

## SIMULACE PROVOZNÍHO NAMÁHÁNÍ KONSTRUKCÍ ŽELEZNIČNÍCH VOZIDEL

Bohumil CULEK st.<sup>a)</sup>, Bohumil CULEK ml.<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Katedra dopravních prostředků, <sup>b)</sup> Katedra dopravní infrastruktury

### 1. Úvod

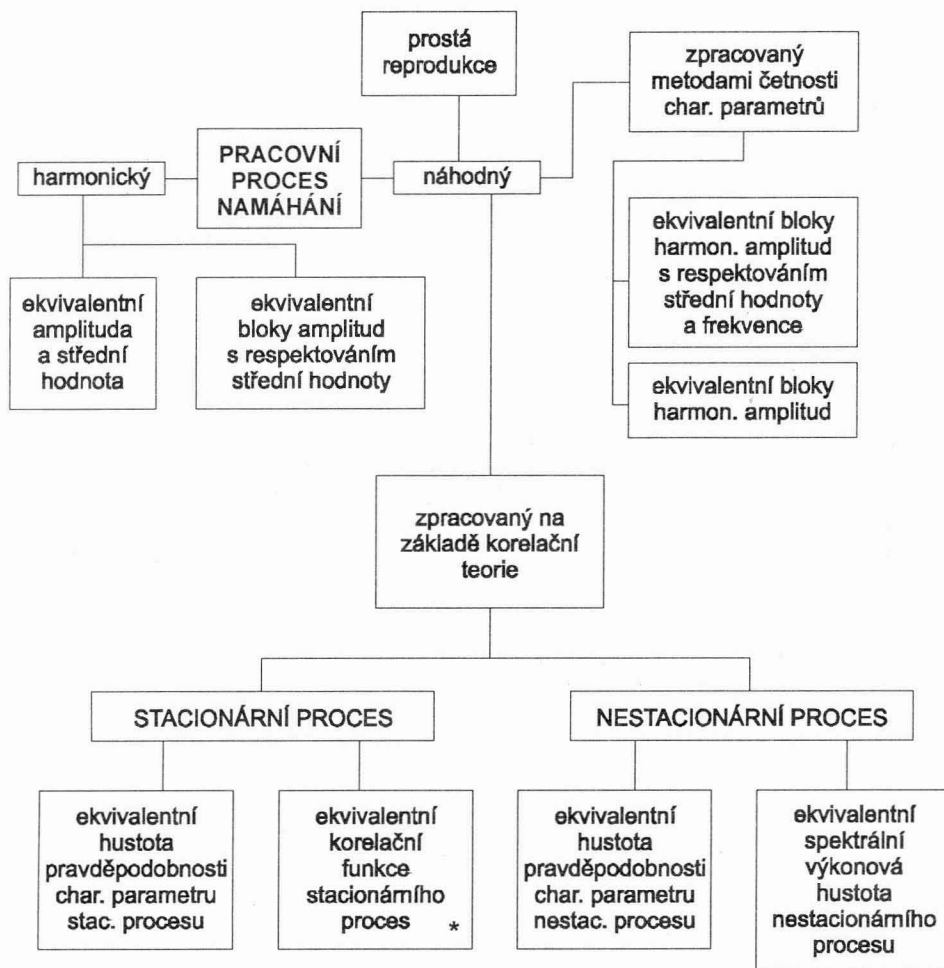
Požadavky na zvýšení užitných parametrů železničních vozidel (např. zvýšení rychlosti jízdy, zvýšení užitečného zatížení, snížení vlastní hmotnosti) kladou na konstruktéry složitý úkol, na jedné straně splnit tyto požadavky, na druhé straně garantovat takovou životnost a provozní spolehlivost navržených konstrukcí, aby jejich provoz byl bezpečný. Řešení tohoto přetrvávajícího úkolu lze vést dvěma směry: a) výpočetní cestou - prováděním teoretických odhadů životnosti pomocí hypotéz, b) experimentální cestou - simulacemi provozního namáhání konstrukcí na zkušebních stavech [1-3]. Praxe ukazuje, že oba zmíněné směry se musí při stavbě nových železničních vozidel vzájemně doplňovat a také jejich další zdokonalování by mělo probíhat ve vzájemné vazbě.

V experimentální oblasti se již mnoho let soustředí pozornost na zkušební postupy založené na možnostech elektrohydraulických zatěžovacích systémů, které mohou programovatelným způsobem zatěžovat konstrukci tak, aby tento proces co nejdříve odpovídal provoznímu zatížení. Podle dostupných informací je velmi blízko tomuto cíli systém simulace provozního namáhání konstrukcí pomocí programového souboru ITFC (Iterative Transfer Function Compensation), který se již uplatnil v některých oborech (např. v automobilovém průmyslu). V oboru železničních vozidel se v současné době získávají s tímto systémem potřebné zkušenosti. Část z nich je obsahem tohoto příspěvku.

### 2. Přehled způsobů simulace provozního namáhání konstrukcí

Možnosti simulace provozního procesu namáhání jsou znázorněny na **obr. 1**. Použití jednotlivých způsobů simulace závisí na technickém vybavení experimentálního pracoviště, na stupni znalosti reálného procesu namáhání a na odborných znalostech experimentátorů.

Simulace pomocí ITFC patří do bloku označeného ve schématu na **obr. 1** značkou (\*), i když všeobecně je ITFC někdy představován jako programový soubor, který umožňuje reprodukovat v laboratorních podmínkách na zkoušené konstrukci její reálné provozní namáhání (tedy včetně nestacionárních procesů). Lze ho chápat jako vícekanálový číslicový řídicí systém, který za pomoci elektrohydraulických zatěžovacích válců reprodukuje na zkoušené konstrukci signály změřené v provozu.



**Obr.1** Schéma možností simulace provozního procesu namáhání

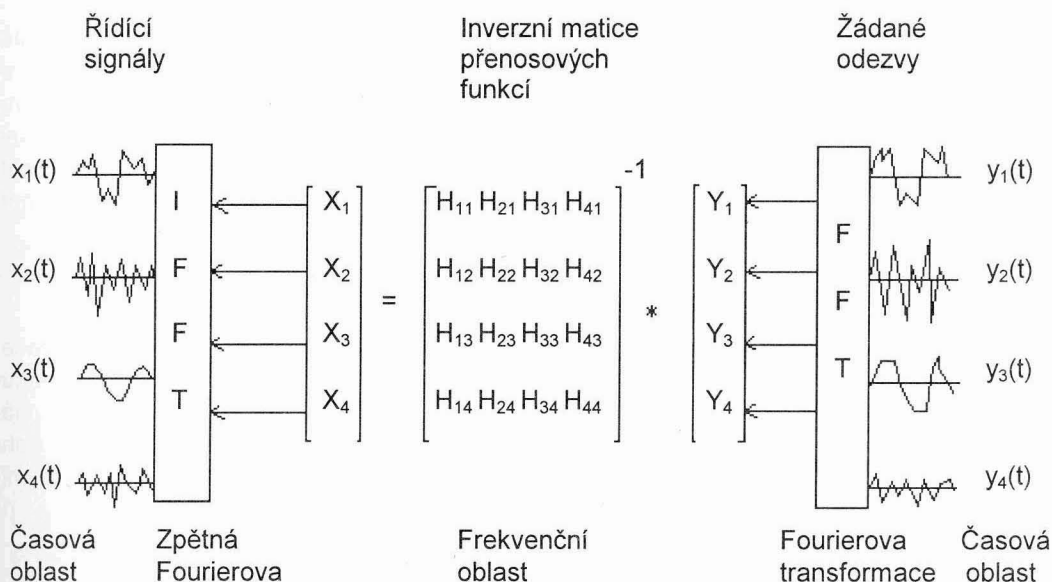
### 3. Princip simulace pomocí ITFC

Podstatou simulace pomocí ITFC je vyiterování vstupních signálů (řídicích signálů zatěžovacích válců zkušebního stavu), které ve zkoušené konstrukci vyvolají předem stanovené výstupní signály (odezvy konstrukce - žádané signály). Těmito žádanými signály mohou být např. napětí konstrukce změřená v provozních podmínkách.

Aby mohl být tento záměr v reálném čase splněn, je nutné převést problém tvorby řídicích signálů z časové oblasti do oblasti frekvenční a stanovit matici přenosových funkcí

Bohumil Culek st., Bohumil Culek ml.:

zkušební soustavy, respektive inverzní matici k matici přenosových funkcí a zajistit zpětný převod signálů do časové oblasti. K realizaci těchto základních kroků je třeba aplikovat rychlou Fourierovu transformaci (FFT) a zpětnou Fourierovu transformaci (IFFT) - viz schematické znázornění procesu iterace řídicích signálů na **obr. 2**.



**Obr. 2** Schematické znázornění procesu iterace řídicích signálů

### 3.1 Aplikace FFT a IFFT

Fourierova transformace se aplikuje v diskrétní formě:

FFT:

$$X_i(n/NT) = \sum_{k=0}^{N-1} x_i(kT) \cdot e^{-j2\pi mk/N}, \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

IFFT:

$$x_i(kT) = \sum_{n=0}^{N-1} X_i(n/NT) \cdot e^{j2\pi mk/N}, \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

kde: T je interval vzorkování časového záznamu

N je počet vzorků.

Vztahy (1), (2) tvoří tzv. fourierovský pár, který má při tomto způsobu simulace rozhodující význam z následujících důvodů:

- a) proces, který má být simulován (předpokládá se, že je náhodný), je při měření zaznamenáván v časové oblasti,
- b) vytvoření řídicích signálů při simulaci probíhá iterativním způsobem v mnohonásobných opakováních, což by v časové oblasti nebylo možné,

- c) při iteraci řídicích signálů se využívá matice přenosových funkcí zkušební soustavy, jednotlivé prvky této matice jsou stanoveny na základě Fourierových obrazů výstupních a vstupních signálů zkušební soustavy,
- d) při simulaci se operuje se spektrálními výkonovými hustotami řídicích signálů i odezev.

Díky FFT a IFFT lze mnohočetné opakování iteračních kroků k získání řídicích signálů zvládnout ve velmi krátkém čase. Vlastní proces transformace vychází z rozdělení časového signálu do intervalů  $T$ , intervaly se diskretizují 512, respektive 1024 vzorky. Fourierova transformace potom dává 256, respektive 512 diskrétních sinusových složek s frekvencemi  $1/T, 2/T, \dots, 256(512)/T$ . Chceme-li analyzovat signál např. do frekvence 125 Hz, musíme zvolit délku intervalu  $T = 4$  sec. Sinusové složky, kterými bude pak popsán časový signál budou mít frekvence 0.25, 0.5, 0.75, ... 125 Hz.

### 3.2 Matice přenosových funkcí

Přenosovou charakteristiku vícekanálového systému (což je případ simulace provozního namáhání konstrukce železničního vozidla) nelze popsat pouze jedinou přenosovou funkcí. Zpravidla jeden samostatně působící budící signál na vstupu vyvolá odezvy na všech výstupech (tenzometricky měřená místa zkoušené konstrukce). Každý vztah mezi jedním budícím signálem a jednotlivými výstupy je popsán odpovídajícími přenosovými funkcemi, takže např. 4 kanálový systém je popsán 16 přenosovými funkcemi, které tvoří matici přenosových funkcí (viz **obr. 2**).

Jednotlivé přenosové funkce zkušební soustavy můžeme vyjádřit vztahem

$$H_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{xx}}, \quad (3)$$

kde:  $G_{xy}$  je vzájemná spektrální výkonová hustota (SVH) vstupního a výstupního signálu,

$G_{xx}$  je SVH vstupního signálu,

a matici přenosových funkcí zkušební soustavy vztahem

$$H_{xiYj} = \frac{G_{xiYj}}{G_{xxi}}. \quad (4)$$

### 3.3 Iterace řídicího signálu

Při iteraci se na základě požadované odezvy  $Y_p$  (napětí konstrukce změřené v provozních podmínkách), skutečné odezvy  $Y_s$  (napětí konstrukce změřené v průběhu přípravy simulace) a inverzní matice  $H^{-1}$  k matici přenosových funkcí  $H$  zkušební soustavy odvozuje postupně v jednotlivých iteračních krocích řídicí signál  $X$  pro zatěžovací válce. Postup při iteraci je následující:

- a) iterace vychází z vypočítané první aproximace řídicího signálu,

$$X_j = Y_j \cdot H^{-1} \quad (5)$$

- b) signál  $X_1$  se pustí do zatěžovacích válců a po proběhnutí se zjistí, jak přesně odpovídá změřená skutečná odezva  $Y_1$  požadované odezvě  $Y_D$  a určí se jejich rozdíl tzv. chybový signál

$$E_I = Y_D - Y_1 \quad (6)$$

- c) vypočítá se korekční signál  $K_I$  a s jeho pomocí se vypočítá nový řídicí signál  $X_2$

$$K_I = E_I \cdot H^{-1} \quad (7)$$

$$X_2 = X_1 + K_I \quad (8)$$

Postup b) a c) se opakuje až do snížení odchylky mezi požadovanou a skutečnou odezvou na hodnotu, která je v mezích požadované přesnosti simulace. Po dosažení této přesnosti může být spuštěn proces simulace.

#### 4. Experimentální získání podkladů pro simulaci provozního namáhání pomocí ITFC

Jak bylo uvedeno v bodě 3, podstata simulace provozního namáhání pomocí ITFC spočívá v tom, že se na dynamickém zkušebním stavu působí na konstrukci zatěžovacími válci tak, aby odezva v konstrukci byla stejná jako odezva získaná při měření v provozních podmínkách. Tento požadovaný stav procesu simulace lze zdánlivě snadno docílit prostou reprodukcí sil, které v provozu do konstrukce vstupují. V některých jednoduchých případech to možné je (např. simulace provozního namáhání prvků vypružení), ale ve většině ostatních případů se při tomto postupu naráží na několik problémů, které je nutno si uvědomit ještě před výběrem veličin, které mají sloužit jako podkladové veličiny pro simulaci a musí se tedy v provozu změřit.

Především je třeba si uvědomit, že i velmi výkonné elektrohydraulické zatěžovací systémy jsou výkonově limitovány. Jde-li tedy o složitější vícekanálovou zkoušku, je v mnoha případech nutné vyvarovat se velkých zdvihů zatěžovacích hydraulických válců, aby energie potřebná k přívodu příslušného tlakového hydraulického oleje byla co nejnižší (významnou roli v otázce spotřeby energie hrají také frekvence zatěžovacích válců, ale s těmi nelze v případě simulace provozního namáhání manipulovat). Hledá se proto takové řešení konstrukčního uspořádání experimentu, které umožní snížit zdvihy zatěžovacích válců, což v praxi většinou znamená vyřadit z činnosti pružící elementy. Např. při simulaci provozního namáhání rámu podvozku železničního vozidla se provede instalace pouze samotného rámu, i když v provozu se pochopitelně musí měřit podkladové veličiny na kompletně vybaveném vozidle a tedy i podvozku.

Zmíněné řešení ovšem vyžaduje, aby v provozu měřené podkladové veličiny pro simulaci provozního namáhání byly přímo na rámu podvozku, což je splněno tenzometrickým měřením mechanického napětí. Protože ve většině případů takovýchto experimentů, kdy se při simulaci provozního namáhání jedná o stanovení životnosti konstrukce, se měří mechanická napětí ve vybraných kritických místech konstrukce za účelem následného stanovení její životnosti, není měření provozních mechanických napětí jako podkladu pro simulaci pomocí ITFC zvláštní úlohou, ale pouze součástí celého tenzometrického měření.

## 4.1 Měření mechanických napětí konstrukce

### 4.1.1 Výběr míst konstrukce pro měření napětí

Tato část ešení experimentu, na jehož konci je simulace provozního namáhání pomocí ITFC, je velmi důležitá, protože má podstatný vliv na pozdější identifikaci zkušební soustavy a následnou iteraci řídicích signálů zatřívacích válců. Jak bylo naznačeno již v bodě 3.2, je třeba, aby každý zatřívací válec měl své identifikační místo na zkoušené konstrukci (svěj tenzometr), které pokud možno nereaguje na sílové úinky ostatních zatřívacích válců, respektive reaguje na něco nejméně a naopak velmi silně reaguje na sílový úinek příslušného válce.

Uvedený požadavek (předpoklad) se plní velmi obtížně, protože každá konstrukce, i velmi tenká, vykazuje základní symetrii, z níž plyne obdobné namáhání konstrukce v různých (symetrických) místech, vyvolané jednotlivými vnějšími silami a příslušnými reakcemi. Aby při přípravě simulace a při vlastní simulaci bylo problém co nejméně, je úelné provést již před měřením napětí (v provozu) několik úkonů:

- a) pro každý zatřívací válec vybrat více identifikačních míst (alespoň dva),
- b) v identifikačních místech umístit a rozložit situovat několik tenzometrů (alespoň dva),
- c) jednoduchou statickou zkouškou ověřit vhodnost výběru identifikačních míst a nalepených tenzometrů (toto lze pro většinu případů jednoduše pomocí různých hydraulických zvedáků, přenosných siloměrů a měřících zesilovačů zapojených na nalepené tenzometry).

Při stanovení identifikačních míst se také ve značné míře uplatňují zkušenosti z předchozích obdobných měření a experimentů.

### 4.1.2 Příprava konstrukce pro měření napětí v provozních podmínkách

Vlastní příprava konstrukce pro měření napětí v provozních podmínkách je dána standardním postupem přípravy tenzometrického měření.

## 4.2 Vyhodnocení změřených provozních napětí

Postup při vyhodnocení změřených provozních napětí se řídí potřeby údajů pro vlastní simulaci provozního namáhání a eventuální následné vyhodnocení životnosti zkoušené konstrukce. Napětí v identifikačních místech konstrukce se vyhodnocují ve formě SVH - viz bod 3. Napětí v kritických místech konstrukce se vyhodnocují rovněž ve formě SVH a pro potřebu vzájemného porovnání výsledků simulačního procesu a výsledků výpočtu životnosti se obvykle vyhodnocují matice a spektra napětí dvouparametrickou metodou Rain-flow (RF).

## 4.3 Sestavení reprezentativního spektra napětí

Sestavení reprezentativního spektra napětí má dvě fáze. První fáze zahrnuje vytvoření obecně platného reprezentativního spektra z naměřených hodnot napětí při zkušebních jízdách a ostatních provozních situacích. (zpracovává se obvykle v časové oblasti). Druhá fáze je již poplatná vlastní simulaci. Spektrum v ní vytvořené musí mít stejné statistické parametry jako spektrum obecné, ale vzhledem ke kapacitním omezením elektrohydraulického systému, na nichž se simulace realizuje, je třeba, aby bylo časově redukováno cca na 30 minut délky analogového záznamu napětí.

## 5. Vlastní provedení simulace provozního namáhání konstrukce pomocí ITFC

Z dosud provedených simulací provozního namáhání pomocí ITFC (vesměs s konstrukcemi rámu podvozků železničních nákladních vozů) plynou následující zkušenosti a doporučení:

- a) Proces namáhání konstrukce, který má být na DZS simulován, musí být stacionární. Pokud tato podmínka není splněna, vznikne konstantní posunutí mezi skutečnou a žádanou odezvou simulovaného procesu. Pokud se chceme této skutečnosti vyvarovat, musíme provést rozčlenění procesu na jednotlivé stacionární bloky a části vykazující nestacionaritu vyeliminovat (dostaneme proces po částech stacionární). Toto řešení však přináší závažný problém, který souvisí s napojením takto získaných dílčích částí procesu (viz dále).
- b) V procesu, který má být simulován, se nesmí vyskytovat frekvence nižší než je podíl: vzorkovací frekvence/délka bloku FFT. Pokud tato situace nastane, dochází při simulaci k vědomé chybě, která způsobí (stejně jako v ad. a) po sunutí skutečné odezvy oproti žádané odezvě.
- c) Vzorkovací frekvence procesu namáhání by měla být podstatně vyšší než v literatuře 2,5+3 násobek maximální frekvence procesu (této otázce je třeba se dále věnovat a provést její experimentální ověření).
- d) Vhodný výběr identifikačních míst konstrukce má podle teoretických předpokladů podstatný význam při iteraci řídicích signálů. Jak ale naznačily provedené experimenty, není zřejmě umístění identifikačních míst rozhodujícím faktorem pro zdárný průběh simulace.
- e) Simulace v režimu řízení elektrohydraulického systému „dráha-dráha“ byla méně komplikovaná než v režimu řízení „síla-dráha“. Lze předpokládat, že u tužších zkušebních soustav, než byly zkoušené rámy podvozků nákladních vozů, by se mohl uplatnit i režim řízení „síla-síla“.

Pokud jde o podklady pro simulaci a způsob sestavení reprezentativního spektra namáhání dané konstrukce, je nutné uvést, že zde zůstává k vyřešení velmi závažný problém týkající se částí procesu namáhání, které vykazují nestacionaritu (např. přejezd železničních vozidel přes přechodnice oblouků). Tyto nestacionární části procesu jsou pro simulaci pomocí ITFC nežádoucí a měly by být odstraněny. Jejich odstraněním však zmizí z procesu namáhání významný díl, který byl doposud kompenzován časově stejně obsáhlou jinou částí téhož procesu se stacionárním průběhem, avšak uvedená transformace nebyla korektní v tom, že potírala návaznost jednotlivých částí procesu namáhání (historii procesu), čímž předem vnášela do realizované simulace určitou chybu.

V této souvislosti nabývá na významu poznatek, že je to velmi nízká frekvence, daná kvazistatickou změnou střední hodnoty procesu namáhání (nestacionarita ve střední hodnotě procesu), která způsobuje posunutí mezi skutečnou a žádanou odezvou simulovaného signálu. Vzhledem k tomu, že tuto velmi nízkou frekvenci (cca 0.05 Hz) nelze z procesu namáhání konstrukce železničního vozidla odstranit jinak než dodatečným "odříznutím" přechodových částí, nelze ani bez tohoto zákroku zcela eliminovat odchylku skutečného a žádaného signálu při simulaci pomocí ITFC. Nalezením optima vzorkovací frekvence analogového záznamu procesu namáhání, která souvisí také s volbou délky bloku pro FFT, sice lze tuto nepříznivou situaci do určité míry ovlivnit, ale úplného odstranění chyby (odchylky) skutečné odezvy od odezvy žádané se tím nedocílí. Jedno z možných řešení

tohoto problému vychází z transformace nestacionárního procesu na proces stacionární, jak je uvedeno dále.

## 6. Transformace provozního procesu namáhání konstrukce železničního vozidla pro simulaci pomocí ITFC

Jedná se o transformaci, která změní zaznamenaný nestacionární proces namáhání na proces stacionární ve střední hodnotě, jehož účinek na zkoušenou konstrukci při realizaci na dynamickém zkušebním stavu bude co do životnosti konstrukce ekvivalentní účinku původního procesu. Úloha má dvě části:

- Části provozního procesu namáhání s jinou střední hodnotou, než je střední hodnota odpovídající statickému předpětí konstrukce, je nutné přetransformovat na tuto střední hodnotu tak, aby nově vzniklý proces měl stejný poškozující účinek jako původní provozní proces
- Z přetransformovaného procesu namáhání je třeba vyřadit části s nízkými amplitudami, které mají zanedbatelný poškozující účinek. Tento krok realizovat tak, aby byla zachována časová následnost amplitud, jaká byla u původního provozního procesu.

### 6.1 Transformace procesu namáhání na jedinou střední hodnotu

K tomuto transformačnímu kroku lze použít principu Smithova diagramu **obr. 3** a algoritmu obdobné metodě "stékajícího deště", aby byla zachována následnost rozkmitů. Pro přepočítání velikostí amplitud při změně střední hodnoty lze použít vztah:

$$\sigma_{a0} = \frac{\sigma_{ai} \cdot \sigma_{c0}}{\sigma_{c0} - \frac{1 - \varphi}{\varphi} \cdot \sigma_{mi}} \quad (9)$$

kde:  $\sigma_{a0}$  je transformovaná amplituda,

$\sigma_{ai}$  je původní amplituda,

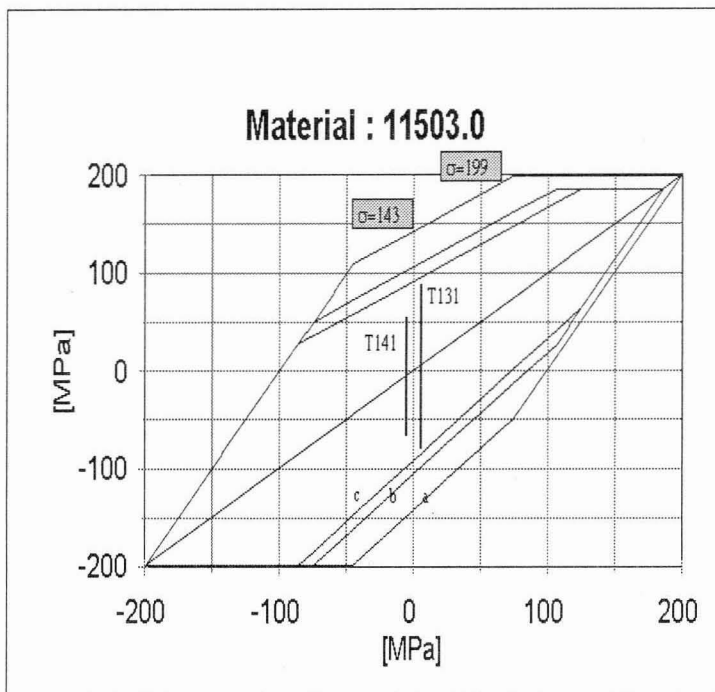
$\sigma_{c0}$  je mez únavy zkoušené konstrukce,

$\sigma_{mi}$  je střední hodnota příslušného rozkmitu,

$\varphi$  je součinitel sbíhavosti Smithova diagramu.

Názorné zobrazení tohoto transformačního kroku představují **obr. 4, 5**.

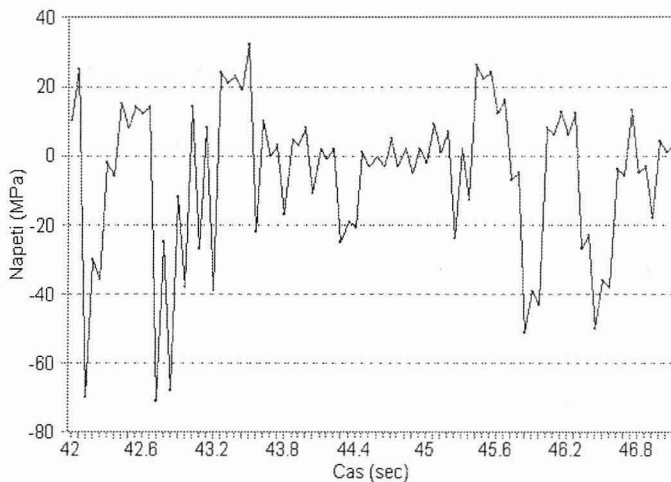




- a...hranice pro plný materiál
- b...hranice s respektováním vrubového účinku tupého svaru
- c...hranice s respektováním vrubového účinku koutového svaru

**Obr. 3** Smithův diagram materiálu rámu podvozku

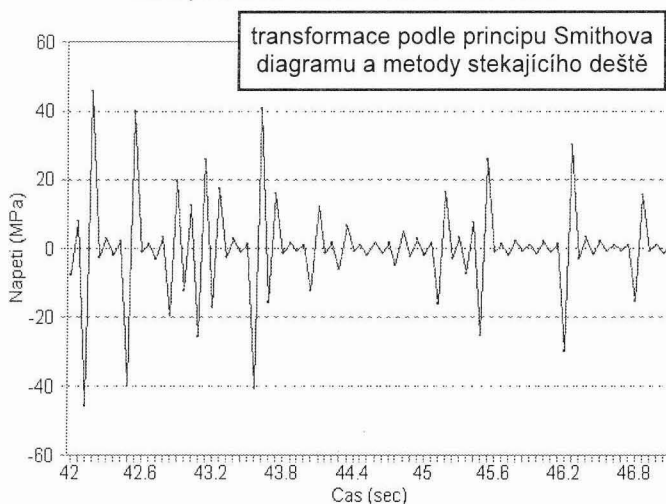
### Část reálného procesu provoz. napeti ramu podvozku Y25Rs v místě tenz. T123



**Obr. 4** Část reálného procesu

## Cast transform. procesu provoz. napeti

ramu podvozku Y25Rs v meste tenz. T123



**Obr. 5** Část transformovaného procesu

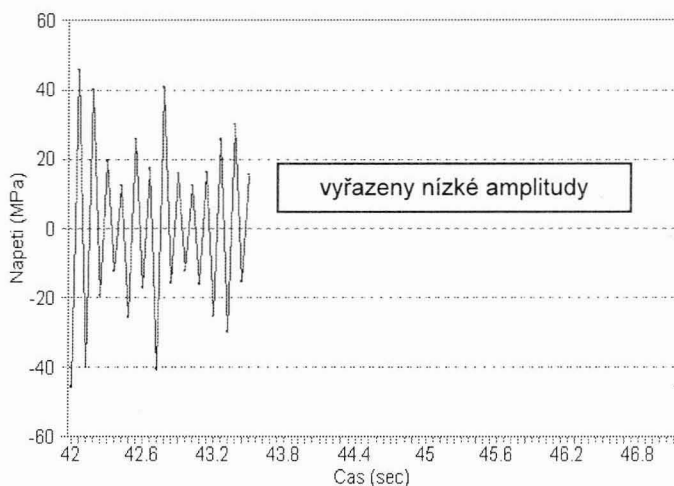
působ transformace byl následně testován vypočítáním a porovnáním mediánových životností jednotlivých míst konstrukce rámu podvozku pro reálné záznamy napětí a transformované záznamy napětí (viz dále bod 6.3). Životnosti pro transformovaná napětí vycházely v rozmezí o 1 až 7% nižší než životnosti pro reálná napětí, což lze považovat za přijatelný výsledek, jestliže se uvažuje skutečnost, že odchylky byly vždy na tzv. bezpečné straně.

### 6.2 Vyřazení nízkých amplitud přetransformovaného procesu namáhání

Hlavním smyslem tohoto bodu je časově zkrátit celý simulační proces vyřazením nízkých amplitud, které mají zanedbatelný poškozující účinek ohledně životnosti zkoušené konstrukce. Vyřazeny byly amplitudy napětí  $\sigma_i < 0.3\sigma_c$  ( $\sigma_c$ -příslušná mez únavy materiálu). Obdržíme tak upravený proces pro simulaci (viz **obr. 6**).

Stejně jako v předchozím transformačním kroku (bod 6.1) i zde byla respektována podmínka následnosti amplitud podle reálného procesu provozního napětí (algoritmus tohoto transformačního kroku je poměrně složitý a zde prezentovaný výsledek je vázán na pouze na jeho zjednodušenou verzi).

## Cast transform. procesu provoz. napeti ramu podvozku Y25Rs v miste tenz. T123



**Obr. 6** Část upraveného procesu

### 6.3 Ověření transformace procesu namáhání

K ověření provedené transformace procesu namáhání (viz obr.6), že takto upravený proces ekvivalentně nahrazuje původní provozní proces určený k simulaci na dynamickém zkušebním stavu, byl použit dříve navržený postup teoretického stanovení životnosti konstrukce železničního vozidla [4], skládající se z diskretizace analogového záznamu napětí dvouparametrickou metodou "stékajícího deště" (2D), aplikace upravené hypotézy Corten-Dolanovy a použití Wöhlerových charakteristik získaných zkouškami konstrukčních uzlů rámu podvozku Y25 na dynamickém zkušebním stavu. Pro konkrétní místa rámu s tenzometry T131 a T141 byly provedeny výpočty životností nejprve pro případ reálného provozního procesu namáhání a potom opakovaně pro případ transformovaného procesu namáhání určeného pro simulaci. Jako podklady pro zmíněné výpočty byla použita spektra napětí rámu podvozku změřená na tratích ČD (ukázka spektra **obr. 7**). Z výsledků výpočtů životností (viz ukázka výpočtu **obr. 8** a stručný souhrn v **Tab. 1**) je patrné, že pro provedený způsob transformace se vypočítané životnosti pro reálný a transformovaný proces (i upravený transformovaný proces s vyřazenými nízkými amplitudami) velmi blíží, což svědčí o splněním požadavku na transformaci. (Pro informaci je v **Tab. 1** uveden i výpočet životnosti pro případ diskretizace reálného spektra pomocí jednoparametrické metody "stékajícího deště" (1D).

**Tab. 1** Výsledky výpočtu životností

Životnost [ km ]				
Tenzometr č.	reálný proces (1D)	reálný proces (2D)	transform. proces (1D)	upravený transf. proces (1D)
131	$3,554 \cdot 10^5$	$2,802 \cdot 10^5$	$2,797 \cdot 10^5$	$2,805 \cdot 10^5$
141	$8,668 \cdot 10^5$	$5,212 \cdot 10^5$	$5,192 \cdot 10^5$	$5,259 \cdot 10^5$



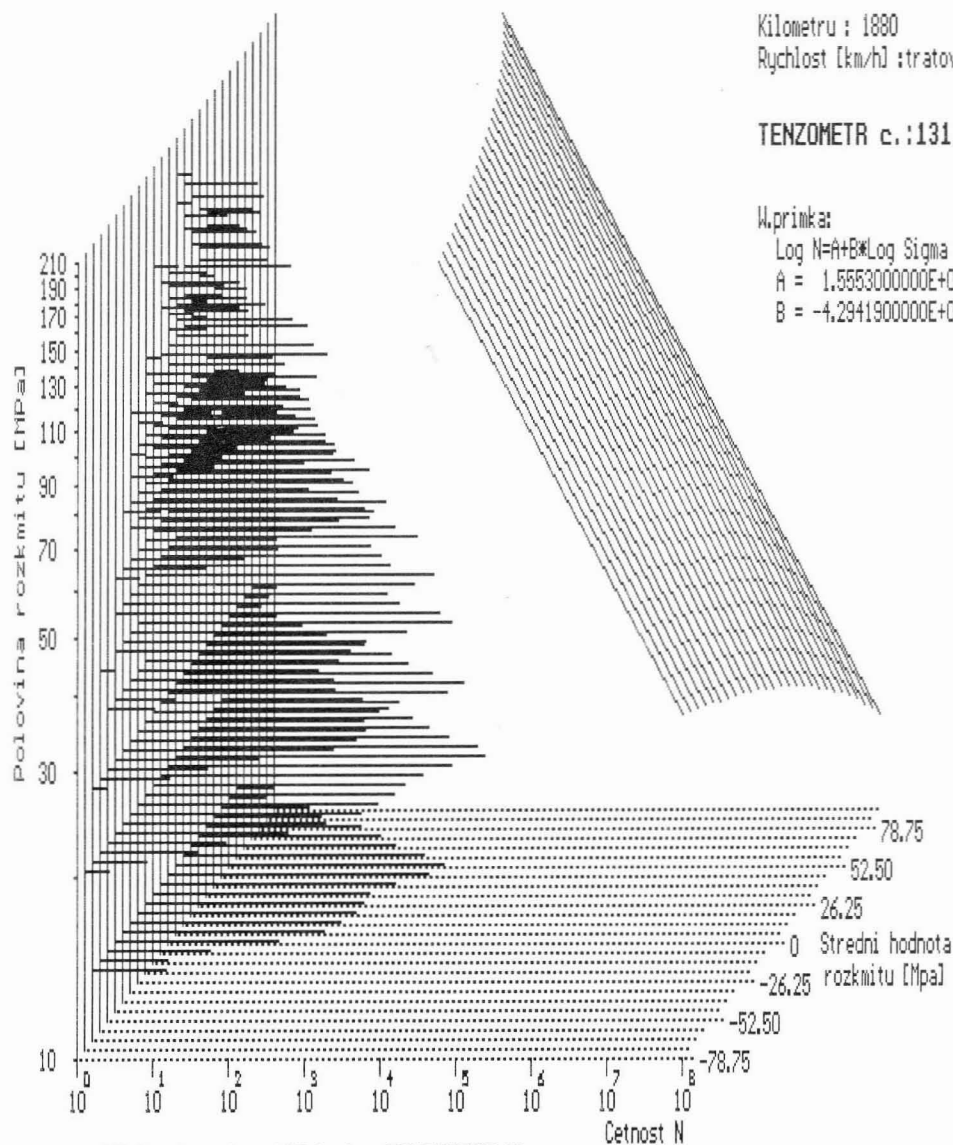
# HYPOTEZA CORTEN-DOLANOVA 2-D

Mereny usek : Trate CO

Kilometru : 1880  
Rychlost [km/h] : stratova

TENZOMETR c.:131

W,prinkas  
Log N=A+B\*Log Sigma  
A = 1.5553000000E+01  
B = -4.2941900000E+00



Dilci poskozeni po 1880 km je  $6.7087298743E-03$  .

Zivotnost v [km] je  $2.8023188222E+05$  .

*Obr. 8 Ukázka výpočtu životnosti*

## 7. Závěr

Simulace provozního namáhání konstrukcí železničních vozidel pomocí ITFC je v souhrnu všech činností, které s tím jsou spojeny, velmi náročný experimentální postup. Jeho použití je předurčeno pro oblast dynamických procesů, které jsou stacionární ve střední hodnotě. Protože tato podmínka není v obecném případě u železničních vozidel splněna, je třeba hledat cestu, jak tento problém vyřešit. Jednou z možností je transformace nestacionárního procesu ve střední hodnotě v proces, který je v tomto parametru stacionární.

Lektoroval: Doc. Ing. Jaroslav Menčík, CSc.

Předloženo v lednu 1998.

## Literatura

- [1] Culek B.st.: Simulace provozního namáhání konstrukce železničního vozidla, HP, ČVUT Praha, 1997.
- [2] Culek B.st.: Řešení technických prostředků pro provoz dynamického zkušebního stavu, zpráva VÚŽ Praha č. U 02027322, Cerhenice 1992.
- [3] Culek B.st., Vaněček A., Zadražil M.: Dynamické zkoušky podvozku Y25, zpráva VÚŽ Praha č. P07118813-DÚ03-E01, Praha 1986.
- [4] Culek B.st.: Stanovení životnosti konstrukce železničního vozidla v podmínkách provozu na tratích ČSD a železničního zkušebního okruhu, KDP, ČVUT Praha 1991.

## Resumé

### SIMULACE PROVOZNIHO NAMÁHÁNÍ KONSTRUKCÍ ŽELEZNIČNÍCH VOZIDEL

Bohumil CULEK st., Bohumil CULEK ml.

V příspěvku je naznačen způsob použití programového systému ITFC (Iterative Transfer Function Compensation) k simulaci provozního namáhání konstrukce železničního vozidla. Dále je zde uveden postup transformace nestacionárního procesu namáhání konstrukce vozidla na proces stacionární.

## Summary

### SIMULATION OF WORKING STRESS ON CONSTRUCTION OF RAILWAY TRUCKS

Bohumil CULEK st., Bohumil CULEK ml.

In this paper is outlined method aplikation of program equipment ITFC (Iterative Transfer Function Compensation) to simulation of working stress on railway trucks. Further is here introduced advance of transformation of the non-stationary process of the trucks in to stationary process.

## Zusammenfassung

### **SIMULATION DER BETRIEBSBEANSPRUCHUNG DER KONSTRUCTION VON EISENBAHNFahrZEUGEN**

Bohumil CULEK st., Bohumil CULEK ml.

Im Beitrag wird das Verfahren der Benutzung des Programmsystems ITFC (Iterative Transfer Function Compensation) zur Simulation der Betriebsbeanspruchung der Konstruktion von Eisenbahnfahrzeugen angezeigt. Weiter ist hier ein Fortgang der Transformation der nonstationären Beanspruchungsprozess der Fahrzeugkonstruktion in den stationären Prozess eingeführt.

