
1 0 0
2 0 0
3 0 0
4 0 0
5 0 0
6 0 0
7 0 0
8 0 0
9 0 0
10 0 0
```

*Obr. 10 – Ukázka úvodní hlavičky textového souboru záznamu EPA pro aplikaci zemědělský traktor*



Obr. 11 – Ukázka grafu záznamu EPA pro aplikaci zemědělský traktor

Ze zadaných dat můžeme zpozorovat, že u některých aplikací točivý moment nabývá záporných hodnot. V běžné praxi to zřejmě značí případ brzdění motorem. Tyto hodnoty je třeba vhodně vyfiltrovat, protože SR processor s tímto případem nepočítá a proto nám neposkytne následnou analýzu zátěžné historie. Po domluvě ze strany ČZ a.s. se záporné hodnoty vynulovaly, protože by neměly mít vliv na celkový dopad únavového poškození.

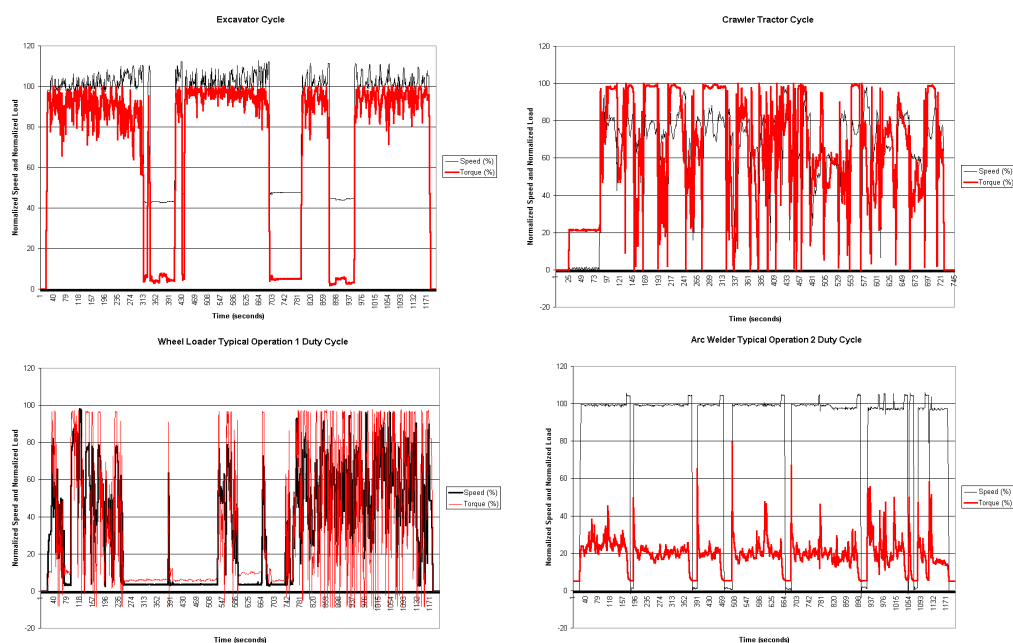
Dále si můžeme všimnout, že hustota jednotlivých záznamů je velmi malá. S tím souvisí počet řádků, který se pohybuje nejčastěji v rozmezí 1000 – 2000, což je oproti případu traktor nebo dodávka, kde se počet řádků záznamu pohybuje řádově v desítkách tisíc, velmi malý vzorek.

### 3.6 Charakteristický záznam

Ačkoliv jsou záznamy EPA pro jednotlivé aplikace svým provozním režimem rozdílné, dají se zde naleznout charakteristické spojovací znaky. Doba trvání jednotlivých záznamů zpravidla nepřesahuje dobu dvaceti minut. Dále pro záznamy EPA platí, že hodnoty točivého momentu jsou vztaženy ke své maximální hodnotě a z toho důvodu bude hodnota parametru  $F$  vždy nejvýše  $F_{MAX}=1$ .

Z dostupných grafů jednotlivých měření je vidět, že se zde nacházejí velké extrémy v zaznamenaném točivém momentu viz Obr. 12. Všechny grafy jsou dostupné na přiloženém CD-ROMu v adresáři „EPA“ → „Grafy“.





Obr. 12 – Ukázka grafů provozního měření EPA pro různé typy aplikací

Ve všech záznamech, kromě svářečického stroje, byl zaznamenán alespoň jeden výkyv z minimální úrovně otáček do maximální a naopak.

Charakteristický záznam má tři podoby. První je konstantní, téměř symetrické oscilování mezi minimálními a maximálními hranicemi točivého momentu. Druhý záznam představuje prudký výkyv z klidové polohy na 80-100% maximálního momentu, držení se na dané úrovni a následný pokles zpět do 0-10% maximálního momentu. Pro oba tyto typy v rámci listu Llevels mají velké procentuální zastoupení cykly s vysokou hodnotou parametru  $F$ , přičemž pro první typ jsou vysoké hodnoty obsaženy v malém počtu cyklů, zatímco u druhého typu jsou více koncentrované. Třetí typ představuje klidný provozní režim, který kromě ojedinělých výkyvů nedosahuje žádných jiných extrémů a v listu Llevels nemají vysoké hodnoty parametru  $F$  prakticky žádné zastoupení.

Z hlediska listu LDurs se zde obecně kvůli nízkému počtu záznamů objevují především cykly, které nepřesahují půl minuty.

Výstupy listu LChng, uvedené na příloženém CD-ROMu v adresáři „EPA“ → „LChng“ se velmi liší od záznamů prováděné ČZ a.s. Na první pohled je vygenerovaná mapa mnohem širší. To je způsobeno vzorkovací frekvencí, která je větší než u měření ČZ. Dále je na mapách vidět určitá symetričnost a malá četnost obsazených polí z důvodů malého počtu dat.

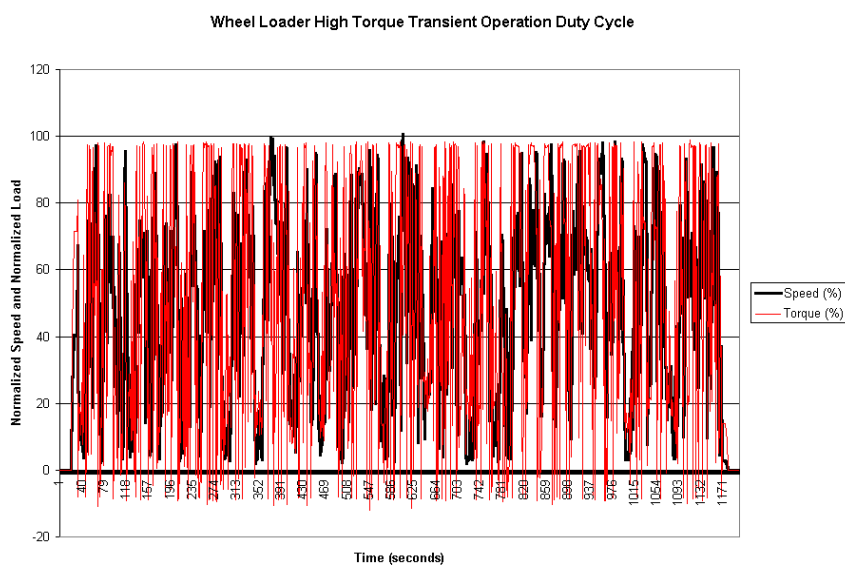


### 3.7 Analyzování dat SR Processorem

Postup pro zpracování provozních dat agentury EPA je zcela analogický jako pro případ dodávka, který je popsán v *Kap. 2*. Z důvodů vysokého počtu provozních měření, byly pro bližší analýzu vybrány dvě aplikace s různým provozním režimem jízdy. Tyto aplikace jsou nakladač a jeho přechodný cyklus pro vysoké hodnoty točivého momentu (wheel loader, high torque transient operation) a bagr (backhoe).

#### 3.7.1 Záznam Wheel Loader

Ze záznamu (*Obr. 13*) je vidět, že točivý moment osciluje s určitou pravidelností mezi svými minimálními a maximálními hranicemi. Objevuje se zde vysoká četnost záznamu momentů, které jsou menší než nula. Točivý moment však nedosáhne své maximální hodnoty.



*Obr.13 – Provozní záznam agentury EPA pro aplikaci nakladače*

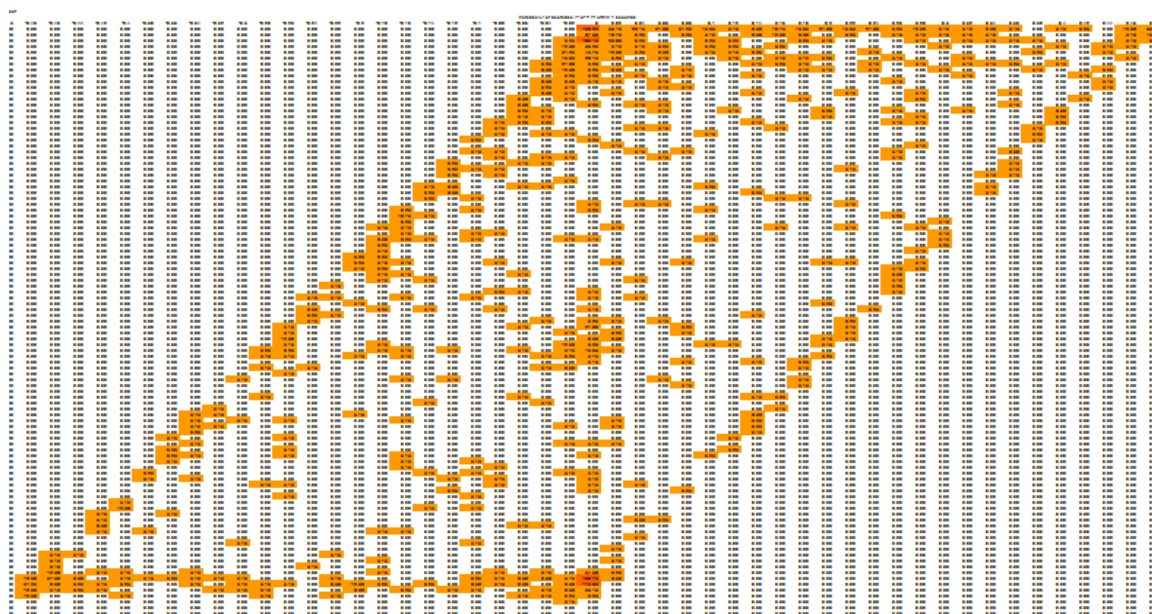
Na *Obr. 14* je vidět výřez z listu Llevels. Vzhledem ke svému pracovnímu cyklu je v rozmezí parametru  $F=0,93$  až  $F=0,96$  velmi vysoké procentuální zastoupení. Doba strávená na úrovni  $F=0,94$  zaujímá 5,8% celkového času.



0.88	5628.5	0.5%
0.89	5660.39	0.5%
0.90	5692.1	0.6%
0.91	5723.64	0.6%
0.92	5755	0.6%
0.93	5786.19	1.5%
0.94	5817.22	5.8%
0.95	5848.08	3.9%
0.96	5878.78	1.1%
0.97	5909.31	0.2%
0.98	5939.7	0.0%
0.99	5969.92	0.0%
1.00	6000	0.0%
1.01	6029.93	0.0%

Obr. 14 – Výřez listu Llevels pro případ nakladače

V mapě (Obr. 15) listu LChng je vidět určitá souměrnost, protože provozní záznam nakladače se dá prohlásit téměř za symetrický. Mapa není hustě obsazená z důvodu malého počtu záznamů a jsou na ní vidět velké výkyvy.



Obr. 15 – Mapa listu LChng pro případ nakladače

Z hlediska listu LCint zde připadá pro následné vyhodnocení v úvahu pouze tabulka T0x, protože cyklus nedosahuje hodnoty  $F=1$ . Proto tabulky TMx a TxM, které sledují zvýšení a pokles zatěžování právě do  $F=1$ , neposkytují relevantní výsledky.

Z tabulky Tx0 (Obr. 16) lze vyčíst velmi agresivní tendenci ve zrychlení z  $F=0$  na rozmezí  $F=0,9-0,95$ . Záznamy s největší četností jsou v intervalu 0-3 sekundy. Prakticky se zde neobjevují záznamy delší než 30 sekund.

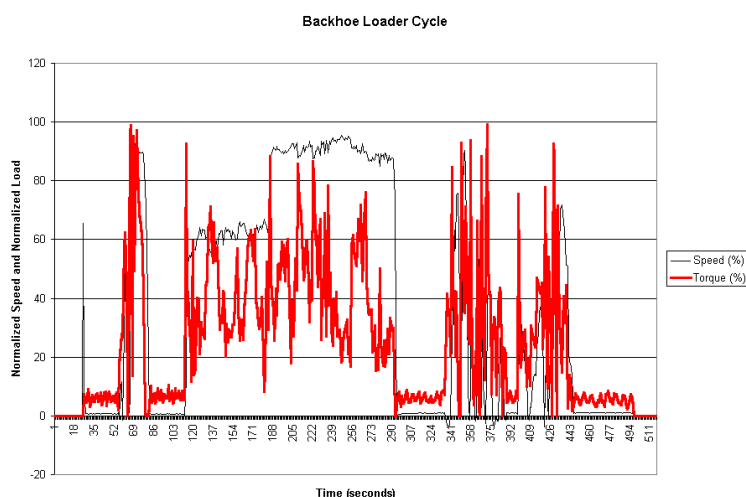


F parameter [-]		Number of occurrences per 1 hour							
from	to	maximum duration of the interval [min]							
		0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
0	0.5	0.650	0.150	0.280	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.6	0.037	0.210	0.280	0.150	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.7	0.090	0.090	0.001	0.001	0.031	0.000	0.000	0.000
0	0.75	0.090	0.018	0.150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.8	0.220	0.006	0.001	0.001	0.031	0.000	0.000	0.000
0	0.85	0.018	0.090	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.9	1.000	0.485	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.95	0.780	0.005	0.220	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000
0	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	1.05	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	1.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Obr. 16 – Tabulka T0x záznamu nakladač

### 3.7.2 Záznam backhoe

Z přiloženého grafu (Obr. 17) je vidět poměrně klidný pracovní cyklus. Hodnoty točivého momentu kmitají kolem 20 - 80% a nedosahují svého maxima



Obr. 17 – Provozní záznam agentury EPA pro aplikaci bagr

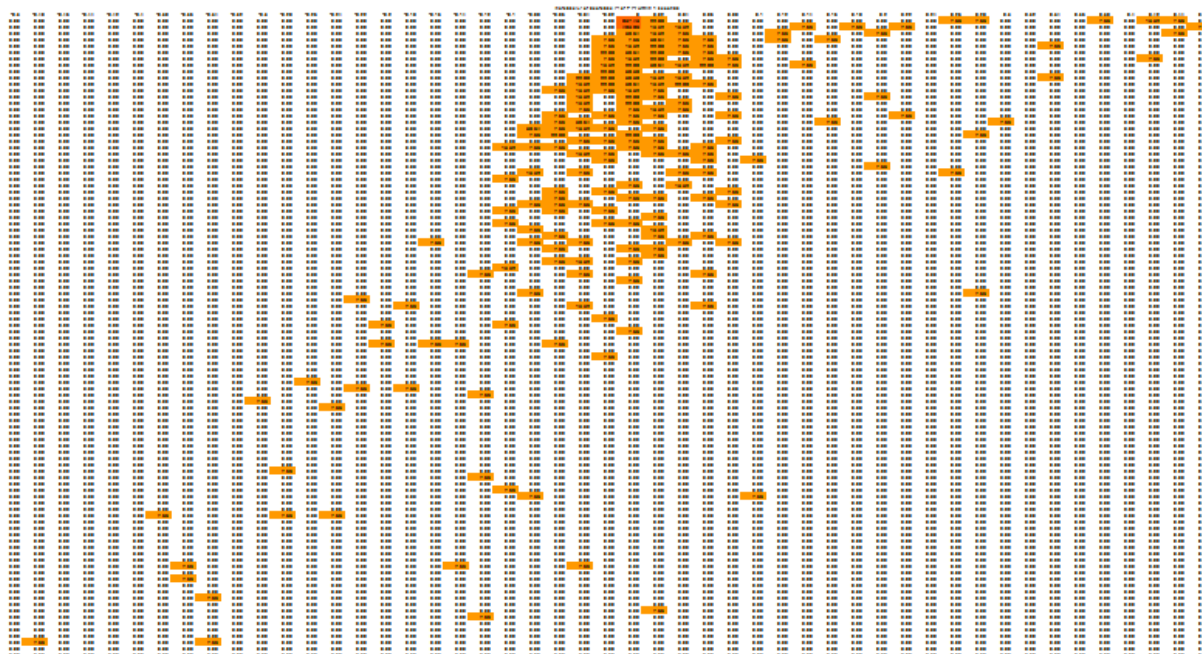
Na Obr. 18 je vidět výřez z listu Llevels. Oproti nakladači, kde zastoupení na vysokých úrovních otáček bylo velmi vysoké, zde je jejich procentuální zastoupení řádově nižší.

0.90	5692.1	0.035%
0.91	5723.64	0.035%
0.92	5755	0.032%
0.93	5786.19	0.043%
0.94	5817.22	0.062%
0.95	5848.08	0.052%
0.96	5878.78	0.052%
0.97	5909.31	0.046%
0.98	5939.7	0.026%
0.99	5969.92	0.0%
1.00	6000	0.0%

Obr. 18 – Výřez listu Llevels pro případ bagru



V mapě (Obr. 19) listu LChng je vidět vysoká koncentrace na nižších úrovních otáček. I zde se vyskytují osamělá pole, která produkují náhlé výkyvy pracovního cyklu. Celková četnost polí je i v tomto případě velmi nízká.



. Obr. 19 – Mapa listu LChng pro případ bagru

Stejně jako v předchozím případě cyklus nedosahuje hodnoty  $F=1$ , tudíž tabulky  $TM_x$  a  $TxM$  nejsou podstatné.

Z tabulky  $Tx_0$  (Obr. 20) lze vyčíst, že i v tomto případě se velmi rychle dostane bagr z  $F=0$  na rozmezí  $F=0,85-0,95$ . Záznamy s největší hodnotou jsou v intervalu 3 sekund a celkově se zde objevují v intervalech 0 – 5 minut.

F parameter [-]		Number of occurrences per 1 hour							
from	to	maximum duration of the interval [min]							
		0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
0	0.5	0.153	0.000	0.000	0.077	0.077	0.000	0.000	0.000
0	0.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.077	0.000	0.077	0.000
0	0.7	0.000	0.000	0.077	0.000	0.077	0.000	0.077	0.000
0	0.75	0.153	0.000	0.077	0.000	0.000	0.077	0.000	0.000
0	0.8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.85	0.153	0.000	0.000	0.000	0.077	0.000	0.000	0.000
0	0.9	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.95	0.077	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	1.05	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	1.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Obr. 20 – Tabulka  $T0_x$  záznamu bagru



### 3.8 Závěr

Z uvedené analýzy je zřejmé, že dané aplikace jsou z hlediska svého zátěžného provozního režimu diametrálně odlišné. Zatímco nakladač má velice agresivní zátěžnou charakteristiku, bagru připadá spíše klidnější průběh. Jejich následná analýza z hlediska rain-flow procedury je popsána v následující kapitole.

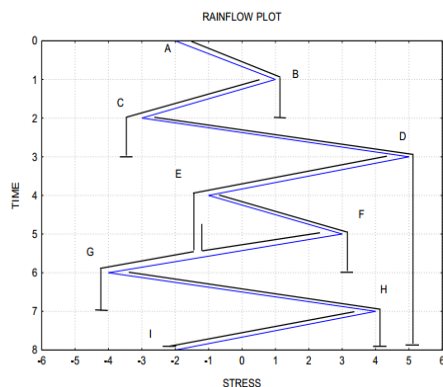
## 4 Analýza výstupní zátěžné historie

### 4.1 Rain-flow

Rain-flow analýza, neboli metoda stékajícího deště se v dnešní době považuje za nejsprávnější a v současné době i nejvíce používanou metodou dekompozice náhodného procesu. „Byla odvozena ze studia cyklických deformačních vlastností a hystereze mezi napětím  $\sigma$  a přetvořením  $\varepsilon$  u skutečného kovového materiálu“. V tomto případě se uzavřeným cyklům přiřazuje poškození, které se dále kumuluje do celkového poškození.

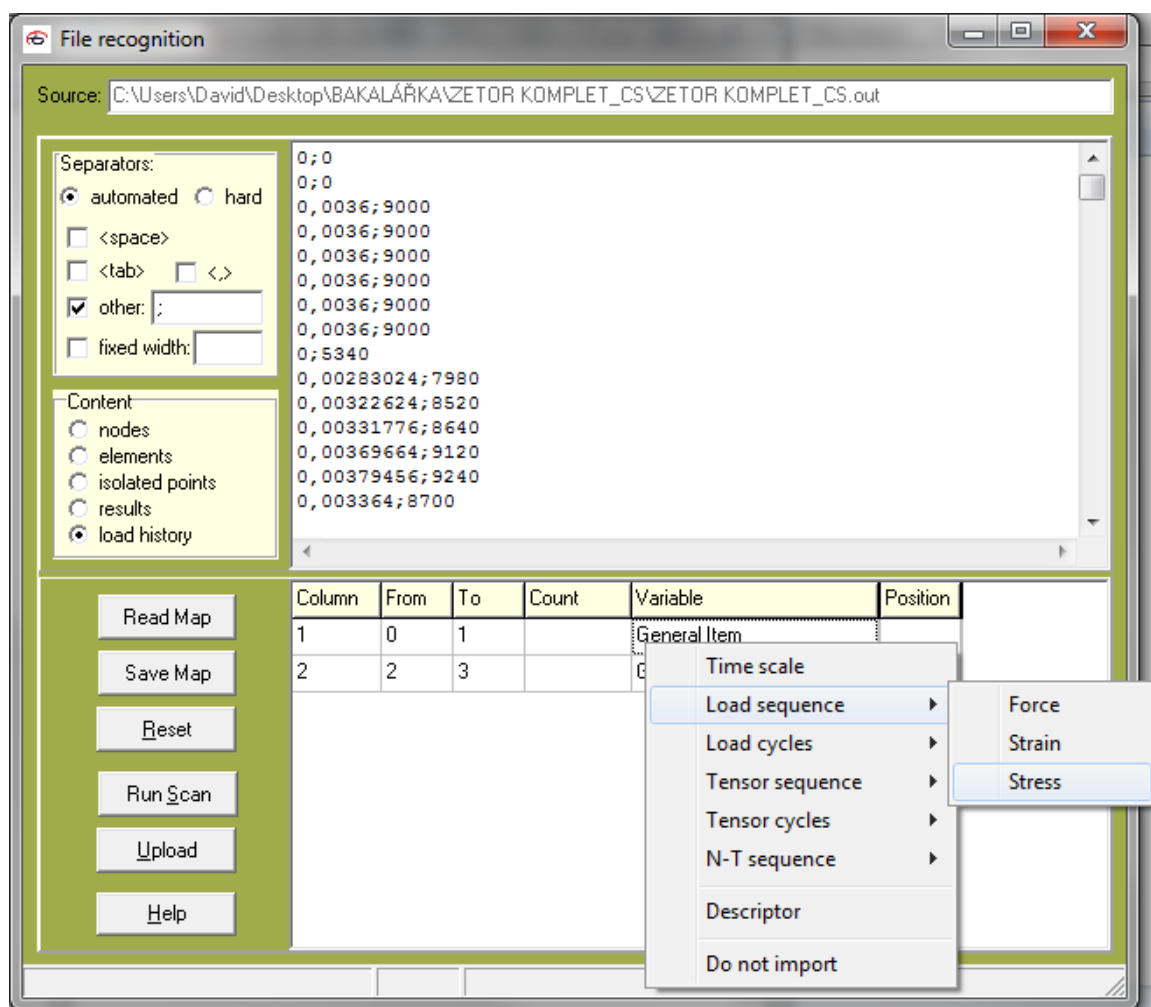
„Pokud záznam náhodného procesu otočíme od  $90^\circ$  a představíme si, že jednotlivé kmity náhodné proměnné  $X$  (měřené napětí  $\sigma$  nebo přetvoření  $\varepsilon$ ) představují střechy rozložené nad sebou, po kterých stéká déšť. Přitom musíme dodržovat tato pravidla:

- a) Největším lokálním maximem daného záznamu vyhodnocení začíná a opět končí, přičemž pomocný zahajovací půlkmit A-B se nepočítá
- b) „Proudy vody“ vytékají ze všech vnitřních koutů střech, tj. z minima směrem doprava nebo z maxima směrem doleva.
- c) Proud vody pokračuje po nižších střechách až do okamžiku, kdy se buďto kladný proud dostane během svislého pádu do bodu proti minimu, které je menší než to, v němž proud začal nebo kdy se záporný proud dostane do bodu proti maximu, které je větší než to, v němž proud začal. Pro tento případ se započítává rozkmit jako půlkmit.
- d) Proud vody pokračuje po nižších střechách až do okamžiku, kdy narazí na proud padající z vyšší střechy. Tím se definuje další rozkmit stejné velikosti, ale v opačném měru než rozkmit zmíněný v odstavci c) a jeho zápočtem se doplňuje paměť na jeden úplný kmit, který odpovídá uzavřené hysterezní smyčce“. [7]



Obr. 21 – Provedení procedury rain-flow. [cit. 2015-06-20]. Dostupný pod licenci Vibrationdata na < [http://www.vibrationdata.com/tutorials/rainflow\\_counting.pdf](http://www.vibrationdata.com/tutorials/rainflow_counting.pdf) >

Pro rain-flow analýzu byl v tomto případě použit volně dostupný software PragTic od Ing. Jana Papugy, Ph.D. a jeho kolektivu. Software nám umožní import dat, spuštění rain-flow procedury a následné zobrazení rain-flow matice. [2]



Obr. 22 – Uživatelské rozhraní PragTicu



Nejprve si uživatel do programu nahraje soubor s extenzí \*.out., který je vygenerovaný SR Processorem popsáným v předchozí kapitole. Soubor sestává ze sledu hodnot bez časové osy, které jsou od sebe oddělené znakem ENTER. „Pro následné zpracování zátěžné historie do podoby jednotlivých cyklů je potřeba aplikovat analýzu rain-flow popsanou v předešlé kapitole.“ [2]

V uživatelském rozhraní (*Obr. 22*) uživatel vybere základní parametry pro aplikaci rain-flow procedury, jako je separátor, který je v tomto případě středník, význam obsahu souboru, a nadefinuje první řádek. Dále je třeba určit význam načítané informace. Rozsah obsahu je poté nutné naskenovat, načíst a označit jméno vektoru v databázi PragTicu.

Nyní je načten celý soubor. Nejprve si uživatel zvolí jednu z definovaných zátěžných historií. Poté je uživatel dotázán, zda chce uskutečnit zpětné uzavírání cyklů během druhého běhu zátěžnou historií, ve které dochází k hledání globálního maxima či minima. „Těmto hodnotám není umožněno formovat uzavřený cyklus, nýbrž jsou ukládány bokem a tvoří vzestupnou část tzv. rezidua.“ Když daná hodnota dosáhne globálního extrému, pak se bokem zapisují hodnoty, které jsou menší či větší než hodnota předcházejícího extrému. [2]

Pokud zátěžná historie začíná globálním extrémem, reziduum nevzniká a toto řešení se chová jako by se daný úsek opakoval vícekrát za sebou a ne pouze jedenkrát. Právě toto zaručí zpětné uzavírání cyklů během druhého běhu zátěžnou historií. [2]

Tímto byly definovány všechny vstupy pro realizaci rain-flow procedury. Její výsledek je zobrazen v tabulce zobrazené na *Obr. 23*. „Jedná se o tabulku, kde na řádcích jsou jednotlivé detekované cykly vždy v pořadí horní úvrat' cyklu, dolní úvrat' cyklu a počet výskytů“. [2]





Line	LFU	LFL	LFO
1	0,13003236	0,00591361	1
2	0,41460721	0	1
3	0,65658609	0	1
4	0,80030916	0,26904969	1
5	0,546121	0,36204289	1
6	0,597529	0,023409	1
7	0,93431556	0,00227529	1
8	0,94692361	0,00210681	1
9	0,95238081	0	1
10	0,36192256	0,00021609	1
11	0,94458961	0,49674304	1
12	0,93760489	0,89208025	1
13	0,95531076	0,024336	1
14	0,96177249	0	1

Obr. 23 – Výsledek rain-flow procedury

#### 4.2 Zpracování rain-flow matic

Rain-flow matice popisuje počet výskytů jednotlivých cyklů mezi definovanými spodními a horními úrovněmi otáček. V prvním kroku je nutné určit dimenzi vznikající matice, ke kterému vybízí dialogové okno. Pro následující zpracování budeme uvažovat matici 61x61. V dalším dialogovém oknu stanovíme meze matice. Je zřejmé, že mezní otáčky jsou během provozu překračovány a proto je vhodné volit od počátku takové meze a počty tříd, které umožní jednoduché rozšiřování. V případě, že některá hodnota překročí aktuálně nastavené meze, je možno stávající matice jednoduše rozšířit přidáním dalších tříd s identickým krokem na dosavadní mezní hodnotu. [2]

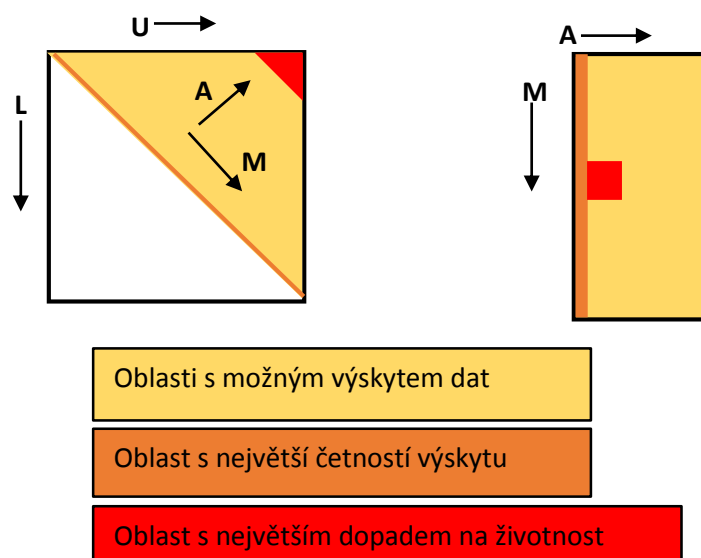
V tomto případě volím dolní mez  $S_D = -0,01$  a horní mez  $S_H = 1,21$ . Je také třeba vyplnit prahovou hodnotu, čili nejnižší amplitudu, pod kterou se dané cykly nebudou započítávat. Pro následné zpracování dat je důležité dodržovat identické meze pro následné porovnávání.

PragTic umožňuje sestavit dvě zobrazení výsledné matice. První z nich je U-L matice (Upper – Lower), čili horní – dolní úvratě. Druhé zobrazení je A-M, které sleduje amplitudy a střední hodnoty.

V rain-flow matici se data vyskytují dle Obr. 24. Všechny oblasti však z hlediska generování poškození nejsou významné. Největší dopad na poškození má amplituda zátěžného cyklu.



Pro matici typu U-L se jedná o prostor s nejvyššími horními hodnotami a nejnižšími dolními hodnotami. U A-M matice o oblast s nejvyššími horními hodnotami a středními dolními hodnotami. [2]



Obr. 24 – Ukázka možných výskytů dat v U-L a A-M matici dle [2]

### 4.3 Výstupy jednotlivých měření

Pro výstupy rain-flow matic byla vybrána matice U-L. Matice popisuje počet výskytů cyklů definovaných spodními a horními úrovněmi otáček. V příloze jsou zobrazeny jednotlivé matice pro záznamy traktor, dodávka, nakladač a bagr. Hodnoty za svislou červenou čarou jsou ty, které překročily maximální provozní hranici otáček. Hodnoty v zeleném rámečku mají největší dopad na životnost turbodmychadla.

Například na (Obr. 25) se ve vyznačené buňce vyskytuje celkem 43 cyklů mezi horní úrovní otáček v rozmezí  $F=0,52$  až  $F=0,78$  a spodní úrovní otáček v rozmezí  $F=0,39$  až  $F=0,65$ .

Z těchto matic však nelze vyčíst příliš mnoho informací. Dají se zjistit pouze celkové rozložení cyklů. Je tedy nutné je převést na parciální poškození, aby se dal posoudit jejich samotný vliv na celkové poškození v kritické oblasti.



Upper	Class		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lower	rotations [krot/min]		0	54	78	94	108	121	132	143	153	164
Class	rotations [krot/min]	paramete r F [-]	0.00	0.13	0.26	0.39	0.52	0.65	0.78	0.91	1.04	1.20
1	0	0.00	31.0	112.0	57.0	38.0	20.0	19.0	20.0	22.0	35.0	1.0
2	54	0.13	0	42.0	97.0	41.0	20.0	19.0	21.0	18.0	16.0	0
3	78	0.26	0	0	48.0	75.0	23.0	14.0	13.0	14.0	7.0	0
4	94	0.39	0	0	0	24.0	43.0	17.0	8.0	13.0	6.0	0
5	108	0.52	0	0	0	0	15.0	43.0	29.0	3.0	2.0	0
6	121	0.65	0	0	0	0	0	25.0	78.0	12.0	5.0	0
7	132	0.78	0	0	0	0	0	0	35.0	66.0	8.0	0
8	143	0.91	0	0	0	0	0	0	0	25.0	37.0	0
9	153	1.04	0	0	0	0	0	0	0	0	5.0	0
10	164	1.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

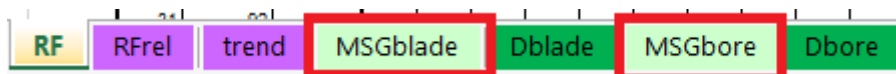
Obr. 25 – Ilustrační rain-flow U-L matice s dimenzí 10x10 záznamu traktor

#### 4.4 Analýza dle Femfatu

K výše uvedeným požadavkům slouží aplikace pracovně nazvaná Femfat v rámci MS Excel, která přejímá postup výpočtu stejnojmenného komerčního únavového řešiče, vyvíjeného ECS Magna-Steyr v Rakousku. Analýza dle Femfatu umožňuje rain-flow matice vygenerované v programu PragTic převést na celkové poškození, ze kterého se následně určí výsledná životnost pro dané opakující se provozní zatížení. Aplikace je popsána v technické zprávě viz [2].

Výpočet se realizuje na základě znalosti S-N křivky v tahu – tlaku, která je výsledkem únavových zkoušek daného materiálu, amplitudy a střední hodnoty parametru F u každé jednotlivé buňky rain-flow matice.

Do listu „MSG“ (Obr. 26) se do modře vyznačených polí zadají vstupní data, které zahrnují materiálové parametry, MKP data, a vlastnosti turbodmychadla. MKP data vycházejí z modelu a zahrnují maximální zjištěné napětí v kritických místech a poměrný gradient napětí odpovídající právě těmto místům.

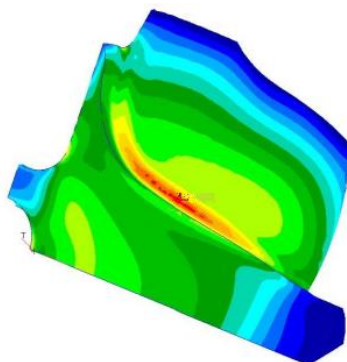


Obr. 26 – Jednotlivé listy aplikace pro analýzu dle Femfatu

Klíčovými hodnotami jsou zde maximální provozní otáčky (maxrot) a maximální napětí (maxstress) dosažené ve vyšetřovaném bodě konstrukce MKP modelu (Obr. 27).



Pomocí těchto parametrů lze přímou úměrou vztáhnout meze každé buňky rain-flow matice k hodnotě napětí. Jako výchozí materiál pro následující srovnání bude uvažován materiál 7075 – T6 při teplotě 150°C se zadanými parametry viz *Kap. 5* pro vývrt rotoru.



*Obr. 27 – Průběh napětí na segmentu turbínového kola v programu MSC Fatigue*

#### 4.5 Určení životnosti

K určení velikostí poškození od jednotlivých kmitů je nejčastěji používána Palmgrenova – Minerova hypotéza, kde poškození od určitého kmitu s určitou amplitudou a střední hodnotou je dáno vztahem (4), kde  $n_i$  prezentuje četnost daného kmitu v průběhu zatěžování a  $N_i$  odpovídá počtu daných kmitů do poruchy.

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

Pro určení životnosti je však nutné určit výsledné poškození, které je dle Palmgrena – Minera:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

Počet cyklů, které součást vydrží do poruchy, případně do vzniku únavové trhliny, je dán poměrem kritické hodnoty poškození a kumulovaného poškození. V tomto případě je hodnota kritického poškození  $D_{er} = 1$ . Výsledný vztah je tedy (5). [7]

$$N = \frac{D_{er}}{D} = \frac{1}{D} \quad (5)$$



#### 4.6 Rain-flow matice záznamů ČZ

Rain-flow matice provozních měření ČZ jsou uvedené v příloženém CD-ROMu v adresáři „ČZ“ → „Rain-flow“. Na obrázcích je zeleným rámečkem vyznačena kritická oblast, která je pro provozní záznamy ČZ vymezena v rozmezí  $F=0,9$  až do maximálního přesažení provozních otáček v horní úrovni a v rozmezí  $F=0$  až  $F=0,1$  v dolní úrovni otáček. Ve fialovém rámečku je pak vyznačen cyklus, ke kterému se váže největší přesažení maximálních provozních otáček. Kritická oblast je vyznačena na spodní straně matice ve větším měřítku s procentuálním poškozením od jednotlivých cyklů.

Z matice prvního měření traktoru při rozvozu je vidět, že došlo k jednomu významnějšímu přesažení provozních otáček. Ukázalo se, že tento jediný cyklus generuje 5,7% celkového poškození. Největší poškození generuje cyklus těsně za hranicí překročení provozních otáček, který se zde objevuje čtyřikrát a generuje více než jednu desetinu veškerého poškození. Cykly, které překročily provozní otáčky a leží v kritické oblasti, generují přibližně 60% celkového poškození, přičemž samotná kritická oblast vytváří 95% poškození.

Rain-flow matice záznamu traktoru při tažných pracích je z hlediska vyšších poškození více koncentrovanější. V porovnání s prvním měřením je zde podobná hladina dílčího poškození, nicméně v menší míře polí a to přibližně v polovičním počtu polí matice a v polovičních počtech cyklů. Vyskytuje se zde opět jedno významné překročení provozních otáček a to přímo na stejné úrovni otáček jako v předcházejícím měření. Nicméně tento cyklus generuje pouze 3,2% poškození, tedy přibližně poloviční hodnotu než ten samý cyklus z prvního měření.

Důvodem je, že rozsah přetížení na maximální provozní otáčky již není tak velký jako v předchozím případě a nevybíhal do takových extrémů. Ukazuje se tedy, že zátěžný režim byl spíše poklidnější. Součet poškození cyklů přesahující maximální provozní otáčky je v tomto případě 40% a kritická oblast tvoří 85% celkového poškození.

Rain-flow matice záznamu dodávka ukazuje v poměru se záznamy traktoru větší koncentraci hodnot, které jsou větší než maximální otáčky. Cyklus, který dosáhl největšího přesažení generuje 1,4% veškerého poškození. Přetížení na maximální provozní otáčky je zde v mnohem větší míře. Z toho vyplývá, že zátěžný režim byl mnohem více agresivnější než v předchozím případě.



#### 4.7 Rain-flow matice záznamů EPA

Rain-flow matice provozních záznamů EPA jsou uvedené na příloženém CD-ROMu v adresáři „EPA“ → „Rain-flow“. Kritická oblast je stejně jako u záznamů ČZ vyznačena zeleným rámečkem. Je ohraničena stejným způsobem jako v předchozím případě s tím rozdílem, že v horní úrovni otáček je parametr  $F$  vymezen v rozmezí  $F=0,9$  až  $F=1$ , protože zde nedochází k přetížením na maximální provozní otáčky. Fialovým rámečkem jsou ohraničeny dominantní cykly, které generují největší poškození, které je následně procentuálně zobrazeno ve výřezu na spodní straně matice u blíže analyzovaných záznamů.

Provozní data agentury EPA jsou do počtu výskytů jednotlivých cyklů velmi málo koncentrovaná, kvůli nízké vzorkovací frekvenci a málo objemnému počtu dat. Jelikož jsou hodnoty točivého momentu vztažené k jeho maximální hodnotě, bude hodnota parametru  $F$  maximálně rovna jedné, a proto nedochází k jejímu přesazení.

Nejzajímavější výstupem bude případ nakladače. Z rain-flow matice záznamu můžeme vidět dvě pole, ve kterých se prakticky kumuluje veškeré poškození, které odpovídá 80% celkového poškození. Vyznačená oblast poté generuje 92% celkového poškození. To ovšem není zase tak překvapivé, už z pohledu na příložený graf, kde hodnota točivého momentu kmitá mezi svými maximy a minimy.

Rain-flow matice záznamu bagru vykazuje předpokládaný klidný provozní režim. Největší hodnoty dosahuje cyklus označený v příloze červeným rámečkem, který generuje téměř 70% veškerého poškození. Vyznačená kritická oblast způsobuje bezmála 100% všech poškození.

#### 4.8 Komparace rain-flow matic

V případech dodávka i traktor během měření docházelo k pravidelnému překračování maximálních otáček turbodmychadla. U dodávky však frekvence výskytu překročení těchto otáček byla mnohem větší z důvodů častého brždění a zpomalování.

Mezi prvním a druhým měřením traktoru je však také rozdíl. První měření ukázalo přibližně dvojnásobnou kumulaci cyklů v kritické oblasti při téměř stejné zátěžné době. Je tedy zřejmé, že traktor při rozvozu zatěžoval svým provozním režimem turbodmychadlo více, než při tažných pracích prováděných v druhém měření.



Provozní záznamy EPA sestávají pouze z jednoho charakteristického záznamu, který se v rámci následné rain-flow analýzy bude opakovat. Tyto záznamy tedy neposkytují z dlouhodobého hlediska reprezentativní vzorek, protože se nepředpokládá, že by jednotlivé aplikace byly zatěžovány pouze tímto cyklem. Ze záznamů však lze vyčíst, který z těchto cyklů má na celkovou životnost největší dopad.

## 5 Únavové analýzy konkrétní konfigurace v rámci ČZ a.s.

Únavová analýza se provádí pomocí postupu dle Femfatu viz *Kap. 4.4*. Výsledná životnost součástí se pak určí vztahy popsány v *Kap. 4.6*. V této kapitole byly porovnány rotory dmyhadla a turbíny řady C31.

Kritická místa, ve kterých dosahuje rotor největšího napětí, jsou lopatky rotoru, vývrt pro vsazení hřídele do dmyhadlového kola a okolí místa, kde je turbínové kolo svařeno s hřídelem. Materiálová data uvedená v následujících kapitolách byla poskytnuta ze strany ČZ.

Výpočet je realizován pro konkrétní kombinaci daného typu turbodmyhadla, zvolených materiálových parametrů a zátěžných historií, které se však v reálu k danému turbodmyhadlu nevztahují. Výsledky tak pro jinou zátěžnou historii a také pro případ jiného kola mohou vypadat odlišně.

### 5.1 Vstupy pro dmyhadlové kolo

Pro dmyhadlové kolo se uvažuje jako standardní materiál slitina hliníku 7075 - T6 pro frézovaná dmyhadlová kola užívána v ČZ a.s. Pro lopatky rotoru bylo použito nastavení uvedené na *Obr. 28*. Pro vývrt se použije nastavení uvedené na *Obr. 29*. Tyto dvě tabulky se liší v dosaženém maximálním napětí (maxstress) v kritickém místě a v hodnotě poměrného gradientu napětí (relative stress gradient). Parametry byly zadány ze strany ČZ a.s. MKP modely byly zpracovány v ČZ a odtud vychází maximální napětí a relativní napětíový gradient.

150°C	7075	wrought aluminum alloy	stress gradient effect:			roughness	prob. of su	quantil	
Node	226543	Rm	470	bend/tens factor applied	1.1	componer	40	50	0
maxrot	150 000	Rm corrected	470	sigCbending	246.7	specimen	1	50	0
maxstress	393.8	NRm	525	sigCbending corrected	246.7				
SN_W	10.21	sigC	224.3	radius of bending speci	4	1/probabil	1.000		
SN_C	1.00E+30	NC	1E+06	relative stress gradient	2.568	roughness	0.701		
SN_SS	16.467171			stress gradient factor	1.254	total facto	1.031		
				slope modified by the st	5.452				

Obr. 28 – List s přípravou výpočtu dle Femfatu pro lopatky rotoru



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	150°C	7075	wrought aluminum alloy		stress gradient effect.				roughness	prob. of su	quantil
2	Node	22607	Rm	470	bend/tens factor applic	1.1		componer	40	50	0
3	maxrot	150 000	Rm corrected	470	sigCbending	246.7		specimen	1	50	0
4	maxstress	356.8	NRm	525	sigCbending corrected	246.7					
5	SN_W	10.21	sigC	224.3	radius of bending speci	4		1/probabil	1.000		
6	SN_C	1.00E+30	NC	1E+06	relative stress gradient	0.323		roughness	0.701		
7	SN_SS	16.467171			stress gradient factor	1.111		total facto	0.851		
8					slope modified by the st	1.418					

Obr. 29 – List s přípravou výpočtu dle Femfatu pro lopatku rotoru

## 5.2 Vstupy pro turbínové kolo

Pro turbínové kolo se uvažuje materiál IN 713C, což je austenitická niklová žárupevná slitina. Protože pro tyto slitiny však ČZ a.s. chybí relevantní data týkající se vlivu gradientu napětí, byla tato hodnota vynulována (Obr. 30). To znamená, že se vliv gradientu vyruší a definované maximální napětí působí po celém průřezu vzorku. Toto je velmi konzervativní řešení a vede k podstatně nižším životnostem, než kdyby byl gradient napětí uvažován. Definovaná data jsou vztažena pro teplotu 500°C

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	500°C	IN 713C	cast nickel alloy		stress gradient effect.				roughness	prob. of su	quantil
2	Node	22607	Rm	865	bend/tens factor applic	1.2		componer	40	50	0
3	maxrot	150 000	Rm corrected	865	sigCbending	308.3		specimen	1	50	0
4	maxstress	630	NRm	239	sigCbending corrected	308.3					
5	SN_W	6.87	sigC	256.9	radius of bending speci	4		1/probabil	1.000		
6	SN_C	3.55E+22	NC	1E+06	relative stress gradient	0		roughness	0.607		
7	SN_SS	77.457			stress gradient factor	1.000		total facto	0.607		
8					slope modified by the st	1.000					

Obr. 30 – List s přípravou dle Femfatu pro lopatky rotoru turbínového kola

## 5.3 Výsledky

V Tab. 7,8 je uvedeno shrnutí životností vypočtených dle Femfatu v rámci ČZ a.s. Největší životnost pro obě kola vykazuje traktor při tažných pracích, nejmenší pak dodávka. Životnost odpovídá daným provozním režimům. Provozní režim dodávky byl mnohem agresivnější a mnohem více docházelo k přesazení maximálních otáček. Bližší přehled analýzy dle Femfatu dmychadlového a turbínového kola pro provozní záznamy dodávky a traktoru při zadaných parametrech ze strany ČZ a.s. jsou uvedené na přiloženém CD-ROMu v adresáři „ČZ“ → „Výsledky“.





Aplikace	Životnost [h]	
	Lopatky	Vývrt
Traktor - Všechna měření	16 575	15 324
Traktor - Tažné práce	7 429	6 888
Traktor - Rozvoz	37 354	34 211
Dodávka	4 036	3 873

Tab. 7 – Výsledný přehled životností pro dmyhadlové kolo

Aplikace	Životnost [h]	
	Lopatky	Vývrt
Traktor - Všechna měření	23 375	42 176
Traktor - Tažné práce	12 954	23 225
Traktor - Rozvoz	61 615	109 939
Dodávka	6 880	12 543

Tab. 8 – Výsledný přehled životností pro turbínové kolo

V Tab. 9,10 jsou uvedeny životnosti blíže analyzovaných provozních měření EPA. Na CD-ROMu jsou v adresáři „EPA“ → „Výsledky“ uvedeny životnosti pro všechny záznamy. Pro aplikace, které mají více provozních režimů byl vybrán režim s vysokou hodnotou točivého momentu. Ze záznamů EPA se dá obecně předpokládat, že nejagresivnější provozní režim, který je v tomto případě záznam nakladač, je režim konstantně fluktuující mezi maximálními a minimálními úrovněmi otáček. Při stejně zadaných parametrech jako u traktoru nebo dodávky při uvažovaném materiálu 7075-T6, by kritické místo vývrtu rotoru dmyhadlového kola při tomto opakujícím se cyklu, mělo provozní dobu pouhých 211 hodin do poškození. Bagr dosahuje při zadaných parametrech řádově podobných životností jako dodávka v předchozím případě.

Aplikace	Životnost [h]	
	Lopatky	Vývrt
Backhoe	4 905	4 253
Wheel loader	250	211

Tab. 9 – Výsledný přehled životností pro dmyhadlové kolo pro provozní záznamy EPA

Aplikace	Životnost [h]	
	Lopatky	Vývrt
Backhoe	5 145	8 871
Wheel loader	296	551

Tab. 10 – Výsledný přehled životností pro turbínové kolo pro provozní záznamy EPA



## 6 Závěr

Z příložených výsledků dmychadlového kola je vidět, že vyšší poškození generuje kritické místo vývrtu rotoru, přibližně o 8% více než u lopatek. Tato skutečnost je zajímavá, protože na lopatky působí větší napětí. Tento jev výrazně ovlivňuje gradient napětí, který se v místě vývrtu blíží nule, a proto je kritickou hodnotou napětí postižena větší oblast, než je tomu u lopatek.

I přes konzervativní řešení bylo na turbínovém kole dosaženo mnohem větší životnosti, která by však při uvažování gradientu napětí mohla být mnohem vyšší. Životnosti dosahují téměř dvojnásobných hodnot než u dmychadlového kola. Pro přesné výsledky je ovšem nutné znát chybějící data.

Ze záznamů EPA se jako nejagresivnější cyklus ukázal režim nakladače. Největší životnost vykazuje záznam aplikace na svařování. Všechny tyto cykly, jejichž výsledky jsou uvedené na příloženém CD-ROMu vykazují obecně poměrně malou životnost. Důvodem je malý vzorek, který má navíc téměř ve všech případech velmi agresivní provozní cyklus, který se v rámci rain-flow procedury stále opakuje.



## 7 Seznam použité literatury

- [1] Zemek, J.: ŽIVOTNOST TURBODMYCHADLA. [Technická zpráva]. ČZ a.s., Strakonice 2011
- [2] Papuga, J.: ZPRACOVÁNÍ PROVOZNÍCH MĚŘENÍ TURBODMYCHADEL PRO ÚNAVOVU ANALÝZU. [Technická zpráva 12105/13/13]. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS ČVUT v Praze, Praha 2013
- [3] Papuga, J.; Nesládek, M.; Hrubý, Z.; Jurenka, J.: CZ\_ServiceLoads\_US1405completeA.ppt. [Prezentace]. FS ČVUT v Praze, Praha 2014.
- [4] EPA website: <http://epa.gov/>. [online]. 27.6.2015 [cit. 2015-06-27]. Dostupné z: <http://www2.epa.gov/aboutepa/our-mission-and-what-we-do>
- [5] Heinz S.: DEVELOPMENT OF A WORLDWIDE HARMONISED HEAVY-DUTY ENGINE EMISSIONS TEST CYCLE. [Technická zpráva]. ECE-GRPE WHDC Working Group, 2001.
- [6] EPA website: <http://epa.gov/>. [online]. 27.6.2015 [cit. 2015-06-27]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/nrcycles.htm>
- [7] Růžička, M. – Hanke, M. – Rost, M.: DYNAMICKÁ PEVNOST A ŽIVOTNOST. ČVUT, Praha 1989.
- [8] Papuga, J.: ÚNAVOVÁ PREDIKCE DÍLŮ TURBODMYCHADLA. [Technická zpráva 12105/14/13]. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS ČVUT v Praze, Praha 2014.