

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2023

**DOMINIK
FRANTIŠEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **František** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **473726**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Funkční model primárního okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem

Název diplomové práce anglicky:

Functional model of the primary loop of a nuclear power plant with a pressurized water reactor

Pokyny pro vypracování:

Úvodní rešeršní část práce bude obsahovat popis jednotlivých komponent primárního okruhu JE, popis způsobu měření příslušných technologických veličin a základní způsoby jejich regulace.

Hlavním cílem práce bude vytvořit funkční model primárního okruhu jaderné elektrárny pro experimentální činnosti a výukové účely. Zařízení bude pracovat s tlaky do 0.5MPa a tomu odpovídajícími teplotami primárního chladiva (vody).

Systém bude obsahovat vhodně konstrukčně provedené systémy jako reaktor (s elektrickým topením), kompenzátor objemu, parogenerátor a oběhové čerpadlo. Celý okruh bude osazen vhodnými měřicími a ovládacími prvky, které bude možné číst a řídit prostřednictvím řídicí desky Arduino a připojeného PC přes USB.

Seznam doporučené literatury:

Heřmanský B., Jaderné elektrárny, 1981, SNTL - Státní nakladatelství technické literatury

Todreas Neil E and Mujid S Kazimi. Nuclear Systems. Volume 1 Thermal Hydraulic Fundamentals. 2nd ed. Taylor & Francis 2011.

HEZOUČKÝ, František, Pavel KAŇOVSKÝ a Ján NAŇO. Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Rubek J., Řízení a automatizace jaderných energetických zařízení, učební text, FS ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v příloženém seznamu použitých zdrojů, na který odkazuji na konci každé kapitoly.

V Praze dne:

Podpis:

Anotační list

Jméno autora:	Dominik František
Název práce:	Funkční model primárního okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem
Thesis title:	Functional model of the primary loop of a nuclear power plant with a pressurized water reactor
Akademický rok:	2022/2023
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí práce:	Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 88 Počet obrázků: 53 Počet tabulek: 5 Počet příloh: 6
Klíčová slova:	model, reaktor, okruh, měření, parogenerátor, řízení
Keywords:	model, reactor, loop, measurement, steam generator, control
Abstrakt:	Cílem práce bylo sestavit funkční model primárního okruhu jaderné elektrárny ve školních laboratořích pro výukové účely. Tvorba obnášela volbu základních parametrů, návrh konstrukce všech potřebných komponent a potrubí a následně jejich montáž. Součástí je měření a řízení termofyzikálních veličin pomocí ovládacího programu v počítači, komunikujícího prostřednictvím řídicí desky Arduino. Zdrojem tepla v reaktoru je elektrické topné těleso o výkonu 4 500 W. Pracovní přetlak v okruhu jsou 4 bary a maximální dosahované teploty až 150 °C. V parogenerátoru lze generovat páru i za mírného přetlaku cca 2 barů.
Abstract:	The goal of the work was build a functional model of the primary circuit of a nuclear power plant in school laboratories for teaching purposes. The creation included the choice of basic parameters, the construction design of all the necessary components and pipelines, and then their assembly. The model includes the measurement and control of thermophysical quantities using a control program on a computer, communicating via the Arduino control board. The source of heat in the reactor is an electric heating element with an output of 4 500 W. The working overpressure in the circuit is 4 bars and the maximum temperature reached is up to 150 °C. In a steam generator, steam can be generated even at a slight overpressure about 2 bars.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Janu Štěpánkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, pomoc a cenné rady, které mi věnoval. Dále chci poděkovat panu Pavlu Linkovi za pomoc s řešením nesnází ve školních laboratořích a panu Petru Střížovi za výrobu všech potřebných dílů a komponent. Poděkování patří i Ing. Vojtěchu Smolíkovi za pomoc s CFD modelováním. Na závěr děkuji své rodině a blízkým za podporu během realizace díla a po dobu celého studia.

Obsah

Seznam použitých symbolů	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek.....	11
Úvod.....	12
1. Primární okruh jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem.....	13
1.1. Hlavní komponenty primárního okruhu	13
1.1.1. Reaktor.....	14
1.1.1.1. Konstrukce reaktoru	14
1.1.1.2. Aktivní zóna	15
1.1.2. Parogenerátor	16
1.1.2.1. Konstrukce parogenerátoru	16
1.1.2.2. Tepelný výpočet parogenerátoru	18
1.1.3. Kompenzátor objemu.....	20
1.1.3.1. Konstrukce kompenzátoru objemu.....	20
1.1.3.2. Systém kompenzace objemu	21
1.1.4. Hlavní cirkulační čerpadlo.....	22
1.1.4.1. Konstrukce hlavních cirkulačních čerpadel.....	23
1.1.4.2. Hydraulické charakteristiky čerpadel	24
1.2. Měření technologických veličin.....	26
1.2.1. Základní principy měření.....	26
1.2.1.1. Měření tlaku.....	26
1.2.1.2. Měření teploty	29
1.2.1.3. Měření průtoku	31
1.2.1.4. Měření neutronového toku	33
1.2.2. Měření na primárním okruhu	33
1.2.2.1. Systémy měření na primárním okruhu	34
1.2.2.2. Měření tepelného výkonu reaktoru.....	35
1.3. Provoz a řízení jaderné elektrárny	36
1.3.1. Uvádění elektrárny do provozu.....	36
1.3.1.1. Komplexní zkoušení.....	36
1.3.1.2. Fyzikální spouštění	36
1.3.1.3. Energetické spouštění.....	36
1.3.2. Provozní režimy jaderných reaktorů.....	37
1.3.2.1. Normální provoz.....	37
1.3.2.2. Abnormální provoz.....	37
1.3.2.3. Havarijní podmínky.....	38
1.3.3. Regulační program.....	38
1.3.3.1. Regulace na konstantní střední teplotu primárního chladiva	39
1.3.3.2. Regulace na konstantní tlak páry v hlavním parním kolektoru.....	39
1.3.3.3. Regulace kombinovaná	40
1.3.4. Normální a abnormální přechodové režimy	40

1.3.4.1.	Ohřev primárního okruhu	41
1.3.4.2.	Vychlazování bloku	41
1.3.4.3.	Regulace výkonu bloku	42
1.3.4.4.	Výpadek hlavních cirkulačních čerpadel	43
1.3.4.5.	Rychlé odstavení reaktoru	43
2.	Model primárního okruhu	44
2.1.	Úvod	44
2.1.1.	Okrajové podmínky	45
2.2.	Výběr základních prvků	45
2.2.1.	Topné těleso	45
2.2.2.	Čerpadlo	46
2.3.	Konstrukční návrh komponent	48
2.3.1.	Reaktor	48
2.3.2.	Parogenerátor	50
2.3.3.	Kompenzátor objemu	52
2.3.4.	Potrubí a armatury	52
2.3.5.	Shrnutí základních parametrů	54
2.4.	Měření fyzikálních veličin	54
2.4.1.	Měření teploty	55
2.4.2.	Měření tlaku	56
2.4.3.	Měření průtoku	57
2.4.4.	Měření hladiny	58
2.4.5.	Měření výkonu	59
2.5.	Elektrické zapojení	60
2.5.1.	Silnoproudá část	60
2.5.2.	Slaboproudá část	62
2.6.	Programování	63
2.7.	Spouštění a měření	66
2.7.1.	Stanovení součinitele prostupu tepla parogenerátoru	66
2.7.2.	Dosažení varu v parogenerátoru	67
2.7.3.	Automatická regulace na požadovanou teplotu	69
2.7.4.	Ztráta chlazení v parogenerátoru	70
2.7.5.	Regulace tlaku	71
Závěr		72
Seznam použité literatury		74
Přílohy		78
Příloha 1		78
Příloha 2		81
Příloha 3		82
Příloha 4		83
Příloha 5		86
Příloha 6		87

Seznam použitých symbolů

Q	Tepelný výkon	(W)
\dot{m}	Hmotnostní průtok	(kg/s)
h	Měrná entalpie	(J/kg)
k	Součinitel prostupu tepla	(W/m^2K)
t	Teplota	($^{\circ}C$)
α	Součinitel přestupu tepla	(W/m^2K)
p	Tlak	(Pa)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	(W/mK)
ρ	Hustota	(kg/m^3)
l_v	Výparné teplo	(J/kg)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Primární okruh jaderné elektrárny [4].....	13
Obrázek 2: Reaktor VVER 1000 [4].....	15
Obrázek 3: Horizontální a vertikální parogenerátor [3].....	17
Obrázek 4: Kompenzátor objemu	20
Obrázek 5: Schéma systému kompenzace objemu [6]	21
Obrázek 6: Hlavní cirkulační čerpadlo [3]	22
Obrázek 7: Hydraulická charakteristika okruhu s čerpadlem [13]	24
Obrázek 8: Úplná charakteristika odstředivého čerpadla [14].....	25
Obrázek 9: Pojmy z oblasti měření tlaku [17]	26
Obrázek 10: Typy deformačních tlakoměrů [17]	27
Obrázek 11: Typy elektrických tlakoměrů [17][18]	28
Obrázek 12: Schéma termočlánku [21]	30
Obrázek 13: Rotametr [22]	32
Obrázek 14: Regulační režimy [28].....	39
Obrázek 15: Změna hlavních parametrů při ohřevu primárního okruhu [29]	41
Obrázek 16: Změna hlavních parametrů při vychlazování okruhu [29].....	42
Obrázek 17: Schéma modelu okruhu.....	44
Obrázek 18: Topné těleso v reaktoru [30]	45
Obrázek 19: Závislost změny entalpie na střední teplotě vody	46
Obrázek 20: Čerpadlo Alpha Solar 15-75 130 [31].....	47
Obrázek 21: Charakteristika čerpadla Alpha Solar 15-75 130 [31].....	47
Obrázek 22: Model reaktoru	49
Obrázek 23: Model parogenerátoru	51
Obrázek 24: Tlaková nádoba FESTO CRVZS-5 [33]	52
Obrázek 25: Potrubí a armatury použité na konstrukci modelu [34][35][36]	53
Obrázek 26: Označení prováděných měření na modelu	55
Obrázek 27: Modul MAX6675 pro termočlánek [40]	56
Obrázek 28: Tlakoměry použité na modelu [34][41]	56
Obrázek 29: Převodník proudového signálu na napěťový [42].....	57
Obrázek 30: Sestava pro měření průtoku [44][45]	57
Obrázek 31: Charakteristika měřící clony [44].....	58
Obrázek 32: Upravená charakteristika měřící clony.....	58
Obrázek 33: Proudový senzor [46]	59
Obrázek 34: Závislost výkonu topení v kompenzátoru objemu	60
Obrázek 35: Schéma silnoproudé části [31][46][47][48][49].....	61
Obrázek 36: Schéma slaboproudé části [50][51]	62
Obrázek 37: Vývojový diagram řídicí funkce	65
Obrázek 38: Časová změna parametrů při varu v parogenerátoru.....	68
Obrázek 39: Časová změna parametrů při automatické regulaci výkonu	69
Obrázek 40: Časová změna parametrů při ztrátě chlazení.....	70
Obrázek 41: Časová změna parametrů při regulaci tlaku	71

Obrázek 42: Snímek modelu.....	73
Obrázek 43: Výkres sestavy reaktoru	78
Obrázek 44: Rychlostní profil.....	79
Obrázek 45: Vektorový rychlostní profil.....	79
Obrázek 46: Teplotní profil	80
Obrázek 47: Výkres sestavy parogenerátoru	81
Obrázek 48: CAD model konstruované smyčky	82
Obrázek 49: Snímek řídicí obrazovky	86
Obrázek 50: Snímky reaktoru a vnitřku parogenerátoru	87
Obrázek 51: Řídicí krabice s displejem	87
Obrázek 52: Smyčka bez izolace	88
Obrázek 53: Smyčka s izolací.....	88

Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace provozních režimů [14]	37
Tabulka 2: Provozní režimy normálního provozu [14]	37
Tabulka 3: Základní parametry modelu.....	54
Tabulka 4: Kalibrace senzorů proudu	59
Tabulka 5: Určení součinitele prostupu tepla	67

Úvod

Jaderné elektrárny jsou dnes již nepostradatelnou součástí energetické koncepce mnoha států. I přes své specifické nevýhody jsou stálým a spolehlivým zdrojem nízkoemisní elektrické energie. Konkrétně bloky s tlakovodním konceptem reaktoru jsou dnes na světě nejrozšířenějším typem jaderného energetického reaktoru. Původně byl vyvinut v USA, ale později tuto koncepci převzaly i další státy. V současnosti tvoří více než dvě třetiny provozovaných energetických reaktorů na světě. [1]

Příslušné reaktory jsou typické primárním okruhem s cirkulující vodou o vysokém tlaku a pod mezí sytosti. Pro uvedení do problematiky a pochopení souvislostí, se tato práce v první části zabývá popisem konstrukce a funkce komponent primárního okruhu tlakovodních reaktorů, způsoby měření konvenčních i jaderných technologických veličin a možnostmi řízení jaderného bloku za stacionárních a přechodových režimů.

Hlavním cílem práce je navrhnout a sestavit funkční model primárního okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem ve školních laboratořích pro podporu výuky v předmětech souvisejících s měřením, řízením a automatizací v jaderné energetice. Model by měl dostatečně reprezentovat fyzikální a termodynamické děje skutečného bloku a být vhodný pro měření a experimentální činnosti.

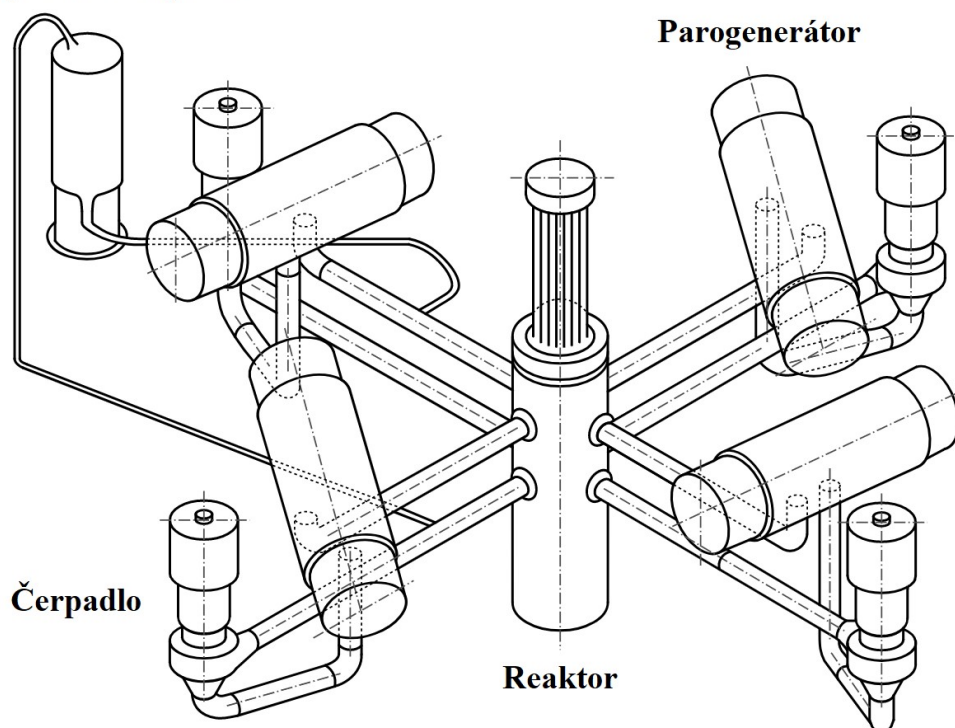
1. Primární okruh jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem

Tlakovodní typ reaktoru PWR (Pressurized Water Reactor) patří do skupiny lehkovodních reaktorů, vyznačujících se použitím obyčejné vody (H_2O) jako chladiva i jako moderátoru. U těchto reaktorů je chladivo pod teplotou sytosti daného tlaku primárního okruhu. Střední teplota chladiva v primárním okruhu je běžně kolem $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, a proto, aby nedocházelo k výskytu dvofázové směsi, musí být chladivo pod vysokým tlakem. Bloky s tlakovodními reaktory jsou vždy ve dvousmyčkovém uspořádání – teplo uvolňované v primárním okruhu v reaktoru je přes parogenerátor předáváno do sekundárního okruhu k turbíně. [2][3]

1.1. Hlavní komponenty primárního okruhu

Teplo generované řízenou štěpnou řetězovou reakcí v jaderném reaktoru je primárním chladicím okruhem odváděno do parogenerátoru, kde je předáváno do sekundárního okruhu. Na sekundární straně parogenerátoru dochází k varu vody, která má nižší tlak než voda v primárním okruhu. Generovaná pára je vedena na turbogenerátor, kde je expanzí přeměněna část vnitřní energie páry na mechanickou práci a dále na elektrickou energii. Hlavní chladicí okruh je tvořen tlakovou nádobou reaktoru, parogenerátorem, kompenzátorem objemu, hlavním cirkulačním čerpadlem a primárním potrubím. Schéma primárního okruhu ve čtyřsmyčkovém uspořádání je na obrázku 1.

Kompenzátor objemu



Obrázek 1: Primární okruh jaderné elektrárny [4]

Součástí primárního okruhu jsou i bezpečnostní systémy jako například systémy havarijního odstavení reaktoru, vysokotlaké a nízkotlaké systémy havarijního chlazení a systém snižování tlaku v hermetických prostorech. Dalšími prvky by dále byly pomocné systémy primárního okruhu jako například systémy doplňování a bórové regulace, kontinuálního čištění chladiva, spalování vodíku atd.

1.1.1. Reaktor

Jaderný reaktor je srdcem každé jaderné elektrárny. Zde se uvolňuje tepelná energie při řízené štěpné řetězové reakci. Štěpením jaderného paliva, především tepelnými neutrony, je uvolňována tepelná energie ohřívající palivové soubory a ty dále předávají teplo chladivu – v tomto případě obvyčejné vodě, o tlaku 13 – 16 MPa.

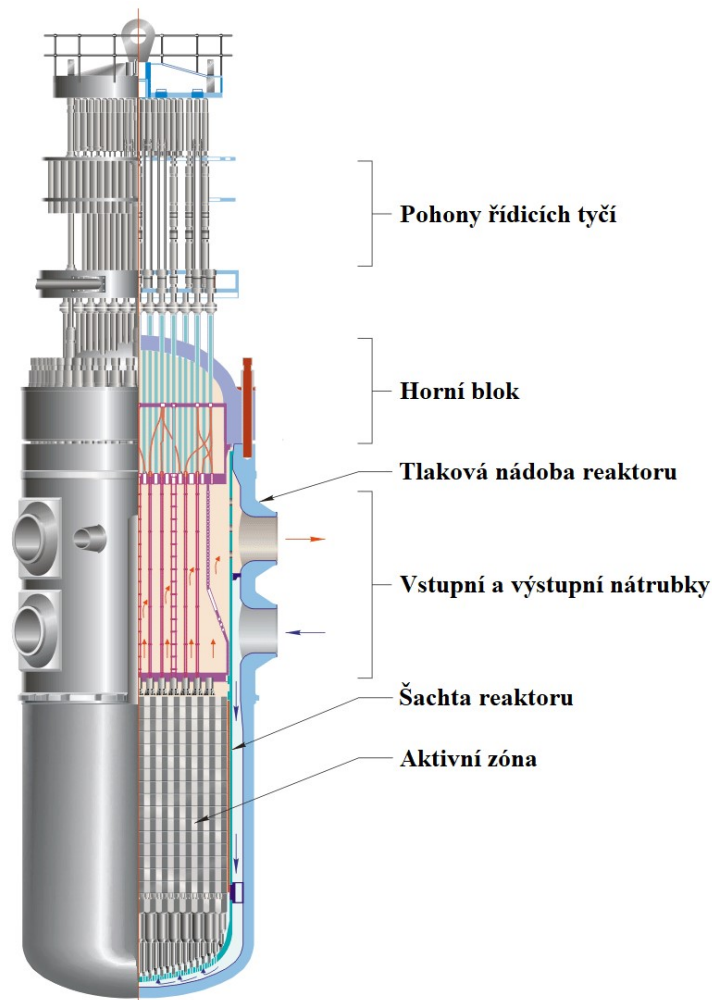
1.1.1.1. Konstrukce reaktoru

Základem reaktoru je tlaková nádoba válcového tvaru, svařená z kovaných prstenců a eliptického dna. Horní část je tvořena přírubovým prstencem, na který dosedá horní blok tlakové nádoby. Na spodní části horního bloku je víko reaktoru s nátrubky pro připojení pohonů regulačních orgánů a k vyvedení vnitroreaktorového měření. Na ploše přírubového prstence jsou otvory pro závrtné šrouby těsnícího uzlu, které shora prochází přírubou víka.

Pod přírubovým prstencem je hrdlový prsteneček s nátrubky pro připojení větví cirkulačních smyček. Reaktory typu VVER mají tyto prstence dva – horní a spodní. Spodní je pro nátrubky studené větve a horní pro nátrubky horké větve. Mezi horní a spodní řadou hrdel je zevnitř nádoby umístěn rozdělovací kroužek oddělující vstupní a výstupní proud chladiva. Rozdělovací kroužek je z materiálu s jiným součinitelem tepelné roztažnosti než jaký má materiál tělesa tlakové nádoby a za provozu je těsně sevřen mezi šachtou a tělesem reaktoru. Mezi vstupními a výstupními nátrubkami jsou umístěny menší nátrubky pro přívod vody ze systémů havarijního chlazení aktivní zóny.

Šachta reaktoru odděluje sestupný a vzestupný prostor chladiva. Je zavěšena na osazení na vnitřním povrchu přírubového prstence a ve spodní části tlakové nádoby radiálně upevněna vodíci pery. Plní funkci nosné konstrukce pro aktivní zónu, blok ochranných trub a zajišťuje uložení a polohu palivových souborů. Dno šachty je opatřeno velkým počtem otvorů pro zrovnoměnění rychlosti chladiva vstupujícího do aktivní zóny. Výstup chladiva je uskutečněn přes horní děrovaný díl šachty. V šachtě reaktoru je umístěn koš aktivní zóny sloužící k uložení palivových souborů.

Na koš aktivní zóny dosedá blok ochranných trub, zajišťující polohu palivových souborů a vedení regulačních orgánů a vnitroreaktorového měření. Schéma reaktoru VVER 1000 je na obrázku 2.



Obrázek 2: Reaktor VVER 1000 [4]

Pro kované díly tlakové nádoby VVER 1000 je použita legovaná vysokojakostní ocel 15Ch2NMFA. Prstence v oblasti aktivní zóny jsou z podobné oceli 15Ch2NMFA-A s vyšší odolností proti křehkému porušení a vyšší radiační odolností. Z vnitřní části je nádoba opatřena dvouvrstevným nerezavějícím návarem. Rozdělovací kroužek je výkovek z jakostní uhlíkové oceli 22K. Vnitřní konstrukční části jsou z austenitické nerezavějící oceli 08Ch18N10T. [5]

1.1.1.2. Aktivní zóna

Aktivní zóna jaderného reaktoru se skládá z jaderného paliva, povlakových materiálů, moderátoru, chladiva, absorpčních elementů a konstrukčních materiálů. Palivo s povlakem tvoří palivový proutek a proutky tvoří palivové soubory. Palivové soubory jsou umístěny v aktivní zóně a mezi jednotlivými proutky se nachází moderátor s chladivem. Vhodným geometrickým uspořádáním palivových článků – poměrem moderátoru a paliva, lze dosáhnout kritické soustavy. Veškeré materiály aktivní zóny jsou kromě mechanického, tepelného a chemického namáhání také namáhány radiačně.

Palivem tlakovodních reaktorů je v převážné většině obohacený uran (do 5% $^{235}_{92}\text{U}$) ve formě keramického oxidu uranu UO_2 , případně směsi oxidů uranu a plutonia. Palivo je

ve formě pelet, lisovaných a spěkaných z prášku. Jeho velkou výhodou je chemická stabilita bez fázových přeměn, takže omezující teplotou je až teplota tavení (cca 2 800 °C – mění se s vyhořením paliva). Keramické palivo není samonosné a navíc během provozu dochází k jeho nabobtnávání a praskání, proto musí být palivové pelety uloženy v hermeticky těsném obalu – pokrytí. Prostor mezi palivem a jeho pokrytím slouží k zachycení radioaktivních štěpných produktů, uvolňujících se s vyhoříváním paliva, a pro lepší přestup tepla je zaplněn heliem. Hlavními požadavky na povlakové materiály jsou malá absorpce neutronů, radiační, mechanická a chemická stabilita a vysoká tepelná vodivost. Nejčastěji používanými materiály jsou slitiny zirkonia.

Úkolem moderátoru v jaderném reaktoru je zpomalovat rychlé neutrony, vznikající ze štěpení, do oblasti tepelných energií. Základními požadavky na moderátory jsou dobré zpomalovací vlastnosti a malá absorpce neutronů. Lehkovodní reaktory používají jako moderátor obyčejnou vodu. Ta velice dobře neutrony zpomaluje (z důvodu lehkých jader), ale poměrně výrazně neutrony absorbuje, proto je nutné uran pro lehkovodní reaktory obohacovat.

Chladivo odebírá tepelnou energii palivu a předává ji do sekundárního okruhu prostřednictvím parogenerátoru. Musí splňovat řadu jaderně i tepelně fyzikálních a ekonomických požadavků. Nejdůležitějšími jsou nízká a krátkodobá indukovaná reaktivita, malá absorpce neutronů, stabilita při provozních podmínkách, dostatečná měrná tepelná kapacita a součinitel přestupu tepla, nízká viskozita a přijatelné náklady. U lehkovodních reaktorů plní voda funkci jak moderátoru, tak chladiva.

Absorpční elementy umožňují řídit a kontrolovat proces štěpné řetězové reakce. Kromě řídicích prvků jsou zde i havarijní, sloužící k rychlému odstavení reaktoru v případě potřeby. Absorbátory jsou materiály s vlastností silně absorbovat neutrony a tím ovlivňovat neutronovou bilanci v aktivní zóně. Mohou být ve formě mechanických regulačních tyčí, rozpustné nebo vyhořívající. [2]

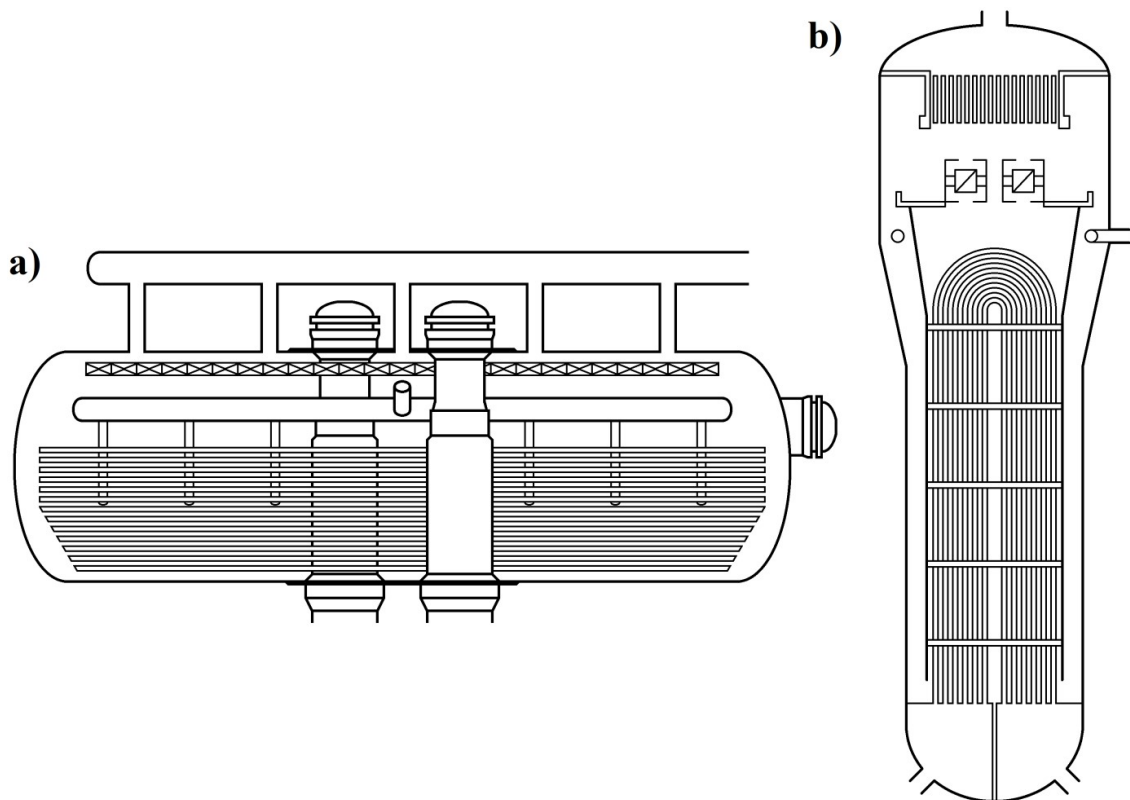
1.1.2. Parogenerátor

Parní generátor je tepelný výměník, oddělující aktivní primární okruh s vysokotlakou vodou od sekundárního neaktivního okruhu s vodou a vodní parou. Jeho hlavním účelem je odvádět teplo z primárního okruhu a generovat sytou páru.

1.1.2.1. Konstrukce parogenerátoru

Parogenerátory elektráren s tlakovodními reaktory jsou horizontální nebo vertikální tělesové válcové výměníky. Teplosměnné plochy tvoří tisíce válcových trubiček. Primární médium o vyšší tlaku (13 – 16 MPa) proudí těmito trubičkami a sekundární médium o nižší tlaku (4 – 8 MPa) je v mezitrubkovém prostoru. Válcové trubky jsou pevnostně výhodnější pro vysoké tlaky a menší tlak vně trubek dovoluje konstrukci parogenerátoru se slabšími stěnami. Teplosměnné plochy jsou zcela ponořeny, a proto

není u těchto typů parogenerátorů možné přehřátí páry. Na obrázku 3 jsou oba typy nejpoužívanějších parogenerátorů.



Obrázek 3: Horizontální a vertikální parogenerátor [3]

Horizontální parogenerátory (a), původně vyvinuté v USA, jsou dnes rozšířené především na východě u reaktorů typu VVER. Tělesem je horizontální z kroužků svařovaná válcová tlaková nádoba s množstvím nátrubků. V centrální části, kde jsou stěny z pevnostních důvodů zesíleny, obsahuje nátrubky pro vstup primárních kolektorů a nátrubky pro přívod napájecí vody sekundárního okruhu. Dalšími otvory na válcové části jsou otvory pro nátrubky odvodu páry, nátrubky odluhu a odkalu, nátrubky pro měření a na eliptickém dnu jsou vstupní průlezy pro kontroly. Primární kolektory prostupují celou výškou parogenerátoru a jsou přivařeny k tělesu. Horní část je opatřena víkem umožňujícím vstup do primární části. Ve střední části kolektorů jsou vyvrtány otvory pro napojení teplosměnných trubek ohnutých do tvaru U. Upevnění a utěsnění spojů je zaručeno hydraulickým zaválcováním a obvařením.

Naopak vertikální parogenerátory (b), typické pro západní PWR, byly nejprve použity v SSSR. Jejich nevýhodou oproti horizontálním typům je použití namísto válcových kolektorů jako rozdělovacího elementu vodorovné trubkovnice, které jsou pevnostně méně výhodné a konstrukčně náročnější. Navíc se v místech spoje trubky s trubkovnicí objevují korozní problémy vlivem úsad. Menší plocha hladiny způsobuje vyšší vzestupnou rychlost páry a neúčinnost gravitační separace vlhkosti a je tedy nutné v horní rozšířené části parogenerátoru použít rozsáhlejší systém separace. Výhodou vertikálních parogenerátorů je menší zastavěný půdorys a podstatně vyšší maximální jednotkový tepelný výkon, což snižuje investiční náklady.

Parogenerátory jsou vyrobeny z uhlíkaté oceli 22K. Teplosměnné trubky horizontálních parogenerátorů jsou z austenitické nerezové oceli 08Ch18N10T, trubky vertikálních jsou ze speciálních chrom-niklových slitin Inconel či Incoloy. [6][7]

1.1.2.2. Tepelný výpočet parogenerátoru

Aby parní generátory plnily svoji funkci, musí být tepelný výkon všech parogenerátorů roven výkonu reaktoru. Platí, že tepelný výkon každého parogenerátoru na primární straně je roven tepelnému výkonu na jeho sekundární straně:

$$Q_{PG} = \dot{m}_I \cdot (h_{I,in} - h_{I,out}) = \dot{m}_{II} \cdot (h_{II,out} - h_{II,in})$$

kde \dot{m}_I a \dot{m}_{II} jsou hmotnostní průtoky na primární a sekundární straně, $h_{I,in}$ a $h_{I,out}$ jsou měrné entalpie na vstupu a výstupu z parogenerátoru na primární straně a $h_{II,in}$ a $h_{II,out}$ jsou měrné entalpie na vstupu a výstupu z parogenerátoru na sekundární straně. Při známých parametrech reaktoru, podle počtu smyček primárního okruhu a z požadavků na admisní páru a napájecí vodu je možné určit potřebný hmotnostní průtok napájecí vody \dot{m}_{II} .

Cílem je stanovit teplosměnnou plochu parogenerátoru S_{PG} . Tu lze vyjádřit z rovnice prostupu tepla:

$$Q_{PG} = k \cdot \overline{\Delta t_{ln}} \cdot S_{PG}$$

kde k je součinitel prostupu tepla a $\overline{\Delta t_{ln}}$ je střední logaritmický teplotní spád. Napájecí voda má teplotu blízkou teplotě sytosti, a přestože tělesové parogenerátory nemají ekonomizér, lze předpokládat, že celá výhřevná plocha je na sekundární straně omývána vroucí vodou o konstantní teplotě. V ustáleném stavu je ochlazení primárního teplonosného média stejné jako jeho ohřátí v reaktoru (kolem 30 °C). Vlivem rozdílných teplot po délce výhřevných ploch se bude měnit i součinitel prostupu tepla, proto je vhodné při výpočtech rozdělit teplosměnnou plochu na více částí a postupovat po úsecích. Výsledná teplosměnná plocha pak bude součtem všech dílčích.

Pro střední logaritmický teplotní spád každého úseku platí vztah:

$$\overline{\Delta t_{ln}} = \frac{(t_{I,in} - t_{II}) - (t_{I,out} - t_{II})}{\ln\left(\frac{t_{I,in} - t_{II}}{t_{I,out} - t_{II}}\right)}$$

kde $t_{I,in}$ a $t_{I,out}$ jsou teploty primární vody na vstupu a výstupu z daného úseku a t_{II} je teplota sytosti na sekundární straně.

Pomocí následující rovnice se určí měrné tepelné toky pro každý úsek, které jsou nutné pro stanovení součinitelů přestupu tepla na sekundární straně:

$$q = k \cdot \overline{\Delta t_{ln}}$$

Pro první iteraci lze odhadnout součinitel prostupu tepla v mezích od 3 000 do 6 000 W/m^2K , přičemž v úsecích s vyšším $\overline{\Delta t_{ln}}$ bude k také větší. Součinitel přestupu tepla na sekundární straně, kde se jedná o var vody ve velkém objemu, lze stanovit podle vztahu Kutateladzeho:

$$\alpha_{II} = m \cdot q^{0,7} \cdot p_{II}^n$$

kde vystupují měrný tepelný tok q a tlak sekundárního média p_{II} . Koeficient m a exponent n jsou funkcí materiálu a tvaru teplosměnného prvku. Součinitel přestupu tepla se v těchto případech ještě snižuje o odpor kysličníků, usazovaných na materiálech stěny. Jeho velikost pro austenitické oceli lze volit $0,1 \cdot 10^{-4} Km^2/W$.

Pro zvolenou rychlost proudění v trubkách (od 2 do 6 m/s) a vnitřním průměru trubek (12 až 20 mm) je dále pro výpočet součinitele přestupu tepla na primární straně potřeba určit Reynoldsovo a Prandtlovo číslo. Následně je možné použít například základní Dittus-Boelterovu korelaci, platnou pro $Re > 10^4$ a $0,6 \leq Pr \leq 160$, ve tvaru:

$$\alpha_I = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\lambda}{d_{in}}\right)$$

kde Re je funkcí hydraulického průměru, rychlosti a viskozity proudícího média, a určuje charakter proudění (laminární nebo turbulentní) a Pr je funkcí tepelné vodivosti, viskozity a měrné tepelné kapacity, a určuje jaký přenos tepla v médiu převládá (konvekce nebo kondukce). Parametr λ představuje součinitel tepelné vodivosti proudícího média a d_{in} je charakteristický rozměr, v tomto případě vnitřní průměr trubek.

Nyní už je možné vypočítat součinitel prostupu tepla. V tomto případě je použit výpočet pro válcovou stěnu a hodnota součinitele je vztahována ke vnějšímu průměru trubek:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{out}}{d_{in}} \cdot \frac{1}{\alpha_I} + \frac{d_{out}}{2 \cdot \lambda_t} \cdot \ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right) + \frac{1}{\alpha_2}}$$

kde d_{in} a d_{out} jsou vnitřní a vnější průměr trubek a λ_t je součinitel tepelné vodivosti materiálu trubek.

Takto vypočítané součinitele prostupu tepla pro každý úsek se nyní porovnají s těmi zvolenými na začátku a v případě neshody se postup opakuje s novou hodnotou součinitele, dokud není výsledná chyba dostatečující. S finálními hodnotami se stanoví teplosměnná plocha parního generátoru z rovnice $Q_{PG} = k \cdot \overline{\Delta t_{ln}} \cdot S_{PG}$. [6][8][9][10]

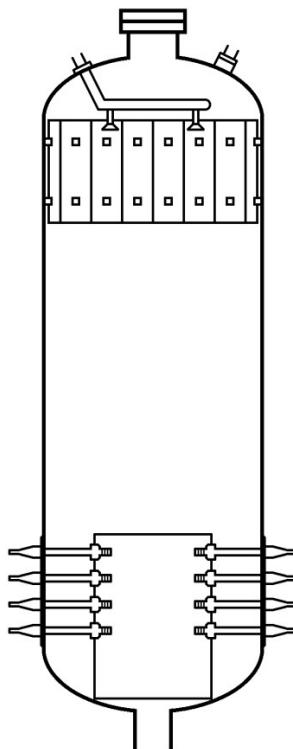
1.1.3. Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu je částí nezávislého systému kompenzace objemu chladiva, který plní funkci regulátoru tlaku a objemu v primárním okruhu. Pracuje jako vyrovnávací nádrž při změnách objemu vlivem tepelných dilatací.

1.1.3.1. Konstrukce kompenzátoru objemu

Kompenzátor objemu je vertikální tlaková nádoba, neoddělitelně spojená s primárním okruhem a umístěna nad jeho úrovní. V případě smyček s hlavními uzavíracími armaturami je kompenzátor připojen k jejich neoddělitelné části – mezi reaktorem a uzavíracími armaturami. Na spodním eliptickém dnu je nátrubek pro připojení k jedné z horkých větví. Ve spodní části válcové nádoby, pod úrovní hladiny vody, jsou umístěny ponorné elektrické ohříváky, podepřeny děrovaným nosným válcem. Ohříváky jsou rozděleny do několika skupin, které se postupně zapínají a vypínají v závislosti na změnách tlaku v okruhu. Celkový výkon všech skupin ohříváků je v jednotkách megawattů.

Na horním eliptickém dnu je nátrubek pro vstup vody ze studené větve jiné smyčky. Voda je v kompenzátoru rozstříkována tryskami (sprchami) pro efektivnější kondenzaci páry. Na horním víku je také nátrubek pro přepouštění páry přes ventily do barbotážní nádrže. Běžně je zde jeden odlehčovací ventil a dva pojistné ventily, ovládané impulsními řídicími ventily. Odlehčovací ventil má menší hltnost a otevírá při nižším tlaku. Horní víko dále obsahuje průlez, používaný k revizním prohlídkám. Schéma kompenzátoru objemu je na obrázku 4.



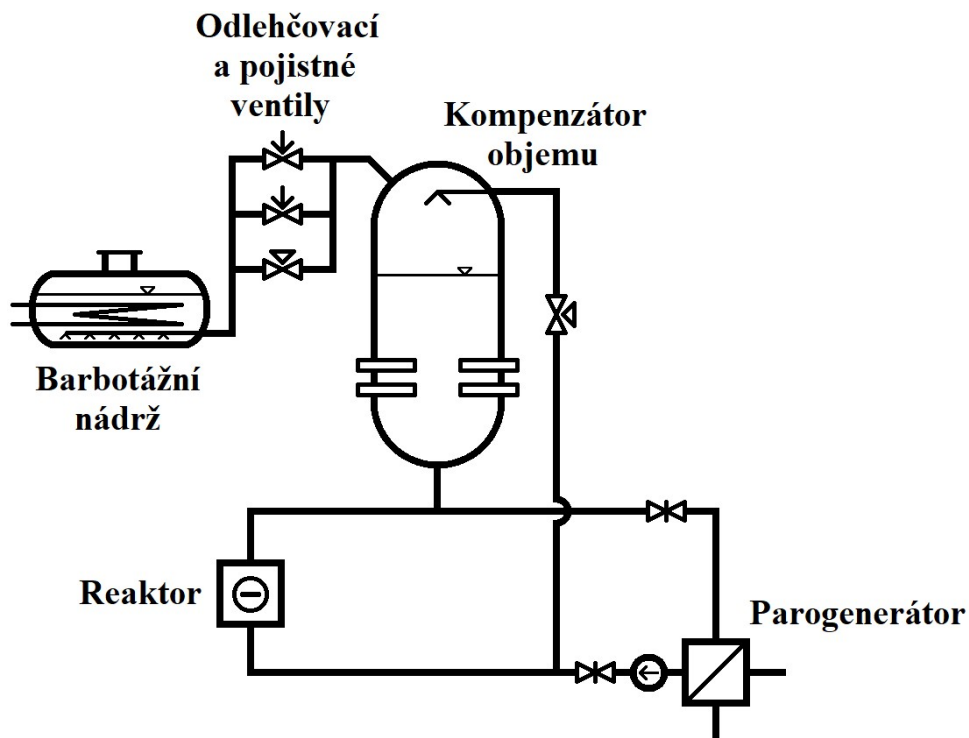
Obrázek 4: Kompenzátor objemu

Materiálem kompenzátoru objemu je uhlíkatá ocel. Na vnitřní straně je kompenzátor opatřen nerezovou výstelkou. V oblasti rozstříkávání vody tryskami je vnitřní povrch stěn chráněn proti tepelným rázům chladnější vody tepelným štítem. [5][11]

1.1.3.2. Systém kompenzace objemu

Při najíždění, odstavování nebo změnách výkonu dochází ke změnám teploty chladiva a k tepelným dilatacím, způsobujících v uzavřeném primárním okruhu změny tlaku. Při snížení teploty vody v okruhu se sníží její objem a část vody z kompenzátoru vyteče do horké větve. Naopak při zvýšení teploty se objem vody zvýší a do kompenzátoru část jejího objemu přitéká. Tlak primárního okruhu je tedy dán tlakem parního polštáře v kompenzátoru objemu, přičemž voda sahá přibližně do dvou třetin výšky kompenzátoru a zbytek je tvořen parou. Při spouštění bloku je v primárním okruhu udržován tlak nejprve dusíkovým polštářem a postupně se přechází na parní.

Za provozu při malých změnách tlaku nastává automatická regulace, kdy při zvýšení teploty vzroste tlak a teplota sytosti vody je při vyšším tlaku také vyšší, v důsledku toho část páry kondenzuje a tlak v kompenzátoru se sníží. Při snížení teploty a tlaku je opět nižší i teplota sytosti vody a část se jí vypaří, čímž vzroste objem parního polštáře a zvedne se tlak primárního okruhu.



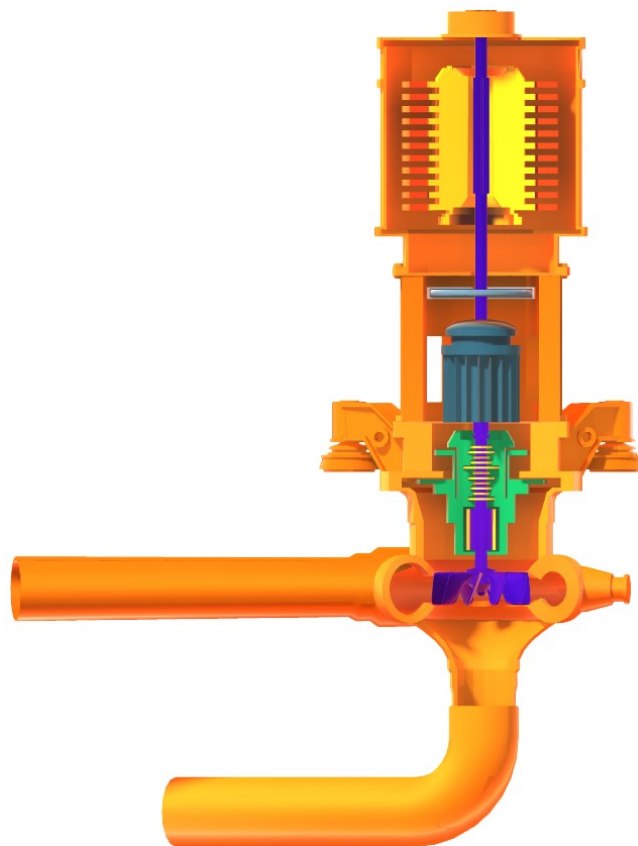
Obrázek 5: Schéma systému kompenzace objemu [6]

Při větších změnách tlaku v okruhu je třeba regulovat elektrickými ohříváky nebo sprchami. Zapnutím sprch a rozstříkáváním chladnější vody do horního prostoru parního polštáře se začne tato pára ochlazovat a kondenzovat, snižovat svůj objem a v důsledku toho tlak klesá. Naopak při potřebě zvýšit tlak se zapínají elektroohříváky, nastává var a zvětší se objem páry. Při větším zvýšení tlaku, který již nelze

kompenzovat sprchami, se otevírají odlehčovací ventily a v případě potřeby i pojistné ventily a pára je přepouštěna do barbotážní nádrže, kde je zaváděna pod vodní hladinu pro urychlení její kondenzace. Voda v barbotážní nádrži je chlazena chladicím okruhem, ale v případě selhání a vzrůstu tlaku je opatřena pojistnou membránou pro předejití prasknutí nádrže. Na obrázku 5 je schéma zapojení kompenzátoru objemu v primárním okruhu. [11][12]

1.1.4. Hlavní cirkulační čerpadlo

Hlavní cirkulační čerpadla jsou nejdůležitějšími, ale i technologicky nejnáročnějšími čerpadly v jaderné elektrárně. Pracují za vysokých teplot a tlaků s radioaktivní vodou a je nutné, aby vydržely bez revize a případné opravy po celou dobu kampaně, kdy jsou za provozu nepřístupná. Jsou umístěné na studené větvi cirkulačních smyček mezi parogenerátorem a reaktorem a zajišťují cirkulaci chladicího média. U bloků s vysokým výkonem a menším počtem smyček mohou být na každé smyčce paralelně umístěny čerpadla dvě. V tomto případě tedy jde o smyčku s jednou horkou větví z reaktoru do parogenerátoru a dvěma studenými větvemi z parogenerátoru zpět do reaktoru. Model hlavního cirkulačního čerpadla je na obrázku 6.



Obrázek 6: Hlavní cirkulační čerpadlo [3]

U některých bloků (například VVER 440) je na studené větvi mezi hlavním cirkulačním čerpadlem a reaktorem ještě umístěna hlavní uzavírací armatura. V současnosti maximální technologicky zvládnutelný tepelný výkon reaktoru na jedno čerpadlo je přes

1 000 MWt, při dodávaném množství vody tímto čerpadlem asi 30 000 m³/hod. U dnešních elektráren bývá běžně objemový průtok čerpadlem kolem 20 000 m³/hod se zvýšením tlaku média při průchodu čerpadlem o zhruba 0,5 MPa. Elektrický příkon se pohybuje v rozmezí od 1 do 8 MW. Výška celého agregátu je kolem 10 metrů. [3][6]

1.1.4.1. Konstrukce hlavních cirkulačních čerpadel

Hlavní cirkulační čerpadla se většinou konstruují jako odstředivá, jednostupňová, vertikální s elektromotorem umístěným nad čerpadlem. Z hlediska začlenění do primárního okruhu existují dva přístupy – čerpadla zapouzdřená a čerpadla ucpávková.

Zapouzdřená čerpadla jsou i s elektromotorem umístěna v hermetickém tlakovém pouzdru a vůbec nenarušují těsnost primárního okruhu. Vlivem přítomnosti vody pod tlakem v prostoru hřídele se snižuje účinnost čerpadla z důvodu ztrát třením. Další nevýhodou je omezená velikost setrvačnicku, který je nezbytný z bezpečnostního hlediska, kdy v případě přerušení napájení po nezbytnou dobu pohání čerpadlo. U tohoto typu čerpadel je doba doběhu běžně kolem 5 sekund.

Na současných elektrárnách jsou na primárním okruhu nejpoužívanějším typem čerpadla ucpávková. Na rozdíl od zapouzdřeného čerpadla má ucpávkové čerpadlo (nebo také čerpadlo s těsněním hřídele) umístěno elektromotor vně primárního okruhu. Hřídel spojující čerpadlo s elektromotorem tedy musí mít speciální vysokotlaké těsnění zabraňující úniku chladiva z primárního okruhu okolo rotujícího hřídele. Elektromotor umístěný vně je možné konstruovat klasickým způsobem, což zvyšuje jeho účinnost a usnadňuje chlazení a mazání. Další výhodou je možnost použití masivnějšího setrvačnicku na hřídeli, díky čemuž je zajištěn doběh čerpadla v případě výpadku napájení v řádu minut.

Těsnění hřídele hlavních cirkulačních čerpadel se dělí dvěma způsoby – hydrodynamické a hydrostatické. U každého z nich jsou dva těsnící kroužky, jeden otáčející se, spojený s hřídelem a druhý neotáčející se, pevně umístěný ve statoru. U hydrodynamického těsnění je rotující kroužek na hřídeli čelně přitlačován pružinkami na kroužek ve statoru. Mezi těmito třecími kroužky z grafitu je spára v rozmezí hodnot nerovností obou povrchů (1 – 3 μm) a únik nepřevyšuje hodnotu několika kubických centimetrů za hodinu. Hydrostatické těsnění je podobné s tím rozdílem, že se předem nastavuje šířka mezi pevně uloženými kroužky v rozmezích 10 – 30 μm. Těsnění je spolehlivější, ale je zde poměrně značný trvalý únik chladicí vody až 0,15 kg/s. K utěsnění hlavních cirkulačních čerpadel, kde jsou vysoké tlakové rozdíly, se řadí v kombinaci několik těsnění za sebou. Aby se zamezilo úniku z primárního chladiva, je poslední stupeň těsnění hřídele zahlcován čistým kondenzátem.

Hřídel je uložen jak v radiálních, tak v axiálních ložiskách, která jsou nejčastěji kluzná, výjimečně valivá. Ložiska mohou být v případě ucpávkových čerpadel mazána olejem, kromě nejbližšího oběžnému kolu, aby nedošlo ke znečištění primární vody. Voda má nižší mazací schopnost, která se navíc snižuje s rostoucí teplotou, proto je nutné sem

přivádět ochlazenou vodu pomocným systémem. U zapouzdřených čerpadel jsou vodou mazána všechna ložiska.

Všechny součásti čerpadel, které přicházejí do kontaktu s vodou, jsou zhotoveny z erozivzdorných a korozivzdorných materiálů. Zároveň, jako ostatní komponenty primárního okruhu, nesmějí obsahovat prvky, ze kterých by vlivem záření mohly vzniknout izotopy s delšími poločasy rozpadu (například kobalt). [3][6]

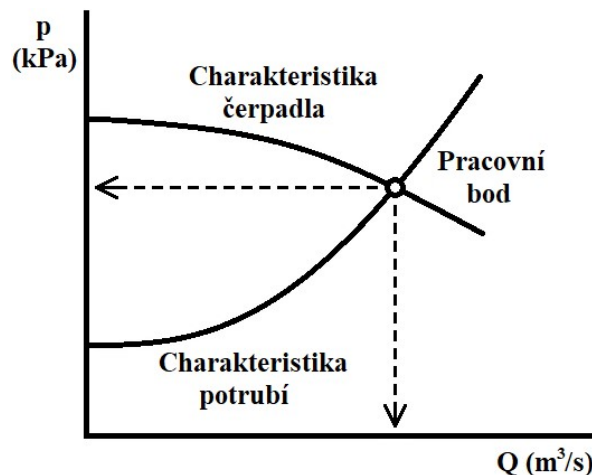
1.1.4.2. Hydraulické charakteristiky čerpadel

Charakteristikou čerpadla je myšlena závislost mezi tlakovým ziskem (výtláčnou výškou), který čerpadlo vyvíjí a množstvím protékané kapaliny. Svoji charakteristiku pak má i potrubí, případně celá cirkulační smyčka včetně reaktoru. Průtok touto smyčkou tedy závisí na tlakovém spádu vyvozovaném hlavním cirkulačním čerpadlem a na tlakové ztrátě celé cirkulační smyčky s reaktorem. Platí jednoduchá bilance tlakových spádů:

$$\Delta p_{HC\check{C}} - \Delta p_{CS} - \Delta p_R = 0$$

kde $\Delta p_{HC\check{C}}$ je tlakový spád na čerpadle, Δp_{CS} je tlaková ztráta v cirkulační smyčce a Δp_R je tlaková ztráta v reaktoru. Zatímco čerpadlo je aktivní a vytváří tlak, čímž podporuje proudění, potrubí a prvky na něm jsou pasivní, vytváří protitlak a omezují proudění tlakovými ztrátami.

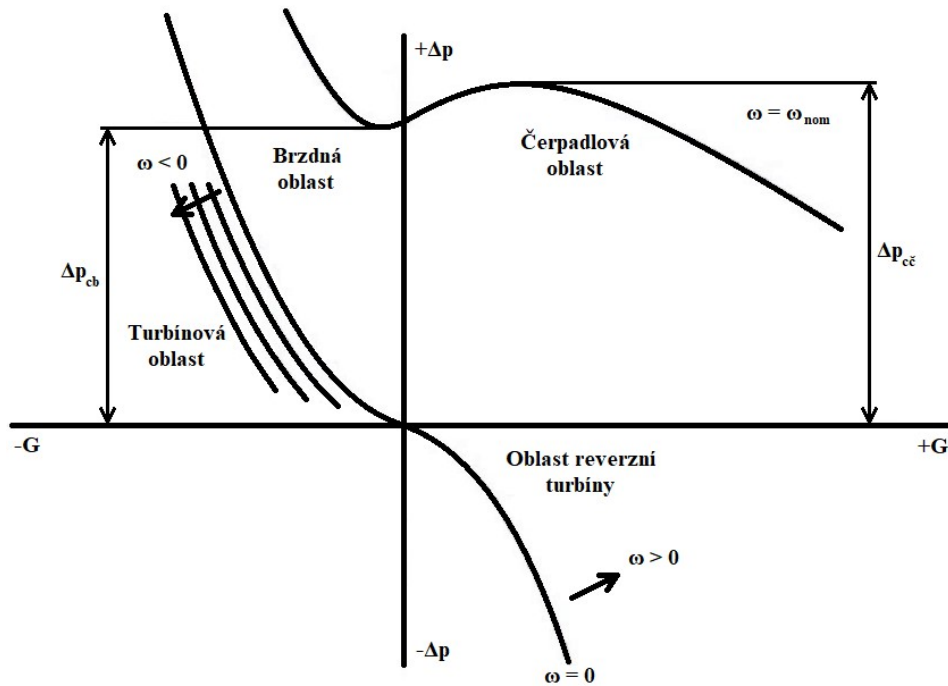
Závislost tlakové ztráty na průtoku je kvadratická – roste s druhou mocninou. Ani charakteristika čerpadla není lineární. Na obrázku 7 je příklad charakteristiky čerpadla s charakteristikou okruhu. V místě, kde se vyrovnává tlak od čerpadla s odporem, který klade okruh, se nachází pracovní bod čerpadla.



Obrázek 7: Hydraulická charakteristika okruhu s čerpadlem [13]

Hlavních cirkulačních čerpadel je na jaderném bloku více a jsou zapojena paralelně. Zejména zde se tedy může stát, že se za provozu dostanou do provozního stavu, k jehož znázornění jednoduchá charakteristika nestačí. Pro tyto stavy je zapotřebí sestavit úplnou čtyřkvadrantovou charakteristiku na obrázku 8. Zde je vykreslena závislost

tlakového spádu čerpadla na průtoku chladiva při změnách úhlové rychlosti rotoru čerpadla.



Obrázek 8: Úplná charakteristika odstředivého čerpadla [14]

Z hlediska provozu hlavních cirkulačních čerpadel jsou významné především tři oblasti – čerpadlová, brzdová a turbínová. Čerpadlo za normálního provozu pracuje v čerpadlové oblasti poblíž ω_{nom} , kde má kladnou úhlovou rychlost ($\omega > 0$), vyvozuje tlakový spád ($\Delta p > 0$) a průtok chladiva je v požadovaném směru ($Q > 0$).

V případě, že z nějaké příčiny dojde k výpadku čerpadla, začnou se úhlová rychlost, tlakový spád i průtok čerpadlem snižovat až do stavu, kdy nastane vlivem přetlaku od ostatních čerpadel proudit chladivo opačným směrem. Čerpadlo se po určitou dobu bude nacházet v brzdě oblasti, kdy se stále otáčí v původním směru ($\omega > 0$), vyvozuje tlakový spád ($\Delta p > 0$), ale chladivo proudí opačným směrem ($Q < 0$).

Po určité době, za stálého obráceného průtoku ($Q < 0$), dochází k zastavení čerpadla a následně k jeho otáčení opačným směrem ($\omega < 0$), za stále kladného tlakového spádu ($\Delta p > 0$). Zde je čerpadlo poháněno opačně proudící kapalinou a pracuje jako turbína. Čerpadla na moderních elektrárnách jsou proti tomuto jevu vybavena antireverzačním zařízením, které zabraňují otáčení v opačném směru. [11][13][14]

1.2. Měření technologických veličin

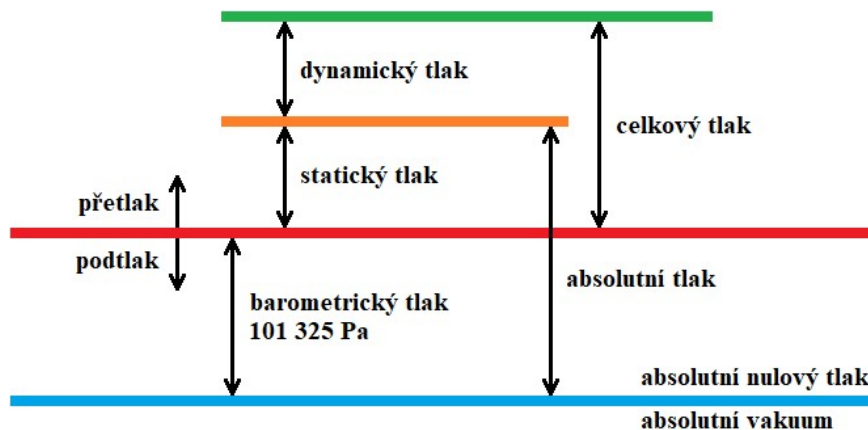
Měřicí systém jako celek je určen k zjištění hodnoty měřené veličiny a skládá se ze snímačů, přenosových tras a vyhodnocovacích přístrojů. Je-li to nutné, je součástí obvodu i převodník, který převádí veličinu z její přirozené formy na veličinu již zpracovatelnou vyhodnocovacím přístrojem. Vstupními prvky v obvodu jsou snímače, které podle principu funkce existují například jako – odporové, indukční, kapacitní, mechanické, hydrostatické, termoelektrické, elektrostatické, fotoelektrické, ultrazvukové a další. [15]

1.2.1. Základní principy měření

Měřené veličiny na jaderné elektrárně se dají rozdělit do dvou skupin – jaderné a konvenční. Konvenční veličiny se vyskytují i mimo jadernou energetiku a je to například měření teplotních veličin (tlak, teplota, průtok, hladina, ...), mechanických veličin (poloha, otáčky, ...), elektrických veličin (napětí, proud, impedance, ...) a další. Do jaderných veličin patří například měření neutronového toku, periody reaktoru, vyhořívání paliva a dozimetrie. Veškeré snímače primárního okruhu oproti konvenčním musí navíc splňovat odolnost proti ionizujícímu záření. Dále jsou stručně popsány nejčastější způsoby měření nejen na jaderné elektrárně. [16]

1.2.1.1. Měření tlaku

Měří se buď přímo tlak, nebo tlaková diference. Měřicí přístroje se nazývají tlakoměry (případně manometry). Pro měření tlaků menších než je atmosférický (barometrický) se používají vakuometry. Základní jednotkou je pascal (Pa) – tlak, který vyvolá síla jednoho newtonu rovnoměrně rozložená na ploše $1\ m^2$, kolmé ke směru síly. Tlakové snímače mohou měřit absolutní tlak nebo rozdíl měřeného tlaku od tlaku atmosférického – přetlak nebo podtlak (obrázek 9). U proudících tekutin rozlišujeme statický a dynamický tlak, jejich součet je roven celkovému tlaku. Nejčastějšími typy tlakoměrů jsou kapalinové, deformační, a elektrické.



Obrázek 9: Pojmy z oblasti měření tlaku [17]

a) Kapalinové tlakoměry

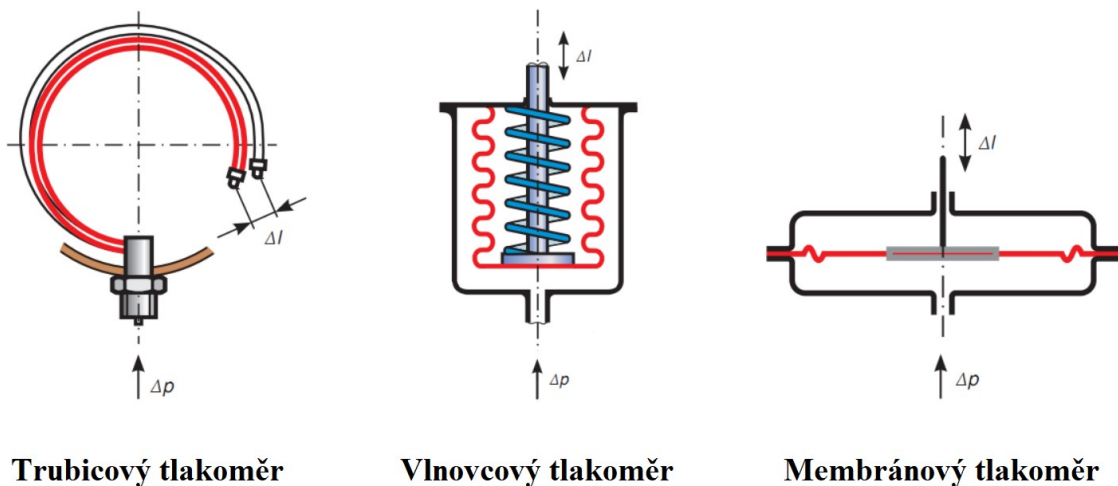
Kapalinové tlakoměry jsou založeny na principu účinku hydrostatického tlaku. Změna výšky hladiny vytlačeného kapalinového sloupce Δh o hustotě ρ je pak úměrná změně tlaku Δp :

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Měření tlaku je tak převedeno na měření délky, případně na úhel natočení (prstencový tlakoměr). Výhodou je jednoduchost a spolehlivost, avšak neposkytují signál vhodný pro dálkový přenos a další zpracování. [18]

b) Deformační tlakoměry

Princip činnosti deformačních tlakoměrů je založen na deformaci vhodného pružného elementu působením tlaku. Výhodou je odolávání těžkým provozním podmínkám díky jejich robustnosti, velký měřicí rozsah, přesnost a spolehlivost. Možným zdrojem chyby je jejich dopružování – zpožděné dosažení koncového stavu a velké změny teplot. Základní typy jsou na obrázku 10.



Trubicový tlakoměr

Vlnocový tlakoměr

Membránový tlakoměr

Obrázek 10: Typy deformačních tlakoměrů [17]

Nejrozšířenějším typem je trubicový tlakoměr (Bourdonova trubice). Jedná se o trubici, eliptického až kruhového tvaru, stočenou do kruhového oblouku nebo šroubovice. Na jednom konci je uzavřena a druhým je přiváděn měřený tlak. Podle tvaru trubice se používá pro měření v řádu od desítek kilopascalů až po tisíce megapascalů s přesností 2,5%. Jako materiál trubice se pro nižší tlaky používá mosaz, pro vyšší ocel. Při působení tlaku se trubice narovňuje a změna tlaku je indikována přes změnu polohy volného konce například diferenciálním transformátorem.

Pro měření tlakových diferencí je vhodný vlnocový tlakoměr. Jeho tlakovým prvkem je tenkostěnný kovový vlnovec, umístěný v pouzdře. Měřený tlak (v případě měření tlakové difference vyšší tlak) je přiváděn do pouzdra na vnějšek vlnovce a deformace vlnovce je převáděna táhlem na ukazatel. Tuhost vlnovce lze měnit pružinou.

Membránové tlakoměry rovněž využívají pružnosti materiálu deformačního elementu, v tomto případě membrány. Kruhová membrána je sevřena mezi dvěma přírubami a zvlněna soustřednými kruhy pro zvýšení linearitu. Z jedné strany je přiváděn měřený tlak. Pro malé tlaky se používají pryžové membrány, pro vysoké tlaky až do desítek megapascalů mosazné, bronzové nebo ocelové. Membrány měří v malém rozsahu, ale mají vyšší citlivost. Dalšími výhodami je jejich otřesuvzdornost a možnost měření i agresivních látek. [16][18]

c) Tlakoměry se silovým účinkem

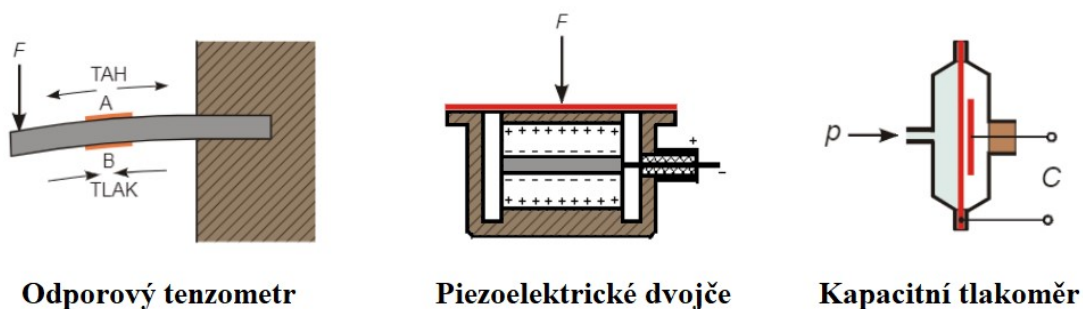
U těchto tlakoměrů se měření tlaku převádí na měření síly. Součástí tlakoměru je píst vyvážený závažím nebo pružinou. Tlakoměry tohoto typu se nejčastěji používají jako kalibrační. Do této skupiny patří tlakoměry pístové a zvonové.

U pístového tlakoměru je píst uložen ve válci naplněném tlakoměrným médiem, kterým může být olej, voda případně vzduch. Píst je uložen ve vertikálním směru a přidává se na něj závaží, dokud se nedosáhne rovnováhy mezi silou vyvozenou tlakem a hmotností pístu se závažím.

Zvonový tlakoměr je modifikací pístového tlakoměru. Do tlakoměrné kapaliny je ponořený zvon, do kterého se přivádí měřený tlak. Působí-li uvnitř zvonu přetlak, zvon se vynořuje – měřítkem je zdvih zvonu. Používá se při kalibraci pro menší tlaky do 1 000 Pa. [18]

d) Elektrické tlakoměry

Elektrické snímače poskytují elektrický výstupní signál. Jde o moderní a perspektivní snímače doplněné elektronickými vyhodnocovacími obvody. Do této skupiny patří odporové, piezoelektrické a kapacitní snímače, schematicky zobrazené na obrázku 11.



Obrázek 11: Typy elektrických tlakoměrů [17][18]

Odporové snímače tlaku (tenzometry) pracují na principu změny odporu vodiče s jeho deformací. Odporové tenzometry jsou ke zvýšení citlivosti a přesnosti různě uspořádány na deformačním členu, nejčastější uspořádání je do Wheatsonova můstku. Používají se v kombinaci s deformačními tlakoměry – tlak média je snímán membránou či vlnovcem, který je spojen s pružným členem vybaveným odporovými tenzometry, které slouží k převodu mechanického signálu na elektrický. V moderních snímačích se

používají polovodičové tenzometry, vyráběné z křemíku. Jejich výhody jsou vysoká teplotní a chemická odolnost a použitelnost v širokém rozsahu.

Piezoelektrické snímače jsou z krystalů, u kterých působením mechanické deformace vzniká elektrický náboj – například krystaly křemene. Na plochách křemene specificky orientovaných k ose mechanického namáhání se dělají výbrusy opatřené kovovými elektrodami. Snímač obvykle obsahuje dva krystaly (piezoelektrické dvojče) jejichž náboje se sčítají. Tlak je na krystaly převáděn membránou. Jejich výhodami jsou malé rozměry a možnost použití pro měření dynamických tlakových průběhů, díky malé časové konstantě v řádu mikrosekund. Naopak je nevhodné s nimi měřit statické tlaky, protože náboj vznikající v krystalu se rychle vybíjí.

U kapacitního snímače se působením měřeného tlaku mění vzdálenost mezi deskami (elektrodami) kondenzátoru a to vyvolá změny kapacity kondenzátoru. Tento princip je často využíván pro měření tlakového rozdílu. Zde jsou tři elektrody – dvě pevné a prostřední pohyblivá na membráně, všechny umístěné v oleji nebo jiné inertní kapalině. Na olej zvenčí působí přes oddělovací membrány dva různé měřené tlaky, z každé strany jeden, a vychylují prostřední elektrodu. Průhyb membrány s elektrodou vyvolá opačné změny kapacit, takže citlivost snímače je dvojnásobná. Nevýhodou těchto snímačů je jejich nelineární závislost, proto musí být vybaveny linearizačním členem a dále obvody pro potlačení vlivu parazitních kapacit. [17][18][19]

1.2.1.2. Měření teploty

Měření teploty je jedním z nejčastějších a zároveň nejdůležitějších v celém průmyslu. Přímé určení teploty není možné, určuje se podle změny fyzikálních vlastností nějaké látky, která je určitým způsobem v kontaktu s měřeným prostředím nebo tělesem. Nejčastější principy měření teploty jsou pomocí tepelné roztažnosti látek, změny elektrického odporu se změnou teploty a termoelektrického jevu.

a) Dilatační teploměry

Dilatační teploměry využívají změn objemu nebo délky určité látky se změnou teploty. Tuto závislost vyjadřuje teplotní součinitel délkové roztažnosti α (případně teplotní součinitel objemové roztažnosti β). Tento součinitel není konstantní, a proto je vhodné používat jeho střední hodnotu pouze na omezeném intervalu. Do této skupiny snímačů teploty patří i bimetaly – pásek ze dvou spojených kovů s různou tepelnou roztažností. Výhodou je jejich jednoduchost, ale zásadní nevýhodou je malá přesnost měření.

b) Odporové teploměry

Tyto snímače fungují na principu závislosti ohmického odporu vodičů a polovodičů na teplotě. Nejčastěji se využívají kovové materiály – nikl, měď a zejména platina. Provedení je ve formě tenkého drátku (0,001 až 0,5 mm) navinutého na keramickou, skleněnou nebo slídovou podložku s vývody. Pro platinové odporové snímače je závislost odporu na teplotě s platností pro $t > 0^\circ\text{C}$ vyjádřena rovnicí:

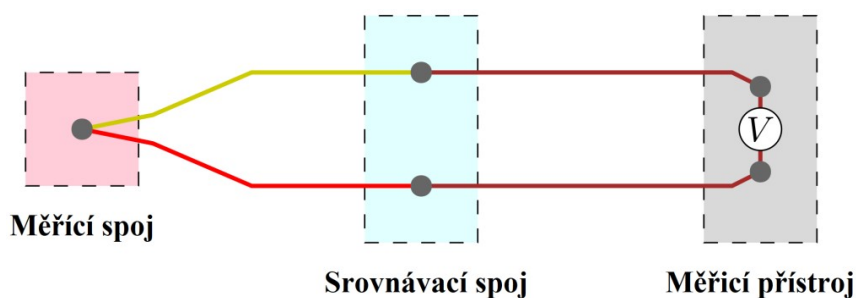
$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$$

kde A a B jsou konstanty udávané normou, R_t je odpor při teplotě t a R_0 je odpor při teplotě $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$. Nejpoužívanější platinové snímače s označením Pt100, kde písmena udávají materiál a číslice za nimi právě hodnotu tohoto odporu, mají $R_0 = 100 \text{ } \Omega$. Vyhodnocení odporu snímače lze provést buď přímo, nebo pomocí odporového můstku. Přímé vyhodnocení se provádí velmi zřídka, protože snímač je proudově zatěžován a tímto proudem zahříván, čímž se zvyšuje chyba měření.

c) Termoelektrické teploměry

Spolu s odporovými teploměry se jedná o nejpoužívanější způsob měření teploty. Termoelektrické snímače pracují na principu termoelektrického jevu, při kterém se tepelná energie přímo přeměňuje na elektrickou a naopak. Při spojení dvou různých kovových vodičů na obou koncích, pokud mají tyto konce rozdílnou teplotu, se v obvodu generuje elektrické napětí. Tato přeměna teplotních rozdílů na elektrické napětí se nazývá Seebeckův jev a jeho opakem (přeměna elektrické energie na tepelnou) je Peltierův jev.

Základem snímače je tedy termoelektrický článek, složený ze dvou od sebe izolovaných různých vodičů, pouze na konci spojených. Konec vystavovaný měřené teplotě se nazývá měřící spoj, volný konec srovnávací spoj. Pokud je na těchto koncích rozdílná teplota, měříme na srovnávacím spoji elektrické napětí. Pro správné měření je důležitá stálá teplota srovnávacího spoje, ke které je vztažena teplota měřícího spoje. Ze srovnávacího konce je pak elektrický signál veden k měřicímu přístroji měděnými vodiči. Jednoduché schéma termočlánu je na obrázku 12.



Obrázek 12: Schéma termočlánu [21]

Generované napětí je funkcí materiálu vodičů a rozdílu teplot. Podle použitých materiálů termoelektrické dvojce se termočlánu dělí na mnoho typů. Nejpoužívanějším průmyslovým termočlánu je typ K, vhodný i pro měření v neutronovém toku. Materiály vodičů jsou chromel (NiCr) a alumen (NiAl). Rozsah měření je od $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ až do $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Na celém intervalu má prakticky lineární charakteristiku s citlivostí $40 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. U vyšších teplot je z důvodů nestabilit vhodné, aby teplota na měřeném konci byla tou nejvyšší na trase termočlánu. [16][20]

1.2.1.3. Měření průtoku

Měření průtoku v energetice se týká především kapalných, případně plynných médií a může být realizováno pomocí objemových a rychlostních měřidel nebo pomocí škrtících orgánů. U některých měření hraje roli typ rychlostního profilu, přičemž častěji se vyskytuje proudění turbulentní. Pro měření jsou nejčastějšími průtokoměry turbinové, indukční, ultrazvukové a dále měření pomocí snímačů diferenčního tlaku.

a) Turbinové průtokoměry

Hlavní částí těchto průtokoměrů je malá turbína umístěná do potrubí a otáčející se v závislosti na rychlosti proudícího média. Frekvence otáčení, snímaná bezdotykově elektromagneticky, je pak úměrná okamžitému průtočnému množství. Podle osy turbíny vzhledem ke směru proudění může být uložena axiálně nebo radiálně. Jsou vhodné pro plyny nebo kapaliny s nízkou viskozitou. Jejich výhodou je relativně vysoká přesnost, zvyšující se s rostoucím průtokem (relativní chyba do 0,5 %), ale mají nižší životnost.

b) Indukční průtokoměry

Indukční průtokoměry jsou založeny na principu Faradayova jevu. Protéká-li vodivá kapalina potrubím, ve kterém je magnetické pole, indukuje se v ní elektrické napětí. Magnetické pole je tvořeno elektromagnetem a elektrické napětí je snímáno dvojicí elektrod ve směru kolmém na směr siločar magnetického pole. Velikost indukovaného napětí U_i je pak přímo úměrná střední rychlosti proudění měřené kapaliny \bar{v} podle vztahu:

$$U_i = B \cdot D \cdot \bar{v}$$

kde B je magnetická indukce magnetického pole a D je průměr potrubí. Tyto snímače mají řadu výhod – nezpůsobují žádné tlakové ztráty, mohou být zabudované v kterémkoliv místě potrubí, závislost výstupního signálu na průtoku je lineární a měření není závislé na teplotě, hustotě, viskozitě, čistotě média. Jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena a použití pouze pro kapaliny s elektrickou vodivostí alespoň $5 \mu S/cm$.

c) Ultrazvukové průtokoměry

Jejich princip je založen na Dopplerově jevu. Měří se čas, potřebný k průchodu měřícího paprsku skrz proudící médium. Z rozdílu rychlosti šíření ultrazvukových vln po proudu a proti proudu se stanovuje rychlost průtoku. Měřicí sondy mohou být buď připevňované na vnější očištěný povrch, opatřené gelem pro lepší akustickou vazbu, nebo jsou umístěny přímo ve stěně potrubí. Jsou vhodné i pro měření velkých průtoků, kde nelze použít jiná měřidla, ale nedají se použít u některých potrubí s vnitřní výstelkou. V materiálu výstelky musí být rychlost zvuku značně odlišná oproti rychlosti zvuku v materiálu trubky, což například u kovového potrubí s vnitřní nerezovou výstelkou neplatí.

d) Průtokoměry s měřením tlakové difference

Nejpoužívanějším je stanovení průtoku měřením tlakové difference na vloženém škrticím orgánu, zužujícím průtočný průřez. Škrticím orgánem může být například clona, dýza nebo Venturiho trubice. Z Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity je pak vyjádřena rychlost proudění, případně objemový průtok. Pro nestlačitelnou kapalinu a vodorovné potrubí beze ztrát mají rovnice tvar:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

kde p je měřený tlak, ρ hustota kapaliny, v rychlost proudění a S průtočný průřez. Indexy 1 jsou pro veličiny před zúžením a indexy 2 v místě zúžení. Při známé charakteristice škrticího orgánu, určené na základě modelových pokusů, je možné odečítat průtok přímo z tlakové ztráty pomocí tabulek nebo grafů. Pro zajištění správného měření musí být dodrženo několik podmínek. Látka musí být homogenní a zaplňovat celý průřez potrubí a potrubí musí být přímé a bez překážek v určité délce před a za měřidlem.

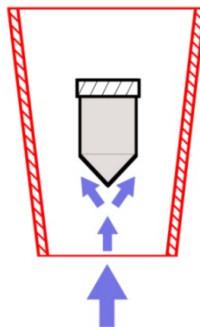
Dalším typem jsou rychlostní sondy – nejčastěji Pitotova nebo Prandtlůva trubice. Využívají závislosti dynamického tlaku na rychlosti proudění. Měří se zde tlak celkový a tlak statický. Rychlost proudění kapaliny v o hustotě ρ se poté vypočítá ze vztahu:

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

kde tlak celkový p_c je součtem tlaku statického p_s a dynamického p_d .

e) Rotametry

Rotametry jsou jednoduchá měřidla, používaná pro měření menších průtoků. Je tvořen plovákem ve svislé kuželové trubici. Kapalina proudí vzhůru a nadnáší plovák, přičemž s měnícím se průtokem se mění průtočná plocha vlivem kuželového tvaru trubice a tlakový rozdíl na plováku je konstantní. Měřený průtok se odečítá podle polohy plováku ze stupnice nebo pomocí magnetických snímačů. Schéma rotametru je na obrázku 13. [16][18][20]



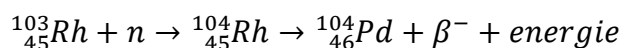
Obrázek 13: Rotametr [22]

1.2.1.4. Měření neutronového toku

Měření neutronového toku je specifické výhradně pro jadernou energetiku. Jde o jedno z nejdůležitějších měření v aktivní zóně reaktoru. Hustota toku neutronů je přímo úměrná intenzitě probíhajícího štěpení, a to je přímo úměrné k množství uvolňované tepelné energie. Nejstarším způsobem měření neutronového toku je fotografická detekce ionizujícího záření, využívaná například u osobních dozimetřů. Co se týče reaktorového měření, jsou zpravidla používané dva principy – aktivační detektory a ionizační detektory.

a) Aktivační detektory

U těchto detektorů vzniká po ozáření neutrony z neaktivního prvku radioizotop, který se rozpadá. Změřením aktivity tohoto prvku, lze určit, v jaké míře byl ozářen. Nejpoužívanějšími jsou rhodiové samonapájecí detektory. Radiačním záchytem neutronu na rhodiu vzniká radioizotop rozpadající se beta rozpadem:



Vzniklá částice β^{-} způsobuje úbytek náboje emitoru a vytváří proud detektoru. Poločas rozpadu na stabilní paladium je 4,3 minuty – mají tedy zpožděnou odezvu a slouží pouze jako informační (nemohou z nich být vyvozeny ochranné funkce). Jejich výhodami je jejich jednoduchost, stabilita při působení teplot a tlaku, malé vyhořívání a nepotřebují žádný přívod energie.

b) Ionizační detektory

Využívají ionizačních účinků na látku. V ionizační komoře je v plynném prostředí umístěna anoda a katoda, připojené do elektrického obvodu. Plyn mezi elektrodami je nevodivý a elektrický obvod není za normálních okolností uzavřen. Vnikne-li do prostoru ionizační komory záření, začne z původně neutrálního plynu vyrážet elektrony. Vzniklé kladné ionty a záporné elektrony se dají do pohybu k elektrodám a obvodem začne protékat proud přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření. Výhodou oproti aktivačním detektorům je jejich velmi rychlá odezva. [20][23][24]

1.2.2. Měření na primárním okruhu

Jaderná elektrárna je pro správný a bezpečný chod vybavena řadou systémů. Co se týče měření, je vybavena systémy, do kterých se soustřeďují a zpracovávají informace z jednotlivých čidel. Odtud se signály posílají do informačních, řídicích a bezpečnostních systémů. Tyto podsystémy tvoří dohromady rozsáhlý systém kontroly a řízení (SKŘ).

1.2.2.1. Systémy měření na primárním okruhu

Bezpečnost a efektivita jaderných elektráren z velké části závisí na rychlosti a přesnosti důležitých provozních parametrů. Dále jsou vyjmenovány některé příklady dílčích systémů měření na primárním okruhu. Mezi další nezminěné pak patří například měření tlaku a hladiny v kompenzátoru objemu, tlakové ztráty reaktoru a tlaku nad aktivní zónou, polohy regulačních orgánů, rozložení teplot a průtoků na smyčkách primárního okruhu, koncentrace kyseliny borité v chladiivu, atd.

a) Vnitroreaktorové měření neutronového toku

Je tvořeno kanály měření neutronového toku, rozmístěnými rovnoměrně po celé aktivní zóně. V těchto kanálech je po výšce palivových souborů umístěno několik samonapájecích rhodiových detektorů v hermetickém plášti. Vyvedení je provedeno vodícími kanály bloku ochranných trub.

b) Měření neutronového toku vně reaktoru

Hustota neutronového toku se na vnější straně reaktoru měří ionizačními detektory, udávajícími okamžitý přehled o celkovém výkonu reaktoru a hrubý přehled o jeho rozložení v aktivní zóně. Díky rychlé odezvě je toto měření součástí systému ochrany reaktoru. Z důvodu potřeby velkého rozsahu měření jsou detektory rozděleny do několika skupin pokrývajících celý rozsah výkonu (od monitorování odstaveného reaktoru po hlavní provozní měření, případně k účelům pohavarijního monitorování).

c) Měření teplot na výstupu z aktivní zóny

Je provedeno termočlánky typu K umístěnými na výstupu z palivových souborů. Dále je měřena teplota v horní části reaktoru. Vývody termočlánků se spojují do několika skupin a přes blok ochranných trub a víko reaktoru jsou vedeny do kompenzačních krabic, ve kterých je měřena teplota odporovými teploměry. Tato teplota je teplotou srovnávacího konce termočlánků. Z kompenzačních krabic jsou signály vedeny kabelovými trasami do vyhodnocovacích systémů.

d) Měření hladiny v reaktoru během provozu

Slouží ke sledování hladiny během provozu a ke sledování zásoby chladiiva během havárií se ztrátou chladiiva. Měří se dvěma způsoby – na základě diferenčního tlaku nebo změny charakteru přestupu tepla. První způsob vychází z rozdílné měrné hustoty vody a vodní páry. Nejsou-li v provozu hlavní cirkulační čerpadla, sleduje se hydrostatický tlak v tlakové nádobě reaktoru. Jsou-li čerpadla spuštěna, sleduje se dynamický tlak média ve smyčkách. Druhý způsob využívá skutečnosti, že přestup tepla je řádově odlišný pro obě fáze chladicího média. Systém je považován za bezpečnostní a je zálohován.

e) Měření teplot na hlavních cirkulačních smyčkách

Pro měření se používají odporové teploměry nebo termočlánky (případně obojí). Obsahují-li větve smyček hlavní uzavírací armatury, je důležité především měření na neoddělitelné části jednotlivých větví (mezi hlavní uzavírací armaturou a reaktorem). Snímače je z důvodu vysoké rychlosti proudění nutné umístit do teploměrných jímek – kovové trubice chránící před mechanickým a chemickým poškozením.

f) Měření netěsností na primárním okruhu během provozu

K detekci a lokalizaci úniků z primárního okruhu slouží vícero měření. Prvním je měření akustického signálu, který vzniká při průchodu média trhlinou, přičemž je možno určit přibližný rozsah i místo úniku. Dalším způsobem je měření vlhkosti uvnitř kontejnmentu. Obě metody jsou poměrně rychlé a spolehlivé. Pro jejich potvrzení se používají další způsoby, například detekce aerosolů v kontejnmentu nebo z hmotnostní bilance chladiva. Pro detekci netěsností na trubičkách parogenerátorů se měří aktivita na sekundárním okruhu z odvalu a odkalu parogenerátorů. [20][25]

1.2.2.2. Měření tepelného výkonu reaktoru

Jedním z nejzákladnějších parametrů energetického zařízení je tepelný výkon. Obecně se určuje součinem hmotnostního průtoku média, procházejícího tepelným zdrojem, a rozdílem měrné entalpie za zdrojem a před zdrojem tepla:

$$Q = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

kde \dot{m} je hmotnostní průtok média a h_1 , h_2 jsou měrné entalpie vstupujícího a vystupujícího média, které jsou funkcí tlaků a teplot.

Na primárním okruhu nelze průtok média z důvodu bezpečnosti měřit pomocí žádných škrťících orgánů. Je možné jej stanovit ze známých hydraulických charakteristik čerpadel, případně hydraulických odporů parogenerátorů nebo reaktoru. Pro přesné stanovení tepelného výkonu je ale vhodné využít nepřímou metodu měření na základě tepelné bilance mezi primárním a sekundárním okruhem. Uvažováním přímé rovnosti mezi tepelným výkonem reaktoru a tepelným výkonem primárního okruhu, měřeného ze sekundární strany, bude vztah následující:

$$Q_R = \sum_{i=1}^n Q_{PG_i} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{PG_i} \cdot \Delta h_{PG_i}$$

kde Q_R je tepelný výkon reaktoru, Q_{PG_i} je tepelný výkon i -tého parogenerátoru, \dot{m}_{PG_i} hmotnostní průtok i -tého parogenerátoru, Δh_{PG_i} měrný entalpický spád i -tého parogenerátoru a n je celkový počet parogenerátorů na chladících smyčkách.

Měření teplot a tlaků pro určení měrných entalpií se provádí před a za jednotlivými parogenerátory běžnými snímači a průtoky je možné měřit pomocí škrťících orgánů.

Díky tomuto měření je zároveň možné stanovit rozložení tepelného výkonu do jednotlivých smyček. [20]

1.3. Provoz a řízení jaderné elektrárny

Provoz a řízení jaderného bloku jsou v mnoha ohledech odlišné od provozu konvenčních elektráren. Je zde kladen vysoký důraz na bezpečnost a veškeré zásahy do řízení jsou dány provozními předpisy, schválenými státními dozornými orgány.

1.3.1. Uvádění elektrárny do provozu

Po dokončení výstavby jaderné elektrárny, před samotným komerčním spuštěním, musí proběhnout řada kontrol a zkoušek, včetně chodu na nulovém výkonu a postupného zvyšování až na jmenovité parametry. Tyto činnosti jsou běžně řazeny do 3 fází – komplexní zkoušení, fyzikální spouštění a energetické spouštění. Proces spouštění se zakončuje průkazným provozem a uvedením elektrárny do komerčního provozu. [26]

1.3.1.1. Komplexní zkoušení

Komplexní zkoušení je prvním krokem spouštění a provádí se bez přítomnosti jaderného paliva. Prokazuje správnost a úplnost zařízení podle projektu. Zkoušky se zabývají technickými a vzduchotechnickými systémy v budově reaktoru a v budově aktivních pomocných provozů a dále řídicími a diagnostickými systémy primárního a sekundárního okruhu včetně havarijních systémů. Následně se prokazuje integrita kontejnmentu a těsnost všech hermetických průchodů. Součástí je i hydrozkouška primárního okruhu, která zahrnuje kontrolu čistoty a těsnosti primárního okruhu a jeho ohřev a natlakování na provozní parametry. [3][26][27]

1.3.1.2. Fyzikální spouštění

Proces fyzikálního spouštění začíná již se zavezeným palivem v aktivní zóně, avšak výkon reaktoru zůstává zanedbatelně nízký tak, že není nutný nucený odvod tepla. Důraz se v této fázi klade na jaderně-fyzikální vlastnosti reaktoru, důležité pro následné spolehlivé zvyšování výkonu. Kritičnosti je poprvé dosaženo snížením koncentrace kyseliny borité a výkon reaktoru se udržuje na minimálním kontrolovaném. To je takový, při kterém je hustota toku neutronů dostatečná pro její měřitelnost detektory s omezenou citlivostí. Provádí se řada kalibračních experimentů s regulačními tyčemi a roztokem kyseliny borité a dále se měří závislost reaktorových charakteristik. [3][26]

1.3.1.3. Energetické spouštění

Závěrečnou etapou spouštěcích prací je energetické spouštění. Postupně v krocích se zvyšuje výkon reaktoru a experimenty jsou prováděny na několika výkonových hladinách. Provádí se zkoušení dynamických vazeb mezi primárním a sekundárním

okruhem, zkoušení a kalibrace měřících přístrojů používaných ve výkonových stavech, kontrola systémů a integrity zařízení a další. Ověřuje se provozuschopnost jak v ustálených, tak v přechodových stavech. Po dosažení dostatečného výkonu je přifázována turbína a zatíženy generátory. [26]

1.3.2. Provozní režimy jaderných reaktorů

Provozní režimy jsou klasifikovány podle mezinárodních dokumentů do čtyř kategorií, předpokládaných projektem. Rozdělení zahrnuje normální provoz, abnormální provoz a havarijní podmínky. Klasifikace provozních režimů je v tabulce 1. [14]

Tabulka 1: Klasifikace provozních režimů [14]

Pravděpodobnost vzniku události (1/reaktor rok)	Kategorie	Název režimu
Trvalý provoz	Kategorie I	Normální provoz
$< 10^{-1}$	Kategorie II	Abnormální provoz
$< 10^{-2}$	Kategorie III	Havarijní podmínky (projektové nehody)
$< 10^{-3}$	Kategorie IV	

1.3.2.1. Normální provoz

Kategorie I je normální provoz. To zahrnuje všechny operace plánovaného provozu, kdy jsou splněny všechny limity a podmínky. Patří sem provoz na výkonu, spouštění a odstavování bloku, zvyšování a snižování výkonu a výměna paliva. Konkrétní podskupiny režimů normálního provozu se u elektráren poněkud liší, v tabulce 2 jsou uvedeny provozní režimy normálního provozu pro elektrárny EDU a ETE. [14]

Tabulka 2: Provozní režimy normálního provozu [14]

Režim	Název režimu	Výkon reaktoru (% N_{nom})	Reaktivita (%)	Teplota chladiva (°C)
1	Provoz na výkonu	> 2	> -1	> 250 (EDU) > 260 (ETE)
2	Nevýkonový provoz (doba trvání do 72 hodin)	≤ 2	≥ -1	> 190 (EDU) > 260 (ETE)
3	Horká rezerva (EDU) Horký stav (ETE)	Zbytkový	< -1	≥ 180 (EDU) > 260 (ETE)
4	Polohorká rezerva (EDU) Polohorký stav (ETE)	Zbytkový	< -1	≥ 90 (EDU) 150 – 260 (ETE)
5	Odstavení s dochlazením (EDU) Studený stav (ETE)	Zbytkový	< -1	< 90 (EDU) 70 – 150 (ETE)
6	Odstavení s roztěsněním (EDU) Odstávka (ETE)	Zbytkový	< -1 (EDU) < -2 (ETE)	< 90 (EDU) < 70 (ETE)
7	Vyvezení paliva (EDU) (v ETE patří do režimu 6)	Palivo vyvezeno z reaktoru		

1.3.2.2. Abnormální provoz

Abnormální provoz odpovídá kategorii II. Patří sem stavy a události odlišující se od normálního provozu, ale které lze očekávat. Tyto události nevedou k poškození paliva

ani k porušení integrity primárního okruhu, ale mohou vést k rychlému odstavení reaktoru. Po jejich skončení a odstranění příčin je blok opět schopen normálního provozu.

Do této kategorie patří například výpadek jednoho či více cirkulačních čerpadel, výpadek turbíny, ztráta pracovních a rezervních zdrojů napájení, ztráta vakua v kondenzátoru turbíny, prasknutí trubek instrumentace procházející stěnami ochranné obálky, neúmyslné otevření přepouštěcího nebo pojistného ventilu kompenzátoru objemu a další. [14]

1.3.2.3. Havarijní podmínky

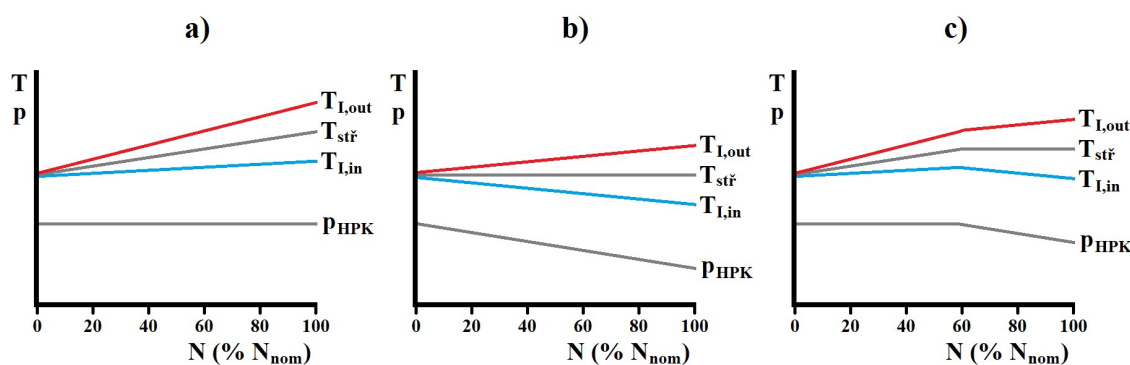
Havarijní podmínky spadají do kategorií III a IV. Kategorie III zahrnují havárie, vyskytující se pouze zřídka. Tyto události mohou způsobit nízké poškození paliva, ale nesmí při nich dojít ke ztrátě dalších bariér (hranice primárního okruhu a ochranné obálky). Události patřící do této kategorie jsou například havárie s chybnou činností regulačních orgánů, malé havárie se ztrátou chladiva primárního nebo sekundárního okruhu, úplná ztráta nuceného průtoku chladiva reaktorem a další.

Do kategorie IV patří největší havárie, na které je blok projektován. Neočekává se, že nastanou, avšak jejich důsledkem může být vypuštění značného množství radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do okolí. Tyto havárie musí splňovat požadavky na limity pro ně určené a požadavky zajišťující funkce bezpečnostních systémů potřebných ke zvládnutí nehody. Spadají sem havárie s velkým únikem primárního nebo sekundárního chladiva, prasknutí hřídele nebo zadření rotoru hlavního cirkulačního čerpadla a další. [14]

1.3.3. Regulační program

Při všech normálních provozních režimech, musí být vhodnou regulací zajištěna rovnováha mezi výkonem reaktoru, výkonem předávaným do sekundárního okruhu a výkonem na turbogenerátoru. Teplotnímu rozdílu mezi primárním a sekundárním okruhem je výkon přímo úměrný. Regulace se zaměřuje na vybrané parametry, kterými jsou vstupní, výstupní a střední teplota chladiva v reaktoru ($T_{l,in}, T_{l,out}, T_{l,stř}$) a tlak páry v hlavním parním kolektoru (p_{HPK}), který je přímo svázán s teplotou admisní páry. Pro celý výkonový rozsah lze udržet konstantní pouze jednu z nich, hodnoty ostatních fyzikálních veličin jsou poté určeny z jejich závislostí.

V jaderných elektrárnách lze používat řadu regulačních programů, zde jsou uvedeny pouze tři nejzákladnější – regulace na konstantní střední teplotu chladiva (a), regulace na konstantní tlak páry v hlavním parním kolektoru (b) a kombinace obou předchozích (c). Všechny zmíněné způsoby regulace jsou na obrázku 14.



Obrázek 14: Regulační režimy [28]

Při regulaci na konstantní střední teplotu chladiva v primárním okruhu se bude při změnách výkonu měnit teplota a tlak admisní páry na sekundární straně. Při regulaci na konstantní tlak admisní páry se naopak při změně výkonu bude měnit střední teplota chladiva v primárním okruhu. [14][28]

1.3.3.1. Regulace na konstantní střední teplotu primárního chladiva

Tento režim ve srovnání s režimem regulace na konstantní tlak v hlavním parním kolektoru obecně vytváří lepší podmínky pro provoz primárního okruhu. Při změně výkonu se mění pouze teplotní rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou z reaktoru, střední teplota chladiva zůstává stejná. Z toho vyplývají nižší požadavky na velikost kompenzátoru objemu a jeho regulační obvody pro kompenzaci objemových změn vlivem změny teploty. Zároveň je výhodný pro reaktory s velkým záporným teplotním koeficientem reaktivity, které mají vysokou samoregulační schopnost.

Příkladem samoregulačního procesu může být snížení výkonu turbín, při kterém se sníží odebrané množství páry z parogenerátoru, ve kterém začne růst tlak i teplota. To má za následek snížení odběru tepla z primárního okruhu, který se začne nahřívát, a reaktor vlivem záporného teplotního koeficientu reaktivity začne snižovat výkon. Díky tomu jsou kladeny nižší nároky na počet a velikost regulačních orgánů.

Nevýhodou této regulace jsou poměrně velké změny teploty a tlaku v sekundárním okruhu, což negativně ovlivňuje turbínu. Jelikož tlak s klesajícím výkonem vzrůstá, je nutné dimenzovat sekundární okruh na vyšší parametry. [16][28]

1.3.3.2. Regulace na konstantní tlak páry v hlavním parním kolektoru

Naopak regulace na konstantní tlak v hlavním parním kolektoru vytváří lepší podmínky pro provoz a řízení sekundárního okruhu, s čímž souvisí vyšší účinnost tepelného cyklu. Další výhody a nevýhody jsou opačné oproti předchozímu režimu.

Pro relativně neměnnou teplotu vody sekundárního okruhu je při zvyšování výkonu potřeba zvyšovat střední teplotu primárního okruhu a naopak. Proti tomu působí zpětné vazby a je potřeba více regulačních orgánů. Zároveň změny střední teploty vyvolávají změny objemu vody a jsou kladeny vyšší požadavky na kompenzaci. Aby nemusel být

kompenzátor objemu příliš velký, volí se kompromisní řešení a kompenzátor se dimenzuje na rychlé změny výkonu pouze v omezeném rozsahu. Větší výkonové změny, například rychlé snížení výkonu turbíny, je pak nutné řešit přepouštěním části páry z parogenerátorů do přepouštěcích stanic, aby nedocházelo k působení havarijních ochran reaktoru.

Přechodové režimy je tímto programem možné realizovat podle priorit dvěma způsoby – od reaktoru k turbíně nebo od turbíny k reaktoru. To znamená, že na odběratelem požadovanou hodnotu elektrického výkonu může být řízen výkon reaktoru a soulad mezi fyzikálními parametry pak udržuje automatický regulátor turbíny a naopak. [14][16][28]

1.3.3.3. Regulace kombinovaná

Posledním základním typem regulace je regulace kombinovaná, spojující obě předchozí dohromady. Zde se při nižších výkonových hladinách (do 50 – 70 % nominálního výkonu) aplikuje regulace na konstantní tlak páry v hlavním parním kolektoru a při vyšších výkonech regulace na konstantní střední teplotu primárního chladiva.

Cílem kombinované regulace je sloučit výhody obou předešlých. Regulace na konstantní tlak páry v hlavním parním kolektoru při nižších výkonech snižuje maximální hranici tlaku a teploty páry v sekundárním okruhu. Při vyšších hladinách výkonu, na kterých blok obvykle pracuje, je výhodné používat regulaci na konstantní střední teplotu primárního chladiva z důvodu optimálního chodu primárního okruhu a maximálního využití samoregulačních vlastností reaktoru. [16][28]

1.3.4. Normální a abnormální přechodové režimy

Každý přechodový proces má za následek nerovnováhu mezi produkcí páry a její spotřebou, která se projeví na změně tlaku páry v sekundárním okruhu. V těchto stavech je zapotřebí najít novou rovnováhu vhodnou regulací a blokádami. Pomalé kontrolované procesy, jako jsou najíždění, odstavování, změny výkonu, atd., lze zvládat normálními provozními regulátory. U rychlých změn při poruchových stavech je potřeba dopomoc zásahem limitačních systémů.

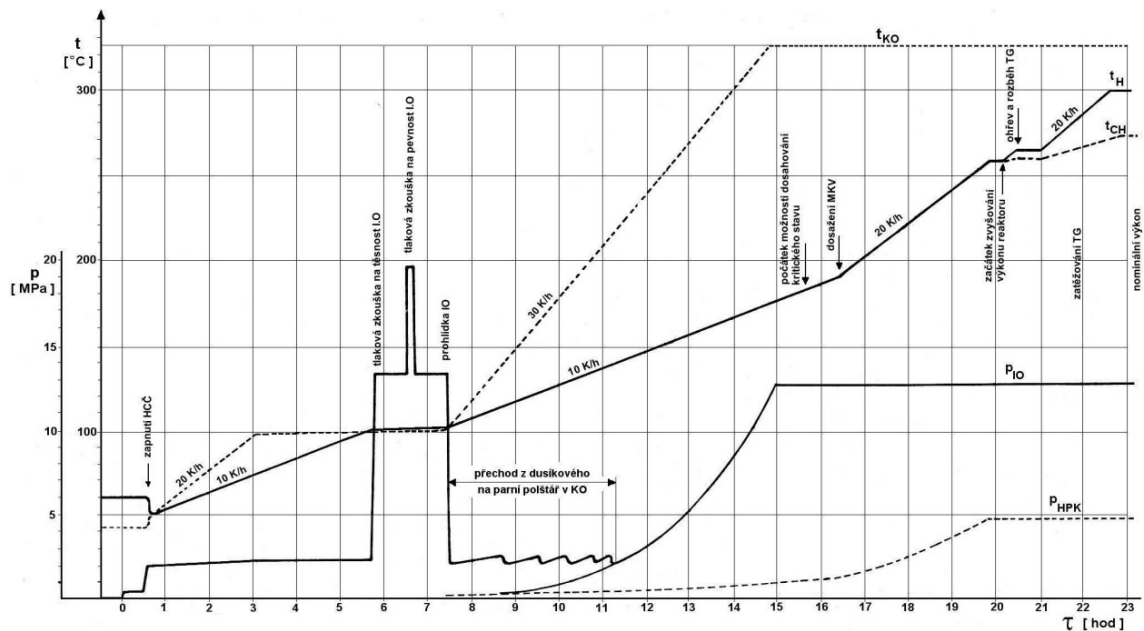
V případě, že je možné použít binární signály (vypnuto – zapnuto, otevřeno – zavřeno), nemusí být reakce regulátorů závislá výhradně až na změně fyzikálního parametru (tlak v hlavním parním kolektoru, hladina v parogenerátoru, teplota primárního chladiva, ...). Je-li na základě binárního signálu rozpoznán příslušný režim, pak regulátory mohou být do požadovaných stavů přepnuty okamžitě. Zde se může jednat například o stav vypínače hlavního cirkulačního čerpadla, poloha rychlouzávěrů turbíny, atd.

Dále jsou popsány některé nejčastější normální či abnormální přechodové režimy vyskytující se na jaderném bloku. [14]

1.3.4.1. Ohřev primárního okruhu

Po každé odstávce a výměně paliva je nutné primární okruh utěsnit, natlakovat a ohřát na provozní teplotu. K ohřevu jsou k dispozici tři zdroje tepla – čerpací práce hlavních cirkulačních čerpadel, zbytkový výkon jaderného paliva a elektroohříváky v kompenzátoru objemu. Ohřát je nutné jak vodu v primárním okruhu, tak kotlovou vodu na sekundární straně parogenerátorů, ale i samotnou ocelovou konstrukci celého okruhu.

Z tepelné bilance, při uvážení tepelných ztrát, lze vypočítat potřebný čas k prohřátí celého okruhu. Rychlost ohřevu je omezena z důvodu šetrnosti k materiálům. U bloků VVER je povolena rychlost ohřevu $20^{\circ}\text{C}/\text{h}$ pro chladivo v primárním okruhu a $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ pro chladivo v kompenzátoru objemu. Na obrázku 15 je průběh základních parametrů primárního okruhu při jeho ohřevu. Během celého procesu jsou na určitých hladinách výdrže pro těsnostní a pevnostní tlakové zkoušky. Také je zde vyznačen přechod z dusíkového na parní polštář v kompenzátoru objemu. [14]

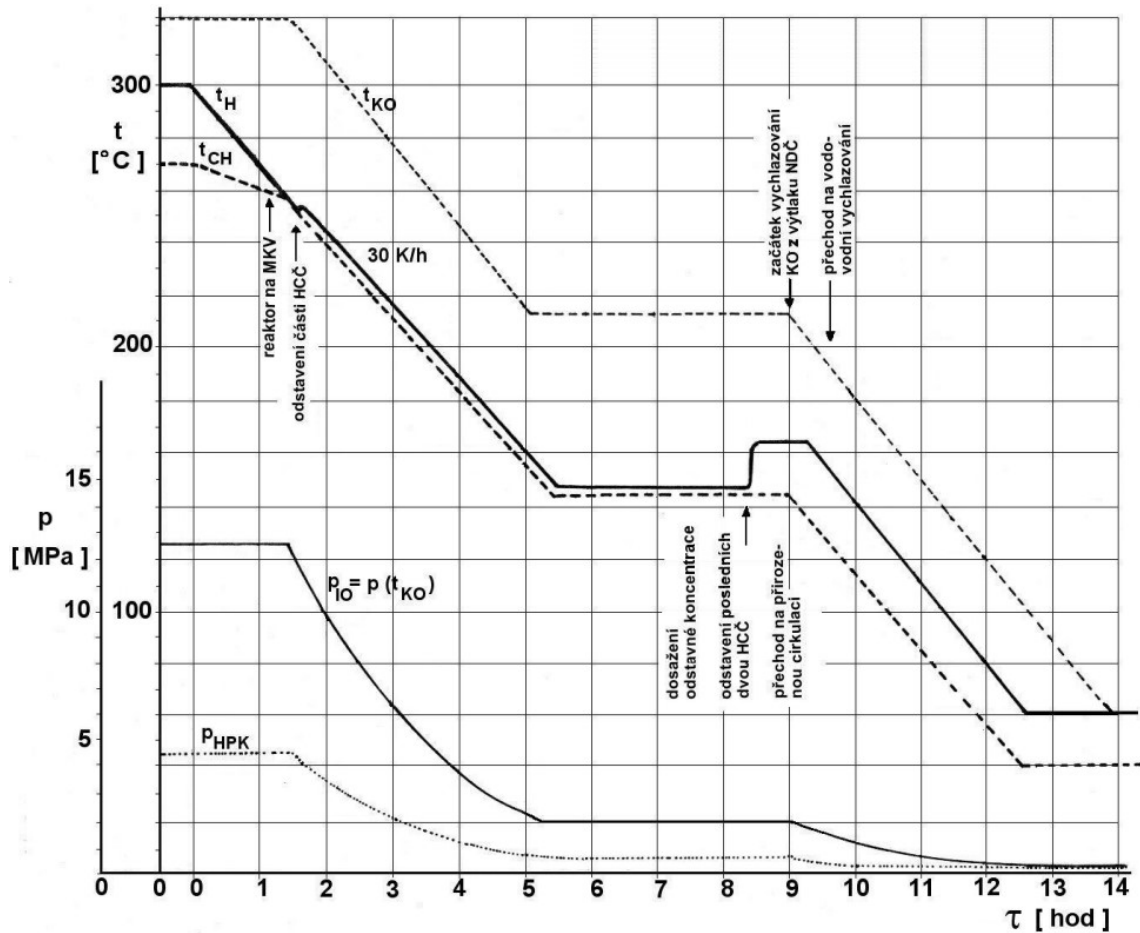


Obrázek 15: Změna hlavních parametrů při ohřevu primárního okruhu [29]

1.3.4.2. Vychlazování bloku

Před vychlazováním je nutné nejdříve snížit výkon bloku na nulu. To se provádí v režimu konstantního tlaku páry v hlavním parním kolektoru, snižováním výkonu reaktoru trendem zhruba $1\% N_{nom}/min.$ a následným odstavením turbogenerátoru postupným uzavřením rychlozavěrných ventilů a převedením zbylé páry do přepouštěcích stanic kondenzátorů. Teplo se pak odvádí z parogenerátorů přímo do kondenzátorů turbíny. Vychlazování se zahajuje až při zvýšené koncentraci kyseliny borité, zajišťující bezpečnou podkritičnost a při stálé nucené cirkulaci primárního chladiva.

Je nutné odvést teplo naakumulované, teplo ze zbytkového výkonu a teplo z čerpací práce hlavních cirkulačních čerpadel. Maximální rychlost vychlazování je pro bloky VVER 30°C/h. Zároveň je nutné vychlazovat i kompenzátor objemu prostřednictvím sprchového systému. Následuje postupné vypínání hlavních cirkulačních čerpadel a přechod na přirozenou cirkulaci. Časová změna parametrů při vychlazování primárního okruhu je na obrázku 16. [14][29]



Obrázek 16: Změna hlavních parametrů při vychlazování okruhu [29]

1.3.4.3. Regulace výkonu bloku

Regulace na výkonovém provozu může probíhat až od 50 do 100 % nominálního výkonu u VVER 440 a od 70 do 100 % u VVER 1000, podle potřeb soustavy. Požadavkům sítě lze vyhovět v režimech primární, sekundární nebo terciální regulace. Konkrétní hodnoty v následujícím textu jsou určeny pro bloky VVER 1000.

Primární regulace je uplatněna v rozsahu ± 20 MW tepelného výkonu. V tomto rozsahu je reaktor schopen vyrovnávat výkon samoregulací, přičemž je potřeba nezapomenout, že samoregulační vlastnosti se v průběhu kampaně mění. Účelem této regulace je stabilizovat síť v případě její měnící se frekvence. Turbogenerátor je v režimu regulace elektrického výkonu se zapojeným korektorem frekvence.

Sekundární regulace je změna výkonu až o 100 MW v krátkých intervalech podle pokynů dispečinku. Rychlost změny elektrického výkonu je až 10 MW/min. Turbogenerátor v režimu regulace elektrického výkonu vyhovuje skokovým požadavkům zadavače elektrického výkonu generátoru.

Účelem terciální regulace je větší snižování výkonu nebo úplně odstavení bloku při přebytčích v soustavě. Požadavek na snížení výkonu je režimově stejný jako u sekundární regulace – turbogenerátor v režimu regulace elektrického výkonu. Rozdíl je v potřebě přechodu z páry z odběrů na turbíně na páru z redukčních stanic (zásobovaných ostrou parou) z důvodu nedostačujícího parního výkonu pro topení napájecí nádrže a pro pohon napáječek. [14]

1.3.4.4. Výpadek hlavních cirkulačních čerpadel

Výpadek některých hlavních cirkulačních čerpadel, a provoz s alespoň třemi pro bloky VVER 440 nebo dvěma pro bloky VVER 1000, jsou projektem předpokládány režimy a je povoleno zachovat energetický provoz v případě, že dojde k úměrnému snížení výkonu reaktoru. Limitní výkony vychází z kritérií nedosažení varu v palivových souborech.

Díky setrvačnickům je po výpadku čerpadel prodlužován jejich doběh. Čas doběhu se mění v závislosti na tom, kolik čerpadel vypadne a jak intenzivní je brzdění protitlakem od pracujících čerpadel. K zamezení přechodu čerpadla do turbínového režimu je instalováno aretační zařízení zabráňující zpětnému otáčení rotoru. Dále pracující čerpadla na sebe nabírají část průtoku vypadlých čerpadel, což znamená, že průtok reaktorem není snížen o celé množství průtoku vypadlé smyčky, a je tedy i menší zpětný průtok vypadlou smyčkou.

Výpadek čerpadla je indikován binárním signálem příslušného vypínače nebo ztrátou napětí na sekci, odkud je čerpadlo napájeno. Tento signál okamžitě vyvolá zapůsobení příslušných limitačních, případně havarijních systémů. Na snížení výkonu reaktoru reaguje turbogenerátor snížením odběru páry. Je-li odstraněna příčina poruchy bez odstavení reaktoru, může být vypadlé čerpadlo opětovně spuštěno. V případě výpadku všech hlavních cirkulačních čerpadel dochází k rychlému odstavení reaktoru zapůsobením havarijní ochrany reaktoru. [14]

1.3.4.5. Rychlé odstavení reaktoru

Jde o jeden z nejméně žádoucích přechodových režimů. Plynulé změny výkonu mají relativně malý vliv na čerpání životnosti komponent, to se ale nedá říct o poruchových režimech s rychlou změnou fyzikálních parametrů. Odstavení je realizováno pádem všech regulačních orgánů do aktivní zóny – historicky označováno jako SCRAM (Safety Control Rod Axe Man). Vlivem odstavení reaktoru klesá parní výkon, přivírají regulační ventily turbíny a po pár sekundách uzavírají rychlozávěrné ventily působením limitačního systému. [14]

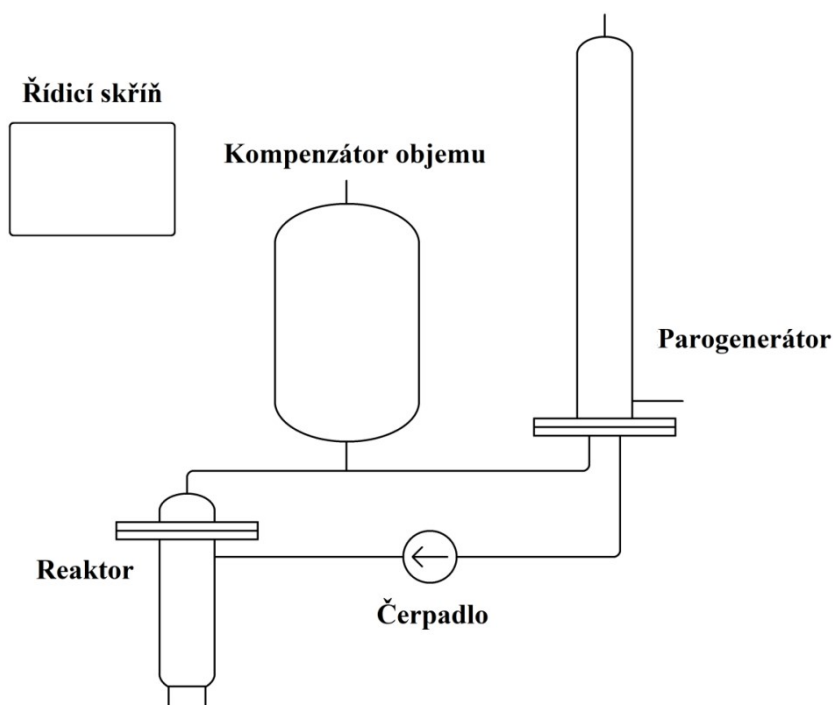
2. Model primárního okruhu

Tato kapitola je věnována popisu hlavního cíle práce – sestrojení funkčního modelu primárního okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem, určenému pro experimentální a výukové účely. Celý postup je rozepsaný do několika kapitol od prvotního výpočtu a návrhu, přes montáž komponent a elektrozařízení až po spouštění a testy.

2.1. Úvod

Základem smyčky je ocelová nádoba představující reaktor, ve které je umístěno elektrické topení, nahrazující jaderné palivo. Tato nádoba (dále reaktor) je měděným potrubím spojena s tepelným výměníkem, sloužícím jako parogenerátor. V uzavřeném okruhu mezi reaktorem a parogenerátorem je na studené větvi umístěné čerpadlo, zajišťující nucenou cirkulaci chladiva (vody) mezi nádobami. Pro kompenzaci tepelných dilatací vody a změn tlaku v okruhu, je v horní části na horké větvi umístěna expanzní nádoba představující kompenzátor objemu na jaderné elektrárně. V kompenzátoru bude za provozu hladina vody dosahovat zhruba dvou třetin výšky nádoby, zbytek objemu bude vyplněn směsí vzduchu a vodní páry. K řízení a regulaci tlaku slouží topení o nižším výkonu umístěné v kompenzátoru.

Všechny součásti jsou z nerezové oceli, propojené topenářskými materiály – měděným potrubím s mosaznými armaturami, pájenými tvrdou pájkou. Základní představa okruhu je zachycena na obrázku 17. Reaktor a parogenerátor jsou složeny z rozebíratelných dílů smontovaných přírubami.



Obrázek 17: Schéma modelu okruhu

Součástí okruhu bude elektrická rozvodná skříň, umožňující měřit a řídit hlavní parametry prostřednictvím řídicí desky Arduino připojené k počítači. Měřeny budou tlaky a teploty na několika místech a současně průtok vody smyčkou. Ovládat bude možné topení v reaktoru a topení v kompenzátoru objemu pro regulaci tlaku a dále spínání čerpadla.

2.1.1. Okrajové podmínky

Samotnému návrhu předchází určení okrajových podmínek. Směrodatnou veličinou je tlak vody v okruhu. Na tlaku je závislá teplota sytosti vody a podle ní se dále volí teploty na jednotlivých místech okruhu. S ohledem na dostupnost komponent, jako jsou topnářské prvky – potrubí, armatury, ventily, atd., ale také čerpadlo, je zvolen tlak $0,5 \text{ MPa}$. Tomuto tlaku odpovídá teplota sytosti $151,8 \text{ }^\circ\text{C}$, které by bylo vhodné dosahovat v kompenzátoru objemu. Limitní teplota a tlak je volena jako kompromis mezi technickou proveditelností, náklady, bezpečností a dostatečnou termohydraulickou reprezentací skutečného oběhu.

Dalším omezujícím parametrem je samotná velikost okruhu. Celé zařízení musí být přiměřeně snadno transportovatelné. Jednotlivé komponenty, potrubí i veškeré elektrické prvky budou upevněné do kovového rámu o šířce $1,4 \text{ m}$ a výšce $1,45 \text{ m}$.

2.2. Výběr základních prvků

V tomto případě se jedná o elektrické topné těleso a čerpadlo. Obě komponenty jsou běžně dostupné na trhu a od jejich volby se bude dále odvíjet celý návrh.

2.2.1. Topné těleso

Jedná se o klasické elektrické topné těleso používané k ohřevu vody v bojleru. Tato tělesa se typicky vyrábí s výkonem cca od $1,5 \text{ kW}$ po 12 kW . Pro co největší ohřev vody, ale s ohledem na omezený prostor, je zvoleno topné těleso o výkonu $4,5 \text{ kW}$, zobrazené na obrázku 18.



Obrázek 18: Topné těleso v reaktoru [30]

Vybrané topení se skládá ze tří topných větví tvaru U, z nichž každá má výkon $1,5 \text{ kW}$. Topné větve jsou upevněné v šestihřanné hlavici OK65, se závitem $M48 \times 2$. Délka

topné spirály je cca 350 mm. Napájení je možné buď sdruženým napětím 400 V (zapojení do trojúhelníku) nebo fázovým 230 V (zapojení do hvězdy). Pro vybrané těleso k modelu je zvoleno zapojení do hvězdy (3x230 V), které umožní snazší regulaci výkonu.

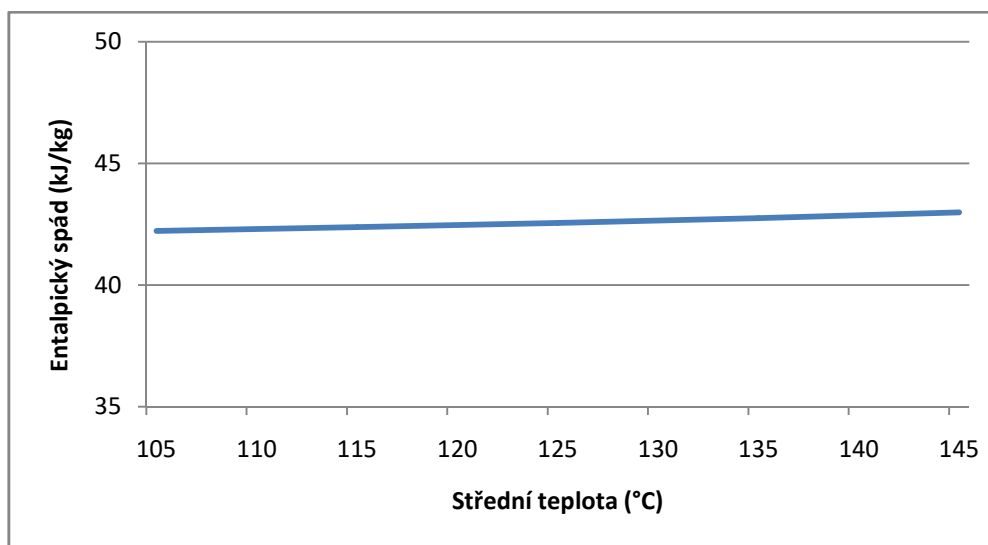
2.2.2. Čerpadlo

Jak již bylo zmíněno, zvolenému tlaku v okruhu $p = 0,5 \text{ MPa}$, odpovídá teplota sytosti $T_{sat} = 151,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Dále je potřeba znát teplotní spád na reaktoru, ze kterého se určí entalpický spád Δh a následně vypočítá potřebný hmotnostní průtok \dot{m} ze vzorce:

$$Q = \dot{m} \cdot \Delta h$$

kde Q je tepelný výkon topného tělesa.

Vzhledem k výkonu topení a požadovanému průtoku v řádech jednotek litrů za minutu, nemusí být teplotní spád příliš velký. Je volen $10 \text{ }^\circ\text{C}$. V případě, že teplota v žádném místě reaktoru nedosáhne teploty sytosti a nedojde k varu, což je jedna z limitních podmínek provozních režimů tlakovodních reaktorů, bude entalpický spád na reaktoru přibližně přímo úměrný teplotnímu spádu. Průběh změny entalpie pro konstantní změnu teploty o $10 \text{ }^\circ\text{C}$ v závislosti na různé střední teplotě je na obrázku 19.



Obrázek 19: Závislost změny entalpie na střední teplotě vody

Z grafu lze vyčíst, že změna entalpie pro změnu teploty o $10 \text{ }^\circ\text{C}$ se v uvedeném rozsahu pohybuje přibližně od 42 do 43 kJ/kg. Měnit se tedy nebude (při změnách střední teploty, se zachováním teplotního spádu) ani hmotnostní průtok v okruhu. Běžně dostupná čerpadla mají omezení maximální teploty média do $130 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro další výpočty bude tedy uvažována teplota vody ve studené větvi (zde je umístěno čerpadlo) rovna $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (zvolena rezerva $10 \text{ }^\circ\text{C}$ do limitní teploty) a po ohřátí průchodem přes reaktor $130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pro zvolené hodnoty vychází průtok, vyjádřený z předchozí rovnice:

$$\dot{m} = \frac{Q}{dh} = \frac{4\,500}{42\,500} = 0,106 \text{ kg/s}$$

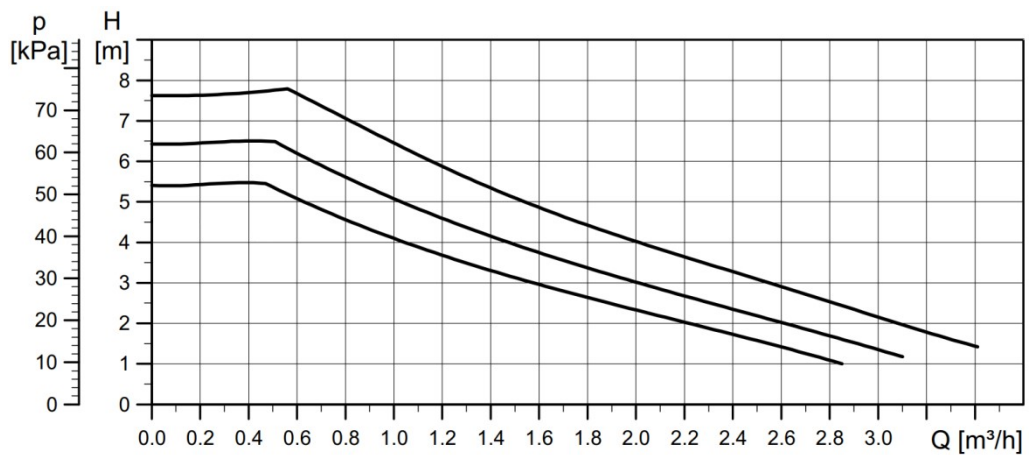
V tomto rozsahu teplot se ani hustota vody příliš nemění – při daném tlaku je pro teplotu 100 °C hustota vody 958,5 kg/m³ a pro teplotu 150 °C je 917 kg/m³. Tudiž i objemový průtok bude v rozsahu provozních teplot téměř konstantní. Při střední teplotě 125 °C bude průtok 0,405 m³/hod nebo také 6,76 l/min.

Pro zvolený provozní tlak 0,5 MPa, maximální teplotu 120 °C a objemový průtok 0,405 m³/hod, je vybráno čerpadlo Alpha Solar 15-75 130 značky Grundfos, zobrazené na obrázku 20.



Obrázek 20: Čerpadlo Alpha Solar 15-75 130 [31]

Na obrázku 21 je charakteristika čerpadla pro 3 volitelné rychlostní režimy, přepínatelné tlačítkem na krytu čerpadla.



Obrázek 21: Charakteristika čerpadla Alpha Solar 15-75 130 [31]

2.3. Konstrukční návrh komponent

Návrh jednotlivých prvků okruhu je koncipován tak, aby byla jejich konstrukce nejlépe co nejpodobnější konstrukci skutečných komponentů na jaderné elektrárně, ale zároveň, aby nebyla příliš složitá jejich výroba a využilo se co nejvíce snadno dostupných normalizovaných součástí.

Mimo hlavních, již zmíněných komponent, zde bude mnoho dalších neméně důležitých součástí. Mezi ně například patří samotné potrubí okruhu, armatury, kohouty, ale i snímače teploty, tlaku, hladiny a průtoku.

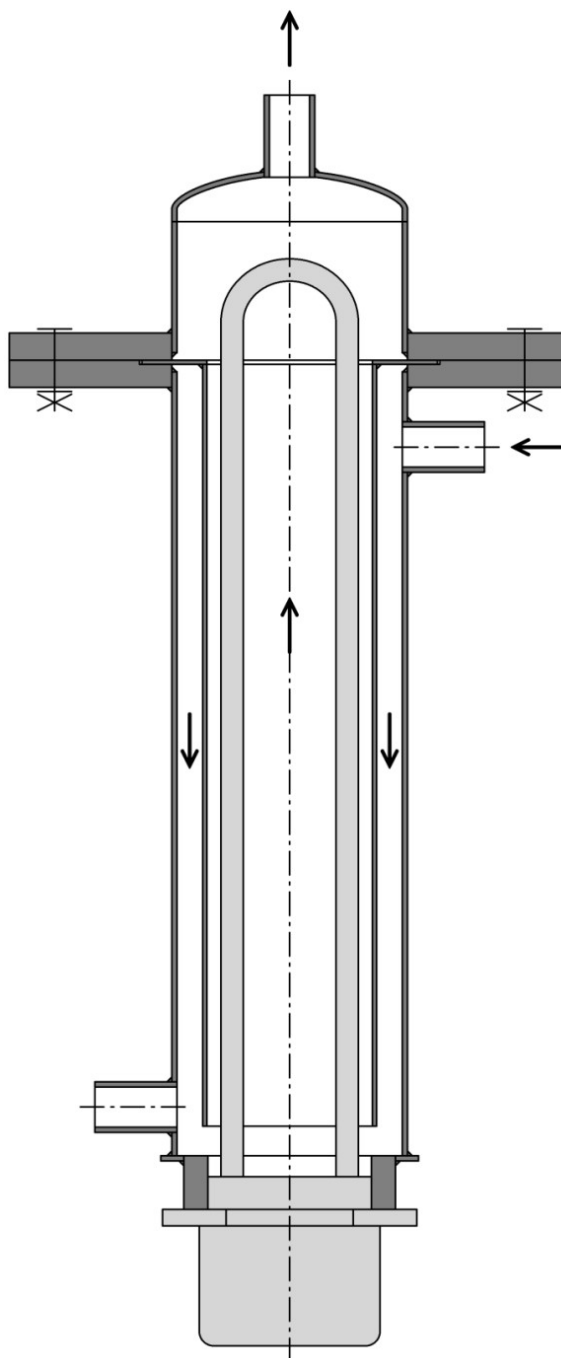
2.3.1. Reaktor

Reaktorová nádoba je svařena z normalizovaných dílů z nerezové oceli. Konstrukce reaktoru je přizpůsobena uložení topného tělesa a zároveň se snaží co nejvíce přiblížit skutečné reaktorové nádobě. Schematický náčrt i s umístěním topného tělesa je na obrázku 22. Na obrázku je naznačen i směr toku chladiva. V příloze 1 je umístěn orientační výkres sestavy reaktoru a výsledky simulace jednoduchého CFD výpočtu s grafickým zobrazením průběhu teplot a rychlostí v tělese. Simulace zahrnuje vytvoření modelu, vhodné nastavení sítě, volbu okrajových podmínek a vlastní výpočet, který byl v tomto případě proveden modelem k-omega SST. U rychlostí jsou zajímavé především oblasti vstupního a výstupního nátrubku, v jejichž okolí dochází k tvorbě malých vírů. Tlaková ztráta celé nádoby je podle simulace kolem 1 kPa . Průběhy teplot ukazují výskyt lokálního varu na povrchu topného tělesa, kde teploty mohou dosahovat až $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Reaktor je zhotoven ze tří dílů a jeho celková výška je přibližně $0,45 \text{ m}$. Spodní díl je tvořen plochou přírubou $DN 65$, přivařenou k trubce 70×2 . K válcové ploše zvenčí je v horní části pod přírubou přivařen vstupní nátrubek z navařovací vsuvky (niplu) s trubkovým závitem $G1/2$. Stejný nátrubek je přivařen i ve spodní části nádoby, v nejnižším místě celého okruhu, kde slouží k napouštění a vypouštění smyčky vodou. Zesponu je k trubce navařena válcová matice, do níž se šroubuje topné těleso.

Na vnitřním povrchu příruby je osazení, ve kterém je usazena šachta reaktoru. Ta odděluje vstupní a výstupní proud chladiva a je tvořena trubkou $50 \times 1,5$, přivařenou k plechovému kroužku. Chladivo proudí od vstupního nátrubku mezikružím mezi stěnou reaktoru a šachtou, na spodku nádoby se otáčí a vnitřním prostorem šachty proudí vzhůru, přičemž omývá topné těleso.

Na přírubu dosedá víko reaktoru, svařené z totožné ploché příruby a trubky jako jeho spodní část, a klenutého dna s navařovací vsuvkou, sloužící jako nátrubek pro horkou větev. Umístění nátrubku v horní části víka v ose reaktoru je z důvodu předcházení vzniku vzduchových kapes při napouštění a hromadění horkého chladiva za provozu v prostoru pod víkem.



Obrázek 22: Model reaktoru

Průměr trubky použité na šachtu je vybrán z nabídky obchodů tak, aby byla dostatečně velká mezera mezi topnými větvemi a šachtou. Zároveň průměry a tloušťky obou trubek jsou voleny tak, aby byly průtočný průřez mezikruží S_1 a průtočný průřez ve vnitřním prostoru S_2 , po odečtení plochy zabrané topnými trubicemi, přibližně shodné:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6,6^2}{4} - \frac{\pi \cdot 5^2}{4} \doteq 14,6 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - 6 \cdot \frac{\pi \cdot D_t^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4,7^2}{4} - 6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} \doteq 14,3 \text{ cm}^2$$

kde d_1 je vnitřní průměr vnější trubky, d_2 a D_2 jsou vnitřní a vnější průměr vnitřní trubky a D_t je průměr topných trubic, vše dosazované v *cm*. Velikost mezery mezi topnými větvemi a šachtou je pro tento případ cca 3 mm.

Součin pracovního přetlaku p (v *MPa*) a objemu V (v litrech) této nádoby je přibližně:

$$p \cdot V = p \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot h = 0,4 \cdot \frac{\pi \cdot 0,66^2}{4} \cdot 4 \doteq 0,4 \cdot 1,4 = 0,56 \leq 10$$

Průměr d a výška h jsou dosazované v decimetrech. Součin je menší než 10 a tedy podle normy ČSN 69 0010-1-1 o tlakových nádobách, do této normy nespadá. Už na první pohled je patrné, že pracovní přetlak 4 bary není nijak velký a navržené tloušťky stěn pro tento tlak jsou spíše předimenzované. [32]

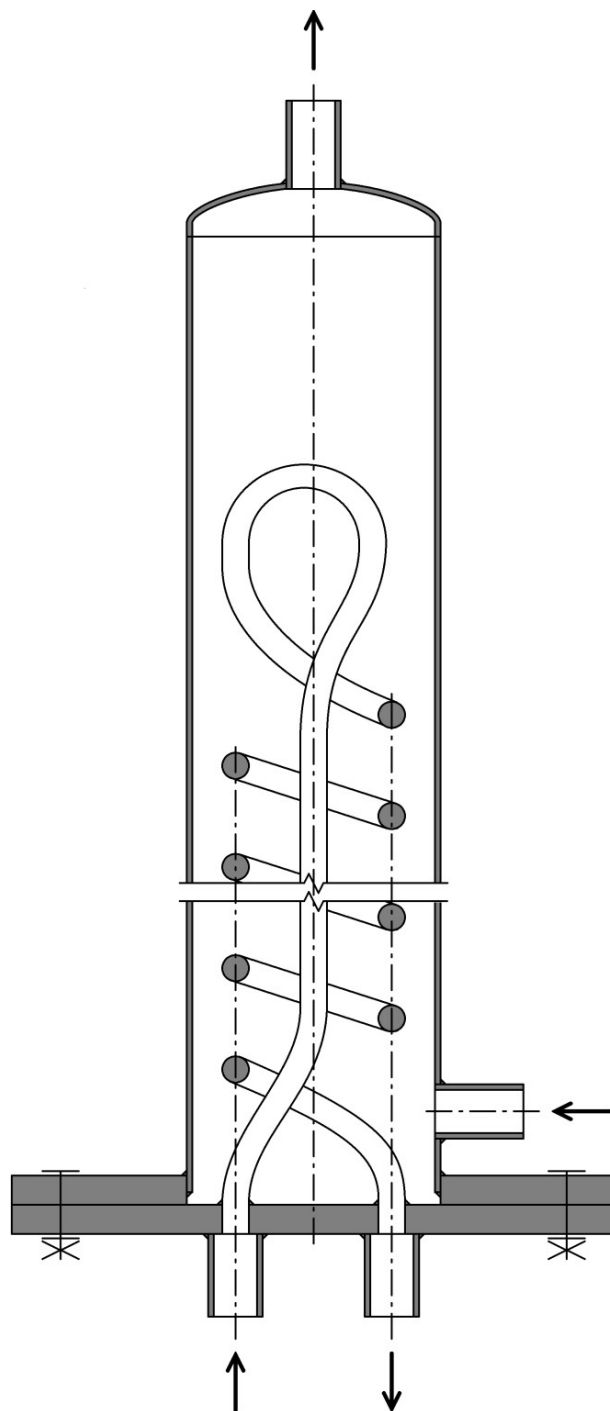
2.3.2. Parogenerátor

Na sestavení parogenerátoru jsou použity stejné nebo podobné normalizované díly jako u reaktoru. Schéma parogenerátoru je na obrázku 23 a v příloze 2 je výkres sestavy bez měděné spirály.

Parogenerátor je složen ze dvou rozebíratelných dílů z nerezové oceli. Teplosměnná plocha mezi primárním a sekundárním médiem je z měděné trubky 10x1. Spodní část parogenerátoru tvoří plochá plná příruba DN 65, do které jsou vyvrtány díry pro usazení měděné šroubovice z horní strany. Měděná šroubovice je připájena přes vloženou spojku, což umožňuje její snazší vyměnitelnost. Zespod děr v přírubě jsou navařeny ocelové nátrubky pro připojení studené a horké větve.

Horní díl je svařen z trubky 70x2 a ploché příruby DN 65, sloužící pro připojení ke spodnímu dílu. Navrchu je trubka uzavřena klenutým dnem. Díl dále obsahuje dva nátrubky z niplů, pro připojení vstupního a výstupního potrubí se sekundárním chladičem. Měděná šroubovice dosahuje přibližně do dvou třetin výšky válce. Celková výška parogenerátoru je zhruba 0,7 m.

Výška měděné šroubovice je přibližně 0,4 m a je tvořena dvanácti závity, se středním průměrem cca 50 mm. Ve vrchní části je měděná trubka ohnuta a vedena středem šroubovice zpět ke vstupnímu nátrubku. Celková délka teplosměnné měděné trubičky je přibližně 3 metry a celková plocha vnějšího povrchu trubičky přibližně 0,1 m².



Obrázek 23: Model parogenerátoru

Z důvodu složité geometrie měděné trubičky a komplikované výrobě nezahrnoval návrh parogenerátoru tepelný výpočet pro určení součinitele prostupu tepla. Základní parametry spirály (průměr trubičky a celková délka) jsou určeny pouze přibližně tak, aby vyhovovaly konstrukci parogenerátoru a byl zaručen odvod tepla. Pro spolehlivost je volena větší délka, než by bylo potřeba. Přenos tepla je možné regulovat výkonem a průtokem v systému.

2.3.3. Kompenzátor objemu

Na kompenzátor objemu je použita pětilitrová tlaková nádoba FESTO CRVZS-5, zobrazená na obrázku 24.



Obrázek 24: Tlaková nádoba FESTO CRVZS-5 [33]

Nádoba je válcového tvaru, navržena pro maximální tlak 10 barů. Obsahuje jeden nátrubek na každém eliptickém dnu, s vnitřním trubkovým závitem $G1$. K válcové ploše jsou přivařeny dvě křídla s otvory pro možnost upevnění. Mezi křídly je umístěn třetí nátrubek se závitem $G3/8$.

Nádoba bude uložena ve vertikální poloze a přes spodní nátrubek připojena k horké větvi. K hornímu nátrubku bude připojen uzel potrubí s pojistným ventilem, tlakoměrem a nátrubek s kohoutem a s koncovkou pro připojení kompresoru. Prostředním nátrubkem na kompenzátoru bude procházet topná patrona s výkonem necelých 500 W (výrobce udává hodnotu výkonu je 400 W , ale skutečný měřený výkon je vyšší) a termočlánek pro měření teploty. Výkon topení by měl pokrývat tepelné ztráty v kompenzátoru a zároveň mít rezervu pro možnost dohřívání vody a tím zvyšování tlaku v okruhu.

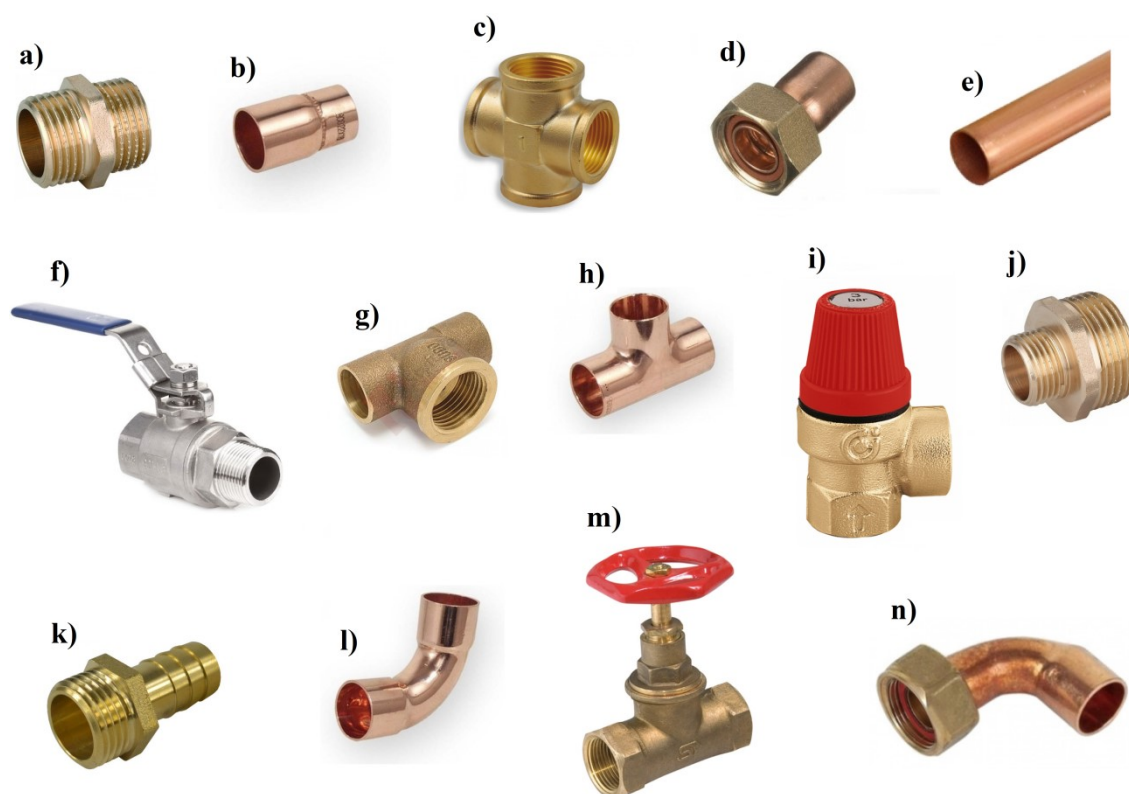
2.3.4. Potrubí a armatury

Veškeré komponenty okruhu jsou spojené měděným potrubím s použitím měděných tvarovek a mosazných armatur. Rozměr trubek je 15×1 a k ocelovým nádobám jsou připojené převlečnými maticemi s trubkovým závitem $G1/2$. V místech, kde je to potřebné, jsou použity měděné redukce nebo mosazné redukční vsuvky.

V nejnižším místě okruhu na spodním nátrubku reaktoru, určeném pro napouštění a vypouštění, je použit uzavírací kohout. Stejný kohout je umístěn nad kompenzátořem

objemu, kde umožňuje odtlakování okruhu a jeho natlakování ze zdroje stlačeného vzduchu. Tyto kohouty jsou opatřeny mosazným nátrubkem pro připojení kompresoru nebo hadice. V horní části okruhu, nad kompenzátorem, je dále pojistný ventil otevírající při tlaku 6 barů.

Za čerpadlem je umístěn uzavírací ventil, sloužící k případné ruční regulaci průtoku škrcením čerpadla. Je zde spíše pro zkoumání různých přechodových stavů a simulacím poruch. Na reálném primárním okruhu žádný škrtící ventil není, lze k němu přirovnat hlavní uzavírací armatury, avšak ty je za provozu podle provozních předpisů zakázáno používat. Veškeré použité topenářské díly jsou na obrázku 25.



Obrázek 25: Potrubí a armatury použité na konstrukci modelu [34][35][36]

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| a) Mosazná závitová vsuvka | h) Měděný T-kus |
| b) Měděná redukce | i) Mosazný pojistný ventil (6 bar) |
| c) Mosazný kříž s vnitřními závity | j) Mosazná redukovaná vsuvka |
| d) Měděné hrdlo s převlečnou matkou | k) Mosazná hadicová spojka |
| e) Měděné potrubí | l) Měděné koleno |
| f) Uzavírací kohout | m) Mosazný uzavírací ventil |
| g) Mosazný T-kus se závitem | n) Měděné koleno s převlečnou matkou |

Těsnění závitů je řešeno dvěma způsoby. Tam, kde je možné těsnit závity na čelo, jsou použity teflonové těsnící kroužky s teplotní odolností do 250°C. V případech, kde není možné použít těsnící kroužky, je těsnění zajištěno závitovým těsnícím vláknem.

Celá hlavní cirkulační část okruhu (bez větve s kompenzátorem objemu) je včetně komponent tepelně izolována čedičovou vatou s hliníkovou fólií. Tloušťka izolace komponent (reaktor a parogenerátor) je 20 mm a izolace potrubí 25 mm. Kompenzátor objemu zaizolován není, jeho tepelné ztráty jsou využívány k ochlazení vody a vzduchu pro potřeby snižování tlaku v okruhu.

V příloze 3 je snímek CAD modelu smyčky včetně všech komponent, armatur a potrubí bez izolace, vytvořeného v softwaru Autodesk Inventor.

2.3.5. Shrnutí základních parametrů

Pro přehlednost jsou v tabulce 3 uvedeny hlavní parametry okruhu, dosahované na nominálním výkonu.

Tabulka 3: Základní parametry modelu

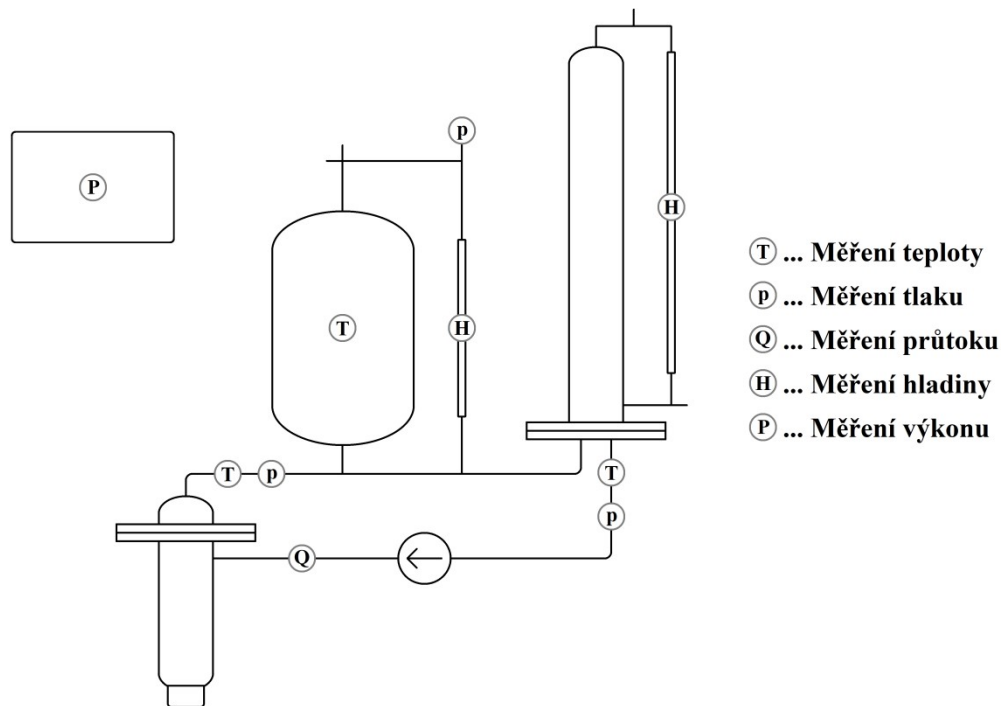
Veličina		Hodnota	Jednotka
Primární okruh	Tepelný výkon	4 500	W
	Tlak	5	bar
	Teplota sytosti	151,8	°C
	Teplota horké větve	130	°C
	Teplota studené větve	120	°C
	Průtok		0,1
		6,8	l/min
Sekundární okruh	Tlak	1	bar
	Teplota napájecí vody	20	°C

Parametry sekundárního okruhu jsou omezené, jelikož zde prozatím není žádná uzavřená smyčka ani měření. Voda na sekundární stranu parogenerátoru se bude přivádět z vodovodního řadu a vypouštět do odpadu. K regulaci průtoku lze použít uzavírací ventil.

2.4. Měření fyzikálních veličin

Měření se týká teplot, tlaků, průtoku a hladin. Měřené veličiny jsou převedeny na elektrický signál a přes Arduino zobrazeny na monitoru a displeji. Na obrázku 26 je zobrazeno umístění jednotlivých snímačů a měřidel.

Arduino je mozkiem celého systému. Je to otevřená elektrická platforma, tvořená jednoduchým hardwarem a vývojovým prostředím k tvorbě softwaru. Arduino čte údaje od vstupních senzorů a snímačů rychlostí až 10 kHz a na základě nich ovládá výstupní prvky. Ke psaní řídicího kódu využívá vlastní programovací jazyk Arduino. Arduino software (IDE) je ke stažení zdarma. Veškeré další prvky a příslušenství je možné zakoupit. Hlavními výhodami jsou jeho nízké náklady, jednoduché programovací prostředí, rozšiřitelný open source software a podpora všech operačních systémů. [37]



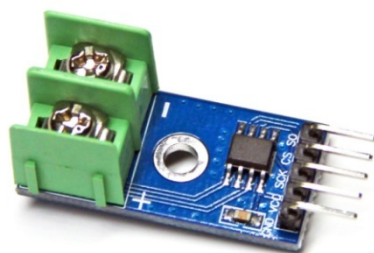
Obrázek 26: Označení prováděných měření na modelu

2.4.1. Měření teploty

Měření teploty je na třech místech. První měření je umístěno na výstupu z reaktoru na horké větvi, druhé na výstupu z parogenerátoru na studené větvi a třetí měření teploty je umístěno do kompenzátoru objemu. Za reaktorem je předpokládána maximální teplota v ustáleném režimu $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, za parogenerátorem $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v kompenzátoru teplota sytosti $151,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

K měření všech teplot je použit termočlánek typu K, vhodný pro rozmezí od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ s lineární charakteristikou a citlivostí $40\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Termočláanky jsou kalibrovány pomocí bodu tání vody na teplotu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve směsi voda-led (ledové tříšti). Od tohoto způsobu kalibrace se nedá očekávat přesnost vyšší než $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, avšak pro tato měření je to dostačující.

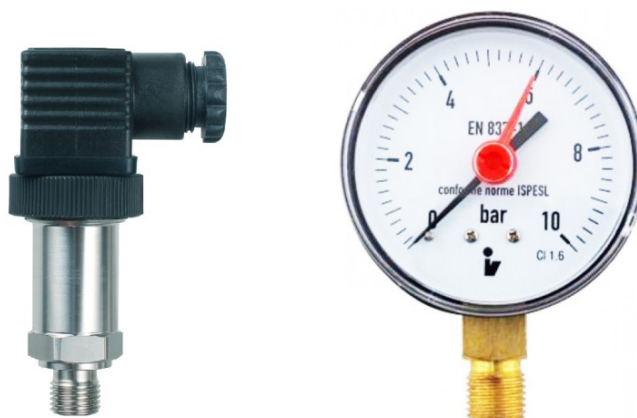
Ke čtení signálů z termočláneků jsou použity moduly MAX6675. K tomuto převodníku je připojen termočlánek a převodník je pak propojený s Arduinem pěti vodiči. První je připojen na napětí 5 V , druhý na GND a zbylé tři na volitelné digitální piny pro čtení výstupního napěťového signálu. Modul zajišťuje měření referenční teploty studeného konce termočláneku zabudovaným odporovým teploměrem. Termočlánek s tímto převodníkem má rozlišení naměřených hodnot $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a sníženou přesnost cca $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Převodník MAX6675 je na obrázku 27. [38][39]



Obrázek 27: Modul MAX6675 pro termočlánek [40]

2.4.2. Měření tlaku

Měření tlaku je také na třech místech – za reaktorem, za parogenerátorem a nad kompenzátorem objemu. Na měření za reaktorem a za parogenerátorem jsou použity elektrické tlakové snímače Thermokon DLF10 A a jejich signál je převáděn na hodnoty tlaku a zobrazován na monitoru i displeji. Měřicí rozsah těchto snímačů je 0 – 10 barů a přesnost $\pm 0,5\%$. Tyto snímače jsou napájeny ze zvonkového transformátoru napětím 12 V. Třetím snímačem tlaku je budíkový tlakoměr nad kompenzátorem objemu. Použité tlakoměry jsou na obrázku 28. [41]



Obrázek 28: Tlakoměry použité na modelu [34][41]

Elektrické tlakové snímače mají výstupní signál 4 – 20 mA. K jejich čtení na Arduinu je potřeba použít převodník proudového signálu na napěťový. Převodníky obsahují pět kontaktů. Dva slouží pro napájení, opět napětím 12 V ze zvonkového transformátoru, na další dva kontakty je připojen okruh s tlakoměrem, a poslední kontakt je připojený k Arduinu na analogový pin a slouží pro čtení výstupního signálu. Převodník je na obrázku 29.



Obrázek 29: Převodník proudového signálu na napěťový [42]

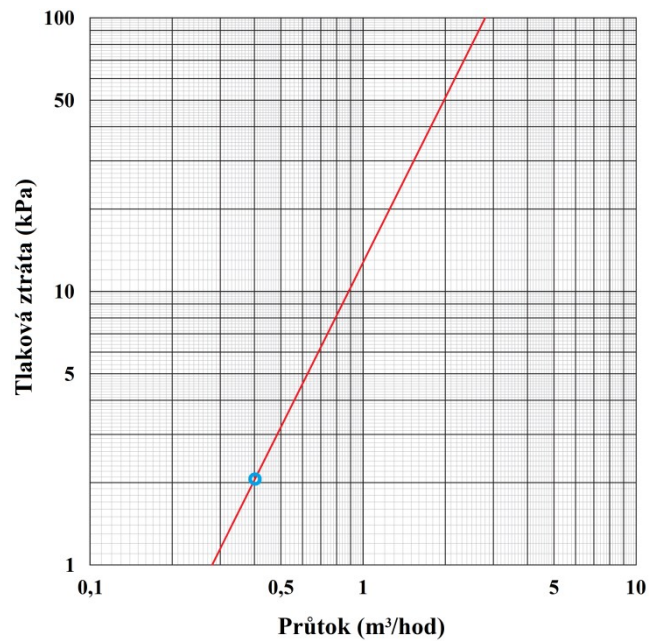
2.4.3. Měření průtoku

Měření průtoku je provedeno diferenčním tlakovým snímačem BD Sensors AX2-XMD na měřicí cloně závitové 9400 DN 15 HF, umístěné na studené větvi za čerpadlem. K odběrům na clonce je tlakový snímač připojen přes kondenzační trubice z důvodu jeho tepelné ochrany. Před clonkou a za clonkou jsou dodrženy délky potrubí, předepsané výrobcem, pro zklidnění proudu média. Diferenční snímač je použitelný v rozsahu tlakové difference 0 – 7,5 kPa a jeho výrobcem udávaná přesnost je do 0,1%. Oba použité prvky jsou na obrázku 30. Ke čtení signálu z diferenčního tlakoměru je použit stejný převodník jako u předchozích tlakoměrů. [43]



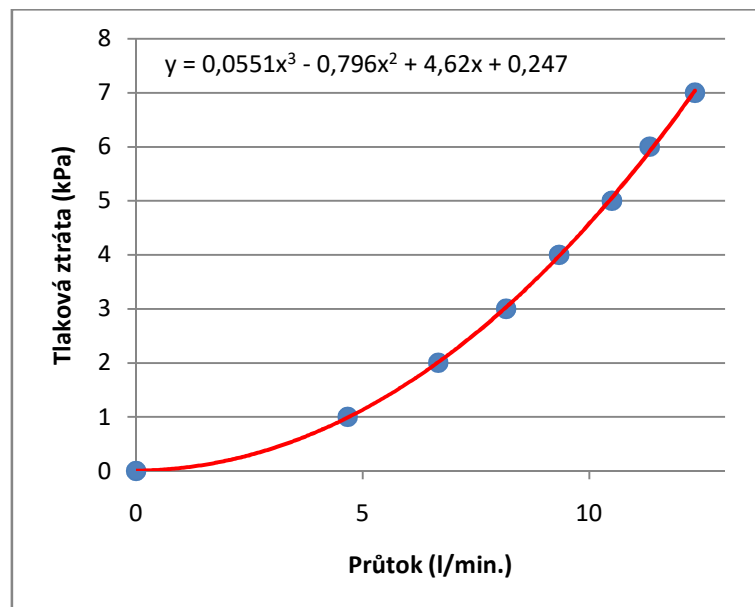
Obrázek 30: Sestava pro měření průtoku [44][45]

Pro takto nízké objemové průtoky je obtížné najít vhodnou clonu. U této se při vypočteném průtoku uplatňuje pouze spodní část charakteristiky, proto byla měřicí aparatura pro jistotu před použitím kalibrována. Kalibrační měření potvrdilo přesnost clonky i pro nízké průtoky.



Obrázek 31: Charakteristika měřicí clony [44]

Na obrázku 31 je graf z technického listu clony. Obsahuje závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku clonou v logaritmickém měřítku. Je zde vyznačen pracovní bod pro napočítaný provozní režim. Na obrázku 32 je pak v lineárním měřítku vynesena závislost v měřeném rozsahu diferenčního snímače s proložením bodů polynomicou funkcí, která je implementována do řídicího programu. Měření průtoku ve stacionárním stavu je při známých teplotách a výkonu možné ověřit výpočtem.



Obrázek 32: Upravená charakteristika měřicí clony

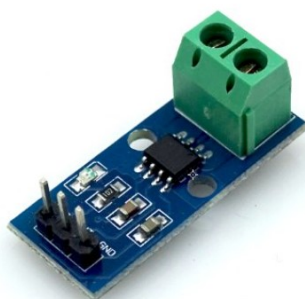
2.4.4. Měření hladiny

Kontroluje se hladina v kompenzátoru objemu a v parogenerátoru. Měření je realizováno stavoznakem ze skleněných trubiček o vnějším průměru 10 mm

a tloušťkou stěny 4 mm, které jsou umístěné rovnoběžně s vertikálními nádobami a napojeny na potrubí. Do měděného potrubí je skleněná trubička připevněna přes mosaznou převlečnou matici s gumovým těsněním. Na trubičkách je vyznačena minimální výška hladiny, aby v případě kompenzátoru objemu nedošlo ke spálení topného tělesa a u parogenerátoru nedošlo k obnažení teplosměnné měděné trubky. Detekce hladiny prozatím není nijak převáděna na elektrický signál.

2.4.5. Měření výkonu

Výkon jednotlivých topných elementů je vypočítáván z elektrického proudu, protékajícího daným topidlem. Elektrický proud je měřen proudovými senzory ACS712, umístěnými na každém obvodu s topnými elementy. Výkon je počítán vynásobením měřeného proudu fázovým napětím. Celkem jsou zde senzory čtyři – jeden pro každou ze tří fází reaktorového topení (s rozsahem do 20 A) a jeden pro topení kompenzátoru (s rozsahem do 5 A). Udávaná přesnost výstupního signálu je 1,5 %. Senzor proudu je na obrázku 33.



Obrázek 33: Proudový senzor [46]

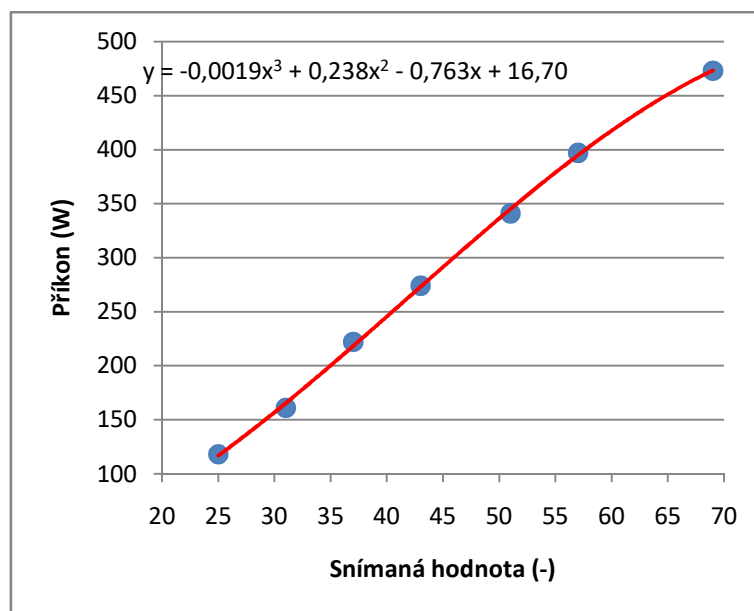
K senzorům lze použít jim určený kód pro čtení proudu. Zde je ale zpracování signálu a kalibrace provedena odlišně. Údaj v bitech čtený Arduinem je přímo přiřazen hodnotě proudu, který je současně měřen ampérmetrem.

Výkon každé větve topnice v reaktoru (R1, R2, R3) je řízen spínacími relé, ale může být v případě nutnosti ovládán ručně tlačítky. Má tedy dva stavy – vypnuto a zapnuto. Stav vypnuto je přiřazena 0 – nulový výkon. Pro zapnutý stav je hodnota snímaná senzorem přenásobena koeficientem, aby odpovídala proudu měřeným ampérmetrem. Proudová hodnota je následně vynásobena fázovým napětím a výsledný příkon je zobrazován na displeji. Seznam hodnot je vypsán v tabulce 4.

Tabulka 4: Kalibrace senzorů proudu

	R1	R2	R3
Senzor proudu	123,67	119,62	121,7
Ampérmetr (A)	6,47	6,51	6,53
Koeficient	0,0523	0,0544	0,0537
Vypočtený příkon (W)	1 488	1 497	1 502

Pro topení v kompenzátoru je kalibrace složitější. Fyzicky je možné topnici regulovat stmívačem. Na celém intervalu je tedy proměřeno více bodů (celkem 7), jak ampérmetrem, tak wattmetrem, a jejich hodnoty jsou vyneseny do grafu závislosti příkonu topnice na snímané hodnotě proudovým senzorem. Tyto body jsou proloženy polynomicou funkcí, která je následně použita v kódu pro přepočítání snímané hodnoty na příkon topení. Graf závislosti s naměřenými hodnotami (modré body) a polynomicou aproximací (červená křivka) jsou na obrázku 34.



Obrázek 34: Závislost výkonu topení v kompenzátoru objemu

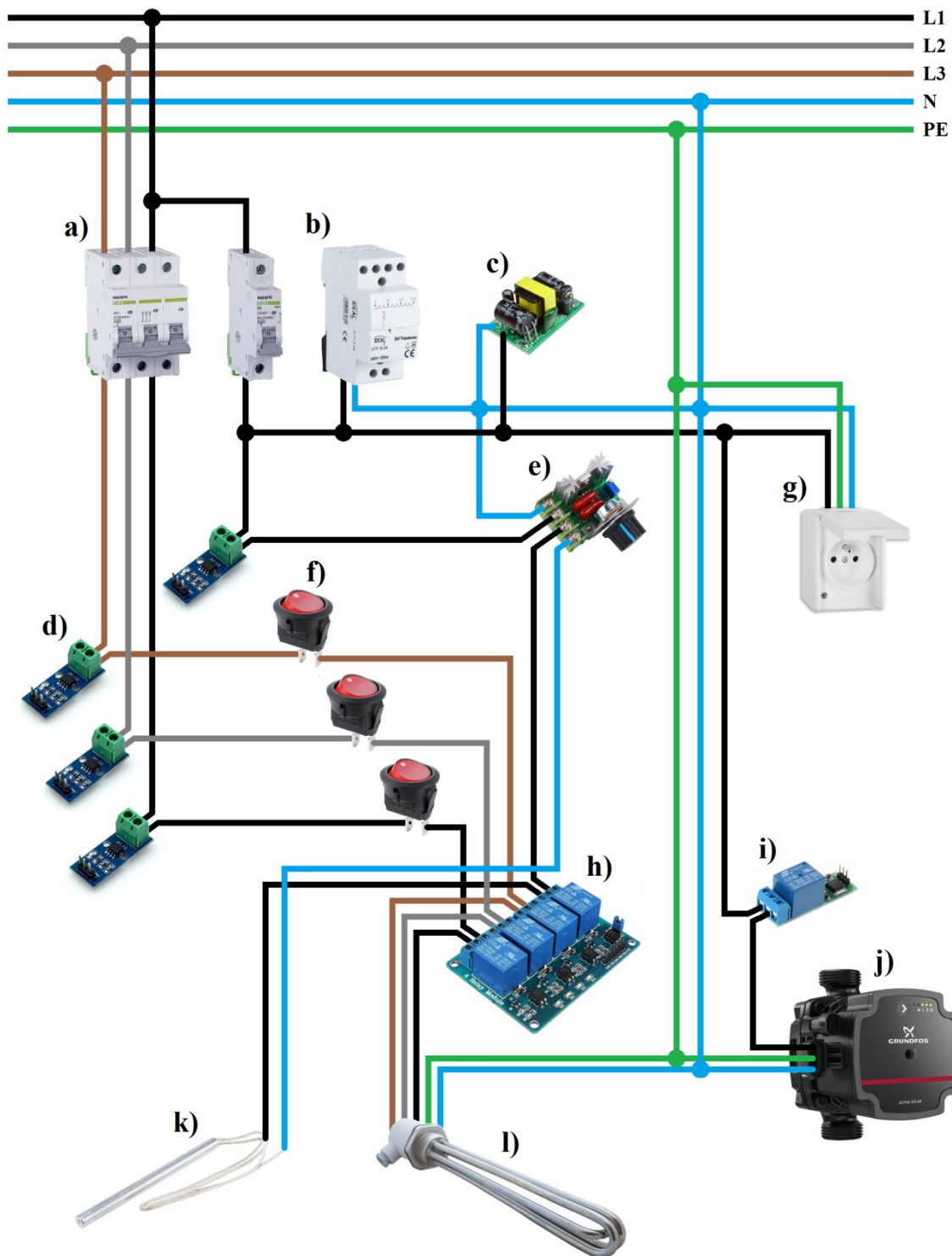
2.5. Elektrické zapojení

Po dokončení konstrukce okruhu následovala práce na rozvodech elektřiny. V této kapitole je popsána jak silnoproudá část, týkající se hlavních komponent – topení a čerpadlo, tak i slaboproudá část, do které spadají veškeré měřicí a ovládací prvky.

2.5.1. Silnoproudá část

Okruh je připojen na třífázovou elektrickou síť přes rozvaděč, obsahující třífázový a jednofázový elektrický jistič. Přes třífázový jistič každá z fází napájí jednu z větví topného tělesa v reaktoru. Jednotlivé fáze lze spínat pomocí Arduina přes relé modul a zároveň fyzicky tlačítkem na řídicí skříni. Každá fáze obsahuje navíc již zmíněný proudový senzor.

Přes jednofázový jistič je zapojeno topné těleso v kompenzátoru a čerpadlo. Topné těleso lze podobně jako topení v reaktoru spínat pomocí relé a měřit protékající proud proudovým senzorem. Zde je ale místo tlačítka použit stmívač, umožňující řídit protékající proud a tím výkon topení v rozsahu přibližně od jedné třetiny výkonu do maxima.

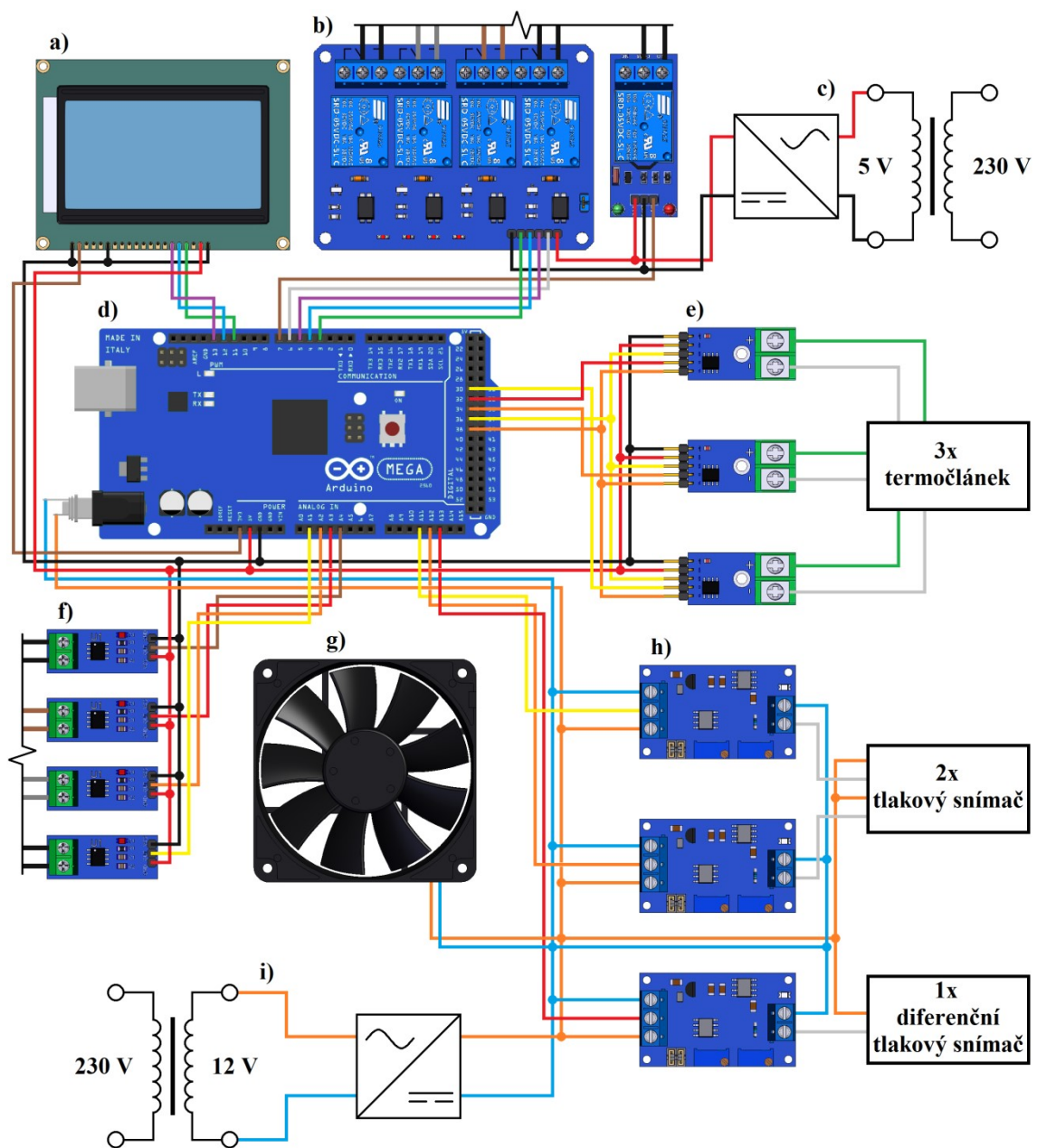


Obrázek 35: Schéma silnoproudé části [31][46][47][48][49]

- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| a) Jističe | g) Zásuvka |
| b) Zvonkový transformátor | h) Spínací relé topení |
| c) Napěťový zdroj (5V) | i) Spínací relé čerpadla |
| d) Proudové senzory | j) Čerpadlo |
| e) Stmívač | k) Topné těleso kompenzátoru |
| f) Tlačítka | l) Topné těleso reaktoru |

Čerpadlo lze opět spínat přes Aduino, zde jsou ale pouze dvě polohy – zapnuto a vypnuto, jako na reálném primárním okruhu. Bylo-li by to potřeba, lze tlačítkem na čerpadle měnit jeho charakteristiku. Přes stejný jistič je dále zapojen zvonkový transformátor, sloužící jako zdroj pro slaboproudou část a jednofázová zásuvka pro případ potřeby. Z důvodu možného přetížení Arduino velkým proudovým odběrem, je zde navíc připojen zdroj stejnosměrného napětí pro napájení všech spínacích relé. Schéma celého zapojení je na obrázku 35.

2.5.2. Slaboproudá část



Obrázek 36: Schéma slaboproudé části [50][51]

- | | |
|---------------------------|---------------------------------|
| a) Displej | f) Proudové senzory |
| b) Spínací relé | g) Větrák |
| c) Napěťový zdroj (5V) | h) Převodníky tlakových snímačů |
| d) Arduino | i) Napěťový zdroj (12V) |
| e) Převodníky termočlánků | |

Do slaboproudé části patří veškeré ostatní elektrické prvky. Jedná se o napájení měřících snímačů, převodníků, senzorů, chladícího větráku, spínacích relé a propojení všech potřebných součástí s Arduinem. Schéma zapojení je na obrázku 36.

Arduino je propojené přes USB s počítačem a poskytuje zdroj 3,3 a 5 V. Napětím 5 V z Arduina jsou napájeny všechny převodníky termočlánků, proudové senzory a displej. Napájení 3,3 V slouží pouze jako zdroj pro podsvícení na displeji. Ze zvonkového transformátoru a přes usměrňovač se stabilizátorem jsou 12 V napájeny tlakové snímače a jejich převodníky, chladící větrák a Arduino. Spínací relé napájí druhý pomocný zdroj 5 V.

Na digitální piny Arduina jsou připojeny spínací relé (piny 3, 4, 5, 6, 7), termočlánky (piny 30, 32, 34, 36, 38) a displej (piny 11, 12, 13). Na analogové piny pak proudové senzory (piny A1, A2, A3, A4) a převodníky signálu tlakových snímačů (piny A11, A12, A13).

2.6. Programování

Celý program i s komentáři (texty za dvojitým lomítkem „//“) je uveden v příloze 4. Na úplném začátku obsahuje import používaných knihoven. Následně jsou inicializovány všechny proměnné a použité piny Arduina. V počáteční funkci (*setup()*) je nastavení displeje a definování vstupních a výstupních pinů. Dále je zde nastavení rychlosti pro sériový přenos dat.

Následuje opakující se funkce (*loop()*), ve které jsou postupně volány jednotlivé pracovní funkce (funkce jsou definovány až na konci skriptu, na chod programu to nemá vliv). Nejdříve funkce pro vykreslení displeje, poté funkce pro výpočty a čtení teplot, výkonů, tlaků a průtoku. Dále funkce pro výpis všech parametrů, důležitých pro řízení a nakonec je zavolána funkce pro samotné řízení. Loop smyčka je zakončena příkazem pro její zdržení o čas 1 000 ms před opakovaným spuštěním.

Ve zbytku skriptu jsou definované všechny použité funkce. První je funkce pro vykreslení displeje (*vykresleni_displeje()*), umístěného na řídicí skřini. Obsahuje nastavení fontu písma a dále příkazy pro výpis textu a proměnných na dané souřadnice. Na displeji jsou zobrazovány parametry okruhu ve dvou sloupcích. V prvním je celkový výkon reaktoru, výkon kompenzátoru a tlak v okruhu. V druhém sloupci jsou zobrazené všechny tři měřené teploty a hodnota průtoku.

Dále funkce pro čtení hodnot z proudových senzorů (*cist_senzor()*), určených pro čtení analogového signálu, který je úměrný výkonu reaktoru, případně kompenzátoru. Jelikož má střídavý signál sinusový průběh, jednotlivé čtené hodnoty jsou za určitý čas nasčítány a zprůměrovány k dosažení jeho střední hodnoty. Zprůměrovaný proudový signál z reaktorových senzorů je pouze přenásoben konstantou, zabezpečující zobrazení správné hodnoty výkonu. Pro proudový signál kompenzátorového senzoru je zde funkce (*vypocet_vykonu_KO()*) určující výkon v celém rozsahu řízení (viz kapitola 2.4.5.).

Následuje funkce pro nastavení spodního prahu vypnutých topnic (*oprava_signalu()*). Při vypnutí spínacího relé, případně tlačítka, zde může zůstat zbytkový šum v jednotkách wattů. Tato funkce zajišťuje zobrazení nul na displeji a monitoru v případě rozepnutí elektrického obvodu.

Další funkce zajišťuje čtení tlaku (*cist_prevodnik()*). Proudový signál snímačů tlaku je prostřednictvím převodníků převeden na napěťový signál vhodný pro Arduino. Opět je zde počítán průměrný signál za čas, který je následně převeden z hodnoty v bitech na *kPa*. Hodnota z diferenčního snímače je v následující funkci (*vypocet_Q()*) přepočítána na průtok (viz kapitola 2.4.3.). Dále je definována funkce pro výpis všech parametrů okruhu, které jsou přes sériový monitor posílány do řídicího prostředí v Pythonu.

Následuje rozsáhlá složená funkce pro logiku řízení (*cist_prikaz()*). Na začátku je uložen příkaz z řídicího rozhraní Pythonu a zkontrolovány všechny limity a podmínky pro bezpečný provoz:

- průtok smyčkou, pokud je nenulový výkon reaktoru (hrozba výpadku čerpadla),
- rezerva do varu (počítáno jako rozdíl teploty sytosti pro aktuální tlak a teploty za reaktorem),
- maximální teplota (omezeno čerpadlem),
- teplotní spád na parogenerátoru (podmínka odvodu tepla z primárního okruhu),
- maximální tlak
- a kontrola, zda již nezafungovala havarijní ochrana reaktoru (HOR).

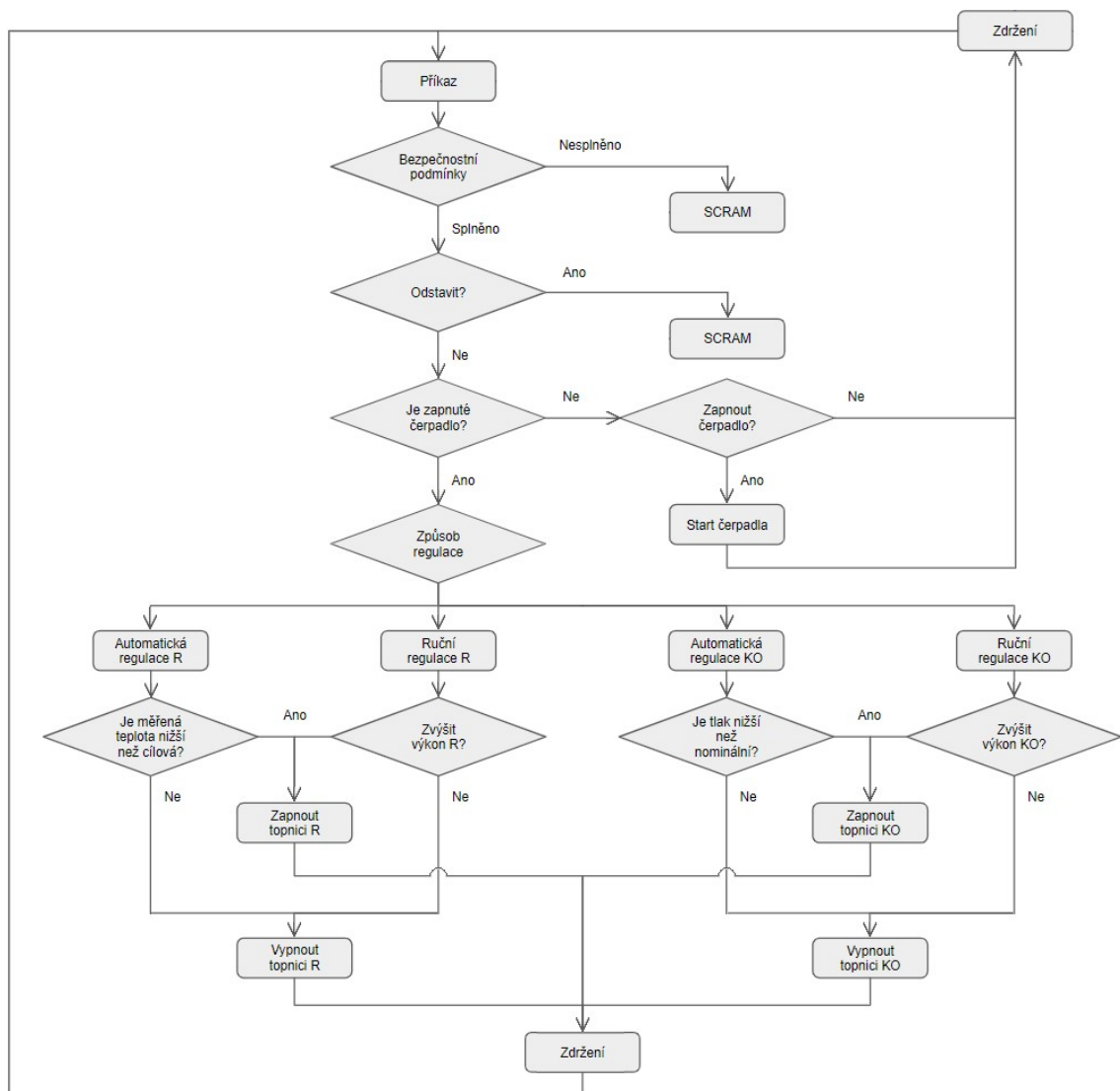
Je-li některá z podmínek porušena, zavolá se funkce pro havarijní odstavení reaktoru (*SCRAM()*). V případě, že jsou všechny splněny, pokračuje program do další funkce (*volba_regulace()*), ve které se zkontroluje, zda je řízení automatické (*auto_regulace()*) nebo ruční (*rucni_regulace()*) a odkáže do příslušné funkce. Tato kontrola je důležitá z důvodu, aby nebylo možné zasahovat do automatických regulací ručním řízením (zároveň obsahuje kontrolu, zda je dostatečný průtok, aby nebylo možné zvyšovat výkon v případě výpadku čerpadla). Následně se zavolá další funkce (*proved_prikaz()*), která umožní zvolit způsob řízení (automatické nebo ruční) a nastavit požadovanou teplotu pro automatické řízení topení v reaktoru. Oba způsoby regulace jsou možné jak pro výkon reaktoru, tak topení v kompenzátoru.

Všem těmto regulacím je nadřazeno ovládání čerpadla (zapnout – vypnout) a spuštění havarijní ochrany (*SCRAM()*). Volbou automatické regulace reaktoru se vstoupí do funkce (*auto_regulace_R()*), ve které jsou zapínány a vypínány jednotlivé topné větve v závislosti na rozdílu mezi požadovanou a měřenou teplotou. Funkce pro automatickou

regulaci výkonu topení v kompenzátoru (*auto_regulace_KO()*) spouští a vypíná topení v okolí nominálního přetlaku 400 kPa.

Pro režim ruční regulace výkonu reaktoru je v příslušné funkci (*rucni_regulace_R()*) přiřazen každému příkazu daný úkon. Je zde vypínání a zapínání jednotlivých fází, případně zapnutí všech tří fází najednou (zapínání zahrnuje podmínku spuštěného čerpadla). Funkce pro ruční ovládání topení v kompenzátoru (*rucni_regulace_KO()*) obsahuje rovněž povely pro zapnutí a vypnutí topení. Zjednodušený vývojový diagram logiky řízení je na obrázku 37.

Na konci skriptu je definována funkce pro havarijní odstavení reaktoru (*SCRAM()*), zajišťující vypnutí všech topení v reaktoru. A poslední funkce (*t_sat()*) pro výpočet teploty sytosti vody při daném tlaku.



Obrázek 37: Vývojový diagram řídicí funkce

2.7. Spouštění a měření

Během dokončovacích prací se průběžně dělalo několik testů a zkoušek. Mezi ně patřily například tlakové zkoušky a ověření funkčnosti všech měřicích snímačů. Tlaková zkouška byla provedena do přetlaku necelých 6 barů (při dosažení 6 barů by otevřel pojistný ventil). Dále se kontrolovaně střídavě zvyšovala a snižovala teplota, čímž se odhalila potřeba přetěsnění některých šroubových spojů, především těch, kde je styk dvou materiálů s různou tepelnou roztažností.

Již s hotovými ovládacími a bezpečnostními funkcemi se na modelu provedla řada měření a experimentů pro ověření kompletní funkčnosti. Dále byly realizovány experimenty, prověřující schopnosti modelu reagovat na různé přechodové stavy. Provedeno bylo i měření pro odhad součinitele prostupu tepla z primárního média do sekundárního.

Snímek monitoru řídicí obrazovky modelu během jednoho z experimentů je uveden v příloze 5. Monitor obsahuje všechny ovládací tlačítka pro řízení modelu a záznamy průběhu všech měřených veličin. Na konkrétní ukázce v příloze lze vidět změny výkonu reaktoru i kompenzátoru při ruční regulaci, změny teplot a skokové změny tlaku za parogenerátorem vlivem třecích ztrát po zapnutí/vypnutí čerpadla. Program zároveň ukládá všechny měřená data do textového dokumentu, pro případnou práci s nimi. Používané názvy měřených veličin jsou:

- výkon_R – celkový výkon reaktoru (všechny 3 fáze dohromady),
- výkon_KO – výkon topnice v kompenzátoru objemu,
- teplota_R – teplota za reaktorem,
- teplota_PG – teplota za parogenerátorem,
- teplota_KO – teplota v kompenzátoru,
- tlak_R – tlak za reaktorem,
- tlak_PG – tlak za parogenerátorem,
- prtok_Q – objemový průtok smyčkou.

Všechny měřené veličiny se týkají primárního okruhu, automatizované řízení na sekundární straně není. Při některých experimentech byly na sekundární straně měřeny parametry ručně, a to teploty rtuťovým teploměrem a průtok objemovým měřením (metodou „kýbl-stopky“).

2.7.1. Stanovení součinitele prostupu tepla parogenerátoru

Součinitel prostupu tepla parogenerátoru, vzhledem ke složité geometrii teplosměnné plochy, byl zpětně již na hotové smyčce stanoven experimentálně. Odváděné teplo v parogenerátoru musí být při zanedbání tepelných ztrát (okruh je tepelně izolován) rovno tepelnému výkonu topnic v reaktoru. Pro zvolený tepelný výkon reaktoru Q jsou měřeny všechny teploty – vstupní teplota na primární straně $t_{I,in}$, výstupní teplota na primární straně $t_{I,out}$, vstupní teplota na sekundární straně $t_{II,in}$ a výstupní teplota na

sekundární straně $t_{II,out}$. Z teplot je určen střední logaritmický teplotní spád $\overline{\Delta t_{ln}}$ a ze vzorce pro tepelný výkon výměníku je vypočítán součinitele prostupu tepla:

$$\overline{\Delta t_{ln}} = \frac{(t_{I,in} - t_{II,out}) - (t_{I,out} - t_{II,in})}{\ln\left(\frac{t_{I,in} - t_{II,out}}{t_{I,out} - t_{II,in}}\right)}$$

$$k = \frac{Q}{\overline{\Delta t_{ln}} \cdot S}$$

Měření je provedeno pro čtyři různé kombinace výkonů reaktoru a průtoků na sekundární straně. Po nastavení výkonu a průtoku se všechny teploty nechaly nějaký čas ustálit a následně byly zaznamenány. Všechny hodnoty, včetně vypočítaného součinitele prostupu tepla jsou v tabulce 5:

Tabulka 5: Určení součinitele prostupu tepla

Q (W)	$t_{I,in}$ (°C)	$t_{I,out}$ (°C)	$t_{II,in}$ (°C)	$t_{II,out}$ (°C)	S (m ²)	$\overline{\Delta t_{ln}}$ (°C)	k (W/m ² K)
4500	70	60	20	47	0,1	30,7	1 465
1500	42	39	20	32	0,1	14	1 070
4500	92	84	20	82	0,1	29,1	1 547
4500	63	53	20	35	0,1	30,4	1 479

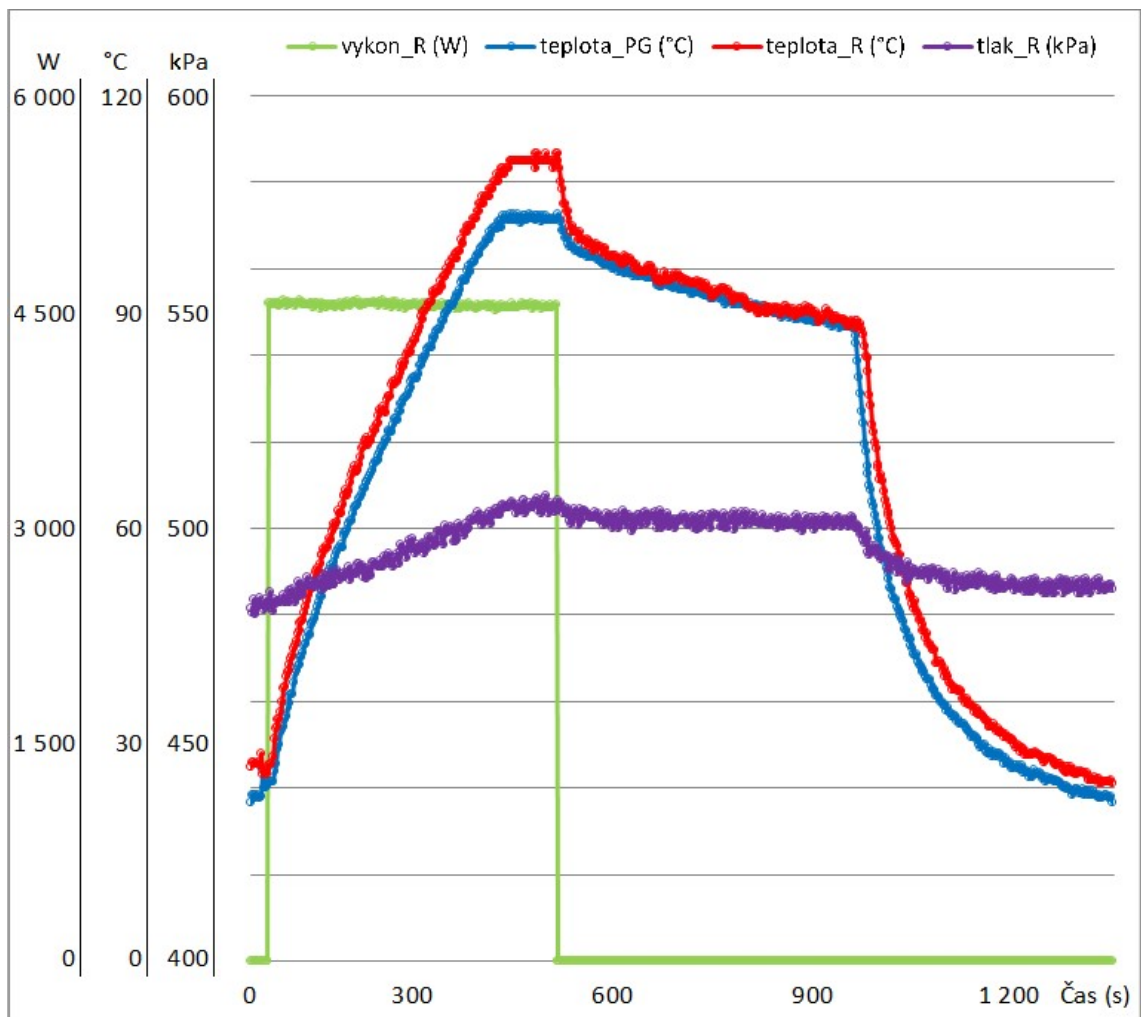
Z hodnot uvedených v tabulce jde vidět, že součinitel prostupu tepla parogenerátoru je přibližně 1 500 W/m²K. Odlišnost u druhého měření může být způsobena nedostatečně dlouhým čekáním na ustálený stav.

2.7.2. Dosažení varu v parogenerátoru

V tomto experimentu se koumalo, zda je možné, a za jaký čas, dosáhnout na sekundární straně varu vody při atmosférickém tlaku. Parogenerátor byl ze sekundární strany zaplněn vodou a průtok zastaven. Výkon reaktoru se nastavil na 100 %. Pro toto měření se předem zrušila podmínka havarijního odstavení v případě poruchy v odvodu tepla na sekundární straně parogenerátoru (minimální teplotní spád na parogenerátoru). Časový průběh parametrů při experimentu je zobrazen na obrázku 38.

Na grafu lze vidět v první fázi plného výkonu rychle rostoucí teplotu rychlostí přibližně 12 °C za minutu a pomalu se zvyšující tlak. Za běžného stavu by byl reaktor odstaven při překročení teploty 80 °C, kde je definována podmínka pro minimální teplotní spád na parogenerátoru alespoň 5 °C. V tomto případě se ochlazení pohybuje cca od 3 do 5 °C. V čase cca 450 s dochází k varu na sekundární straně parogenerátoru, což vlivem zvýšeného odvodu tepla zastaví růst teplot v primárním okruhu a teploty se ustálí na 111 °C za reaktorem a 103 °C za parogenerátorem. Pro další zvyšování parametrů by bylo potřeba zvýšit tlak vody na sekundární straně. V čase cca 500 s dochází k odstavení reaktoru, následovaném pozvolným poklesem a vyrovnáním teplot. Prudký

pokles teplot i tlaku je patrný v čase cca 1 000 s, kdy je obnoven přívod napájecí vody do parogenerátoru.



Obrázek 38: Časová změna parametrů při varu v parogenerátoru

Z výsledků byl posléze orientačně určen součinitel prostupu tepla i pro var na sekundární straně. Z ustálených teplot je vypočítán střední logaritmický teplotní spád cca $6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a součinitel prostupu tepla přibližně $7\,500\text{ W/m}^2\text{K}$. Je zde tedy cca pětinašobný nárůst součinitele oproti variantě, kdy voda na sekundární straně nevře.

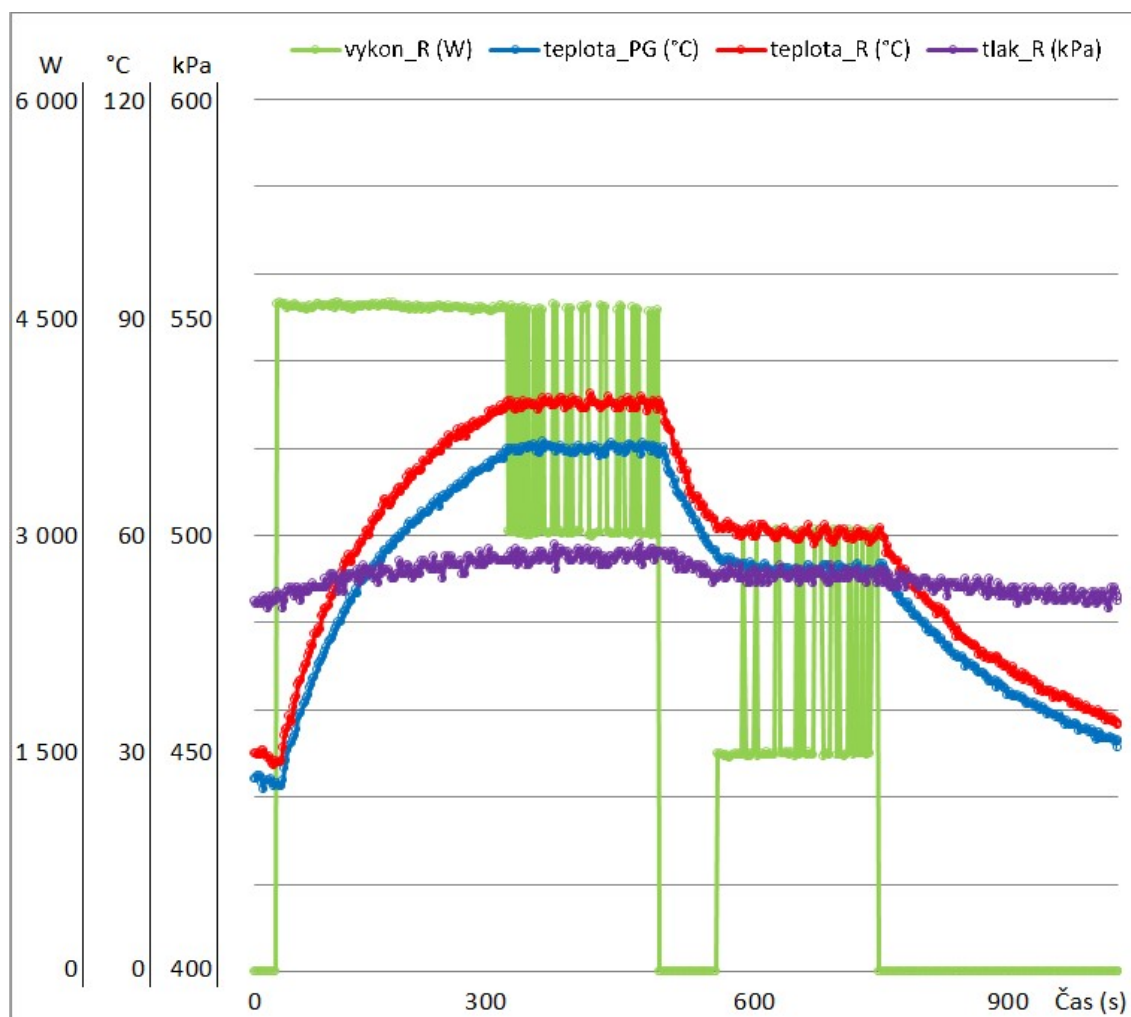
Měrné skupenské teplo varu vody při atmosférickém tlaku je $l_v = 2\,257\text{ kJ/kg}$. Pro tepelný výkon $Q = 4\,500\text{ W}$ je produkce páry:

$$\dot{m}_p = \frac{Q}{l_v} = \frac{4\,500}{2\,257} \doteq 2\text{ g/s}$$

V parogenerátoru je tedy při maximálním výkonu reaktoru možné generovat přibližně 2 g páry za sekundu.

2.7.3. Automatická regulace na požadovanou teplotu

V tomto experimentu je zkoumána funkčnost automatického řízení reaktoru na zvolenou cílovou teplotu. Na obrázku 39 je vynesena časová závislost měřených parametrů.

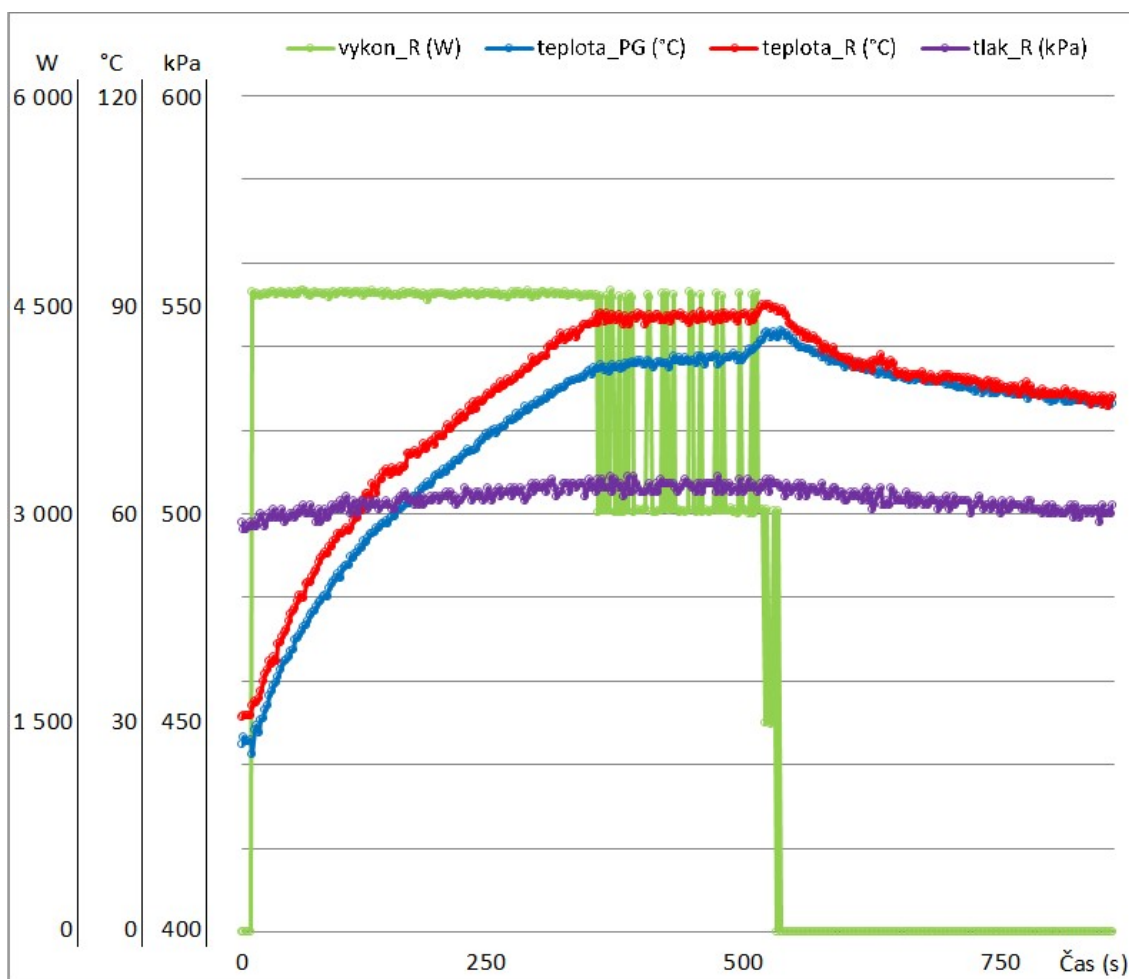


Obrázek 39: Časová změna parametrů při automatické regulaci výkonu

Před začátkem spuštění reaktoru je zapnuto čerpadlo a nastaven průtok na sekundární straně na cca 1 l/min . Následně je zapnuta automatická regulace reaktoru a nastavena cílová teplota na $80 \text{ }^\circ\text{C}$. V první fázi, kdy je regulátorem nastaven maximální výkon, prudce roste teplota až k hranici cílové teploty, kde regulátor zasahuje vypnutím jedné topnice. Jelikož není možné výkon reaktoru řídit spojitě, regulace je zajištěna střídavým vypínáním a zapínáním jedné větve topného tělesa. Je-li měřená teplota nižší o více než $2 \text{ }^\circ\text{C}$ oproti požadované, zapnou se všechny ze tří větví topného tělesa. Pokud se měřená teplota blíží zespodu cílové, jedna ze tří fází se vypne. Po překročení požadované teploty zůstane zapnutá pouze jedna fáze a při překročení cílové teploty o více než $2 \text{ }^\circ\text{C}$ se vypínají všechny topnice. V čase cca 500 s je nastavena nová cílová teplota na $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Regulátor na tento příkaz reaguje vypnutím všech topných větví a opětovně některé zapíná při přiblížení k požadované teplotě. Nakonec v čase cca 750 s je zmáčknuto tlačítko SCRAM a dochází k rychlému havarijnímu odstavení reaktoru.

2.7.4. Ztráta chlazení v parogenerátoru

V dalším experimentu se sledovalo chování parametrů okruhu a funkce havarijní ochrany v případě ztráty napájecí vody. Jde o případ, kdy nebyly parametry primárního okruhu dostatečně vysoké k tomu, aby voda na sekundární straně vřela. V takovém případě by byla reakce limitačního systému, pracujícím pouze na základě teplotního spádu, zpomalena o dobu, než by došlo k vyvaření veškeré vody z parogenerátoru. Průběh sledovaných veličin je na obrázku 40.

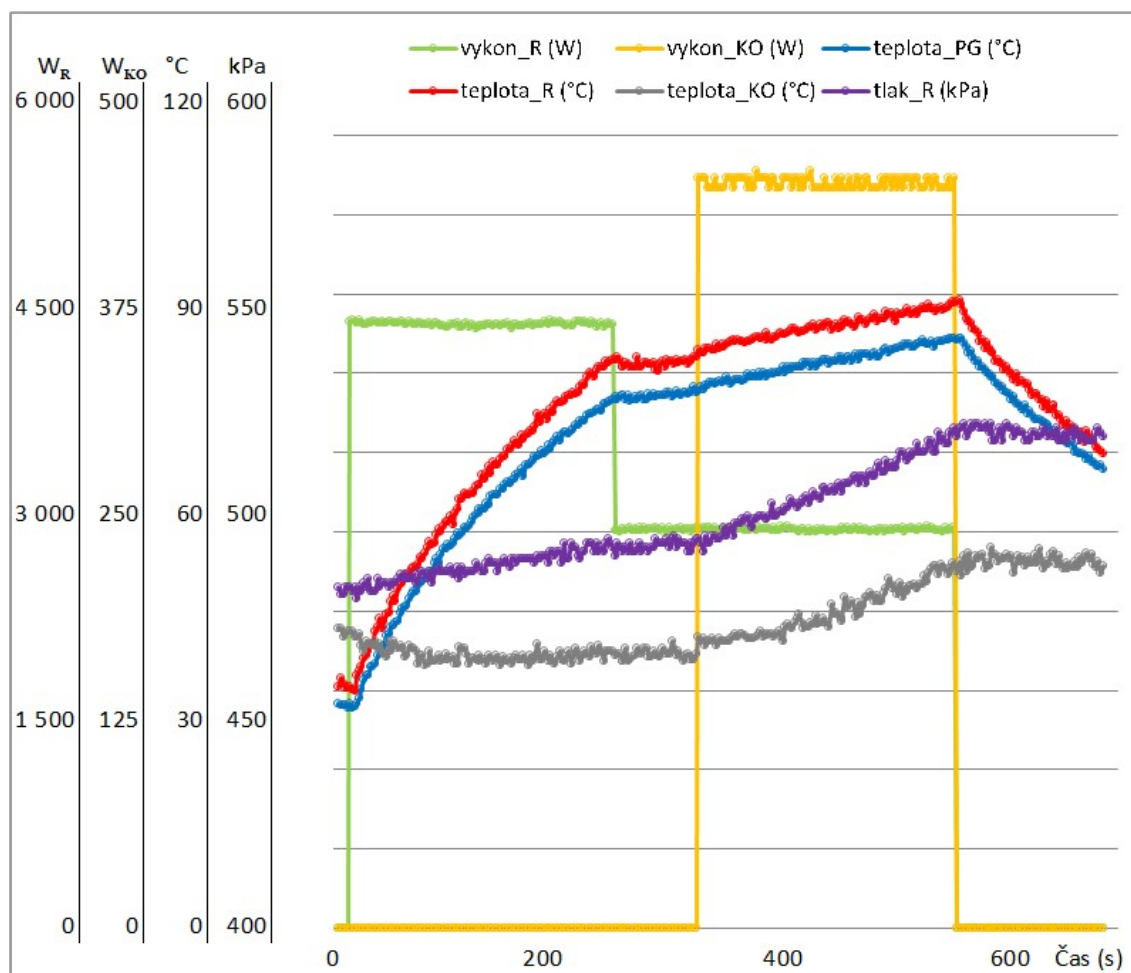


Obrázek 40: Časová změna parametrů při ztrátě chlazení

Průtok chladicí vody na sekundární straně je nastaven ventilem na hodnotu přibližně $0,8 \text{ l/min}$. V odstaveném stavu a vychlazeném primárním okruhu, se zapnutým čerpadlem, je nastavena automatická regulace reaktoru na teplotu $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Po ustálení teploty na požadované, je v čase cca 500 s zastaven přívod napájecí vody. To se projeví postupným zvyšováním teplot primárního chladiva a vyrovnáváním teplot horké a studené větve. Snížením teplotního rozdílu až pod minimální hranici $5 \text{ }^\circ\text{C}$ dojde k odstavení reaktoru. Před samotným odstavením je vidět nejdříve jen částečné snížení výkonu, kdy regulátor reagoval na pozvolné zvyšování teploty za reaktorem, ještě než došlo k porušení provozních limitů.

2.7.5. Regulace tlaku

Posledním zaznamenaným experimentem je sledování vlivu topného tělesa v kompenzátoru objemu na změny tlaku a zkuška funkčnosti havarijního odstavení v případě převýšení maximálního dovoleného tlaku. Naměřená data jsou vynesena v grafu na obrázku 41.



Obrázek 41: Časová změna parametrů při regulaci tlaku

Tento experiment proběhl v režimu ruční regulace výkonu reaktoru i výkonu kompenzátoru. Na začátku je výkon reaktoru nastaven na 100 % a po zvýšení teplot je trvale vypnuta jedna z topnic. Na grafu lze sledovat ustálení teplot i tlaku. V čase cca 350 s je zapnuto topení v kompenzátoru objemu. Aniž by voda v kompenzátoru vřela, je vidět okamžitý nárůst tlaku v okruhu. Z tohoto jevu je vyvozen závěr, že pouze ohřev velkého objemu vody a vzduchu v kompenzátoru stačí ke změnám tlaku. Nakonec v čase cca 500 s zareagoval na maximální tlak v okruhu 525 kPa bezpečnostní systém a došlo k odstavení.

Závěr

Úvodní část práce je věnována teoretické části v oboru konstrukce a funkce primárního okruhu. Jsou zde popsány hlavní komponenty – reaktor, parogenerátor, kompenzátor objemu a hlavní cirkulační čerpadlo. Dále jsou vysvětleny základní principy měření, zmíněny nejpoužívanější druhy snímačů a popsána nejdůležitější měření v jaderné energetice. Poslední kapitola rešeršní části je věnována provozu a řízení jaderných energetických zařízení a jsou v ní rozepsána témata jako provozní režimy, normální a abnormální přechodové stavy a režimy regulace bloků.

V druhé části práce je popis způsobu řešení zadaného úkolu – sestavení funkčního modelu primárního okruhu jaderné elektrárny. Práce zahrnuje určení limitních parametrů okruhu, kterými jsou nominální pracovní přetlak 400 kPa a jemu odpovídající teploty.

Následuje výběr topení do reaktoru a čerpadla. Pro účely topení je použito topné těleso do bojleru s výkonem $4\,500 \text{ W}$. Použité čerpadlo je značky GRUNDFOS, používané u solárních systémů, vhodné pro nízké průtoky v řádech jednotek litrů za minutu a relativně vysoké teploty. Limitující teplota studené větve okruhu, daná tímto čerpadlem, je $130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dále jsou navrženy zbylé komponenty. Jedná se o reaktor, vertikální parogenerátor a kompenzátor objemu. Reaktor je navržen pro rozměry topného tělesa a svařen z dostupných normalizovaných dílů. Svoji konstrukcí (nádoba, šachta, víko) napodobuje skutečnou tlakovou nádobu reaktoru. Parogenerátor je také svařen z normalizovaných dílů. Tvoří jej vertikální válcová nádoba, obsahující uvnitř teplosměnnou plochu ve formě do spirály stočené měděné trubičky. Primární médium proudí měděnou trubičkou a sekundární omývá měděnou trubičku zvenčí. Zdrojem napájecí vody je vodovodní řad. Funkci kompenzátoru objemu plní pořízená tlaková nádoba FESTO, do které je zavedeno menší topné těleso pro regulaci tlaku v okruhu.

Hlavní cirkulační potrubí je tvořeno měděnými trubkami s mosaznými armaturami. Dále je zde pojistný ventil a kohouty s nátrubky pro napouštění, vypouštění a tlakování okruhu. Potrubí je osazeno vstupy pro připojení snímačů teplot a tlaků. Teplota se měří termočlánky na horké větvi za reaktorem, na studené větvi za parogenerátorem a v kompenzátoru objemu. Elektrické snímače tlaku jsou umístěny rovněž za reaktorem a parogenerátorem a navíc je nad kompenzátozem objemu, v místě vedle pojistného ventilu, umístěn budíkový tlakoměr. Průtok je měřen na průtokové cloně diferenčním snímačem tlaku.

Součástí modelu je rozvodná a řídicí skříň obsahující veškeré elektrické obvody. To zahrnuje přívod napájení ke spotřebičům (topná tělesa, čerpadlo, snímače,...) a jejich propojení s Arduinem a dalšími pomocnými elektrickými prvky (převodníky, senzory, tlačítka, displej,...). Pro měření výkonu topnic jsou zde senzory proudu, jejichž signál je převáděn na výkon. Výkony, teploty, tlak a průtok jsou zobrazovány na displeji, který je

umístěn na řídicí skříni. Ručně lze spínat jednotlivé fáze topného tělesa v reaktoru a regulovat výkon topného tělesa v kompenzátoru stmívačem.

Propojením Arduina přes USB s počítačem je umožněno ovládat model okruhu prostřednictvím interaktivního řídicího programu. Skript je psán v programovacím rozhraní Arduina a přes sériový monitor komunikuje s ovládací obrazovkou vytvořenou v jazyce Python. Součástí řídicího kódu je kontrola limitních parametrů a podmínek v okruhu a v případě jejich porušení se model automaticky uvede do bezpečného, vypnutého stavu. Jsou zde omezení známá ze skutečného jaderného bloku – ztráta nucené cirkulace chladiva, překročení maximálních tlaků nebo teplot, ztráta odvodu tepla z primárního okruhu a další. Možnost regulace je buď automatická, nebo ruční. Automatická regulace umožňuje zvolit požadovanou cílovou teplotu na výstupu z reaktoru.

Experimenty prokázaly funkčnost modelu – řízení výkonu, regulace teplot, tlaku, respektování bezpečnostních podmínek a nakonec i generování páry na sekundární straně parogenerátoru, což potenciálně umožňuje v budoucnu připojit sekundární okruh s parní turbínou. Kompletní smyčka je na obrázku 42, další fotky jsou v příloze 6. Model ponese jméno LION – Lehkovodní primární okruh (IO) Nukleární elektrárny.



Obrázek 42: Snímek modelu

Seznam použité literatury

- [1] *PRIS: Power Reactor Information System* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/>
- [2] KLIK, František a Jaroslav DALIBA. *Jaderná energetika*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství Českého vysokého učení technického, 2002. ISBN 80-01-02550-0.
- [3] *SVĚT ENERGIE: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/>
- [4] *VVER. Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/VVER>
- [5] *TĚLESO TLAKOVÉ NÁDOBY, TECHNICKÝ POPIS A NÁVOD NA OBSLUHU: Ae 6358/Dok, Dokumentace ŠKODA*. Plzeň, 2004.
- [6] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren – Díl 2*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03189-6.
- [7] Parní generátory a potrubní sítě jaderně energetických zařízení
- [8] JANEBA, Břetislav. *Výpočty kotlů a parogenerátorů*. Praha, 1975.
- [9] *Nuclear Power: Nuclear Power for Everybody* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/>
- [10] *VDI Heat Atlas*. Second Edition. Berlin: Springer, [2010]. ISBN 978-3-540-77876-9.
- [11] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren – Díl 1*. Vyd. 4. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03190-x.
- [12] URBÁNEK, Václav a Ivo RAIMAN. *Jaderná elektrárna s reaktory VVER-440 typ 230 včetně technologických systémů*. Praha: ÚISJP, 1987.
- [13] HODBOŇ, Josef a Luboš HRDLIČKA. *Regulační charakteristiky čerpadel až po kvadratickou „Eco-Mode“*. *TZB-info* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/potrubi-a-armatury/17756-regulacni-charakteristiky-čerpadel-az-po-kvadratickou-eco-mode>
- [14] HEZOUČKÝ, František a Svatobor ŠTECH. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN 978-80-261-0548-0.
- [15] HASHEMIAN, H. M. *Monitoring and measuring I & C performance in nuclear power plants*. Research Triangle Park, NC: ISA, International Society of Automation, [2014]. ISBN 087664048x.

- [16] DVOŘÁK, Vladimír a Petr SLÁČALA. *Měření a regulace v jaderných elektrárnách*. 2. opr. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1990.
- [17] KADLEC, Karel. *Příprava na laboratorní práci: Měření a regulace tlaku, kalibrace tlakoměrů* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16370045-I-vybrane-snimace-tlaku.html>
- [18] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/MRT/>
- [19] BEJČEK, Ludvík a Jan VACULÍK. *Snímače tlaku. AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf
- [20] BLÁHA, Václav. *Měření v jaderné energetice: Investice do rozvoje a vzdělávání* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2023-05-27].
- [21] *Termočlánek. Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termo%C4%8Dl%C3%A1nek>
- [22] *Průtokoměr. Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFtokom%C4%9Br>
- [23] ULLMANN, Vojtěch. *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. Astro Nukl Fyzika* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [24] SAJDL, Petr. *Technická jaderná chemie, Radioaktivní odpady* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~sajdlp/>
- [25] TOLAR, Lukáš. *Experimentální určení časové konstanty smyčkového RTD JE Temelín: Diplomová práce* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2018 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/32823>
- [26] OTČENÁŠEK, Petr. *Základy konstrukce a funkce jaderných elektráren*. Vyd. 3. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02707-4.
- [27] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [28] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [29] HEZOUČKÝ, František, Pavel KAŇOVSKÝ a Ján NAŇO. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03324-4.

- [30] *ELTOP Topné těleso 4500 W. Zboží.cz* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/vyrobek/eltop-topne-teleso-4500-w/>
- [31] *GRUNDFOS* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.grundfos.com/>
- [32] *NORMY.biz: ČSN 69 0010-1-1 (690010)* [online]. [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/32213>
- [33] *Conrad Electronic* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/>
- [34] *OBCHOD-VTP.CZ* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.obchod-vtp.cz/>
- [35] *Pan Fitinka* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://eshop.panfitinka.cz/>
- [36] *Instalatérská s.r.o.* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.instalaterska.cz/>
- [37] *Co je to Arduino?. Bastlírna HW Kitchen* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitchen.cz/co-je-to-arduino/>
- [38] *Kalibrace dotykových snímačů teplot bez profesionálního vybavení. Electroscope: Online časopis pro elektrotechniku* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/693/1/r6c1c8.pdf>
- [39] *Webový magazín o ARDUINU. Drátek návody* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://navody.drateg.cz/>
- [40] *DRÁTEK.CZ* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://drateg.cz/>
- [41] *BOLA - Měřicí, regulační a topenářská technika* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.bola.cz/>
- [42] *RoboTools.In - Trusted Robotics, DIY, Engineering Online Store* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://robotools.in/>
- [43] *BD Sensors: Tlakoměrná technika* [online]. [cit. 2023-06-01]. Dostupné z: <https://www.bdsensors.cz/>
- [44] *Hydronix* [online]. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.hydronix.cz/>
- [45] *Elektrotechnický velkoobchod i maloobchod - Elektro Viola* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://viola.cz/>
- [46] *LaskaKit.cz* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/>
- [47] *MojeElektro.cz* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://mojeelektro.cz/>
- [48] *HORNBAACH - hobby e-shop* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.hornbach.cz/>

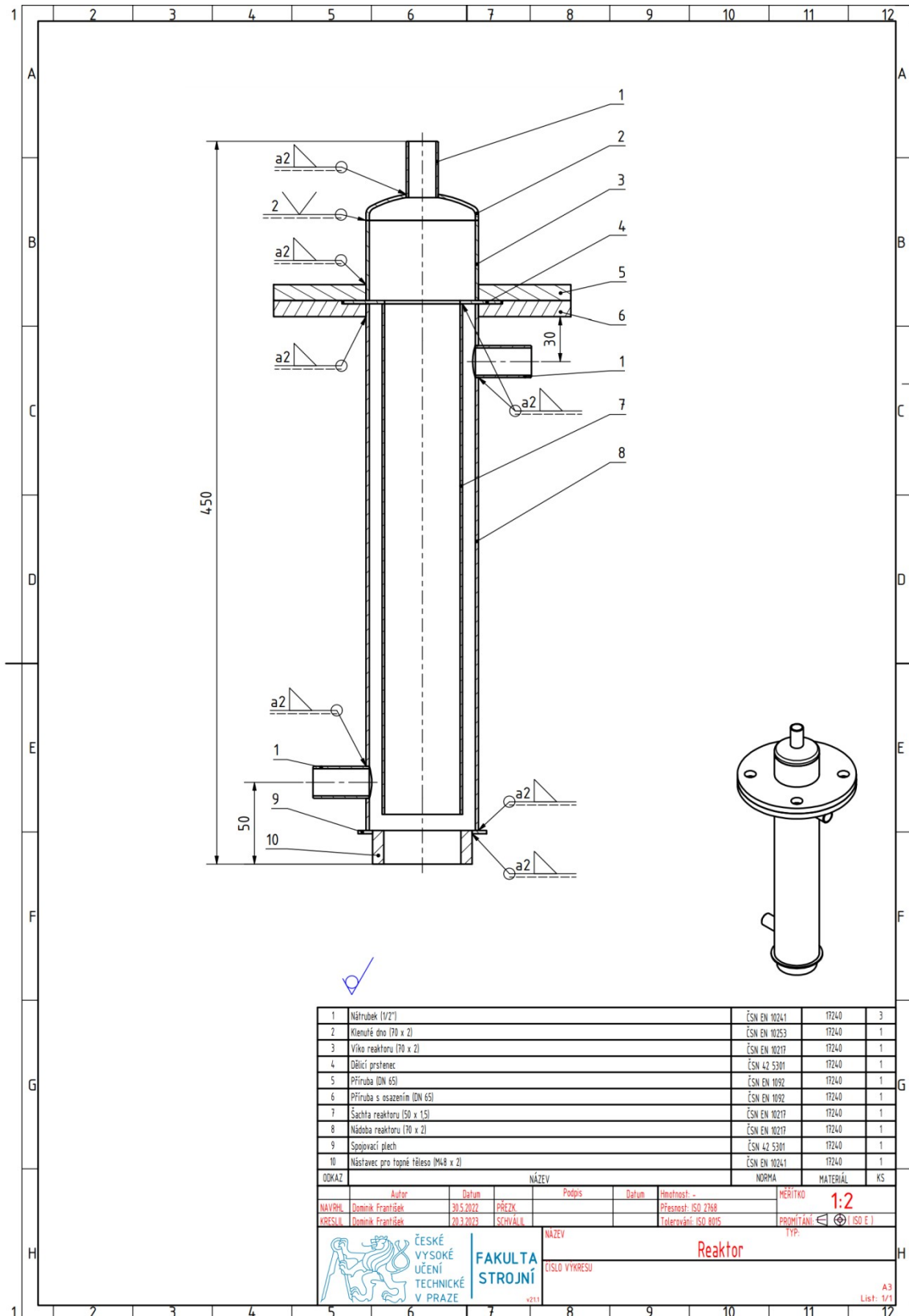
[49] *ELKOV elektro a.s.* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://eshop.elkov.cz/>

[50] *GrabCAD - Making Additive Manufacturing at Scale Possible* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://grabcad.com/>

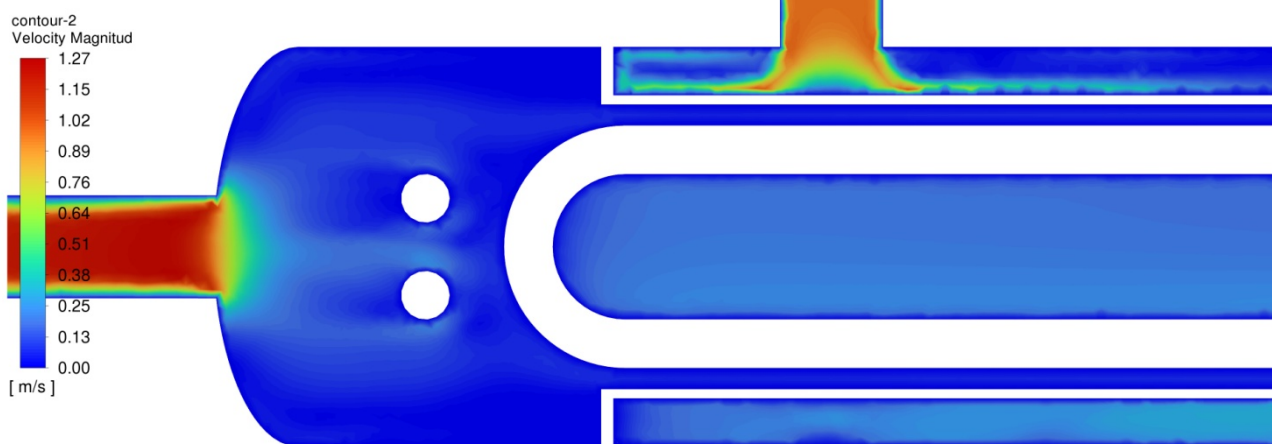
[51] *Arduino Forum* [online]. [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/>

Přílohy

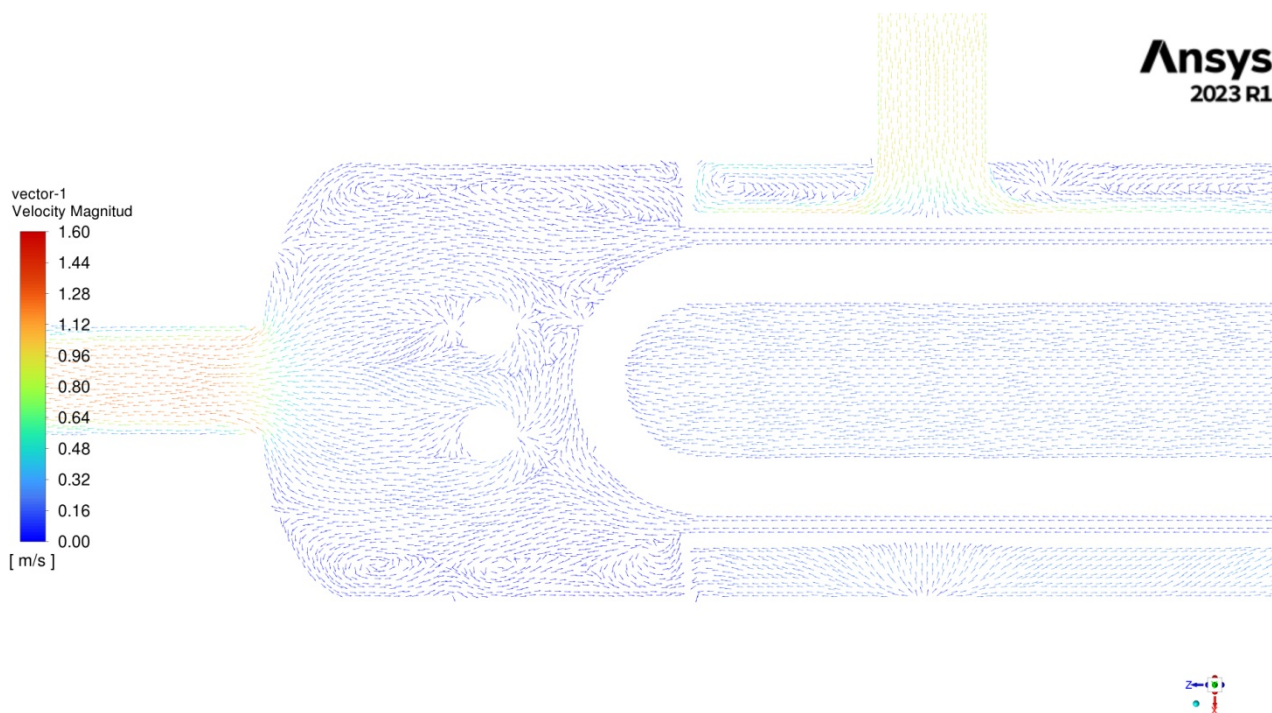
Příloha 1



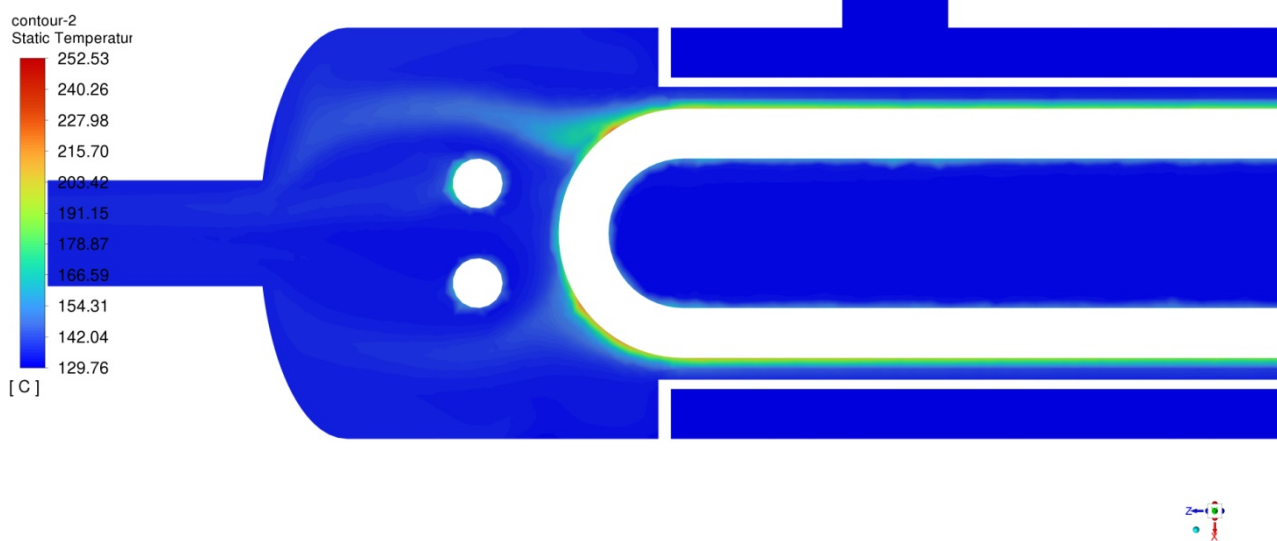
Obrázek 43: Výkres sestavy reaktoru



Obrázek 44: Rychlostní profil

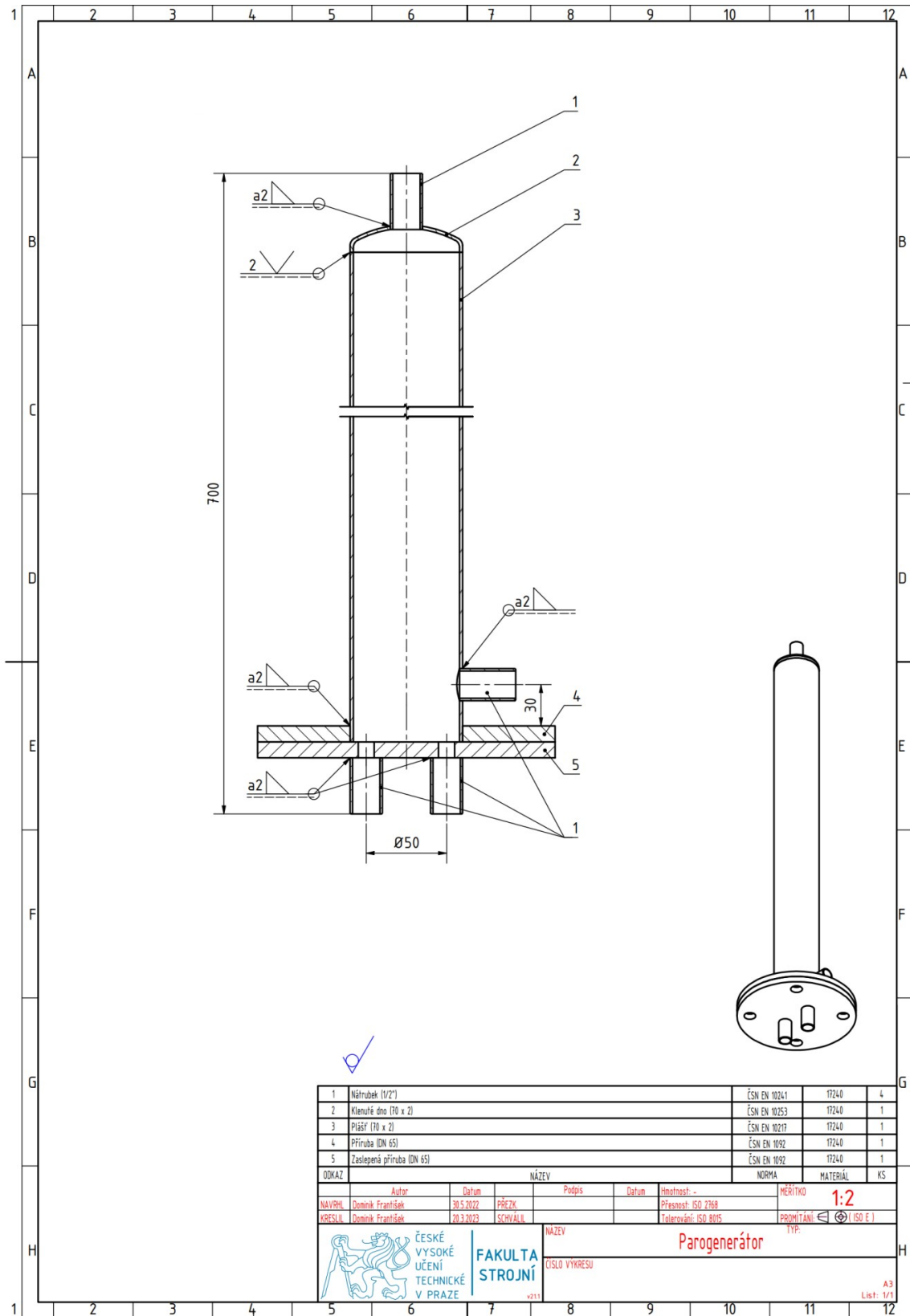


Obrázek 45: Vektorový rychlostní profil



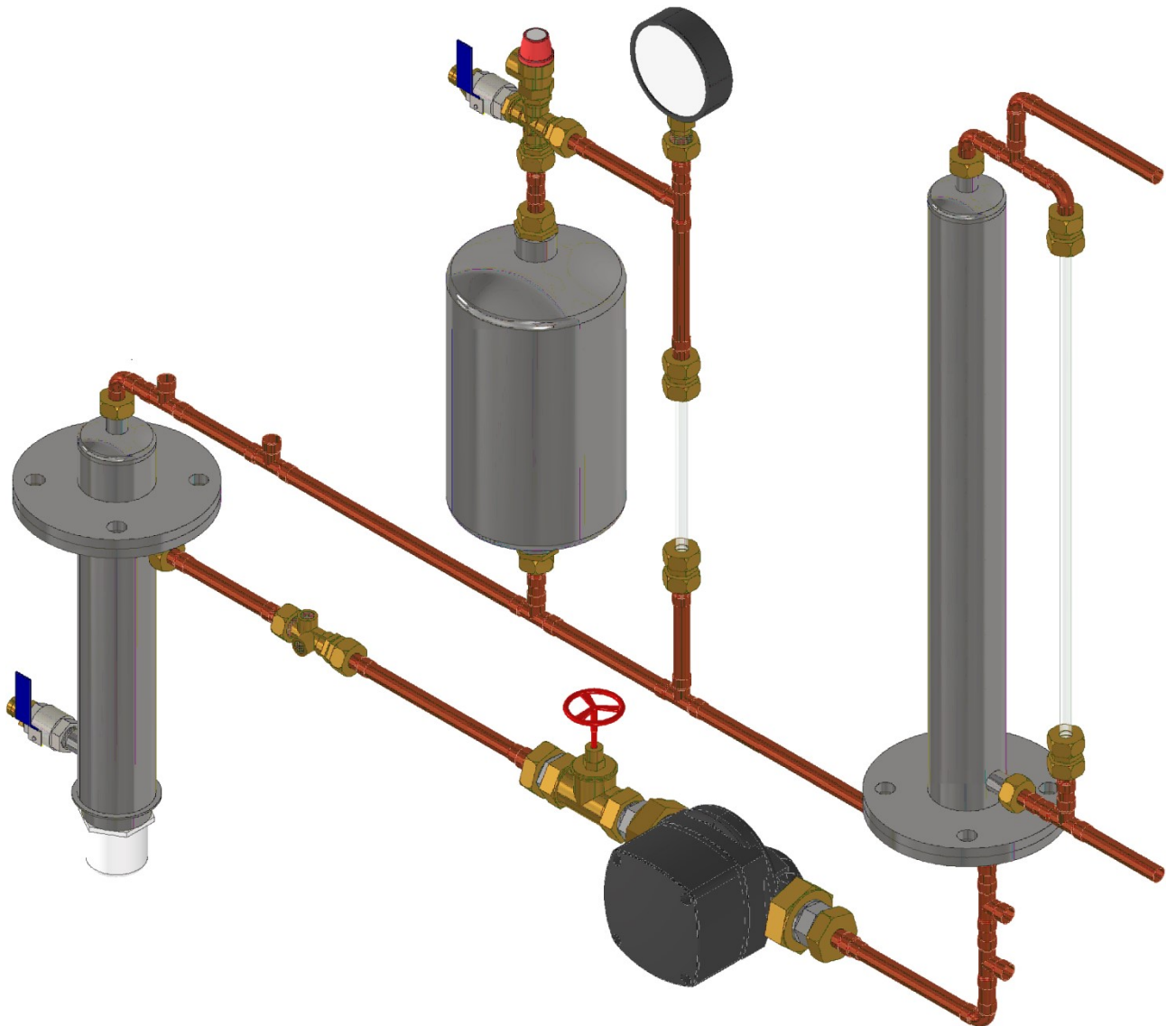
Obrázek 46: Teplotní profil

Příloha 2



Obrázek 47: Výkres sestavy parogenerátoru

Příloha 3



Obrázek 48: CAD model konstruované smyčky

Příloha 4

```
// Import knihoven
#include "max6675.h"
#include "U8glib.h"

// Měření teploty
int pin_DO = 38;
int pin_CS_R = 30;
int pin_CS_PG = 32;
int pin_CS_KO = 34;
int pin_CLK = 36;
MAX6675 thermoclanek_R(pin_CLK, pin_CS_R, pin_DO);
MAX6675 thermoclanek_PG(pin_CLK, pin_CS_PG, pin_DO);
MAX6675 thermoclanek_KO(pin_CLK, pin_CS_KO, pin_DO);
float teplota_R;
float teplota_PG;
float teplota_KO;
int teploty_ms = 50;

// Displej
#define EN 13
#define RW 12
#define RS 11
U8GLIB_ST7920_128X64_1X lcd(EN, RW, RS);
String rezim_R_displej = "R";
String rezim_KO_displej = "R";

// Spínací relé
int rele_R1 = 3;
int rele_R2 = 4;
int rele_R3 = 5;
int rele_KO = 6;
int rele_HCC = 7;

// Proudové senzory
const int analog_A_R1 = A1;
const int analog_A_R2 = A2;
const int analog_A_R3 = A3;
const int analog_A_KO = A4;
int vykon_R1;
int vykon_R2;
int vykon_R3;
int vykon_KO;
int vykon_R;
int proud_ms = 200;

// Měření tlaku
const int analog_P_R = A13;
const int analog_P_PG = A14;
const int analog_P_Q = A15;
float tlak_R;
float tlak_PG;
float tlak_Q;
float prtok_Q;
int tlak_ms = 10;

float teplota_sytysti;
float rezerva_do_varu;
float teplotni_spad_PG;

String prikaz;
bool auto_KO;
bool auto_R;
bool HOR;
int cilova_teplota;

void setup() {
  // Nastavení displeje
  // Nastavení bílé barvy pro výpis
  if (lcd.getMode() == U8G_MODE_R3G3B2) {
    lcd.setColorIndex(255);
  }
  // Nastavení maximální intenzity svitu
  else if (lcd.getMode() == U8G_MODE_GRAY2BIT) {
    lcd.setColorIndex(3);
  }
  // Nastavení viditelnosti pixelů
  else if (lcd.getMode() == U8G_MODE_BW) {
    lcd.setColorIndex(1);
  }
  // Nastavení pinů relé
  pinMode(rele_R1, OUTPUT);
  pinMode(rele_R2, OUTPUT);
  pinMode(rele_R3, OUTPUT);
  pinMode(rele_KO, OUTPUT);
  pinMode(rele_HCC, OUTPUT);

  digitalWrite(rele_R1, HIGH);

  digitalWrite(rele_R2, HIGH);
  digitalWrite(rele_R3, HIGH);
  digitalWrite(rele_KO, HIGH);
  digitalWrite(rele_HCC, HIGH);

  // Nastavení pinů proudů
  pinMode(analog_A_KO, INPUT);
  pinMode(analog_A_R1, INPUT);
  pinMode(analog_A_R2, INPUT);
  pinMode(analog_A_R3, INPUT);

  // Nastavení pinů tlaků
  pinMode(analog_P_R, INPUT);
  pinMode(analog_P_PG, INPUT);
  pinMode(analog_P_Q, INPUT);

  // Havarijní ochrana reaktoru a automatické regulace
  HOR = false;
  auto_KO = false;
  auto_R = false;

  // Nastavení rychlosti přenosu dat v bitech za sekundu
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Vykreslení displeje
  lcd.firstPage();
  do {
    // vykreslí žádaný obsah
    vykreslení_displeje();
  } while (lcd.nextPage());

  // Čtení teplot
  teplota_R = thermoclanek_R.readCelsius() - 0.5;
  teplota_PG = thermoclanek_PG.readCelsius() - 1.75;
  teplota_KO = thermoclanek_KO.readCelsius();

  // Výpočet výkonu KO
  vykon_KO = cist_senzor(analog_A_KO);
  vykon_KO = vypocet_vykonu_KO(vykon_KO);
  vykon_KO = oprava_signalu(vykon_KO, 50);

  // výpočet výkonu reaktoru
  vykon_R1 = cist_senzor(analog_A_R1) / 19.11 * 230.0;
  vykon_R2 = cist_senzor(analog_A_R2) / 18.37 * 230.0;
  vykon_R3 = cist_senzor(analog_A_R3) / 18.63 * 230.0;

  vykon_R1 = oprava_signalu(vykon_R1, 500);
  vykon_R2 = oprava_signalu(vykon_R2, 500);
  vykon_R3 = oprava_signalu(vykon_R3, 500);

  vykon_R = vykon_R1 + vykon_R2 + vykon_R3;

  // výpočet tlaku a průtoku
  tlak_R = cist_prevodnik(analog_P_R) / 1023.0 * 1000.0;
  tlak_PG = cist_prevodnik(analog_P_PG) / 1023.0 *
  1000.0;
  tlak_Q = cist_prevodnik(analog_P_Q) / 1023.0 * 7.5 -
  0.26; // 0.26 je hodnota, kterou to ukazuje při 0
  if (tlak_Q < 0) {
    tlak_Q = 0;
  }
  prtok_Q = vypocet_Q(tlak_Q);

  // Výpis parametrů
  vypis_dat();

  // Řízení
  cist_prikaz();

  // Zdržení v ms
  delay(1000);
}

void vykreslení_displeje(void) {
  // Nastavení písma
  lcd.setFont(u8g_font_6x10);
  // Nastavení pozice výpisu v pixelech, souřadnice jsou
  ve tvaru x, y, maximum je 128, 64

  // Výpis textu na zadanou souřadnici
  lcd.setPrintPos(0, 8);
  lcd.print("vykon:");
  lcd.setPrintPos(0, 20);
  lcd.print("R:");
  lcd.setPrintPos(18, 20);
```

```

lcd.print(String(vykon_R)+" W"+rezim_R displej);
lcd.setPrintPos(0, 32);
lcd.print("KO:");
lcd.setPrintPos(18, 32);
lcd.print(String(round(vykon_KO))+
W"+rezim_KO displej);

lcd.setPrintPos(65, 8);
lcd.print("Teplota:");
lcd.setPrintPos(65, 20);
lcd.print("R:");
lcd.setPrintPos(83, 20);
lcd.print(String(round(teplota_R))+ " C");

lcd.setPrintPos(65, 32);
lcd.print("PG:");
lcd.setPrintPos(83, 32);
lcd.print(String(round(teplota_PG))+ " C");

lcd.setPrintPos(65, 44);
lcd.print("KO:");
lcd.setPrintPos(83, 44);
lcd.print(String(round(teplota_KO))+ " C");

lcd.setPrintPos(0, 51);
lcd.print("Pretlak:");
lcd.setPrintPos(0, 63);
lcd.print(String(round(tlak_R))+ " kPa");

lcd.setPrintPos(65, 63);
lcd.print("Q: ");
lcd.setPrintPos(77, 63);
lcd.print(String(round(prutok_Q*100.0)/100.0)+" l/m");
}

// Funkce pro čtení proudových senzorů
float cist_senzor(int A) {
// Proměnné pro měření
float vysl = 0.0;
int n = 0;
int analog = 0;

unsigned long mezicas = millis();
// Opakování měření po dobu xxx ms
while((millis() - mezicas) < proud_ms) {
analog = analogRead(A);
if (analog > 512) {
vysl += analog;
n += 1;
}
}
vysl = vysl / n-512;
return vysl;
}

// Funkce pro výpočet výkonu KO
int vypocet_vykonu_KO(float A) {
int vysl = 0;
vysl = - 0.0019*pow(A,3) + 0.238*pow(A,2) - 0.763*A +
16.7;
return vysl;
}

// Funkce pro opravu signálu - spodní práh pro vypnutý
stav na nulu
float oprava_signalu(float hodnota, int hranice) {
int vysl = 0;
if (hodnota < hranice) {
vysl = 0;
}
else {
vysl = hodnota;
}
return vysl;
}

// Funkce pro čtení převodníků tlaku
float cist_prevodnik(int A) {
float vysl = 0.0;
int n = 0;
int analog = 0;

unsigned long mezicas = millis();
// Opakování měření po dobu xxx ms
while((millis() - mezicas) < tlak_ms) {
analog += abs(analogRead(A));
n += 1;
}
vysl = float(analog) / float(n);

return vysl;
}

// Funkce pro výpočet průtoku
float vypocet_Q(float dP) {
float vysl = 0;
vysl = 0.0551*pow(dP,3) - 0.796*pow(dP,2) + 4.62*dP +
0.247;
return vysl;
}

void vypis_dat(void) {
Serial.print(teplota_R);
Serial.print(";");
Serial.print(teplota_PG);
Serial.print(";");
Serial.print(teplota_KO);
Serial.print(";");
Serial.print(vykon_R);
Serial.print(";");
Serial.print(vykon_KO);
Serial.print(";");
Serial.print(tlak_R);
Serial.print(";");
Serial.print(tlak_PG);
Serial.print(";");
Serial.println(prutok_Q);
}

void cist_prikaz(void) {
if(Serial.available()) {
prikaz = Serial.readStringUntil('\n');
}

teplota_sytosti = t_sat(tlak_R/100);
rezerva_do_varu = teplota_sytosti - teplota_R;
teplotni_spad_PG = teplota_R - teplota_PG;

if (((prutok_Q < 2) and (vykon_R > 1000)) or
(rezerva_do_varu < 5.0) or (teplota_PG > 125) or
((teplota_R > 80) and (teplotni_spad_PG < 5))) {
SCRAM();
HOR = true;
}
else if (tlak_R > 425) {
SCRAM();
digitalWrite(rele_KO, HIGH);
HOR = true;
}
else if (HOR == false) {
volba_regulace();
}

if (prikaz == "hccrun") {
digitalWrite(rele_HCC, LOW);
}
if ((prikaz == "hccstop") and (HOR == false)) {
digitalWrite(rele_HCC, HIGH);
}
if (prikaz == "power0") {
SCRAM();
HOR = true;
}
}

void volba_regulace(void) {
if ((auto_R == true) and (prutok_Q > 2)) {
auto_regulace_RC();
}
if ((auto_KO == true) and (prutok_Q > 2)) {
auto_regulace_KO();
}
if ((auto_R == false) and (prutok_Q > 2)) {
rucni_regulace_RC();
}
if ((auto_KO == false) and (prutok_Q > 2)) {
rucni_regulace_KO();
}
proved_prikaz(prikaz);
}

void proved_prikaz(String prikaz) {
if (prikaz.substring(0,7) == "tgttemp") {
cilova_teploata = prikaz.substring(7,10).toInt();
}
if (prikaz == "autoron") {
auto_R = true;
rezim_R displej = "A";
}
}

```

```

}
if (prikaz == "autoroff") {
    auto_R = false;
    rezim_R_displej = "R";
}
if (prikaz == "autokoon") {
    auto_KO = true;
    rezim_KO_displej = "A";
}
if (prikaz == "autokooff") {
    auto_KO = false;
    rezim_KO_displej = "R";
}
}

void auto_regulace_R(void) {
    if (teplota_R < (cilova_teploata - 2)) {
        digitalwrite(rele_R1, LOW);
        digitalwrite(rele_R2, LOW);
        digitalwrite(rele_R3, LOW);
    }
    if ((teplota_R >= (cilova_teploata - 2)) and (teplota_R
< (cilova_teploata))) {
        digitalwrite(rele_R1, LOW);
        digitalwrite(rele_R2, LOW);
        digitalwrite(rele_R3, HIGH);
    }
    if ((teplota_R >= (cilova_teploata)) and (teplota_R <
(cilova_teploata + 2))) {
        digitalwrite(rele_R1, LOW);
        digitalwrite(rele_R2, HIGH);
        digitalwrite(rele_R3, HIGH);
    }
    if (teplota_R >= (cilova_teploata + 2)) {
        digitalwrite(rele_R1, HIGH);
        digitalwrite(rele_R2, HIGH);
        digitalwrite(rele_R3, HIGH);
    }
}

void auto_regulace_KO(void) {
    if (tlak_R > 400) {
        digitalwrite(rele_KO, HIGH);
    }
    else {
        digitalwrite(rele_KO, LOW);
    }
}

}

void rucni_regulace_R(void) {
    if (prikaz == "power1off") {
        digitalwrite(rele_R1, HIGH);
    }
    if (prikaz == "power2off") {
        digitalwrite(rele_R2, HIGH);
    }
    if (prikaz == "power3off") {
        digitalwrite(rele_R3, HIGH);
    }
    if ((prikaz == "power1on") and (prutok_Q > 2)) {
        digitalwrite(rele_R1, LOW);
    }
    if ((prikaz == "power2on") and (prutok_Q > 2)) {
        digitalwrite(rele_R2, LOW);
    }
    if ((prikaz == "power3on") and (prutok_Q > 2)) {
        digitalwrite(rele_R3, LOW);
    }
    if ((prikaz == "powermax") and (prutok_Q > 2)) {
        digitalwrite(rele_R1, LOW);
        digitalwrite(rele_R2, LOW);
        digitalwrite(rele_R3, LOW);
    }
}

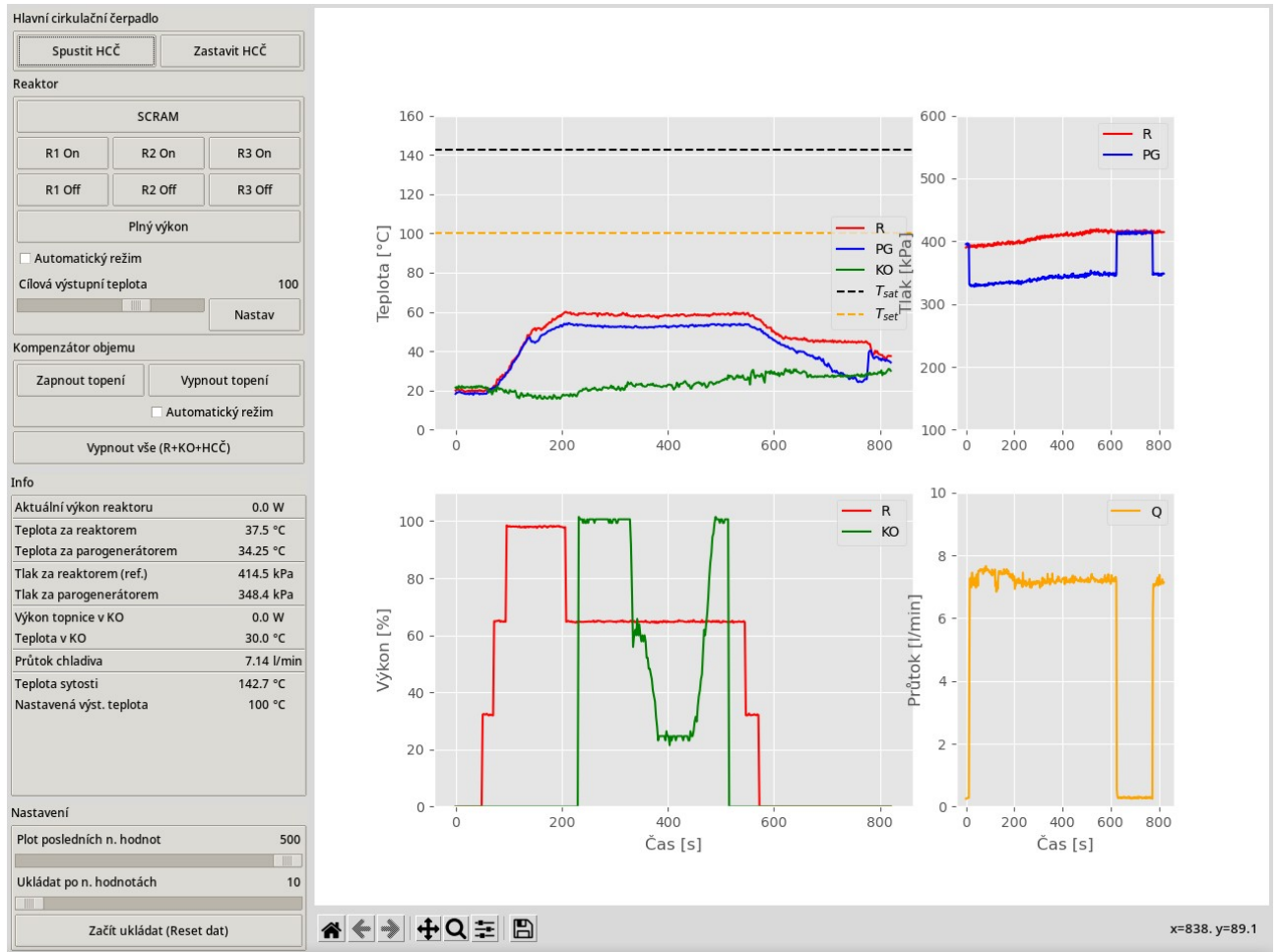
void rucni_regulace_KO(void) {
    if (prikaz == "powerkoon") {
        digitalwrite(rele_KO, LOW);
    }
    else if (prikaz == "powerkooff") {
        digitalwrite(rele_KO, HIGH);
    }
}

void SCRAM(void) {
    digitalwrite(rele_R1, HIGH);
    digitalwrite(rele_R2, HIGH);
    digitalwrite(rele_R3, HIGH);
}

float t_sat(float tlak_bar) {
    float vysl = 0;
    vysl = 100.0 * pow(tlak_bar, 0.25);
    return vysl;
}

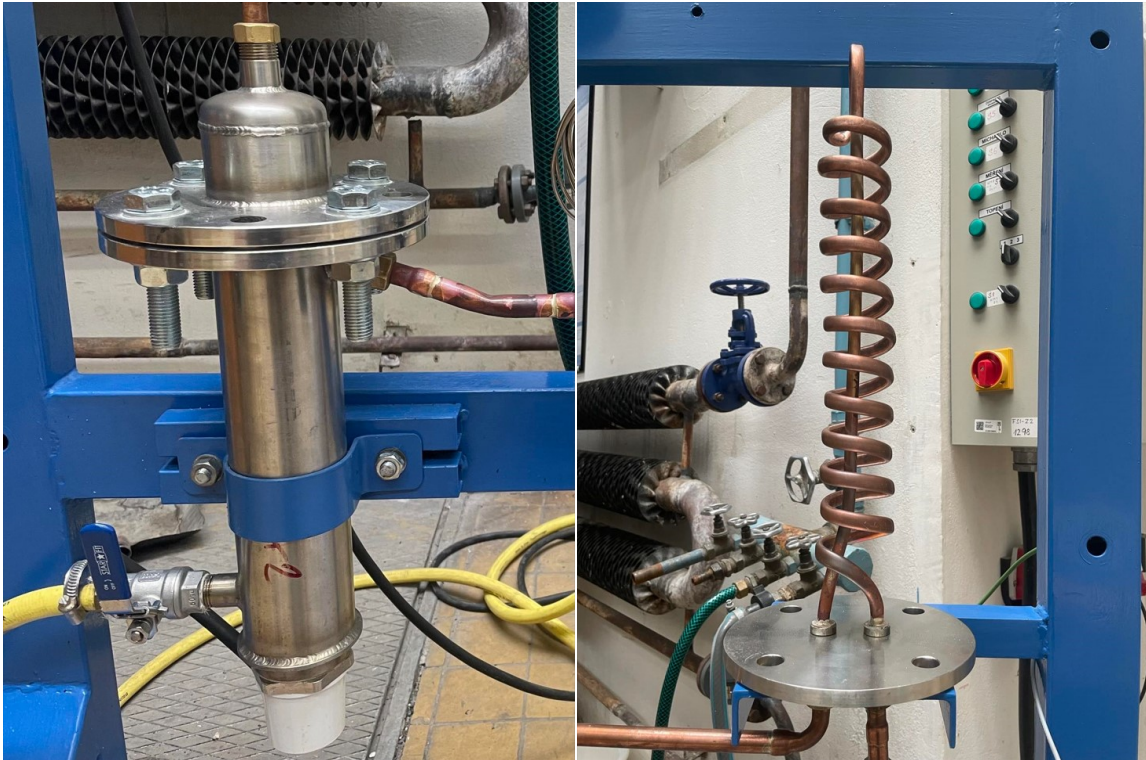
```

Příloha 5



Obrázek 49: Snímek řídicí obrazovky

Příloha 6



Obrázek 50: Snímky reaktoru a vnitřku parogenerátoru



Obrázek 51: Řídicí krabice s displejem



Obrázek 52: Smyčka bez izolace



Obrázek 53: Smyčka s izolací