

# RESEARCH REACTOR IRT-2000 IN SOFIA RECONSTRUCTION DESIGN AND SEISMIC COMPUTATION

# P. Markov\*, V. Valenta\*\*

**Summary:** The presented paper deals with the research reactor IRT-2000 that entered service in 1961 at the Bulgarian Academy of Sciences in Sofia. The reactor is shut down presently and works on its reconstruction have been launched. The text describes the history and design of the original reactor and a new structural design and its merits. Strength and seismic analysis, which are key subject matter of this contribution, have been executed in the frame of the reconstruction.

### 1. Úvod

V roce 2002 vyhlásila Bulharská akademie věd (BAV) veřejnou soutěž na zpracování projektu "Rekonstrukce výzkumného reaktoru IRT-2000 v Sofii". S cílem získat tuto zakázku založila společnost ŠKODA JS a.s. konsorcium s bulharskou projekční organizací AEP (AtomEnergoProjekt) Sofia pod názvem INTERATOM. V roce 2003 pak byla podepsána mezi BAV a konsorciem INTERATOM smlouva na zpracování tohoto projektu.

V roce 2004 pak firma ŠKODA JS a. s. zvítězila i v tendru na dodávku zařízení reaktoru (bazén reaktoru a veškeré vnitřní a související zařízení) a bazénu vyhořelého paliva.

V příspěvku je stručně popsána historie a konstrukce původního reaktoru. Následuje popis nového konstrukčního řešení dle projektu Škoda JS Plzeň s uvedením předností oproti stávajícímu řešení a popis provedených pevnostních a seizmických výpočtů.

Byly provedeny tři samostatné výpočty. Prvý je **pevnostní a seizmický výpočet** reaktoru IRT-2000 ŠKODA. Jeho cílem bylo ověřit seizmickou odolnost zařízení při výpočtovém zemětřesení (SSE). Zvláštní důraz byl kladen na zajištění těsnosti horizontálních kanálů, jejichž porušením by mohlo dojít k proniknutí kontaminované kapaliny vně reaktoru. V druhém výpočtu byla stanovena **statická únosnost** rámu umístěného na komoře chlazení. Byl proveden výpočet stability rámu s komorou chlazení, pevnostní výpočet při normálních provozních podmínkách (NPP) a seizmický výpočet výpočtového modelu s rámem a kontejnerem, který bude na tento rám ukládán. Třetí výpočet **ověřil pevnost membrány DN-150** s ohledem na její konstrukční tloušťku. Prvé dva výpočty jsou předmětem tohoto příspěvku.

Výpočty byly provedeny programem COSMOS/M s využitím výpočtového modelu odvozeného z CAD modelu vytvořeného v programovém prostředí IDEAS. Membrána byla optimalizována programem IDEAS a pevnostně ověřena programem COSMOS/M.

<sup>\*</sup> Ing. Petr Markov, CSc., Finite element analysis comp., Plzeň; tel.: +420 737 620 009; e-mail: petr.markov@seznam.cz

<sup>\*\*</sup> Ing. Václav Valenta, ŠKODA JS a.s. Plzeň, tel.: +420 378 042 525, fax: +420 378 042 407; e-mail: vaclav.valenta1@skoda-js.cz

# 2. Historie provozu reaktoru

Výzkumný reaktor IRT-2000 v Sofii byl uveden do provozu 9.11.1961 a byl postaven dle projektu Kurčatovského institutu v Moskvě. Reaktor pracoval nejprve na výkonu 500 kW a postupně byl jeho výkon zvýšen na 2 000 kW. Po 28 letech provozu byl reaktor 13.7.1989 z rozhodnutí Bulharské Atomové Agentury odstaven z provozu. Důvodem odstavení byl fakt, že v té době již morálně zcela zastaralé zařízení nemohlo splnit zvyšující se nároky na jadernou a radiační bezpečnost provozu.

Téměř 10 let po odstavení reaktoru přijala vláda Bulharské republiky rozhodnutí o jeho rekonstrukci a znovuuvedení do provozu, avšak se snížením maximálního tepelného výkonu na 200 kW.

# 3. Stručný popis původního reaktoru

Jednalo se o klasický reaktor bazénového typu, kde voda plní funkci chladiva, moderátoru i biologického stínění. Chlazen byl nucenou cirkulací vody, kterou zabezpečovala tři paralelně pracující čerpadla primárního cirkulačního okruhu. Teplo pak bylo přes tepelný výměník prostřednictvím sekundárního okruhu odváděno do dvou rozprašovacích chladících nádrží mimo budovu reaktoru. Zvláštností primárního cirkulačního okruhu bylo použití ejektoru za účelem zvýšení průtočného množství vody přes aktivní zónu reaktoru.



Obr. 1: Schéma původního reaktoru IRT-2000

Chladící voda byla přiváděna pod aktivní zónu reaktoru a nucená cirkulace tak probíhala směrem zezdola nahoru.

Nádoba bazénu reaktoru měla tvar oválu a byla vytvořena v ocelobetonovém monolitu. Její stěny byly obloženy hliníkovou slitinou (plechy o tloušťce 6 a 10 mm). Překrytí bazénu reaktoru bylo tvořeno snímatelným krytem z organického skla uloženým na konstrukci zábradlí. Část překrytí nad aktivní zónou byla tvořena pevnou ocelovou podlahou.

Jako palivo byly v reaktoru použity kazety typu EK-10 s palivem ve formě proutků. Koš aktivní zóny měl 48 buněk

(6 x 8) pro uložení palivových kazet, beryliových bloků nebo vytěsnitelů. Vytěsnitel má vnější rozměry a tvar shodný s palivovou kazetou a je vyroben z Al slitiny. V podstatě je to dutý kvádr rozdělený po výšce na tři oddělené komory a slouží k zaplnění prostoru v AZ místo palivové kazety, aby se zachovaly hydraulické poměry, není-li při experimentu toto místo zaplněno.

# 4. Rozsah rekonstrukce a požadavky na nové řešení

Z původního zařízení zůstanou po demontáži jen hliníkové stěny bazénu reaktoru (BR) a bazénu vyhořelého paliva (BVP), v betonu umístěné části horizontálních experimentálních

2

kanálů, část transportního šikmého kanálu mezi BR a BVP a překrytí BVP. Veškeré ostatní zařízení bude nové.

Hliníkové stěny BR a BVP zůstávají nedemontované, protože jejich demontáž by byla obtížná a zbytečná. Ostatní zařízení bude repasováno pro další použití. Nádoba nového BR bude na staveniště dodána ve čtyřech sekcích, které jsou svařeny z plechů tloušťky 6 a 10 mm z nerezavějící oceli a bude postupně ustavena v původní hliníkové nádobě. Obdobně bude probíhat i výroba a montáž nádoby nového BVP.

Nové řešení reaktoru musí splňovat následující požadavky zákazníka:

- zajistit širokou možnost využití jak pro vědecké účely v oblasti jaderné fyziky, fyziky pevných látek, neutronové fyziky, aktivační analýzy, radiační biologie, radiochemie, tak i k výrobě radioaktivních izotopů pro medicínské, průmyslové a zemědělské účely, ale také k provozování NZT (Neutronová Záchytová Terapie) a rovněž k výuce studentů a odborníků
- nové nádoby reaktoru a bazénu vyhořelého paliva vyrobit z nerezavějící oceli
- zachovat použití ejektoru pro zvýšení průtoku vody aktivní zónou, avšak s opačným směrem proudění (shora dolů) než tomu bylo u původního reaktoru
- reaktor osadit speciálním kanálem (namísto bývalé "tepelné kolony"), který bude používán pro NZT

#### 5. Popis nového reaktoru IRT-200

Nové řešení reaktoru a bazénu vyhořelého paliva je navrženo tak, aby splnilo požadavky zákazníka a zároveň vyhovělo veškerým současným požadavkům na jadernou a radiační bezpečnost.

Nádoba bazénu reaktoru. Nový bazén respektuje tvar původního řešení. Hloubka vody v novém bazénu bude 7,25 m (výška bazénu bude 7,65 m), délka bude 4,3 m, šířka je 1,8 m. Prostor mezi nerezovou a hliníkovou nádobou (cca 80mm) bude zaplněn betonem až po šachtu vyústění chladicího potrubí (stavební úroveň +6,9 m). Vzhledem k projektovanému výkonu reaktoru není uvažováno chlazení betonu.

V horní části bazénu bude provedena nástavba zakotvená do betonové podlahy s plošinou a průhledným překrytím.

Koš aktivní zóny. Koš aktivní zóny (AZ) bude vyroben z Al slitiny. Bude umístěn na nosné skříni chladicího okruhu tak aby optimálně využil původní polohu experimentálních horizontálních kanálů. Koš AZ bude mít opěrnou mříž s 54 buňkami (6x9), na kterou se usazují palivové články, beryliové bloky reflektoru, vytěsnitele různých typů atd. V horní části budou tyto elementy AZ opřeny o rám pláště AZ, připevněný na opěrné mříži. Uspořádání AZ bude možno z velké části přestavět, což umožňuje závěsný systém tzv. "pravítek" na horní plošině, na něž se zavěšují regulační orgány.

Jako palivo budou použity nejnovější palivové kazety IRT-4M s obohacením 20% <sup>235</sup>U, vyvinuté v Rusku. Dalšími elementy v AZ budou beryliové bloky umístěné po jejím obvodu a plnící funkci reflektoru. Ve zbývajících volných buňkách budou zasunuty "vytěsnitele" speciální konstrukce. Horní a dolní komora se zaplaví vodou z důvodu chlazení AZ a moderování neutronů. Prostřední komora, která bude umístěna proti horizontálním experimentálním kanálům, bude naopak vyplněna vzduchem, aby nedocházelo k pohlcování neutronů směřujících do kanálu.

Chladicí okruh. Chlazení bude, stejně jako u původního reaktoru, zajištěno nucenou cirkulací vody v bazénu. Voda protékající přes koš AZ shora dolů, bude potrubím DN200

odváděna z prostoru nosné skříně o objemu 1,8 m<sup>3</sup> k čerpadlu, projde tepelným výměníkem a



Obr. 2. Nový reaktor IRT – 200

Popis:

- 1 nádoba bazénu reaktoru,
- 2 palivo v aktivní zóně,
- 3 nosná skříň (pro odvod chladící vody),
- 4 ejektor,
- 5 směšovací nádoba ejektoru,
- 6 přívodní potrubí chladící vody primárního okruhu,
- 7 horizontální experimentální kanály,
- 8 vertikální experimentální kanál,
- 9 kanály ionizačních komor,
- 10 kazeta přechodného uložení elementů AZ,
- 11 otočné rameno pro manipulaci s elementy AZ,
- 12 řídící tyč UR-70 IRT,
- 13 horní plošina,
- 14 překrytí bazénu se zábradlím,
- 15 kanál pro transport paliva,
- 16 nádoba bazénu vyhořelého paliva,
- 17 skladovací mříž,
- 18 odkládací rám

vrátí se do bazénu potrubím DN150 zakončeným tryskou ejektoru.

Pro vyčerpání vody z bazénu bude sloužit potrubí DN50 vstupující do bazénu šachtou vyústění chladicího potrubí a ústící do soustavy přepadu.

Regulační orgány. Jako regulační (RO) budou orgány použity osvědčené regulační tyče UR 70, které pracují na reaktorech v Řeži a Praze. Pro potřeby reaktoru IRT-200 budou ale prodlouženy na celkovou délku 8,1 m. Bude rovněž provedeno několik konstrukčních úprav, které na základě zkušeností z provozu na obou zmíněných reaktorech zlepší jejich funkční vlastnosti a zvýší jejich provozní spolehlivost.

**Experimentální kanály** jsou horizontální a vertikální. Z původních 11 horizontálních kanálů zůstane po rekonstrukci využito jen pět kanálů o průměru 100 mm a jeden tangenciální kanál o průměru 150 mm.

Z důvodu bezpečnosti je navíc v nerezové přírubě zavařena membrána z nerezového ocelového ple-chu o tloušťce 1,2 mm. Tato membrána by v případě protržení hliníkové části kanálu zabránila úniku vody z bazénu reaktoru.

**Kanál NZT** má tvar kvádru, jehož základna kopíruje boční stěnu pláště AZ, k níž těsně přiléhá.

Kanály ionizačních komor a měření provozních parametrů.

Stejným způsobem jako suché ver-tikální kanály budou zhotoveny i kanály pro neutronové detektory. Kanálů je navrženo celkem pět a jsou rovnoměrně rozloženy kolem aktivní zóny.

Nádoba **bazénu vyhořelého paliva** bude zhotovena podobně jako nádoba bazénu reaktoru. Rozdíl spočívá jen v tom, že nebude mít tvar oválu, ale obdélníku o rozměrech 1,8 x 0,9 m a bude sestavena jen ze dvou sekcí, protože je hluboká jen 5,25 m. Mříž pro uložení palivových kazet bude zhotovena z dolní nosné mříže a k ní přivařených 66 trubek rozměru 108 x 4 mm.

K **překrytí bazénu** bude použito stávající litinové víko osazené revolverovým kontejnerem pro transport palivových kazet z bazénu reaktoru do bazénu vyhořelého paliva.

# 6. Pevnostní a seizmický výpočet vnitřních částí - výpočtový model

Výzkumný reaktor IRT - 200 je modelován pro výpočet metodou konečných prvků. Z větší části jsou použity prostorové prvky typu SHELL. Palivo v aktivní zóně reaktoru je modelováno objemovými prvky typu SOLID. Materiálové vlastnosti těchto objemových prvků jsou zvoleny tak, aby jejich dynamické vlastnosti odpovídaly vlastnostem palivových proutků.

Na obr. 3 je zobrazen výpočtový model zařízení. Skládá se ze systému chlazení, aktivní zóny, plošiny a jedné regulační tyče.



Obr. 3. Výpočtový model vnitřních částí výzkumného reaktoru IRT - 200



Obr. 4. Detail aktivní zóny s horizontálními kanály



Obr. 5. Detail horní plošiny

Obr. 4 zobrazuje detail výpočtové sítě v oblasti aktivní zóny a horizontálních kanálů a obr. 5 detail sítě v oblasti horní plošiny.

#### 7. Použité materiály

Většina částí reaktoru a membrána jsou vyrobeny z nerezové oceli 1.4541. U modelu reaktoru je dále použita slitina AlMg<sub>3</sub>. Vlastnosti těchto materiálů použité ve výpočtových modelech a pro vyhodnocení výsledků jsou uvedeny v Tab. 1.

	Ocel 1.4541	Slitina AlMg <sub>3</sub>
E [Pa]	2,19E+11	6,5E+10
ν[-]	0,28	0,33
ρ [kg . m <sup>-3</sup> ]	7900	2700
R <sub>p0.2</sub> [MPa]	210	70
R <sub>m</sub> [MPa]	500	150

Tab. 1. Vlastnosti použitých materiálů

Aktivní zóna reaktoru IRT 200 je velice kompaktní, má tvar hranolu a je tvořena palivovými články. Ty jsou v dolní části zasunuty v mříži a nahoře jsou navzájem opřeny ve vodorovném směru. Prvá ohybová vlastní frekvence těchto článků je velmi blízká 100 Hz. Tato část byla zjednodušeně vymodelována prostorovými prvky (SOLID), odvozeny materiálové pro které byly vlastnosti takové, aby odpovídaly dynamické tohoto modelu dvnamickým vlastnosti vlastnostem samostatných palivových článků.

Odvozené hodnoty pro materiál aktivní zóny jsou

$$E=1,304.10^8$$
 Pa, Nu = 0,33,  $\rho = 662,1$  kg/m<sup>3</sup>.

Potom váží model aktivní zóny ve shodě se skutečností 172,8 kg a má první vlastní tvar, odpovídající souběžnému kmitání palivových článků, o frekvenci přibližně 100 Hz.

#### 8. Zatížení



Obr. 6. Složky spektra odezvy na podlaží +7,8 m



Obr. 7. Složky spektra odezvy na podlaží -0,1 m

Při normálních provozních podmínkách působí na reaktor gravitační zrychlení, které přináší zatížení vlastní tíhou konstrukce, dále zatížení hydrostatickým tlakem kapaliny obklopující teplotní а zatížení. Protože pracovní teplota reaktoru je 40° C, jsou teplotní spády zanedbatelné. Účinky hydrostatického tlaku jsou nulové, protože na počítané konstrukce působí ze všech stran. Zbývá tedy pouze zatížení od vlastní tíhy, definované gravitačním zrychlením –9,81 m/s<sup>2</sup>, působícím ve směru globální osy y.

Při tzv. výpočtovém zemětřesení konstrukci působí na buzení podlažními spektry odezvy v místech upevnění modelovaných částí reaktoru k budově. Výpočtový model celého reaktoru je upevněn k tuhému základu ve dvou výškově různých podlažích. V každém je zadáno jiné spektrum odezvy pro výpočtové seizmické zatížení. Tato spektra jsou stanovena pro výškové kóty budovy v místech upevnění reaktoru.

První pásmo upevnění reaktoru má výškovou kótu -0,1 m, druhé kótu 7,8 m. Do prvního pásma spadá ukotvení dna nádoby a ukotvení horizontálních kanálů. V druhém pásmu jsou nosné prvky plošiny na lemu horní části nádoby, ukotvení vertikálních kanálů na jejich horním konci a v úrovni kompenzátorů délkového protažení. Zadaná podlažní spektra mají tři složky, které působí ve dvou vodorovných a v jednom svislém směru.

Na obr. 6 jsou vykresleny všechny tři složky zadaného spektra odezvy v bodu zadání č. 1693, který je umístěn na podlaží o kótě + 7,8 m. Na obr. 7 jsou vykresleny složky spektra odezvy v bodu č. 869, který je umístěn na podlaží o kótě -0,1 m. Tyto kóty odpovídají místům spojení horní a dolní části reaktoru se základem, který na ně přenáší seizmické buzení.

V uvedených obrázcích jsou červeně (x) a modře (z) vykreslena spektra pro vodorovné směry a zeleně (y) spektra pro svislý směr. Tato spektra jsme obdrželi od zadavatele v digitální formě.

Pro výpočet byly zvoleny křivky spekter odezvy odpovídající útlumu 5 %.

# 9. Okrajové podmínky

Na obr. 8 je vykresleno ukotvení dna komory chlazení a horizontálních kanálů. Na obr. 9 je vlevo znázorněno upevnění plošiny a ukotvení vertikálních kanálů na jejich horním konci a v místě objímek nad kompenzátory teplotní dilatace a vpravo je detail upevnění dna komory chlazení.





Obr. 8. Ukotvení dna komory chlazení a horizontálních kanálů



Obr. 9. Ukotvení plošiny a horní části vertikálních kanálů a detail dna komory chlazení

# 10. Výsledky výpočtů

Deformace kompletního modelu vnitřních částí reaktoru (vlevo) a samotné komory chlazení (vpravo) při zatížení vlastní tíhou jsou vykresleny na obr. 10.



Obr. 10. Deformace celého modelu při zatížení vlastní tíhou [m]

Napětí, které odpovídá tomuto zatížení je vykresleno na obr. 11. Největší napětí je na hraně otvoru pro upevňovací šroub a je rovno 15,3 MPa.



Obr. 11. Napjatost celého modelu při zatížení vlastní tíhou [Pa]

# 12. Modální analýza

Pro výpočtový model celého reaktoru IRT 200 bylo dále vypočteno 70 vlastních frekvencí a jim odpovídajících tvarů kmitání. Vypočtené vlastní frekvence jsou uvedeny v tab. 3. Modální hmotnosti a participační faktory jednotlivých vlastních frekvencí ukázaly, že nejvýznamnější jsou vlastní tvary č. 2, 8, 41, 38, 47 a 37. Ty jsou vyobrazeny na obr. 12.

Spočtené vlastní frekvence a jim odpovídající tvary kmitání byly využity pro výpočet odezvy na seizmické buzení zadanými spektry odezvy (viz obr. 6 a obr. 7). Pro sčítání odezev příslušných jednotlivým tvarům vlastních kmitů bylo použito ve shodě se zprávou Masopust (1995) pravidlo CQC (Complete Quadratic Combination).

Číslo	Frekvence [Hz]										
1	6.47	13	8.18	25	25.76	37	39.85	49	52.82	61	63.79
2	6.66	14	8.21	26	26.01	38	40.11	50	55.01	62	63.80
3	6.66	15	8.22	27	26.47	39	44.30	51	55.14	63	63.87
4	6.95	16	8.26	28	26.48	40	48.73	52	55.34	64	69.63
5	7.19	17	13.31	29	26.59	41	50.03	53	55.39	65	70.85
6	7.24	18	13.85	30	26.71	42	50.14	54	55.62	66	74.72
7	7.89	19	18.59	31	27.36	43	50.80	55	58.99	67	76.64
8	7.98	20	19.21	32	29.81	44	50.83	56	59.35	68	76.91
9	8.12	21	23.71	33	30.18	45	50.89	57	61.39	69	77.14
10	8.13	22	23.95	34	37.08	46	50.98	58	61.80	70	79.33
11	8.13	23	25.44	35	37.86	47	51.31	59	62.58		
12	8.15	24	25.75	36	38.83	48	52.57	60	62.66		

Tab. 3. Spočtené vlastní frekvence výpočtového modelu reaktoru IRT 200



Obr. 12. Vlastní tvary celého modelu vnitřních částí reaktoru č. 2, 8, 37, 38, 41 a 47

# 13. Odezva na seizmické buzení

Na obr. 13 jsou vykresleny maximální výsledné deformace při seizmickém buzení. Je zřejmé, že při tomto buzení kmitají s největšími výchylkami kanály malého průměru a regulační tyče (výchylky až 12 mm) a dále chladič (výchylky až 6 mm). Naproti tomu spodní část reaktoru s horizontálními kanály se při zadaném buzení deformuje velmi málo, do 0,1 mm. Horizontální kanály nejsou spojeny s reaktorem, mezi jejich konci a stěnou aktivní zóny je mezera asi

#### \_\_\_\_\_ Engineering Mechanics, Svratka 2006, #189

1 mm. Samotné horizontální kanály mají malou hmotnost a při seizmické události nebudou namáhat příruby tak, aby došlo k jejich roztěsnění. Těsnost horizontálních kanálů zůstane tedy zachována. Na obr. 14 jsou vykreslena výsledná napětí podle Von Misesovy teorie při zadaném buzení. Je patrné, že největší špičky napětí jsou v místě spojení chladiče s dolní deskou a dosahují maxima 63,1 MPa. Největší napětí je v místě otvoru v komoře chlazení pro upevňovací šroub do základu.



Obr. 13. Celkové deformace [m] reaktoru IRT 200 při zadaném seizmickém buzení



Obr. 14. Výsledná napjatost [Pa] reaktoru IRT 200 při zadaném seizmickém buzení

10 \_\_\_\_\_

#### 14. Výpočet nosnosti rámu komory chlazení

Pro výpočet nosnosti odkládacího rámu na komoře chlazení byl doplněn výpočtový model o podrobný model tohoto rámu. K tomuto rámu byl, podobně jako ve skutečnosti, připevněn zjednodušený model kontejneru, který bude na rám odkládán. Tento kontejner má vnější průměr 700 mm, výšku 1300 mm a celkovou hmotnost nejvýše 1250 kg.

Naproti tomu byl výpočtový model vytvořený pro výpočty seizmické analýzy zjednodušen tak, že byla vynechána plošina, kanály a regulační tyč. Tyto části jsou upevněny samostatně v horní části betonového základu a na výpočet únosnosti komory chlazení s rámem nemají žádný vliv. Detail modelu rámu s kontejnerem umístěným na komoře chlazení je uveden na obr. 15.



Obr. 15. Komora s rámem a kontejnerem



kontejnerem byla provedena modální analýza. Vzhledem k nižšímu počtu vlastních tvarů

Obr. 17. Napjatost rámu při zatížení tíhou kontejneru

Pro tento výpočtový model byly provedeny stejné výpočty jako pro předchozí model a navíc byl proveden výpočet stability modelu při zatížení chladící komory a rámu kontejnerem o hmotnosti 1250 kg.

Detail deformace při zatížení vlastní hmotností je uveden na obr. 16, detail napjatosti při tomto zatížení na obr. 17.

Největší napětí podle Von Missesova kriteria je 15,34 MPa, tedy téměř shodné s napětím bez zatížení kontejnerem.

I pro zjednodušený model s rámem a ledem k nižšímu počtu vlastních tvarů

nízkých vlastních frekvencí, kterými kmitají kanály a regulační tyč, bylo u tohoto modelu do 80 Hz nalezeno pouze 16 vlastních frekvencí.

První dvě vlastní frekvence odpovídají vlastním tvarům č. 2 a 8 u podrobného modelu. U tohoto modelu jsou poněkud vyšší frekvence, protože u podrobného modelu jsou odpovídající vlastní tvary smíšené vždv (s velkou amplitudou kmitá nádoba chladiče a současně některý z kanálů, nebo regulační tyč). Ty jsou měkké a snižují hodnotu vlastní frekvence.

Vlastní tvar č. 3 je nový a kmitá jím kontejner na rámu (obr. 18). Vlastní tvary č. 4 a 5 odpovídají vlastním tvarům č. 37 a 38, č.6 a7 odpovídají tvarům č. 47 a 49. Zajímavý je vlastní tvar č. 9, kterým kmitá kontejner v příčném směru (obr. 18). Vyšší tvary kmitání jsou již pouze skořepinové tvary chladiče.

Seizmické zatížení bylo zadáno stejně jako pro model celého reaktoru. Výsledná deformace a napětí modelu použitého pro výpočet dovoleného zatížení rámu je uvedena na obr. 19. Maximální deformace je u chladiče 4,4 mm a největší napětí je u jeho paty na hraně otvoru komory chlazení a je 75,9 MPa.





Obr. 18. Vlastní tvary č. 3 a 9

Obr. 19. Deformace a napětí při seizmicitě

Dále byly provedeny stabilitní výpočty rámu a chladící komory při zatížení hmotností kontejneru a statický výpočet membrány DN 150, která je největší ze všech membrán a tedy i nejvíce namáhaná tlakem.

# 15. Závěr

Bylo provedeno vyhodnocení všech spočtených výsledků podle požadavků uvedených ve zprávě [4] (Masopust 1995) a dle předepsané normy ΠΗΑЭ Γ-7-002-86 [3]. Pro všechna uvažovaná zatížení reaktor IRT 200 plně vyhovuje. Dále bylo ukázáno, že vyhovuje i při zatížení kontejnerem o hmotnosti 1250 kg umístěným na rámu komory chlazení. Pro dané zatížení vyhovují i membrány.

# 16. Literatura

- [1] I-DEAS Master Series, Structural Dynamic Research Corporation, USA
- [2] COSMOS/M programový systém na modelování a výpočet metodou MKP, SRAC Los Angeles, Kalifornie.
- [3] ПНАЭ Г-7-002-86, Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, Москва, 1989.
- [4] Masopust, Požadavky na seizmické výpočty a hodnocení seizmické odolnosti stavebních konstrukcí a technologického zařízení JE Temelín a zásady jejich provedení, STEVENSON & ASSOCIATES, Plzeň, 1995.
- [5] Markov, Friedl, Rekonstrukce výzkumného reaktoru IRT-2000, Technický projekt, 4. technologická část, 4.1. Bazén a vnitřní části výzkumného reaktoru IRT 2000, 4.1.5. Seizmický a pevnostní výpočet. Zpráva ŠKODA JS a.s. Plzeň, 2005.