

STRAIN MEASUREMENT ON THE MAIN CIRCULATING PUMP PIPELINE SYSTEM TF41 DURING RUNNING UP OF THE NUCLEAR POWER PLANT DUKOVANY, UNIT IV.

D. Vincour*, L. Charvát**

Summary: The strain gauges instrumentation in chosen cross-sections on the pipeline of TF10 system is presented. The way of data saving and processing it as time dependent, internal forces and moments calculation during running up of unit are shown too.

1. Úvod

Podle informací ze Správy primární části Jaderné elektrárny Dukovany dochází během nahřívání bloku k mírnému zvýšení vibrací některých hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ). Jako jedna z možných příčin je uvažována změna silových účinků od potrubního systému TF, působících na příruby chladičů autonomního okruhu a ucpávkové vody během nahřívání bloku, který je umístěn na konzolách připojených k lucerně čerpadla, uvnitř které prochází hřídel rotoru HCČ. Předpokládá se, že silové účinky mohou způsobit vychýlení osy celé konstrukce od svislice, které by mohlo vést ke zvýšeným vibracím tělesa HCČ během provozu. Na tomto místě je třeba zdůraznit, že HCČ nemá klasický pevný základ, ale je instalováno na kulových oporách, které umožňují jeho posun při náhřevu primárního okruhu.

Cílem tohoto úkolu je zjištění vnitřních sil na potrubí TF pomocí tenzometrického měření lokálních deformací v jednotlivých potrubních řezech podle metodiky uvedené v práci Vejvoda, S. (2000)

2. Instalace měřícího řetězce

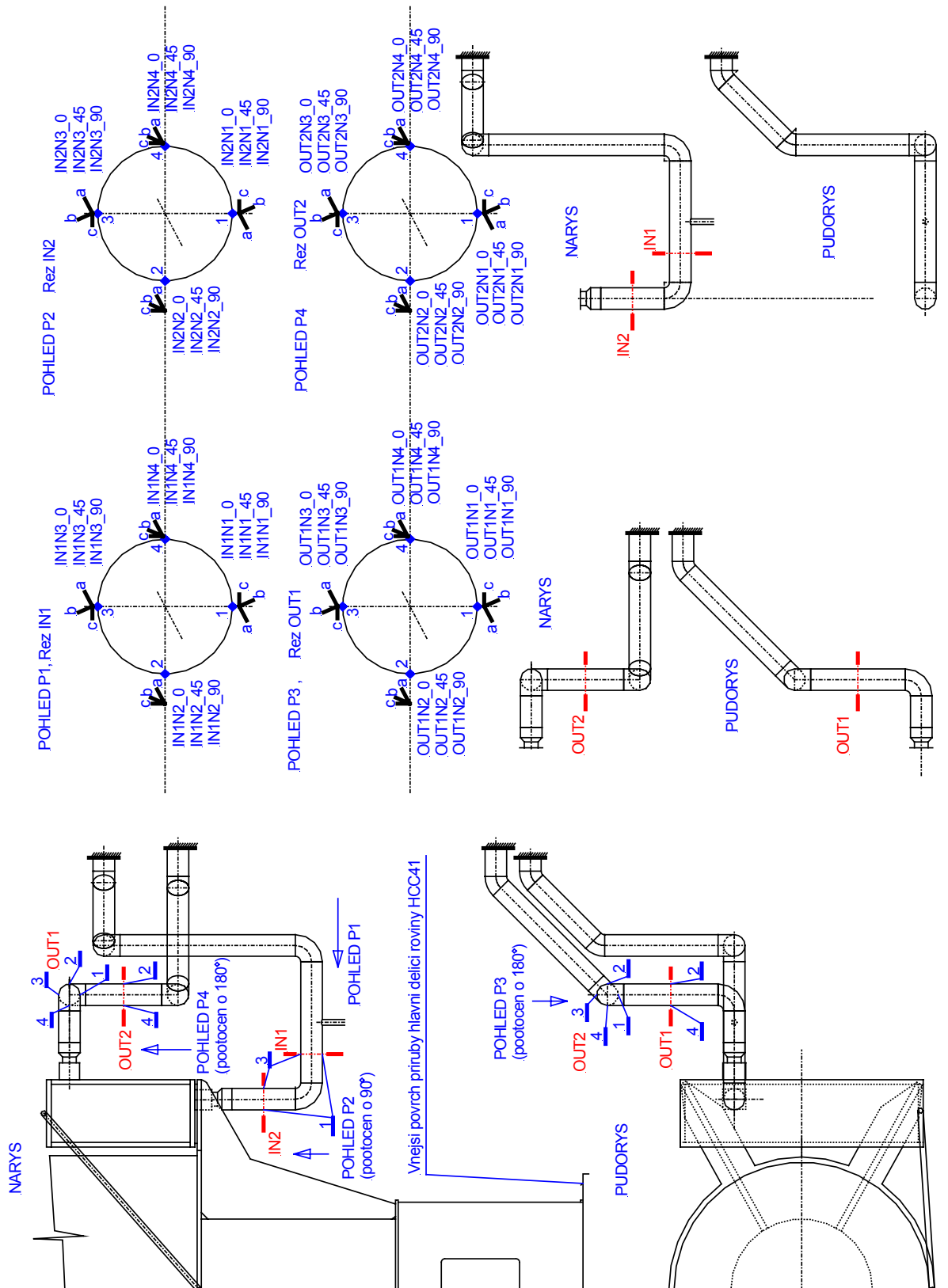
Provozní teplota v potrubí TF nepřesahuje během provozu hodnotu 70°C , proto byly použity běžné tenzometrické růžice s tenzometry umístěnými pod úhly 0° , 45° a 90° , které byly přilepeny ve čtyřech bodech po obvodě jednotlivých řezů. Řezy byly umístěny vždy na rovné části potrubí (Obr.1) v dostatečné vzdálenosti od diskontinuit aby byl v co největší míře vyloučen vliv poruchy membránového stavu a označeny následujícím způsobem:

IN1 – Vstupní potrubí, vodorovný úsek vlevo od nátrubku, Obr.2. a Obr.4.

IN2 – Vstupní potrubí, svislý úsek pod filtrem, Obr.2. a Obr.4.

* Ing. Dušan Vincour, Ph.D: Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., Veveří 95, 611 00 Brno; tel.: +420 541 321 291, fax: +420 541 211 189; e-mail: vincourd@uam.cz

** Ing. Lubomír Charvát: ČEZ,a.s. JE Dukovany, 675 50 Dukovany 269; e-mail: charv1.edu@mail.cez.cz



Obr.1. Vyznačení měřících řezů a umístění čidel na potrubí TF

OUT1 – Výst. potrubí, vodorovný úsek za 1.kolenem v horní části filtru, Obr.3. a Obr.4.

OUT2 - Výstupní potrubí, 1. svislý úsek od filtru, Obr.3. a Obr.4.

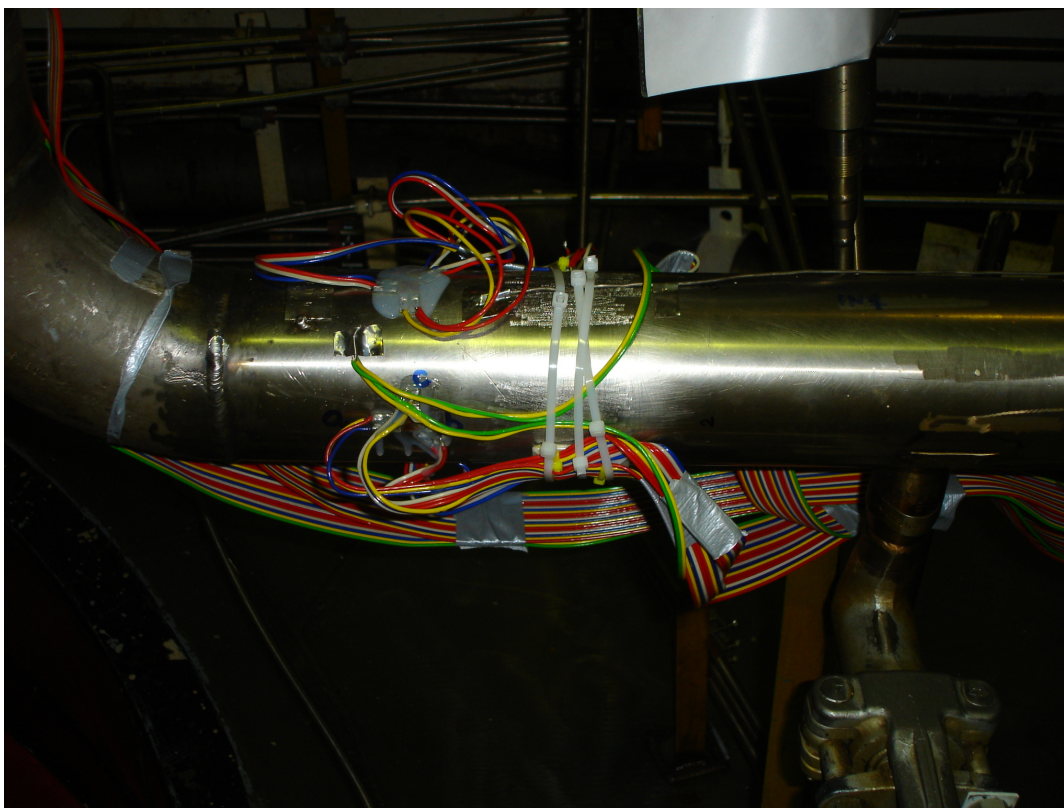
V každém ve shora uvedeném řezu jsou umístěny čtyři tenzometrické růžice, jak je uvedeno na Obr.1. Každý řez je tedy osazen 12ti tenzometry. Celkem se jedná o 48 signálů z tenzometrů. Navíc byly ještě v řezu IN1 umístěny dva termočlánky a v řezu OUT2 jeden termočlánek.

Byly použity dvě měřicí ústředny EMS, které pracovaly během měření nezávisle na obsluze. Data byla automaticky zapisována do vnitřní paměti typu FLASH s pevnou periodou záznamu 1s. Současně bylo nastaveno dynamické vzorkování frekvencí 1kHz, které se automaticky spouští pro každý měřicí kanál zvlášť v případě rychlých změn signálu. Ústředny jsou vybaveny procesorem a speciálním algoritmem, který průběžně kontroluje stav signálů a případně spouští automatické vzorkování.

Potrubí TF není během provozu zaizolováno, proto termočlánky měří střední integrální teplotu povrchu potrubí a okolí. Pro případnou teplotní korekci a jako orientační hodnota je měřená teplota považována za dostačující.

Během instalace byla také provedena měření tloušťek stěn potrubních úseků s měřicími řezy ultrazvukovým tloušťkoměrem. Průměrné naměřené hodnoty byly zohledněny ve výpočtu vnitřních sil.

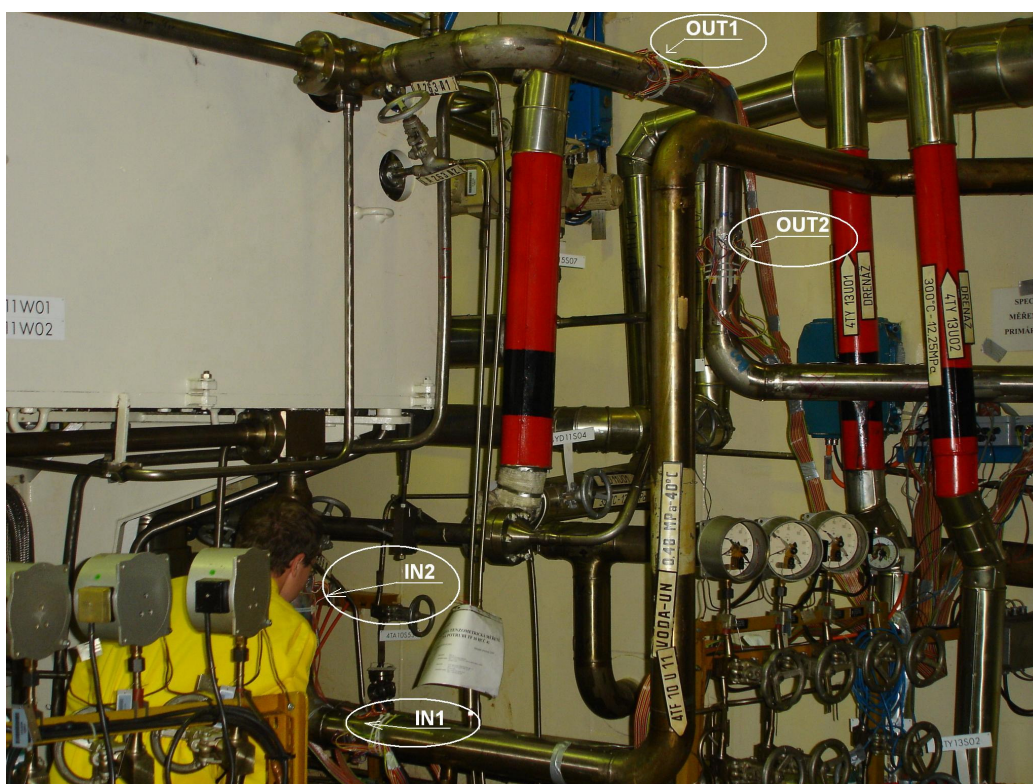
Schéma potrubního systému včetně jednotlivých řezů s tenzometry a termočlánky je ukázáno na Obr.1.



Obr.2. Tenzometry v řezu IN1 se dvěma termočlánky. Vlevo na svislé části je umístěn řez IN2 (jsou vidět pouze kabely vedoucí k řezu IN2).



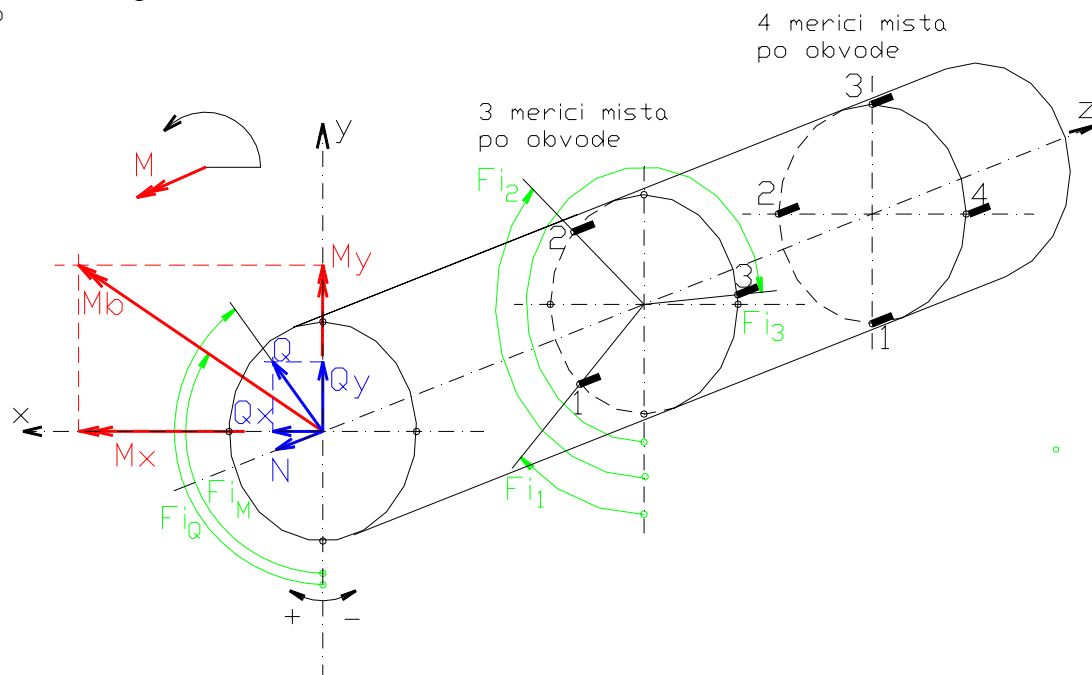
Obr.3. Tenzometry v řezu OUT2 s jedním termočlánkem. V horní části obrázku je částečně vidět řez OUT1. V pravé spodní části jsou umístěny obě měřicí jednotky MJ2 a MJ3 (modré kovové krabice s vývody)



Obr.4. Celkový pohled na řezy IN1, IN2, OUT1 a OUT2 na potrubí TF u HCČ 41 (je umístěno vlevo)

3. Označení veličin v hodnoceném řezu

Na Obr.5. jsou schematicky uvedeny vnitřní síly v hodnoceném řezu a dva způsoby osazení tenzometrů po obvodě.



Obr.5. Vnitřní síly v hodnoceném řezu a dva způsoby osazení tenzometrů po obvodě

Popis veličin k Obr.5. je uveden v Tabulce 1.

Tabulka 1

N	[kN]	Normální síla v ose z, tahová síla má znaménko +.
Mx	[kNm]	Ohybový moment k ose x
My	[kNm]	Ohybový moment k ose y
Mk	[kNm]	Kroutící moment k ose z
Qx	[kN]	Posouvající síla k ose x
Qy	[kN]	Posouvající síla k ose y
Q	[kN]	Celková posouvající síla
Mb	[kNm]	Celkový ohybový moment k ose z
Fi _Q	[°]	Úhel svírající svislá osa řezu a celková posouvající síla
Fi _M	[°]	Úhel svírající svislá osa řezu a celkový ohybový moment
Fi ₁	[°]	Úhel svírající svislá osa řezu a měřicí místo 1
Fi ₂	[°]	Úhel svírající svislá osa řezu a měřicí místo 2
Fi ₃	[°]	Úhel svírající svislá osa řezu a měřicí místo 3

Řez lze osadit buď třemi měřicími místy po 120° nebo čtyřmi měřicími místy po 90°. V každém měřicím místě se předpokládá osamělý tenzometr, nebo tzv. „télčko“ se dvěma tenzometry (podélný a příčný směr) nebo růžice se třemi tenzometry. Zkušenosti z praxe ukazují, že ne všechny tenzometry v hodnoceném řezu se podaří bezchybně zprovoznit, proto v je v praxi používána varianta se čtyřmi měřicími růžicemi. V měřicím řezu jsou předpokládány pouze elastické deformace. Při výpočtech jsou nutné alespoň tři signály z podélně umístěných tenzometrů, čtvrtý je doplňkový. Podélně umístěný tenzometr udává deformaci ve směru podélné osy potrubí. Umístěním dvou měřicích řezů vedle sebe umožňuje zjistit i celkový ohybový moment na potrubním úseku.

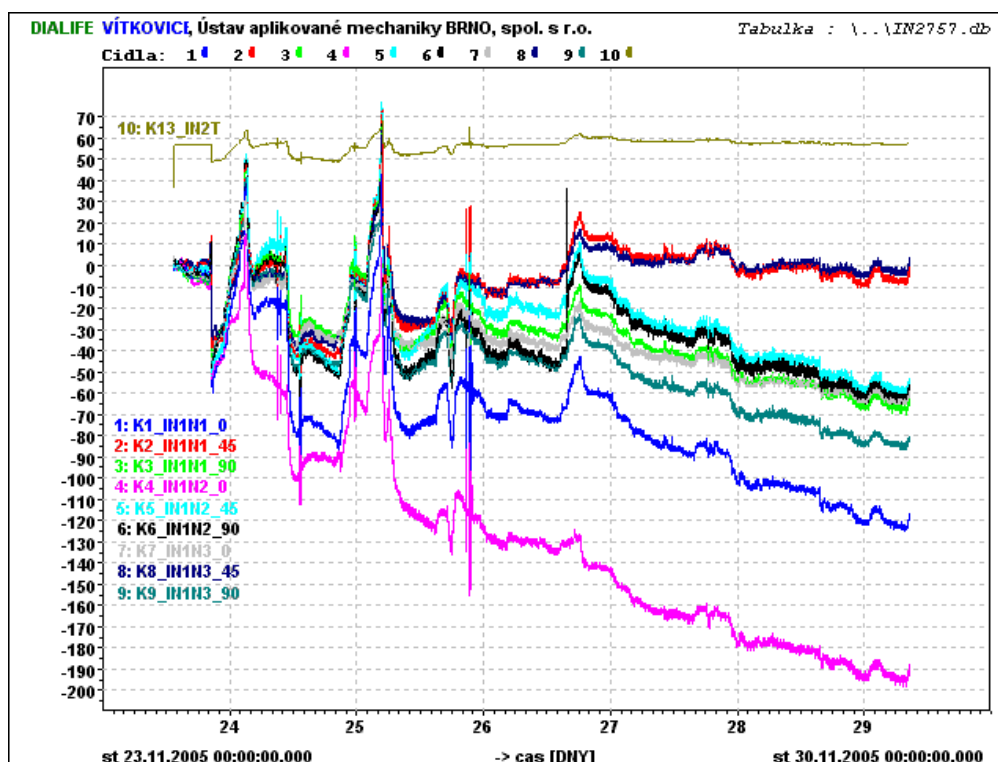
4. Měřená data a vypočtené průběhy sil a momentů.

Sběr naměřených hodnot byl prováděn pracovníky Ústavu aplikované mechaniky Brno, s.r.o. v nepravidelných intervalech v průběhu listopadu a prosince 2005. Vzhledem k velkému objemu dat se odebírala data v kratších obdobích a to samostatně z jednotlivých ústředn. Ústředny byly umístěny v hermetické zóně, kde je velmi omezen vstup, a proto bylo využito každé příležitosti ke kontrole měřícího řetězce, kopii měřených záznamů a vyčištění paměti. Obavy z rychlého zaplnění paměti automatickým ukládáním dat zvýšenou vzorkovací frekvencí z důvodu vibrace potrubí se nakonec nepotvrdily.

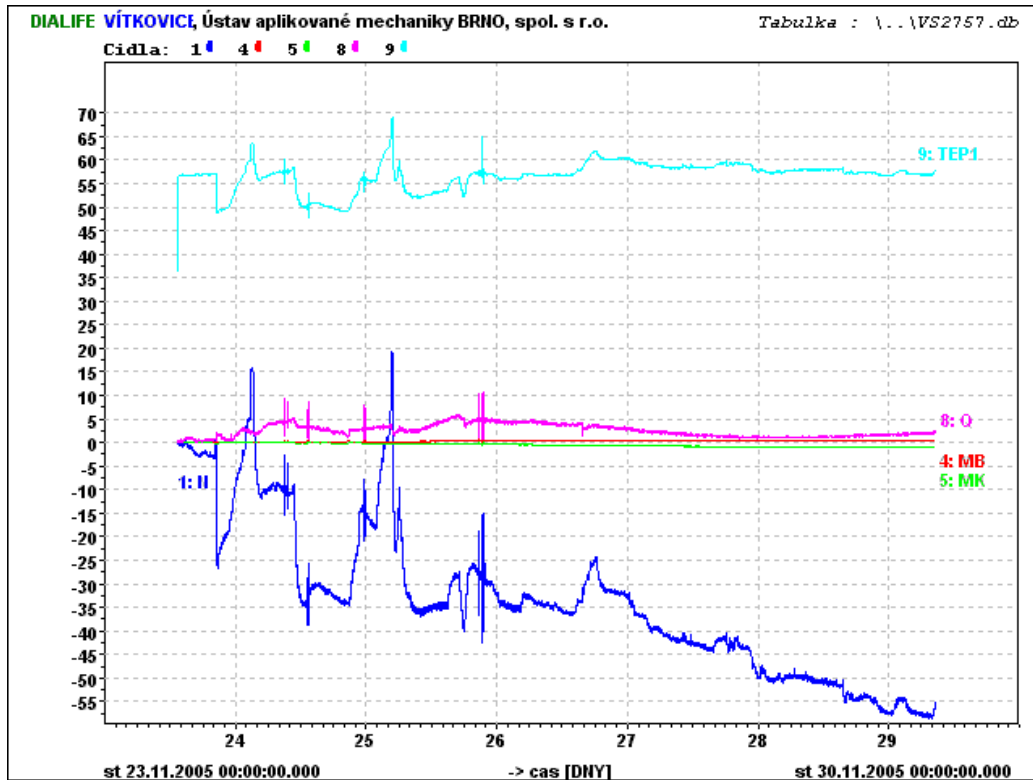
V řezu IN1 od zahájení měření nebyla funkční trojice tenzometrů v poslední 4. růžici. Tato trojice čidel nebyla dále vyhodnocována. Po 29.11.2005 došlo k výpadku ještě jednoho tenzometru i ve 3. růžici (senzor IN1N3_90) ve stejném řezu IN1. Proto u tohoto řezu je po 29.11.2005 použit výpočet sil a momentů jen pomocí trojice tenzometrů v podélných směrech, po jednom z každé růžice.

Likvidace měřeného řetězce byla provedena dne 13.12.2005 v dopoledních hodinách.

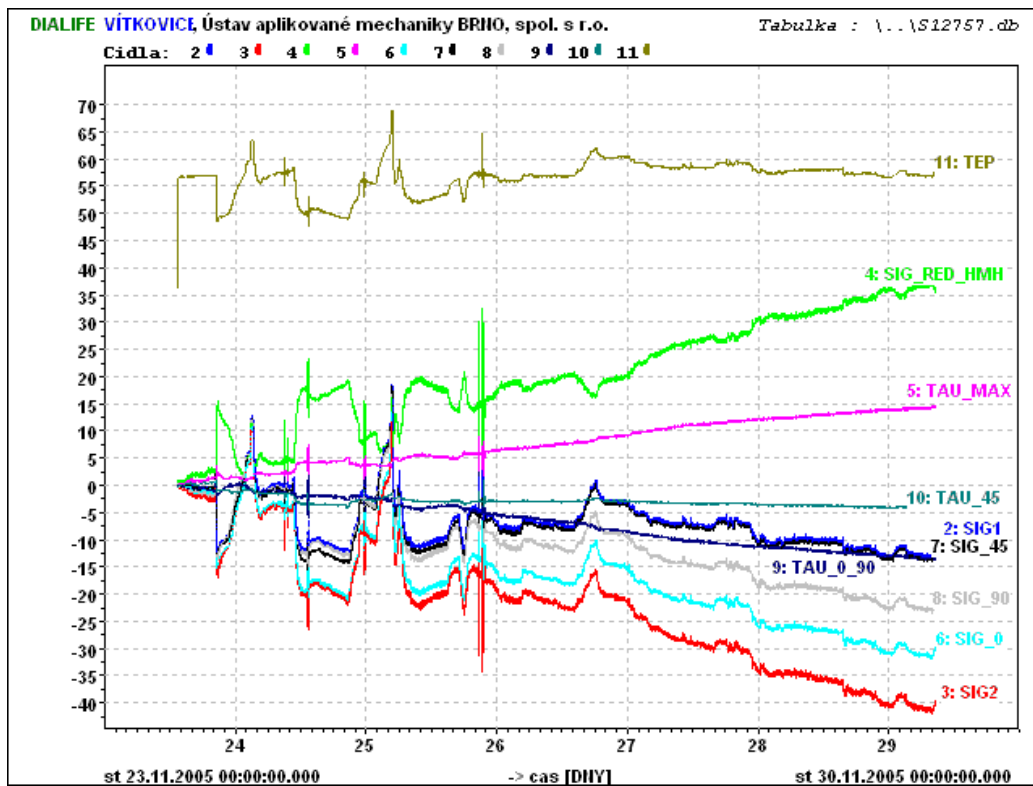
Dne 23.11.2005 se uvedlo ve večerních hodinách HCC41 do provozu. Na Obr.6. se to projevilo relativně náhlým poklesem všech deformací. Změna deformace na všech ostatních řezech se projevila ve stejném okamžiku.



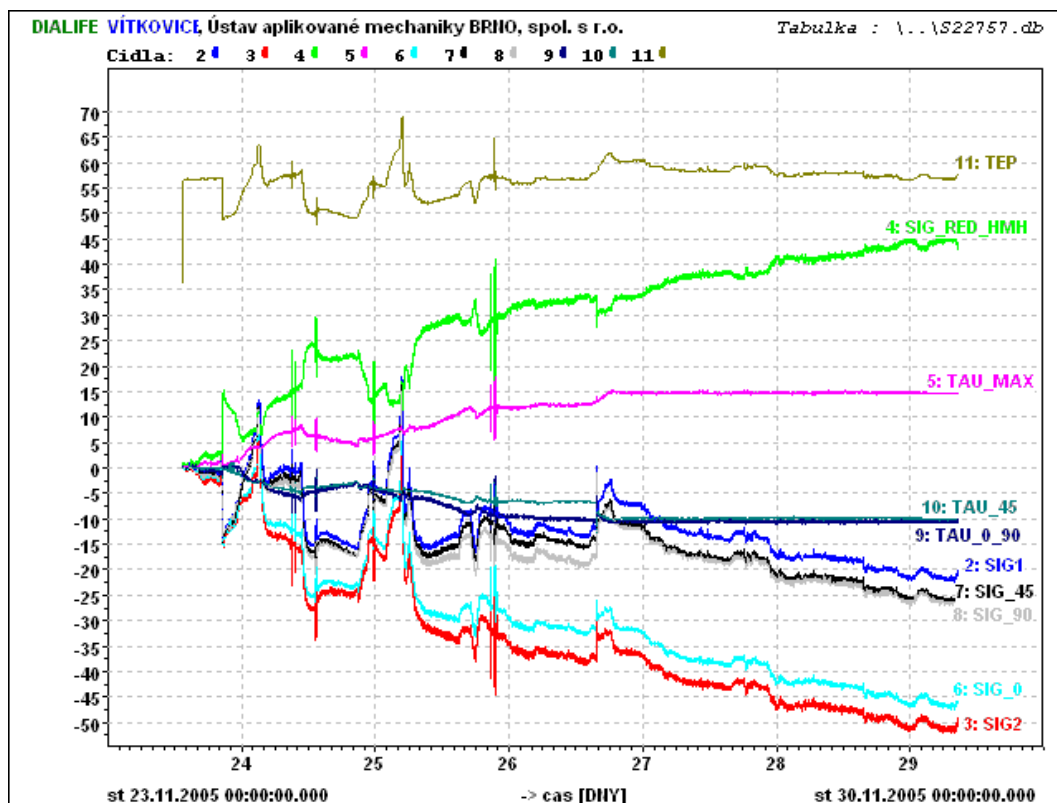
Obr. 6 Průběh korigovaných měřených deformací v 1. až 3. měřící růžici s teplotou na spodní povrchu v řezu IN1



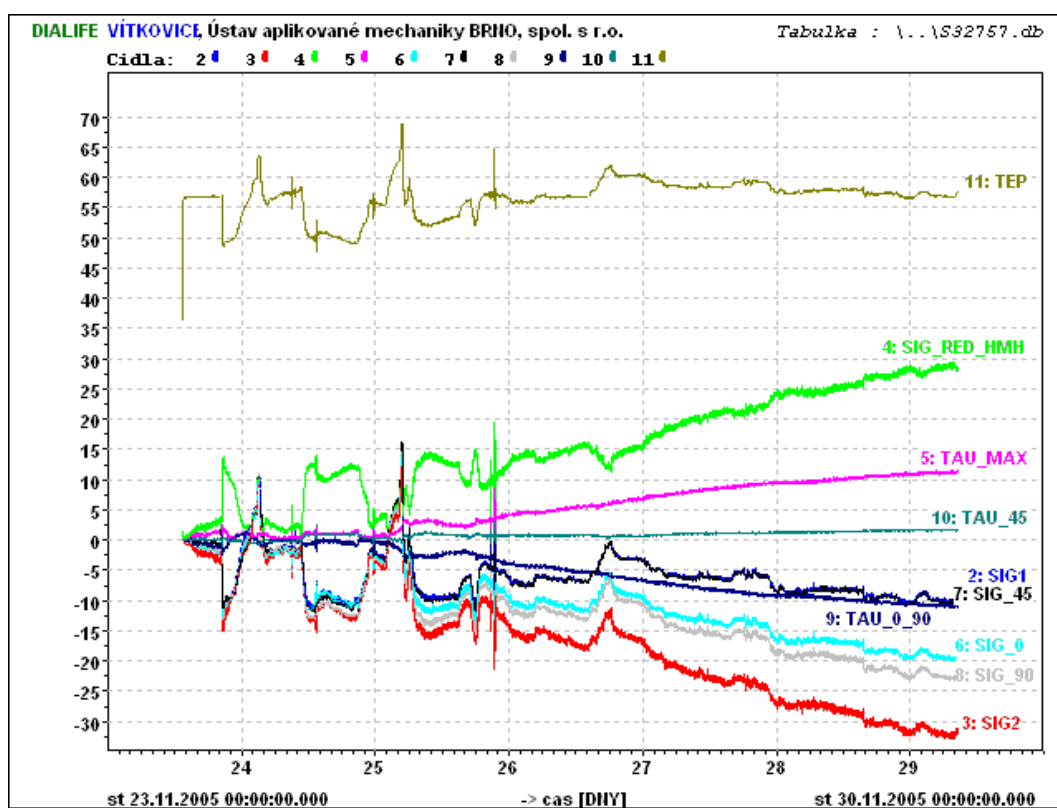
Obr. 7 Průběh vypočtených momentů a sil v řezu IN1 s teplotou TEP1 měřenou v řezu IN2 [$^{\circ}\text{C}$,kN,kNm]



Obr. 8 Průběh vypočtených napětí v místě 1. růžice v řezu IN1 [MPa]



Obr. 8 Průběh vypočtených napětí v místě 2. růžice v řezu IN1 [MPa]



Obr. 9 Průběh vypočtených napětí v místě 3. růžice v řezu IN1 [MPa]

5. Povrchová napětí a vnitřní síly a teplota

Povrchová teplota měřená termočlánkem na vstupním potrubí kolísala během prvních třech dnů v rozsahu 49 až 68°C, v dalším období se ustálila na zhruba 57°C. Povrchová teplota na výstupním potrubí postupně rostla během prvních dnů zhruba od 55 do 67°C kde se ustálila na zhruba 69°C.

Všechna zjištěná povrchová napětí jsou přírůstky. Skutečný stav napjatosti na počátku měření není znám. Stav „nula“ je na počátku měření dne 23.11.2005, Obr.6. Povrchové napětí v řezu IN1 na vnějším obvodu v místech růžic v prvních dnech po spuštění HCC záviselo na teplotě v potrubí a současně se dostávalo do tlaku v rozmezí -20 až -43MPa v osovém směru. Až do konce listopadu docházelo k dalšímu poklesu napětí až na hodnoty -20 až -52MPa. V prosinci se napětí již ustálilo na hodnotách -21 až -54MPa. Osové napětí je dominantní.

Průběh vnitřních sil v řezu IN1 je ukázán na Obr.7. Osová síla N postupně narůstá až na hodnotu -55kN. Posouvající síla Q dosahuje maximální hodnoty kolem +5kN a potom se ustaluje na hodnotě +3kN. Ani v dalším období nepřekračuje osová síla hodnotu -55kN a ustaluje se na -50kN. Kroutící moment Mk se postupně ustálí na hodnotě -1kNm, ohybový moment není příliš významný.

V řezu IN2 se povrchové napětí v místě růžic dostávalo do tlaku v rozmezí -12 až -30MPa v osovém směru. Až do konce listopadu docházelo k dalšímu poklesu napětí až na hodnoty -20 až -40MPa. V prosinci se napětí již ustálilo na hodnotách -22 až -46MPa. Osové napětí je dominantní.

Osová síla N v řezu IN2 postupně narůstá až na hodnotu -35kN. Posouvající síla Q postupně dosahuje maximální hodnoty kolem +4kN a ustaluje se na hodnotě 5kN. V dalším období pokračuje pokles osové síly na hodnotu až -60kN, kde se pak ustaluje na -55kN. Maximální hodnota vlivem poklesu teploty na potrubí během nahřívání dosáhla krátkodobě -65kN.

V řezu OUT1 povrchové napětí nabývalo následujících hodnot. Osové v rozmezí -30 až +7MPa, šikmé 45deg v rozmezí -15 až +15MPa, obvodové v rozmezí -3 až +20MPa. Až do konce listopadu nedochází k výrazným změnám, napětí se zvyšuje následovně: Osové v rozmezí -30 až +9MPa, šikmé 45deg v rozmezí -20 až +20MPa, obvodové v rozmezí -1 až +25MPa. Dominantní je ohybové a smykové napětí.

Osová síla N v řezu OUT1 se postupně mění v rozmezí hodnot -30 až +27kN. Posouvající síla Q postupně dosahuje maximální hodnoty +15kN a ustaluje se na 18kN. V dalším období pokračují změny osové síly mezi hodnotami -3 až -20kN, ustaluje se na -15kN.

Povrchové napětí v řezu OUT2 nabývalo následujících hodnot: osové -15 až +18MPa, šikmé 45deg v rozmezí -20 až +17MPa, obvodové v rozmezí +15 až +25MPa. Až do konce listopadu nedochází k výrazným změnám, napětí se zvyšuje následovně: Osové v rozmezí -20 až +20MPa, šikmé 45deg v rozmezí -23 až +20MPa, obvodové v rozmezí +13 až +30MPa. Dominantní je ohybové a smykové napětí.

Osová síla N v řezu OUT2 se postupně mění v rozmezí hodnot -30 až +34kN. Posouvající síla Q postupně dosahuje maximální hodnoty +15kN a ustaluje se také na 18kN. V dalším období pokračují změny osové síly mezi hodnotami +6 až -10kN, ustaluje se na -5kN.

6. Odhad přírůstku celkové síly působící kolmo na osu HCČ a vyvozených a posuvů

V řezu IN1 dosáhne osová síla maximální hodnoty $N = -55\text{kN}$, která působí kolmo na osu HCČ. V místě napojení větve IN je tedy síla, která „tlačí“ na HCČ přes filtr TF. V řezu IN2 byla zjištěna maximální osová síla $N = -60\text{kN}$, která působí rovnoběžně s osou HCČ. V místě napojení větve IN je tedy síla, která „nadzvedává“ HCČ přes filtr TF. V řezu OUT1 a OUT2 není osová síla příliš významná, protože řezy jsou na úsecích potrubí, jejichž podélné osy nesměřují směrem k HCČ. Byla tam ale vypočtena posouvající síla $Q = +18\text{kN}$, která je v absolutní hodnotě stejná v obou řezech. Součet maximálních přírůstků sil působících kolmo na osu HCČ lze konzervativně určit součtem osově síly v řezu IN1 a posouvající síly v řezech OUT1 nebo OUT2. Předpokládáme-li, že obě síly působí směrem k HCČ (zhruba ve směru dilatace potrubí TF) získáme celkový maximální přírůstek sil F_c

$$F_c = 55 + 18 = 73\text{kN} \quad (1)$$

Tato hodnota je maximální teoretická hodnota. Ve skutečnosti během najíždění a provozu maximální hodnoty vnitřních sil nepůsobí ve stejný okamžik. V tabulce 2 jsou odhadnuté posuvy způsobené jednotkovou silou $F = 50\text{kN}$ působící na konzolu s TF filtrem (kolmo na HCP). Použijeme-li lineárního přepočtu získáme orientační hodnoty posuvů od síly $F_c = 73\text{kN}$:

Tabulka 2

Popis	Výška	$F=50\text{kN}$	$F_c=73\text{kN}$
Střední část konstrukce	1600mm	0.095mm	0.139mm
Konzola s TF filtrem	3200mm	0.320mm	0.467mm
Vrchní část elektromotoru	6300mm	0.720mm	1.051mm

7. Závěr

Bylo realizováno krátkodobé tenzometrické měření na vstupní i výstupní větvi systému TF na HCČ41 během najíždění IV.bloku Jaderné elektrárny Dukovany v období od 23.11.2005 do 13.12.2005. Každá větev byla osazena dvěma měřícími řezy, každý o 12 tenzometrech. Současně byla také měřena povrchová teplota pomocí termočlánků.

Hodnocení měření, výpočet napětí a vnitřních sil bylo provedeno systémem DIALIFE podle metodiky popsané v práci Vejvoda, S. (2000).

Maximální přírůstky osových sil v potrubních úsecích v řezech IN1 a IN2 dosahují hodnot až 60kN , v řezech OUT1 a OUT2 je osová síla zhruba poloviční. Posouvající síly dosahují maximálních hodnot v řezech IN1 a IN2 a pohybují se kolem 5kN a v řezech OUT1 a OUT2 kolem 18kN . Průměrné osově napětí dosahuje maximálních hodnot v řezu IN1 -34MPa a v řezu IN2 -36MPa . V řezech OUT1 je to -10MPa a v řezu OUT2 -6MPa . Celkové ohybové napětí dosahuje maximálních hodnot v řezu IN1 $+8\text{MPa}$ a v řezu IN2 $+13\text{MPa}$. V řezech OUT1 je to $+24\text{MPa}$ a v řezu OUT2 $+23\text{MPa}$.

Nejvyšších povrchových napětí v místech měřících růžic bylo dosaženo v řezu IN1 45MPa redukovaného napětí podle HMM, přičemž maximální hlavní napětí dosahuje hodnot -52MPa a maximální smykové napětí $+15\text{MPa}$, v řezu IN2 50MPa redukovaného napětí podle HMM, přičemž maximální hlavní napětí dosahuje hodnot -55MPa . a maximální smykové napětí

+8MPa, v řezu OUT1 59MPa redukovaného napětí podle HMH, přičemž maximální hlavní napětí dosahuje hodnot -40MPa a maximální smykové napětí +32MPa, v řezu OUT2 68MPa redukovaného napětí podle HMH, přičemž maximální hlavní napětí dosahuje hodnot +50MPa a maximální smykové napětí +38MPa.

Dominantní zatížení vstupní potrubní větve v úsecích s měřicími řezy IN1 a IN2 je osový tlak, v měřicích řezech OUT1 a OUT2 je to kroucení, ohyb a posouvající síla. Odhadnutý maximální přírůstek celkové síly působící na HCC v místě TF filtru může vychýlit svislou osu HCC až o 1mm v místě horní části motoru. Vzhledem k mohutnosti konstrukce a vůlích v uložení rotačních částí není na první pohled zjištěné zatížení příliš významné. Přesto se provozovatel pravděpodobně rozhodne umístit do potrubních tras systému TF kompenzátory. Předpokládá se využití současné instrumentace k dalšímu měření po umístění kompenzátorů.

8. Literatura

- Vejvoda, S. (2000) *Background for TEPO software*. Internal report N° 2969/00. Institute of Applied Mechanics Brno, Ltd.
- Vincour, D. (2002) *Residual life assessment of chosen main components parts on the nuclear power plant unit VVER 440 MW. Measuring on the hot primary connection bolts N° 10 and 20 evaluations*. Internal report N°. 3346/02. Institute of Applied Mechanics Brno, Ltd.