

VYTVÁŘENÍ SPECIÁLNÍCH ZATĚŽOVACÍCH PROCESŮ

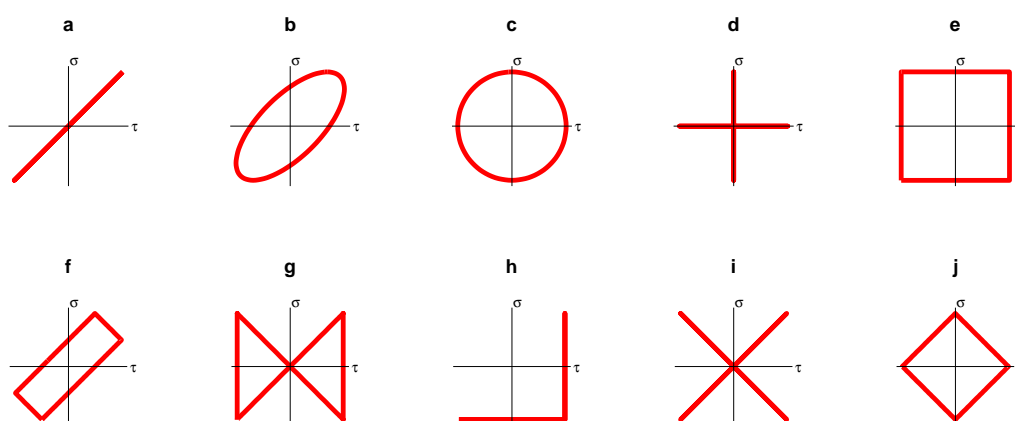
Miroslav BALDA¹

Abstract: *New computing methods for assessment of fatigue lives of machine parts exposed to combined stress should be tested. With a view to it, fatigue experiments are pursued with predefined periodic processes compounded of deterministic time functions of normal and shear stresses. A straight application of simple functions leads to improper results due to dynamic properties of the testing machine. The contribution describes a way of generating loading processes of much better properties.*

Keywords: *fatigue tests, combined stress, loading processes*

1. ÚVOD

Jedním z cílů právě řešeného grantového projektu GAČR (Balda a Růžička (2004)) je vyšetření vlivu zatěžovacích posloupností vyvolávajících neproporcionální kombinované namáhání na únavové porušování zkoušeného objektu. Protože obecný způsob zatěžování (např. náhodnými procesy) je obtížně analyzovatelný, vytipovalo se 10 kombinací periodických zatěžovacích procesů sil $F(t)$ a krouticích momentů $M(t)$, které se postupně aplikují na počítačově řízeném zatěžovacím stroji INOVA 200-1 na již dříve popsaných trubkových vzorcích o vnějším průměru 30 mm a tloušťce stěny 2 mm vyrobených z uhlíkové oceli ČSN 411523.1. Síly $F(t)$ vyvolávají ve zkoušených vzorcích normálové napětí $\sigma(t)$ a jemu odpovídající poměrnou deformaci $\varepsilon(t)$ a krouticí momenty $M(t)$ pak smyková napětí $\tau(t)$ a zkrut $\gamma(t)$. Vhodnou kombinací časových průběhů deformací lze dosáhnout deformačních trajektorií – zatěžovacích cest – podle obr. 1.



Obr. 1. Vybrané zkušební zatěžovací smyčky

Materiál vzorků – ocel – pro svoji tuhost a tudíž i malé deformace neumožňuje řízení stroje na žádané deformace. Umožňuje však řízení sil a momentů na základě jejich požadovaných

¹prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc., FEng., Centrum diagnostiky materiálů, Ústav termomechaniky AVČR, Veveřská 11, 301 00 Plzeň, tel.: +420 377 236 415, e-mail: balda@cdm.it.cas.cz

průběhů. Ty bylo třeba předem připravit ve tvaru N_p vzorků z jedné periody zkušební smyčky $F(kT)$ a $M(kT)$, kde $k = 0, 1, 2, \dots, N_p$, a T je vzorkovací perioda (1 ms pro stroje INOVA).

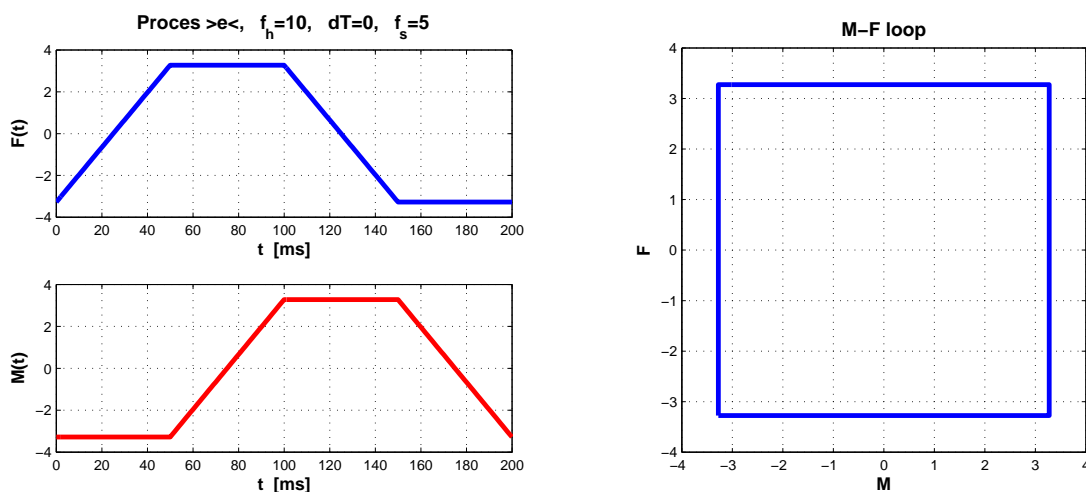
2. VYTVÁŘENÍ PROCESŮ

Elektrohydraulický zkušební stroj INOVA 200-1 pro únavové zkoušky zkušebních těles při kombinovaném namáhání tahem-tlakem a kroucením je vybaven počítačovým řízením. Jím lze realizovat jak zkoušky běžnými zatěžovacími procesy s harmonickým nebo pilovitým průběhem, tak i zkoušky se zadanými průběhy sil a momentů z předem připravených časových řad. Ty obsahují vzorky obou zatěžovacích procesů uspořádané do stejně dlouhých bloků, které se při vlastní zkoušce stále opakují. Délka časových řad závisí na charakteru zatěžování. Při pseudonáhodném zatěžování je délka zatěžovacích časových řad dlouhá, aby periodičnost vyvolávaná opakováním neměla významný vliv na výsledné životnosti. Typická délka realizací v těchto případech je 20-minutový úsek, který při pevné vzorkovací frekvenci $T = 1$ ms představuje 1,2 milionu vzorků pro každý ze signálů. U periodických procesů je délka časových řad podstatně kratší, protože stačí generovat pouze jednu periodu dějů.

Časové řady se pro stroj zadávají ve speciálním tvaru. Každý vzorek je tvořen dvěma bajty, v nichž je možno zobrazit celé číslo z intervalu $(-32768, 32767)$. Na rozdíl od normálního zobracování celých čísel v počítačích s procesory Intel je ale jejich pořadí opačné. Jak 16-bitové zobrazení informace, tak i obrácené pořadí bajtů v ní přineslo jisté komplikace při vytváření zatěžovacích procesů v prostředí MATLAB. Jednodušší situace je s měřítkováním mohutnosti procesů. Ta se nastavuje až na vlastním stroji podle extrému v realizaci, kterému v časové řadě odpovídá v absolutní hodnotě 32767.

Procesy pro zatěžovací cesty – smyčky – podle obrázku 1 jsou sice periodické, ale nerealizovatelné z klávesnice ovládacího počítače stroje. I pro ně bylo třeba připravit pro každou zatěžovací frekvenci zvláštní krátké časové řady. Charakter vybraných zatěžovacích procesů pro smyčky podle obr. 1 napovídal, že by je bylo možno vytvářet relativně jednoduše, a to smyčky

- a až c jedinou dvojicí harmonických funkcí s fázovým posuvem 0° až 90° (viz obr. 2) a
- d až j dvojicemi složenými po částech z lineárních funkcí.



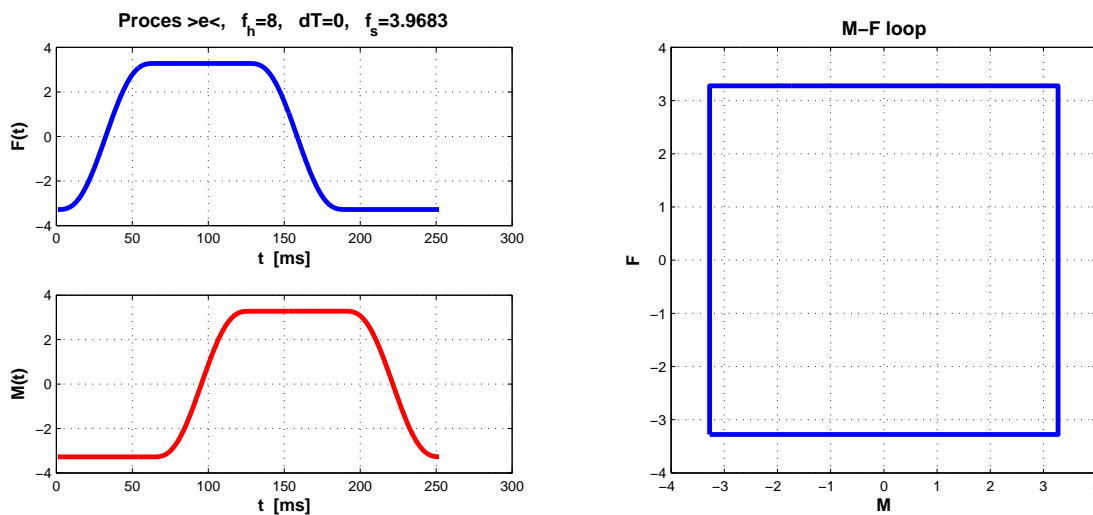
Obr. 2. Smyčka e vytvořená po částech z lineárních funkcí

Takový postup, i když je realizovatelný, by vedl k nepřijatelným chybám. Jejich příčinou jsou dynamické vlastnosti řízeného stroje. Těmi jsou jak vlastní frekvence mechanické soustavy, tak i vlastnosti elektrohydraulického zatěžovacího systému s regulátorem. Obojí vylučuje dodržení ostrých přechodů z jednoho režimu do druhého (např. z rampy do konstanty). Přechodové děje na zlomech průběhů by při ještě přijatelných frekvencích smyček naprosto degradovaly jejich

tvar. Zlepšení by se dosáhlo jedině při extrémně pomalých dějích, při nichž by se neuplatnila ani dynamika stroje, ani regulační a zatěžovací soustava. Takový proces by však byl značně pomalý a tudíž drahý.

Naštěstí není nutné trvat na lineárních průbězích zatěžovacích procesů v čase. Mnohem příhodnější je výběr takových funkcí, které mají spojitou alespoň první derivaci v místech přechodu mezi režimy zatěžování. Nejjednodušší takovou funkcí je kosinová půlvlna, která zajišťuje bezrázový přechod z konstantního průběhu do náběhu na novou úroveň a naopak, protože snižuje nároky na regulační soustavu. Kromě toho přechod bez rázů neobsahuje v sobě tolik vyšších harmonických složek, které mohou budit vlastní tvary kmitů stroje. Proto se tento přístup použil při vlastní realizaci smyček podle obrázku 1.

V obrázku 3 jsou průběhy funkcí $F(t)$ a $M(t)$ s výsledným tvarem smyčky realizované za pomoci kosinových půlvln. V nadpisu levého horního obrázku jsou kromě názvu smyčky uvedeny i další důležité informace, jako jsou frekvence kosinové půlvlny f_h a výsledná frekvence smyčky f_s , obě v [Hz]. Kromě toho je zde ještě údaj o přídatných prodlevách dT [ms], jejichž význam bude vysvětlen dále.



Obr. 3. Vybrané zkušební zatěžovací smyčky

2.1 Parametrizace zadání smyčky

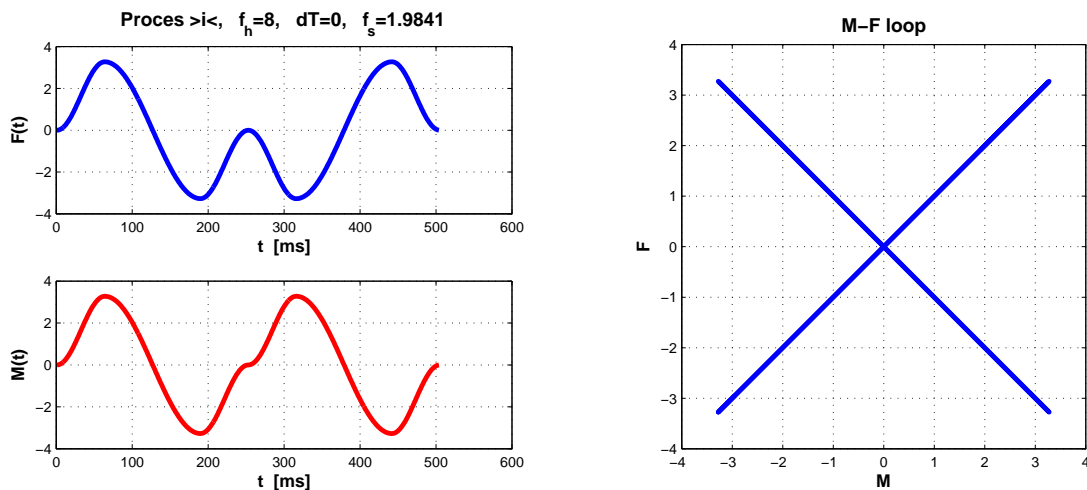
Mnohotvárnost smyček vyvolávala zdání, že bude zapotřebí každou z nich generovat zvláštním programem. Tento „silový“ přístup se však podařilo vyloučit pomocí parametrického popisu dvojice časových řad $F(kT)$ a $M(kT)$. Podrobnějším průzkumem těchto funkcí zjistíme, že je vhodné časovou osu rozdělit na úseky, v nichž množina hraničních bodů je tvořena sjednocením bodů přechodů z obou funkcí. Každý úsek v obou funkcích je charakterizován svojí délkou (trváním) a úrovní na jeho počátku normalizovanou do intervalu $(-1, 1)$. Délka úseku se vyjadřuje v násobcích trvání nejkratší půlvlny ve smyčce. Její konkrétní velikost se později vypočte z uživatelem zadané nejvyšší frekvence ve spektru smyčky. Násobek byl zvolen z podmínky stejné maximální rychlosti v úseku.

Je zřejmé, že každá smyčka v závislosti na své složitosti má jiný počet parametrů, takže nebylo možno je ukládat do matice. Využila se proto jiná možnost, kterou poskytuje MATLAB, totiž pole struktur. Každé smyčce byla přiřazena struktura obsahující

- jeden znak charakterizující typ smyčky,
- řádkový vektor úrovní procesu F na počátcích úseků,
- řádkový vektor úrovní procesu M na počátcích úseků,
- řádkový vektor násobků trvání nejkratšího kosinového půlcyklu,
- skalár fáze mezi procesy $F(t)$ a $M(t)$

Tak např. smyčka i byla popsána následující strukturou MATLABu a příslušnými průběhy.

```
proc('i'-'a'+1) = ...
    struct('typ', 'i', ...
        'pkF', [0, 1, -1, 0, -1, 1, 0], ...
        'pkM', [0, 1, -1, 0, 1, -1, 0], ...
        'Nt', [1, 2, 1, 1, 2, 1]);
```

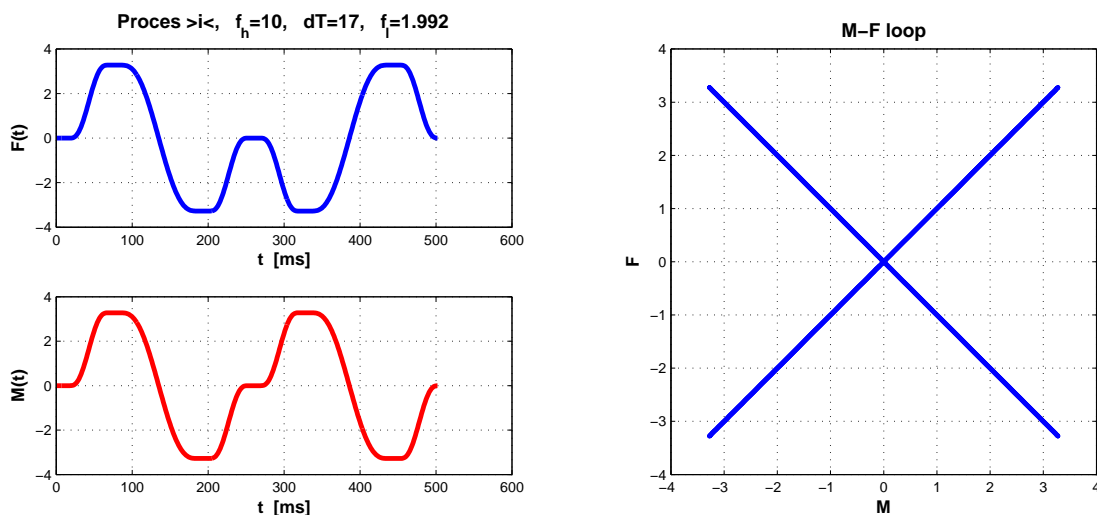


Obr. 4. Smyčka i složená s kosinových půlvln a konstantních úseků

Struktury pro smyčky a , b a c se navzájem liší jen v dalším poli struktury – fázi – 'fi'. Ta je napevno nastavena u smyčky a na nulu a u smyčky c na 90° . U smyčky b je nabídnuta fáze 45° , kterou však lze změnit. Odtud vyplývá, že by tato jediná struktura postačovala pro generování i obou ostatních. Zbylé smyčky mají pole 'fi' struktury prázdné.

2.2 Zpřesnění skutečných tvarů smyček

Navzdory spojitým prvním derivacím zatěžovacích procesů $F(t)$ a $M(t)$ dochází v hraničních bodech k přechodovým dějům, které regulační systém stroje při normálním režimu a únosných frekvencích nezvládá. Pokud se děje výrazně neliší od harmonických, lze použít obálkovou regulaci, která se snaží dodržet extrémní hodnoty na požadovaných. Tuto hardwarovou možnost však nelze vždy použít. Byly proto vyzkoušeny následující softwarové prostředky k omezení přechodových dějů:



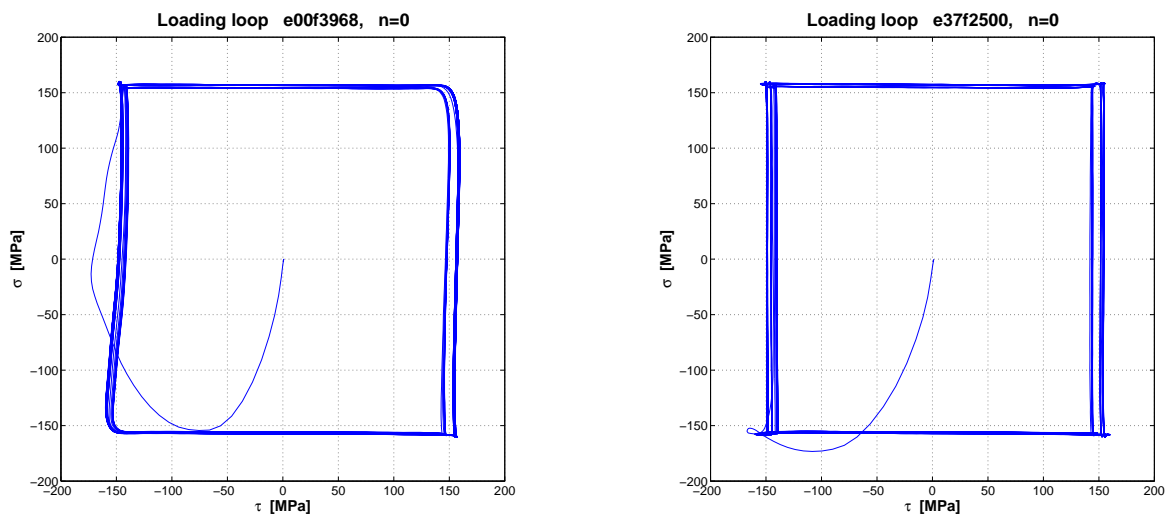
Obr. 5. Smyčka i s korekcí prodlevami o trvání $dT = 10$ ms

Časové prodlevy na hranicích úseků. Ty se ukázaly u některých smyček jako prostředek k omezení zákmitů, protože vložené prodlevy na konstantních hladinách dávají možnost, aby přechodové děje v nich odezněly. Trvání prodlev je stejně jako úseků smyčky celočíselným

násobkem vzorkovací periody. To má ovšem za následek, že se prodlužuje perioda smyčky, a tím se i snižuje efektivní frekvence smyčky a prodlužuje trvání zkoušky. Je ponecháno na uživateli, jakou frekvenci smyčky zadá a jakou zvolí frekvenci její nejrychlejší složky. prodleva se potom sama vypočte. Je patrné, že jde o jistý kompromis, který je ponechán na uživateli.

V obrázku 5 je uveden návrh stejné smyčky jako v obrázku 4 s tím rozdílem, že je zde při stejné výsledné frekvenci smyčky $f_\ell = 2$ [Hz] vyšší generující frekvence $f_h = 10$ [Hz] a prodleva $dT = 17$ [ms]. Aby se neprodloužila perioda procesu s prodlevami o $dT = 17$ ms, bylo nutno zvýšit frekvenci f_h z 8 Hz na 10 Hz.

Vliv prodlužování periody se zjišťoval na smyčce e měřením průběhů skutečných procesů $F(t)$ a $M(t)$ realizovaných strojem. Na obrázku 6 vlevo je zobrazeno prvních cca 20 smyček získaných z nekorigovaných $F(t)$ a $M(t)$. Napravo je záznam začátku zatěžování s prodlevami o trvání $dT = 37$ ms v úvratích.



Obr. 6. Počátek zatěžování bez a s korekcí prodlevami v úvratích

Prodlevami se omezil jak náběh na smyčku z počátku, tak i deformace smyčky v rozích. Z obrázků je patrné, jak špičková (obálková) regulace dotahuje zesílení tak, aby se po několika smyčkách dosáhly požadované extrémy.

Polynomické přechody. Ty představují alternativu ke kosinovým přechodům. Procesy složené z konstantních a kosinových úseků mají sice spojité první derivace, ale další derivace jsou nespojitě. To dává možnost vzniku nežádoucích přechodových dějů. Pokud by i vyšší derivace byly spojité, (nulové) snižují se tím nároky na rozběhy ovládacích a zatěžovacích mechanismů. Nulovost vyšších derivací však nemůže zajistit kosinový přechod, ale polynomický

$$y(t) = \sum_{k=0}^n a_k t^k. \quad (1)$$

Proměnná t – čas – se měří vždy od počátku úseku. Stupeň n polynomu závisí na úrovni požadavku na nulovost derivací. V případě nulovosti druhých derivací na okrajích úseků musí být $n \geq 5$. Pro normalizovaný přechod definovaný nad $\xi = t/t_{\max} \in (0; 1)$, $\eta(\xi) = y/y_{\max} \in (0; 1)$ a $n = 5$ se z (1) získá z podmínek $\eta(0) = \dot{\eta}(0) = \ddot{\eta}(0) = \ddot{\eta}(1) = 0$ a $\eta(1) = 1$ předpis

$$\eta(\xi) = 10 \xi^3 - 15 \xi^4 + 6 \xi^5. \quad (2)$$

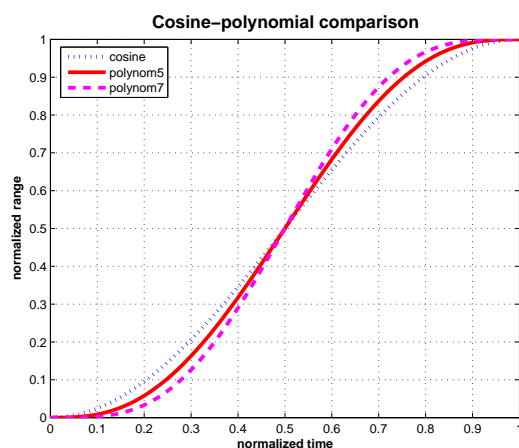
Kdyby měly být nulové i třetí derivace na okrajích intervalu přechodu, měl by jeho funkční předpis tvar

$$\eta(\xi) = 35 \xi^4 - 84 \xi^5 + 70 \xi^6 - 20 \xi^7. \quad (3)$$

Složitost předpisů nepředstavuje žádnou komplikaci, protože se normalizované hodnoty vygenerují jen jednou a potom se pouze měřítkují a případně zrcadlí. Nakonec se vše zkonvertuje do celočíselné formy pro stroj INOVA.

Na vedlejším obrázku je podáno srovnání průběhů normalizovaných půlvln přechodů z jedné úrovně do druhé. Z něj vyplývá, že kosinus je nejméně strmý, ale s krátkým přechodem na konstantní průběh mimo interval.

Strmost polynomičtých přechodů je větší než u kosinu a roste se stupněm polynomu. Naproti tomu přechod do konstantního průběhu je pozvolnější, což pozitivně ovlivňuje omezování přechodových dějů.



Obr. 7. Srovnání funkcí přechodů

3. ZÁVĚR

V etapě přípravy zkoušek, jejichž cílem bylo zajištění experimentálních dat o únavě zkušebních vzorků vystavených periodickému kombinovanému namáhání s předepsanými zatěžovacími cestami, se zjistilo, že vůbec nejde o jednoduchou úlohu. Příčinou tohoto zjištění jsou dynamické vlastnosti zkušebního stroje s regulovaným elektrohydraulickým zatěžovacím systémem. Ty, i při optimálně nastaveném PID regulátoru výrazně zkreslují požadované průběhy sil a momentů.

Hledaly se cesty k omezení zkreslování zatěžovacích procesů a našly se v takových úpravách časových průběhů sil a momentů, které omezují vznik a přetrvávání přechodových dějů plynulými rozběhy a doběhy zatěžovacích válců.

Poděkování: Příspěvek vznikl jako jeden z výstupů grantového projektu č. 101/05/0199 podpořeného GAČR a výzkumného záměru Ústavu termomechaniky AV ČR č. AV0Z 20760514.

LITERATURA

Balda M., Růžička M., 2004. Teoreticko-experimentální analýza procesu poškozování a vývoj metodiky pro odhadování únavové životnosti složitě namáhaných součástí. Návrh grantového projektu 101/05/0199 GAČR.