

Návrh sekundárního okruhu pro nové jaderné zdroje v ČR

Jakub Valenta

Abstrakt

Článek seznamuje s možnostmi nových jaderných reaktorů, které mohou být v budoucnosti realizovány v ČR. Pro jeden z reaktorů je dále navržen sekundární okruh pomocí programu ThermoFlow. Výsledkem takového návrhu jsou parametry sekundárního okruhu, které jsou v závěru článku diskutovány.

Klíčová slova

sekundární okruh, jaderná energetika, jaderný reaktor, ThermoFlow

1. Úvod

Spotřeba elektrické energie v České Republice, ale i na celém světě neustále roste. Nárůst spotřeby společně s dožívajícími elektrárnami na celém území České republiky v budoucnu povede ke krizi spojené s nedostatkem elektrické energie. Abychom tomu zabránili, je třeba stávající elektrárny rekonstruovat a tím prodloužit jejich život a zvýšit efektivitu. Všechny stávající elektrárny nelze stále rekonstruovat, proto musíme přistoupit ke stavbě nových energetických zařízení.

Jedním řešením je stavba nového jaderného zdroje. Nespornou výhodou jaderného zdroje je, že neprodukuje téměř žádné skleníkové plyny jako například uhelné nebo plynové elektrárny. Nevýhodou je vznik radioaktivního odpadu, který umíme zatím pouze uskladnit. Palivo jaderného zdroje není strategickou surovinou jako je ropa a zemní plyn, což by Českou republiku nečinilo závislou na zahraničních dodávkách těchto surovin. To je v souladu se Státní energetickou koncepcí, jejímž cílem je energetická nezávislost a soběstačnost České republiky.

Rozhodl jsem se pro návrh sekundárního okruhu pro nový jaderný zdroj v ČR, protože mi připadá energetika zajímavá, zvláště pokud se nacházíme v období, kdy je energetický průmysl na vzestupu. Myslím si, že je také dobré vědět, jak se elektrická energie vyrábí, abychom nebyli uživateli něčeho, čemu vlastně ani nerozumíme.

2. Varianty nového jaderného zdroje

Státní energetická koncepce počítá s výstavbou dvou možných bloků nového jaderného zdroje. Jeho celková kapacita by měla být do 3400 MWe. Následující varianty zdroje vycházejí z [1], ovšem jejich výčet nemusí být konečný.

2.1. Reaktor EPR

Reaktor EPR je tlakovodní typ reaktoru třetí generace. Je výsledkem spolupráce firem Siemens a Framatome ANP (dnes AREVA). Jedná se o moderní kombinaci reaktorů N4 ve Francii a KONVOI v Německu. Cílem vývoje bylo zvýšení bezpečnosti, ale zároveň konkurenceschopnosti produktu.

Výrobce udávaný výkon je 1600+ MWe a účinnost reaktoru může dosahovat až 37%. Jedná se o jeden z nejvýkonnějších tlakovodních reaktorů. Primární okruh se skládá ze čtyř smyček (čtyři okruhy cirkulace vody mezi tlakovou nádobou reaktoru a parogenerátorem). Tento design pochází z reaktorů N4 a KONVOI, kde se osvědčil. K hlavním součástem reaktoru EPR patří: tlaková reaktorová nádoba, cirkulační čerpadla a parogenerátory. Všechny tyto součásti se od předchozího designu zvětšily, což vedlo ke zvýšení bezpečnosti, operativnosti a výkonu. Přibyla jedna úroveň bezpečnosti, takže jsou bezpečnostní funkce rozděleny do 4 x 50%. Navíc jsou sekce bezpečnosti fyzicky odděleny do nezávislých tras, aby porucha jedné sekce neovlivnila sekci druhou. K zajímavostem bezpečnostního systému reaktoru EPR patří zřízení – speciální nádoba, která při roztečení aktivní zóny zachytí taveninu, kterou ochladí voda omývajíc nádobu (viz obrázek 1). Tím se zamezí proniknutí radioaktivity do okolního prostředí elektrárny. Ovšem pravděpodobnost těžké havárie, která by vedla



Obr. 1. Nádobu na zachycení taveniny

k poškození aktivní zóny je menší než 10^{-6} /rok. A pravděpodobnost těžké havárie s poškozením aktivní zóny, která by zároveň zapříčinila únik radioaktivity do okolí je menší než 10^{-7} /rok.

Budova reaktoru je dvouplášťová a je schopna vydržet náraz vojenského i dopravního letadla. Budovy umožňující provoz reaktoru jsou situovány na opačných stranách reaktorové budovy a tak by při případné havárii letadla byla zničena jen jedna. Životnost elektrárny je projektována na 60 let bez výměny reaktorové nádoby, ostatní komponenty jsou projektovány tak, aby byla možná jejich výměna.



Obr. 2. Řez reaktorovou budovou reaktoru EPR

Reaktor je možno provozovat v režimech od 20% do 100% nominálního výkonu. Řídicí systémy reaktoru EPR jsou projektovány tak, aby zajistily rychlé sledování výkonových požadavků sítě. Manévrovací schopnosti reaktoru jsou: postupná změna výkonu v pásmu 50% - 100% je možná rychlostí až 5%/min, skoková změna 10% v pásmu 20% -100%, zvýšení výkonu o 20% během dvou minut. Reaktor EPR vyhovuje požadavkům provozovatelů, které jsou formulované v EUR (European utility requirements).

Tabulka 1 – Tabulka základních technických dat reaktoru EPR

Základní technická data	
Tepelný výkon	4500 MWt
Elektrický výkon	1600+ MWe
Počet smyček	4
Palivo	UO ₂ /MOX
Obohacení U-235	Méně než 5%

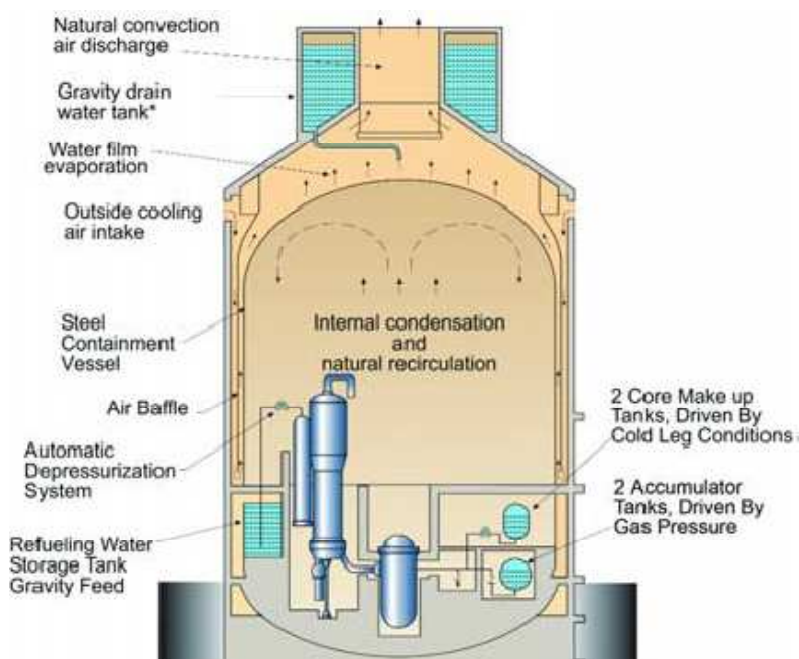
2.2. Reaktor AP 1000

Projekt reaktoru AP 1000 je výsledek snahy firmy Westinghouse Electric zvýšit konkurenceschopnost jaderných energetických zdrojů v USA. Jedná se o projekt tlakovodního reaktoru třetí generace o výkonu 1117 MWe, který vychází z reaktoru AP 600 a zároveň se s ním snaží zachovat maximum shodných prvků. To umožňuje využít znalostí, které přinesl dvacetiletý vývoj reaktoru se zvýšenou pasivní bezpečností.

Reaktor AP 1000 je tedy z velké části založen na projektu reaktoru se zvýšenou pasivní bezpečností a využívá osvědčené součásti svého předchůdce. Výhodou pasivní bezpečnosti je, že při nehodě se reaktor obejde bez zásahu operátora nebo spuštění záložních systémů. Pasivní bezpečnostní prvky reaktoru AP 1000 se snaží v co největší míře využívat přírodních zákonitostí, jako jsou gravitační síla, přirozená cirkulace vody nebo vedení tepla. Toto využití přírodních jevů umožňuje vynechání některých aktivních členů, jako jsou čerpadla nebo ventilátory. Tím se nejen sníží náklady na projekt, ale také pravděpodobnost, že se nějaké podobné zařízení porouchá a bude nutné ho opravit. Tím vzniklo zařízení, které je jednodušší a méně nákladné stavět, provozovat a udržívat.

Příkladem pasivního bezpečnostního systému je pasivní chladicí systém kontejmentu. Pokud dojde k nehodě a teplota uvnitř kontejmentu vzroste, teplo je nejprve odváděno do vodní nádrže. Pára z vodní nádrže začne cirkulovat a kondenzovat na stěnách kontejmentu, který je kovový a umožňuje tak pohodlný přestup tepla. Vnější povrch kontejmentu je chlazen proudem okolního vzduchu. Teplý vzduch stoupá vzhůru k centrálnímu otvoru a studený vzduch je nasáván otvory v budově reaktoru.

Budova reaktoru je podobně jako u reaktoru EPR dvouplášťová. Jeden plášť je kovový a je to stěna



Obr. 3. Ilustrace pasivního chladicího systému AP 1000

samotného kontejmentu a druhý plášť je železobetonový. Životnost jaderné elektrárny je 60 let bez výměny reaktorové nádoby, ostatní komponenty jsou navrženy tak, aby bylo možné je vyměnit. Přes absenci některých aktivních bezpečnostních prvků splnil projekt AP 1000 bezpečnostní a pravděpodobnostní kritéria US NRC (US Nuclear Regulatory Commission). Pravděpodobnost těžké havárie s poškozením aktivní zóny je $5 \cdot 10^{-7}$ /rok a pravděpodobnost těžké havárie s poškozením aktivní zóny a únikem radioaktivity do okolí je $6 \cdot 10^{-8}$ /rok.

Reaktor se snaží sledovat zatížení elektrárny a je projektován tak, aby bez aktivace pasivních bezpečnostních systémů zvládl následující situace: pozvolná změna výkonu o 5% za minutu ve výkonovém rozsahu 15 – 100%, skoková změna zatížení o 10% rozsahu výkonu 15 – 100%, 100% výpadek generátoru.

Tabulka 2 – Tabulka základních technických dat reaktoru AP 1000

Základní technická data	
Tepelný výkon	3415 MWt
Elektrický výkon	1117 MWe
Počet smyček	2
Palivo	UO ₂ /MOX
Obohacení U-235	2,35 – 4,45 %

2.3. Reaktor VVER

Reaktor třetí generace VVER typu V-392 je projekt tří organizací: OKB, Institut Kurčatova a LOAEP. Jedním ze základů pro vývoj tohoto reaktoru se staly zkušenosti s provozem předcházejících typů reaktorů VVER-1000, které jsou v provozu také v České Republice. Cílem projektu je výstavba nových spolehlivých jaderných elektráren s podstatně vyššími bezpečnostními parametry. Proto je reaktor vyvíjen na základě nových ruských bezpečnostních požadavků pro jaderné elektrárny. Dalším cílem je konkurenceschopnost projektu v zahraničí.

Bezpečnost jaderné elektrárny je založena na principu hloubkové ochrany s použitím systémů bariér zabráňujících migraci ionizujícího záření a radioaktivních látek do životního prostředí. Příkladem hloubkové ochrany jsou následující opatření: postupné umístění bariér proti úniku radioaktivních látek (struktura paliva, pokrytí palivového článku, hranice primárního okruhu, kontejment), uvažování všech událostí, které by měly za následek porušení těchto bariér, minimalizace pravděpodobnosti havárií s únikem radioaktivity. Nicméně systém bariér není jediným systémem chránícím reaktor. Mezi další bezpečnostní systémy patří např. systémy havarijního chlazení aktivní zóny, pasivní systém zaplavování aktivní zóny, systém rychlého doplňování bóru, dvojitý betonový kontejment, sofistikované řídicí systémy atd.

Cílem všech bezpečnostních systémů reaktoru VVER typ V-392 je zajištění toho, že pravděpodobnost vážného poškození aktivní zóny nepřesáhne 10^{-6} /rok a pravděpodobnost vážného poškození aktivní zóny spojená s únikem radioaktivity do životního prostředí nepřesáhne 10^{-7} /rok.

Reaktor VVER typ V-392 obsahuje množství bezpečnostních systémů. Otázkou však zůstává, jak moc bude tento reaktor technologicky náročný na stavbu, údržbu a servis.

Tabulka 3 – Tabulka základních technických dat reaktoru VVER

Základní technická data	
Tepelný výkon	3000 MWt
Elektrický výkon	1068 MWe
Počet smyček	4
Palivo	UO ₂
Obohacení U-235	1,6; 2,4; 4 %

2.4. Reaktor EU-APWR

Reaktor EU-APWR byl vyvinut firmou Mitsubishi Heavy Industries na základě bloků 1538 MWe plánovaných pro japonský energetický průmysl. Byl navrhnout tak, aby splňoval podmínky evropských provozovatelů (EUR). Navrhnutá zlepšení zahrnují vysokou tepelnou účinnost (až 39%), snížení počtu dílů, 24 měsíční palivový cyklus a zvýšení výkonu na 1700 MWe, což je jeden z nejvyšších výkonů na světě.

EU-APWR je tlakovodní reaktor třetí generace, který má čtyřsmyčkový primární okruh. Elektrárna disponuje jedním turbosoustrojím a jedním generátorem na reaktor. Tím je snížen počet mechanických prvků a je tak možno dosáhnout vysoké účinnosti. Oproti dřívější generaci byla zvýšena tepelná účinnost o 10%, snížena měrná spotřeba paliva o 16%, snížen počet vyhořelých palivových souborů o 28% a zmenšen obestavěný prostor o 17%.

Reaktorová nádoba a její vestavby byly zjednodušeny a upraveny k vyšší spolehlivosti, snížení nároků na provozní testování a ke snížení radiační zátěže reaktorové nádoby. Po obvodu aktivní zóny je umístěn ocelový reflektor, který snižuje tok rychlých neutronů na stěnu nádoby.

Reaktor disponuje bezpečnostními systémy, které zabraňují vzniku nehod. K takovým systémům patří např. havarijní chlazení aktivní zóny, které vstřikuje chladivo s kyselinou boritou do chladicího systému v případě: nehody se ztrátou chladiva, prasknutí hlavního parovodu a poruchy systému řízení chemických režimů. Havarijní chlazení aktivní zóny zahrnuje hydroakumulátory napojené na studenou větev cirkulačních smyček, aktivní systém vstřiku chladiva do reaktorové nádoby, systém havarijního odstavení a nádrž. Kromě opatření pro snížení pravděpodobnosti vzniku těžkých nehod obsahuje projekt systémy, které zmírňují dopady případné nehody. Jsou to: systém odtlakování primárního okruhu, zaplavovaná šachta reaktoru s prostorem pro zachycení trosk roztavené aktivní zóny, spalovače vodíku v kontejmentu a alternativní systém odvodu tepla z kontejmentu.



Obr. 4. Celkový pohled na elektrárnu s reaktorem EU-APWR

K alternativě obdobného technického řešení pro USA je US-APWR, pro který probíhá v USA licenční řízení.

Tabulka 4 – Tabulka základních technických dat reaktoru EU-APWR

Základní technická data	
Tepelný výkon	4451 MW_t
Elektrický výkon	1700 MW_e
Počet smyček	4
Palivo	UO₂/MOX
Obohacení U-235	do 5%

Dnes není možné určit, jaký typ reaktoru je nejvhodnější pro nový zdroj v České Republice, bez výběrového řízení, které bude zaměřeno na tuto problematiku. Nicméně pro návrh sekundárního oběhu v programu Thermoflow jsem se rozhodl použít variantu s reaktorem EU-APWR. Myslím si, že pokud jsou ve Státní energetické koncepci uvažovány dva možné bloky, pak by se měla využít ta varianta, která disponuje nejvyšším výkonem. Jedná se o krok správným směrem z hlediska budoucí spotřeby, která bude neustále vzrůstat. Navíc u staveb takového charakteru platí, že čím vyšší instalovaný výkon postavíme, tím levněji nás vyjde stavba v přepočtu na 1 MW_e. Dále projekt EU-APWR disponuje velice vysokou tepelnou účinností v porovnání s ostatními projekty.

3. Návrh sekundárního okruhu v programu Thermoflow

3.1. O programu Thermoflow

Již od roku 1987 je program Thermoflow nástroj pro návrhy v oboru energetiky a kombinované výroby tepla a elektřiny. Prvním nástrojem byl GT PRO, který se rozšířil do celého světa a stal se nejpoužívanějším programem pro návrh elektráren s plynovou turbínou. Thermoflow do roku 2008 používalo více jak 2000 uživatelů ve více jak 70 zemích světa. V dnešní době je program Thermoflow dodáván ve dvou specifikacích a to: Specifická aplikace, kde je program zaměřen na určitou oblast (např. jeden druh elektráren) a Plně flexibilní specifikace, která je obecnější a lze použít jakýkoliv model systému. Následující návrh sekundárního okruhu byl navržen ve specifikaci ST PRO.

3.2. Úvodní práce s programem

Než začneme navrhovat samotný energetický systém, je užitečné projít některá nastavení a upravit je podle našich požadavků. Takovým nastavením je výběr jednotek, ve kterých se bude výpočet odehrávat. Na výběr je několik variant jednotek. V našem návrhu budeme používat jednotky soustavy SI, pouze tlak bude uváděn v barech. Jednotky lze měnit i v průběhu celého návrhu.

Pokud máme zvoleny jednotky, přejdeme k vlastnímu návrhu. V levé části okna se nachází tzv. navigátor (viz obr. 5), ve kterém jsou jednotlivá menu návrhu a který nám pomáhá se v návrhu orientovat. Po spuštění programu je aktivní menu „New Session“, kde si vybereme, jaký typ energetického systému navrhujeme, jaký mód návrhu zvolíme, kolik jednotek a jakého výkonu elektrárna obsahuje (ne v případě jaderného cyklu), to jestli navrhujeme na nejvyšší účinnost nebo na nejnižší náklady a nakonec frekvenci generátoru.

V našem případě je volen systém jaderného cyklu, v módu prostého návrhu bez ekonomických výpočtů, návrh bude uvažován pro nejvyšší účinnost a frekvenci generátoru 50 Hz.

3.3. Základní návrh

Pokud jsme nastavili počáteční parametry v menu „New Session“, nic nám nebrání v pokračování návrhu. V navigátoru se přepneme do menu „Start Design“, kde nastavíme typ parní turbíny a pohon napájecích čerpadel parogenerátoru.

Pro naše řešení použijeme turbínu skládající se z vysokotlakého a nízkotlakého dílu, které jsou umístěny na jednom hřídeli. Otáčky turbíny zvolíme 3000 ot/min.

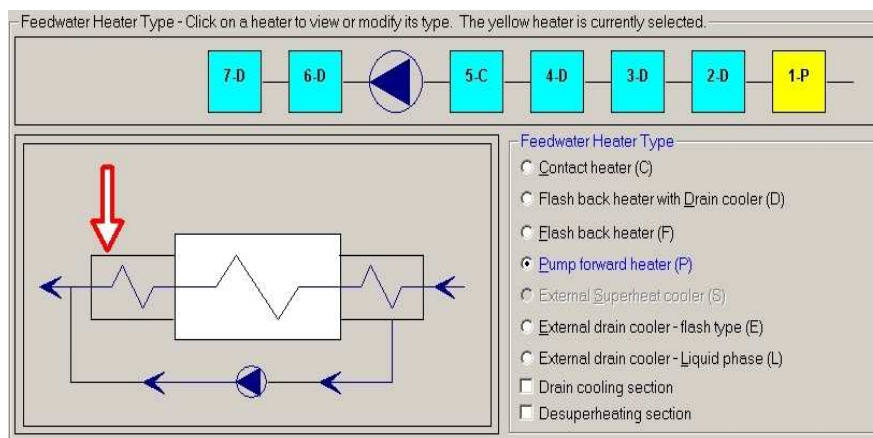


Obr. 5. Navigátor

3.4. Základní návrh systému regenerace a tepelné úpravy vody

Návrh systému regenerace a tepelné úpravy vody je v navigátoru reprezentován v pořadí třetím menu, které nese název „FWH Selection“. Program zde nabízí možnost automatického a uživatelského návrhu. V uživatelském návrhu se volí typy, počet a uskupení tepelných výměníků a čerpadel a módy související s konečnou teplotou, která ze systému odchází. Konkrétní hodnoty, které vstupují do výměníků, se zadávají až v další části návrhu.

Náš návrh vychází ze systému regenerace a tepelné úpravy vody reaktoru US-APWR. Bylo zvoleno osm zařízení. Zařízení jdou po řadě za sebou takto: jeden čerpadlový ohřívač, tři protiproudé výměníky s chladičem odtoků, jeden kontaktní ohřívač, jedno čerpadlo a dva protiproudé výměníky s chladičem odtoků (viz obrázek 6). V módu souvisejícím s konečnou teplotou budeme konečnou teplotu předepisovat.



Obr. 6. Systém regenerace a tepené úpravy vody

3.5. Návrh kritérií elektrárny

Další menu „Plant Criteria“ je první složené menu. Obsahuje totiž osm karet. V každé kartě se zadávají kritéria charakterizující elektrárnu.

První kartou je karta „Site and Cooling system“. Tato karta nás vybízí k zadání okolních podmínek elektrárny, jako jsou průměrná okolní teplota, nadmořská výška, atmosférický tlak, průměrná relativní vlhkost okolního vzduchu, průměrná teplota mokrého teploměru. Program disponuje databází lokací po celém světě, kde jsou již tyto hodnoty uloženy a pokud plánujeme postavit elektrárnu na některém takovém místě, stačí si jen vybrat ze seznamu. Dále je nutno vyplnit teplotu chladicí vody a typ chladicího systému elektrárny.

Pro náš návrh byly doplněny hodnoty pro lokaci Temelín, jelikož s největší pravděpodobností bude v budoucnu nový jaderný zdroj v ČR umístěn právě tam. Systémem chlazení oběhu bude chladicí věž s přirozeným tahem typu Itterson.

<i>Průměrná teplota okolí</i>	15 °C
<i>Nadmořská výška</i>	503,3 m
<i>Atmosférický tlak</i>	0,9544 bar
<i>Průměrná relativní vlhkost</i>	70 %
<i>Prům. tepl. vlhk. teploměru</i>	11,85 °C

Druhá karta slouží k nastavení odběrů páry a k nastavení externích zdrojů páry. Náš návrh řeší čistě kondenzační režim, proto nemá žádné odběry páry pro provoz mimo elektrárnu. Neuvažujeme ani externí zdroje páry.

Třetí karta řeší tlakové ztráty v potrubí a ztráty entalpie. Zde necháme program nastavit ztráty automaticky, jelikož je velice obtížné získat potřebné informace.

Čtvrtá a poslední karta, do které můžeme nastavit informace v tomto menu, se zabývá vlastní spotřebou elektrárny. Vlastní spotřeba jaderné elektrárny Temelín je asi sedm procent instalovaného výkonu. Proto do spotřeby doplníme stejný údaj přepočtený na výkon reaktoru EU-APWR.

Vlastní spotřeba elektrárny 110400 kW

Další karty jsou pro jaderný cyklus nepřístupné a není možné v nich upravovat údaje, proto se zde jimi nebudeme dále zabývat.

3.6. Návrh systému chlazení

Menu „Cooling System“ je opět rozděleno na několik karet. Nejprve je třeba navrhnout parametry kondenzátoru. Jedním z parametrů je tlak v kondenzátoru. Tlak je možno zapsat dvěma způsoby, jedním způsobem je zápis tlaku v jednotkách bar a druhým způsobem je zápis tlaku v jednotkách cm Hg. Dalším parametrem kondenzátoru je jeho výška, brána k hladině vody v chladicí věži.

<i>Tlak v kondenzátoru</i>	0,088 bar (6,608 cmHg)
<i>Výška kondenzátoru</i>	3,048 m

Program nám vypočte z parametrů kondenzátoru a parametrů okolního prostředí teplotu vody vycházející z kondenzátoru a teplotu vody do kondenzátoru vstupující. Tyto teploty je možné ovlivnit zadáním rozdílu mezi jednotlivými teplotami, který nám ale program sám nabídne.

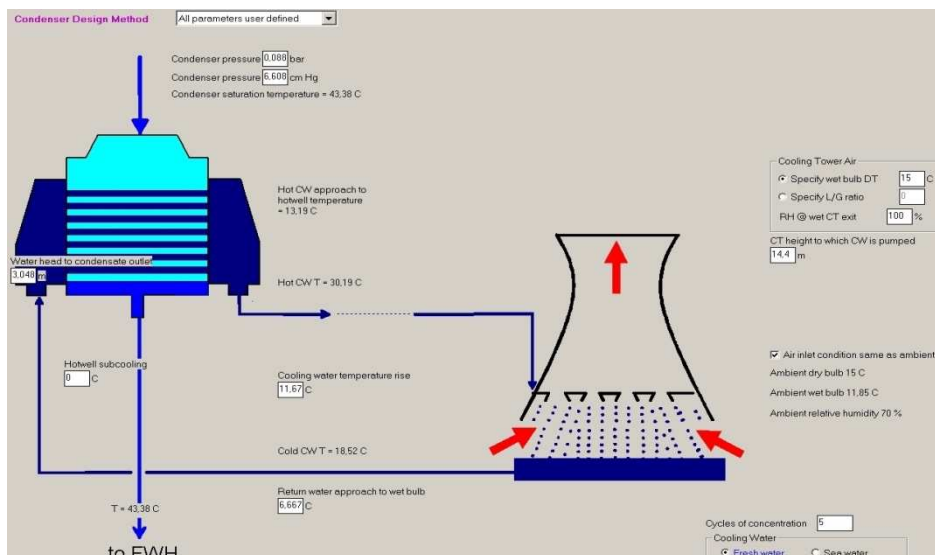
Rozdíl teplot

11,67 °C

Lze také nastavit parametry chladicí věže, nastavujeme výšku, do které je v chladicí věži čerpána voda a specifikaci chlazení ve věži. Na výběr je i druh vody. Vše je názorně zpracováno v přehledném schématu (viz obrázek 7).

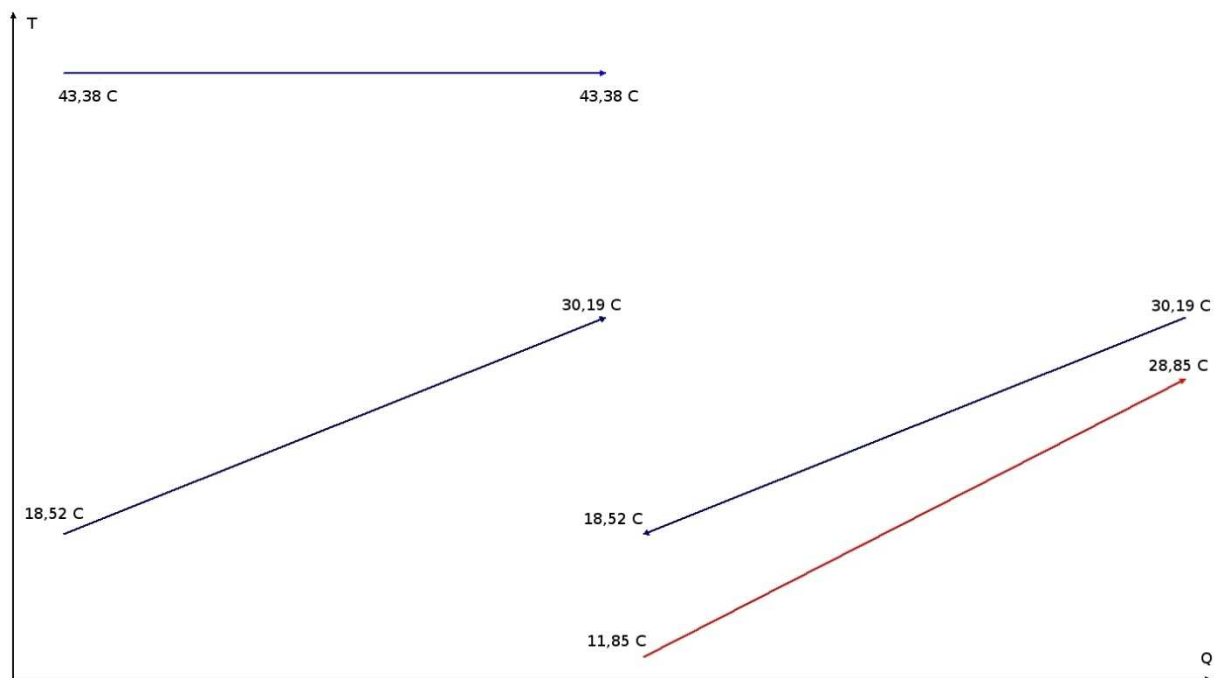
Výška čerpané vody

14,4 m



Obr. 7. Schéma chladicího systému

Dále v menu „Cooling System“ najdeme T-Q diagram znázorňující průběhy teplot v jednotlivých fázích cirkulace vody (viz obrázek 8).



Obr. 8. T-Q diagram chladicího oběhu

První dvojice čar znázorňuje průběhy teplot v kondenzátoru. Teplo je přijímáno chladicí vodou, jejíž teplota vzrůstá až na 30,19 °C. Druhá dvojice čar představuje průběhy teplot v chladicí věži. Vzduch proudící chladicí věží je ohříván a chladicí voda naopak ochlazována. Konečné teploty tekutin jsou patrné z obrázku.

Taktéž je zde detailní nastavení kondenzátoru týkající se konstrukce. Zde nastavíme materiál kondenzátoru, druh trubek a jejich parametry. Materiál používaný u kondenzátoru jaderných elektráren je titan. Zvolíme bezešvý druh trubek. Program vyplní parametry trubek, aby byl zajištěn dobrý přenos tepla. Také je třeba nastavit, jaké prvky jsou použity pro vytvoření podtlaku při rozjždění turbíny. Volíme ejektor páry, který je používán v jaderné elektrárně Temelín.

<i>Materiál trubek</i>	<i>titan</i>
<i>Druh trubek</i>	<i>bezešvé</i>
<i>Vnější průměr</i>	<i>25,4 mm</i>
<i>Tloušťka stěny</i>	<i>0,7112 mm</i>
<i>Tepelná vodivost</i>	<i>21,63 W/m·C</i>
<i>Rychlost vody v trubce</i>	<i>2,367 m/s</i>

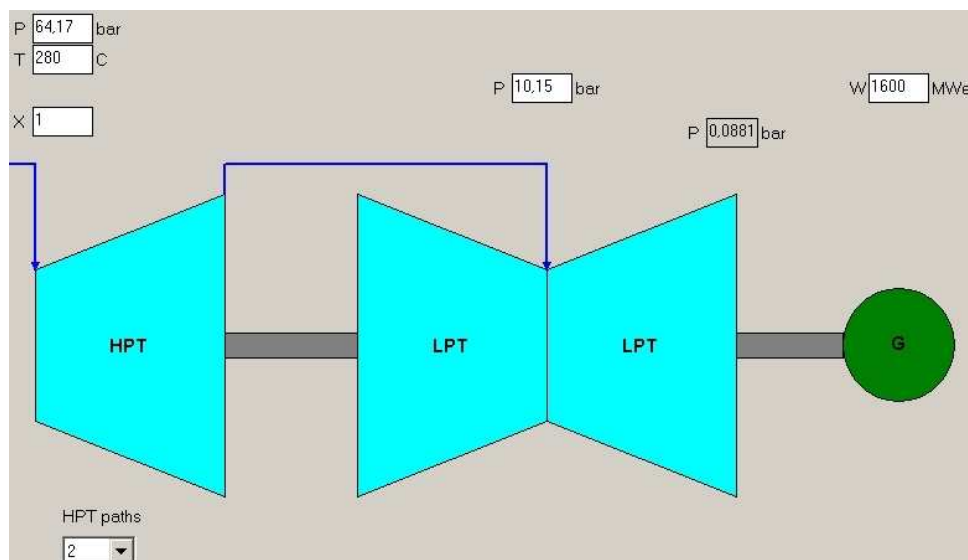
Již zbývá nastavit ztráty v kondenzátoru, které nám program nabídne v závislosti na zvoleném materiálu a parametrech kondenzátoru.

3.7. Návrh základních parametrů turbosoustrojí

Následuje návrh základních parametrů turbosoustrojí. V menu „ST Inputs“, které je opět rozděleno do několika karet, nejprve nastavujeme, jak už název napovídá, vstupní parametry na turbíně. Před zadáváním číselných parametrů je potřeba upřesnit, jaký výkon budeme požadovat. V našem případě budeme požadovat zadání elektrického výkonu na turbogenerátoru. Dále již zadáváme parametry vstupující do turbíny. V první řadě parametry veličin vstupujících do vysokotlakého dílu turbíny: tlak, teplota a suchost vodní páry. Jediným parametrem předepsaným pro vstup do nízkotlakého dílu je tlak. Ještě v první kartě menu nastavíme výkon, kterého chceme dosáhnout na turbogenerátoru.

<i>Tlak páry pro VT díl</i>	<i>64,17 bar</i>
<i>Teplota páry pro VT díl</i>	<i>280 °C</i>
<i>Suchost vodní páry</i>	<i>1</i>
<i>Tlak páry pro NT díl</i>	<i>10,15 bar</i>
<i>Výkon na TG</i>	<i>1600 MWe (*)</i>

(* v tomto nastavení je číselná hodnota 1600 největší, kterou program Thermoflow povoluje nastavit.)



Obr. 9. Návrh turbosoustrojí

V dalších kartách se nastavují ztráty tlaků na ventilech při vstupu do turbíny, které program sám navrhne, dále také ztráty entalpií, nastavení generátoru, jako je systém chlazení, ztráty na jednotlivých zařízeních generátoru a některé jeho faktory. Toto nastavení je také navrženo programem. Navrhuje se zde také tvar výpusti páry do kondenzátoru a nastavení ventilů turbíny.

3.8. Návrh odběrů páry z turbosoustrojí a stupňů turbíny

Menu „ST Ports/Groups“ umožňuje stanovit počet odběrů z každého dílu parní turbíny a nastavit jejich tlaky. Odebraná pára z turbíny slouží k regeneraci a k tepelné úpravě vody, základní nastavení regenerace a tepelné úpravy vody je popsáno v bodě 3.4. Pro přehřívání je vyveden jeden odběr (0. odběr) páry ještě před vstupem do turbíny. Z vysokotlakého dílu parní turbíny budeme odebírat páru třemi parními odběry (program Thermoflow nedovolil snížení počtu odběrů na vysokotlaké části turbíny, proto je 3. odběr nevyužitý).

Tlak 0. odběru	64,17 bar
Tlak 1. odběru	34,07 bar
Tlak 2. odběru	20,50 bar
Tlak 4. odběru	10,56 bar

Další odběr je vyveden za druhým přehřívákem, ještě před vstupem páry do nízkotlaké části turbíny.

Tlak 5. odběru	10,15 bar
----------------	-----------

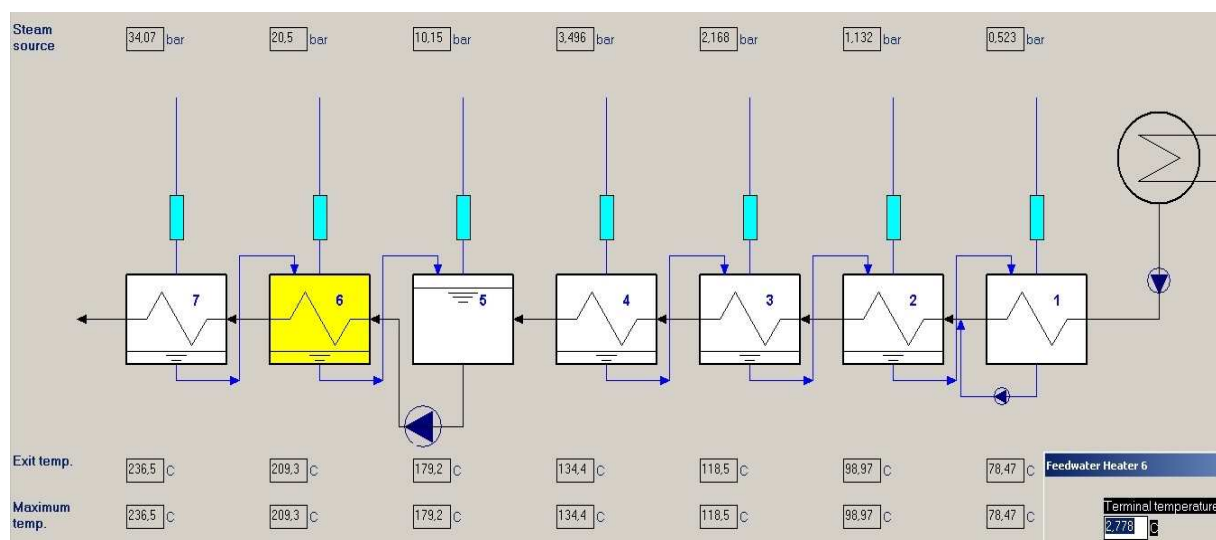
Z nízkotlaké části turbíny jsou vyvedeny celkem čtyři odběry.

Tlak 6. odběru	3,496 bar
Tlak 7. odběru	2,168 bar
Tlak 8. odběru	1,132 bar
Tlak 9. odběru	0,523 bar

Dále se v menu řeší přítomnost separátorů vlhkosti. Kde jsme zvolili instalaci separátorů vlhkosti a odvod vlhkosti do regeneračního systému. V nastavení stupňů turbíny nastavíme pouze pro první stupeň počet vstupních ventilů a pro ostatní stupně zvolíme automatické nastavení pro nejvyšší účinnost.

3.9. Návrh systému regenerace a čerpadel

Menu „FWH/Pumps“ vychází z návrhů v bodech 3.4. a 3.8., které spojí v celek a vytvoří systém regenerace. K použitým zařízením pro regeneraci program připojí odběry páry z turbíny a vypočte



Obr. 10. Schéma systému regenerace s hodnotami teplot

teploty, které bude mít voda opouštějící jednotlivé výměníky. V první kartě je schéma zapojení parních odběrů do jednotlivých výměníků. Ve druhé je toto schéma zjednodušeno a doplněno o vypočtené teploty (viz obrázek 10).

Ve třetí kartě je možno nastavit parametry jednotlivých výměníků. Jako příklad uvedeme hodnoty těchto parametrů pouze pro první výměník.

<i>Materiál trubek</i>	<i>nerezová ocel</i>
<i>Vnější průměr</i>	<i>19,05 mm</i>
<i>Tloušťka stěny</i>	<i>1,245 mm</i>
<i>Tepelná vodivost (149 °C)</i>	<i>14,88 W/m·C</i>
<i>Rychlost vody v trubce</i>	<i>2,896 m/s</i>

Další karta řeší umístění napájecího regulačního ventilu a další parametry jako jsou např. ztráta tlaku na regulačním ventilu nebo v jaké výšce se nachází odvzdušňovač systému. V poslední kartě tohoto menu jsou diagramy jednotlivých čerpadel a nastavení čerpadlových stanic. Všechna čerpadla jsou navržena jako vertikální, kromě napájecích čerpadel parogenerátoru, která jsou navržena jako vícestupňová odstředivá. Počet čerpadel ve stanici se volí vždy tak, aby žádné nepracovalo na 100%. To je z důvodu zálohy. Kdyby se nějaké čerpadlo porouchalo a vyžádalo si odstavení, zvýší se výkon u ostatních čerpadel, a tím se vykryje ztráta čerpadla. Nastavujeme také účinnost a otáčky čerpadel. Uvedeme příklady nastavení pro hlavní cirkulační čerpadla.

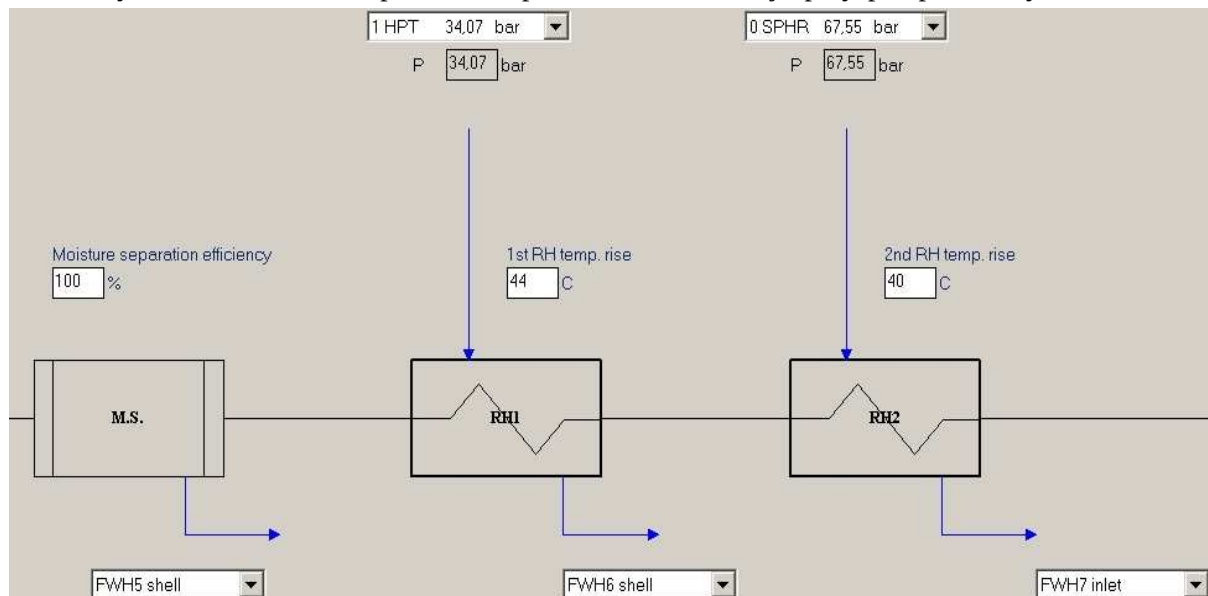
<i>Typ čerpadla</i>	<i>vertikální</i>
<i>Počet čerpadel na stanici</i>	<i>3</i>
<i>Nominální kapacita čerp.</i>	<i>50 %</i>
<i>Štítková účinnost čerp.</i>	<i>97 %</i>
<i>Štítkové otáčky</i>	<i>600 ot/min</i>

3.10. Doplnující návrhy

Menu „Misc. Streams“ řeší přídatné zdroje páry a vody. Náš návrh však s těmito zdroji nepočítá. Zajímavá z hlediska našeho návrhu je pouze poslední karta, kde nastavíme ejektor páry na tlak 10,56 bar.

3.11. Návrh systému přehřívání a separace vlhkosti

Poslední menu našeho návrhu nese název „Nuclear Cycle“, kde se nastavují parametry přehříváků a separátoru vlhkosti. Přehříváky a separátor vlhkosti se nacházejí mezi vysokotlakým dílem a nízkotlakým dílem. Nastavení parametrů spočívá v určení zdrojů páry pro přehříváky a směrů, kam



Obr. 11. Schéma systému přehřívání a separace vlhkosti

tato pára po předání tepelné energie bude odcházet a rozdíl teplot, o jaký se ohřeje pára vycházející z vysokotlakého dílu. Nastavení cest: vlhkost ze separátoru vlhkosti směrujeme do, v pořadí pátého, výměníku regeneračního systému, zdroj páry pro první přehřívák nastavíme na první odběr páry z vysokotlakého dílu turbíny a použitou páru budeme směřovat do, v pořadí šestého, výměníku regeneračního systému, zdroj páry pro druhý přehřívák nastavíme na odběr z parovodu a použitou páru

budeme směřovat do, v pořadí sedmého, výměníku regeneračního systému. Náhorně zobrazeno v obrázku 10.

Rozdíl teplot v 1. přihříváku	44 °C
Rozdíl teplot v 2. přihříváku	40 °C

V další kartě tohoto menu je možno nastavit ztráty v systému přihrívání a separace vlhkosti. Jakmile vyplníme požadované návrhové parametry, přejdeme k výpočtu. V navigátoru stiskneme tlačítko „Compute“ a vyčkáme na vypsání výsledků.

4. Parametry navrženého sekundárního okruhu

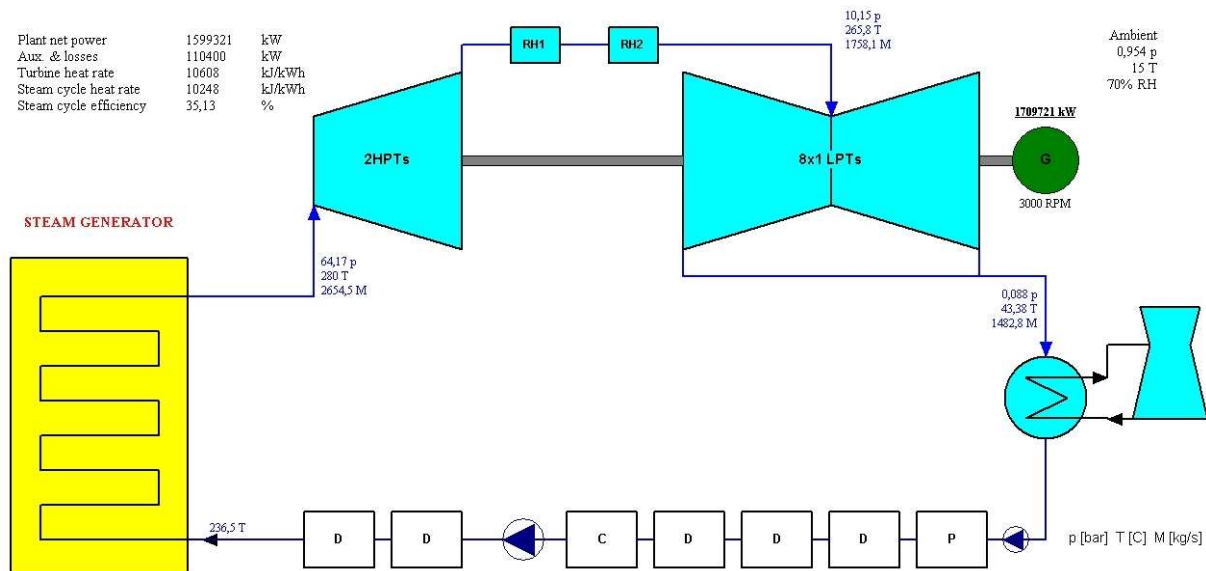
Po výpočtu je v navigátoru možnost vybrat výsledky v tabulkové a obrázkové podobě. Tabulky obsahují číselné údaje o každém zařízení a obrázkové výsledky zobrazují různá schémata a diagramy. Za zmínku stojí i menu s názvem „Off Design“, ve kterém můžeme, v případě nespokojenosti, předefinovat některé již předem navržené parametry.

4.1. Základní parametry sekundárního oběhu

Hned v první tabulce nalezneme základní parametry elektrárny.

Výkon turbogenerátoru	1709,721 MW
Čistý výkon elektrárny	1599,321 MW
Spotřeba tepla turbínou	10608 kJ/kWh
Spotřeba tepla parního cyklu	10248 kJ/kWh
Účinnost parního cyklu	35,13 %

Celý oběh je navíc znázorněn graficky.



Obr. 12. Schéma sekundárního oběhu

Z obrázku 11 lze vyčíst parametry páry v jednotlivých úsecích sekundárního oběhu. Z parogenerátoru vychází ostrá pára, která míří přímo do vysokotlaké části parní turbíny, kde odevzdá část své tepelné energie. Ostrá pára vstupující do vysokotlaké části parní turbíny má následující parametry:

Tlak	64,17 bar
Teplota	280 °C
Hmotnostní tok	2654,5 kg/s

Z vysokotlaké části parní turbíny je pára vedena do separátoru vlhkosti, kde se zbaví kapiček vody, které by mohly způsobit poškození lopatek nízkotlaké části parní turbíny. Následuje tepelná úprava páry ve dvou přehřívácích. Pára opouštějící přehřívaky vstupuje do nízkotlaké části parní turbíny, kde odevzdá zbytek své tepelné energie. Parametry páry:

Tlak 10,15 bar
Teplota 265,8 °C
Hmotnostní tok 1758,1 kg/s

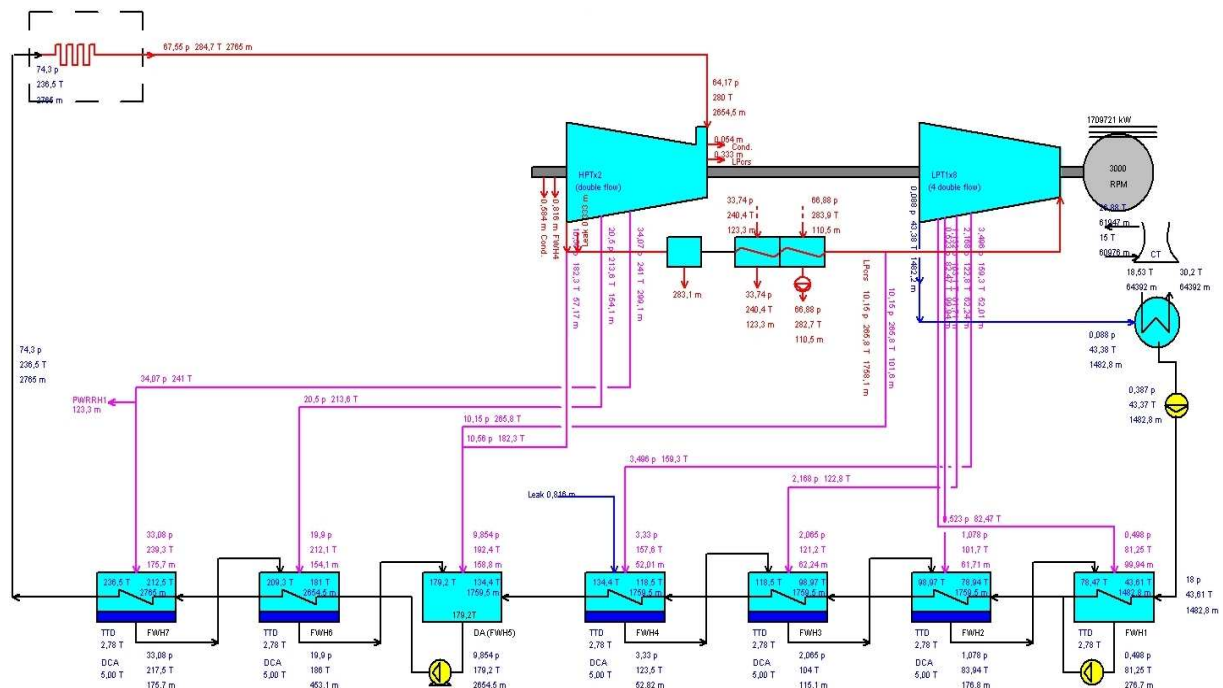
Z nízkotlaké části parní turbíny proudí pára do kondenzátoru, kde odevzdá nevyužitelný zbytek své energie a přemění se na vodu. Tato voda je čerpána z kondenzátoru s parametry:

Tlak 18 bar
Teplota 43,6 °C
Hmotnostní tok 1482,8 kg/s

Po odčerpání z kondenzátoru je voda hnána do systému regenerace, kde se v jednotlivých tepelných výměnících postupně ohřívá. Po průchodu všemi sedmi výměníky tepla, proudí voda zpět do parogenerátoru, kde se přemění na ostrou páru a oběh se tak uzavírá. Parametry vody před vstupem do parogenerátoru:

Tlak 74,3 bar
Teplota 236,5 °C
Hmotnostní tok 2765 kg/s

Podrobnější informace lze vyčíst z detailního schématu sekundárního oběhu (viz obrázek 13).



Obr. 13. Detailní schéma sekundárního oběhu

4.2. Oběh chladicí věže

Účelem chladicího oběhu je odebrání tepla páry, které se uvolňuje při skupenské změně a umožnit tak kondenzaci páry. Díky cirkulaci vody, která páru ochlazuje je tento proces umožněn. Pára kondenzuje v kondenzátoru a odevzdává chladicí vodě tepelnou energii. Chladicí voda se ohřeje a je směřována do chladicí věže. Parametry chladicí vody při opuštění kondenzátoru:

Tlak 0,954 bar
Teplota 30,2 °C
Hmotnostní tok 64392 kg/s

V chladicí věži je chladicí voda rozstříkována a chlazena proudem vzduchu, který chladicí věž nasává. Parametry nasávaného vzduchu jsou

<i>Tlak</i>	<i>0,954 bar</i>
<i>Teplota</i>	<i>15 °C</i>
<i>Hmotnostní tok</i>	<i>60976 kg/s</i>

Tento vzduch je rozstřikovanou vodou ohříván a směřován k hornímu otvoru chladicí věže. Vzduch opouští chladicí věž při parametrech:

<i>Tlak</i>	<i>0,954 bar</i>
<i>Teplota</i>	<i>26,88 °C</i>
<i>Hmotnostní tok</i>	<i>61947 kg/s</i>

Rozstřikovaná voda je čerpána z chladicí věže do kondenzátoru, kde se opět ohřeje a cyklus se tak opakuje. Parametry vody:

<i>Tlak</i>	<i>0,954 bar</i>
<i>Teplota</i>	<i>18,53 °C</i>
<i>Hmotnostní tok</i>	<i>64392 kg/s</i>

4.4. Práce parní turbíny

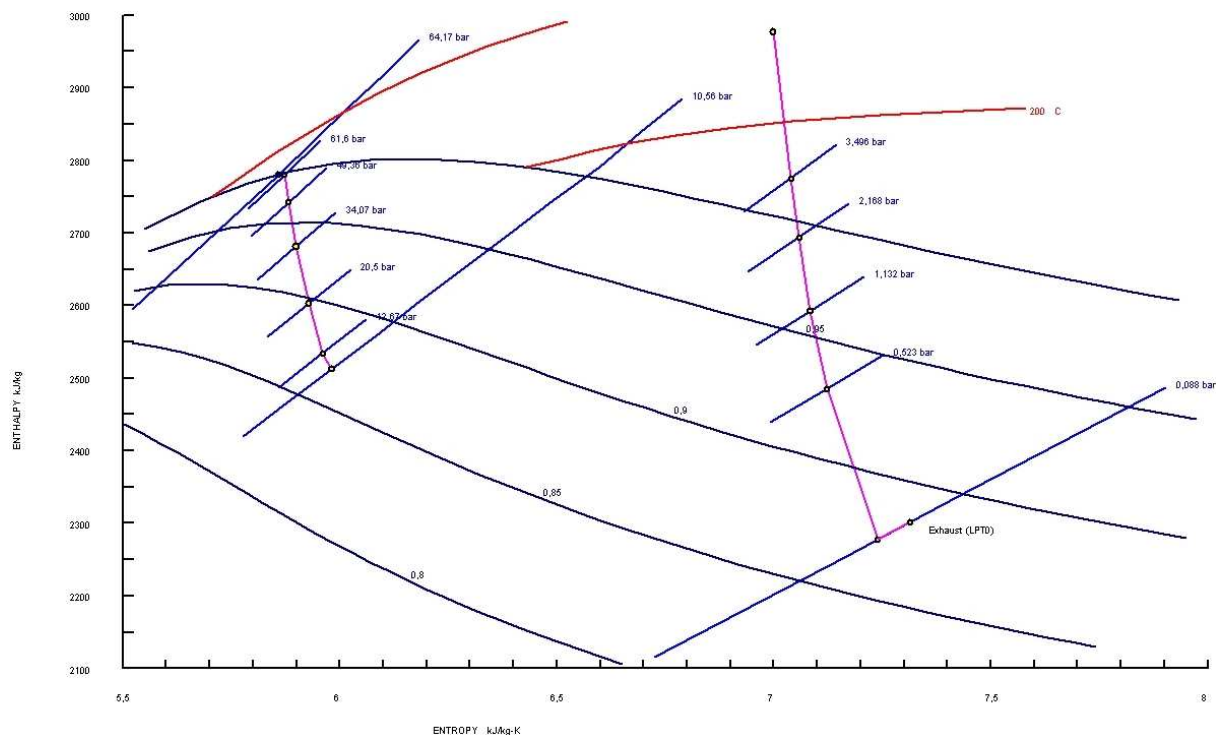
Parní turbína má za úkol přeměnit tepelnou energii páry na mechanickou práci. Děje se tak ve dvou částech parní turbíny, vysokotlaké a nízkotlaké.

<i>Mechanický výkon</i>	<i>1749,375 MW</i>
<i>Mechanické ztráty</i>	<i>17,692 MW</i>
<i>Ztráty generátoru</i>	<i>21,963 MW</i>
<i>Čistý výkon generátoru</i>	<i>1709,721 MW</i>

Turbína je navrhována na otáčky 3000 ot/min. Pro instalovaný výkon, na jaký sekundární oběh navrhujeme, však žádný výrobce takovou turbínu nenabízí. Ovšem technologický vývoj jde stále dopředu a je snaha navrhnout takovou turbínu, která by takové otáčky při daném výkonu zvládla. Předpokládáme tedy, že než bude stavba nového jaderného zdroje realizována, řada výrobců již bude takovou turbínu nabízet na trhu.

4.3. Oběh parní turbíny

Oběh parní turbíny je v programu Thermoflow znázorněn v i – s diagramu (viz obrázek 12).



Obr. 13. Schéma sekundárního oběhu

Na obrázku jsou patrné expanze páry ve vysokotlaké i nízkotlaké části parní turbíny (fialové křivky). Izobary protínající expanzní křivky představují tlaky, při kterých pára v turbíně vstupuje do jednotlivých stupňů turbíny. Po první expanzi následuje přihřívání při konstantním tlaku (viz izobara 10,56 bar).

5. Závěr

Elektrická energie je potřebná v každém odvětví lidské činnosti. Její spotřeba roste, abychom udrželi náš vývoj, je dobré mít elektrické energie dostatek. Proto je užitečné seznámit se s možnostmi energetických systémů a jejich funkcemi. K těmto poznatkům nám mohou pomoci i nástroje zabývající se designem a projektováním takových systémů. Mezi takové nástroje patří program ThermoFlow, s jehož pomocí jsme navrhli sekundární oběh pro jaderný reaktor EU-APWR. Program ThermoFlow je software vyžadující mnoho informací pro návrh energetického zařízení, ale s ohledem na složitost takových zařízení je to pochopitelné. Pomocí ThermoFlow jsme mohli navrhnout sekundární oběh pro jaderný zdroj, který by mohl v budoucnu v České Republice vyrábět elektrickou energii. V našem návrhu jsme se nechali inspirovat alternativou reaktoru určenou pro USA, US-APWR.

Výsledkem našeho návrhu je asi osmdesát stran tabulek a schémat s nejrůznějšími technickými daty, podrobně popisující celý navržený systém zařízení. Podařilo se nám navrhnout takové energetické zařízení, které je schopno do elektrické sítě dodávat výkon 1599,3 MW, při vlastní spotřebě 110,4 MW. Toto zařízení pracuje s vysokou účinností 35,13%. Dokázali jsme využít potenciál moderního reaktoru a dosáhnout hrubého výkonu 1709,7 MW, což je dokonce o něco málo více než výrobce uvádí. I když se jedná o předběžný návrh, je z údajů patrné, že je úspěšný. Nicméně v budoucnu bychom chtěli pokračovat v optimalizaci našeho návrhu, zpřesnit a doplnit vstupní informace, které by nám pomohly více se přiblížit reálnému energetickému zařízení.

Po provedeném návrhu a práci v programu ThermoFlow, se nám podařilo nejen navrhnout energetický systém, ale také porozumět složitostem takového systému a získat zkušenosti a znalosti, které můžeme využít i v jiných oborech.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory výzkumného centra MŠMT 1M06059 – Progresivní technologie a systémy pro energetiku.

Seznam použitého značení

Délkové rozměry	l	[mm]
Entalpie	h	[kJ/kg]
Entropie	S	[kJ·kg ⁻¹ ·C ⁻¹]
Hmotnostní tok	m	[kg/s]
Otáčky	n	[ot/min]
Rychlost	v	[m/s]
Tepelná vodivost	λ	[W·m ⁻¹ ·C ⁻¹]
Teplota	T	[°C]
Teplo	Q	[kJ]
Tlak	p	[bar]
Výkon	P	[MW]

Použitá literatura

- [1] ŘIBŘID J.: Nový jaderný zdroj v lokalitě Temelín včetně vyvedení výkonu do rozvodny Kočín, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., 2008
- [2] www.areva-np.com
- [3] www.westinghouse.com
- [4] www.mhi.co.jp/en/
- [5] www.thermoflow.com
- [6] www.nrc.gov/reactors/new-reactors/