

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ S/N SNÍMACHO PRO URČOVÁNÍ  
ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI STROJNÍCH ČÁSTÍ**

**Ing. Lubomír Gajdoš CSc  
Státní výzkumný ústav materiálu**

Možnosti využití S/N snímačů pro určování únavové životnosti strojních částí.

Ing. Lubomír Gajdoš, CSc, SVÚM Praha

---

### 1. Úvod

Se zvyšujícími se nároky na spolehlivost strojních celků a zařízení při současném trendu efektivního využívání vlastností materiálu až do oblasti mezních stavů, stoupá počet výzkumných prací zabývajících se otázkami provozní diagnostiky a predikce zbytkové životnosti strojních částí. Hledají se cesty, které by umožnily indikovat míru únavového poškození, k němuž během provozu v současti již došlo. Monitory únavového poškození, které jsou spojeny s namáhaným tělesem, jsou řešeny tak, aby s deformační historií části poskytly co možná největší změnu měrné veličiny. Když změna měrné veličiny, např. elektrického odporu, dosáhne jisté "kritické hodnoty", lze očekávat lom v několika málo cyklech.

V anglo-amerických zemích jsou dnes nejvíce propracovány tzv. S/N snímače, vyráběné firmou Micro-Measurements v licenci firmy Boeing. Měrnou veličinou těchto snímačů je elektrický odpor měřicího foliového elementu. Foliový element, který je zhotoven z Ni-Cu slitiny, poskytuje odezvu na změny deformace, jímž byl snímač podroben, a to formou kumulace stálých a pro jisté teplotní omezení - nevratných změn elektrického odporu. Pokud odporová změna snímače odpovídá přímo nebo přes vhodné násobiče deformací únavovému chování části, na

kterou je snímač přitmelen, pracuje S/N snímač jako měřič únavové životnosti.

## 2. Základní charakteristiky S/N snímačů

S/N snímače mají vzhled foliového tenzometru ( obr.1), avšak na rozdíl od tenzometrů jsou konstruovány tak, aby poskytly maximální odezvu na únavové poškození. Snímač přitmelený na únavově namáhanou součást v místě, kde se předpokládá lom, akumuluje změny elektrického odporu s cyklickými deformacemi, podobně jako se akumuluje únavové poškození v součásti. Když akumulovaná změna elektrického odporu dosáhne jisté "kritické" hodnoty, pohybující se od  $3\Omega$  do asi  $10\Omega$  podle typu materiálu části, lze očekávat lom v několika málo cyklech. Kritickou hodnotu změny odporu snímače lze určit měřením jeho odporových změn při únavové zkoušce s konstantní hodnotou amplitudy deformace.

Odezva S/N snímače na cyklické zatěžování je v lineárních souřadnicích zobrazena na obr.2 a v log-log souřadnicích na obr.3. Při srovnání těchto změn s odporovou odezvou samotného materiálu části (ČSN 11 373) zjistíme, že u ocelového vzorku nemáhaného cyklicky dochází ke změnám opačného smyslu, tedy k poklesu odporu /1/. Největší změny vykazuje hlevně minimální hodnota odporu v cyklu, zatímco maximální hodnota zůstává v převážné části cyklického zatěžování prakticky konstantní a střední hodnota odporu, odpovídající nulovému zatížení, vykazuje jisté malé záporné změny.

I když mechanizmy odporových změn v průběhu cyklického namáhání jsou u skutečného ocelového vzorku a S/N snímače od-

lišné ( v prvním případě je to pokles magnetické permeabilitu, způsobený omezováním pohyblivosti stěn magnetických domén v důsledku únavového poškození, ve druhém případě je to vzrůst měrného odporu v důsledku hlavně tvorby defektů a rozpadu "shluků" souhlasných atomů v Ni-Cu slitině), lze tyto změny korelovat s únavovou životností. U S/N snímačů, kde se jedná o modelový materiál vyvinutý tak, aby svojí odezvou na cyklické namáhání poskytl reprodukovatelné výsledky s minimálním rozptylem, je tato korelace mnohem přesnější, než u skutečných ocelových částí, kde se vlivem nehomogennosti materiálu musí počítat s mnohem větším rozptylem.

Závislosti zobrazené na obr.3 slouží jako kalibrační křivky pro S/N snímače se základní hodnotou odporu  $R_0 = 100 \Omega$ . Dobrou ilustraci únavového chování S/N snímače získáme, překreslíme-li kalibrační křivky z obr.2 do souřadnic  $\log \xi - \log N$  (obr.4). Křivky na obr.4 jsou vlastně ohnické únavové křivky snímače, odpovídající dané odporové změně. Jsou nezávislé na únavovém chování materiálu části, na kterou byl snímač přitomen. Je-li únavová křivka materiálu části ekvidistantní s některou ohnickou únavovou křivkou S/N snímače, představují pak křivky na obr.4 čáry stejného poškození.

Odezva S/N snímače na náhodné zatěžování je tím větší, čím je větší agresivita zatěžovacího spektra. Odporové změny snímače přitom odpovídají změnám vyvolaných cyklováním s konstantní hodnotou tzv. ekvivalentní deformační amplitudy /2/, jež velikost je dána pouze agresivitou zatěžujícího spektra.

Podle příručky pro použití S/N snímačů /3/ závisí vliv střední hodnoty deformace na velikosti amplitudy cyklické de-

formace. Je-li amplituda cyklické deformace větší než je přechodová hladina snímače, projeví se vliv střední hodnoty deformace přidáním konstantní odpovědi změny k hodnotě vyvolané cyklickými deformacemi. Při amplitudách cyklické deformace nižších než je přechodová hladina snímače, projeví se vliv střední hodnoty deformace téměř konstantní percentuální změnou odporu snímače, která je přibližně úměrná čtverci střední hodnoty deformace. (Přechodovou hladinou S/N snímače se označuje minimální hodnota amplitudy celkové deformace, při níž celková změna odporu snímače v okamžiku vzniku trhliny může ještě dosáhnout "kritickou" hodnotu. Při nižších hodnotách deformace než je přechodová hladina, nelze kritické změny odporu vůbec dosáhnout).

S/N snímači je v zásadě možné měřit i statickou deformaci ( $k$ -faktor  $2,05 \pm 3\%$ ), avšak tento postup se nedoporučuje z toho důvodu, že  $k$ -faktor S/N snímače je nelineární funkcí cyklické deformace, která velmi rychle vzrůstá, když ohmická únavová odezva S/N snímače dosáhne přibližně  $3\Omega/4$ . Druhým důvodem je skutečnost, že základní hodnota odporu snímače se mění s každým cyklem, takže způsobuje nepřetržitý posuv nuly. I malé, vratné odpovědi změny vyvolané statickým zatížením mohou být pak zdrojem chyby, zejména při měření ohmické odezvy snímače řádu  $10^{-1}\Omega$ .

S rostoucí teplotou až do hodnoty  $65^{\circ}\text{C}$  se odpovědná odezva S/N snímačů na cyklické zatěžování zvyšuje. Pro teploty vyšší než  $65^{\circ}\text{C}$  nelze S/N snímače vůbec použít vzhledem k "vyžíhání" stálých odpovědi změn. Samotné vratné změny odporu vyvolané teplotou závisí na koeficientu teplotní roztažnosti

materiálu, na němž je S/N snímač přitmelen. Opravy vyplývající z diferenciálního koeficientu teplotní roztažnosti mezi snímačem a materiálem části je nutno provádět velice pečlivě s uvážením, že teplotní koeficienty odporu snímačů se mění od hodnoty přibližně  $-36 \mu\Omega/\Omega/^\circ C$  do hodnoty  $-61 \mu\Omega/\Omega/^\circ C$  v průběhu kumulace trvalých odporových změn. Aby nedošlo ke zkreslení naměřených výsledků vlivem teploty, je nutno uskutečnit všechna měření při konstantní teplotě, která by měla být stabilizována a nepřesáhnout  $65^\circ C$  /3/.

Jak již bylo uvedeno, slouží S/N snímač jako měřič únavového poškození v těch případech, kdy se jedná o dostačujoucí souhlasnost mezi únavovými charakteristikami snímače a materiálu části. V tomto smyslu mohou být základní požadavky na materiál části sníženy, použije-li se tzv. dvojny únavový snímač, který se skládá ze dvou na sebe položených kovových folií, zhotovených ze zcela odlišných slitin. K dispozici jsou pak dvě skupiny ohmických únavových křivek, takže požadavky na souhlasnost únavových charakteristik materiálu části nemusí být tak přísné /5/.

### 3. Pokusná část

V pokusné části práce bylo ověřováno chování S/N snímačů při cyklickém namáhání tyčí z nízkouhlíkové svařitelné oceli s konstantní i proměnlivou amplitudou cyklických deformací s cílem určit kritické hodnoty snímačů a ověřit vhodnost jejich použití pro měření únavového poškození a indikaci porušení částí z nízkouhlíkových ocelí.

### 3.1 Použitý materiál a snímače

Pro experimentální program byla zvolena nízkouhlíková svařitelná ocel ČSN 11 373 následujícího složení: 0,03 C; 0,48 Mn; 0,28 Si; 0,046 P; 0,013 S. Tyče pro výrobu vzorků byly normalizačně vyžíhány ( $880-900^{\circ}\text{C}/1\text{ hod}$ ). Tvar a rozměry použitych vzorků jsou patrné z obr.5 a jejich mechanické vlastnosti, zjištěné z trhacího diagramu, jsou uvedeny v tab.1.

• Tab.1.

Pevnost $\sigma_{\text{Pt}}$ /MPa/	Mezní $\sigma_{0,2}$ /MPa/	Tažnost $\delta_5$ /%	Kontrakce $\gamma$ /%
419,7	298,1	42,5	62,2

Zkoušky se uskutečnily při použití S/N snímačů typu FWA-01 (obr.1) o přibližné velikosti měrného foliového elementu  $7 \times 3$  mm a základní hodnotě odporu  $R_0 = 100 \Omega$ . Snímače byly tmeleny na povrch zkoušebního vzorku pomocí speciálního dvousložkového lepidla M-Bond 610, dodávaného firmou Micro-Measurements. Po přitmelení snímače probíhalo vytvrzování spoje na teplotě  $127^{\circ}\text{C}$  po dobu 4 hodin za účelem dosažení maximální adheze lepidla a jeho optimálních charakteristik.

### 3.2 Zkušební zařízení a postup zkoušek

K cyklickému zatěžování byl použit elektrohydraulický pulzátor PCQ fy Schenck, který umožňuje i programované zatěžování při řízení zkoušky od síly nebo od celkové deformace. Protože S/N snímače jsou citlivé na deformační historii, již

byly podrobeny, bylo cyklické zatěžování vzorků řízeno od deformace, přičemž do regulačního zesilovače byl jako zadávaný signál veden signál z funkčního generátoru (zkoušky s konstantní amplitudou deformace) nebo z programovacího automatu (programované zkoušky).

Pro řízení deformace vzorku při jeho cyklickém zatěžování byl použit induktivní extenzometr DS-32 fy Hottinger s měrnou délkou  $l_0 = 40$  mm. Závislost mezi poměrnou deformací  $\varepsilon$  v místě nalepení snímačů a deformací  $\varepsilon_0$ , podle níž byla řízena zkouška, lze přibližně vyjádřit vztahem /6/:

$$\varepsilon = 1,525 \cdot \varepsilon_0^{1,13} \quad \dots \quad (1)$$

Ke snímání odpovídých změn snímačů byly použity tenzometrické mosty typu 581 DNH fy Peekel s analogovým výstupem. Odpovědové změny byly v průběhu cyklického zatěžování zaznamenávány na U.V.zapisovač. Celkové schéma zkoušky je uvedeno na obr.6.

### 3.3 Získané výsledky

#### Stabilita nuly a teplotní charakteristiky snímačů

Hlavnímu experimentálnímu programu předcházely zkoušky stability nuly a teplotních charakteristik S/N snímačů. Tyto ukázaly, že při kompenzačním zapojení snímačů bylo kolísání nuly menší než  $3,8 \cdot 10^{-5} \Omega$ , přičemž změna teploty probíhala od  $20,5^\circ\text{C}$  do  $28,3^\circ\text{C}$ . Získaný údaj znamená, že chyba způsobená kolísáním nuly je řádu  $10^{-4}$ , uvážíme-li, že odpovědové změny snímače v důsledku hromadění poškození při cyklickém namáhání

dosahují řádově  $10^6 \Omega$ .

Měření teplotních charakteristik snímačů ukázalo, že změna odporu snímače s teplotou kolísá kolem přibližně lineární závislosti. Z této závislosti určená hodnota diferenciálního teplotního koeficientu snímače přitom lehce na ocelový vzorek činila  $\alpha_d = 210 \mu\Omega/^\circ C$ . Podle zjištěného diferenciálního teplotního koeficientu snímače způsobí změna teploty o  $10^\circ C$  chybu řádu  $10^{-3}$ .

#### Zatěžování s konstantní amplitudou deformace

Překreslený záznam z U.V.zapisovače, zachycující odporové změny snímače v průběhu cyklování s konstantní amplitudou deformace o velikosti  $\varepsilon_0 = \pm 2 \cdot 10^{-3}$  (podle vztahu (1) odpovídá  $\varepsilon = \pm 3,34 \cdot 10^{-3}$ ), je zobrazen na obr.7. Kromě záznamu, jaký by vyplynul při extrémně malé rychlosti posuvu papíru v U.V.zapisovači, jsou na obr.7 vyneseny i skutečné průběhy odporu snímače během několika jednotlivých cyklů po aplikaci 1 250 cyklů (řez A) a 23 000 cyklů (řez B). Plochá charakteristika v saturační oblasti a pokles střední hodnoty i rozmezitu ( $R_{max} - R_{min}$ ) v poslední fázi zkoušky ukazují, že k lomu došlo mimo oblast S/N snímače.

Změny odporu snímačů u dalších vzorků v závislosti na počtu aplikovaných cyklů jsou vyneseny v log-log souřadnicích na obr.8. I když by získané křivky měly být shodné s kalibračními křivkami zobrazenými na obr.3, není odezva S/N snímače na cyklické namáhání přesně shodná s průměrnou odezvou vyjádřenou kalibrační křivkou. Čár-

kované jsou zakresleny křivky, které se svou polohou vymykají jisté zákonitosti v posloupnosti průběhů s roztočí deformační amplitudou. Mezi nepravidelnosti průběhu křivek, které lze na obr.8 pozorovat, patří protínání plných křivek křivkami čárkovánými a S-tvar křivky č.11. Průběh odporových změn snímače přitmeleného na vzorku č.13, který byl zatěžován konstantní amplitudou deformace  $\varepsilon_0 = 1,1 \cdot 10^{-3}$  (podle vztahu (1)  $\varepsilon = 1,7 \cdot 10^{-3}$ ), ukazuje, že praktický práh citlivosti snímačů je vyšší než přechodová hladina, výrobcem udávaná hodnotou  $\varepsilon = 1,4 \cdot 10^{-3}$  [3]. Jak dále ukazuje obr.8, odporové změny S/N snímačů se v průběhu cyklického namáhání s amplitudami deformací  $\varepsilon > 1,7 \cdot 10^{-3}$  pohybovaly v rozmezí  $\Delta R_{kr} = 3-4 \Omega$ . Znamená to, že k lomu vzorku z ocele 11 373, zatěžovaného nad skutečnou přechodovou hladinou dojde, když nahromaděná trvalá změna snímače dosáhne hodnoty  $\Delta R = 3-4 \Omega$ .

#### Zatěžování s proměnlivou amplitudou deformace

Odezva S/N snímače na náhodné zatěžování byla ověřována při programovaném zatěžování vzorků třemi programy - tab.2. Celkem bylo použito 12 hladin deformací od  $\varepsilon_0 = 1,1 \cdot 10^{-3}$  do  $\varepsilon_0 = 2,2 \cdot 10^{-3}$ , což pokrylo rozsah deformačních amplitud  $\varepsilon = 1,7 \cdot 10^{-3} - 3,7 \cdot 10^{-3}$ . Směrodatné odchylinky vyplynuly z podmínky, aby 99% (program N-1) nebo 99,9% (program N-2) všech případů připadlo do intervalu deformací  $\varepsilon_0 = 0,6 \cdot 10^{-3} - 2,2 \cdot 10^{-3}$ . Cykly s danou

deformační amplitudou nebyly aplikovány v bloku najednou, nýbrž v deseti skupinách s náhodným pořadím jejich aplikace. Zatěžovací spektra jsou graficky znázorněna na obr.9.

Tab.2.

Program	N-1	N-2	R-1
Typ spektra	normální	normální	Rayleighovo
Střední hodnota $\xi_0$ (nebo modus)	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Směrodatná odchylka	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	-
Celkový počet cyklů v bloku	2 691	2 257	3 358

Odporové změny S/N snímačů v závislosti na aplikovaných deformačních cyklech jsou pro jednotlivé zatěžovací programy vyneseny v log-log souřadnicích na obr.10. Pravděpodobná rozptylová pásma odpovodových změn S/N snímačů při programovaném zatěžování, vzata jako oblast vymezená horními a spodními křivkami na obr.10, jsou na obr.11 zakreslena do diagramu kalibračních křivek S/N snímačů s vyznačením nejbližších kalibračních křivek daných výrobcem.

#### 4. Diskuse výsledků

##### 4.1 Zkoušky s konstantní amplitudou deformace

Experimentálně zjištěné kalibrační křivky vykazují vzhledem ke kalibračním křivkám daným výrobcem rozdíly, spočívající v posuvu křivek, odlišnosti jejich tvaru,

i v porušení posloupnosti polohy křivek vzhledem k deformační amplitudě. Výrazný S-tvar křivky č.11 na obr.8 ukazuje na to, že při praktickém použití S/N snímačů bude nutné počítat s tím, že odpová odezva snímače bude velmi citlivě reagovat na lokální změny stavu napjatosti v části, zejména na procesy únavového změkčování (rychlejší změna odporu snímače) a zpevnování (pomalejší změna odporu snímače). Průběh křivky č.11 indikuje, že v oblasti kolem 4 000 cyklů m. t. l. v měrné části vzorku výrazné změkčování, které pak bylo vystřídáno zpevnováním. Větší amplituda deformace v měrné části vzorku při nezměněné hodnotě průměrné deformace na vzdálenosti  $f_0 = 40$  mm, způsobila rychlejší změnu odporu snímače.

Protínání křivky 6 s křivkami 5 a 9 a křivky 12 s křivkami 7 a 8 a též porušení posloupnosti polohy křivek vzhledem k deformačním amplitudám mají patrně původ v rozdílnosti měrné délky vzorku a délky, na níž byla udržována konstantní amplituda prodloužení. Při praktických aplikacích S/N snímačů bude nutno s podobnými jevy a průběhy odpová změn snímačů počítat.

#### 4.2 Zkoušky s proměnlivou deformační amplitudou

Odpová odezva S/N snímačů při zatěžování vzorků programy N-1 a N-2 odpovídá v první fázi cyklování přibližně odesvě pro konstantní amplitudu  $\dot{\varepsilon} = \pm 2,5 \cdot 10^{-3}$  (obr.11a, b). V pozdější fázi cyklování nastává přibližování odpová odesvy snímačů ke kalibrační křivce  $\dot{\varepsilon} = \pm 2 \cdot 10^{-3}$ , což

je výsledkem cyklického zpevňování v měrné části vzorku. Rozdíl mezi odporovými odezvami u obou programů spočívá v tom, že v případě programu N-2 (menší směrodatná odchylka rozdělení) dochází k odklonu od křivky, příslušné deformaci  $\dot{\varepsilon} = \pm 2,5 \cdot 10^{-3}$  dříve a přiblížení ke křivce  $\dot{\varepsilon} = \pm 2 \cdot 10^{-3}$  je těsnější. Vliv snížení směrodatné odchylky rozdělení se projevil dále zvýšením průměrné životnosti a do jisté míry i snížením rozptylu výsledků.

U programu R-1 byl vliv cyklického zpevňování na odporovou odezvu snímačů výraznější a životnost vzorků kratší vzhledem k tomu, že Rayleighovo rozdělení se stejnou hodnotou modusu, jako je střední hodnota normálního rozdělení, je agresivnější než normální rozdělení. Počáteční odporová odezva S/N snímače odpovídala cyklování s konstantní amplitudou deformace  $\dot{\varepsilon} = \pm 3 \cdot 10^{-3}$ , přičemž v průběhu dalšího cyklování se odporová odezva snímače postupně přiblížila ke křivce  $\dot{\varepsilon} = \pm 2,3 \cdot 10^{-3}$  (obr.11c).

Srovnání odezvy snímačů při programovaném zatěžování s experimentálními kalibračními křivkami (obr.12) ukazuje, že ekvivalentní amplituda deformace u programu N-1 má hodnotu  $\dot{\varepsilon} \approx \pm 2,96 \cdot 10^{-3}$ , což je hodnota převyšující o 1,3.s modus rozdělení  $\hat{\varepsilon}$ . U programu N-2 má ekvivalentní amplituda deformace přibližně velikost  $\dot{\varepsilon} = \pm 2,6 \cdot 10^{-3}$ . Tato hodnota je také větší než modus rozdělení  $\hat{\varepsilon}$  a jejich rozdíl činí přibližně  $0,8.s$  (kde s je směrodatná odchylka rozdělení v termínech deformace  $\varepsilon_0$ ). Vidíme, že se zmenšováním s se zmenšuje i poměr  $(\dot{\varepsilon}_{ekv} - \hat{\varepsilon})/s$ . V limitním případě platí:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{\varepsilon_{\text{ekv}} - \hat{\varepsilon}}{s} = 0$$

Fyzikálně lze tuto rovnost interpretovat tak, že při zmenšení směrodatné odchylky na nulu přejde programované namáhání s proměnlivou amplitudou deformace v namáhání s konstantní hodnotou amplitudy deformace, rovně modusu rozdělení.

U programu R-1 lze podle obr.12 považovat za ekvivalentní amplitudu deformace hodnotu  $\varepsilon = \pm 2,96 \cdot 10^{-3}$ .

Získané výsledky potvrdily, že při náhodném resp. programovaném zatěžování jak s normálním tak i Rayleighovým rozdělením četnosti deformačních amplitud lze najít hodnotu ekvivalentní deformační amplitudy, která vyvolává přibližně stejné odporové změny snímače jako náhodné kmitové zatěžování daného spektra. Hodnota ekvivalentní deformační amplitudy závisí přitom na modusu u Rayleighova rozdělení a na modusu a směrodatné odchylce u normálního rozdělení.

### 5. Použití S/N snímačů pod přechodovou hladinou

U mnoha technických aplikací S/N snímačů se setkáváme se situací, kdy cyklické deformace u únavově namáhané části jsou menší než je přechodová hladina S/N snímačů ( $\varepsilon = (1,4-1,7) \cdot 10^{-3}$ ). Při přímém přitmelení S/N snímače do kritického místa části by snímač v takovémto případě vykazoval velmi malou odporovou změnu, kterou

nelze korelovat s únavovými parametry zkoušky. Jestliže leží přechodová hladina snímače nad hodnotou deformační amplitudy příslušející mezi únavy části a amplituda zatežovacích cyklů bude ležet mezi těmito dvěma hodnotami, může dojít k lomu součásti, přestože snímač bude vykazovat jen velmi malou odpovovou změnu. Správný odhad únavového poškození součásti totiž předpokládá, že přechodová hladina snímače se shoduje s amplitudou deformace na mezi únavy.

Aby bylo možné použít S/N snímače i v těch případech, kdy deformace na mezi únavy i cyklická deformace vyvolaná zatížením leží pod přechodovou hladinou snímače, lze úroveň deformace zvětšit pomocí tzv. násobičů deformace /7/. Násobiče deformace jsou tvarově upravené rovinné prvky, zhotovené z kovové folie. Svými okrajovými plochami se tmelí na vyšetřovanou část (obr.13a,b). V důsledku nižší tuhosti měrné části násobiče než je tuhost jeho základního těla dojde v této části násobiče při deformaci vyšetřované součásti ke zvětšení poměrné deformace.

V našem ústavu jsme ověřovali možnost použití násobičů typu Hawker-Siddeley, vyráběných z duralového plechu o tloušťce 0,5 mm. Rozměry zkoušených násobičů jsou patrné z obr.14. Na měrnou část násobiče jsme pomocí speciálního tmelu M-Bond 610 přitmelili polyimidovou folii tloušťky 0,04 mm, která sloužila jako "difuzér" pro vyrovnání vysokých deformačních gradientů v místech štěrbin. Stejným tmelem jsme na polyimidovou folii přitmelili

tenzometr typu SM 120. Po vytvrzení spojů při zvýšené teplotě jsme násobič přilepili na plochou zkušební tyč z vysokopevnostní oceli pomocí epoxidového lepidla Araldite tak, aby délka  $l_1$  (podle obr.13b) byla  $l_1 \approx 15$  mm. Na druhou stranu tyče jsme přitmelili další tenzometr typu SM 120. Zkušební tyč s přilepeným násobičem a tenzometrem jsme pak monotonně zatěžovali v elasticke oblasti na trhacím stroji.

Odporové změny tenzometrů, reprezentující poměrnou deformaci  $\varepsilon$  v měrné části násobiče a poměrnou deformaci  $\varepsilon_0$  zatěžované tyče, byly vynášeny na souřadnicový zapisovač. Směrnice získané lineární závislosti ( $\varepsilon / \varepsilon_0$ ) poskytla následující hodnotu násobícího faktoru násobiče:

$$M = 2,45$$

Uvážením deformačních podmínek v různě tuhých elastickech prvcích spojených za sebou a aplikací získaných výsledků na násobič deformace typu Hawker-Siddeley, lze odvodit vztah pro násobící faktor násobiče:

$$M = 1 + 2 \cdot \frac{l_1}{l_0} \quad \dots \quad (2)$$

kde  $l_0$  a  $l_1$  jsou délky podle obr.13b.

Dosadíme-li do vztahu (2)  $l_0 = 21$  mm a  $l_1 = 15$  mm, dostaneme  $M=2,43$ , což svědčí o velmi dobré přesnosti vztahu (2). V dalším kroku budou násobiče zkoušeny ve spojení s S/N snímači při cyklických zkouškách na zkušebních tyčích a později na konkrétních strojních částech a konstrukcích v provozu.

## 6. Závěr

1. Praktický prah citlivosti S/N snímače (přechodová hladina) je asi  $1,8 \cdot 10^{-3}$  a jeho kritická odporová změna, již dosáhne v okamžiku vzniku trhliny u části z nízkouhlíkové oceli 11373, leží v rozmezí  $3-4 \Omega$ . Vzhledem k jistým rozdílům v experimentálně zjištěných a výrobcem dodaných kalibračních křivkách je vhodné ověřit předem odporové odezvy snímačů.
2. Náhodné zatěžování vyvolává u snímačů přibližně stejnou ohnickou odezvu jako zatěžování s konstantní amplitudou deformace. Ekvivalentní amplituda deformace leží přitom nad modusem spektra a se zmenšováním směrodatné odchylky u normálního rozdělení se přibližuje hodnotě modusu.
3. Vzhledem k zjištěné hodnotě diferenciálního teplotního součinitele snímače ( $\alpha_d = 210 \mu\Omega/\text{°C}$ ), přitomeleného na tyč z ocele 11373, má kolísání teploty malý vliv na přesnost měření při praktickém použití S/N snímačů u částí z této ocele.
4. Použitelnost S/N snímačů lze rozšířit pomocí násobičů deformace i do oblasti deformačních amplitud ležících pod přechodovou hladinou snímačů. Násobiče jsou zhodoveny z duralového plechu o tloušťce 0,5 - 0,8 mm a podle typu umožňují zvětšit úroveň deformace 1-3 -krát nebo 2,5-10 -krát.

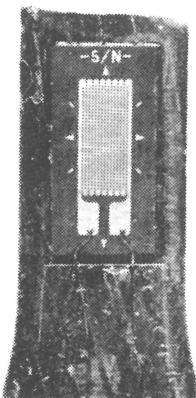
Literatura

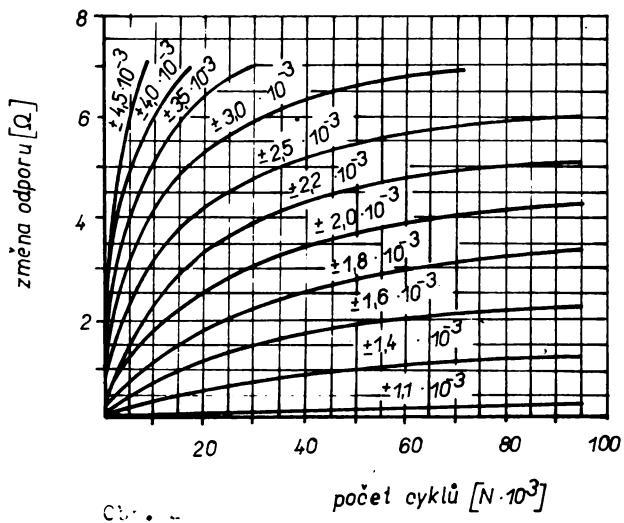
- /1/ Gajdoš,L. : Změny elektrické impedance v průběhu únavového procesu, Kovové materiály, č.5,1974,s.622-636.
- /2/ Harting,D.R. : The S/N - Fatigue Life Gage Response to Random Inputs ,Advances in Test Measurement,Oct.1968,Pittsburgh : Instrument Society of America
- /3/ Micro-Measurements, April 1969 , S/N Fatigue Life Gage Applications Mammual, 2<sup>nd</sup> Edition,Romulus:Micro-Measurements Division, Vishay Intertechnology , Inc.
- /4/ Booth ,C. W. : The S/N Fatigue Life Gage in Perspective, Romulus : Micro-Measurements Division of Vishay Intertechnology ,Inc.,1970
- /5/ Kowalski,H.C.: Prospectus of a New Method for Determining Cumulative Fatigue Damage : Dual -Element Fatigue-Life Gage ,ISA Trans.,Vol.11, Nr.4 ,1972
- /6/ Gajdoš,L. : Prověření možnosti využití S/N snímačů pro určování životnosti zejména částí z nízkouhlíkových ocelí,Výzk.zpráva SVÚM , Z-75-3271
- /7/ Gajdoš,L. : Metody indikace stupně únavového poškození,Strojírenství,č.5,1973,s. 306-312
- /8/ Dorsey, J. : Engineering Concepts in Fatigue Life Gage Use , Applications Note AN-127, Micro-Measurements Division,Vishay Intertechnology ,Inc.

Seznam obrázků

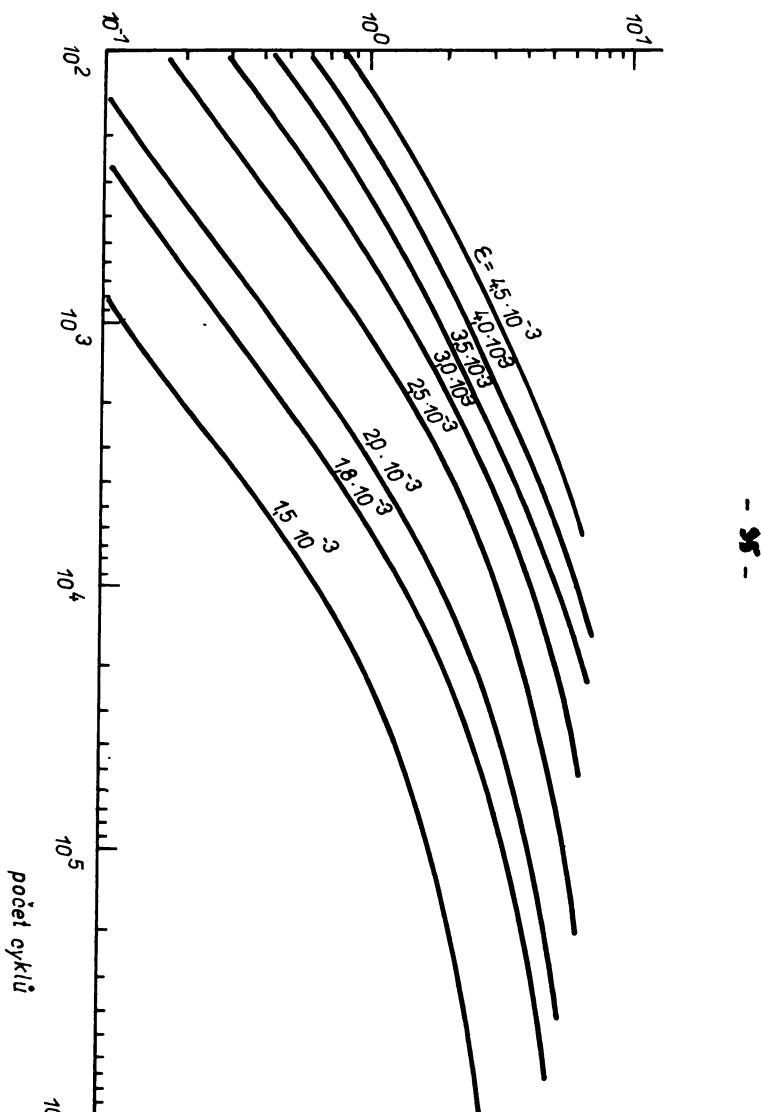
- Obr.1. - S/N snímač
- Obr.2. - Odezva S/N snímače na cyklické zatěžování v lineárních souřadnicích
- Obr.3. - Kalibrační křivky S/N snímačů
- Obr.4. - Ohmicko-únavové křivky S/N snímačů
- Obr.5. - Tvar a rozměry zkušebních vzorků
- Obr.6. - Blokové schéma zkoušky
- Obr.7. - Změna odporu S/N snímače v průběhu cyklického namáhání s konstantní amplitudou deformace  $\varepsilon_0 = \pm 2 \times 10^{-3}$
- Obr.8. - Ohmická odezva použitých S/N snímačů v log-log souřadnicích
- Obr.9. - Rozdělení četnosti deformačních cyklů v zatěžovacích blocích použitých programů
- Obr.10. - Odporové odezvy S/N snímačů na programované zatěžování programem N-1 (a), N-2 (b) , a R-1 (c)
- Obr.11. - Rozptylová pásma experimentálně zjištěných změn S/N snímačů při programovaném zatěžování vzhledem ke kalibračním křivkám daným výrobcem
- Obr.12. - Rozptylová pásma experimentálně zjištěných odporových změn S/N snímačů při programovaném zatěžování vzhledem ke kalibračním křivkám zjištěným experimentálně
- Obr. 13.- Mechanické násobiče deformací :jednoduchý (a) a typu Hawker -Siddeley (b)
- Obr.14. - Experimentálně ověřovaný násobič deformace

Obs.



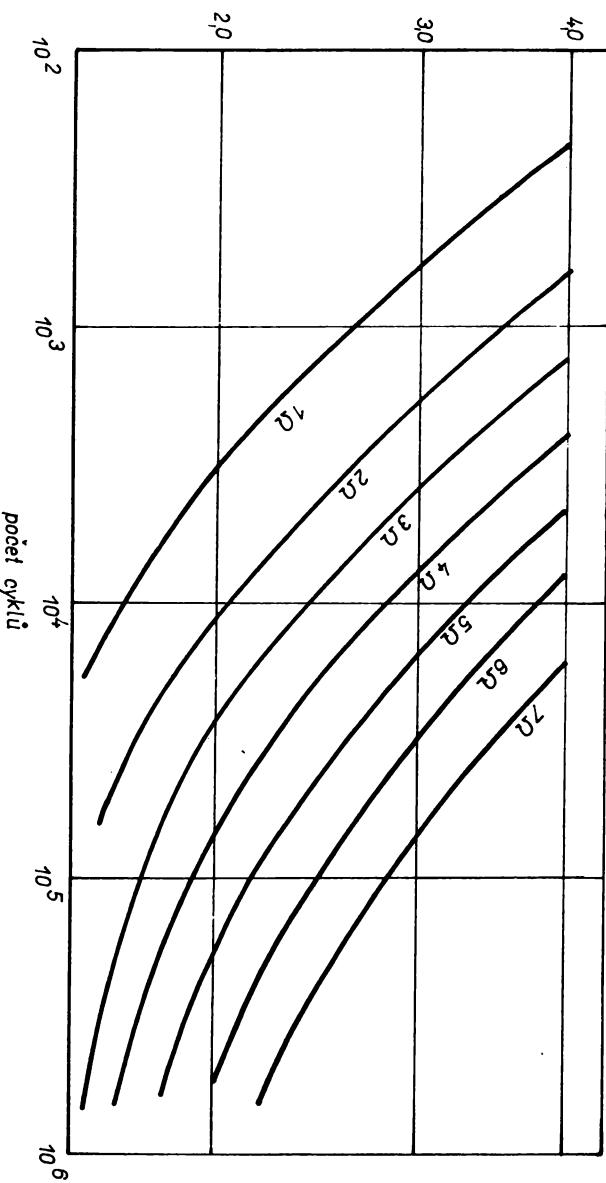


změna odporu snímače [ $\Omega$ ]



čír. 3

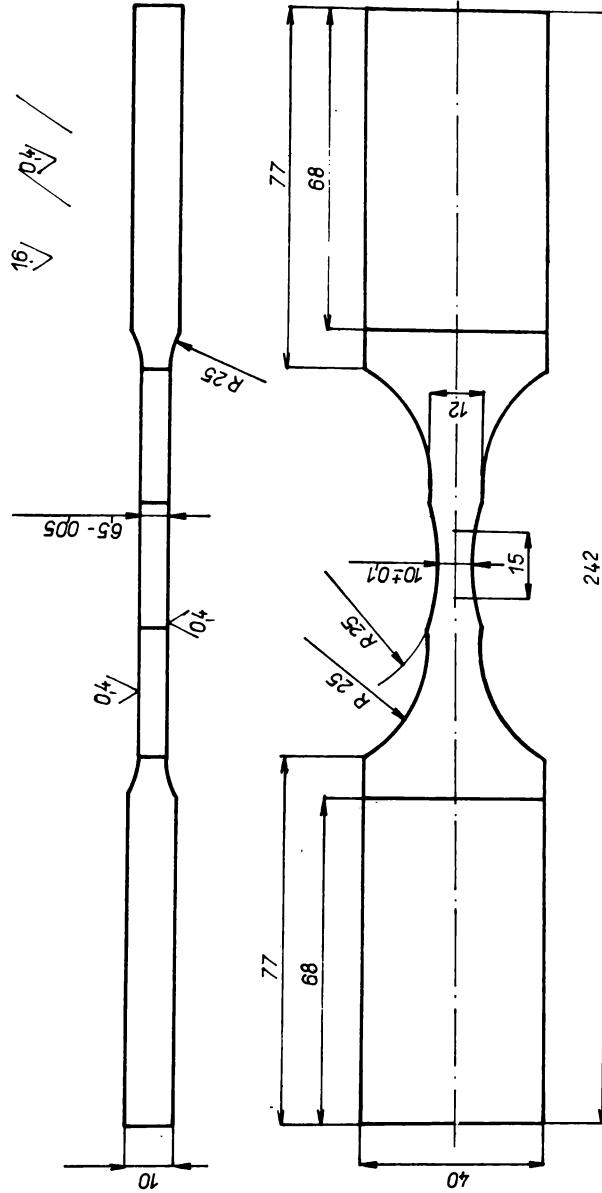
amplituda deformace ( $10^{-3}$ )



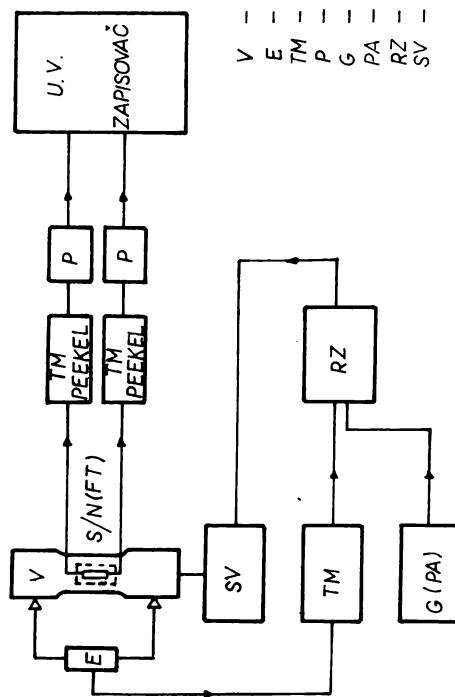
C<sub>b</sub> = 4.0

- 38 -

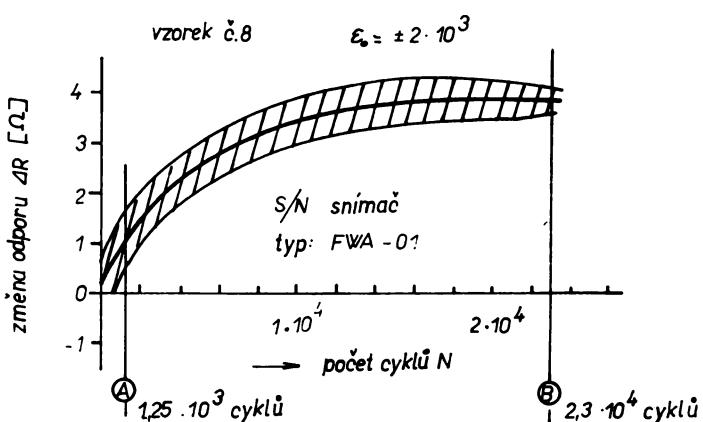
- 95 -



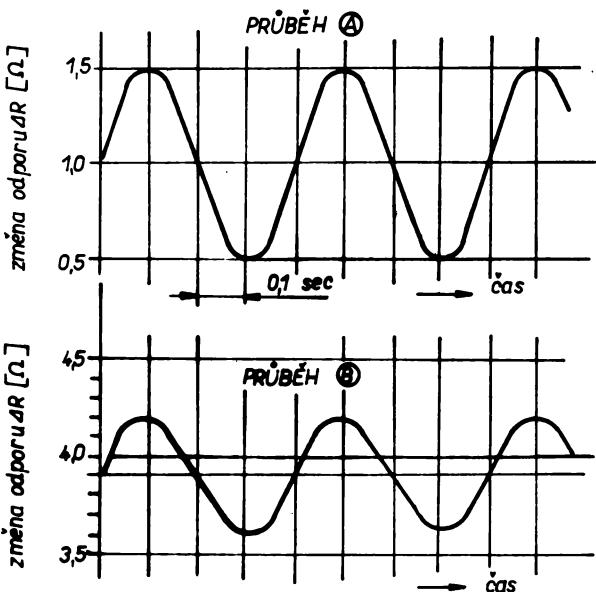
- 35 -



V - VZOREK  
E - EXTENZOMETR  
TM - TENZOMETRICKÝ MOST  
P - POTENCIOMETR  
G - GENERATOR  
PA - PROGRAM AUTOMAT  
RZ - REGULACNÍ ZESILOVÁC  
SV - SERVOVÁLEC

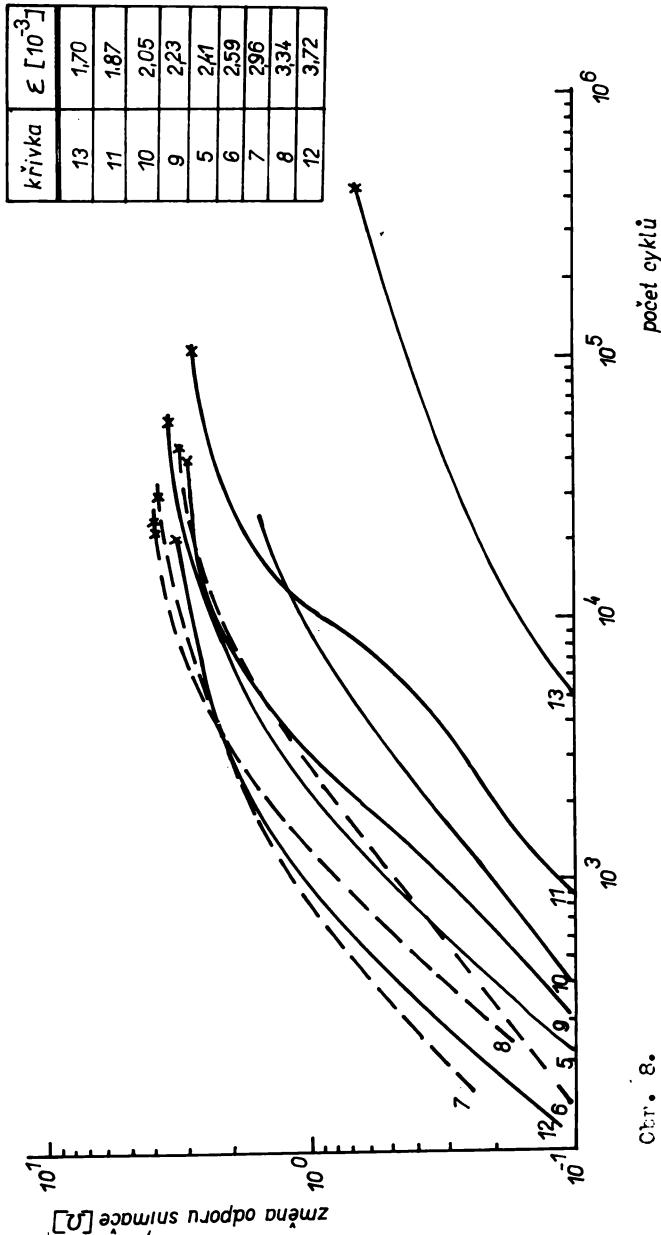


- 35 -

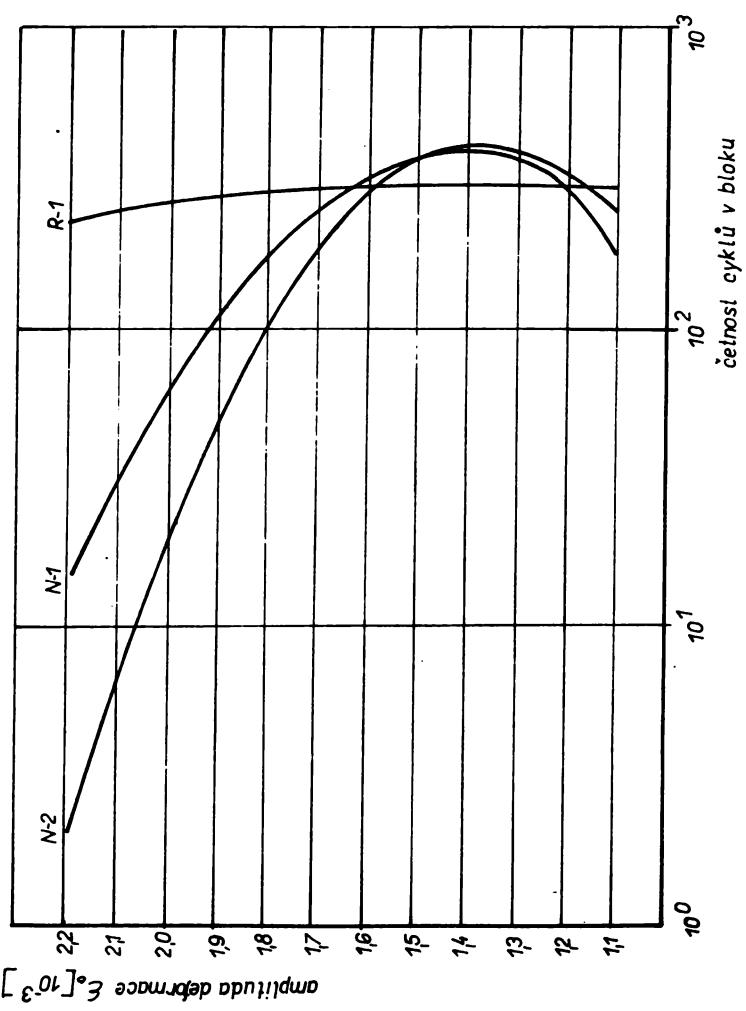


Obr. 7.

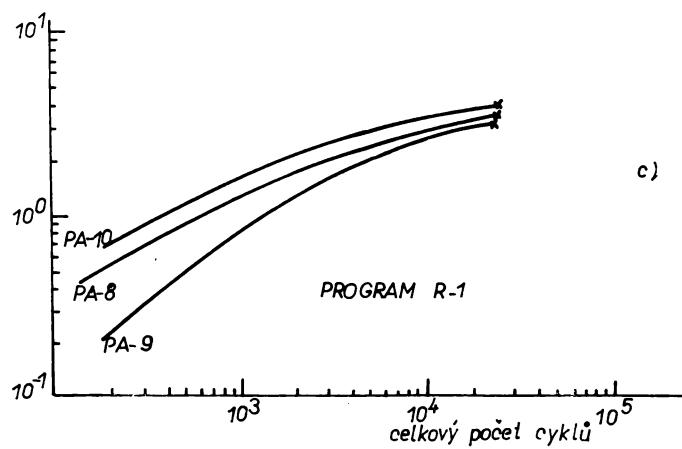
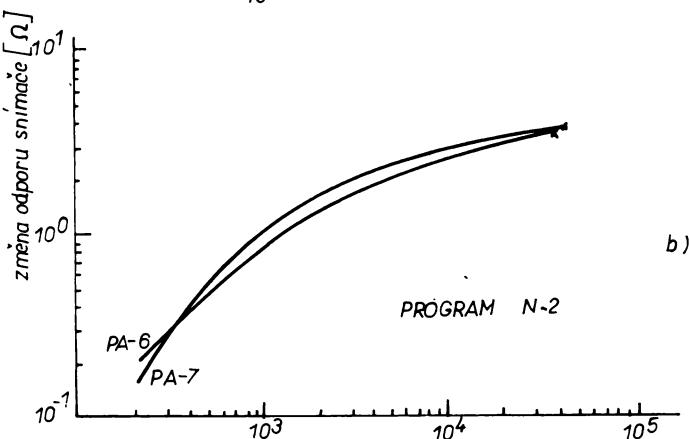
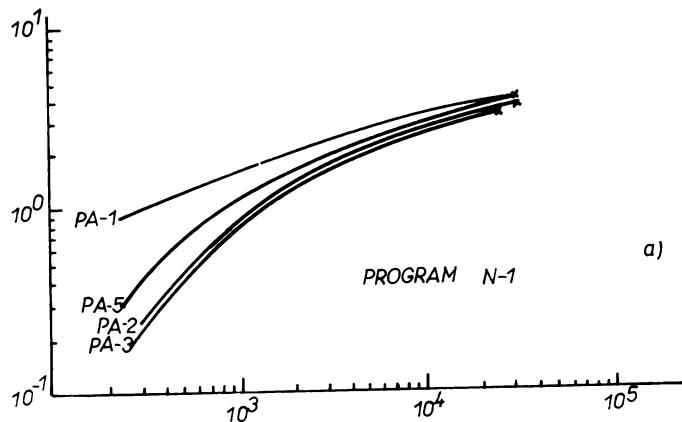
- 35 -

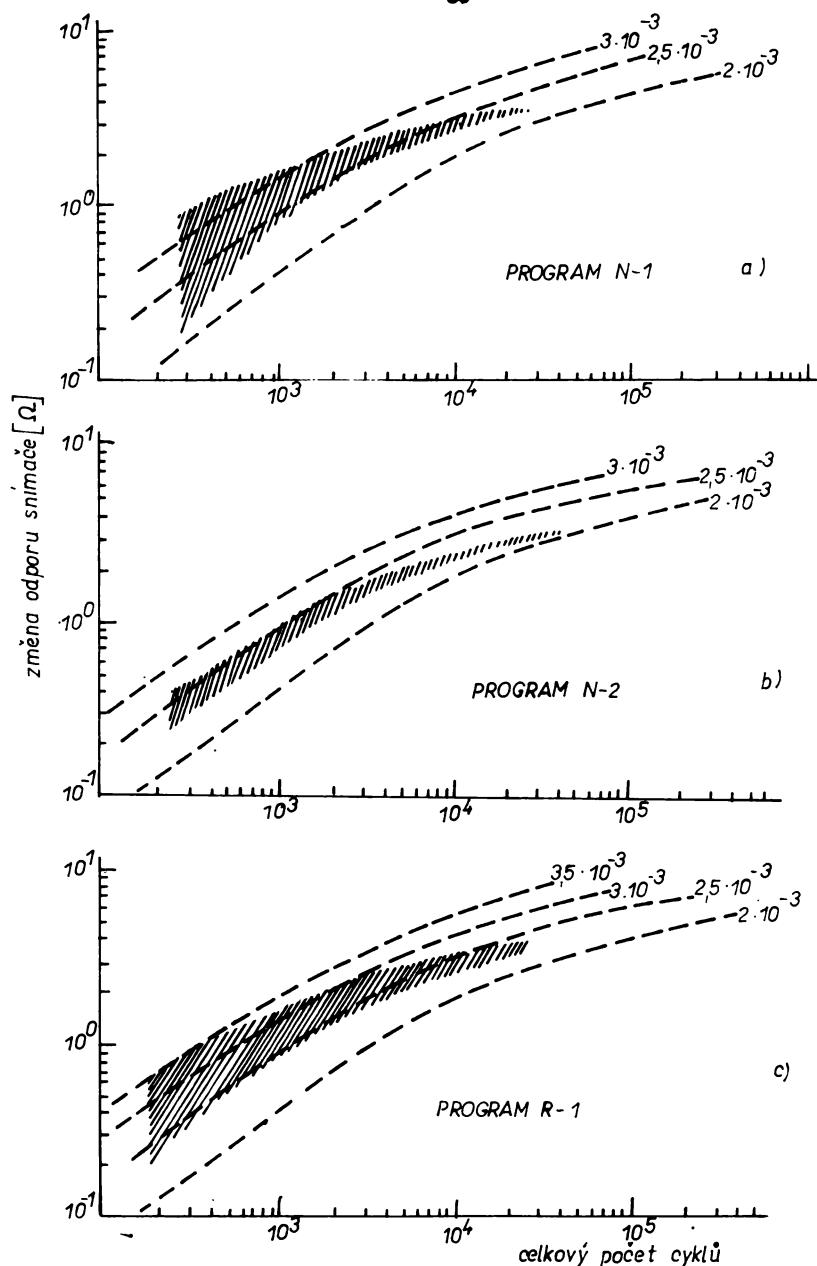


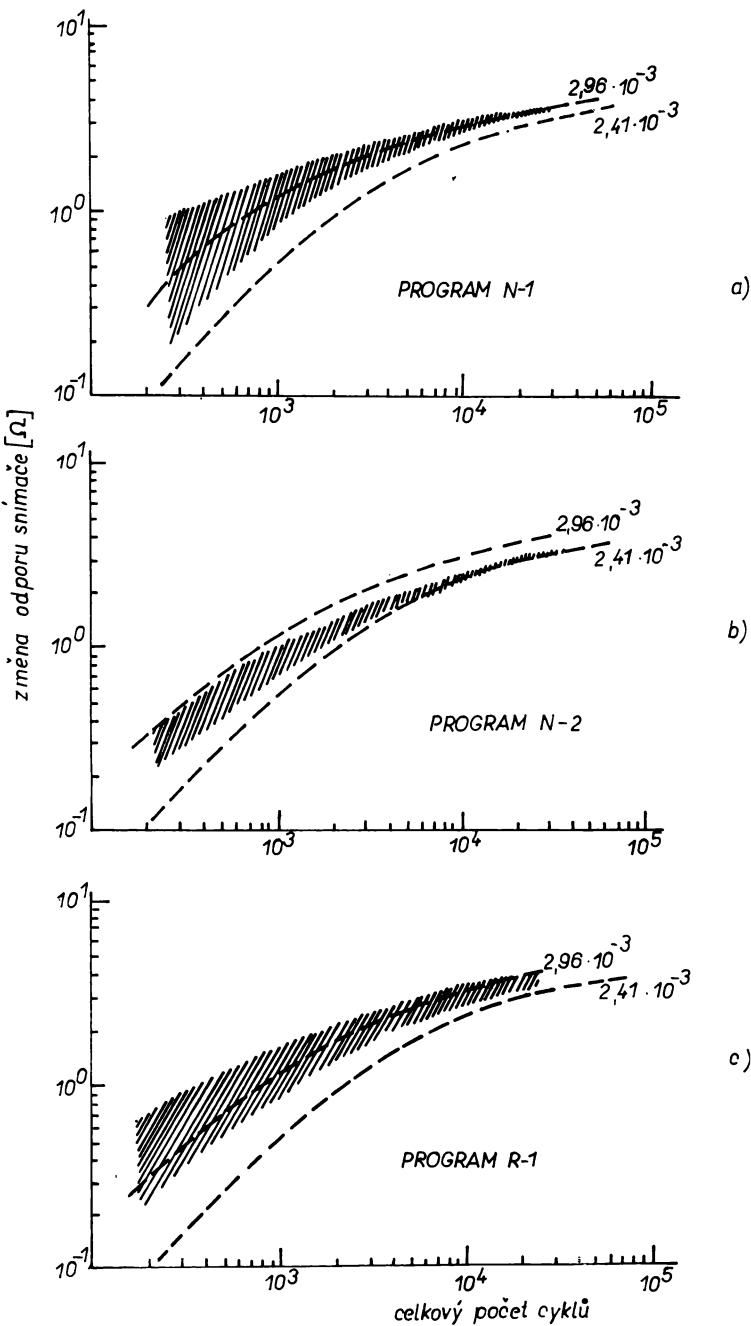
- 65 -

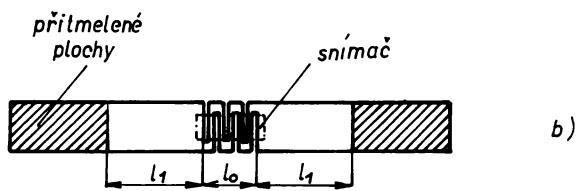
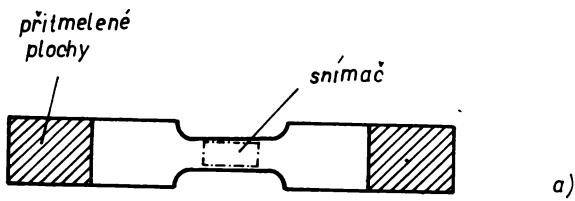


C. • Ž.

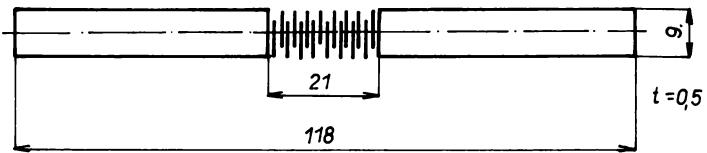






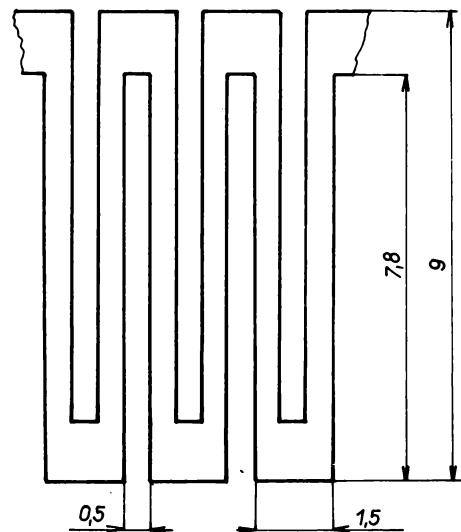


M=1:1



DETAIL

M=10:1



Chm. 1+