

# VIRTUÁLNÍ NUMERICKÉ SIMULACE JAKO PODPORA NÁVRHU, VÝROBY A PROVOZU ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

## VIRTUAL NUMERICAL SIMULATION AS SUPPORT OF DESIGN, MANUFACTURING AND OPERATION OF ENERGETIC FACILITY

Marek Slováček

MECAS ESI s.r.o., Brojova 16, 326 00 Plzeň

### Abstrakt

Použití virtuálních numerických analýz se v současné době nevyhnulo ani oblasti energetiky. Moderní nástroje počítačové simulace, lze použít ve velmi široké oblasti, tzn. jak v oblasti návrhu konstrukce (statické a dynamické analýzy, predikce životnosti, predikce proudění atd.), výroby (numerické analýzy odlévání, kování, svařování, tepelného zpracování atd.), tak během provozu (predikce vzniku a růstu vad, analýzy provozních režimů s predikcí životnosti, analýzy dopadů oprav na životnost atd.). V současné době lze virtuálními numerickými simulacemi vyhodnotit vliv výrobních procesů, případných oprav a provozních parametrů na životnost jednotlivých komponent energetických zařízení. Cílem příspěvku je detailně popsat a shrnout dostupné možnosti numerických analýz během návrhu, výroby a provozu komponent energetických zařízení.

### Numerické analýzy v oblasti energetiky

Nyní je stále diskutován průmysl 4.0, což je označení pro současný trend plné digitalizace a s ní související automatizace výroby a kontroly procesů. Cílem je vytvořit tzv. chytré továrny nebo provozy, které budou využívat kyberneticko-fyzikální systémy, které převzou činnosti, které vykonávali lidé. Předpoklad digitalizace celého procesu nebo návrhových a kontrolních mechanismů je soubor numerických simulačních programů a jejich vzájemného spojení. Cílem článku a prezentace je dát obecný přehled možností numerických analýz fyzikálních procesů, dále možnosti vizualizace procesů a managementu s daty. Na základě spojování uvedených procesů, resp. software lze provést spojení tzv. Hybrid Twin, kde jde především o spojení prvního návrh pomocí systému modeling Simulation X, sběru dat, jejího vyhodnocení, provedení numerických analýz a potom reálnou vizualizaci.

Virtuální numerické simulace pro oblast energetiky můžeme rozdělit do následujících skupin:

- 1. Návrh zařízení** (převážně statické – obr. 1 a dynamické analýzy v lineární a nelineární oblasti, analýzy proudění, popř. včetně tepelného přenosu – obr. 2, analýzy vibroakustiky, predikce životnosti, analýzy havarijních stavů – nárazové zkoušky lopatek turbín, nárazové zkoušky potrubních systémů atd.) Při návrhu zařízení se uplatňují nové progresivní trendy, jako je např. posouzení míry konzervativnosti návrhových analýz zahrnutím přesného vlivu výrobních procesů. Například je velmi používané spojení numerických analýz svarových spojů s následným posouzením statické či dynamické pevnosti, dále životnosti, případné limitní posouzení na základě principů lomové mechaniky. Ve výpočtech mezních stavů se již uvažují předchozí výrobní vlivy jako je nehomogenní materiálová struktura, zbytková napětí a plastické deformace. Dalším příkladem je např. numerická simulace ohýbání trubek s následným tepelným zpracováním – obr. 7, dalším krokem je svařování a následující pevnostní analýzy s posouzením limitních stavů.
- 2. Výroba** (oblast lití, svařování, kování, lisování, ohýbání atd.) Na základě numerických simulací výrobních procesů lze provést optimalizaci jednotlivých technologických operací s cílem snížení nákladů výroby, zkrácení přípravného procesu, či snížení počtu zmetků, resp. oprav. Dalším aspektem je samozřejmě výroba zařízení s co nejnižší úrovní zbytko-

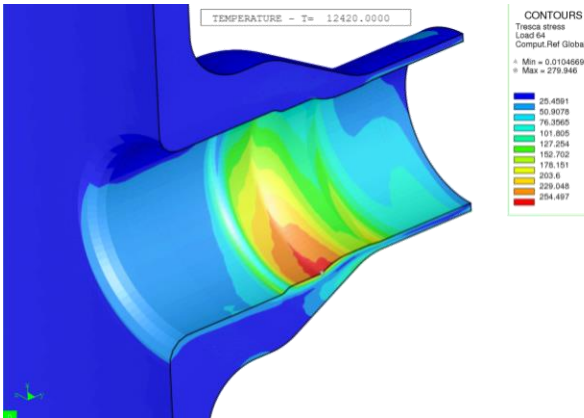
vých napětí a plastických deformací, příznivou materiálovou strukturou a požadovanými materiálovými vlastnostmi, aby byl dosažen co nejdelší bezporuchový provoz zařízení. Na obr. 3 je uveden model z numerické analýzy lití ingotu, následného převozu a ohřevu na kovací teplotu. Cílem byla optimalizace tepelného režimu tak, aby bylo v maximální míře omezen vznik vycezenin a ředin, dále aby byla obdržena požadovaná struktura a zároveň minimální úroveň zbytkových napětí. V uvedeném případě rovněž šlo o tzv. numerickou simulaci 3 generace, tzn. byly spojeny analýzy odlévání a tepelného zpracování, včetně numerické simulace převozu ingotu na vagónu s uvažováním vlivu sálání mezi ingotem a vagónem, viz obr. 4. Na obr. 5 je predikce deformací po svařování tělesa nízkotlakého dílu turbíny. Byl numericky simulován „assembly“ proces svařováním. Celý díl byl složen z 12 samostatných svařovaných podsestav. Každá podsestava byla řešena samostatně jako „lokální“ numerická analýza. Nakonec byly jednotlivé podsestavy svařeny v jeden celek pomocí tzv. „globálního přístupu“. Na obr. 6 je uvedeno výsledné zbytkové napětí po provedení optimalizační numerické simulace svařování opravy turbínové skříně. Na obr. 7 je uvedena numerická analýza ohýbání trubek s cílem posouzení možnosti vzniku vad v ohybu.

- 3. Oblast řízeného stárnutí** (statické a dynamické analýzy v lineární a nelineární oblasti, analýzy proudění, analýzy vibroakustiky, predikce životnosti, nárazové zkoušky, lomová mechanika, optimalizace oprav atd.). Cílem uvedené oblasti je provedení vybraných numerických simulací s cílem získat informace o degradaci konstrukce během provozu a predikce její životnosti na bázi skutečných zatěžovacích režimů zjištěných během provozu. Samozřejmě, i zde se vyskytují návrhové numerické analýzy, a to těch komponent, které nesplňují požadavky na funkčnost a životnost, a musí se nahradit zařízeními nové konstrukce. Dále na základě numerických analýz lze provést optimalizace technologií oprav svařování se zahrnutím jejich vlivů na další provoz komponenty. Dalšími typickými analýzami je posouzení nalezených vad na bázi principů lomové mechaniky, jejich případný růst a rozhodnutí o provozu zařízení, opravě nebo kompletní výměně. Na obr. 8 jsou uvedena teplotní pole na T spoji během provozu. Cílem bylo pomocí CFD analýz zjistit skutečné teplotní zatížení, dále provést analýzy pevnosti s cílem stanovit životnost uzlu. Na obr. 9 jsou uvedena zbytková napětí po opravě reaktoru jaderné elektrárny. Cílem numerické analýzy byla validace technologického postupu opravy, potvrzení její proveditelnosti z hlediska napěťových stavů a materiálové struktury. Posouzení trhliny ve svarovém spoji tlakové nádoby reaktoru je uvedeno na obr. 10. Celý projekt byl provedena v několika krocích. Nejdříve byla provedena numerická analýza svařování, aby bylo obdrženo rozložení zbytkových napětí a plastických deformací po výrobním procesu, dále bylo uvedené místo zatíženo provozními parametry. Posléze byla vytvořena v konstrukci, resp. ve výpočetním modelu trhlina, která byla posouzena na limitní stavy. Na obr. 11 jsou uvedeny predikce šíření trhlin v nátrubku tlakové nádoby reaktoru pro dvě různé počáteční velikosti a dále pro různé zatěžovací režimy v průběhu 30 let provozu.
- 4. Virtuální realita.** Jde o velmi výkonný softwarový produkt, který zobrazuje trojrozměrný model virtuálního prototypu v jeho reálných rozměrech a znázorňuje jeho chování v reálném čase. Virtuální reality je využívána pro posuzování konstrukčních návrhů, vyhodnocování a optimalizaci montážních a demontážních procesů, pro ověřování technických prostředků a nástrojů pro výrobu, údržbu a opravy. Dále je umožněno během simulací montáže, údržby a oprav odhalovat kontakt a kolizní oblasti pevných částí a okamžitě vyhodnocovat chování flexibilních komponent, dále představuje podporu pro vyhotovení technické dokumentace a animací pro nácvik pracovních postupů. V oblasti energetiky používají virtuální realitu společnosti jako jsou SIEMENS, AREVA, HITACHI především na ověření výrobních postupů a ověření proveditelnosti údržby a oprav.

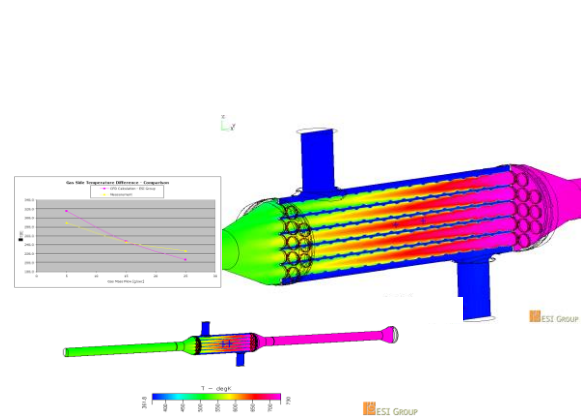
**5. Systém modeling** Program SimulationX, obr. 12, je intuitivní softwarová platforma pro modelování fyzikálních závislostí, simulaci a analýzu mechatronických systémů. Inženýři, nejen z oblasti energetiky, důvěřují uvedenému řešení při návrhu a virtuálním testování elektrických, mechanických, tepelných či tekutinových systémů a jejich kombinací. Programové řešení jim umožňuje pochopit chování jednotlivých komponent v rámci systému a optimalizovat finální projekt s ohledem na scénáře skutečného zatížení, které je dynamické, v čase proměnné. Ať už jde o eliminaci vibrací v pohonném ústrojí turbín, návrh efektivních topných a chladicích okruhů, jednotek pro ukládání energie nebo tzv. virtuální elektrárny a lze vyhodnocovat, jak zcela nová nekonvenční řešení, tak i optimalizovat řešení stávající. Chceme-li jmenovat oblasti, ve kterých nachází SimulationX nejrozsáhlejší uplatnění, jsou to zejména analýzy dynamického chování parogenerátorů, chlazení, sušení vzduchu a zpětného získávání odpadního tepla. Dále pak porovnávání vlastností různých variant složitých systémů, jako jsou např. nabíjecí a vybíjecí charakteristiky mechanických, tepelných, tekutinových a chemických akumulátorů. Nesmíme opomenout ani oblast optimalizace řídicích algoritmů pro systémy kombinované výroby tepla a elektřiny nebo pro výrobu, skladování a spotřebu obnovitelných energií. Pomocí softwarové platformy SimulationX je možné provádět bezpečnostní analýzy a studie spolehlivosti pomocí analýzy stromu poruchových stavů (FTA) a analýzy příčin a důsledků (FMEA) na základě fyzické struktury modelu. Přínosem je samozřejmě i možnost identifikace slabých míst a ztrát v celém modelovaném systému a maximalizace jeho celkové účinnosti.

## **Závěr**

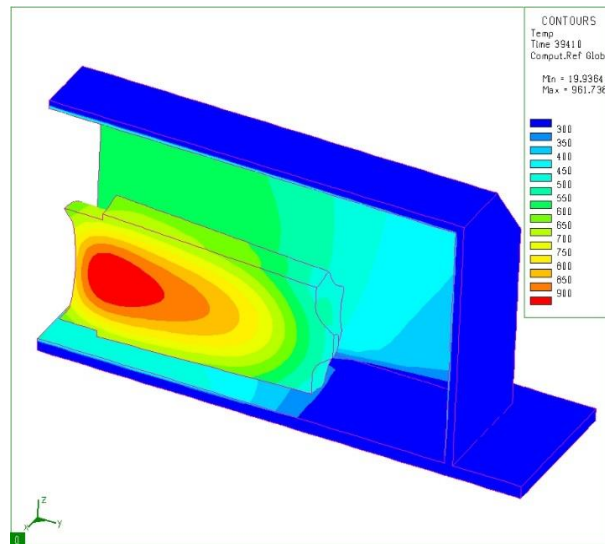
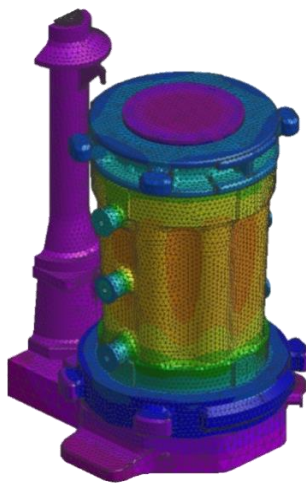
ESI Group má dlouholeté zkušenosti v oblasti poradenství a inženýrských služeb v oblasti energetiky zajišťovaných po celém světě. Výsledkem spolupráce s předními společnostmi energetického průmyslu jsou metodiky se specifickým produktově-procesním přístupem, a přitom v souladu se zavedenými standardy. Pro splnění přísných požadavků kladených na energetická zařízení, ESI Group nabízí řešení, založené na přesné kalibraci modelů reprezentativních vzorků a využití dat pro analýzu finálního konstrukčního řešení. Uvedený přístup se opírá o realistické zohlednění fyziky materiálu v modelech sestavených se zohledněním výrobních procesů, jaké absolvovala reálná konstrukce a se zatížením, které odpovídá reálným, popř. mezním provozním podmínkám. Na základě numerických simulací je u klíčových rozhodnutí, která poskytují významné navýšení spolehlivosti, produktivity, či zavedení inovací, možné posoudit míru konzervatismu, se kterou jsou přijata, při současném zajištění patřičné úrovně bezpečnosti.



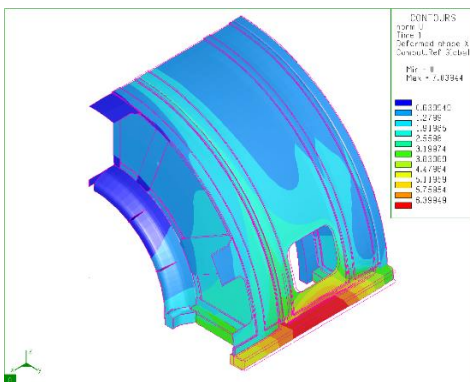
Obr. 1: Napětí v nátrubku



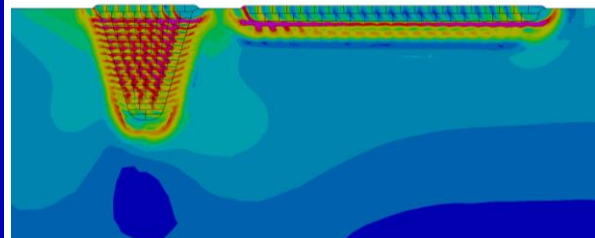
Obr. 2: Analýza účinnosti tepelného výměníku



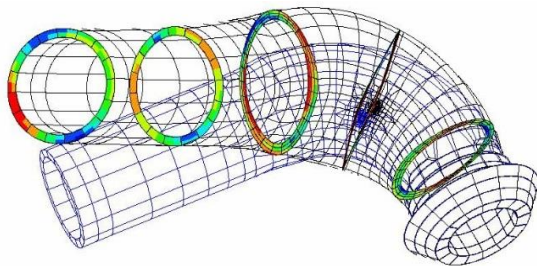
Obr. 3 a obr. 4: Posouzení/optimalizace technologie odlévání ingotu



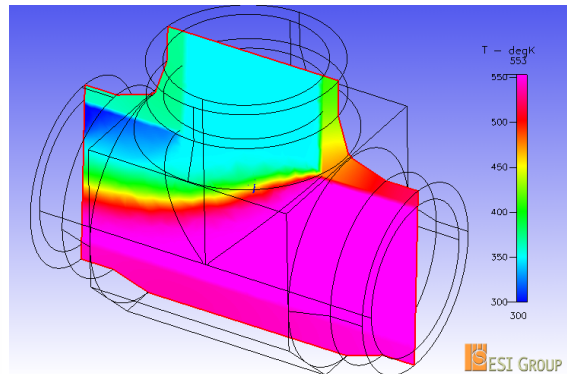
Obr. 5: Predikce deformací tělesa turbíny



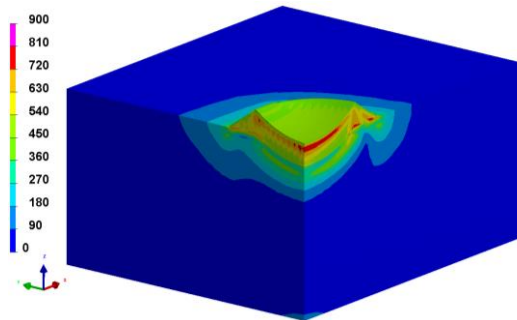
Obr. 6: Oprava turbínového tělesa



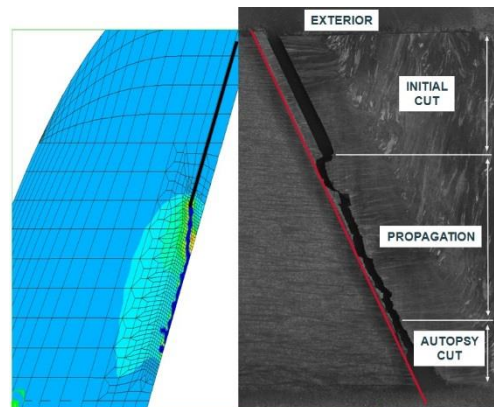
Obr. 7: Simulace ohybu trubky



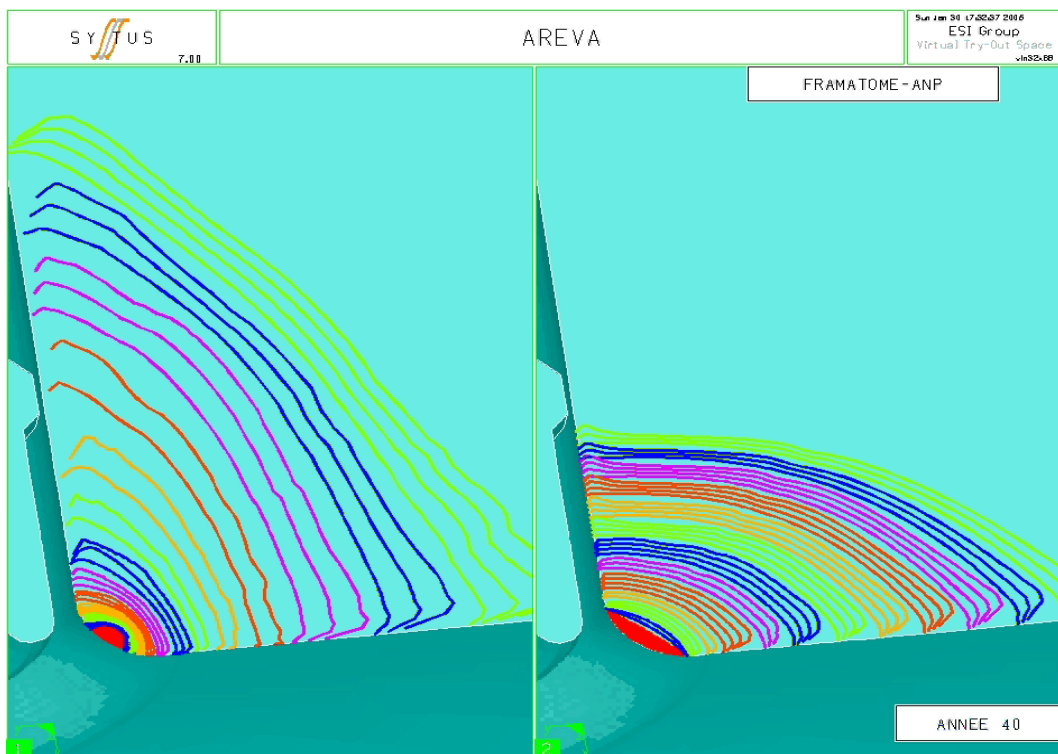
Obr. 8: Vyhodnocení průběh teplot T-spoje



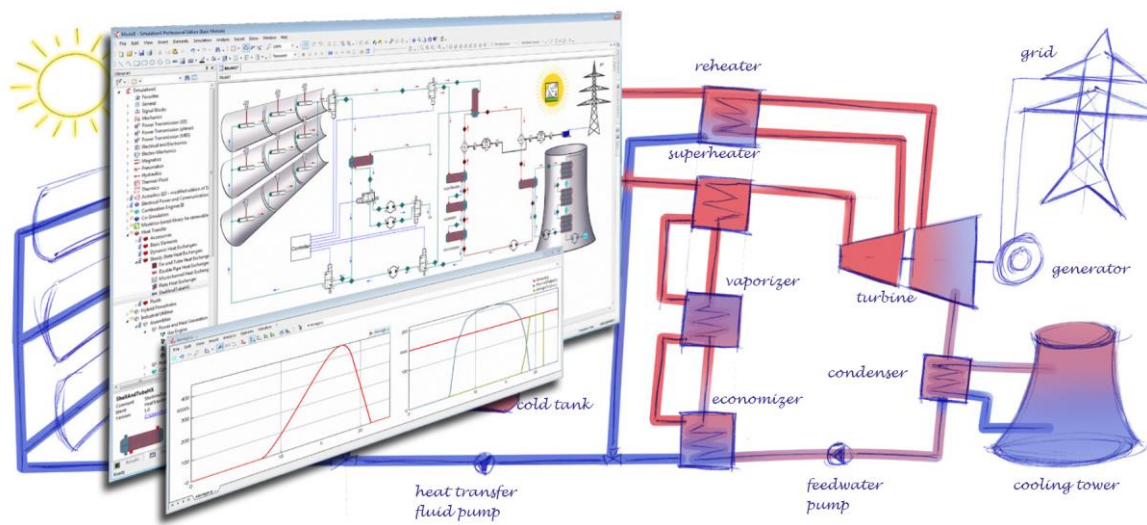
Obr. 9: Zbytkové napětí po opravě



Obr. 10: Posouzení vady ve svarovém spoji



Obr. 11: Predikce šíření vady v nátrubku reaktoru



Obr. 12: Systém modeling – Simulation X