

ANALYSIS OF SEISMIC RESISTANCE OF NUCLEAR REACTORS WWER 440/V230 INTERNALS

P. Markov*

Summary: *A re-analysis of the 1st to 4th reactor units' internal parts at nuclear power plant Kozloduy, Bulgaria, was carried out at ŠKODA JS a.s. in 2003. The reactors are of WWER 440 type, model V213. The scope of the analysis was to verify their strength and remaining life in the light of the current standards. Dynamical calculations for emergency working conditions were part of this analysis. Namely the seismic calculations and the analysis of accidental rupture in the primary circuit pipeline were the points in question.*

This contribution presents the calculations of the internals resistance to excitation given by response spectra for the safe shutdown earthquake (SSE). Calculation models are described and the essential results are published including their assessment according to the appropriate standards.

1. Úvod

V roce 2003 byl proveden ve ŠKODA JS a.s. přepoččet vnitřních částí reaktorů 1. až 4. bloku jaderné elektrárny Kozloduj v Bulharsku. Jedná se o reaktory VVER 440 typ V230. Cílem výpočtů bylo ověření pevnosti a stanovení projektové a zbytkové životnosti v souladu se současnými normami. Součástí těchto výpočtů byly i dynamické výpočty pro havarijní provozní podmínky. Jednalo se o seizmické výpočty a výpočty při havarijním roztržení potrubí primárního okruhu.

Vnitřní části reaktorů mají následující hlavní komponenty - nosný válec (NV), dno nosného válce (DNV), koš aktivní zóny (KAZ) a blok ochranných trub (BOT). Dále byl zadavatelem požadován výpočet vložené tyče. Vložená tyč (VT) je nejvíce namáhanou částí pohonu regulačního mechanismu reaktoru (HRK – havarijní, regulační a kompenzační).

Pro jednotlivé komponenty vnitřních částí jsme počítali pevnostní analýzu pro stanovené provozní režimy reaktorů a na základě jejich výsledků jsme stanovili projektovou životnost a maximální únavové poškození jednotlivých reaktorů do konce roku 2001. Další požadované výpočty byly výpočty odezvy na buzení při havárii se ztrátou chladiva prasknutím potrubí primárního okruhu o průměru 100, 200 a 500 mm, seizmické výpočty, výpočty vibrační pevnosti a výpočty narůstajících trvalých deformací.

Všechny výpočty a vyhodnocení jejich výsledků bylo provedeno v souladu s normami PNAE (viz Literatura).

* Ing. Petr Markov, CSc.: ŠKODA JS a.s.; Orlický 266; 316 06 Plzeň; tel.: +420.378 042 826, fax: +420.378 042 407; e-mail: petr.markov@skoda.cz

V tomto příspěvku se budeme zabývat seizmickými výpočty vnitřních částí uvedených jaderných reaktorů. Výpočty jsou platné pro bloky č. 1 až 4 JE Kozloduj. Blok č. 4 není na rozdíl od bloků č. 1 až 3 opatřen tzv. stínícími kazetami. Tento rozdíl byl ve výpočtových modelech respektován, bylo však zjištěno, že nemá žádný vliv na dynamické vlastnosti počítaných vnitřních částí, a tedy ani na výsledky výpočtů odezvy na seizmické buzení. Proto jsou uvedeny výsledky získané pro všechny čtyři bloky s užitím shodných výpočtových modelů, které jsou platné pro oba typy reaktorů.

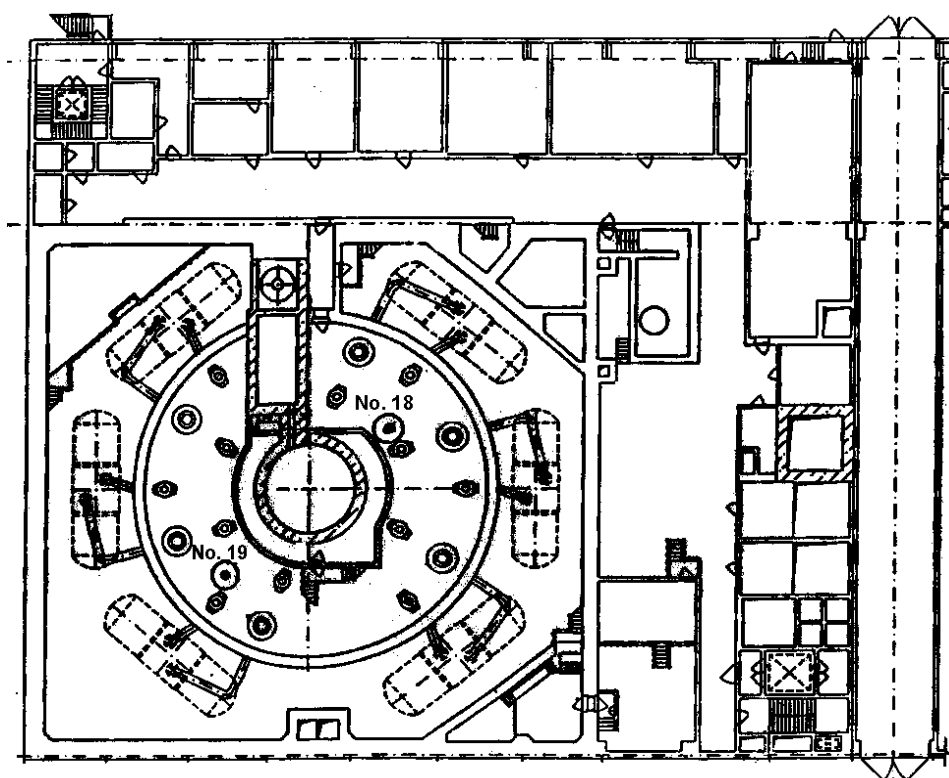
2. Zadané seizmické zatížení

Seizmické charakteristiky stavební plochy atomové elektrárny Kozloduj, definované jako Review Level Earthquake (RLE) nám byly zadány ve zprávě „Initial data ...“ (1993). Jsou v ní nazvány „konstrukční charakteristiky“ a představují spektra odezvy pro zrychlení zemského povrchu a generované časové průběhy (tři složky) i maximální horizontální a vertikální zrychlení pro úroveň Operating Basis Earthquake (OBE) a Safe Shutdown Earthquake (SSE).

Z hodnot uvedených ve „Specifikaci ...“ (2001) pro lokalitu Kozlodujské elektrárny vyplývá, že hodnoty zrychlení jsou zde při SSE dvojnásobné, než při OBE.

V této specifikaci je též definováno seizmické zatížení způsobené lokálními zdroji v okruhu do 30 km od elektrárny (LE - Local Earthquake). Maxima zrychlení pro LE dosahují v horizontálním směru hodnoty 0,8 hodnoty maxima zrychlení při SSE, ale ve vertikálním směru dosahují 1,3 násobku hodnoty zrychlení při SSE.

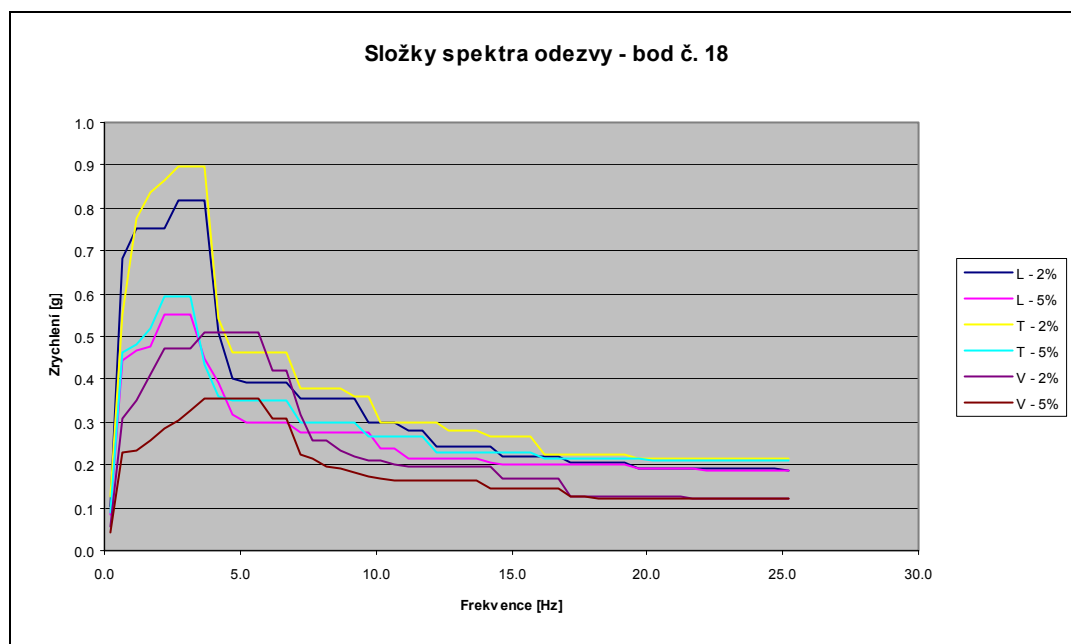
Všechna tato zatížení byla vzata v úvahu při konstrukci podlahových spekter odezvy pro SSE a pro LE. Z porovnání vyplynulo, že větší vliv na konstrukci reaktoru má buzení SSE.



Obrázek 1. Místa zadaných spekter odezvy na podlaží +2,7 m (body č. 18 a 19)

Zadavatelem byla stanovena rozšířená obalová spektra odezvy pro SSE v bodech č. 18 a 19 na podlaží reaktorového sálu na kótě +2,7 m. Tyto body leží v těsné blízkosti upevnění tlakové nádoby k betonovému základu (viz obrázek 1). Porovnáním obou spekter jsme zjistili, že v bodu č. 18 byly zjištěny poněkud vyšší hodnoty prakticky v celém rozsahu frekvencí. Proto jsme dále použili spektra tohoto bodu.

Zadaná spektra odezvy pro maximální výpočtové zemětřesení SSE v bodu č. 18 jsou pro tlumení 2% a 5% vykreslena na obrázku č.2. Složky L a T působí ve vodorovném směru, složka V působí ve svislém směru. Pro vnitřní části je předepsán útlum 5%, pro potrubí 2%.



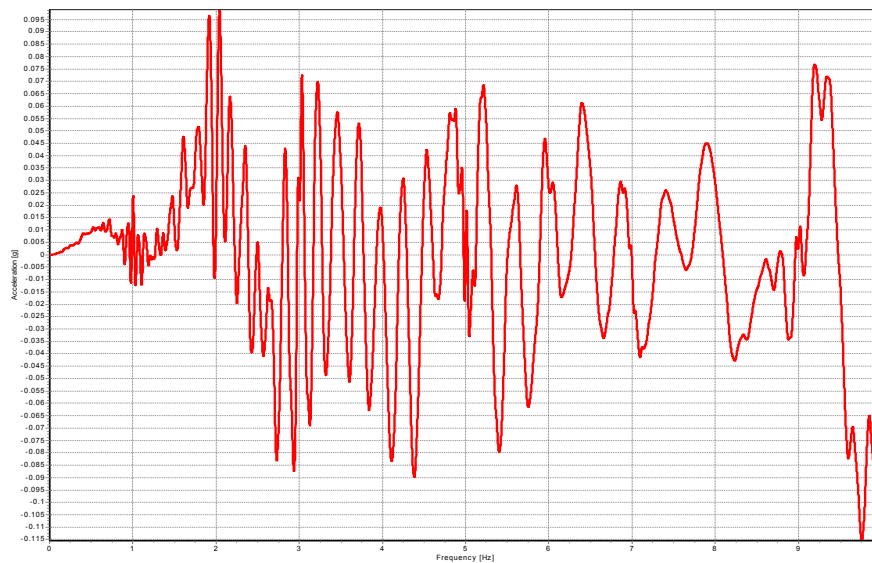
Obrázek 2. Zadaná spektra odezvy pro maximální výpočtové zemětřesení SSE v bodu č. 18

3. Metodika výpočtu

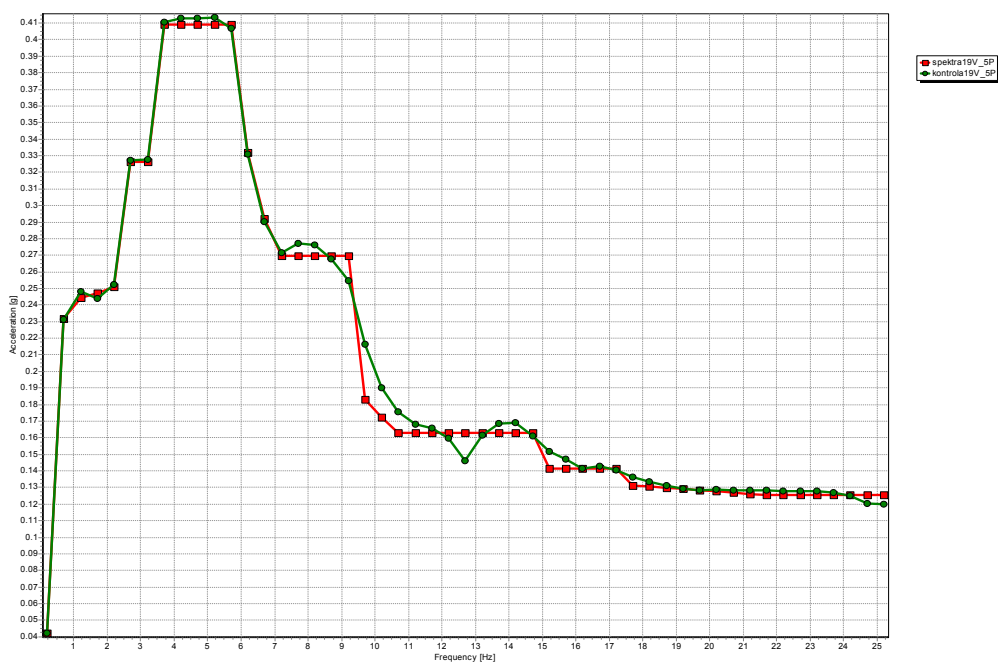
Popsané buzení působí na reaktory v místech jejich upevnění na příslušná podlaží budovy. Pro převod těchto spekter odezvy jsme ve spolupráci s pracovníky Katedry mechaniky (KME) Západočeské univerzity (ZČU) navrhli použití zjednodušeného výpočtového modelu primárního okruhu reaktoru VVER 440, typ V230 JE Kozloduj. Výpočtový model vytvořený na ZČU byl zatížen časovými průběhy zrychlení, které byly odvozeny ze zadaných složek spekter odezvy. Příklad časového průběhu odvozeného ze spektra pro složku V bodu č. 18 je uveden na obrázku č. 3.

Protože převod ze spektra na časový průběh není jednoznačný, bylo provedeno srovnání zadaných obalových spekter se spektry vygenerovaných časových průběhů – pro složku V bodu č.18 je toto porovnání vykresleno na obrázku č. 4. Je zřejmé, že náš převod byl velmi přesný.

Na zjednodušeném modelu celého primárního okruhu jaderných reaktorů VVER 440/V230 byly provedeny výpočty odezvy na buzení časovými průběhy působícími v místech upevnění primárního okruhu na jednotlivá podlaží reaktorové budovy. Výsledkem jsou časové průběhy výchylek, rychlostí a zrychlení v místech upevnění vnitřních částí reaktorů a pohonů HRK.



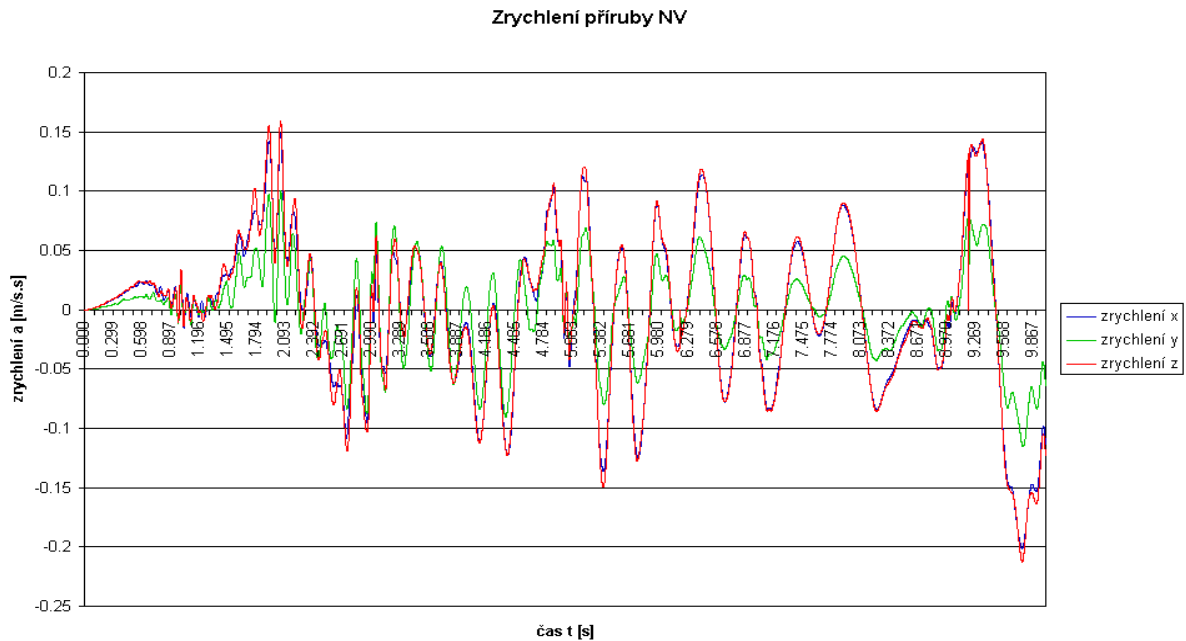
Obrázek 3. Časový průběh vygenerovaný ze spektra odezvy pro komponentu V bodu č. 18



Obrázek 4. Porovnání spekter odezvy: zadané červeně, vypočtené zeleně

Vnitřní části jsou upevněny k tlakové nádobě (TN) reaktorů v místech společné příruby TN a nosného válce – bod B v obrázku č. 7, v místě rozdělení proudů – bod U a v místě tangenciálních per – bod O. Ukázka vypočtených časových průběhů zrychlení příruby TN a NV je uvedena na obrázku č. 5.

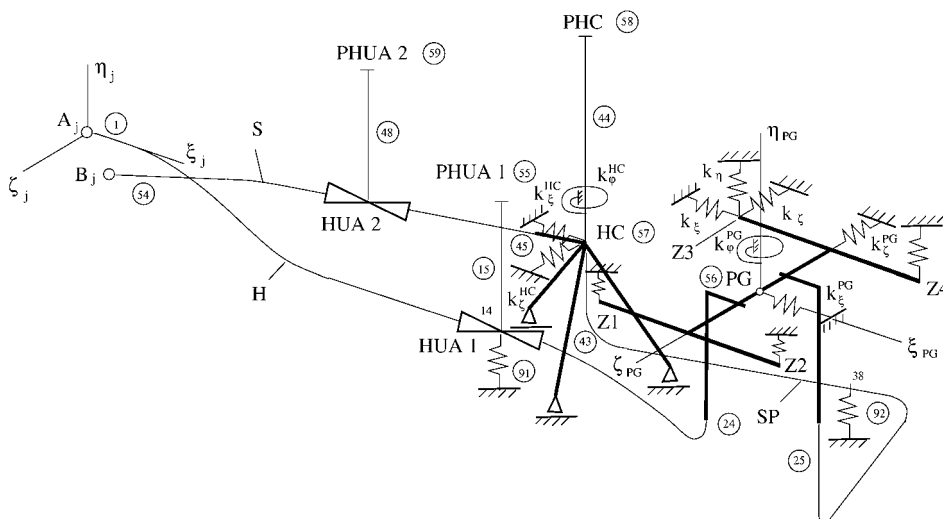
Pohony HRK jsou upevněny na víku TN. Proto byly též vypočteny časové průběhy zrychlení víka TN – bod VTN na obrázku č. 7. Ty byly dále použity pro výpočet seizmické odolnosti vložené tyče.



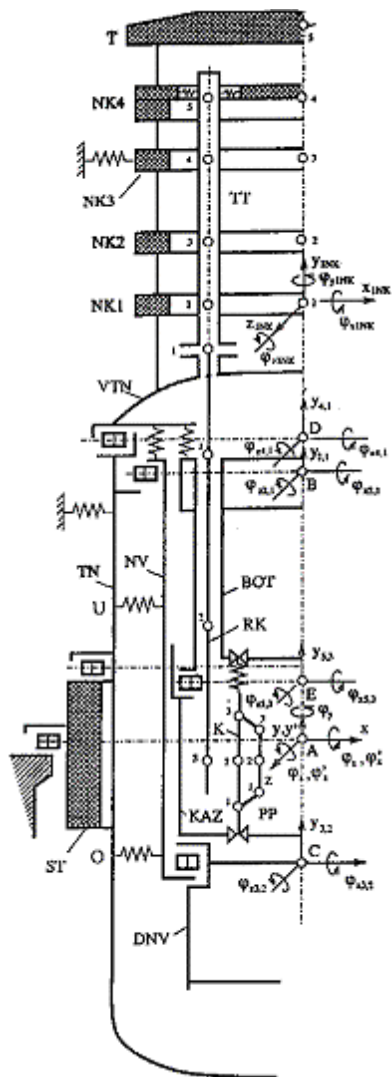
Obrázek 5. Časové průběhy zrychlení příruby NV a TN (bod B v obrázku č. 7, směr x odpovídá směru L, y odpovídá V a z odpovídá T)

4. Výpočtové modely

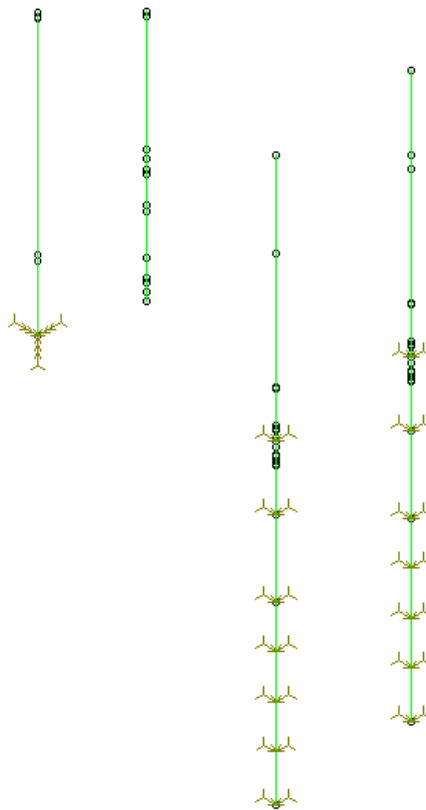
V první fázi výpočtů, ve které byla stanovena seizmická zatížení vnitřních částí a pohonů HRK byl použit zjednodušený výpočtový model primárního okruhu reaktoru VVER 440, typ V230 JE Kozloduj vytvořený pracovníky KME ZČU v Plzni. Ten se skládá z modelu samotného reaktoru a ze šesti připojených smyček primárního okruhu. Model jedné z připojených smyček je vykreslen na obrázku č. 6. Model reaktoru bloků č. 1 až 3 je vykreslen na obrázku č. 7.



Obrázek 6. Výpočtový model smyčky primárního okruhu

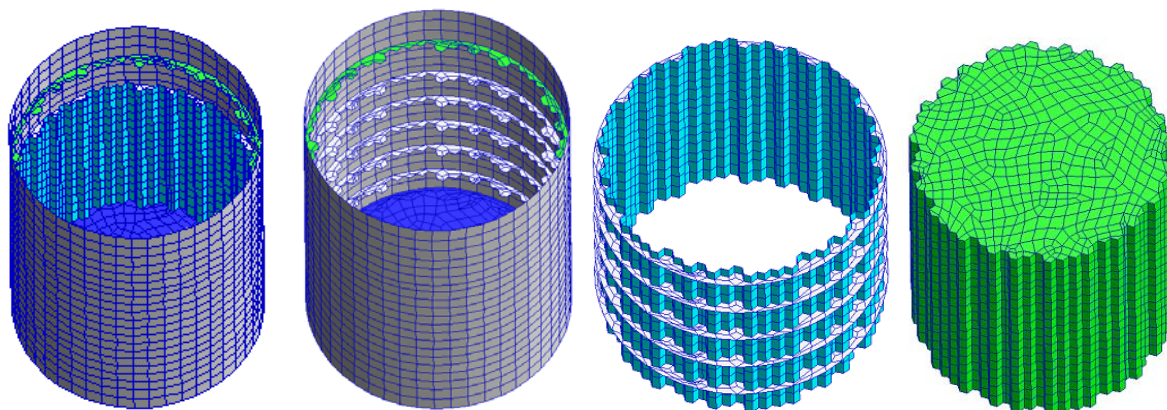


Obrázek 7. Výpočtový model reaktoru



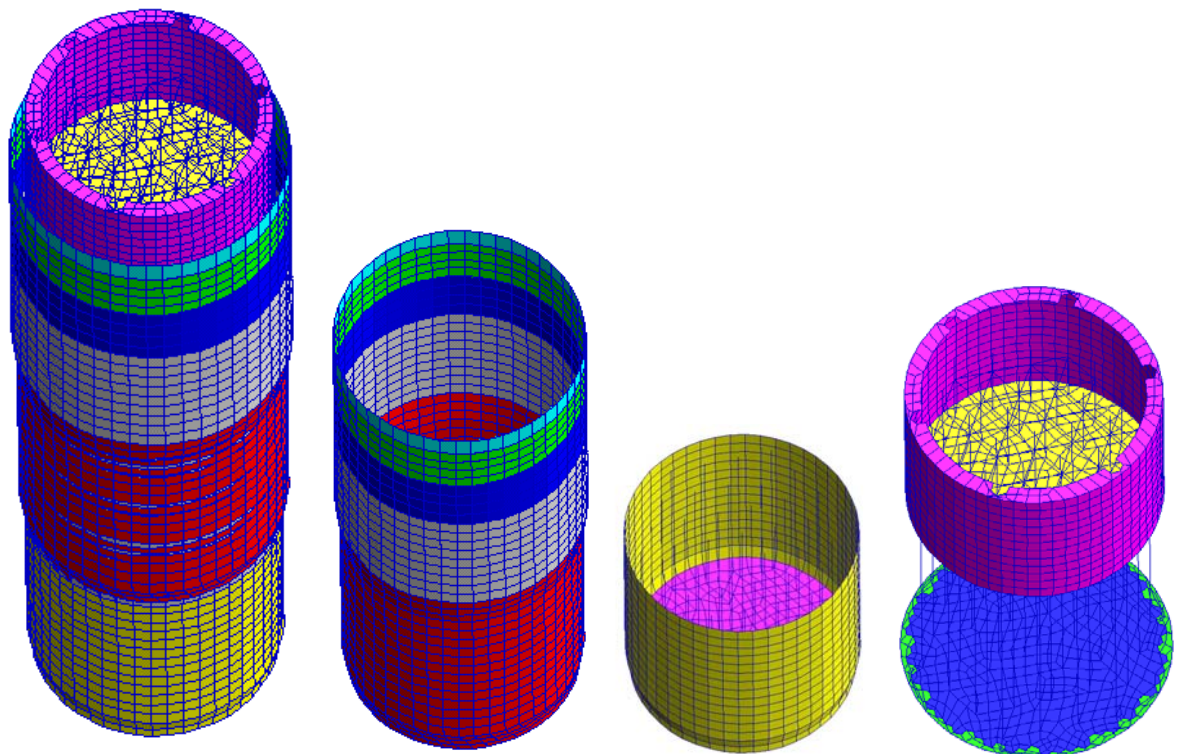
a) b) c) d)

Obrázek 8. Výpočtové modely pohonu HRK



a) celý model pláště b) vnější plášť c) hraněný plech d) model vnitřku AZ

Obrázek 9. Výpočtový model koše aktivní zóny reaktoru VVER 440 V230



a) celý model b) nosný válec c) dno nosného válce d) blok ochranných trub

Obrázek 10. Výpočtový model vnitřních částí reaktoru VVER 440 V230

Ve druhé fázi výpočtů, byla stanovená zatížení aplikována na výpočtové modely vnitřních částí reaktorů (obrázek 9 a 10) a na výpočtové modely pohonu HRK (obrázek 8).

Pro pohon HRK byly vytvořeny dva výpočtové modely. Prvý pro kazetu HRK v dolní poloze a druhý v horní poloze. Písmenem a) a b) jsou označeny společné pevné části. Další část, která představuje svisle se pohybující díl, je v obou polohách vykreslena jako c) a d).

Výpočtový model vnitřních částí je převážně vytvořen ze skořepinových a nosíkových elementů.

Na obrázku 9 d) je vykreslen výpočtový model aktivní zóny (AZ). Byl vytvořen tak, aby co nejdříveji simuloval vliv palivových a stínících kazet na ostatní vnitřní části výpočtového modelu. Trojrozměrné prvky vyplňující vnitřní prostor AZ mají jednu hranu ve směru globální osy y. Jejich materiálové vlastnosti byly stanoveny tak, aby dynamické chování tohoto výpočtového modelu bylo co nejbližší dynamickému chování palivových a stínících kazet.

5. Materiálové vlastnosti a okrajové podmínky

Všechny vnitřní části reaktorů VVER 440 model V 230 jsou vyrobeny ze stabilizované austenitické nerez oceli 0X18H10T. Výjimkou je vložená tyč a nosný válec, jejichž hlavní komponenty jsou vyrobeny z austenitické oceli 08X18H10T a martenzitické oceli 14X17H2. Materiálové vlastnosti pro tyto oceli v závislosti na teplotě jsme použili z databáze ŠKODA JS a.s.

NV je upevněn horním okrajem pomocí segmentového anuloidového prstence mezi tlakovou nádobou a její víko. Toto spojení s tlakovou nádobou je uvažováno jako poddajné.

Další spojení NV s TN je v místě uzlu rozdělení proudu, které odděluje vstupující chladicí kapalinu od ohřáté kapaliny vystupující. Těsnění tohoto uzlu je dimenzováno tak, aby vlivem teplotních dilatací TN a NV za provozní teploty bezpečně dosedlo. Jeho působení uvažujeme jako poddajné v radiálním a tangenciálním směru a volné ve vertikálním směru.

Poslední spojení NV s TN je v dolní části NV, kde je po obvodu osm tangenciálních per, která zabraňují rotačnímu pohybu NV vůči TN. I v tomto místě uvažujeme poddajné spojení v radiálním a tangenciálním směru a volné ve vertikálním směru.

BOT je stlačován předepjatými pružinami (pružinové bloky) ve směru y vůči přírubě NV.

Tuhosti, které jsou v uvedených místech zadány, byly získány na základě výpočtů a zkušeností pracovníků Katedry mechaniky ZČU, ÚJV Řež a ŠKODA JS a. s.

Pouzdro HRK je upevněno ve své dolní přírubě k nátrubkům víka tlakové nádoby. Další opory jsou ve vodorovném směru (x a z) v sedmi uzlech, ve kterých jsou vložena tyč a kazeta HRK vedeny (obrázek 8).

6. Výsledky a vyhodnocení

Nejprve jsme provedli frekvenčně modální analýzu všech výpočtových modelů. Nalezené vlastní tvary a jim odpovídající vlastní frekvence výpočtového modelu vnitřních částí jsme porovnali s vlastními tvary a frekvencemi zjištěnými na zjednodušeném modelu celého reaktoru i s chladicími smyčkami. Z tohoto porovnání vyplývá velmi dobrá shoda mezi oběma výpočtovými modely.

U modelů pohonu HRK jsme porovnali nalezené vlastní frekvence s dřívějšími pracemi provedenými v rámci projektové dokumentace a v práci Pečinka (1978). I zde jsme obdrželi dobrou shodu porovnatelných výsledků.

Odezva na zadané seizmické buzení (SSE) byla spočtena metodou modální analýzy. Výsledné výchylky vnitřních částí reaktorů [mm] jsou uvedeny na obrázku č. 11. Výsledná napětí [MPa] jsou na obrázcích č. 12 a 13.

Deformace i napětí jsou velmi malá. Vstupní spektra odezvy mají velmi nízké hodnoty zrychlení (pro útlum 5 % jsou nejvyšší hodnoty zrychlení ve spektrech odezvy menší než 0,6 g). Reaktory jsou z dynamického hlediska správně uloženy na podlaží, které je blízko zemskému povrchu (+2,7 m). Tuhá konstrukce tlakové nádoby jen velice málo tato spektra zesiluje, takže nejvyšší hodnoty zrychlení ve spektrech odezvy jsou menší než 0,65 g. Vnitřní části nemají vlastní frekvence v rozsahu do 10,0 Hz, ve kterém mají spektra odezvy nejvyšší hodnoty zrychlení. Proto zadaná spektra vyvolávají ve vnitřních částech malou odezvu.

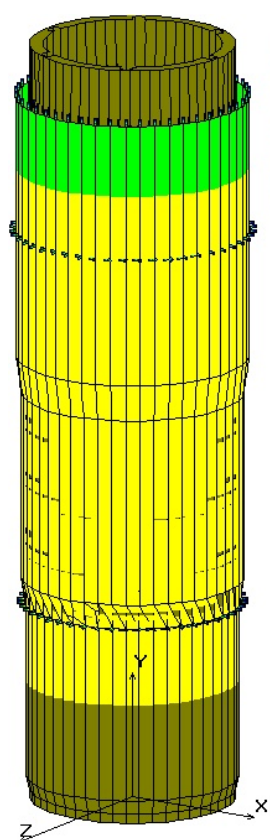
Maximální deformace 0,15 mm jsou v oblasti aktivní zóny. Maximální napětí v uzlech výpočtového modelu je 0,84 MPa a je na nosném válci v místě upevnění dna nosného válce. Dno nese všechny ostatní vnitřní části, a proto se v tomto místě přenáší největší svislé zatížení na nosný válec. Současně je blízko tohoto místa nosný válec tangenciálně upevněn k tlakové nádobě. Nejvyšší výsledné napětí v nosnících DNV a BOT je 1,32 MPa.

Výsledné výchylky pohonu HRK [m] jsou vyobrazeny na obrázku č. 14. Výsledná napětí [Pa] jsou na obrázku č. 15. Jedná se o model s kazetou v horní poloze, kdy má seizmicky nezodolněný pohon větší odezvu na seizmické buzení.

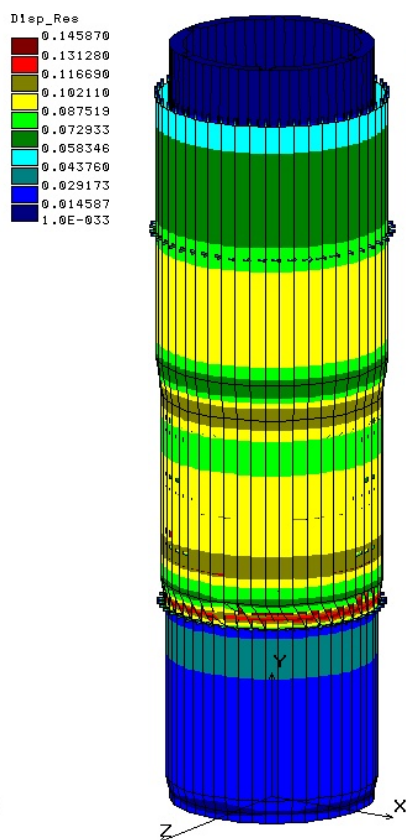
Deformace v horní poloze jsou při zadaném seizmickém buzení až 0,3 m. Nejvyšší hodnota napětí ve vložené tyči je v přechodovém dílu a je rovna 48,0 MPa.

Vyhodnocení nalezených napětí bylo provedeno podle norem PNAE uvedených v literatuře. Podle těchto norem se pro samotná seizmická zatížení hodnotí dvě kategorie. První - $(\sigma_s)_1$ - kontroluje součet největšího napětí při normálních provozních podmínkách

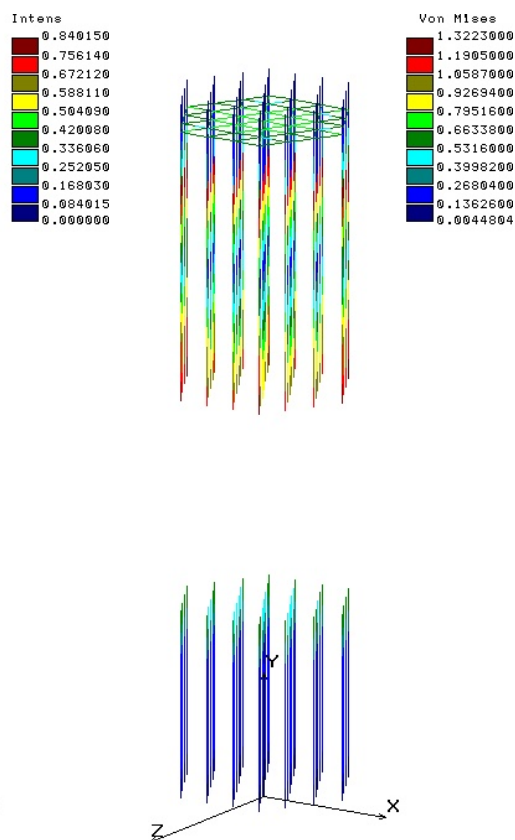
(NPP) a největšího napětí vyvolaného seizmickým zatížením (SSE) pro membránové napětí. Druhá - $(\sigma_s)_2$ – kontroluje NPP + SSE pro membránové a ohybové napětí. Vypočtené hodnoty se porovnávají s limitními hodnotami pro tyto kategorie.



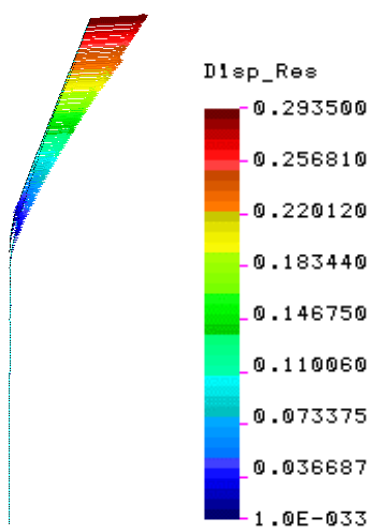
Obrázek 11. Deformace



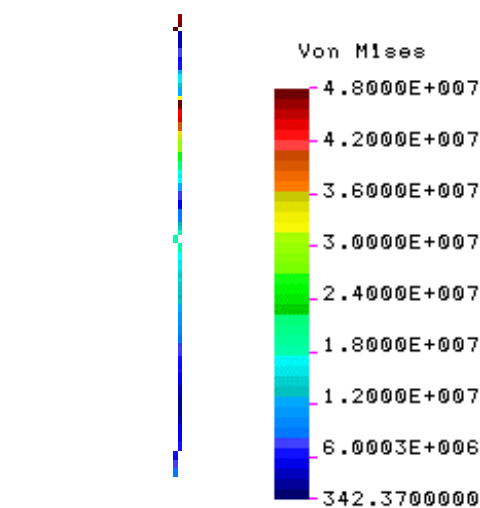
Obrázek 12. Napjatost skořepin



Obrázek 13. Napjatost nosníků



Obrázek 14. Deformace pohonu HRK



Obrázek 15. Napjatost pohonu HRK

Pro limitní hodnoty těchto kategorií platí $(\sigma_s)_1 = 1,4 [\sigma]$, $(\sigma_s)_2 = 1,8 [\sigma]$, kde $[\sigma]$ je dovolené napětí pro ocel, ze které je počítaná část vyrobena. Jmenovité dovolené napětí se pro části

jaderného zařízení určuje podle vztahu (PNAE): $[\sigma] = \min\{R_m^T / n_m; R_{p0,2}^T / n_{0,2}\}$, kde R_m^T je minimální hodnota meze pevnosti při výpočtové teplotě, $R_{p0,2}^T$ je minimální hodnota meze kluzu při výpočtové teplotě, $n_m = 2,6$ je součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti, $n_{0,2} = 1,5$ je součinitel bezpečnosti k mezi kluzu.

7. Závěr

Pro každou z počítaných vnitřních částí bylo provedeno přiřazení nalezených napětí příslušným kategoriím a jejich porovnání s příslušnými limitními hodnotami. V tabulce č. 1 jsou uvedeny výsledky pro kategorie $(\sigma_s)_1$ a $(\sigma_s)_2$.

Tabulka 1. Vyhodnocení seizmických výpočtů vnitřních částí reaktorů VVER 440/V230

Část reaktoru	Kategorie	Hodnota	Limit	Hodnocení	Blok
Nosný válec	$(\sigma_s)_1$	18,3	155,8	Vyhovuje	1. - 4.
	$(\sigma_s)_2$	50,3	200,3	Vyhovuje	1. - 4.
Dno nosného válce	$(\sigma_s)_1$	95,9	155,8	Vyhovuje	1. - 4.
	$(\sigma_s)_2$	95,9	200,3	Vyhovuje	1. - 4.
Koš aktivní zóny	$(\sigma_s)_1$	104,6	155,8	Vyhovuje	1. - 4.
	$(\sigma_s)_2$	135,7	200,3	Vyhovuje	1. - 4.
Blok ochranných trub	$(\sigma_s)_1$	47,5	165,2	Vyhovuje	1. - 4.
	$(\sigma_s)_2$	47,5	212,4	Vyhovuje	1. - 4.
Vložená tyč	$(\sigma_s)_1$	51,3	165,2	Vyhovuje	1. - 4.
	$(\sigma_s)_2$	62,5	212,4	Vyhovuje	1. - 4.

Literatura

Initial Data of Seismic Input and Soil Conditions of Kozloduy NPP Site (1993).

Markov P. a kol. (2003) Průkaz pevnosti a životnosti vnitřních částí reaktorů VVER 440, typ V230, bloky 1 až 4 JE Kozloduj, zpráva ŠKODA JS a.s., Plzeň.

Pečínka L. (1978) Dynamický výpočet vložené tyče, zpráva ŠKODA JS a.s., Plzeň.

PNAE G-7-002-86 (1989) Normy výpočtu na pevnost zařízení a potrubí atomových energetických zařízení, Energoatomizdat, Moskva.

PNAE G-7-008-89 (1990) Pravidla výstavby a bezpečného provozování zařízení a potrubí atomových energetických zařízení, Energoatomizdat, Moskva.

Specification Sp. HF-13/2001 of requirements for seismic resistance of equipment (2001) NPP Kozloduy report.

Vložená tyč, výpočet pevnosti, projektová dokumentace VVER 440.

Zeman V a kol. (2003) Modelování primárního okruhu reaktoru VVER 440, typ V 230 a výpočet seizmického buzení vnitřních částí, ZČU Plzeň.